

МІНІСТЕРСТВО ОБОРОНИ УКРАЇНИ

ВІЙСЬКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ ТА ІНФОРМАТИЗАЦІЇ
ІМЕНІ ГЕРОЇВ КРУТ

Кафедра телекомунікаційних систем та мереж

І.К. Нестеренко

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

**РАДІОМОНІТОРИНГ ВИКОРИСТАННЯ
РАДІОЧАСТОТНОГО СПЕКТРА**

Частина III

Київ - 2025

УДК 621.396

І.К. Нестеренко. Електромагнітна сумісність радіоелектронних засобів та радіочастотний менеджмент. Частина III. Радіомоніторинг використання радіочастотного спектра: Навчальний посібник. К.: ВІТІ, 2025. 175 с.

Навчальний посібник містить базовий теоретичний та довідковий матеріал для проведення занять з навчальних дисциплін “Електромагнітна сумісність (ЕМС) радіоелектронних засобів (РЕЗ) та випромінюючих пристроїв (ВП)”. Викладено загальні положення по радіомоніторингу радіочастотного спектра, його роль у менеджменту електромагнітного спектра, наведено принципи вимірювань параметрів випромінювань, дані стосовно вимірювальних засобів, принципи пеленгації та визначення місцезнаходження джерел радіовипромінювання, а також призначення та склад автоматизовані інформаційні системи (АІС) управління радіочастотним спектром і системи радіоконтролю.

Приділено увагу аспектам практичного застосування отриманих знань для вирішення проблем радіомоніторингу та радіотехнічного контролю.

До кожного розділу книги наведено контрольні питання та розрахункові завдання.

Навчальний посібник розроблено відповідно до робочих програм навчальної дисципліни (силабуса) та призначений для здобувачів ступеня магістра за спеціальністю *172 Електронні комунікації та радіотехніка*, буде також корисним для здобувачів інших спеціальностей при опануванні радіотехнологій та забезпечення спільної роботи радіообладнання.

АВТОР:

Нестеренко І. К. – доцент кафедри телекомунікаційних систем та мереж Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Сайко В. Г. – професор кафедри телекомунікаційних систем та мереж Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, доктор технічних наук, професор;

Гуржій П. М. – докторант науково-організаційного відділу Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, к.т.н.

Рекомендовано до друку Вченою радою Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут (протокол засідання № __ від __ 2025 року).

УДК 621.396
© ВІТІ ім. Героїв Крут, 2026

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначення.....	5
Вступ	7
1. Задачі і місце радіомоніторингу у сфері користування РЧС.....	8
1.1. Питання термінології у сфері радіомоніторингу.....	9
1.2. Узагальнена структура системи частотного менеджменту.....	10
1.3. Методи радіомоніторингу.....	14
1.4. Радіотехнічна розвідка як складова радіоелектронного забезпечення радіоелектронної боротьби.....	23
Контрольні питання та завдання.....	27
2. Вимірювання та контроль параметрів радіовипромінювань.....	27
2.1. Принципи вимірів параметрів сигналів. Подання сигналів у часовій та частотній областях.....	21
2.2. Вимірювання в амплітудній та фазовій областях (векторні).....	28
2.3. Вимірювальні засоби.....	34
2.4. Аналізатори спектру на основі SDR приймачів.....	45
Контрольні питання.....	48
3. Основні принципи та методи вимірювання параметрів і характеристик радіосигналів.....	48
3.1. Основні принципи та методи вимірювання частоти та її відхилення при ефірному РЧК.....	49
3.2. Методи вимірювань ширини смуги частот.....	53
3.3. Контроль позасмугових та побічних випромінювань.....	55
3.4. Вимірювання рівня сигналу.....	56
Контрольні питання та завдання	61
4. Пеленгування джерела радіовипромінювання.....	61
4.1. Методи пеленгації та основні типи радіопеленгаторів.....	63
4.2. Амплітудні радіопеленгатори	65
4.3. Фазові пеленгатори.....	75
4.4. Інтерферометричні і кореляційні радіопеленгатори.....	79
4.5. Методи надвисокої розрізняювальної здатності.....	82
4.6. Похибки пеленгування джерела радіовипромінювання.....	85
4.7. Вибір методу пеленгації та типу радіопеленгатора.....	88
Контрольні питання.....	94
5. Визначення місцезнаходження джерела радіовипромінювання.....	94
5.1. Принципи та методи визначення місцезнаходження джерела радіовипромінювання за допомогою радіопеленгації.....	94
5.2. Метод тріангуляції.....	97
5.3. Метод різниці часу приходу сигналів (TDOA).....	102
5.4. Визначення місцезнаходження ДРВ методом наведення з допомогою одного мобільного пеленгатора.....	104
5.5. Метод визначення місця розташування однією станцією (метод <i>SSL</i>)..	109
5.6. Порівняння методів позиціонування.....	110
Контрольні питання та завдання	113

6. Радіоконтроль спектра та джерел радіовипромінювання.....	113
6.1. Контроль відповідності параметрів випромінювань дозволених передавачів.....	113
6.2. Виявлення недозволених випромінювань (передавачів).....	115
6.3. Вимірювання зайнятості спектра.....	117
Контрольні питання.....	122
7. Автоматизовані інформаційні системи (AIC) управління радіочастотним спектром і системи радіоконтролю.....	123
7.1. Принципи побудови та склад AIC.....	123
7.2. Система радіочастотного моніторингу України.....	125
7.3. Стаціонарні та мобільні станції радіомоніторингу.....	128
Контрольні питання.....	135
Додатки.....	136
А. Швидке Перетворення Фур'є.....	136
Б. Аналогово-цифрове перетворення.....	141
В. Оцінювання зони покриття та показників якості обслуговування в радіомережах.....	143
Г. Додаток до протоколу вимірювання параметрів РЕЗ (приклад).....	153
Д. SDR приймачі та аналізатори спектра.....	155
Д.1. SDR приймач RTL-SDR.....	155
Д.2. SDR приймач HackRF One.....	157
Д.3. Аналізатор спектра TinySA Ultra+ ZS-407.....	159
Е. Застосування приладів для контролю радіосигналів для виконання бойових завдань.....	162
Е.1. Портативний пристрій радіотехнічної розвідки на базі аналізатора спектру “TINY SA ULTRA”.....	162
Е.2. Комплекс моніторингу спектра.....	163
Е.3. Індикатори (детектори) радіовипромінювань.....	165
Е.4. Детекція дронів по відеоканалу, перехоплення відеосигналів.....	169
Список літератури.....	173

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

АРЧС	– Аналізатор радіочастотного спектра
АСРМ	– Автоматизована система радіомоніторингу
АЧС	– Амплітудно-частотний спектр
АЧХ	– Амплітудно-частотна характеристика
АФП (С)	– Антено-фідерний пристрій (антена, АФС– система)
АЦП	– Аналого-цифровий перетворювач;
БПЛА	– Безпілотні летальні апарати
ВП	– Випромінювальний пристрій
г.п.п.	– Густина потоку потужності, Вт/м ²
ДПФ	– Дискретне перетворення Фур'є
ДС(А)	– Діаграма спрямованості (антени)
ЗО	– Зона обслуговування
ДРВ	– Джерело радіовипромінювання
ДРЗ	– Джерело радіозавад
ЗС	– Завадовий сигнал
ЕІВП	– Еквівалентна ізотропно–випромінювальна потужність
ЕМЗ	– Електромагнітна завада
ЕМО	– Електромагнітна обстановка (середовище)
ЕМС	– Електромагнітна сумісність (<i>Electro Magnetic Compatibility</i>)
ЕРС	– Електрорушійна сила
КАМ	– Квадратурна амплітудна модуляція
КАР	– Кільцева антенна решітка
КП	– Коефіцієнт підсилення антени
КтР	– Кутове рознесення
КХ	– Короткі хвилі
КФМн	– Квадратурна фазова маніпуляція
МСЕ (ITU)	– Міжнародний союз електрозв'язку (<i>International Telecommunication Union</i>)
МСЕ-Р (ITU-R)	– Сектор радіозв'язку Міжнародного союзу електрозв'язку
МСРМ	– Мобільна станція (комплекс) радіомоніторингу
НДР (НДП)	– Незаконно діюче радіообладнання (передавач)
НКЕК	– Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сфері електронних комунікацій, радіочастотного спектра та надання послуг поштового зв'язку
ППРЧ	– Псевдовипадкове переналаштування робочої частоти
ПРМ (прм)	– Радіоприймач або радіоприйом;
ПРД (прд)	– Радіопередавач або радіопередача;
ПРХ	– Поширення радіохвиль
ПТК	– Первинний технічний контроль
РЕЗ	– Радіоелектронний засіб
РЕР	– Радіоелектронна розвідка
РКП	– Радіоконтрольний пост (пост радіоконтролю)
РП	– Радіопеленгатор
РР	– Радіорозвідка
РТР	– Радіотехнічна розвідка
РО	– Радіообладнання
РЧ	– Радіочастота
СРК	– Служба радіоконтроля
СРМ	– Станція (комплекс) радіомоніторингу

СРЧМ	– Система радіочастотного моніторингу
РЧ	– Радіочастота
РЧМ	– Радіочастотний моніторинг
СЧП	– Система частотного планування
РЧС (РЧР)	– Радіочастотний спектр (радіочастотний ресурс)
СЗО	– Сигнально-завадова обстановка
УДЦР (ДП УДЦР)	– Державне підприємство "Український державний центр радіочастот"
УКХ	– Ультракороткі хвилі
ШПФ (ШПС)	– Швидке перетворення Фур'є (Швидке перетворення сигналу)
ЧД	– Частотний детектор
ФМн	– Фазова маніпуляція
<i>BER</i>	– <i>Bit Error Rate</i> , (коефіцієнт битових помилок)
<i>BS</i>	– <i>Base Station</i> (базова станція)
<i>COB</i>	– <i>Communication Order of Battle</i> (бойовий порядок зв'язку)
<i>ECCM</i>	– <i>Electronic Counter Countermeasures</i> (радіоелектронний захист)
<i>ECM</i> активне)	– <i>Electronic Counter Measures</i> (радіоелектронне придушення,
<i>EMC</i>	– <i>Electro Magnetic Compatibility</i> (електромагнітна сумісність)
<i>EMI</i>	– <i>Electromagnetic interference</i> (електромагнітна завада)
<i>EOB</i>	– <i>Electronic Order of Battle</i> (бойовий порядок радіозасобів)
<i>ESM</i> пасивне)	– <i>Electronic Support Measures</i> (радіоелектронне забезпечення,
<i>FFT</i>	– <i>Fast Fourier Transform</i> (швидке перетворення Фур'є)
<i>IFM</i>	– <i>Instantaneous Frequency Measurement</i> (метод вимірювання миттєвої частоти)
<i>LQI</i>	– <i>Link Quality Indicator</i> (індикатор якості зв'язку)
<i>ROB</i>	– <i>Radar Order of Battle</i> (бойовий порядок радіолокації)
<i>RSSI</i>	– <i>Received Signal Strength Indicator</i> (індикатор потужності отриманого сигналу)
<i>SIGINT</i>	– <i>SIGnal INTelligence</i> (радіоелектронна розвідка)
<i>SINR</i>	– <i>Signal Interference + Noise Ratio</i> (відношення сигнал/завада+шум)
<i>SNR</i>	– <i>Signal Noise Ratio</i> (відношення сигнал/шум)
<i>SDR</i>	– <i>Software-defined radio</i> (програмно визначене радіо)
<i>SSL</i>	– <i>Single station location system</i> (метод визначення місця розташування ДРВ однією станцією у діапазоні КХ)
<i>QOS</i>	– <i>Quality Operating Service</i> (показників якості обслуговування)
<i>QoS</i>	– <i>Quality of Service</i> (показник якості послуг)

ВСТУП

Через зростання потреб у використанні радіочастотного спектра необхідно вдосконалювати методи контролю за його використанням з урахуванням технічних досягнень у галузі радіозв'язку.

Радіочастотний спектр – це обмежений природний ресурс, і тому важливо, щоб усі служби радіозв'язку використовували його найбільш ефективним і раціональним чином і щоб у результаті різні мережі радіозв'язку могли функціонувати у вільному від завад середовищі.

Техніка радіозв'язку розвивається стрімко. З появою нових технологій та в умовах феноменального зростання служб радіозв'язку попит на радіочастотний спектр зростає астрономічними темпами. Продуктивне та раціональне управління використанням спектра є головним фактором забезпечення одночасної роботи різних мереж радіозв'язку без створення взаємних радіозавад.

Одним із найважливіших засобів управління використанням спектра є контроль. Контроль за використанням спектра удосконалюються з метою забезпечення суворого дотримання технічних параметрів та норм систем радіозв'язку, а також для сприяння ефективному використанню радіочастотного спектру та геостаціонарної супутникової орбіти.

Методи контролю за використанням спектру відрізняються від методів, що застосовуються в мережах радіозв'язку, тим, що роботи з контролю виконуються у неоптимальних умовах та у невідомій електромагнітній обстановці.

Цей навчальний посібник охоплює основні особливості методик та практики контролю за використанням спектру, включаючи створення системи контролю.

Навчальний посібник містить базовий теоретичний та довідковий матеріал з радіоконтролю. Викладено загальні положення по радіомоніторингу радіочастотного спектра, його роль у менеджменту електромагнітного спектра, наведено принципи вимірювань параметрів випромінювань, дані стосовно вимірювальних засобів, принципи пеленгації та визначення місцезнаходження джерел радіовипромінювання, а також призначення та склад автоматизовані інформаційні системи (AIC) управління радіочастотним спектром і системи радіоконтролю.

Приділено увагу аспектам практичного застосування отриманих знань для вирішення проблем радіомоніторингу та радіотехнічного контролю, а також при виконанні бойових завдань.

Метою даного навчального посібника є викладення необхідного мінімуму знань у галузі радіомоніторингу та радіотехнічного контролю.

1. Задачі і місце радіомоніторингу у сфері користування РЧС

Термін “моніторинг” використовується для характеристики більшості процедур спостереження та контролю процесів не лише в різних галузях промисловості, а й у багатьох інших сферах людської діяльності.

Спостереження за користуванням радіочастотним спектром, зокрема проведенням його моніторингу, є одним зі способів підтримання цілісності процесів використання радіочастотного ресурсу (РЧР). Радіочастотний моніторинг є важливим інструментом отримання об’єктивної інформації про електромагнітну обстановку (ЕМО) і реальний стан використання радіочастотного спектра (РЧС) держави.

Радіочастотний моніторинг (РЧМ) – це комплекс організаційно-технічних заходів, що забезпечують систематичний контроль, у тому числі збирання, оброблення, збереження та аналіз даних параметрів випромінювання радіообладнання, випромінювальних пристроїв, радіоелектронних засобів та випромінювальних пристроїв спеціального призначення [1].

У спеціальних користувачів замість терміну «радіомоніторинг» використовується термін «радіотехнічний контроль». Термін “радіоконтроль” означає контроль правильності ведення радіообміну.

Радіочастотний моніторинг здійснюється з метою (стаття 44 [1]):

- 1) забезпечення електромагнітної сумісності;
- 2) визначення стану користування радіочастотним спектром на регіональному, національному та міжнародному рівнях;
- 3) визначення наявного для впровадження новітніх технологій радіочастотного спектра;
- 4) розроблення пропозицій для прийняття відповідних рішень щодо підвищення ефективності користування радіочастотним спектром та визначення дотримання Україною та сусідніми державами міжнародних зобов’язань і положень Регламенту радіозв’язку Міжнародного союзу електрозв’язку у сфері радіочастотного спектра.

Радіочастотний моніторинг здійснюється державним підприємством, що перебуває у сфері управління регуляторного органу, у смугах радіочастот загального користування, якими користуються загальні користувачі радіочастотного спектра, Генеральним штабом Збройних сил України – у смугах радіочастот спеціального і загального користування, якими користуються спеціальні користувачі радіочастотного спектра.

За погодженням з Генеральним штабом Збройних сил України радіочастотний моніторинг у смугах радіочастот спеціального користування може здійснювати державне підприємство, що перебуває у сфері управління регуляторного органу.

У разі виявлення незаконно діючого радіообладнання чи випромінювального пристрою регуляторний орган забезпечує вжиття заходів щодо припинення його роботи. У разі неможливості застосування заходів державного нагляду до суб'єкта, який експлуатує незаконно діюче радіообладнання чи випромінювальний пристрій, регуляторний орган звертається до органів Національної поліції України для проведення спільних заходів з метою встановлення особи порушника та інших фактичних даних, необхідних для оформлення матеріалів про адміністративне правопорушення відповідно до “Кодексу України про адміністративні правопорушення”.

1.1. Питання термінології у сфері радіомоніторингу

Термін *«технічний радіоконтроль»* визначено в “Положенні про радіочастотний моніторинг у смугах радіочастот загального користування” як *складову радіочастотного моніторингу, призначену для інструментальної оцінки параметрів випромінювання РЕЗ (ВП) у смугах радіочастот загального користування.*

В іноземній науково-технічній літературі, викладеній англійською мовою, застосовують два терміни: *Radiomonitoring* і *Spectrum Monitoring*.

Ще один термін, який стосується зазначеної термінології, – це “первинний технічний контроль” (ПТК). Зміст цього терміна в Порядку проведення приймальних випробувань радіоелектронних засобів та випромінювальних пристроїв на місці експлуатації визначено так: “Приймальні випробування РЕЗ (ВП) на місці експлуатації (***первинний технічний контроль***) – комплекс робіт, що складається з ***перевірки на місці експлуатації РЕЗ (ВП) відповідності їх характеристик*** висновкам щодо ЕМС РЕЗ (ВП), вимірювання параметрів РЕЗ (ВП), інструментальної оцінки параметрів випромінювання РЕЗ (ВП) з метою визначення їх відповідності висновкам щодо ЕМС РЕЗ (ВП), стандартам, нормам випромінювання, даним, зазначеним у сертифікаті відповідності, та прийняття рішення про видачу або відмову у видачі дозволу на експлуатацію РЕЗ (ВП)”.

Далі найпоширеніші у сфері радіомоніторингу терміни використовуватимемо в таких визначеннях.

Система радіочастотного моніторингу (СРЧМ) – це сукупність взаємозв'язаних технічних та програмних засобів, призначених для виконання завдань радіомоніторингу, таких як збирання, оброблення, аналіз і збереження даних про параметри й характеристики радіосигналів і джерел радіовипромінювання.

Система технічного радіоконтролю – сукупність взаємозв'язаних технічних засобів і засобів автоматизації, що діють під управлінням персоналу відповідних підрозділів.

Радіотехнологія – сукупність способів формування, передавання, приймання (оброблення) радіосигналів, що становлять єдиний технологічний процес передавання та приймання сигналів, застосування яких передбачає використання радіочастотного ресурсу.

Станція (комплекс) радіомоніторингу (СРМ) – функціонально завершений комплект обладнання та відповідне програмне забезпечення, які дають змогу виконувати певний обсяг завдань радіомоніторингу (виявлення та вимірювання параметрів радіовипромінювання, ідентифікацію, пеленгування джерел радіовипромінювання, визначення їх місцезнаходження тощо).

Стаціонарна станція радіомоніторингу – станція радіомоніторингу, постійно розташована у фіксованому пункті з певними географічними координатами.

Мобільна станція (комплекс) радіомоніторингу (МСРМ) – розташована на транспортному засобі станція (комплекс) радіомоніторингу, яка забезпечує виконання завдань радіомоніторингу під час руху і/або на зупинці цього транспортного засобу.

Радіоелектронний засіб (РЕЗ) – технічний засіб, призначений для передавання і/або приймання радіосигналів радіослужбами.

Випромінювальний пристрій – технічний пристрій, що використовується для виробничих, наукових, медичних, побутових потреб (за винятком потреб радіозв'язку), який випромінює електромагнітну енергію в навколишній простір і не є радіоелектронним засобом.

Радіоконтрольний пост (пост радіоконтролю, РКП) – окремий стаціонарно розташований підрозділ, оснащений спеціалізованим обладнанням (станцій радіомоніторингу/радіоконтролю) для виконання завдань радіомоніторингу/радіоконтролю.

1.2. Узагальнена структура системи частотного менеджменту

Основними складовими системи частотного менеджменту є (рис.6.1):

- 1) система планування і розподілу РЧС;
- 2) система радіомоніторингу;
- 3) система радіоінспекції.

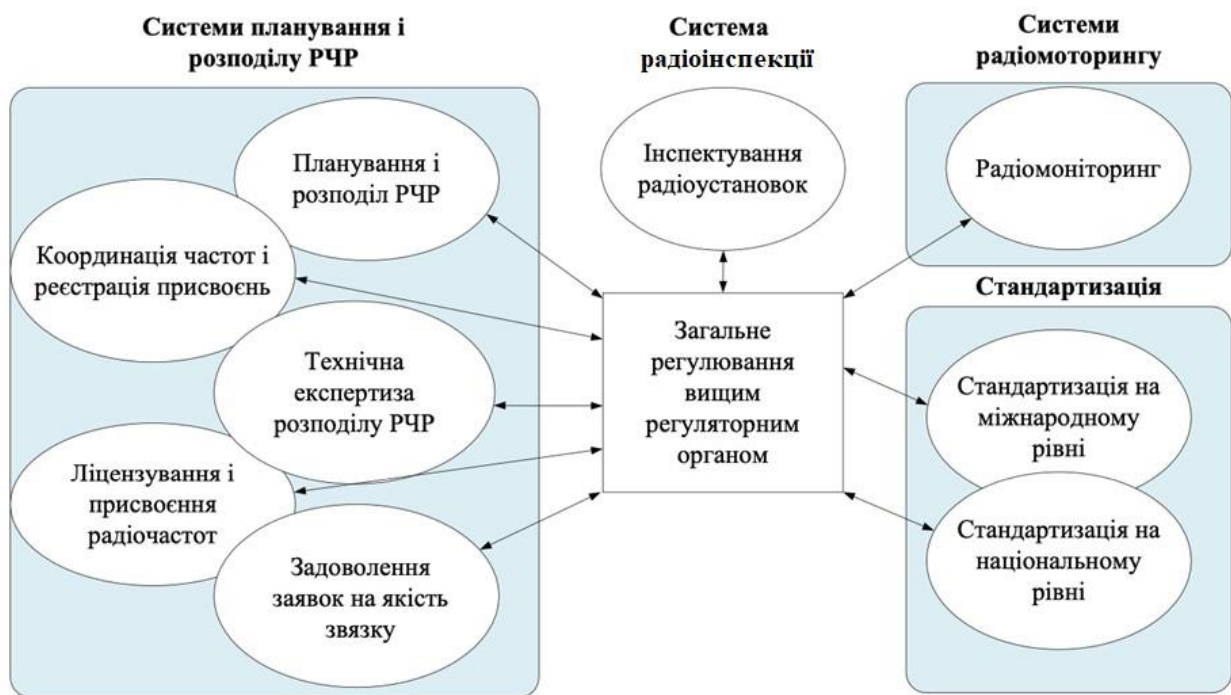


Рисунок 1.1. Основні задачі національної системи частотного менеджменту

Структура і взаємодія складових системи частотного менеджменту наведені на рисунку 1.2.

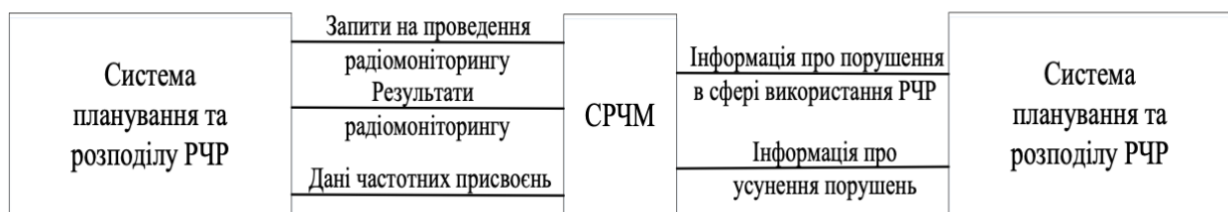


Рисунок 1.2. Взаємодія складових системи частотного менеджменту

Структура взаємодії елементів системи частотного менеджменту зводиться до наступного:

система планування і розподілу РЧР:

- 1) встановлює (визначає) офіційний список присвоєних радіочастот для контролю випромінювань;
- 2) визначає завдання для СРЧМ з проведення моніторингу смуг частот і радіоконтролю;

система радіомоніторингу виконує наступні основні завдання:

- 1) приймає і відпрацьовує заявки на виконання конкретних завдань по проведенню моніторингу спектра в заданих смугах частот і на заданих територіях, виявленню джерел радіозавад;

2) здійснює радіоконтроль (виявлення і вимірювання технічних параметрів радіовипромінювань, ідентифікацію передавачів, перевірку легітимності роботи РЕЗ (ВП));

3) забезпечує службу радіоінспектування, систему планування і розподілу РЧС необхідною інформацією про виявлені порушення в сфері користування РЧС для прийняття управлінських рішень тощо.

Відповідно до положень Регламенту радіозв'язку **служба радіоконтролю (СРК) виконує такі завдання:**

1) контроль виконання вимог дозвільних і нормативних документів на користування РЧС або експлуатацію РЕЗ (ВП);

2) здійснення заходів щодо оцінювання ступеня використання РЧС (моніторинг спектру);

3) вивчення випадків появи та впливу радіозавад;

4) розпізнавання та усунення несанкціонованих радіовипромінювань.

Основною метою проведення регулярного радіоконтролю випромінювань на національному рівні є запобігання появі радіозавад. Механізм реалізації цього завдання базується на регулярному контролі технічних параметрів радіовипромінювань і, для певних радіослужб, змісту радіопередач.

Окрім того, на службу радіомоніторингу можуть покладатися виконання і інших завдань, які безпосередньо не визначені в Регламенті радіозв'язку (рис. 1.3).

СРК може бути залучена для забезпечення особливих заходів і окремих завдань:

- надання допомоги в особливих випадках, таких як проведення великих спортивних заходів і обслуговування державних візитів;

- вимірювання зон радіопокриття;

- вимірювання параметрів якості послуг систем рухомого зв'язку;

- технічні та наукові дослідження з питань ЕМС.

Основними об'єктами радіоконтролю служби радіоконтролю є:

- *радіочастотний спектр* у заданій смузі частот, його зайнятість і завантаженість, що підлягають контролю і аналізу через виміряні параметри використання спектру радіозасобами та іншими джерелами радіовипромінювань;

- *діючі РЕЗ або угруповання РЕЗ та інші джерела радіовипромінювань*, що підлягають контролю через відповідність виміряних параметрів випромінювань окремих радіозасобів або

угруповання радіозасобів та інших джерел радіовипромінювань встановленим нормам цих параметрів;

– *радіозавади*, що підлягають контролю через вимірювання параметрів завад.



Рисунок 1.3. Завдання служби радіомоніторингу

Зазвичай *службі радіоінспекцій* (а не службі контролю) *доручаються завдання*:

– інспектування радіообладнання на місцях;
– вимірювання радіообладнання для виключення небезпеки електромагнітного випромінювання для здоров'я;
– обробка випадків електромагнітної сумісності (ЕМС) з обладнанням, не що належать до радіозв'язку;

– діяльність зі спостереження за ринком, коли на ринок надходить радіообладнання або інше електронне обладнання.

1.3. Методи радіомоніторингу

До методів радіомоніторингу відносять:

- 1) пошук і виявлення радіовипромінювання в заданому діапазоні (смузі частот або на заданій частоті);
- 2) спостереження за радіовипромінюваннями в певному діапазоні частот (або на заданій частоті);
- 3) селекцію радіовипромінювань;
- 4) інструментальне оцінювання (вимірювання) параметрів радіовипромінювання;
- 5) радіопеленгування джерел радіовипромінювання (ДРВ);
- 6) визначення місцезнаходження (географічних координат) ДРВ;
- 7) ідентифікацію радіовипромінювання і ДРВ;
- 8) оцінювання зон обслуговування (покриття), показників якості обслуговування (*QOS – Quality Operating Service*) і якості послуг (*QoS – Quality of Service*).

1.3.1. Пошук і виявлення радіовипромінювання

Для пошуку та виявлення радіовипромінювання проводять короткочасне вибіркове (іноді – періодичне) спостереження у визначених смугах радіочастот або на визначених частотах скануванням цих частот (смуг частот) з метою ухвалення рішення щодо наявності або відсутності сигналу у вибірці (іноді цей метод називається пошуковим радіоконтролем) і виявлення радіовипромінювань, присутніх у цих смугах частот (на цих частотах). Для цього застосовують стаціонарні та мобільні комплекси радіомоніторингу, портативні засоби радіоконтролю використовуються лише тоді, коли радіоконтроль здійснюється у смугах частот понад 3 ГГц (або 6 ГГц, залежно від робочої смуги частот радіоконтрольного засобу) або в місцях, де пошук радіовипромінювань іншими засобами (стаціонарними і мобільними СРМ) неможливий (наприклад, в умовах щільної міської забудови, у гірській і важкодоступній для автомобільного транспорту місцевості).

Ухвалення рішення про виявлення або відсутність радіосигналу (радіовипромінювання) здійснюється за енергетичним критерієм, тобто за критерієм *перевищення/не перевищення* заданого порогу виміряного рівня сигналу. Рішення про наявність/відсутність сигналу (випромінювання)

може ухвалюватися як автоматично, так і оператором (візуально або “на слух”).

Потенційні можливості з виявлення радіовипромінювань визначаються

кількома чинниками, зокрема:

- технічними можливостями засобу радіомоніторингу, передусім чутливістю радіоприймального пристрою (ПРМ) або аналізатора спектру і характеристиками спрямованості антени;

- особливостями параметрів радіовипромінювання РЕЗ певної радіотехнології, зокрема спектральною густиною потужності та еквівалентною ізотропно випромінюваною потужністю (ЕІВП) передавача, шириною смуги частот, типом модуляції тощо.

У разі використання автоматизованих стаціонарних комплексів (станцій) радіомоніторингу відповідне рішення ухвалюється автоматично за певними критеріями, які можуть бути визначені заздалегідь або задані оператором для конкретного випадку контролю. Проте в деяких випадках (зокрема, у разі проведення пошуку та виявлення випромінювань малопотужних або широкосмугових передавачів) оператор взагалі може не отримати ніякої інформації стосовно наявності радіовипромінювання та значень параметрів радіосигналів.

У реальних умовах істотний вплив на ухвалення рішення про наявність/відсутність радіосигналу (радіовипромінювання) мають і такі чинники, як електромагнітна обстановка в місці проведення робіт (відношення сигнал/шум або сигнал/радіозавада, наявність сторонніх випромінювань та радіозавад як у смузі частот, що аналізується, так і позасмугових випромінювань) і рівень кваліфікації оператора (правильність вибору місця та часу проведення робіт у разі використання мобільних або портативних засобів, вибору антени, задання режимів і параметрів роботи засобу тощо).

Потрібно також ураховувати, що ймовірність виявлення сигналу безпосередньо пов'язана з тривалістю аналізу та швидкістю сканування.

Складність розв'язання завдання з виявлення радіовипромінювання істотно різна для сигналів різних класів радіовипромінювання. Наприклад, виявлення широкосмугових сигналів за умови апіорної невизначеності щодо несучої частоти, ширини спектра сигналу, виду та параметрів модуляції, закону розподілу відгуків сигналу тощо являє собою досить складну проблему, яку не завжди можна розв'язати навіть автоматизованими способами. Оброблення вузькосмугових сигналів, які

характеризуються великим відношенням сигнал/шум, може успішно здійснюватися із застосуванням досить простої моделі спостережуваних процесів і вимагає мінімального обсягу апіорних даних.

Точне вимірювання рівня напруженості електромагнітного поля випромінювання потребує максимального наближення (узгодження) характеристик ПРМ (його амплітудно- та фазочастотної характеристик) до спектра сигналу, що аналізується. Окрім того, у разі обчислення (розрахунку) рівня напруженості електромагнітного поля через значення рівня сигналу на виході ПРМ параметри антено-фідерного тракту мають бути калібровані.

Поріг виявлення рівня радіосигналу може бути визначений (розрахований) теоретично як припустимий рівень поля радіозавади (шуму). Як такий рівень може використовуватися значення чутливості типового ПРМ у частотному піддіапазоні (смузі частот), що підлягає моніторингу, або рівень індустриальних завод (шуму), виміряний практично за відсутності реальних сигналів. Типові значення рівнів порогів для деяких найпоширеніших частотних піддіапазонів для рухомої радіослужби наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Типові значення рівнів порогів напруженості поля та потужності сигналу для найпоширеніших частотних піддіапазонів рухомої служби

Піддіапазон частот, МГц	Пороговий рівень, дБмкВ/м	Пороговий рівень, дБм
33...47	0	мінус 109,2
47...58	6	мінус 105,2
150...168,5	12	мінус 109,3
410...470	20	мінус 110,1
824...960	26	мінус 110,2
1710...1785; 1805...1880 (тільки для радіотехнології GSM1800)	35	мінус 107,2
1900...1980, 2020...2025, 2110...2170 (тільки для радіотехнології IMT-2000/UMTS)	21	мінус 122,0

Для перерахунку порогового рівня сигналу із значення напруженості електромагнітного поля E (дБмкВ/м) у значення потужності P (дБм) сигналу на вході ПРМ застосовуються відомі формули:

$$E_{[\text{дБмкВ/м}]} = P_{[\text{дБм}]} + C \quad (1.1)$$

де

$$C = 20 \lg f_{[\text{МГц}]} + 77,2 \text{ дБ} - G_i + L_{z' \text{ едн}} \quad (1.2)$$

де E – напруженість електромагнітного поля, дБмкВ/м;

P – виміряне значення потужності, дБм;

C – коефіцієнт перетворення (перерахунку);

f – частота (у розрахунках береться як середня частота піддіапазону), МГц; $L_{z' \text{ едн}}$ – значення втрат у з'єднаннях, дБ;

G_i – коефіцієнт підсилення антени відносно ізотропної антени, дБі.

Зазвичай під час оцінювання параметрів покриття визначається рівень напруженості поля для абонентських радіостанцій. Здебільшого для стандартних радіостанцій можна використовувати наступну умову:

$$- G_i (\partial B) + L_{z' \text{ едн}} (\partial B) = 0. \quad (1.3)$$

1.3.2. Спостереження за радіовипромінюванням

Спостереження за радіовипромінюванням являє собою процес тривалого та цілеспрямованого сприйняття інформації стосовно наявності радіовипромінювання в певному діапазоні (смузі) частот (на заданій частоті) та інструментального оцінювання значень відповідних параметрів. Спостереження реалізується за допомогою автоматизованих стаціонарних комплексів радіомоніторингу та, як виняток, мобільних комплексів із метою визначення динамічних характеристик існування радіовипромінювання, зокрема для оцінювання зайнятості діапазонів і смуг радіочастот, радіочастотних каналів (окремих частот) та інтенсивності роботи РЕЗ (ВП).

Сканування певної смуги частот здійснюється за допомогою аналізатора спектра з використанням смугових фільтрів. Результатом проведення сканування є *оцінка зайнятості певної смуги частот протягом заданого інтервалу часу* (зазвичай цей інтервал становить 24 год). На підставі подальшого аналізу отриманих даних можна визначити інтервали часу, протягом яких кожний канал був зайнятий, ступінь зайнятості всієї смуги частот (тобто статичні характеристики зайнятості), а також динамічні характеристики його зайнятості (час найбільшого завантаження, розподіл навантаження на канал протягом доби тощо).

Під час вимірювання *зайнятості певного (конкретного) частотного каналу* використовується критерій мінімально припустимого

рівня корисного сигналу. Згідно з цим критерієм рівень напруженості поля корисного сигналу в зоні обслуговування має бути не нижчим за

$$P_{\text{пр.мін}} + A, \quad (1.4)$$

де $P_{\text{пр.мін}}$ – чутливість приймача, дБ; A – захисне відношення, дБ, яке визначається за вимогами стандартів на типові обладнання для окремих частотних піддіапазонів або розраховане за відомою методикою.

Час, потрібний для оцінювання смуги частот, визначається комбінацією таких даних, як:

- час сканування каналу;
- типова тривалість передавання;
- потрібна точність оцінювання зайнятості.

Час сканування каналу у смузі частот залежить від швидкості сканування та кількості каналів. Типова тривалість передавання, як правило, становить кілька секунд. Потрібна точність визначається розрізнявальною здатністю вимірювання.

Спеціальні вимоги до вимірювального обладнання з автоматичним визначенням параметрів зайнятості спектра вузькосмуговими сигналами наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Вимоги до параметрів вимірювального обладнання

Загальна смуга частот	Щонайменше від 9 кГц до 10 ГГц
Смуга частот сканування	Змінна, зазвичай від 20 кГц до 5000 кГц — для аналогового обладнання та від 20 кГц до 100 МГц — для цифрового обладнання
Кількість сканувань за хвилину	Змінна, від 6 до 6000 (можливість ручного припинення на потрібній частоті)
Максимальна швидкість сканування	Змінна, залежно від потрібного розрізнення за частотою та класом випромінювання
Чутливість	Не нижча за 1мкВ/м, згідно з піддіапазоном частот (у смузі до 2,7 ГГц)
Ширина смуги розрізнення	Змінна, від 10 Гц до 10 кГц, згідно з піддіапазоном частот (у смузі до 2,7 ГГц)

1.3.3. Селекція радіовипромінювань

Під *селекцією випромінювань* розуміють поділ їх на групи за одним або кількома формальними ознаками (критеріями). Мета проведення селекції є виявлення радіовипромінювань, які належать до певної групи (категорії). Вибір критерію залежить від змісту поставлених завдань. Критеріями можуть бути:

- діапазон або смуга частот аналізу;
- значення робочої частоти;
- вид спектру та ширина смуги частот випромінювання;
- вид модуляції;
- рівень сигналу тощо.

Окрім того, можуть використовуватися такі критерії, як напрям надходження сигналу, часові характеристики роботи передавача і навіть наявність/відсутність відомостей про РЕЗ, якому належить дане випромінювання, у базі даних (БД) обліку РЕЗ (група “невідомі випромінювання”).

Цей метод здійснюється шляхом наступного:

- 1) виявлення випромінювань у заданій смузі частот (на певній частоті);
- 2) попереднє оцінювання параметрів радіовипромінювання;
- 3) проведення аналізу щодо відповідності параметрів і характеристик радіовипромінювання заданим критеріям;
- 4) ухвалення рішення щодо належності конкретного радіовипромінювання до певної категорії (групи).

Селекція радіовипромінювань є допоміжною попередньою процедурою для проведення ідентифікації, пеленгування та інструментального оцінювання параметрів радіовипромінювань (радіосигналів). Просторова селекція поряд із ідентифікацією радіовипромінювань проводиться, аби встановити, який саме РЕЗ є джерелом аналізованого радіовипромінювання.

1.3.4. Вимірювання параметрів радіовипромінювання

Під *вимірюванням (інструментальним оцінюванням) параметрів радіовипромінювання* розуміють відображення фізичних величин їхніми значеннями за допомогою експерименту та обчислень із застосуванням спеціальних технічних засобів. Проте єдиного алгоритму для виконання вимірювання всіх параметрів радіовипромінювання не існує.

У разі застосування функціонально завершених автоматизованих стаціонарних (мобільних) комплексів радіомоніторингу, які обладнані ***спрямованими антенними системами***, вимірювання (інструментальне оцінювання) параметрів радіовипромінювання здійснюється автоматично у процесі виконання поставлених завдань радіомоніторингу. Сам процес вимірювання (інструментального оцінювання) полягає в реалізації таких процедур:

1) проведення панорамного спектрального аналізу у смузі частот, в якій планується вимірювання (інструментальне оцінювання) параметрів певного радіовипромінювання;

2) виявлення необхідного радіовипромінювання та орієнтовне визначення напрямку на його джерело із застосуванням неспрямованих або слабо спрямованих антен;

3) уточнення напрямку на ДРВ застосуванням гостроспрямованих антен (за наявності такої можливості);

4) попереднє оцінювання ширини смуги частот, яку займає радіовипромінювання, та рівня сигналу;

5) аналіз заданої смуги частот і суміжних із нею смуг на предмет відсутності (наявності) сторонніх радіовипромінювань та, за їх наявності, орієнтовне оцінювання ступеня можливого впливу цих випромінювань на вірогідність вимірів;

6) постановка завдання щодо вимірювання (інструментального оцінювання) параметрів радіосигналу (рівня, частоти, стабільності частоти, зсуву частоти, девіації частоти, ширини смуги частот сигналу, швидкості передачі даних тощо), обчислення параметрів радіовипромінювання (напруженості електромагнітного поля, густини потоку потужності тощо) і визначення характеристик радіовипромінювання (виду модуляції, класу радіовипромінювання тощо);

7) проведення вимірювання та аналіз результатів.

У разі визначення ширини контрольної чи займаної смуги частот шляхом її вимірювання на певному рівні необхідно впевнитися в тому, що рівень сигналу, який аналізується, принаймні на 5 дБ перевищує заданий рівень, а ширина аналізованої смуги частот більша за ширину смуги частот контролюваного радіовипромінювання.

1.3.5. Радіопеленгування джерел радіовипромінювань

Під *радіопеленгуванням* (*радіопеленгацією*) розуміють процес визначення напрямку (пеленгу) на джерело радіовипромінювання за результатами аналізу характеристик випромінювання технічними засобами. Здебільшого цей напрям визначається відносно якогось заданого напрямку, роль якого зазвичай відіграє азимутальний напрям на магнітний полюс (“північ”). У разі використання автоматизованих стаціонарних засобів радіомоніторингу пеленг на ДРВ визначається за допомогою реалізації таких процедур:

- 1) проведення панорамного спектрального аналізу у смузі частот, в якій планується пеленгування;
- 2) виявлення радіовипромінювання, джерело якого потрібно запеленгувати;
- 3) аналіз панорами спектра в заданій смузі частот та в суміжних із нею смугах із метою виявлення сторонніх радіовипромінювань, які можуть негативно вплинути на результати пеленгування;
- 4) постановка завдання щодо проведення пеленгування для визначених засобів даної регіональної підсистеми радіомоніторингу;
- 5) отримання та аналіз результатів пеленгування.

1.3.6. Визначення місцезнаходження ДРВ

Під *визначенням місцезнаходження джерела радіовипромінювання* розуміють визначення його географічних координат за допомогою технічних засобів радіомоніторингу. Ця процедура ґрунтується на використанні результатів визначення напрямів (пеленгів) на нього. Іноді для визначення географічних координат джерела випромінювання додатково використовуються такі параметри, як час затримки і/або рівень прийнятого сигналу.

Зміст цієї процедури має деякі відмінності залежно від типу застосовуваного обладнання. Наприклад, місцезнаходження ДРВ визначається по-різному в таких випадках:

- у разі застосування стаціонарних засобів радіомоніторингу - як точка перетину щонайменше двох пеленгів на ДРВ, виміряних із різних територіально рознесених пунктів;
- у разі застосування мобільних комплексів (станцій) радіомоніторингу спільним обробленням і розрахунком географічних координат ДРВ за результатами вимірювання пеленгів на ДРВ із кількох територіально рознесених пунктів за маршрутами руху комплексів.

У деяких випадках, наприклад в середині будівлі, для визначення місцезнаходження ДРВ використовують портативні аналізатори спектра (або радіоприймачі) із спрямованими антенами.

1.3.7. Ідентифікація радіовипромінювань і ДРВ

Під *ідентифікацією радіовипромінювання* розуміють його класифікацію (віднесення до певного класу чи групи), що передбачає визначення характерних ознак цього випромінювання та порівняння його властивостей із відомими. При цьому визначають належності даного електромагнітного

випромінювання до конкретного джерела на основі аналізу та порівняння характеристик цього випромінювання з відомими. В автоматизованих комплексах радіомоніторингу ідентифікація радіовипромінювання проводиться визначенням взаємної кореляції обвідної спектра аналізованого сигналу з обвідними спектрами сигналів, які зберігаються в базі даних радіообстановки комплексів (сигналів, які було раніше зареєстровано у процесі проведення радіоконтролю).

У процесі проведення ідентифікації оператор має справу як із відомими (що значно спрощує цей процес унаслідок отримання інформації за зверненням до певних класифікаторів БД обліку присвоєнь частоти та БД радіообстановки), так і з невідомими радіовипромінюваннями. У цьому разі ефективність проведення ідентифікації радіовипромінювання значною мірою залежить від кваліфікації та досвіду роботи оператора.

Метою проведення ідентифікації ДРВ може бути перевірка виконання певним користувачем РЧС умов дозвільних документів, норм і правил у сфері користування РЧС.

Аналіз структури параметрів радіосигналів із подальшим статистичним обробленням інформації про параметри випромінювання РЕЗ належить до категорії пасивних методів розпізнавання (пасивних тому, що структура сигналу не містить у собі жодної розпізнавальної ознаки). При цьому використовуються інформаційні, енергетичні, часові та спектральні параметри радіосигналів, притаманні випромінюванню конкретного передавача.

1.3.8. Оцінювання зон обслуговування (покриття), показників якості обслуговування (*QOS – Quality Operating Service*) і якості послуг (*QoS – Quality of Service*)

Інструментальне оцінювання показників якості обслуговування (*QOS*) і показників якості надання послуг (*QoS*) реалізується лише використанням спеціалізованих мобільних комплексів радіоконтролю мереж загального користування (мереж стільникового зв'язку, WLAN, цифрового телевізійного та звукового мовлення). Для цього виконується об'їзд мобільними засобами передбачуваної зони радіопокриття базових станцій (передавачів) мереж зв'язку та проводяться інструментальне оцінювання рівня напруженості поля випромінювання в заданих смугах частот (на заданих частотах).

Для проведення вимірювань використовується спеціальне обладнання під керуванням персональної обчислювальної машини зі спеціалізованим програмним забезпеченням.

Так наприклад, якість послуг мереж мобільного зв'язку оцінюється такими безрозмірними величинами, як *доступність зв'язку, безперервність зв'язку, повнота послуги, безперервність послуги, доступність послуги* тощо.

При цьому перелік телекомунікаційних послуг визначено стандартом *ETSI TS 102 250*, до яких відносять:

- послуги телефонії;
- послуги передавання коротких текстових повідомлень (SMS);
- послуги передавання мультимедійних повідомлень (MMS);
- послуги передавання даних.

Основним методом оцінювання зазначених показників якості є метод контрольних викликів.

У ряді випадків для тестування зон обслуговування (покриття) базових станції наприклад, систем наземного мобільного зв'язку: стільникового, транкінгового, пейджингового зв'язку тощо, допускається використання цифрових абонентських пристроїв з функцією вимірювання рівня сигналу. При такому тестуванні такі вимірювання можна проводити досить швидко та з дуже обмеженими людськими та фінансовими ресурсами.

Рекомендації МСЕ щодо проведення такого тестування наведено у додатку В.

1.4. Радіотехнічна розвідка як складова радіоелектронного забезпечення радіоелектронної боротьби

Змінюється характер війни та бойових дій, він становиться все більш технологічними. Все частіше для вирішення бойових завдань розвідки та для знищення техніки та особового складу противника застосовують різноманітні безпілотні летальні апарати (БПЛА), наземні, морські розвідувальні та ударні дрони та роботи. Канали їх керування та телеметрії використовують безпроводові технології в діапазоні УКХ. Тому зараз зростає роль радіоелектронної розвідки (РЕР), яка є складовою частиною радіоелектронної боротьби (РЕБ), завданнями якої, у тому числі, є виявлення БПЛА, дронів, роботів і радіоканалів управління технікою та особовим складом.

Методи і завдання радіочастотного моніторингу, радіотехнічного контролю, РЕР часто співпадають. Виявлення, пеленгування (а також визначення місця знаходження), аналіз та ідентифікація радіовипромінювання здійснюється практично однаковим технічним обладнанням, яке працює по тим же самим принципам.

В сучасних умовах невід’ємною частиною операції і бою є радіоелектронна боротьба, роль якої збільшується завдяки зростаючій ролі радіоелектронних засобів у системах управління військами та зброєю.

Радіоелектронна боротьба (РЕБ) – це сукупність узгоджених за метою, завданнями, простором і часом заходів і дій з виявлення (здобування інформації про місцеперебування радіоелектронних засобів) систем управління військами (силами) та зброєю противника, їхнє радіоелектронне подавлення та заходів протидії технічним засобам розвідки противника, а також радіоелектронного захисту своїх систем і засобів управління військами (силами) і зброєю від дій противника (контррадіоелектронна протидія), які спрямовані на завоювання і утримання переваги (панування) у використанні спектру електромагнітних випромінювань.

Мета РЕБ – дезорганізувати управління військами противника, знизити ефективність його розвідки і застосування зброї і бойової техніки противника; забезпечення надійної роботи (стійкості) власних систем і засобів управління своїми військами і зброєю.

Радіоелектронна боротьба є видом оперативного (бойового) забезпечення операцій (бойових дій) та складовою частиною інформаційної боротьби в просторі фізичних полів – носіїв інформації.

Розрізняють три складові частини радіоелектронної боротьби (рис. 1.4):

- радіоелектронне забезпечення (пасивне, *Electronic Support Measures – ESM*);
- радіоелектронне придушення (активне, *Electronic Counter Measures – ECM*);
- радіоелектронний захист (протидія радіоелектронному придушенню, *Electronic Counter Countermeasures – ECCM*).

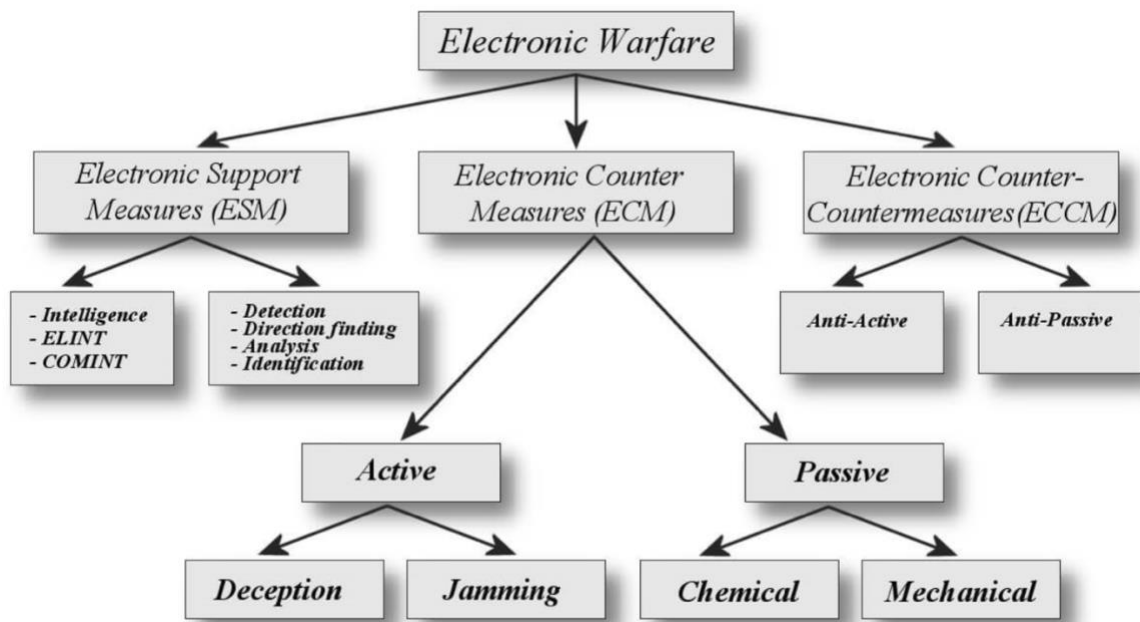


Рисунок 1.4. Складові частини радіоелектронної боротьби

Радіоелектронне забезпечення ESM включає в себе засоби виявлення, пеленгації, аналізу та ідентифікації радіосигналів та включає в себе:

- **радіоелектронну розвідку (PEP, SIGnal INTelligence – SIGINT)** або сигнальна розвідка, яка в свою чергу включає підкатегорії **радіорозвідки (PP, англ. COMINT)** та **радіотехнічну розвідку (PTP, англ. ELINT)**, яка забезпечує виявлення, ідентифікацію та пеленгацію джерел радіосигналів та внесення їх в базу даних SIGINT для використання на тактичному рівні для створення апріорних даних для електронного порядку поля бою (*electronic order of battle – EOB*):

- **радіотехнічну розвідку PTP (ELINT)** – виявлення випромінювання ворожих радарів, комплексів РЕБ, РЛС, систем озброєння, БПЛА та визначення напрямку на радіолокаційний передавач. Результати використовуються для побудови EOB радарів.

- **радіорозвідка PP (COMINT)** – перехоплення інформації з систем зв'язку, визначення напрямку на випромінювач, що дозволяє контролювати та записувати отриману інформацію. Результати використовуються для побудови EOB мереж зв'язку.

Electronic Order of Battle (EOB) представляє найкраще та швидке знання поля бою з точки зору електромагнітного спектру та його зміни з часом. EOB включає виявлення, ідентифікацію, класифікацію, локалізацію, аналіз і збір усіх можливих випромінювань ворога, розділених на:

- бойовий порядок зв'язку (*Communication Order of Battle – COB*);
- бойовий порядок радіолокації (*Radar Order of Battle – ROB*).

Якість функціонування систем РТР та РР багато в чому визначається їхніми обчислювальними системами, за допомогою яких реалізуються функції аналізу прийнятих сигналів. База даних типової обчислювальної системи містить параметри 2000 і більше різноманітних радіо- та радіолокаційних систем. Крім цього, програмне забезпечення може бути налаштоване оператором для зберігання невпізнаних сигналів з метою їх аналізу в подальшому. Процес обробки прийнятих сигналів складається з трьох послідовних етапів:

- сортування сигналів по мірі їх знаходження;
- розподіл їх по класам, групам;
- ідентифікація джерел сигналів.

Для прикладу на рисунку 1.5 наведено робоче місце оператора системи РЕР EL/L-8300, яка працює в діапазоні частот від 0,03 до 40 ГГц.



Рисунок 1.5. Робоче місце оператора системи РЕР EL/L-8300

Процес обробки прийнятих сигналів складається з трьох послідовних етапів:

- 1) сортування сигналів по мірі їх знаходження;
- 2) розподіл їх по класам, групам;
- 3) ідентифікація джерел сигналів.

Аналіз та ідентифікація випромінювань здійснюється з допомогою:

- вивчення форми спектру радіовипромінювання (спектральної масці сигналу),

- аналізу спектральної масці сигналу та змін на протязі часу та
- порівнянням з наявними у базі даних спектральних масок раніше визначених джерел радіовипромінювання.

Завдання радіоелектронного забезпечення (як складової РЕБ) та радіомоніторингу спектра майже співпадають, що дозволяє використовувати однотипне обладнання, або обладнання радіомоніторингу використовувати як складова для створення комплексів РЕБ.

Контрольні питання та завдання:

1. Що таке радіочастотний моніторинг і яка його мета?
2. Які органи здійснюють радіочастотний моніторинг у смугах частот загального та радіотехнічний контроль у смугах частот спеціального користування?
3. Що є складовими системи частотного менеджменту?
4. Які основні завдання виконує система радіомоніторингу?
5. Які основні завдання виконує служба радіоконтролю?
6. Що відносять до методів радіомоніторингу та який їх зміст?
7. Назвати та пояснити критерій, за яким здійснюється виявлення сигналу – підстави для ухвалення рішення про наявність/відсутність сигналу.
8. Пояснити відмінність виявлення від вимірювання?
9. Що розуміють під ідентифікацією радіовипромінювання?
10. Переведіть значення рівня порогу потужності сигналу для рухомого радіозв'язку в діапазоні 824...960 МГц у рівень напруженості поля.
11. Що таке радіоелектронна боротьба та які її складові?
12. Що відносять до радіоелектронного забезпечення РЕБ.
13. Чим відрізняються завдання радіотехнічної розвідки та радіорозвідки?
14. Назвати процедури, шляхом використання яких в загальному випадку реалізується радіотехнічна розвідка.

2. Вимірювання та контроль параметрів радіовипромінювань

Для виконання завдань для СРК, станції контролю мають бути здатні розпізнавати і визначати розташування джерел випромінювань, і навіть вимірювати їх основні характеристики.

Під терміном “*вимірювання*” розуміють процес визначення фізичних величин шляхом відображення їх значень за допомогою експерименту та обчислення з використанням спеціалізованих технічних засобів.

Відмінність процедури вимірювання рівня сигналу від його виявлення полягає у тому, що для прийняття рішення щодо виявлення сигналу

достатньо встановлення факту перевищення рівня сигналу заданого порогу виявлення, а для вимірювання необхідно визначити числове значення рівня сигналу.

Значення виміряного параметру здійснюється за відповідністю його певному критерію.

До параметрів, які, зазвичай, вимірюються під час проведення радіочастотного моніторингу відносять:

- вимірювання несучої частоти (відхилення частоти);
- рівень сигналу – вимірювання напруженості поля та щільності потоку потужності у фіксованих точках;
- вимірювання ширини смуги радіочастот;
- параметри видів модуляції та девіацію частоти;
- вимірювання зайнятості спектра;
- радіопеленгація тощо.

2.1. Подання сигналів у часовій та частотній областях

Сигнал, параметри якого потрібно визначити, займає частину пропускної здатності каналу передачі. Загальну ємність каналу передачі можна уявити як куб на тривимірній (3D) декартовій діаграмі, як на рис. 2.1.

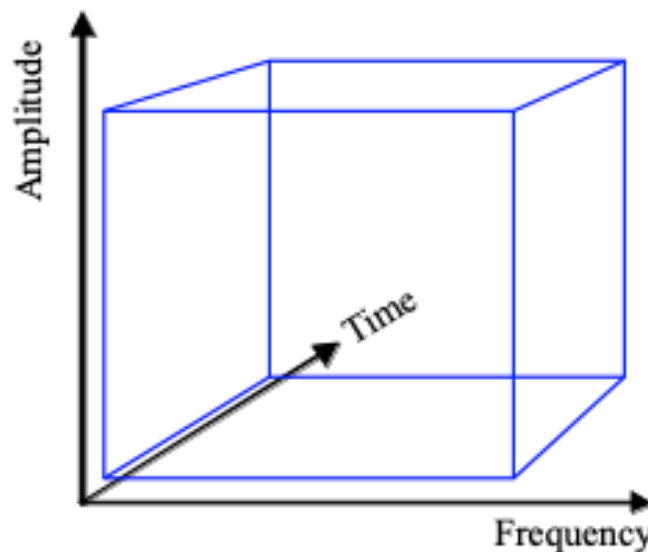


Рисунок 2.1. Пропускна здатність каналу передачі

Амплітуда сигналу може бути визначена у двовірному вимірі (2D) як функція *частоти* або *часу* вимірювання, або у тривимірній вимірі (3D) як функція частоти та часу вимірювання одночасно. Деякі види модуляції потребують також крім амплітуди уявлення *фази* сигналу (векторне подання сигналу).

Для вимірювання амплітуди та інших параметрів сигналу його рівень або співвідношення сигнал/шум та сигнал/завада повинні бути достатніми та перевишувати динамічний діапазон, в якому проводяться вимірювання.

Таким чином існують два основних підходи до подання та аналізу процесів або сигналів:

у *часовій області* – процес чи сигнал представляється як залежність його фізичних параметрів від часу, графічне зображення виконується в декартовій системі координат, де вісь абсцис є віссю *часу* t , а вздовж осі ординат відкладається *амплітуда* або *потужність сигналу* (приклад, осцилограф);

у *частотній області* – відображається залежність його фізичних параметрів від частоти, а графічне подання сигналу в частотній ділянці виконується також в декартовій системі координат, де вздовж осі абсцис відкладається *частота* f , а вздовж осі ординат – *амплітуда* або *потужність сигналу* (приклад, аналізатор спектру).

На рисунку 2.2 показано подання сигналу, що складається з кількох гармонійних коливань різної амплітуди та частоти, у тривимірному просторі “*амплітуда (потужність) – час – частота*”. Подання сигналу у *часовій області* є його проекцією на площину “амплітуда (потужність) – час”, а *частотній області* – проекцією на площину “амплітуда (потужність) – частота”.

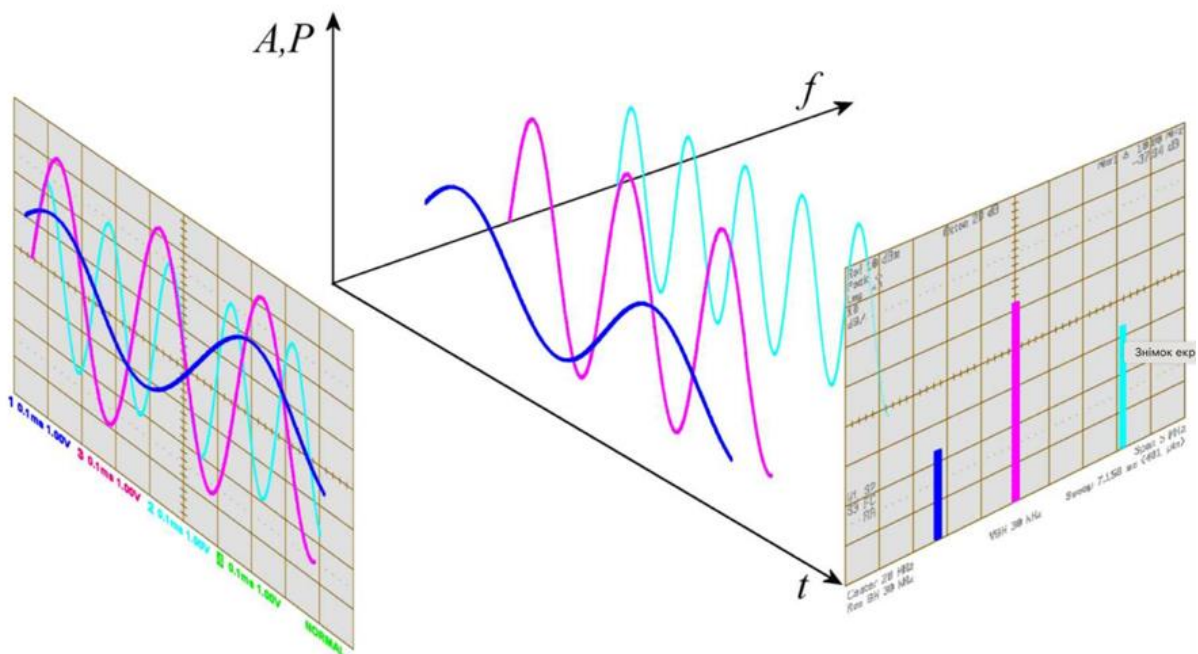


Рисунок 2.2. Тривимірне уявлення сигналу та його проекції, що пояснюють сутність понять “часова область” та “частотна область”

Сигнали, прийняті на станції контролю за використанням спектра, можуть описуватися з використанням або часової, частотної, або фазової областей.

Частотне уявлення сигналу є більш компактним, особливо коли сигнал є складовим і є сумішшю з коливань різних амплітуд і частот. Так, сигнал, показаний малюнку (сума трьох гармонік з різними амплітудами і частотами), в частотній області буде зображено як трьох піків, розставлених на осі частот. З іншого боку часове уявлення сигналу є традиційним та інтуїтивно зрозумілим.

Будь-який сигнал можна розкласти на складові. Таке розкладання сигналу називається спектральним. При цьому сигнал можна подати у вигляді графіка залежності параметрів сигналу від частоти, така діаграма називається спектральною або спектром сигналу.

Цей метод заснований на тому факті, що будь-який реальний сигнал, незалежно від його форми хвилі, може бути побудований шляхом додавання певної кількості синусоїдальних сигналів з різними амплітудами, частотами і фазами. І відповідно будь-який тимчасовий сигнал можна розкласти на певну кількість різних синусоїдальних хвиль в частотній області.

Математичною основою спектрального аналізу сигналів є перетворення Фур'є. Якщо необхідно перетворити сигнал із часової області на частотну область, можна скористатися математичним методом, званим “перетворення Фур'є” (додаток Б).

Спектр сигналу – це сукупність простих складових сигналу з певними амплітудами, частотами та початковими фазами.

Між спектром сигналу та його формою існує жорсткий взаємозв'язок: зміна форми сигналу призводить до зміни його спектра і навпаки, будь-яка зміна спектра сигналу призводить до зміни його форми. Це важливо запам'ятати, оскільки під час передачі сигналів у системі передачі, вони піддаються перетворенням, отже, відбувається перетворення їх спектрів.

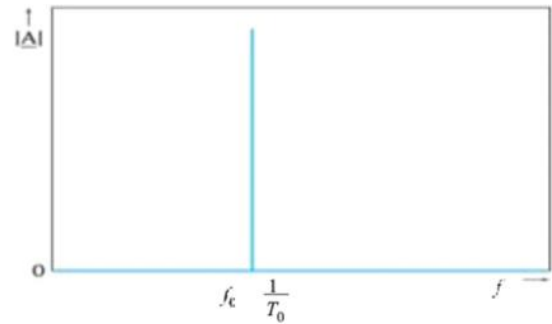
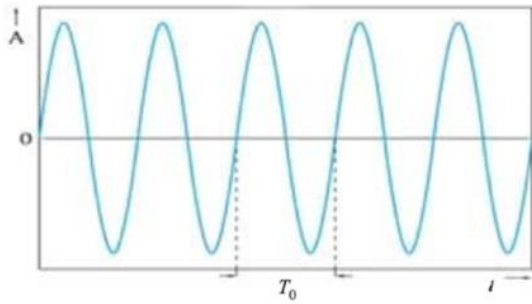
Рис. 2.3 та Рис. 2.4 показані приклади періодичних та аперіодичних сигналів у часовій та частотній областях.

Деякі періодичні сигнали у часовій та частотній областях

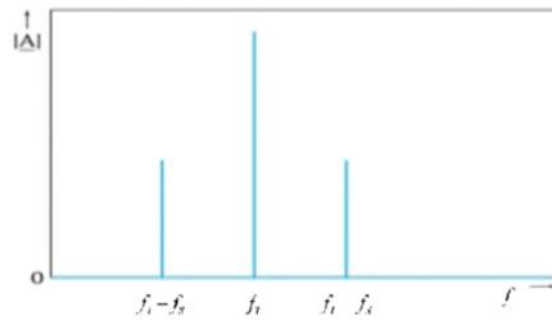
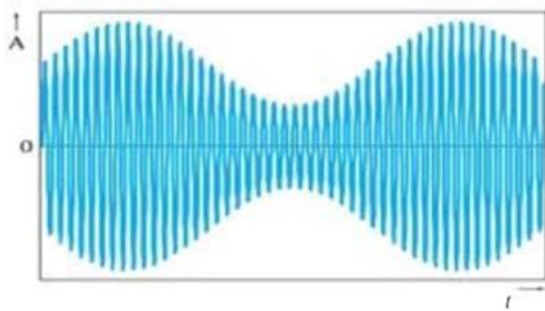
Часова область

Частотна область

Синусоїдальний сигнал



Сигнал з амплітудною модуляцією



Періодичні прямокутні імпульси

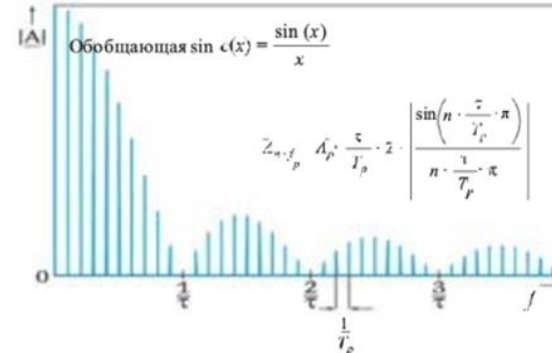
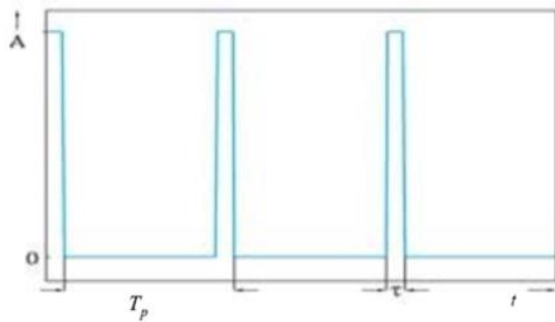


Рисунок 2.3. Приклади періодичних сигналів у часовій та частотній областях

Деякі аперіодичні сигнали у часовій та частотній областях

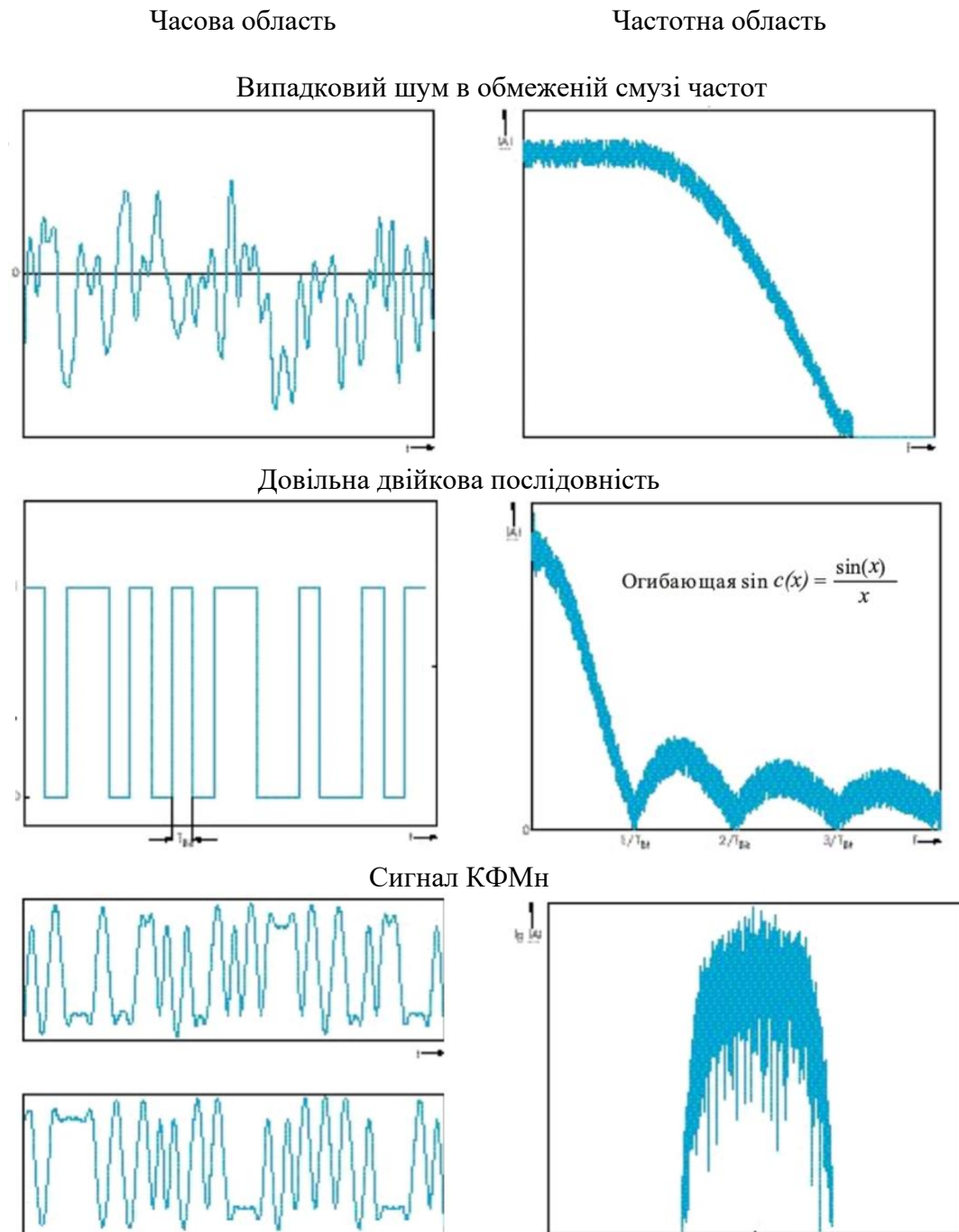


Рисунок 2.4. Приклади аперіодичних сигналів у часовій та частотній областях.

Ще одним корисним уявленням для цілей контролю є **спектрограма** (див. рисунок 2.5), наприклад, для оцінки зайнятості спектра частот. Це уявлення ґрунтується на залежності частоти від часу (можна вважати це режимом 2.5D). На спектрограмі значення амплітуди наведені за

допомогою додаткової колірної шкали. Такого роду уявлення корисне для запису широкосмугового випромінювання, а також для відстеження випромінювання зі зсувом частоти або випромінювання зі стрибкоподібною частотою.

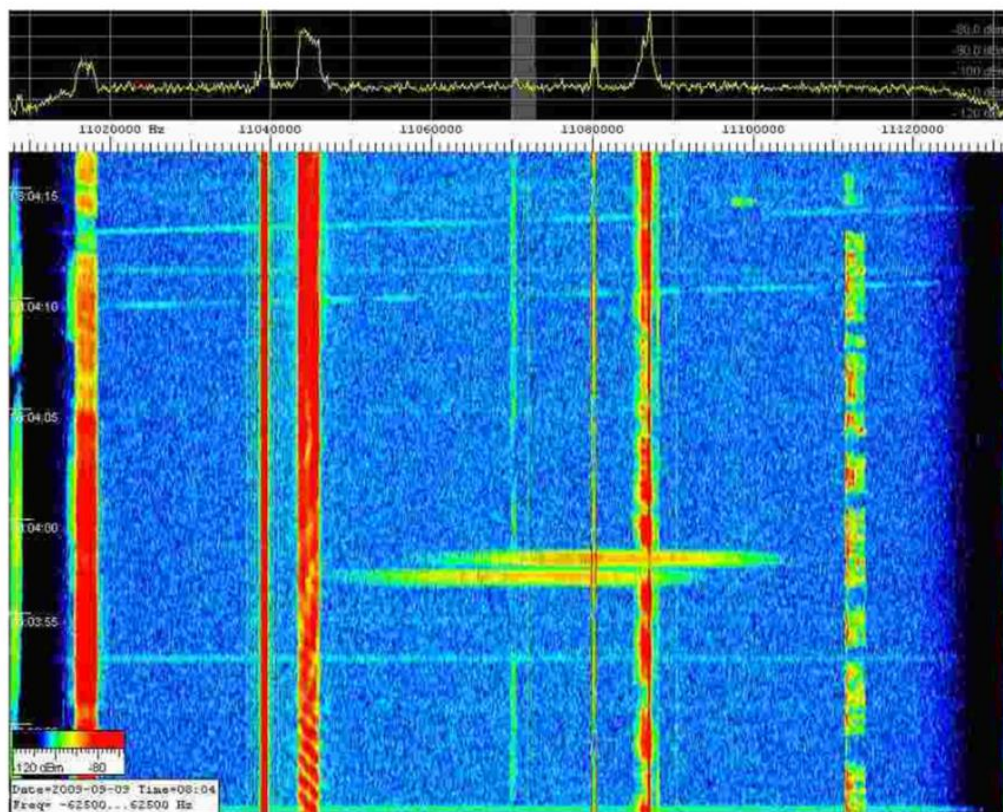


Рисунок 2.5. Приклад 2.5D спектрограми

Сучасні прилади дозволяють візуалізувати спектрограми 3D. На рисунку 2.6 наведений приклад спектрограми (2,5D) сигналу радіостанції в режимі ППРЧ, а на рисунку 2.7 - приклад спектрограми сигналу ППРЧ у вигляді 3D.

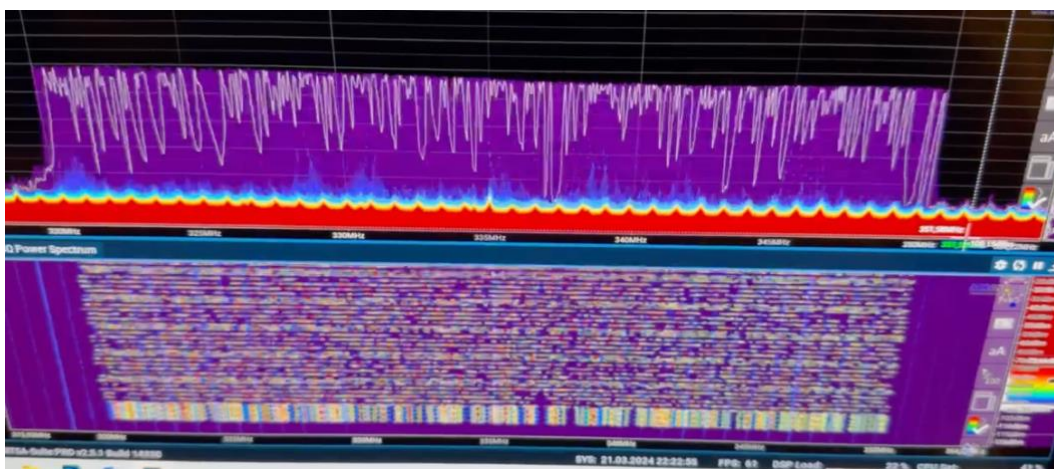


Рисунок 2.6. Приклад спектрограми (2,5D) сигналу ППРЧ

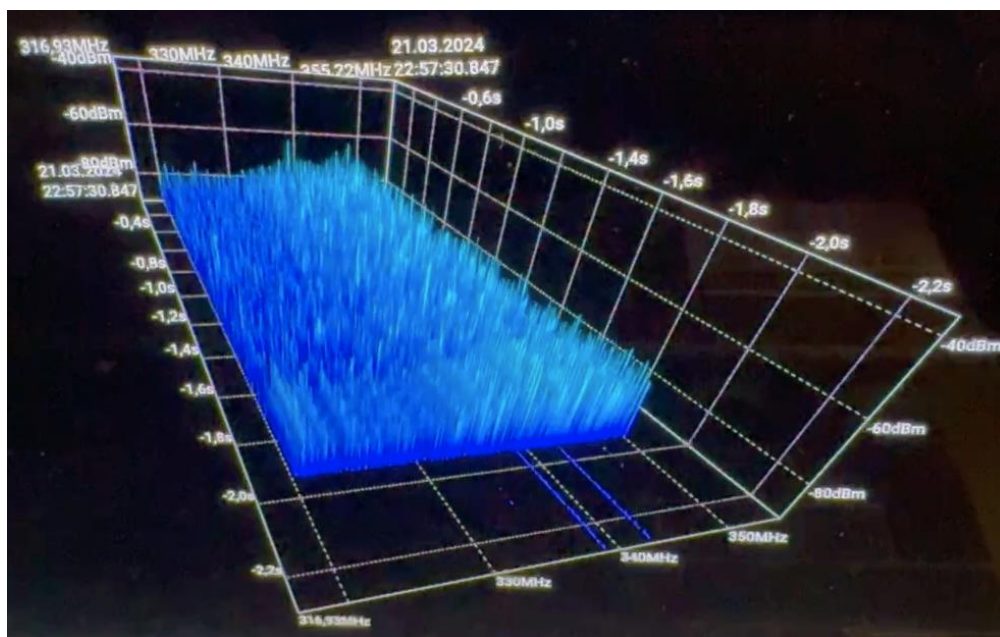


Рисунок 2.7. Приклад 3D спектрограми сигналу ППРЧ

2.2. Вимірювання в амплітудній та фазовій областях (векторні)

У більшості цифрових систем радіозв'язку модулюється фаза радіочастотної (РЧ) несучої (ФМн, КФМн тощо) або фаза та амплітуда разом (КАМ). Однак у частотній області неможливо показати дані про фази. Для представлення такої інформації випромінювання зазвичай зображується як діаграми сузір'я. Довжина вектора від вихідної точки до кожної точки сузір'я представляє амплітуду сигналу, тоді як кут між позитивним відрізком осі X та вектором, виміряний проти годинникової стрілки, представляє фазу. Синфазна складова сигналу ("I") представляється на осі X (ДІЙСНА), а квадратурна складова сигналу ("Q") - на осі Y (УЯВНА). Щоб показати значення сигналу деякі певні моменти часу у фазовій області, використовуються **векторні аналізатори сигналів** (див. рис. 2.8).

Частота повторення цього зображення повинна дорівнювати швидкості передачі символів. Для того щоб уявлення було стабільним, аналізатор має бути синхронізований із сигналом. Для полегшення цієї процедури повинен бути відомий тип сигналу або принаймні швидкість передачі символів.

У простих випадках, коли відомі режим модуляції та схема кодування, аналіз може бути виконаний у реальному часі. Сучасні векторні аналізатори здатні при цьому відобразити послідовність двійкових сигналів чи знаки декодованої інформації.

Однак у разі більш складної схеми модуляції та у випадках, коли або схема модуляції або схема кодування під час прийому невідома, для отримання переданого коду необхідна подальша обробка.

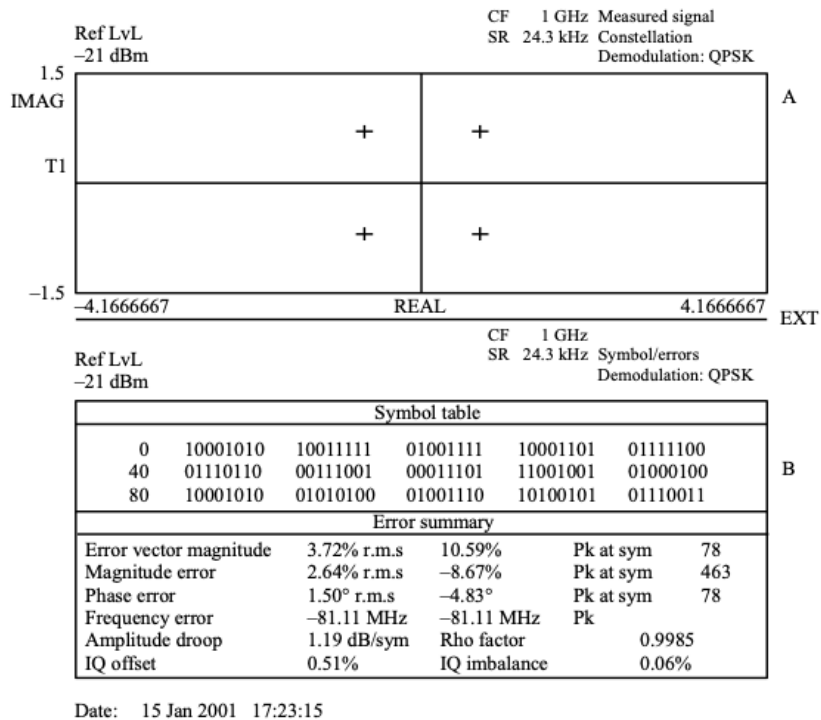


Рисунок 2.8. Сигнал КФМн у вигляді діаграми сузір'я (амплітудно-фазова область)

Для тривимірного подання такого сигналу використовується метод кореляції спектру та моментів. Виконується циклічна автокореляція спектрів, отриманих з кількох послідовних процесів швидкого перетворення Фур'є (FFT). Результат можна зобразити у вигляді двовимірної діаграми, що показує окремі піки в точках сузір'я та час, необхідний для переходу між ними. На рисунку 2.9 показано приклад сигналу BPSK.

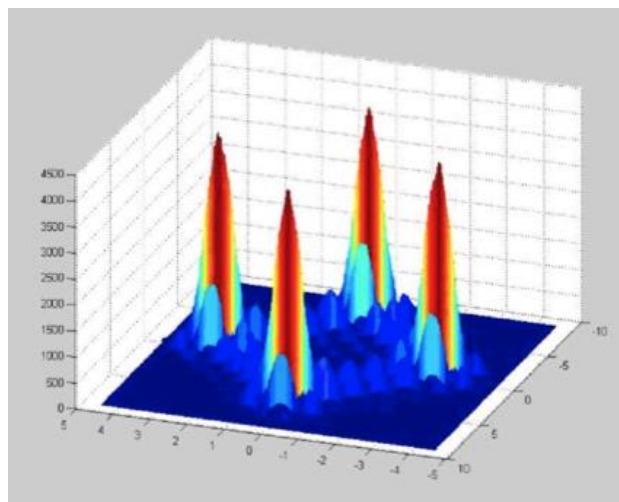


Рисунок 2.9. Результат кореляції спектру сигналу BPSK

2.3. Вимірювальні засоби

Можна виділити наступні загальні вимоги до обладнання засобів радіочастотного контролю:

- 1) обладнання повинне бути автоматизованим;
- 2) обладнання у всіх режимах роботи повинне допускати можливість:
 - ручного управління;
 - одночасного вирішення декількох задач;
 - послідовного вирішення задач;
 - роботу в мережі радіочастотного контролю;
 - обробку та документування результатів роботи.

Важливим елементом для проведення радіочастотного контролю є ПРМ, які використовуються для:

- виявлення;
- пеленгування (та визначення місця знаходження);
- аналізу та ідентифікації випромінювань тощо.

До робочих характеристик цих ПРМ пред'являються досить жорсткі вимоги, що пов'язано з необхідністю:

- перекривати досить широкий діапазон частот, що контролюються, та виконувати різноманітні вимірювання;
- вимірювати параметри радіосигналів із великим динамічним діапазоном їх рівнів;
- вимірювати параметри різноманітних класів радіосигналів;
- забезпечувати високу точність вимірювань;
- забезпечувати автоматизацію процесу вимірювань.

Для виконання вимірювань параметрів радіовипромінювань використовуються моніторингові і вимірювальні прилади:

- антени (антенні системи);
- моніторингові радіоприймачі;
- аналізатори спектра;
- аналізатори сигналів.

2.3.1. Антени (антенні системи)

За призначенням антени для радіоконтроля поділяються на антени для

- виявлення джерела випромінювання (неспрямовані або спрямовані з опорно-поворотним пристроєм);

- вимірювання параметрів випромінювання (спрямовані);
- пеленгаторні (визначення напрямку на джерело випромінювання).

Для стаціонарних, мобільних та переносних станцій радіоконтроля можуть використовуватися різні типи конструкцій антен. Деякі типи антен мобільних станцій радіоконтроля наведені на рис. 2.6



а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.6. Деякі типи антен для радіоконтроля
а) переносна спрямована антена; б) логоперіодична антена;
в) опромінювач для рефлекторної антенної системи 1–18 ГГц;
г) мікрохвильова антена, що транспортується

2.3.2. Вимірювальні приймачі

Вимірювальні приймачі побудовані за принципом приймачів супергетеродинного типу, оскільки вони повинні мати більшу чутливість та високу селективність. Структурна схема супергетеродинного радіоприймача наведена на рисунку 2.7.

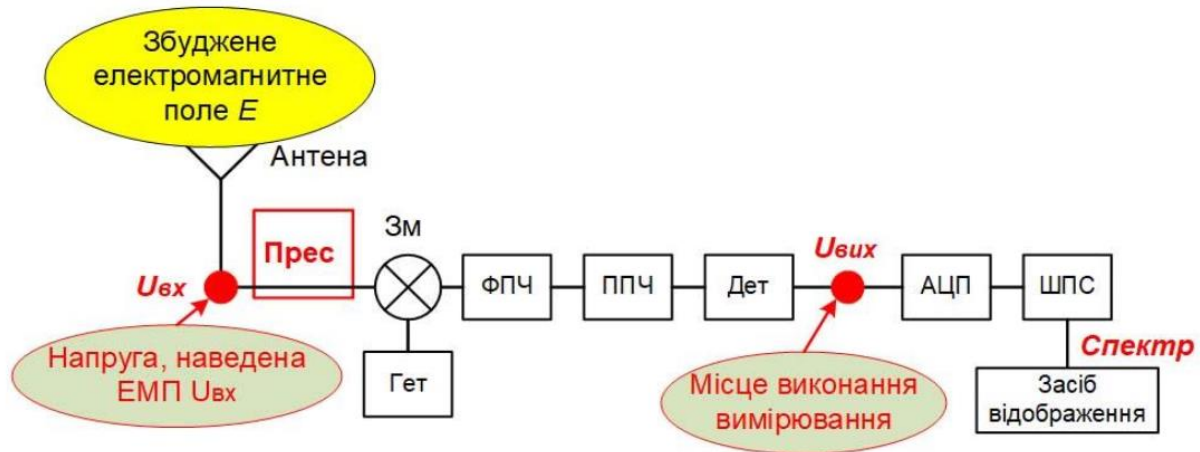


Рисунок 2.7. Структурна схема радіоприймача

На схемі зазначено:

Прес – преселектор (попередня фільтрація та попереднє підсилення);

Гет – гетеродин;

Зм – змішувач;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

ФПЧ (ППЧ) – фільтр (підсилювач) проміжної частоти;

Дет – детектор

ШПС – швидке перетворення сигналу.

Сучасні вимірювальні приймачі повністю автоматизовані (скануючи) та функціонують із використанням спеціального програмного забезпечення при керуванні через стандартний інтерфейс, що відповідає вимогам IEEE-488.

Це дозволяє вимірювати, встановлюючи правильні параметри вимірювального приймача у всій смузі частот вимірювань за допомогою персонального комп'ютера. В результаті мінімізується час вимірювання при перекритті смуги частот без перерв. Результати вимірювань зберігаються в пам'яті персонального комп'ютера і можуть бути представлені як файл або в роздрукованому вигляді.

На рисунках 2.8 наведений зовнішній вигляд деяких радіоприймачів виробництва компанії Icom, які сканують по частоті і використовуються для радіоконтролю. Для вимірювання такими приймачами потрібен комп'ютер з дисплеєм та встановленим програмним забезпеченням для радіоконтролю.



Рисунок 2.8. Зовнішній вигляд: а) PPM AR-5000; б) PPM AR-3000A

Деякі сучасні приймачі мають вбудований процесор з необхідним програмним забезпеченням та дисплеєм, як показано на рис. 2.9.

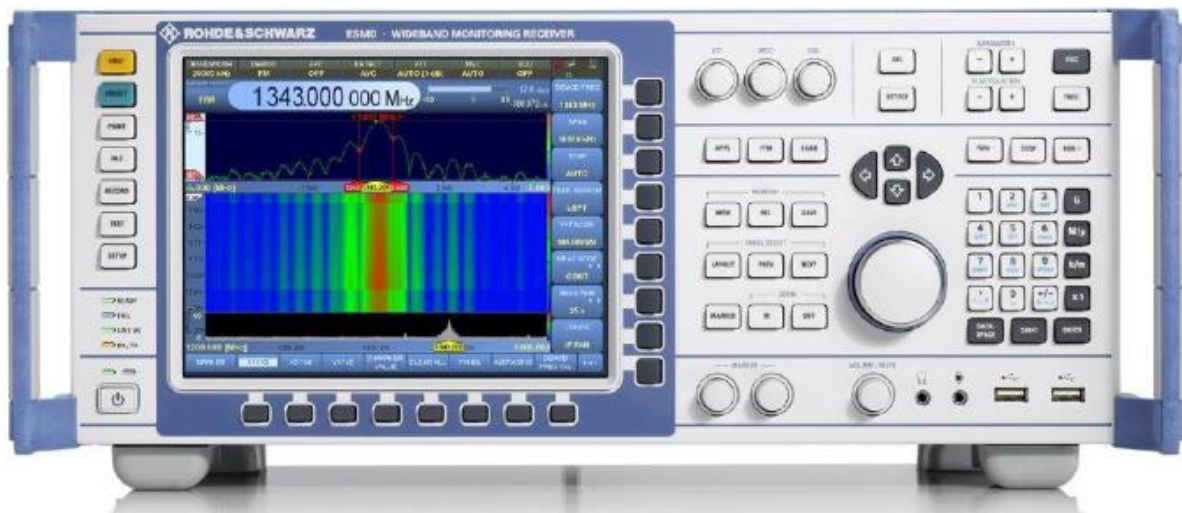


Рисунок 2.9. Широкопasmовий моніторинговий приймач ESMD

2.3.3. Аналізатори спектру з розгорткою

Аналізатор спектру - це прилад для спостереження та виміру відносного розподілу енергії електричних (електромагнітних) коливань у смузі частот. Звичайний аналізатор спектру коштує, безумовно, значно дешевше, ніж вимірювальний приймач. Обладнання цього виду широко використовується при таких вимірюваннях, коли необхідно забезпечити швидке переглядання смуги частот.

Вбудований дисплей з негайним відображенням спектра винятково корисний для виявлення частот, на яких діють небажані радіочастотні завади, та характеру цих завад, особливо якщо є можливість звужити смугу

перегляду до невеликої частини повного спектру. Аналізатор спектру, що має у своєму складі генератор, що слідкує, придатний для проведення контролю високочастотних відгуків ланцюгів.

Разом з тим, звичайний аналізатор спектра не є альтернативою по відношенню до вимірювального приймача в установках для проведення випробувань на відповідність вимог ЕМС внаслідок обмежених чутливості та динамічного діапазону сигналів, а також сприйнятливості до перевантажень.

На рис. 2.10 наведено структурну схему типового аналізатора спектра.

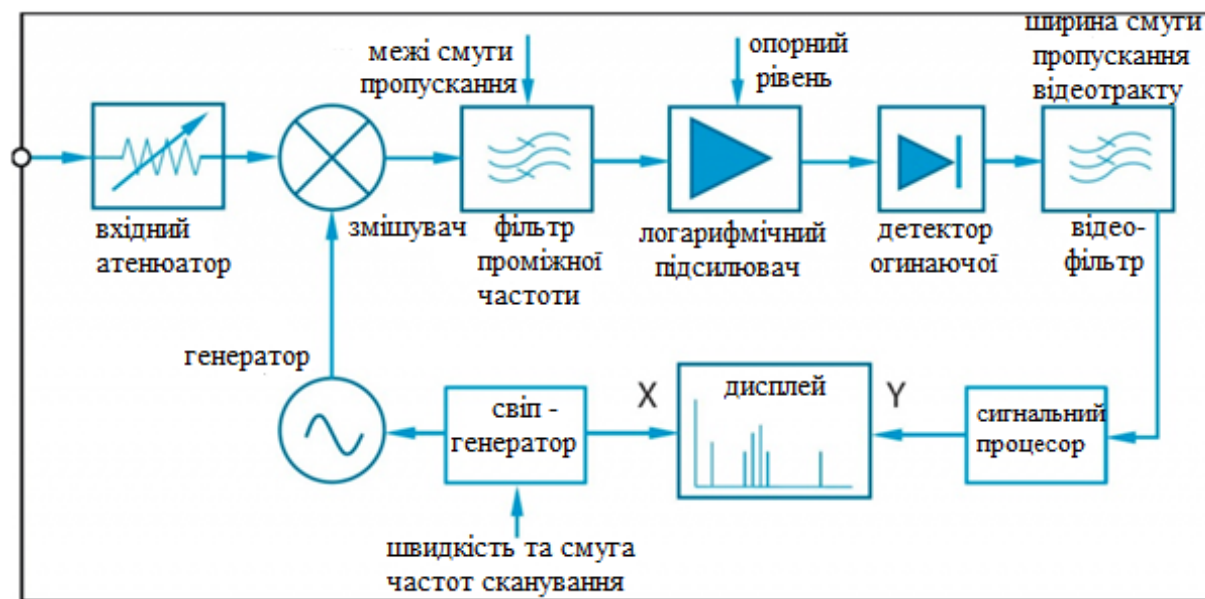


Рисунок 2.10. Структурна схема типового аналізатору спектра.

Аналізатори радіочастотного спектра (АРЧС) виконують такі функції:

- Спектральний аналіз. Прилад допомагає візуалізувати розподіл енергії за частотами і тим самим виявити наявність різних сигналів та радіозавад.
- Вимірювання потужності сигналу. Аналіз визначає рівень потужності радіочастотного сигналу заданому діапазоні частот.
- Демодуляція. Аналізатор може розпізнавати та витягувати інформацію з різних модульованих сигналів (наприклад, АМ, FM, QAM).
- Моніторинг діапазону. За допомогою приладу можна організувати безперервне спостереження за радіочастотним спектром для виявлення несподіваних змін або радіозавад.
- Запис та відтворення даних. АРЧС дозволяє зберігати отримані дані для подальшого аналізу.



Рисунок 2.11. Аналізатор спектра FPL1000

АРЧС зазвичай використовуються для тестування та оптимізації мереж зв'язку, допомагають у виявленні та аналізі сигналів противника. З іншого боку, прилади широко застосовують у лабораторних умовах вивчення радіочастотних явищ і застосовуються контролю за радіочастотним забрудненням у певних зонах.

Для прикладу на рис. 2.12 наведено спектрограми сигналів деяких типів модуляції.

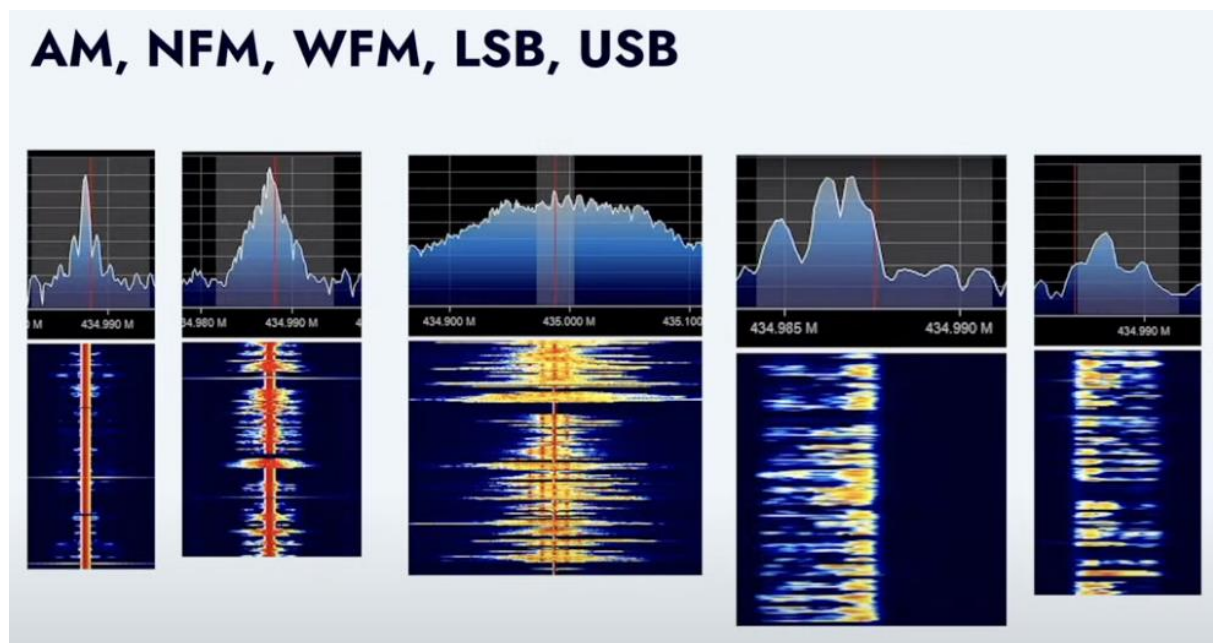


Рисунок 2.12. Спектрограми сигналів амплітудної модуляції AM, вузькосмуговий частотної модуляції NFM, широкосмугової частотної модуляції WFM, односмугової амплітудної модуляції SSB (нижня бокова смуга LSB та верхня бокова смуга USB)

2.3.4. Аналізатори сигналів.

Приклад аналізатора сигналів наведено на рис. 2.13.



Рисунок 2.13. Аналізатор сигналів R&S FSW з відображенням векторної діаграми сузір'їв багатопозиційних сигналів

Основні технічні характеристики:

- ▶ Діапазон частот від 2 Гц до 90 ГГц (до 500 ГГц із зовнішніми змішувачами на гармоніках від Rohde&Schwarz)
- ▶ Низький рівень фазового шуму: – 140 дБн/Гц під час відбудови 10 кГц, – 143 дБн при відбудові 100 кГц (несуча 1 ГГц)
- ▶ Динамічний діапазон вільний від паразитних складових (SFDR) – 60 дБн для внутрішньої смуги аналізу 2 ГГц зі вбудованим АЦП
- ▶ Внутрішня смуга аналізу до 8,3 ГГц
- ▶ Аналіз у реальному масштабі часу зі смугою пропускання 800 МГц, швидкодією 2,4 млн ШПФ/с, ROI 0,46 мкс та інтерфейсом потокової передачі I/Q-даних частотою 500 МГц
- ▶ Реєстратор команд SCPI, що спрощує генерацію коду віддаленого керування приладом
- ▶ Новий дизайн та операційна система Windows 10 з підтримкою мультисенсорних жестів
- ▶ Можливість паралельного запуску та відображення кількох вимірювальних додатків.

Гнучкий аналіз модуляції від MSK до 4096QAM

- ▶ Формати модуляції
 - 2FSK, от 4FSK до 64FSK
 - MSK, GMSK, DMSK
 - BPSK, $\pi/2$ -BPSK, $\pi/2$ -DBPSK, QPSK, QPSK зі здвигом, DQPSK, $\pi/4$ -DQPSK, $3\pi/4$ -QPSK, 8PSK, D8PSK, $3\pi/8$ -8PSK, $\pi/8$ -D8PSK

- 16QAM, 32QAM, 64QAM, 128QAM, 256QAM, 512QAM, 1024QAM, 2048QAM, 4096QAM
- 16APSK (DVB-S2), 32APSK (DVB-S2), 2ASK, 4ASK
- $\pi/4$ -16QAM (EDGE),
- $\pi/4$ -32QAM (EDGE), SOQPSK
- ▶ Довжина аналізу до 128 000 символів
- ▶ Смуга аналізу сигналів 28 МГц (опціонально 40/80/160/320/512 МГц та 1.2/2/4/6.4/8.3 ГГц)

Численні параметри стандартів за замовчуванням

- ▶ Визначаються користувачем сигнальні сузір'я та відповідності
- ▶ GSM, GSM/EDGE
- ▶ 3GPP WCDMA, EUTRA/LTE, CDMA2000®
- ▶ TETRA, APCO25
- ▶ Bluetooth®, ZigBee
- ▶ DECT, DVB-S2(X), DOCSIS 3.0

На рис. 2.14 та 2.15 наведено скріншот дисплею при аналізі сигналу з модуляцією 1024QAM:

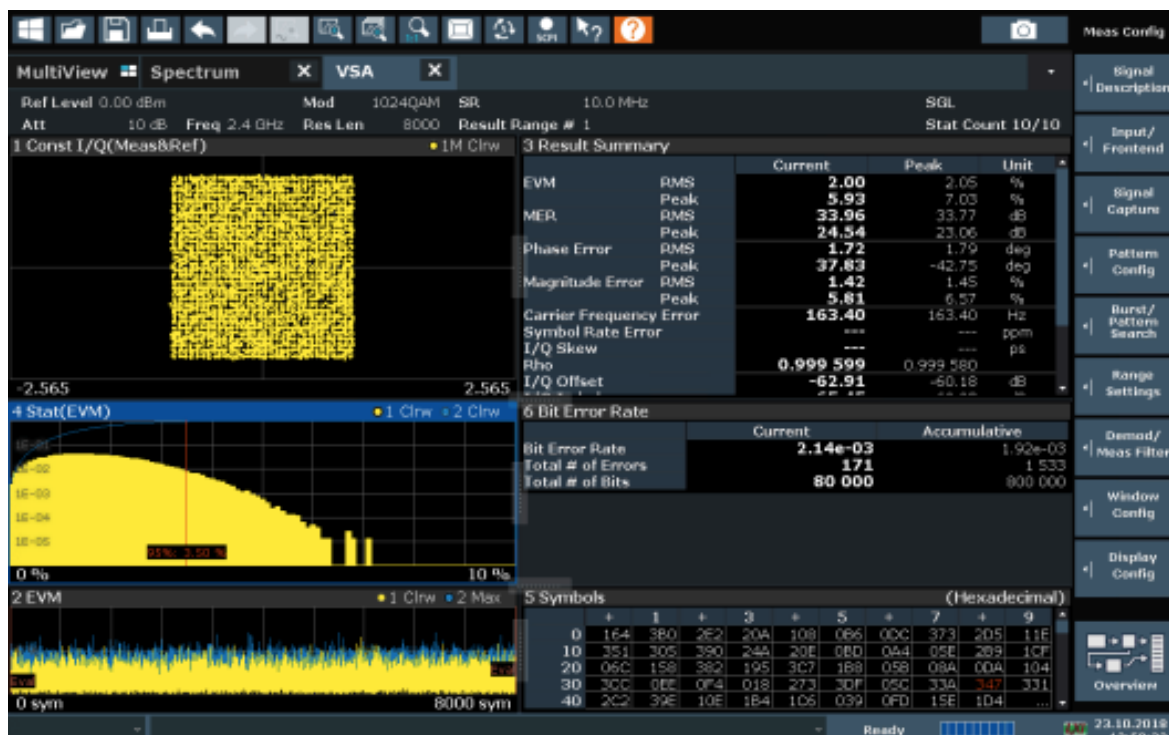


Рис. 2.14. Діаграма сигнального сузір'я, таблиця результатів, таблиця символів та розподіл EVM

Величина́ вектора́ по́хибки EVM (*Error Vector Magnitude*) – це показник якості модуляції у цифрових комунікаційних системах. Він виражає векторну різницю між ідеальним опорним сигналом та фактичним

вимірюваним сигналом, що відображає якість модуляції. Вектор похибки містить амплітудну і фазову компоненти. Іншими словами, вектор похибки – залишковий шум і спотворення, яке залишається після того, як видалена ідеальна версія сигналу.

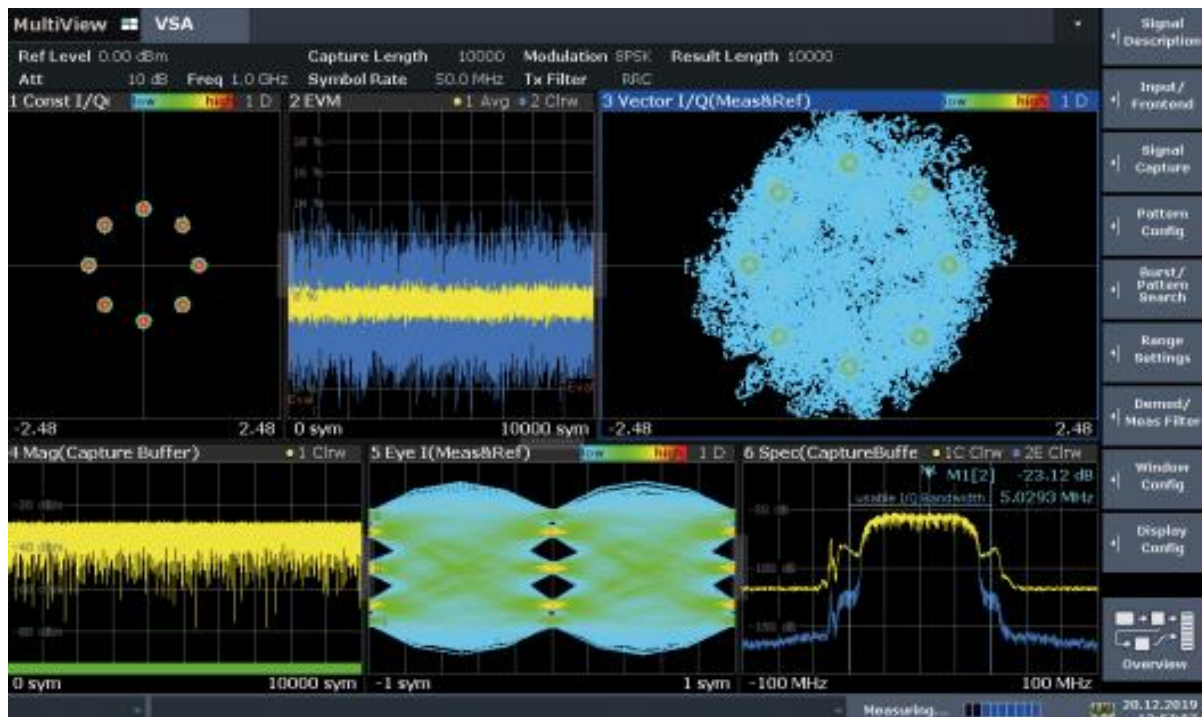


Рис. 2.15. Виявлення завад EG у режимі вимірювання щільності

Висновки

Вимірювальний приймач використовується там, де потрібна *висока точність вимірювань амплітудно-частотних характеристик радіосигналів*, для дослідження характеристик електромагнітної сумісності, автоматизації вимірювань та розрахунків характеристик сигналів та електромагнітних полів.

Аналізатор спектру широко використовується при таких випробуваннях та перевірках, коли необхідно забезпечити *швидкий перегляд смуги частот*, для аналізу властивостей радіосигналів та дослідження характеристик радіопристроїв.

Наведеними вище приладами для аналізу спектрів сигналів оснащені стаціонарні пости радіоконтроля. Для проведення вимірів поза стаціонарних РКП, мобільними та пересувними пунктами радіоконтроля застосовуються портативні пристрої з автономним живленням.

Вартість професійних вимірювальних пристроїв достатньо суттєва, тому у польових умовах в останній час використовують прилади контролю спектра, які побудовані за технологією SDR.

2.4. Аналізатори спектру на основі SDR приймачів

Software-defined radio (SDR) – система радіозв'язку, в якій програмне забезпечення використовується як для модуляції, так і для демодуляції радіосигналів. Концепція SDR радіо наведена на рис. 2.16.

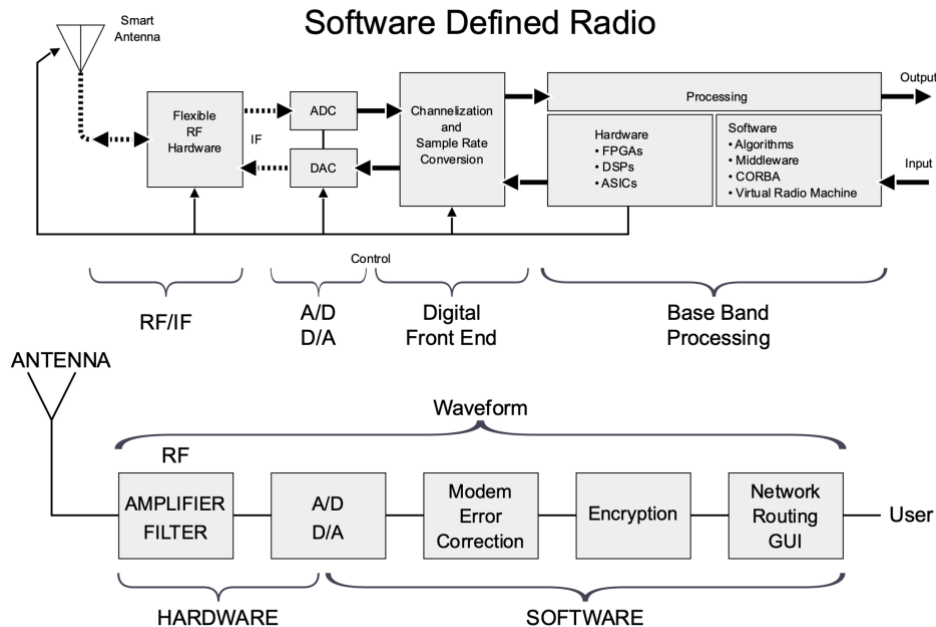


Рисунок 2.16. Концепція SDR радіо

При використанні SDR персональний комп'ютер стає ядром радіостанції, завдяки чому практично весь обсяг робіт із обробки сигналу перекладається на програмне забезпечення, яке запускається на персональному комп'ютері або керує роботою деяких конкретних спеціалізованих мікропроцесорних пристроїв, призначених для обробки сигналу. Мета такого підходу – створити систему, яка може приймати і передавати практично будь-які радіосигнали за допомогою програмного забезпечення, що є гнучким і адаптивним.

SDR широко застосовуються у військовому і стільниковому зв'язку, де в режимі реального часу потрібна підтримка різноманітних радіопротоколів, що змінюються. Прикладом реалізації технології SDR у військовій сфері є радіостанція HARRIS та ASELSAN.

У режимі приймання SDR може забезпечити вищу ефективність, ніж при використанні традиційних аналогових методів, оскільки при цифровій обробці сигналів їх фільтрація близька до ідеальної. Крім того, за допомогою програмних алгоритмів можуть бути реалізовані такі функції, які дуже складно отримати при аналоговій обробці. Ідеальна реалізація

SDR–приймача – це підключення антени безпосередньо до аналого-цифрового перетворювача (АЦП), сполученого з потужним комп'ютером. У такому разі програмне забезпечення, запущене на комп'ютері, забезпечувало б обробку потоку даних, що поступав, і перетворювало б їх в необхідну форму. Ідеальний SDR–передавач функціонував би аналогічно. Програмне забезпечення формувало б потік даних, який поступав би в цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП), підключений до антени.

Проте сучасна технологічна база не дозволяє реалізувати таку ідею на всіх можливих частотах. Доступні АЦП ще недостатньо швидкі для роботи в широкій смузі радіоспектру або не мають достатнього динамічного діапазону, щоб оперувати з сигналами, що мають величезну різницю рівнів в цьому спектрі.

Реалізація SDR можлива поки тільки на частотах до 6 –7 ГГц, тому в пристроях з більш високими робочими частотами проблема високоякісного оцифрування ВЧ сигналів вирішується їх перенесенням на більш низьку частоту. Для цього використовуються змішувач і опорний генератор. Таким чином, потрібне певне аналогове устаткування, щоб направити частину спектру частот на обробку в комп'ютері.

Найбільш поширенні SDR-приймачі та аналізатор спектра, які використовуються для аналізу спектра (рис. 2.17):



Рисунок 2.17. Найбільш поширенні SDR-приймачі та аналізатор спектра

На рисунку 2.17 прилади розташовані зверху вниз в такому порядку:

- TinySA Ultra+ ZS-407 (100 кГц – 7,3 ГГц);
- Airspy R2 SDR (24 МГц - 1800 МГц);
- HackRF One (1 МГц – 6 ГГц);
- SDR приймач RTL-SDR (500 кГц до 1,7 ГГц).

Приймачі відрізняються:

- діапазоном робочих частот,
- шириною смуги пропускання для вимірювання сигналів,
- швидкістю сканування частот,
- дискретністю АЦП (зазвичай 8 або 12 біт);
- рівнем власних шумів та паразитних випромінювань,
- наявністю власного процесора і дисплея тощо.

Аналізатор спектра на відмінність від приймачів не має демодуляторів та не в змозі прослуховувати сигнали.

Характеристики найбільш поширених SDR приймачів та аналізаторів спектра наведені у додатку Д.

У ряді випадків немає потреби у точному вимірюванні параметрів випромінювань. Достатньо отримати сигнальну інформацію (візуальну та звукову) про наявність випромінювань у насамперед визначених смугах частот (для ідентифікації джерела випромінювання) та мати приблизну оцінку відстані до джерела випромінювання (на підставі аналізу рівня сигналу).

Таки вимірювальні приймачі з обмеженою функціональністю та заздалегідь встановленими смугами частот для сканування іноді називаються **детекторами випромінювань**. Вони у декілька разів дешевше аналізаторів спектру, мають незначну вагу та габарити, мале споживання електроенергії. Як правило такі пристрої для зміни параметрів (наприклад смуг робочих частот) можуть можливість з допомогою зовнішніх комп'ютерів (планшетів, смартфонів) з відповідним програмним забезпеченням перелаштовуватися на інші смуги частот.

Також в умовах ведення бойових дій засоби радіоконтролю використовуються також для перехоплення відеосигналів від БПЛА. Слід мати на увазі, що відеосигнал від FPV аналоговий та відкритий, але у крилатих БПЛА канал відеопередачі цифровий та шифрований.

Приклади практичного застосування приладів для контролю радіосигналів на основі SDR приймачів та аналізаторів спектра для виконання бойових завдань наведені у додатку Е:

Е.1. Портативний пристрій радіотехнічної розвідки на базі аналізатора спектру “TINY SA ULTRA”.

Е.2. Комплекс моніторингу БПЛА.

Е.3. Індикатори (детектори) випромінювань.

Е.4. Перехоплювача аналогових відеосигналів.

Контрольні питання

1. Що означає вимірюванням (інструментальним оцінюванням) параметрів радіовипромінювання?
2. Які параметри і для чого вимірюються при радіочастотному моніторингу?
3. Що відноситься до вимірювальних засобів?
4. Які вимоги пред'являють до обладнання засобів радіочастотного контролю?
5. Поясніть представлення сигналу у часовій та частотних областях. З якою метою проводиться аналіз сигналу в цих областях?
6. Назвати та охарактеризувати прилади, які використовуються для виконання вимірювань параметрів радіовипромінювання.
7. Принцип побудови та призначення вимірювальних приймачів.
8. Принцип побудови та призначення аналізаторів спектра.
9. У яких випадках і для чого при радіочастотному моніторингу використовують вимірювальний радіоприймач та аналізатор спектру?
10. Які прилади контролю спектра застосовуються у польових умовах?
11. Що означає SDR радіо, застосування при проведенні радіомоніторингу.

3. Основні принципи та методи вимірювання параметрів і характеристик радіосигналів

Властивості радіосигналів характеризуються їх *параметрами* та *характеристиками*.

Під *параметрами* радіосигналу маються на увазі фізичні величини, які характеризують властивості радіосигналу.

Під *характеристиками* маються на увазі функціональні залежності, які описують властивості радіосигналу.

Параметри сигналів:

- енергетичні параметри: потужність, енергія, напруга;
- частотні параметри: частота, зсув частоти, ширина смуги частот;
- часовий параметр: тривалість сигналу, період повторення;
- фазові параметри: фаза сигналу;
- динамічний діапазон сигналу.

Вид і тип характеристик сигналів визначається радіотехнологією та призначенням сигналів.

Приклади:

- вид, тип, глибина модуляції – для FM сигналів;
- вид модуляції, кут повороту сузір'я – для DVB-T2;
- кількість несучих частот – для ШСС;
- ідентифікаційний код базової станції, ідентифікаційний код мережі – для технологій GSM-900, DCS-1800, тощо.

3.1. Основні принципи та методи вимірювання частоти та її відхилення при ефірному РЧК

В Україні контроль за частотою радіовипромінювання РЕЗ проводиться при технічному та ефірному радіочастотному контролі з метою перевірки виконання нормативних вимог щодо допустимих відхилень частоти передавачів, виражених у мільйонних долях ($\pm N \cdot 10^{-6}$) або в герцах (N_j). При цьому відхилення робочої частоти передавачів усіх категорій і призначень не повинні перевищувати значень, обумовлених ГОСТ 30338 та іншими чинними в Україні нормативними документами, а також [11] і технічними умовами на контрольовані РЕЗ.

У більшості випадків радіочастотний контроль частоти радіовипромінювання РЕЗ проводиться на РКП на значній відстані від РЕЗ шляхом оцінки відхилення немодульованої несучої частоти передавача від присвоєної частоти за результатами вимірювання середньої або характерної частоти модульованого радіовипромінювання в штатному режимі роботи передавача. Для ефірного радіочастотного контролю методи вимірювань, що наведені в ГОСТ 30338, не придатні.

На практиці, радіовипромінювання і сигнал існують у широкий смузі радіочастот. Але, під час радіомоніторингу, зазвичай, інтерес становить одне фіксоване значення радіочастоти, яке зветься несучою частотою радіовипромінювання (радіосигналу).

Практично всі вимірювання частоти, що виконуються на РКП, є *дистанційними* і проводяться нині *автоматизованими методами*. Основними складовими частинами такої автоматизованої системи є:

- цифровий вимірювальний ПРМ із синтезатором частоти;
- частотомір;
- процесор (функції частотоміра можуть виконуватися програмним забезпеченням на ПЕОМ, до складу якої входить вказаний процесор).

Відомо багато *методів вимірювання частоти*, які можуть бути

використані при проведенні радіочастотного контролю РЕЗ:

аналогові методи:

- метод частотоміра;
- метод частотного дискримінатора;
- фазовий метод;

цифрові методи:

- метод вимірювання миттєвої частоти (*IFM – Instantaneous Frequency Measurement*);
- спектральний метод;
- метод вимірювання частоти з використанням швидкого перетворення Фур'є (ШПФ).

Але у засобах ефірного контролю параметрів радіовипромінювань найбільшого застосування здобули наступні, що рекомендовані МСЕ:

1) з використанням лічильника та наступною програмною обробкою результатів вимірювань;

2) шляхом аналізу РЧС методом спектральної густини потужності з використанням швидкого перетворення Фур'є і наступною програмною обробкою результатів вимірювань.

Точність частотних вимірювань на станціях для міжнародного моніторингу визначено в Рекомендації МСЕ-R SM.377-4.

Спектральний метод вимірювання частоти

За частоту немодульованого або модульованого вузькосмугового радіовипромінювання береться значення частоти (f_0), яке відповідає *максимальному значенню* обвідної амплітудно-частотного спектра сигналу, що відображає прийняте радіовипромінювання, яке аналізується (рис. 3.1, а).

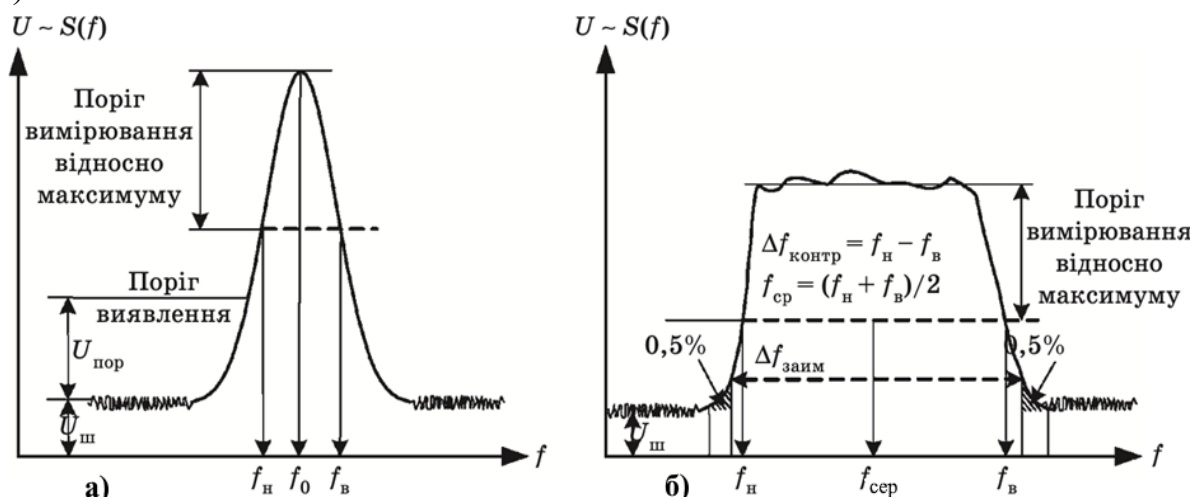


Рисунок 3.1. Вимірювання частоти радіосигналів
($U_{ш}$ – середній рівень шуму)

Але в переважній більшості сучасних радіотехнологій з цифровою модуляцією центральна частота в спектрі виражена нечітко. Крім того, при застосування методів розширення спектра *DSSS*, *FHSS*, *OFDM* сигнал складається з багатьох (до кількох тисяч) парціальних несучих, кожна з яких випромінюється на “свій” центральній під несучій частоті (рис. 3.1, б). В цих випадках за значення робочої частоти радіовипромінювання береться середнє значення ($f_{\text{сер}}$), яке розраховують за наступною формулою (рис. 3.1):

$$f_{\text{сер}} = (f_{\text{в}} - f_{\text{н}})/2, \quad (3.1)$$

де $f_{\text{в}}$ і $f_{\text{н}}$ – значення відповідно верхньої та нижньої частот спектра, які визначені на заданому рівні відносно максимуму обвідної спектра.

Апаратно-програмний спосіб вимірювання частоти з використанням лічильника проводиться шляхом підрахунку кількості імпульсів або переходів амплітуди напруги сигналу через нульовий рівень, які формуються із сигналу проміжної частоти (10,7 МГц або 455 кГц) радіоприймача за певний інтервал часу, наприклад, за 1 с. Інтервал, що визначає час проведення вимірювань, формується високо стабільними імпульсами генератора опорної частоти. Перевагою методу є висока точність вимірювання частоти, а недоліком те, що ширина спектра радіосигналу при проведенні вимірювань обмежується максимальною шириною смуги ПРМ, яка, наприклад, для приймача AR-5000 складає 220 кГц. Цей метод дозволяє досягти високої точності вимірювань і застосовується для вимірювань частоти АМ та ЧМ сигналів. Недоліком методу є деякі обмеження, що накладаються при вимірюваннях частоти ЧМ сигналів на певні несприятливі комбінації з високою девіацією частоти, низькою частотою модуляції та малим інтервалом вимірювань.

Вимірювання частоти з використанням методу швидкого перетворення Фур’є

Умови роботи алгоритмів швидкого перетворення Фур’є (ШПФ):

- кількість відліків в часовій області повинно бути не меншим, ніж потрібна кількість відліків в частотній області і бути кратним $2N$;
- для отримання розрізнявальної здатності по частоті Δf кількість відліків сигналу в часовій області N повинно бути не меншим, ніж

$$N \geq \frac{f_{\text{max}}}{\Delta f}, \quad (3.2)$$

де f_{max} – максимальне значення частоти сигналу в спектрі, що аналізується.

Вимірювання несучої частоти виконується за одним із відомих методів:

- як частота, що відповідає максимальній складовій спектра у разі аналізу вузькосмугового сигналу;
- як центральна частота спектра широкосмугового сигналу;
- шляхом визначення несучих частот в спектрі багаточастотного сигналу.

Вимірювання частоти шляхом аналізу РЧС контрольованого сигналу методом спектральної густини потужності здійснюється програмним визначенням характерних частот радіовипромінювання сигналу за формою його спектра і подальшого обчислення центральної частоти спектра f_0 із використанням швидкого перетворення Фур'є.

Для більшості сигналів центральна частота обчислюється як центр симетрії частини спектра між характерними частотами з урахуванням вагових коефіцієнтів, тобто як лінія поділу РЧС, при якій забезпечується рівність $S_1 = S_2$ (рис. 3.2).

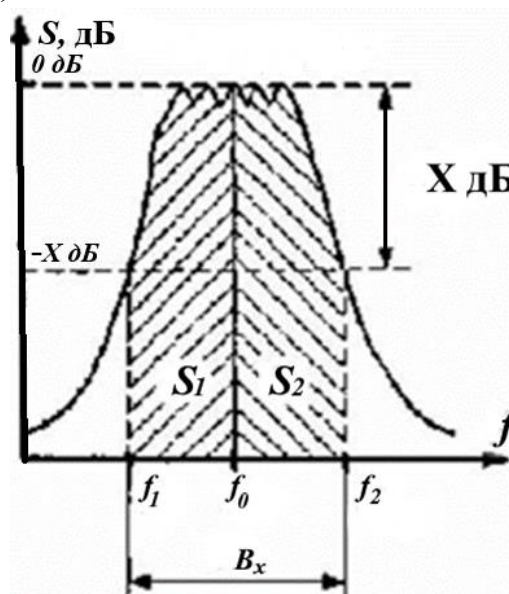


Рисунок 3.2. Вимірювання частоти радіосигналів з використанням ШПФ

Застосування даного методу досить ефективно для симетричних спектрів вузькосмугових сигналів, а основним недоліком є суттєва залежність результату вимірювання частоти сигналу від рівня симетрії його спектра. Будь-які спотворення радіосигналу при передачі чи прийманні призводять до асиметрії його РЧС, і як наслідок – до збільшення похибок вимірювань.

Ці методи вимірювань реалізовані у мобільній станції радіомоніторингу РМ-1300М-1М, структурна схема якої, що пояснює

зазначені принципи вимірювання частоти та її відхилення від номінального значення, наведена на рисунку 3.3.

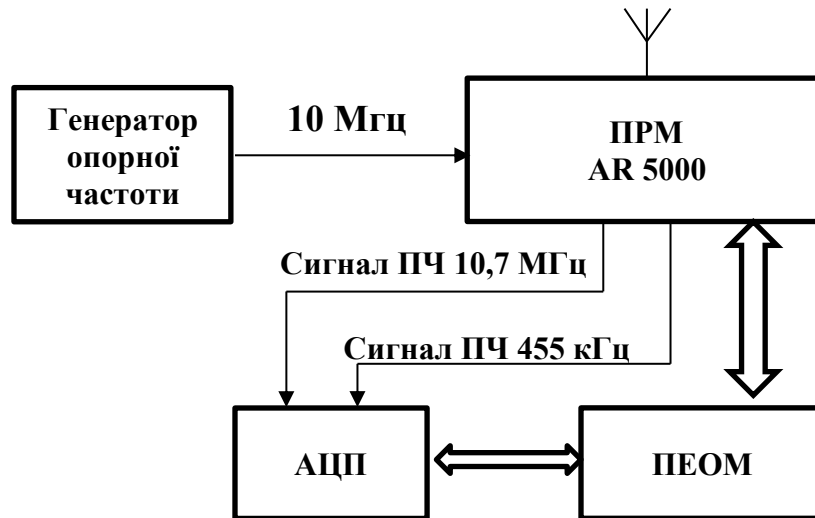


Рисунок 3.3. Структурна схема мобільній станції радіомоніторингу РМ-1300М-1М в частині вимірювання частоти

3.2. Методи вимірювань ширини смуги частот

Основними нормативними документами, які регламентують проведення радіочастотного контролю ширини займаної смуги частот, є [14], [15] та інші відомчі документи України.

Під шириною смуги радіочастот, зазвичай, мається на увазі різниця між верхньою та нижньою границями спектра частот.

Розрізняють наступні різновиди ширини смуги частот випромінювання:

- необхідна ширина смуги частот;
- ширина займаної смуги частот;
- контрольна ширина смуги частот;
- смуга частот на рівні мінус X , дБ;
- присвоєна ширина смуги частот.

Необхідна ширина смуги радіочастот – ширина смуги частот, достатня для даного класу випромінювання для забезпечення передавання сповіщення з необхідною швидкістю і якістю.

Значення ширини смуги частот (ширини спектра) радіовипромінювання (радіосигналу) може визначатися як за критерієм “*відношення потужності*” – так званий *метод $\beta/2$* (рис. 3.4), так і на певному рівні відносно суцільної вершини обвідної спектра сигналу – так званий *метод $X_{\text{дБ}}$* (рис. 3.5).

Ширина займаної смуги частот – ширина смуги частот, за нижньою і верхньою границями яких середні потужності дорівнюють певному відсотку $\beta/2$ від загальної середньої потужності випромінювання (P). Згідно Рекомендацій МСЕ для більшості радіосигналів $\beta=1\%$, тобто ця величина повинна дорівнювати $0,5\% \cdot P$ (рис. 3.4).

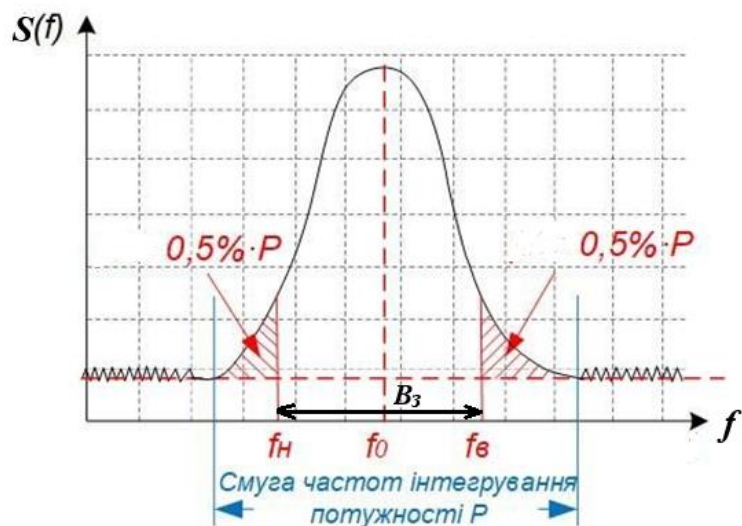


Рисунок 3.4. Ширина займаної смуги частот

Ширина смуги на рівні мінус X, дБ – ширина такої смуги частот, за нижньою та верхньою границями яких будь-яка дискретна складова спектра або безперервна спектральна густина потужності принаймні на X, дБ нижче за попередньо визначений опорний рівень 0 дБ (див. рис.3.5).

Контрольна ширина смуги частот – ширина смуги частот, за нижньою та верхньою границями яких будь-яка дискретна складова спектра або безперервна спектральна густина потужності повинна мати ослаблення не менше, ніж на 30 дБ відносно рівня, прийнятого за 0 дБ.

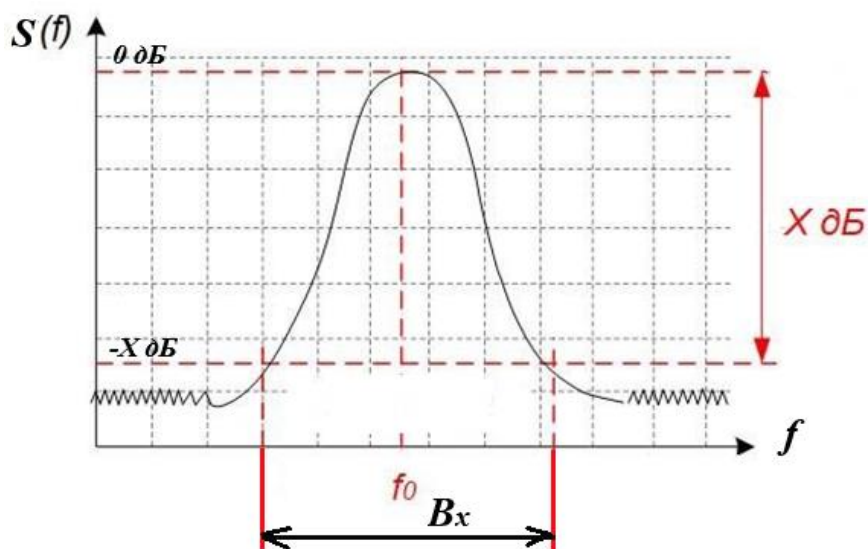


Рисунок 3.5. Ширина смуги частот на рівні мінус X, дБ

У Рекомендації МСЕ-R SM.443 пропонується, щоб станції контролю за використанням спектра тимчасово застосовували для оцінки ширини смуги метод, що полягає у вимірі ширини смуги на рівні 26 дБ (тобто ширина смуги на рівні X , дБ при $X = 26$). Рівень “ X , дБ”, виміряний по відношенню до нульового рівня, може бути іншим в залежності від класу випромінювання.

Сучасні вимірювальні/контрольні приймачі ґрунтуються на цифровій обробці сигналу. Використання цієї технології дозволяє визначати ширину смуги обома методами – методом “ X , дБ” або $\beta\%$. Метод $\beta\%$ передбачає вимірювання ширини смуги незалежно від модуляції сигналу. Тому його слід прийняти як кращий метод, особливо при вимірювання ширини смуги цифрових сигналів, коли їх технічне впізнання неможливе, і в випадку низьких відносин S/N . Однак у випадках завад виміряні значення методом “ X , дБ” можуть бути набагато більш підходящими.

Присвоєна ширина смуги частот – смуга частот, в якій дозволено випромінювання станції (передавача радіоелектронного засобу).

Розрізняють два основні підходи щодо оцінки ширини займаної смуги частот радіовипромінювання:

- пряма оцінка ширини смуги частот шляхом її безпосереднього вимірювання;
- побічна (непряма) оцінка ширини смуги частот.

Безпосереднє вимірювання ширини займаної смуги частот найчастіше проводять за критерієм відношення потужностей (енергетичний критерій) або за критерієм X , дБ («рівневий» критерій) (рис. 3.4, 3.5).

Побічна оцінка ширини займаної смуги частот радіовипромінювання базується на її визначенні за результатами вимірювань параметрів радіовипромінювань, що залежать від ширини цієї смуги частот. Ці методи базуються на залежності ширини займаної смуги частот від інших параметрів радіовипромінювань, таких як, наприклад, рівня затухання спектра поза смугою частот, середньоквадратичного значення девіації частоти сигналу, часу наростання імпульсу, тощо.

3.3. Контроль позасмугових та побічних випромінювань

Радіочастотний контроль позасмугових та побічних випромінювань необхідний для вирішення задач ЕМС та визначення відповідності параметрів засобу радіозв'язку, що випробовується, заявляється або розроблюється, вимогам нормативно-технічної документації.

Методика вимірювання параметрів позасмугових випромінювань базується на вимірюванні ширини смуги частот на декількох рівнях X , дБ із наступним порівнянням отриманих значень з нормативними, що викладені в [14] та [16]. У цих нормативних документах для ряду радіовипромінювань вимоги до значень ширини смуги частот на рівнях мінус 40, мінус 50 та мінус 60 дБ викладені у вигляді розрахункових формул (аналогічно формулам для розрахунків ширини контрольної та необхідної смуг частот на основі параметрів модуляції).

3.4. Вимірювання рівня сигналу

Хоча в багатьох випадках станціям контролю за використанням спектра потрібна інформація про:

- напруженості поля E або
- густину потоку потужності (г.п.п.) РЧ-випромінювання, єдиним

параметром, який може бути виміряний безпосередньо, є ***рівень РЧ-сигналу*** як

- напруга сигналу на вході приймача U або
- потужність сигналу на вході приймача P .

Напруженість поля може бути отримана розрахунковим шляхом результату вимірювання рівня.

Згідно дослідженням МСЕ розподіл миттєвих значень рівня сигналу, зазвичай, відповідає логарифмічно-нормальному закону і має дуже великий динамічний діапазон – понад 195 дБ (від -165 дБм до $+30$ дБм).

Вимірювання рівня сигналу та контроль напруженості поля, як правило, проводиться з метою:

- визначення зони покриття (обслуговування) базової станції (радіопередавача);
- визначення рівня електромагнітного поля сигналу та ефективності передавача радіосистеми (наприклад, передавача для певної служби);
- визначення ступеню впливу завад від певного навмисного джерела радіосигналів;
- визначення рівнів поля сигналів та впливу радіозавад, що були викликані ненавмисними випромінюваннями, джерелом яких може бути обладнання, що випромінює електромагнітну енергію, і оцінювання ефективності заходів по придушенню цих завад;
- оцінювання рівнів небезпечних іонізуючих випромінювань з метою забезпечення санітарних норм;

– забезпечення виконання відповідних положень Регламенту радіозв'язку.

Вимірювальні приймачі та аналізатори спектру, як правило, здатні інтерпретувати рівень РЧ-сигналу або давати його вагову оцінку за допомогою різних детекторів вимірювальних. Хоча миттєва амплітуда РЧ-сигналу постійно змінюється, детектор відстежує миттєву амплітуду РЧ-сигналу протягом певного часу (час виміру) та відображає єдине значення як результат. Нижче перераховані найважливіші детектори:

– *Піковий детектор (P_k)*

Піковий детектор вибирає найвище зі всіх значень амплітуди РЧ-сигналу часу виміру та відсікає всі інші.

– *Середньоквадратичний детектор (RMS)*

На основі всіх миттєвих значень рівня РЧ-сигналу середньоквадратичний детектор обчислює середню потужність. Це еквівалентно тепловій потужності РЧ-сигналу.

– *Детектор середнього значення (AV)*

На основі всіх миттєвих значень рівня РЧ-сигналу детектор AV обчислює середню вхідну напругу.

– *Квазипіковий детектор (QP)*

Квазипіковий детектор інтегрує всі миттєві значення рівня РЧ-сигналу, діючи в якості схеми з ваговою обробкою сигналів, із заданим часом підйому та спаду для імпульсних сигналів.

– *Детектор вибірок (SA)*

Такий детектор найчастіше є стандартним у аналізаторах спектру. Для аналізаторів спектра з розгорткою часом вимірювання на кожній частоті є час, необхідний для сканування від однієї точки відображення до наступної (час сканування/кількість точок) відображення на осі X). З усіх доступних миттєвих значень рівня у цей період часу вибирається лише перший, проте інші відсікаються.

Важливо розуміти, що пікові та середньоквадратичні детектори відображають ефективний рівень РЧ-сигнала. Це означає, що показання пікового детектора відображають середньоквадратичне значення синусоїдального сигналу, що має такий же піковий рівень, як і сигнал, що вимірюється, тобто $U/\sqrt{2}$.

Методика вимірювання напруженості поля, що представлена в Рекомендації МСЕ – Р SM.378-7, базується, головним чином, на визначенні реакції антени на електричні або магнітні поля, які на неї діють. Оскільки певний рівень напруженості поля E наводить в антені відповідне значення

напруги U , то реакцію антени на електромагнітне поле можна виявити, наприклад, за допомогою з'єднаного з нею радіоприймача, а саме – через напругу на його вході.

На практиці напруженість поля характеризують логарифмічною одиницею виміру – дБ(мкВ/м), тобто оцінюють у децибелах відносно рівня 1 мкВ/м, хоча для стислості часто вказують розмірність лише в децибелах.

На частотах понад 1 ГГц більш практичним є вимірювання густини потоку потужності, яка характеризує ефективність напруженості поля електромагнітного випромінювання.

Одиницею виміру густини потоку потужності є Вт/м², хоча на практиці частіше вживають логарифмічну одиницю – дБ (пВт/м²), тобто оцінюють у децибелах відносно $1 \cdot 10^{-12}$ Вт/м².

Рівні напруженості поля вимірюються з використанням антен з відомими показниками ефективності їхньої роботи. Ефективність (ККД) K_e електричної приймальної антени (діюча висота антени) – це напруженість електричного поля E плоскої хвилі, поділена на напругу на виході антени U_0 при її номінальному опорі навантаження (яке зазвичай дорівнює 50 Ом):

$$K_e = E/U_0. \quad (3.3)$$

Аналогічно, ефективність магнітної петльової антени – це напруженість магнітного поля H плоскої хвилі, поділена на напругу на виході антени U_0 при її номінальному опорі навантаження (зазвичай дорівнює 50 Ом).

$$K_i = H/U_0. \quad (3.4)$$

Залежність між ефективністю електричних та магнітних антен у дальній зоні і у вільному просторі виводиться так:

$$K_e = 120 \cdot \pi \cdot K_h, \text{ або } K_e = K_h + 51,5 \text{ дБ/(м)}. \quad (3.5)$$

де $Z_0 = 120 \cdot \pi \approx 377$ Ом – хвильовий опір вільного простору ($H = E/377$ Ом).

Нерідко замість значення ефективності антени (або діючої висоти) вказується коефіцієнт посилення антени G відносно ізотропної антени. Залежність між коефіцієнтом посилення ізотропної антени G та ефективністю антени K_e визначається з формули

$$K_e = \frac{1}{\lambda \sqrt{G}} \cdot \sqrt{\frac{4\pi Z_0}{R_N}} = \frac{9,73}{\lambda \sqrt{G}} = \frac{f_{\text{МГц}}}{30,81 \sqrt{G}}, \quad (3.6)$$

де $R_N = 50$ Ом.

Оскільки значення напруги і напруженості поля зазвичай вимірюються як рівні дБ(мкВ) і дБ(мкВ/м), то значення ефективності антени також наводяться в їхній логарифмічній формі, де:

$$k_e = 20 \cdot \lg K_e \quad \text{і} \quad g = 10 \cdot \log G, \quad (3.7)$$

ефективність антени K_e вказується в дБ(м⁻¹) як

$$k_e = -29,77_{\text{дБ}} - g + 20 \cdot \lg (f_{\text{МГц}}), \quad (3.8)$$

і таким чином рівень напруженості поля e може бути виміряний з рівня напруги на виході антени v_o з використанням формули

$$e_{[\text{дБ(мкВ/м)}]} = v_{o[\text{дБ(мкВ/м)}]} + k_{e[\text{дБ/м}]}. \quad (3.9)$$

Оскільки k_e зазвичай не включає ослаблення a_c фідерного кабелю між антеною та вимірювальним приймачем, то це рівняння має бути розширено (у разі v_o – напруга на вході вимірювального приймача) до

$$e_{[\text{дБ(мкВ/м)}]} = v_{o[\text{дБ(мкВ/м)}]} + k_{e[\text{дБ/м}]} + a_{c[\text{дБ}]}. \quad (3.10)$$

Приклад: на частоті 100 МГц антена має посилення 6,5 дБ та відповідно ефективність 3,7 дБ (вираз 3.8). При вхідному напрузі $v_o = 33,4$ дБ(мкВ) та ослабленню кабелю $a_c = 1,1$ дБ напруженість поля складе 38,2 дБ(мкВ/м).

На вищих частотах, особливо **на частотах вище 1 ГГц**, вимірювання **густини потоку потужності** (S) у багатьох випадках дає більш звичну інформацію, що стосується ефективної напруги поля випромінювання. Одиниця вимірів густини потоку потужності – ват на квадратний метр (Вт/м²).

Для лінійно поляризованої хвилі у вільному просторі $S = E^2/Z_0$, де: E – напруженість поля (В/м);

Z_0 – величина повного опору вільного простору (377 Ом).

Визначення ефективної площі антени A_e для вимірювання густини потоку потужності дається в такий спосіб.

Якщо P – потужність, що приймається в Вт, S – густина потоку потужності у Вт/м², а G – коефіцієнт посилення відносно ізотропної антени в дБ, то ефективна площа антени, A_e , виражається як

$$A_e = P/S \frac{\lambda^2 \cdot G}{4 \cdot \pi} = \frac{(84,62 \text{ м})^2}{(f_{\text{МГц}})^2} G, \quad (3.11)$$

де $S = P/A_e$.

У логарифмічних величинах дана ефективна площа антени a_e , дБ(м²), має вид (використовуючи $p = 10 \cdot \lg P$ та $s = 10 \cdot \lg S$):

$$a_e [\text{дБ (м}^2\text{)}] = 38,55 + g - 20 \cdot \lg f_{[\text{МГц}]}. \quad (3.12)$$

Таким чином, $S_{[\text{дБ(Вт/м}^2\text{)}]} = p_{[\text{дБ(Вт)}]} - a_{e[\text{дБ(м}^2\text{)}]}$.

Якщо прийнята потужність p задана дБм, щільність потоку потужності s , дБ(Вт/м²), можливо отримана за допомогою формули

$$S_{[\text{дБ(Вт/м}^2\text{)}]} = p_{[\text{дБм}]} - a_{e[\text{дБ(м}^2\text{)}]} - 30 \text{ дБ}.$$

Оскільки a_e зазвичай не включає ослаблення a_e фідерного кабелю між антеною та вимірювальним приймачем, то дане рівняння має бути розширено до

$$S_{[\text{дБ(Вт/м}^2\text{)}]} = p_{[\text{дБм}]} - a_{e[\text{дБ(м}^2\text{)}]} - 30 \text{ дБ} + a_{c[\text{дБ}]}. \quad (3.13)$$

Приклад: якщо антена має посилення $g = 15$ дБ на частоті 1 ГГц, ефективна площа a_e складає $-6,45$ дБ(м²). При прийнятій потужності $-73,6$ дБм та ослабленні кабелю $3,5$ дБ густина потоку потужності s становитиме $-106,6$ дБ(Вт/м²) або $+13,4$ дБ(пВт/м²).

ПРИМІТКА. Іноді корисно обчислювати ефективну площу із заданого значення ефективності антени чи навпаки. Для цієї мети застосовуються наступні рівняння (з кількісними значеннями, визначеними вище):

$$A_e = \frac{1}{K_e^2} \frac{Z_0}{R_N} \quad \text{і} \quad a_e (\text{дБ (м}^2\text{)}) = 8,77 \text{ дБ} - k_e (\text{дБ/м}) \quad (3.14)$$

Вимірювання напруженості поля виконується з використанням наступних засобів вимірювальної техніки та метрологічного обладнання:

- 1) каліброваної антени з каліброваним фідером;
- 2) ПРМ або аналізатора спектра;
- 3) джерела каліброваного сигналу.

Сучасні цифрові абонентські засоби радіозв'язку мають функцію вимірювання рівня сигналу, що, наприклад, дозволяє застосовувати їх для визначення зон покриття (Додаток Е).

Контрольні питання

1. Поняття частоти радіовипромінювання.
2. Яка основна мета вимірювання радіочастоти?
3. Які існують методи вимірювання частоти?
4. У чому полягає відмінність спектрального методу вимірювання частоти для вузькосмугових та складних широкосмугових сигналів?
5. Дати визначення необхідної ширини смуги радіочастот.
6. Дати визначення ширини зайнятої смуги частот.
7. Ширина смуги на рівні X , дБ.
8. Контрольна ширина смуги радіочастот.
9. Ширина основної смуги радіочастот.
10. Присвоєна ширина смуги радіочастот.
11. Спектральний метод вимірювання радіочастоти.
12. Метод вимірювання частоти з використанням швидкого перетворення Фур'є.
13. Чим визначається рівень сигналу?
14. Мета контролю напруженості електромагнітного поля.
15. Методи вимірювання напруженості електромагнітного поля.

4. Пеленгування джерела радіовипромінювання

У зв'язку з інтенсивним розвитком РЕЗ та систем, передача інформації в яких здійснюється за допомогою електромагнітних хвиль у просторі, все більше підвищується актуальність *задачі виявлення та ідентифікації джерел радіовипромінювання (ДРВ)*, яка вирішується по відношенню до сигналів із невідомими параметрами.

Ідентифікація діючого ДРВ може бути полегшеною, якщо є можливість встановити його місцезнаходження за допомогою *радіопеленгації* – процесу визначення напрямку (пеленгу) на ДРВ із використанням характеристик поширення радіохвиль.

Радіопеленгація базується на властивостях поширення радіохвиль по найкоротшому шляху з певною швидкістю і на принципах направленого радіоприйому.

На рисунку 4.1 зображені основні типи траєкторій, по яким можуть прийти до радіопеленгатора сигнали джерела випромінювання, що досліджується.

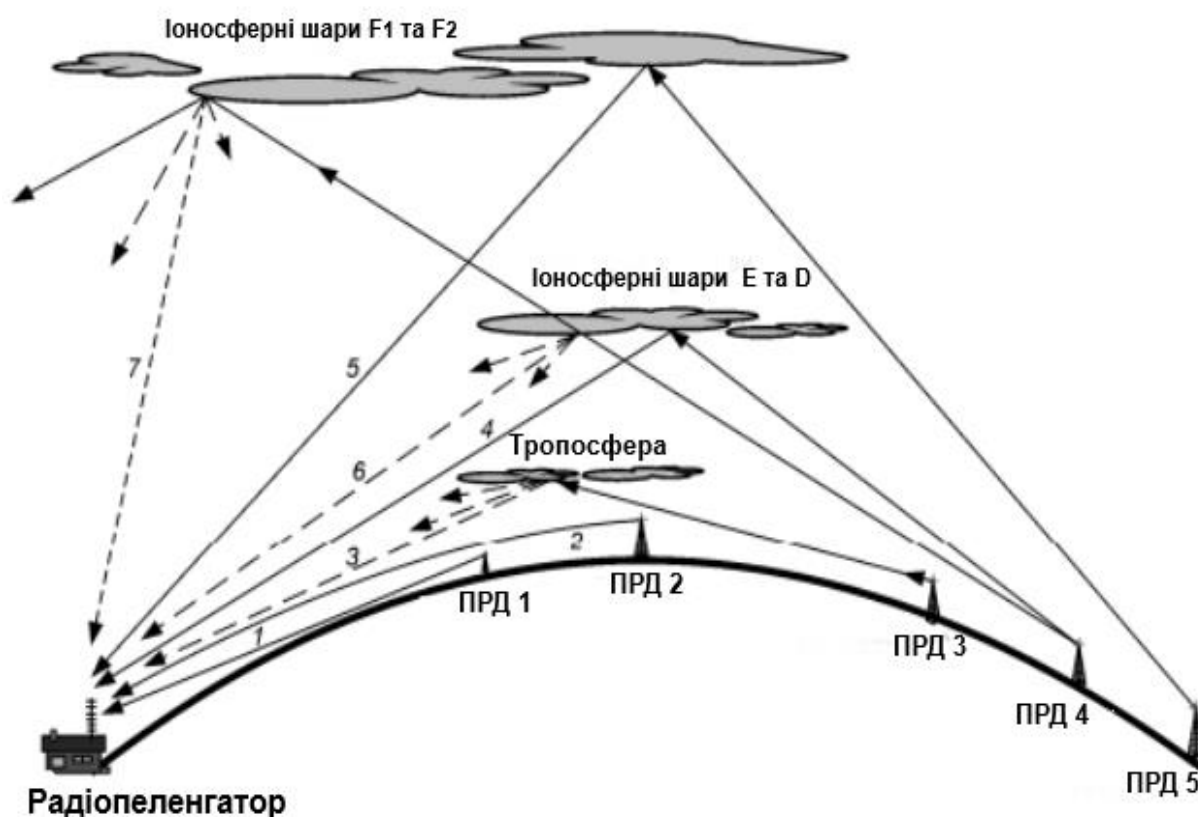


Рисунок 4.1. Основні типи траєкторій при розповсюдженні радіохвиль різних діапазонів від передавачів, які розташовані на земній поверхні

Коментар до рисунку 4.1:

- 1 – траєкторія прямої видимості (для всіх діапазонів);
- 2 – траєкторія з огинанням навколо Землі (для діапазонів НЧ-ВЧ – земна хвиля; для ДВЧ-УВЧ – з дифракцією);
- 3 – тропосферне розсіювання (для ДВЧ-УВЧ);
- 4 – відбиття від нижніх шарів іоносфери (для СЧ-ДВЧ);
- 5 – відбиття від верхніх шарів іоносфери (для ВЧ-ДВЧ);
- 6 – розсіювання від нижніх шарів іоносфери (для ВЧ-ДВЧ);
- 7 – розсіювання від верхніх шарів іоносфери (для ВЧ-ДВЧ).

При проведенні радіочастотного контролю радіопеленгація стає необхідною для:

- визначення місцезнаходження передавача у разі лиха;
- визначення місцезнаходження ДРВ або несанкціонованого РЕЗ;

- визначення місцезнаходження РЕЗ або РВП, який заважає нормальній роботі іншим РЕЗ, і не може бути ідентифікований іншими засобами;
- визначення місцезнаходження джерел радіозавад штучного походження, таких як, наприклад, електроустановки, пошкоджені ізолятори на високовольтних лініях електропередач тощо;
- ідентифікації як відомих, так і невідомих РЕЗ.

4.1. Методи пеленгації та основні типи радіопеленгаторів

Функціонально будь-який радіопеленгатор складається з:

- антенної системи;
- радіоприймального обладнання (або аналізатора спектру);
- пристрою оброблення даних і визначення пеленга.

Залежно від вимог і завдань пеленгування до складу радіопеленгаторів можуть входити додаткові пристрої:

- високочастотний антенний комутатор елементів АС;
- навігаційна система для визначення власного місцезнаходження та орієнтації радіопеленгатора;
- пристрої дистанційного управління радіоканалом або кабельними лініями зв'язку;
- пристрої для калібрування радіоприймальних трактів;
- пристрої тестування працездатності складників радіопеленгатора тощо.

До основних параметрів та властивостей пеленгатора можна віднести:

- точність визначення азимута;
- чутливість;
- стійкість до спотворень фронту хвилі;
- нечутливість до деполяризації;
- завадозахищеність;
- швидкість отримання результату.

За робочим діапазоном частот пеленгаторне обладнання поділяється, як правило, на обладнання для діапазонів:

- СЧ/ВЧ (наприклад, для смуг частот від 300 кГц до 30 МГц);
- ДВЧ/УВЧ (наприклад, для смуг частот від 20 МГц до 3 ГГц).

Пеленгаторна АС є одним із найважливіших складників радіопеленгаторного. обладнання, оскільки від неї суттєво залежить

точність радіопеленгації. Зокрема, вона визначає точність вимірювання пеленгів за наявності багатопроменевого поширення радіохвиль. У зв'язку з цим *важливу роль грає апертура антенної решітки*. Не всі методи радіопеленгації дозволяють використовувати широкоапертурні антени, але у випадку їх застосування вони забезпечують отримання найточніших результатів пеленгування.

Кожна АС складається з певної кількості (мінімум трьох) антенних елементів, розміщених за певною конфігурацією в залежності від робочого діапазону частот і методу пеленгування. Для діапазону ВЧ загальноприйнятні кільцеві, схрещені та "L"-подібні лінійні антенні решітки. В діапазоні ДВЧ/УВЧ, *в основному, застосовують кільцеві антенні решітки*. В якості антенних елементів можуть використовуватися рамкові антени, конічні та біконічні вібратори, дискоконусні антени, штирові вібратори, направлені антени типу логоперіодичної або хвильового каналу тощо. Нині вважається, що для високої точності пеленгування (не гірше 1°) та широкого діапазону робочих частот (наприклад, від 1 МГц до 30 МГц або від 20 МГц до 1300 МГц) *достатньо мати 9 антенних елементів*, хоча їхня кількість може бути більшою.

Нині в сучасних радіопеленгаторах застосовують ПРМ, які мають *обмежену кількість каналів, як правило, від одного до трьох*. Якщо антенних елементів більше, ніж каналів ПРМ або використовується один одноканальний ПРМ, то антенні елементи послідовно підключаються до ПРМ за допомогою високочастотного антенного комутатора.

З виходу РПП сигнали на проміжній частоті поступають на вхід пристрою оброблення даних і визначення (індикації) пеленга, в якому проводиться їх аналого-цифрове перетворення й визначення за отриманими вимірами азимута на ДРВ за певним методом.

Метод пеленгування може визначати або можливість охоплення робочого діапазону частот лише однією антенною системою або необхідність його розмежування на піддіапазони частот з відповідними окремими антенними решітками.

Для визначення місцезнаходження ДРВ найчастіше застосовуються радіопеленгатори, основні з яких наведені на рисунку 4.2.



Рисунок 4.2. Загальна класифікація радіопеленгаторів

4.2. Амплітудні радіопеленгатори

Принцип роботи **амплітудних радіопеленгаторів** базується на аналізі амплітудного розподілу електромагнітного поля, створеного контрольованим сигналом на розкритті приймальної антени пеленгатора. При цьому розрізняють три різновиди амплітудного способу пеленгування:

- за максимальним значенням сигналу (рис 4.3);
- за мінімальним значенням сигналу (рис 4.4);
- на основі порівняння сигналів (рівносигнальний спосіб) (рис 4.5).

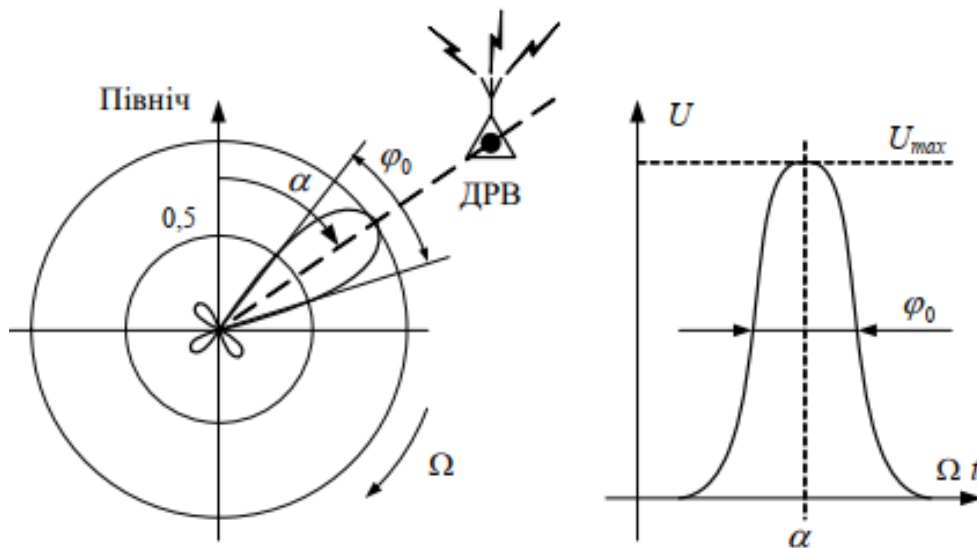


Рисунок 4.3. Принцип пеленгування за максимальним значенням сигналу

В разі пеленгування **за максимальним значенням сигналу** пеленг на ДРВ визначається за максимумом ДН обертової АС (рис. 4.3).

Відлік кутової координати ДРВ проводиться в момент, коли рівень напруги на виході ПРМ, до якого підключена АС пеленгатора, стає максимальним. При цьому фазовий фронт радіохвилі, що надходить на антену радіопеленгатора, перпендикулярний її площині розкриття, а напрямком максимуму ДН антени співпадає з напрямком на ДРВ.

У процесі пеленгування антену пеленгатора або повертають до моменту отримання максимального значення вихідної напруги РПП або обертають її безперервно. В першому випадку просторове положення ДН антени пеленгатора змінюється і напрямком її максимуму співпадає з напрямком на ДРВ. Пеленг зчитується за кутовим положенням ДН.

За цим способом забезпечується значна дальність пеленгування, оскільки пеленгаторний ПРМ працює з великим рівнем сигналу. Основні переваги способу:

- 1) незначний вплив шумів на точність пеленгування, оскільки в напрямку максимального значення ДН антени приймається максимально можлива енергія сигналу, що пеленгується;
- 2) можливість розрізнення в одному частотному каналі декількох ДРВ із різними азимутами;
- 3) нескладна конструктивна реалізація пеленгатора, оскільки потребується одноканальний ПРМ;
- 4) низька вартість радіопеленгатора.

Недолік способу пеленгування за максимальним значенням сигналу – низька точність пеленгування через малу кривизну ДН поблизу її максимуму. Точність визначення пеленга становить близько однієї п'ятої від ширини ДН на рівні половинної потужності $\Delta\alpha \approx 0,2\varphi_0$. Цей спосіб застосовують для роботи в дециметровому та сантиметровому діапазонах, в яких можна побудувати гостро направлені антени.

Спосіб пеленгування **за мінімальним значенням сигналу** застосовується у випадках, коли можна сформувати ДН АС пеленгатора з явно вираженим мінімальним значенням прийнятого сигналу, причому він повинен бути єдиним (рис. 4.4 а). Таку ДН може мати окрема АС, крім цього її можна також сформувати шляхом застосування пари ідентичних антен, кожна з яких має вузьку ДН (рис. 4.4, в). Пеленгування ДРВ проводиться шляхом обертання АС до положення, за якого рівень сигналу на виході РПП сягає мінімального значення (рис. 4.4, б, г).

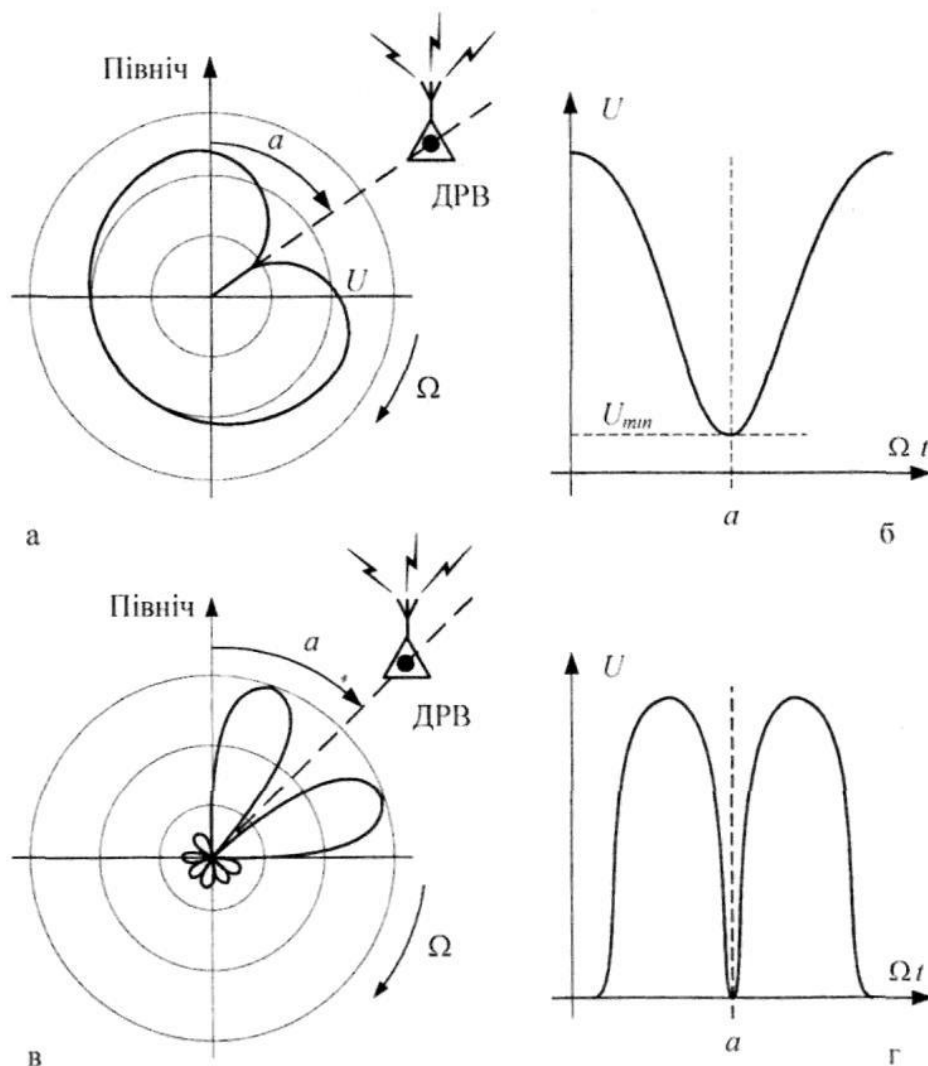


Рисунок 4.4. Принцип пеленгування за мінімальним значенням сигналу

В разі пеленгування за цим способом досягається більша точність вимірювання пеленга, оскільки ДН антени поблизу свого мінімального значення має більшу крутизну залежності, тобто мінімум – досить гострий: $\Delta\alpha \approx 0,1\varphi_0$.

Недолік способу пеленгування за мінімальним значенням сигналу – невисока точність пеленгування в разі низького відношення сигнал/шум, крім цього, дальність дії пеленгаторів, які працюють за цим способом, менша, ніж у пеленгаторів, які працюють за максимальним значенням сигналу.

Рівносигнальний спосіб – компромісний між відміченими раніше, оскільки усуває їхні недоліки. Він реалізується за рахунок застосування двох направлених ідентичних антен, ДН яких дещо розвернуті в азимутальній площині (рис. 4.5, а), при цьому пеленг на ДРВ визначається шляхом порівняння сигналів на виході ПРМ радіопеленгатора.

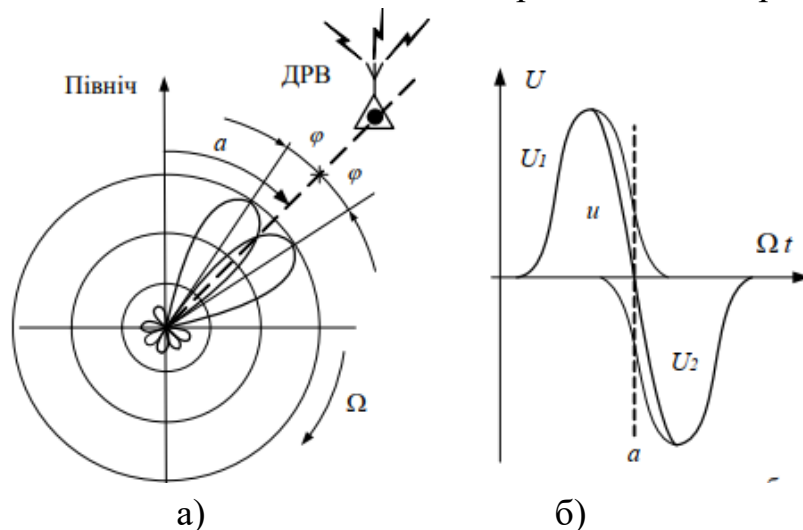


Рисунок 4.5. Принцип пеленгування за рівносигнальним способом

Істинним напрямком на ДРВ вважається такий, що знаходиться між двома максимальними значеннями ДН антен. Оскільки ці антени ідентичні, то їхні ДН однакові і розвернуті на певний кут, тому вихідні сигнали антен можна описати функціями $F(\alpha+\varphi)$ і $F(\alpha-\varphi)$. Напрямок, що відповідає куту α перетину ДН, називається рівносигнальним. Вихідні сигнали антен, пройшовши через фільтри, підсилювачі й детектори радіопеленгатора, порівнюються з протилежними знаками (рис. 4.5, б), у результаті чого залежність амплітуди результуючої напруги від кутового напрямку надходження радіохвилі (пеленгаційна характеристика радіопеленгатора) описується виразом

$$U=U_1(\alpha)-U_2(\alpha) = k[F(\alpha + \varphi)-F(\alpha - \varphi)] \quad (4.1)$$

Ця функція за умови симетричності ДН антен буде непарною.

Під час пеленгування за цим способом, на відміну від пеленгування за мінімальним значенням сигналу, завжди можна впевнитися в наявності сигналу пеленгованого ДРВ, аналізуючи вихідний сигнал будь-якої з антен. Внаслідок непарності пеленгаційної характеристики та лінійності її центральної частини в разі навіть незначного відхилення рівносигнального напрямку від напрямку на ДРВ полярність напруги буде відповідати знаку знаку відхилення, а її рівень - значенню відхилення.

Перевага рівносигнального способу – більші інструментальна точність і чутливість, ніж у пеленгаторів, які працюють за мінімальним значенням сигналу, забезпечується точність пеленгування $\Delta\alpha \approx 0,05 \varphi_0$.

До загальних недоліків радіопеленгаторів із обертовими антенами відносяться: вузький робочий частотний діапазон (коефіцієнт перекриття, як правило, не більший 10), тривалий час реакції (визначається часом оберту антени), складний механічний привід АС, низька швидкість огляду, крім цього ці пеленгатори неефективні у разі пеленгування короточасних сигналів, тривалість яких менша періоду обертання антени.

Незважаючи на відмічені недоліки амплітудні способи досі застосовуються, оскільки використання інших часто вимагає суттєвих фінансових затрат і призводить до значних габаритних розмірів і маси пеленгаторів. Особливо ефективні амплітудні способи пеленгування в діапазоні НВЧ, тому *застосовуються в переносних портативних радіопеленгаторах* (приклад наведений на рис. 4.6). Причому найчастіше застосовується спосіб пеленгування за максимальним значенням сигналу, незважаючи на те, що він має найменшу точність пеленгування, оскільки за цим способом можна одночасно з пеленгуванням ДРВ прослуховувати його сигнал.

Застосування режиму горизонтального сканування «HSCAN» у приймачі реального часу R&S PR100 значно полегшує і спрощує для користувача процедуру ручного амплітудного пеленгування радіосигналів, що здійснюється за допомогою комплекту спрямованих антени R&S HE300 оснащених вбудованим компасом і приймальним пристроєм супутникової (GPS).

Для визначення напрямку (пеленгу) на джерело радіовипромінювань, з використанням опції «HSCAN», оператору достатньо зробити один повний оборот спрямованої антени R&S HE300 навколо осі. Результатом є

цифрове та графічне відображення на екрані приладу даних про напрям (пеленгу) на джерело радіовипромінювань.



Рисунок 4.6. Радіоприймач R&S®PR100
с опцією PR100-DF і антеною HE400

Зовнішній вигляд робочого екрану в режимі горизонтального сканування наведено на рис. 4.7.

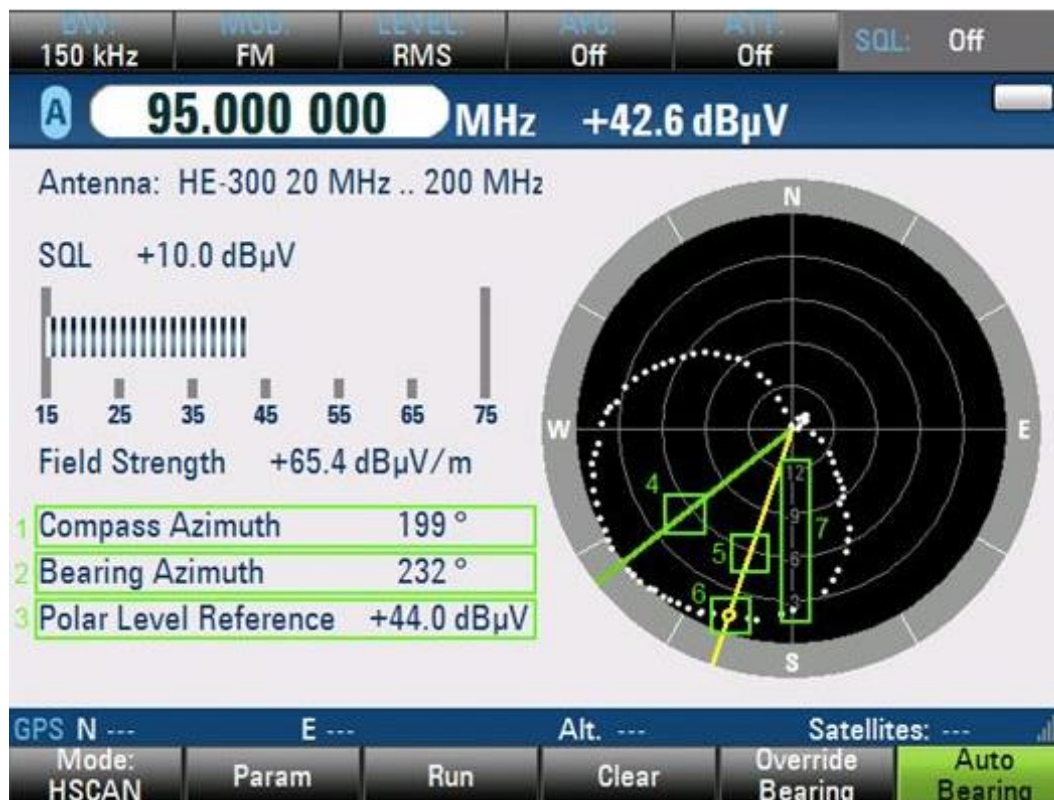


Рисунок 4.7. Вид екрану приймача PR100 в режимі пеленгування
зі спрямованою антеною

Цифрами та піктограмами на рисунку позначені значення наступних параметрів вимірювання та положення об'єктів:

1. Compass Azimuth – поточна орієнтація спрямованої антени (199^0);
2. Bearing Azimuth – певне значення пеленгу на джерело радіовипромінювань (232^0);
3. Polar Level Reference – значення опорного рівня полярної діаграми (+44.0 dBmV);
4. Графічне відображення (зелений промінь) певного значення пеленгу на джерело;
5. Графічне відображення (жовтий промінь) поточної орієнтації спрямованої антени;
6. Точка (на жовтому промені), що відображає рівень сигналу для поточного положення спрямованої антени (значення продубльовано у цифровому вигляді у службовому рядку у верхній частині екрана: + 42.6 dBmV);
7. Шкала параметра “рівень” для полярної діаграми (значення кроку між концентричними колами – 3 дБ).

Графічна інформація, що відображається на екрані приладу, містить виміряну діаграму спрямованості (кардіоїда) з виділеним (обчисленим) значенням максимуму (пеленгу), що відображається у вигляді променя зеленого кольору.

У вигляді променя жовтого кольору відображається інформація про поточний напрямок (орієнтації) спрямованої антени R&S HE300. При збігу жовтого та зеленого променів антена точно спрямована на джерело радіовипромінювань.

Додатково інформація про обчислене значення пеленгу і поточної орієнтації антени відображається в цифровому вигляді.

Горизонтальне сканування може застосовуватися щодо сигналів, як з вертикальною, так і з горизонтальною поляризацією.

Нині досить поширені амплітудні радіопеленгатори **з використанням слабоспрямованих антен**. Антенна система (АС) таких пеленгаторів складається з розміщених по колу певної кількості антенних елементів, кожен з яких має ДН, зображену на рис. 4.8. У процесі роботи антенний комутатор (АК) послідовно підключає виходи антенних елементів до входу ПРМ із частотою комутації F_K . Амплітуда вихідного сигналу ПРМ фіксується пристроєм оброблення даних і визначення пеленга.

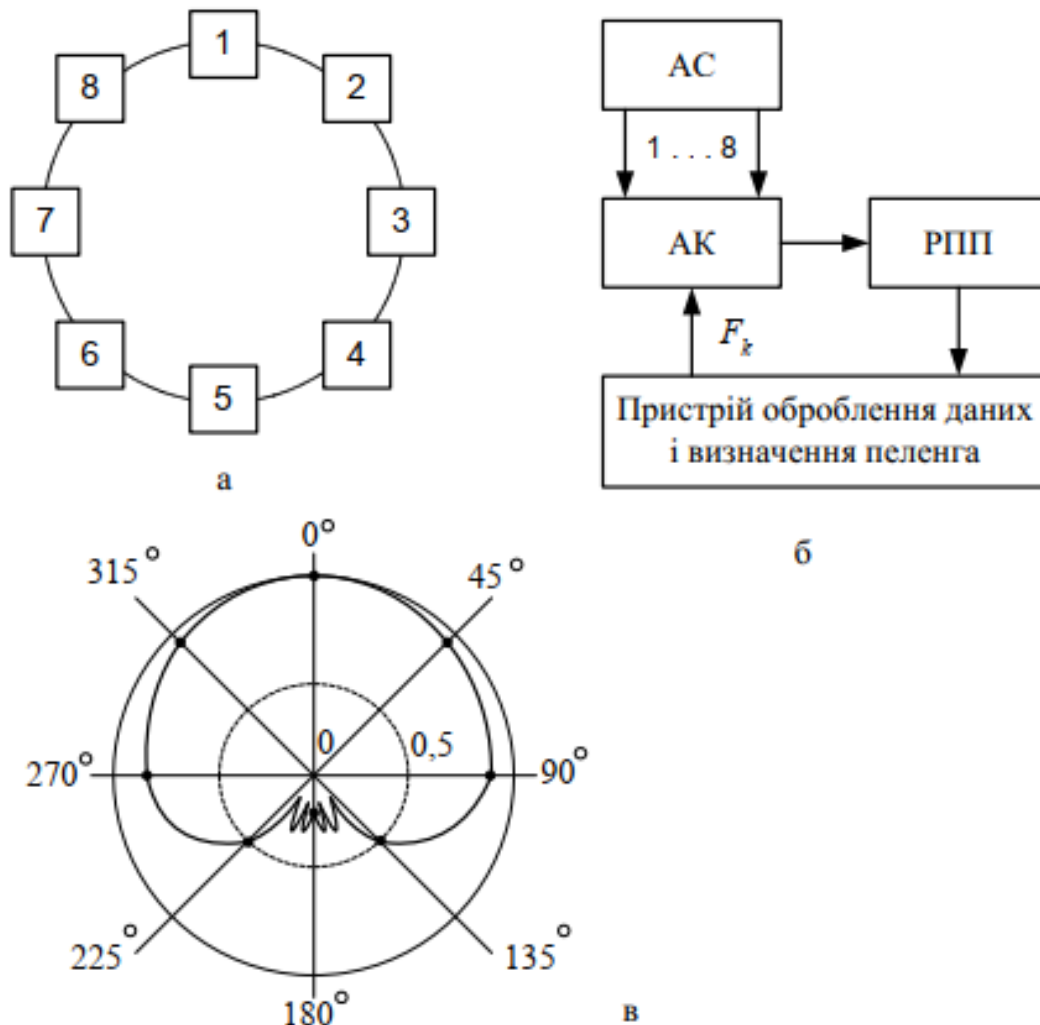


Рисунок 4.8. Амплітудний радіопеленгатор із перемиканням елементів АС:
а – приклад розміщення елементів АС; б – структурна схема радіопеленгатора; в – типова ДН окремого антенного елемента

Для отримання відліку пеленга застосовуються такі методи оброблення результатів:

- виділення з отриманих відліків першої гармоніки f_1 і порівняння її фази з фазою частоти комутації F_k ;
- обчислення координати “центра ваги” ДН за отриманими відліками;
- порівняння дискретних відліків ДН з еталонними для даної частоти й визначення максимуму за методом найменших квадратів.

З наведених методів найефективніший, за відповідної реалізації, метод еталонів, найпростіший – перший варіант, достатньо ефективний та простий – за “центром ваги”.

Радіопеленгатори такого типу досить часто встановлюють на автотранспортних засобах для роботи у верхній частині діапазону УКХ.

На рис. 4.9 наведений приклад пеленгаторний антени та портативного пересувного пеленгатора.



а)



б)

Рисунок 4.9. Приклад пеленгаторний антени а) та портативного пересувного пеленгатора на базі радіоприймача R&S®PR100 с опцією PR100-DF і антеною ADD107 б)

В якості антенних елементів можуть використовуватися пари рамок, пари фазованих вібраторів, положення щілин у стінках хвилеводу щілинної антени тощо. Зрозуміло, що чим більша кількість антенних елементів, тим меншою може бути ширина ДН, щоправда, цей параметр визначається також габаритними розмірами АС, значенням нижньої частоти сигналу та типом антенних елементів.

Основні переваги таких радіопеленгаторів – це простота реалізації та достатня швидкодія.

Основні недоліки:

- жорсткі вимоги до ідентичності антенних елементів, що суттєво впливає на точність пеленгування;
- слабка спрямованість ДН і, як наслідок, поганий захист від когерентної радіозавади та завади в сумісному каналі.

Амплітудні радіопеленгаторні системи типу Эдкока (Н-Еджок) базуються на двох рознесених на відстань не більшу половини довжини хвилі пеленгаторних парах Н-Еджок – вертикальних і протифазно включених вібраторах. Вертикально поляризований сигнал, який приходить з напрямку α , наводить у кожній такій парі електрорушійну силу E , пропорційну $\sin \alpha$. В разі використання двох пеленгаторних пар, розміщених під кутом не більше 90° , напрямок на ДРВ визначається співвідношенням

$$\varphi = \arctg \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi}, \text{ причому } \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} \approx \frac{E_1}{E_2}, \quad (4.2)$$

де E_1, E_2 – амплітуди електрорушійної сили відповідних пеленгаторних пар.

Принцип побудови двоканального амплітудного радіопеленгатора типу Н-Еджок наведений на рис. 4.10.

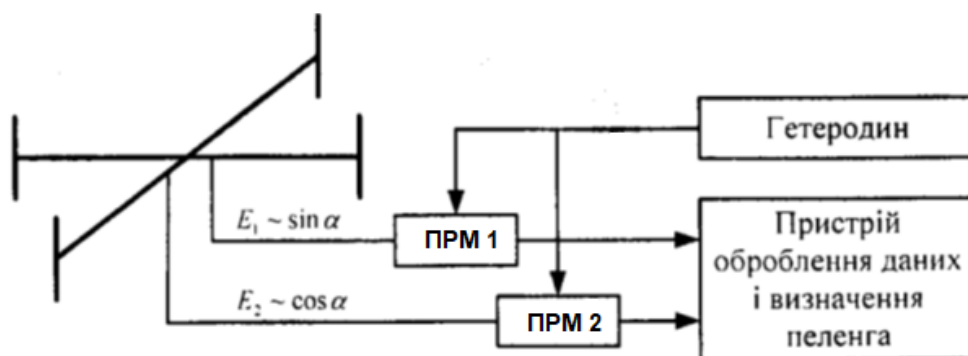


Рис. 4.10. Принцип побудови двоканального амплітудного радіопеленгатора типу Н-Еджок

В радіопеленгаторі використовується двоканальний ПРМ із спільним гетеродином, причому радіоприймальні тракти приймача повинні мати ідентичні комплексні коефіцієнти передавання та фазові зсуви. В разі зміни кута приходу сигналу на 180° фази сигналів E_1 і E_2 змінюються на 90° , що використовується для визначення напрямку на ДРВ, наприклад, шляхом застосування ненаправленої антени та її почергового підключення до одного з радіоприймальних каналів з подальшим обробленням результатів вимірювання, визначенням пеленга та його індикації.

Основні переваги радіопеленгаторів типу Н-Еджок:

- простота реалізації АС;
- достатня швидкодія;
- можливість підвищення точності пеленгування шляхом збільшення кількості пеленгаторних пар.

Основні недоліки:

- необхідність ретельного вирівнювання комплексних коефіцієнтів передавання та фазових зсувів радіоприймальних трактів;
- відсутність селективності за азимутом і відповідно захищеності від дії когерентних завад і завад у сумісному каналі;
- наявність похибок унаслідок не ідентичності пеленгаторних пар.

У сучасних радіопеленгаторах Н-Едкок для обчислення пеленгів використовуються методи цифрової обробки сигналів.

4.3. Фазові пеленгатори

Фазові методи пеленгації базуються на аналізі різниці фаз коливань, прийнятих елементами кругової решітки пеленгаторної антени (набір вібраторів, розташованих по колу).

Цей спосіб пеленгування базується на використанні залежності різниці фаз сигналів, які приймаються двома однаковими антенами (A_1 і A_2 на рис. 4.11), що рознесені в просторі на деяку відстань (базу) d .

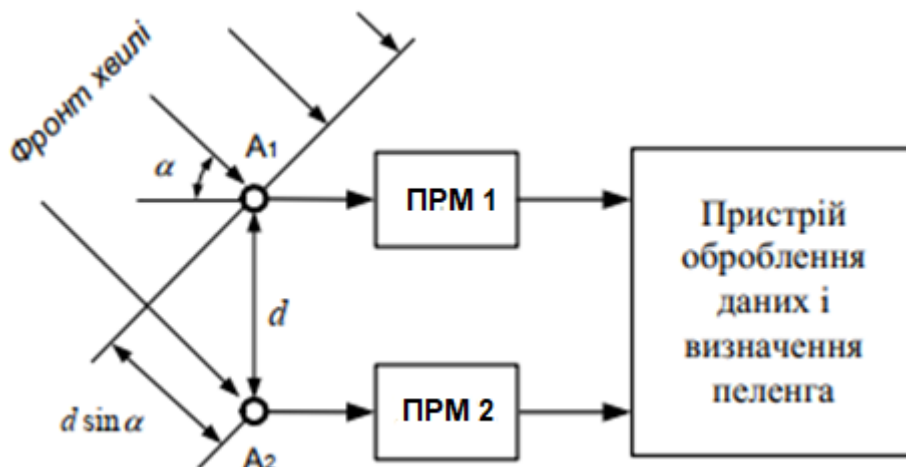


Рисунок 4.11. Принцип фазового способу пеленгування

У загальному випадку фронт електромагнітної хвилі, що приходить під деяким кутом до базової лінії між двома антенами, досягає однієї з антен раніше. Часова затримка приходу хвилі між антенами дозволяє отримати різницю фаз між вихідними напругами цих антен $u_1(t)$ і $u_2(t)$, яка на несучій частоті ω_0 для пеленга α визначається виразом

$$\Delta\varphi = \omega_0 \Delta t = \frac{\omega_0 \cdot t}{c} \sin\alpha, \quad (4.3)$$

де Δt – час затримки надходження сигналів на рознесені антени;

c – швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с).

Звідки можна визначити значення пеленга на ДРВ:

$$\alpha = \arcsin \frac{c \cdot \Delta\varphi}{\omega_0 \cdot d}. \quad (4.4)$$

З виразу (4.4) випливає, що для визначення пеленга на ДРВ потрібно виміряти частоту ω_0 прийнятих сигналів і різницю фаз $\Delta\varphi_0$ цих сигналів у рознесених точках приймання. Але частоту можна й не виміряти у випадку, якщо пеленгатор має здатність обертати базову лінію АС, оскільки у випадку, якщо базова лінія знаходиться на нормалі до напрямку надходження хвилі від ДРВ (дотична до фронту падаючої хвилі), то $\sin \alpha = \Delta\varphi_0 = 0$ незалежно від частоти сигналу.

Якщо використовувати лише дві антени, то це може привести до неоднозначного визначення напрямку на ДРВ, оскільки така ж сама фазова затримка на виходах антен може бути отримана від сигналу, що надходить з протилежного напрямку. Для виключення цієї неоднозначності використовується друга пара антен, базова лінія якої розміщена перпендикулярно до базової лінії першої пари антен. Порівнюючи відносні фази на виходах цих пар антен можна визначити істинний напрямок приходу хвилі. Крім цього для виключення неоднозначності відліку пеленга використовують АС з декількома відмінними за розмірами базами.

Класичні фазові радіопеленгатори використовують механічний рух вертикального вібратора по колу і порівняння фази сигналу на ньому з фазою сигналу, що приходить на нерухомий вібратор, розміщений у центрі кола. Максимальне значення різниці фаз відповідає напрямку приходу сигналу. В сучасних радіопеленгаторах замість механічного колового руху вертикального вібратора застосовують дискретне перемикання розташованих кільцем антенних елементів (рис. 4.12). Крім зазначеної АС до складу радіопеленгатора такого типу входять двоканальний ПРМ із спільним гетеродином, обмежувач амплітуди сигналу (для виключення впливу амплітудної модуляції), суматор сигналів з обох ПРМ, фазовий детектор і пристрій оброблення даних та індикації пеленга.

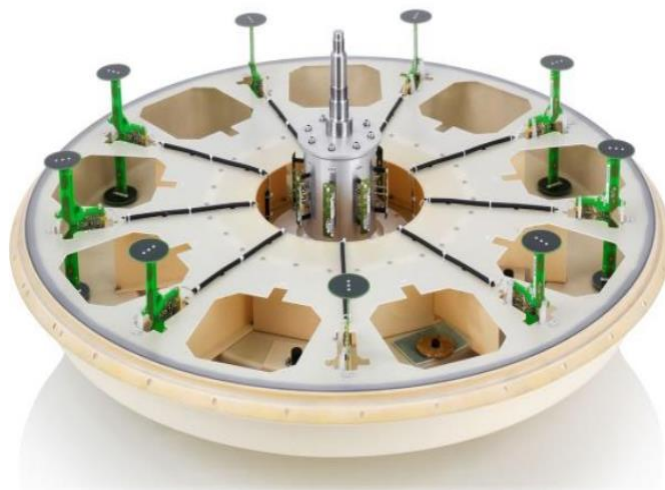


Рисунок 4.12. Реалізація фазового методу пеленгації

До переваг фазових пеленгаторів відносять: 1) простота АС; 2) досить простий алгоритм оброблення сигналів у процесі отримання відліку пеленга; 3) відсутність впливу наявної амплітудної модуляції. Основним недоліком є низька стійкість до впливу когерентних радіозавад і завад у сумісному каналі внаслідок застосування ненаправлених антен.

Доплерівські радіопеленгатори базуються на використанні викликаного ефектом Доплера фазової модуляції, яка виникає під час колового руху приймальної антени. Суть ефекту Доплера полягає в тому, що відносне (взаємне) переміщення приймача і передавача призводить до зміни фази (а отже, і частоти) коливань, що приймаються, в результаті чого їхня частота стає відмінною від частоти випромінених коливань (рис. 4.13).

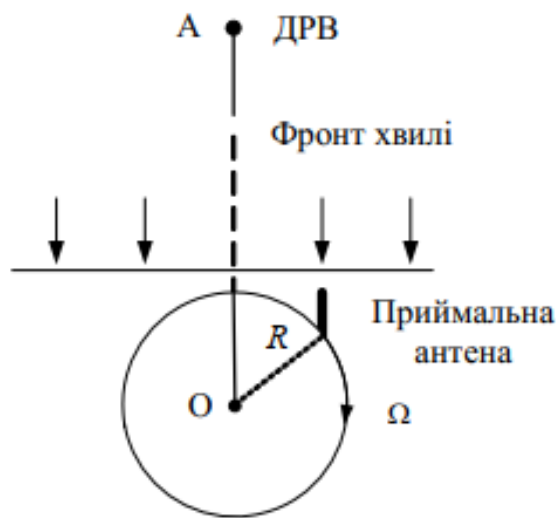


Рисунок 4.13. Процес зміни фази коливань у радіопеленгаторі з використанням ефекту Доплера

Якщо ненаправлена в горизонтальній площині приймальна антена (наприклад, вертикальний вібратор) обертається колом з кутовою частотою Ω у полі, створеному віддаленим передавачем електромагнітних коливань з частотою ω_0 , то зумовлений рухом антени приріст фази електрорушійної сили, що в ній наводиться, від'ємний у проміжки часу, коли антена віддаляється від ДРВ, або додатний, коли антена наближається до ДРВ, і дорівнює нулю в моменти, коли напрямок руху антени перпендикулярний напрямку поширення хвилі (рис. 4.11). Причому, в першому випадку проекція вектора швидкості руху антени на лінію АО збігається з напрямком поширення радіохвилі.

Якщо фазу електрорушійної сили, що наводиться в антені, розміщеній у центрі кола (точка О), прийняти за початкову і рівну

$$\varphi_0 = \omega t, \quad (4.5)$$

то для антени, що рухається колом із радіусом R , миттєве значення фази наведеної електрорушійної сили буде відрізнятися від φ_0 , на значення

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} R \cos(\Omega t - \alpha) \quad (4.6)$$

де α - азимут на ДРВ;

λ - довжина хвилі електромагнітних коливань;

Ωt - поточне значення пеленга обертової антени радіопеленгатора.

При цьому миттєве значення електрорушійної сили в антені дорівнює

$$e = E \sin \left[\omega t + \frac{2\pi}{\lambda} R \cos (\Omega t - \alpha) \right], \quad (4.7)$$

тобто електрорушійна сила в антені радіопеленгатора модульована за фазою частотою Ω , причому фаза модульованого коливання відповідає азимуту на ДРВ, який пеленгується.

Максимальне значення відхилення фази (відносно φ_0), яке відбувається під час обертання антени, характеризується індексом фазової модуляції

$$M = \frac{2\pi}{\lambda} R. \quad (4.8)$$

Якщо прийняті коливання підсилити і подати на фазовий детектор, то для малих значень відношення R/λ на виході детектора можна отримати коливання модулюючої частоти Ω , фаза яких відповідає азимуту α на ДРВ, який пеленгується, тобто

$$u_c = U_c \cos (\Omega t - \alpha). \quad (4.9)$$

Таким чином, у процесі руху антени радіопеленгатора відносно ДРВ, сигнали якого пеленгуються, виникає доплерівський зсув частоти, при цьому антена, що рухається колом, приймає сигнали ДРВ із доплерівським зсувом частоти пропорційним куту приходу сигналу та швидкості її обертання. Пеленг сигналу визначається дотичною до кола, яке під час руху описує антена, в точці максимального доплерівського зсуву. В разі використання прямого доплерівського методу на частотах до діапазону УВЧ швидкість обертання антени зазвичай не має значення, тому був розроблений метод електронного перемикавання великої кількості антенних елементів нерухомої кругової антенної решітки для імітації колового обертання антени, відомий під назвою квазидоплерівського.

Квазідоплерівські радіопеленгатори використовують нерухомі, розміщені по колу антенні елементи (зазвичай вібратори) з їхньою почерговою попарною комутацією і протифазним підсумовуванням сигналів. Практично – це фазові радіопеленгатори, в яких антенні пари (наприклад, Н-Едкок) перемикаються з певною частотою таким чином, що імітується їхнє обертання з частотою ω . Далі результуючі сигнали антенних пар приймаються ПРМ, обмежуються, обробляються частотним детектором (ЧД), а потім фаза отриманого коливання порівнюється з фазою частоти обертання і визначається пеленг на ДРВ.

Структурна схема такого радіопеленгатора наведена на рис. 4.14.

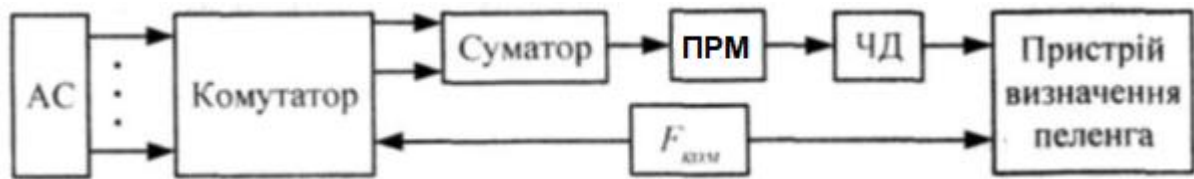


Рисунок 4.14. Структурна схема квазідоплерівського радіопеленгатора

Сучасні доплерівські пеленгатори працюють у діапазоні частот від 20 МГц до 2 ГГц і забезпечують при цьому точність пеленгування не гірше 2° , яка визначається як рівнем потужності сигналу ДРВ, так і базою пеленгатора R (точніше, значенням $2R/\lambda$).

Переваги:

- простота реалізації АС і конструкції самого радіопеленгатора;
- стійкість до впливу наявної амплітудної модуляції.

Недолік спільний для всіх фазових радіопеленгаторів, а саме – низька стійкість до впливу когерентних радіозавад і завад у сумісному каналі.

Квазідоплерівські радіопеленгатори досить поширені і придатні для стаціонарних і рухомих застосувань. З метою забезпечення якомога ширшого охоплення спектра сигналу в них часто використовують активні антени та антенні елементи невеликих розмірів, що дозволяє зменшити габаритні розміри радіопеленгаторів і застосовувати їх в якості переносних.

4.4. Інтерферометричні і кореляційні радіопеленгатори

Принцип дії **фазового інтерферометричного радіопеленгатора** ґрунтується на використанні двох радіоприймальних каналів із спільним гетеродином, до яких підключені дві незалежні АС – ненаправлена опорна та АС, яка часто може бути виконана у вигляді антенної решітки з коловим

розміщенням антенних елементів, які послідовно підключаються до одного з радіоприймальних каналів, і порівнянні фази сигналу цієї АС із фазою сигналу опорної АС (рис. 4.15). У пристрої оброблення даних і визначення пеленга проводиться аналого-цифрове перетворення результатів вимірювання двох прийнятих сигналів, оцінювання їхньої фазової затримки та визначення за рівнем цієї затримки кута приходу сигналу.

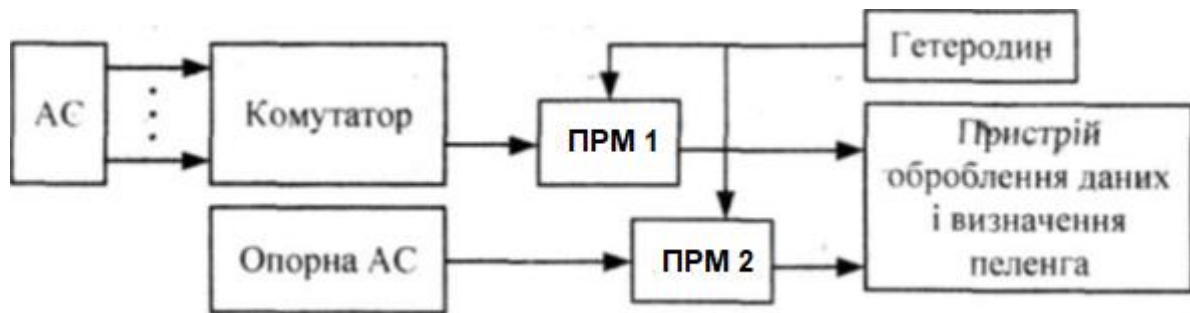


Рисунок 4.15. Структурна схема фазового інтерферометричного радіопеленгатора

Пеленгування ДРВ *амплітудно-фазовим інтерферометричним радіопеленгатором* проводиться шляхом вимірювання методом кореляційної інтерферометрії комплексних напруг сигналів (амплітуди і фази) для кожної антени одночасно, подальшого оброблення вимірів та оцінювання лінії пеленга.

Кореляційної інтерферометри

Як і фазовий метод, метод кореляційної інтерферометри базується на вимірюванні різниці часу приходу електромагнітної хвилі до двох рознесених антен. Але на відміну від фазового методу тут різниця часу приходу радіохвилі визначається не шляхом вимірювання співвідношення фаз сигналів, прийнятих обома антенами, а шляхом вимірювання значень функції взаємної кореляції сигналів цих антен.

Функція взаємної кореляції, що характеризує ступінь статистичного взаємозв'язку (ступінь імовірності) між прийнятими сигналами, визначається за допомогою корелятора, основними складниками якого є помножувач миттєвих значень напруги двох сигналів та, підключений до його виходу, інтегратор, який усереднює отримане значення напруги.

Якщо між вхідними сигналами корелятора існує повний статистичний зв'язок, то в процесі зміни миттєвих значень напруги обох сигналів їхня полярність буде співпадати, в результаті чого вихідна напруга інтегратора буде максимальною. Якщо функція взаємної кореляції дорівнює нулю

(тобто статистичний зв'язок між сигналами відсутній), то з однаковою ймовірністю миттєві значення напруги обох сигналів будуть мати або однакові, або протилежні знаки. Унаслідок цього миттєві значення напруги на виході пристрою множення будуть з однаковою ймовірністю додатними або від'ємними, тому усереднена інтегратором за певний проміжок часу вихідна напруга буде близькою до нуля.

Найпростіший кореляційний радіопеленгатор складається з рознесених на певну відстань (базу) d антен A_1 і A_2 , двоканального ПРМ зі спільним гетеродином, лінії затримки, час затримки якої можна регулювати, корелятора та пристрою оброблення даних і визначення пеленга (рис. 4.16). Сигнали з виходів обох ПРМ поступають на входи корелятора, причому, один – безпосередньо, а другий – через лінію затримки. Пеленгування проводиться за максимумом напруги на виході корелятора, який виникає тоді, коли взаємна кореляція між вихідними напругами ПРМ1 і ПРМ 2 максимальна, наприклад, у випадку коли лінія A_1 і – A_2 антенної бази d перпендикулярна напрямку на ДРВ, що пеленгується, і його сигнали досягають обох антен одночасно.



Рисунок 4.16. Структурна схема кореляційного радіопеленгатора

Якщо лінія антенної бази не перпендикулярна до напрямку на ДРВ, то вихідний сигнал корелятора буде максимальним тоді, коли різниця часу поширення сигналів від ДРВ до обох антен компенсується часом лінії затримки. Таким чином, за числовим значенням часу, яке можна визначити за максимальним рівнем напруги на виході корелятора шляхом регулювання вручну або автоматично часу лінії затримки, можна обчислити кут α між напрямком на ДРВ і напрямком антенної бази d із виразу

$$\cos \alpha \approx \frac{c \cdot \Delta t}{d}. \quad (4.10)$$

де c – швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі.

Статистичний зв'язок між власними шумами обох ПРМ відсутній, тому рівень напруги шумів на виході корелятора наближається до нуля, що, в свою чергу, визначає високу чутливість кореляційного радіопеленгатора. Суттєвого підвищення чутливості й точності пеленгування можна досягнути шляхом збільшення антенного рознесення d , що практично можна реалізувати лише зі стаціонарними антенами.

Кореляційні інтерферометри нині є найперспективнішими серед радіопеленгаторних систем, що зумовлено їхніми такими основними суттєвими перевагами:

- якісне пеленгування практично будь-яких видів радіосигналів, у тому числі, широкосмугових зі складними видами модуляції;
- можливість оброблення та розрізнення одночасно двох або декількох сигналів в одному частотному каналі, причому як когерентних (у процесі приймання багатопроменевого випромінювання одного й того ж ДРВ), так і некогерентних (у процесі приймання радіосигналів від декількох ДРВ, спектри яких перекриваються);
- наявність ефективних методів зменшення інструментальних похибок, зумовлених взаємним впливом антенних елементів і місцевих умов, які можуть враховуватися для будь-яких типів антенних решіток тощо.

Основні недоліки інтерферометрів:

- складність реалізації, що викликана двоканальним прийманням сигналів;
- необхідність забезпечення в радіоприймальних каналах ПРМ якомога більшої ідентичності комплексних коефіцієнтів передавання;
- неповний, порівняно з амплітудними радіопеленгаторами з вузькою ДН, захист від когерентних радіозавад і завад у сумісному каналі.

4.5. Методи надвисокої розрізнявальної здатності

Методи надвисокої розрізнявальної здатності часто згадуються як надвисока і висока розрізнявальна здатність. Ці методи використовуються для розрізнення сигналів (як багатопроменевих, так і сигналів від кількох джерел), створюваних декількома передавачами, що працюють на одній і тій же частоті.

У найчастіше розглядаються два методи:

- метод формування променя та просторового узгодженого фільтра (наприклад, алгоритм CAPON): антенна решітка з керованим положенням

діаграми спрямованості випромінює сигнали у всіх напрямках, а алгоритм виконує пошук пікових значень вхідної потужності. Розрахунок алгоритму формування променя і просторового узгодженого фільтра заснований на виразі керуючого вектора при спробі мінімізації потужності, що створюється шумом та сигналами завад;

– метод підпросторів (наприклад алгоритм MUSIC): заснований на придушенні шуму, сигналів завад та багатопроменевих сигналів. Розрахунок алгоритму методу підпросторів заснований на аналіз основних компонентів (або власних значень) вибірок даних з усіх приладів. Кути падіння хвиль обчислюються шляхом зміни керуючого вектора і пошуку кутів, при яких управляючий вектор ортогональний власним векторам, що відповідає власним значенням шумів.

У таблиці 4.1 наведені основні характеристики та особливості методів надвисокої розрізняювальної здатності.

Комбіновані методи радіопеленгації

Метод просторового узгодженого фільтра та метод підпросторів можуть бути корисними у несприятливих радіосередовищах. Дані методи радіопеленгації бажано застосовувати у режимі реального часу, але це може призвести до ускладнення систем, включаючи N-канальну систему з одним приймачем, каналом обробки та запису для кожного елемента антени.

Для вирішення цієї проблеми багатоканальне обладнання, що виконує обробку в реальному часу на основі нескладного алгоритму, що може бути пов'язане з багатоканальною системою цифрового запису, щоб забезпечити роботу в більш складних радіосередовищах у пакетному режимі (кілька десятків секунд).

Тоді система зможе адаптуватися до середовища, застосовуючи кілька методів визначення кута приходу зі зростаючою складністю:

1. Кореляційний інтерферометр або векторна кореляція дозволяють проводити швидке сканування радіосередовища в реальному часі з метою надання даних про первинне місцезнаходження домінуючих випромінювачів або джерел, а також первинних даних про присутності джерел радіозавад.

2. Метод надвисокої роздільної здатності дозволяє досить чітко виділяти джерело/визначати його місце розташування серед середньої складності та/або для потреб обмеженої точності.

Інші методи, що використовують аналіз ШПФ, також можуть застосовуватися у складних для сигналів середовищах.

Таблиця 4.1

Метод надвисокої розрізняючої здатності

Використання у вимірах РП-антенних решітках	Комплексна напруга сигналу (амплітуда та фаза) вимірюється для кожної антени; вимірювання проводяться принаймні на двох антенах одночасно. На практиці потрібно як мінімум два когерентні канали приймача. При застосуванні методу підпросторів пари напруг для всіх можливих парних комбінацій антен в антенній решітці використовуються для створення того, що в математиці називається вимірювальною «коваріаційною матрицею». Матриця піддається аналізу для поділу компонентів сигналу, що приймається в суміщеному каналі.
Перетворення вимірів в радіопеленг	Декілька радіопеленгів розраховуються з використанням інтерполованих значень азимуту. При нерухомо закріпленій антеною решіткою кожне з цих значень відповідає каліброваній просторової характеристики. Калібрована просторова характеристика, що найкраще узгоджується з характеристиками джерел, що формує приблизні значення азимуту джерел.
Точність (без урахування впливу місцевих умов)	$\leq 1^\circ$ (середньоквадратичне значення)
Чутливість	Висока. Чутливість залежить від вибраного методу. Використання методу підпросторів більш ефективний для сигналів з низьким відношенням сигнал/шум проти методом формування променя.
Мінімальна тривалість сигналу	Для діапазону ВЧ – 100 мс Для діапазонів ОВЧ/УВЧ – 10 мс Час обробки сигналу в системі значно збільшується, якщо кількість паралельних каналів приймача менша, ніж кількість елементів антени. Необхідно, щоб сигнал був стабільним протягом всього періоду вимірювання, чого складно досягти, якщо кількість приймачів менше, ніж кількість елементів антени, особливо у діапазоні ВЧ.
Стійкість щодо деполяризації	Залежить від поляризаційних характеристик антенної решітки, виключенням випадків використання алгоритмічної компенсації з подвійною поляризацією, що підходить для цих систем векторної обробки.
Стійкість до спотворень фронту хвилі (когерентні завади)	Метод формування променя може розділяти множинні джерела некорельованих завад, але не може розділяти джерела когерентних завад. Метод підпросторів здатний розділяти множинні джерела некорельованих завад та частково джерела когерентних завад. Робочі характеристики обох методів покращуються під час використання антенних решіток із широкою апертурою.
Стійкість до завад у суміщеному каналі (некогерентні завади)	Обидва способи здатні розділяти джерела некогерентних завад.
Можливість роботи з просторовою хвилею у ВЧ-діапазоні	Система може визначати кут місця для просторових сигналів та забезпечувати високу чутливість для сигналів, що надходять під великими кутами місця, якщо антенна решітка складається з антен у вигляді схрещених рамок.
Зауваження	Ці методи пеленгації сумісні з новим цифровим поколінням процесорів сигналів; процесори, що застосовуються в персональних комп'ютерах нового покоління, мають потужність, достатню для швидкого виконання необхідних обчислень (хоча, можливо, не в режимі реального часу); ці системи не мають обмежень у вигляді вимоги використовувати антенні решітки.

4.6. Похибки пеленгування джерела радіовипромінювання

Існує низка ефектів, які можуть призвести до того, що пеленгатор визначить помилкові пеленги. Головними причинами виникнення цих ефектів є вплив навколишнього середовища на розповсюдження радіохвиль, що приходять від джерела випромінювання до пеленгатора. Такими основними причинами є:

- *поглинання* енергії хвилі, що проходить близько до земної поверхні;
- *перевідбиття* радіохвиль від предметів (багатопроміневість);
- *розсіювання* радіохвиль від неоднорідностей;
- *дифракція* радіохвиль (заломлення променя на перешкоді і “засвічування” полем сигналу території в зоні радіотіні);
- *рефракція* радіохвиль (їх викривлення та заломлення в атмосфері).

У більшості практичних випадків при падінні радіохвилі різні споруди, нерівності рельєфу місцевості тощо відбувається розсіювання енергії хвилі за багатьма напрямками. При цьому умови пеленгування можуть додатково ускладнюватись тим, що пряма хвиля від джерела випромінювання є слабкою (див. рис. 4.17 а) або зовсім відсутня (рис. 4.17 б).

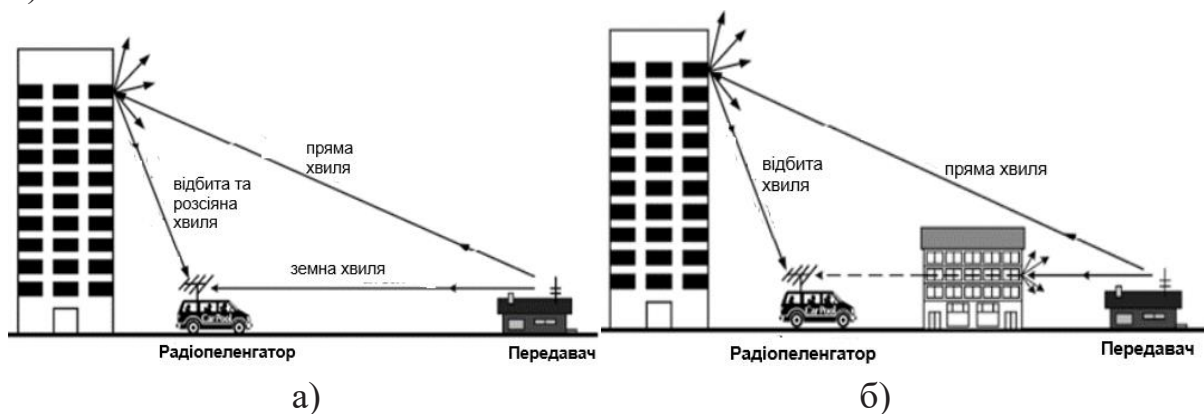


Рисунок 4.17. Помилковий пеленг
а) при ослабленій земній хвилі та б) в зоні радіотіні

До основних чинників, які суттєво впливають на точність пеленгування ДРВ, відносяться:

- похибка, що зумовлена обладнанням радіопеленгатора чи методом пеленгування (*інструментальна або апаратурна похибка*);
- місцезнаходження радіопеленгатора;
- особливість поширення радіохвиль;
- суб’єктивні помилки (*помилки операторів радіоконтролю*).

Похибки, що вносяться апаратурою, обумовлені її конструктивними особливостями та особливостями процесу виготовлення.

Похибки, зумовлені місцем розташування, викликаються нерівностями рельєфу місцевості або особливостями ландшафту поблизу радіопеленгатора. Ці похибки змінюються залежно від напрямки та частоти. Вони можуть таким чином розглядатися як змінні похибки.

Третій тип похибок виникає через неоднорідність умов поширення, яка може призводити до бокових відхилень напрямку поширення радіохвиль щодо напрямку дуги великого кола між передавачем та радіопеленгатором. Крім того, неоднорідність умов поширення радіохвиль призводить до поляризаційних похибок.

При багатопроменовому поширенні радіохвиль в місці установки антени пеленгатора енергія радіосигналу від джерела випромінювання приходить до неї по кількох траєкторіях. Одна з них може бути прямий, тобто прямо від передавальної антени до антени пеленгатора. Можливий і такий варіант, коли пряма траєкторія взагалі відсутня, а енергія сигналу (розсіяна або відбита) досягає антени пеленгатора двома або більшими шляхами. У кожному окремому випадку в антені пеленгатора наводиться сумарний струм сигналу від кожної складової відповідно до принципу суперпозиції. Рівень сигналу на виході антени сумою складових, фаза кожної з яких змінюється випадково, може відчувати значні флуктуації. Так, наприклад, переміщення антени при зміні положення мобільної станції (навіть на кілька десятків сантиметрів) викликає зміни фаз цих складових і може призвести до дуже помітної та швидкої зміни інтенсивності сигналу і, як наслідок, до помилок пеленгу.

Для експлуатації різних типів радіопеленгаторів орієнтовна оцінка відсотків отриманих ними недостовірних пеленгів наведена в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Орієнтовні значення відсотків отримання недостовірних пеленгів для різних типів радіопеленгаторів

Умови експлуатації	Тип радіопеленгатора		
	Квазі-доплерівський	Інтерферометри	з формуванням вузької ДН
Близькі до ідеальних	від 5 % до 7 %	від 3 % до 5 %	від 1 % до 2 %
Суттєво відмінні від ідеальних	від 15% до 20%	від 10% до 15%	від 3 % до 5 %

Висновки з методів радіопеленгації

Незалежно від методу радіопеленгації, кожен РП отримує інформацію про напрямлення електромагнітного поля, яке прийнято вважати однорідним, а поширення радіохвиль – неспотвореним. За таких ідеальних умов, які мають мало спільного з реальністю, фронти хвиль є плоскими; лінії з рівною фазою і рівною амплітудою є паралельні прямі (див. рис. 4.18).

Залежно від діаметра D антена РП виявляє лише невелику частину фронту хвилі. Напрямок, визначений РП, завжди є лінією, перпендикулярною до усередненої частини хвилі фронту. Залежно від розмірів апертури антени щодо просторового періоду нерівномірності ізофази спотвореного поля, у такому спотвореному полі можуть бути отримані різні результати. Тому для зведення до мінімуму похибок від спотворень поля рекомендується вибирати антени РП з більшими щодо довжини хвилі λ розмірами. Відношення $D/\lambda > 1$ відносять до широкоапертурних радіопеленгаторних антен, а D/λ менше 0,5 – до вузькоапертурних радіопеленгаторних антен. Проміжні відносини зазвичай відносяться до середньоапертурних радіопеленгаторів. Широкоапертурні радіопеленгаторні антени ослаблюють вплив багатопроменевості на результати вимірювання, забезпечують порівняно з вузькоапертурними антенами більше відношення сигнал/шум і менший рівень похибок радіопеленгації.

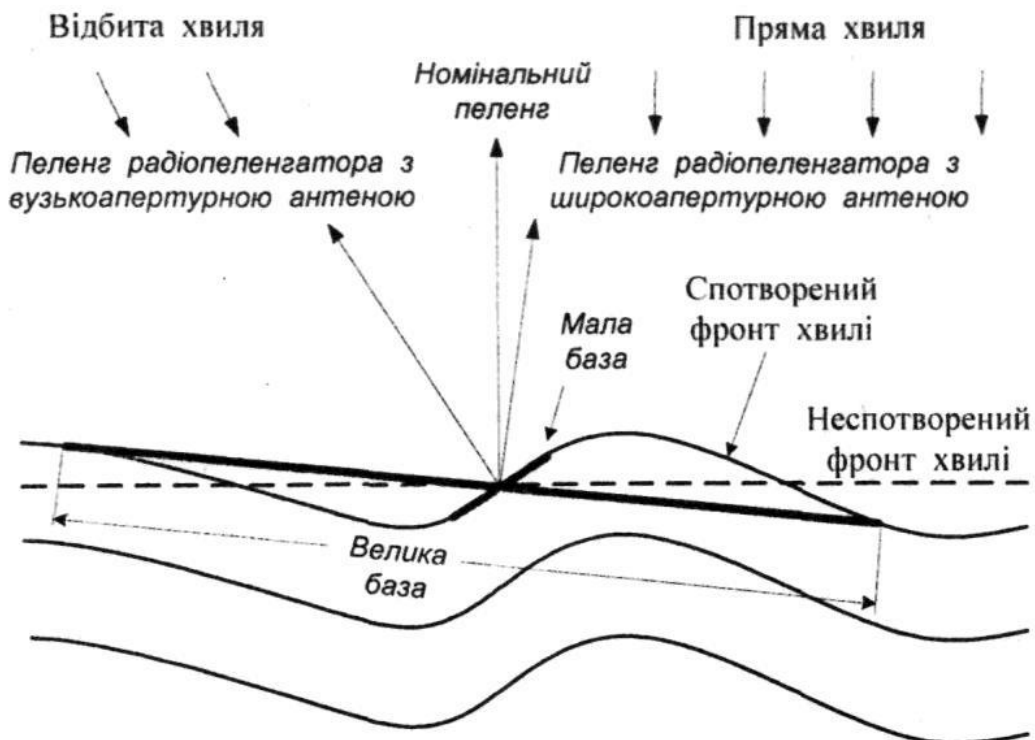


Рисунок 4.18. Приймання радіохвиль широкоапертурною та вузькоапертурною антенами

Можливість роботи з широкою апертурою вкрай важлива для зменшення впливу затіняючих предметів, розташованих поблизу радіопеленгаторної антени, що призводять до появи найбільш шкідливих багатопроменевих складових, широко рознесених по азимуту від напрямку прямого променя, але мають аналогічну амплітуду.

4.7. Вибір методу пеленгації та типу радіопеленгатора

Основні технічні характеристики й параметри радіопеленгаторів:

Чутливість радіопеленгатора визначає його здатність пеленгувати віддалені та малопотужні ДРВ. Як правило, під чутливістю мають на увазі таке значення напруженості електромагнітного поля, за якого пеленгування проводиться з дотриманням заданих характеристик пеленгації, наприклад, значення середньоквадратичної помилки. Чутливість радіопеленгатора (мкВ/м) в основному визначається чутливістю його приймальних трактів, конструкцією АС і алгоритмом обчислення пеленга.

Завадостійкість – здатність радіопеленгатора зберігати у відомих межах свою точність за наявності радіозавад. Унаслідок дії на АС радіопеленгатора під час проведення пеленгування ДРВ кількох радіосигналів, наприклад, основного і завад, показання пеленга для основного сигналу можуть змінюватися, тому завадостійкість радіопеленгатора характеризує напруженість поля радіозавади, яка викликає помилку, що не перевищує припустиме значення. Напруженість поля завади, як правило, задається відносно напруженості поля основного сигналу в децибелах.

Швидкодія радіопеленгатора визначається мінімальним часом, необхідним для настроювання на задану частоту та визначення пеленга.

Розрізнявальна здатність – це характеристика радіопеленгатора, яка визначає його можливість роздільного пеленгування ДРВ із близькими параметрами. Розрізняють розрізнявальну здатність за частотою та кутом.

Діапазон робочих частот радіопеленгатора – це смуга частот, в якій радіопеленгування проводиться із заданою точністю та чутливістю. Чим більший робочий діапазон частот пеленгатора, тим він кращий для вирішення завдань технічного радіоконтролю.

Вид сигналу, що пеленгується – характеристика радіопеленгатора, що зазначає види радіосигналів, для джерел яких він здатний визначати пеленг. Вид сигналу, що пеленгується, безпосередньо пов'язаний зі смугою пропускання радіоприймального тракту радіопеленгатора і його

швидкодією. Чим ширша смуга пропускання, тим більш широкосмугові та короткочасні сигнали можна запеленгувати.

Час розгортання радіопеленгатора визначає, наскільки швидко він може бути приведений у робочий режим. Цей параметр, а також маса та габаритні розміри особливо важливі для рухомих і переносних пеленгаторів.

Складність експлуатації – характеристика, що визначає зручність процесу експлуатації радіопеленгатора.

Точність пеленгування радіопеленгатора, що працює на частотах вище 30 МГц

У Рекомендації МСЕ-Р SM.854 пеленги розділені на чотири класи в залежності від точності та спостережуваних характеристик. Слід зазначити, що значення різних класів відрізняються від значень частот нижче 30 МГц.

Клас А – ймовірність того, що похибка перевищує 1 °, менше 5%.

Клас В – ймовірність того, що похибка перевищує 2 °, менше 5%.

Клас С – ймовірність того, що похибка перевищує 5 °, менше 5%.

Клас D – похибка пеленгу перевищує похибки, допустимі класу С.

Кожен метод пеленгування має свої слабкі та сильні сторони. Найпростіші методи можуть бути недостатньо точними чи мати проблеми внаслідок поляризаційних похибок, але вони прийнятні для застосування в деяких рухомих службах або за необхідності мінімальних матеріальних затрат. Найпередовіші методи, що базуються на застосуванні ПЕОМ, можуть забезпечити виключно точні результати, а також мобільність.

У процесі вибору методу пеленгації та типу радіопеленгатора доцільно:

1) мати якомога більший обсяг інформації щодо характеристик і параметрів радіопеленгаторів;

2) урахувати, що радіопеленгатор повинен забезпечувати пеленгування всієї номенклатури радіосигналів, для роботи з якими він буде вживатися, тобто як вузькосмугових, так і широкосмугових сигналів, при цьому, необхідно звертати увагу на показники якості пеленгування з урахуванням впливу радіозавад, а не лише на співвідношення сигнал/завада (сигнал/шум);

3) провести оцінювання умов використання радіопеленгатора в регіоні (можливість оптимального розміщення АС, рівень забудови, рельєф місцевості тощо);

4) орієнтуватися за умов експлуатації, близьких до ідеальних, на простіші, і, як правило, дешевші типи радіопеленгаторів (при сумірних

значеннях їхніх основних параметрів), при цьому необхідно мати на увазі, що для покращення якості визначення місцезнаходження ДРВ, можливо доведеться збільшити кількість радіопеленгаторів з метою виключення недостовірних пеленгів. Для складних умов пеленгування доцільно орієнтуватися на завадостійкіші типи радіопеленгаторів - інтерферометри або на пеленгатори з формуванням вузької ДН (див. табл.4.2).

Характеристики радіопеленгаторів визначаються не тільки їхніми основними технічними характеристиками й параметрами, властивими для певного типу радіопеленгатора, а й конкретним конструктивним виконанням. У процесі вибору радіопеленгатора необхідно враховувати такі характеристики:

- метод пеленгування (принцип дії та детальна характеристика особливостей його реалізації);
- діапазон частот (наявність його розбивки на піддіапазони);
- чутливість (мінімальний рівень сигналу в місці розміщення АС, за якого реалізується інструментальна точність протягом робочого часу пеленгування) та значення чутливості в діапазоні частот (графічна залежність або детальна таблиця);
- поляризація сигналів (повинні бути вказані кути місця, за яких зберігається точність пеленгування);
- інструментальна (апаратурна) точність пеленгування (значення середньоквадратичної похибки в градусах);
- робочий час пеленгування (час, протягом якого реалізується інструментальна похибка пеленгування);
- мінімальний час пеленгування (час, протягом якого може бути отриманий відлік пеленга);
- точність пеленгування за наявності когерентної завади (для одного відбитого радіосигналу (радіозавади) та для багаторазово відбитих сигналів);
- точність пеленгування за наявності завади в сумісному каналі (наявність двох сигналів на різних частотах у тракці ПЧ РПП);
- точність пеленгування модульованих сигналів (вузькосмугових АМ і ЧМ сигналів, широкосмугових ЧМ сигналів тощо);
- динамічний діапазон;
- показник якості пеленга (його опис і кількісні характеристики);
- вимоги до розміщення АС (повинні бути детально обумовлені вимоги, за яких виключається або мінімізується вплив місця розташування антен неточність пеленгування та інші параметри радіопеленгатора);

- відомості про експлуатаційні характеристики та випробування (зокрема, повинна бути вказана експлуатаційна точність пеленгування та кількість недостовірних пеленгів під час проведення офіційних експлуатаційних випробувань);
- додаткові відомості про радіопеленгатор (наприклад, наявність режиму автоматичного пеленгування та можливості пеленгування в певних смугах частот, завадостійкість тощо);
- конструктивні та інші характеристики (розміри та склад АФС, наявність щогли та грозозахисту, умови електроживлення та експлуатації, маса, габаритні розміри тощо);
- вартість та умови поставки.

Вимоги до майданчика для пеленгатора

При виборі місця для розміщення пеленгатора останній слід розташовувати на піднесеному та вільному від забудови та густій рослинності місці. Провідність ґрунту по можливості на всьому майданчику має бути високою та приблизно однаковою. Для щоб на майданчику міг бути розміщений пеленгатор, на ньому повинні бути відсутні:

- масивні електропровідні конструкції, такі як лінії електропередачі, телефонні лінії, громіздкі антени;
 - мережі підземних трубопроводів та комунікацій;
 - дротяні загородження, високі будівлі, мости;
 - залізничні лінії, водонапірні вежі, фабричні труби;
 - високі дерева, річки, канали, озера, берегова лінія моря.
- Крім того, для розміщення пеленгатора непридатні такі місця:
- гірські долини та підніжжя пагорбів;
 - місця по сусідству з високими стрімчакми чи глибокими ущелинами;
 - місця з різкими змінами електричних властивостей ґрунту;
 - скелі або оголення гірських порід.

Слід зазначити, що на точність визначення параметрів розташування джерела випромінювання мобільним пеленгатором помітно впливають і металеві деталі кузова станції радіоконтроля. При визначенні пеленгу помилка залежить від напрямку приходу сигналу стосовно станції, тобто від розташування кузова машини щодо напрямку приходу променя. У сучасних пеленгаторах ця помилка коригується запровадженням у програму обчислення азимуту спеціальної поправки.

Порівняння методів визначення кута приходу

Таблиці 4.3 наводиться порівняння основних алгоритмів розрахунку кута приходу методів і визначається метод, найбільш ефективний у ситуаціях багатопроменевого поширення та множинних джерел сигналу.

У таблиці також міститься зведена інформація про основні параметри та використання даних методів.

Таблиця 4.3

Зведенні результати порівняння методів радіопеленгації

Точність/кутове рознесення	Чутливість	Стійкість до багатопроменевого поширення	Мінімальна тривалість сигналу	Зауваження
Антенна, що обертається				
2 °-5 ° (середньокв. знач.) Залежить від використовуваної антеною системи	Висока	Гарна	Залежить від швидкості обертання, до 1 хв	Простота застосування. Метод у реальному часу. Гарне поділ сигналів від кількох джерел
Метод Едкока				
1 °-2 ° (середньокв. знач.) Немає кутового рознесення	Від середньої до високою	Обмежена	1 мс	Простота застосування. Метод у реальному часу. Функціональний та широко застосовуваний метод
Фазовий інтерферометр				
Стандартна точність 1° (Середньоквадратичне знач.) для одного джерела. Кутове рознесення можливо оптимальним при високому часовому та частотному рознесенні	Висока	Від середньої до гарної для одного джерела, в залежності від апертури антени	10 мс 1 мс (Примітка 1)	Простота застосування. Метод у реальному часу. Функціональний та широко
Кореляційний інтерферометр				
Стандартна точність 1° (Середньокв. знач.) для одного джерела. Кутове рознесення можливо оптимальним при високому тимчасовому та частотному рознесенні	Висока	Від середньої до гарної для одного джерела, в залежності від апертури антени	ВЧ: 10 мс ОВЧ/УВЧ: 1 мс Залежить від кількості елементів антени та приймачів, а також від швидкості обробки	Помірно складне застосування. Функціональний та широко застосовуваний метод

Точність/кутове рознесення	Чутливість	Стійкість до багато-променевого поширення	Мінімальна тривалість сигналу	Зауваження
Просторовий узгоджений фільтр (CAPON)				
Гарна для некорельованих джерел. Зазвичай точність досягає 2°. Обробляє, як правило, від 2 до 3 некорельованих джерел, рознесених по куту	Висока	Обробляє частково когерентні радіосередовища. Стійкий до декількох некорельованих джерел. Не може обробляти корельовані багатопроменеві сигнали	ВЧ: 100 мс ОВЧ/УВЧ: 10 мс Залежить від кількості елементів антени та приймачів, а також від швидкості обробки	Помірно складне застосування при аналізі в автономному режимі. В реальному часу складне застосування, що вимагає збільшення обчислювальних ресурсів. Для досягнення прийнятних результатів потрібно тривалий час інтеграції, протягом якого середа поширення сигналу повинна бути відносно стабільною
Метод підпросторів (MUSIC)				
Високий показник точності <1°. Обробляє, як правило, від 2 до 3 частково когерентних джерел. Обмежені лише помилками калібрування та тривалістю інтеграції.	Висока	Обробляє, як правило, від 2 до 3 частково когерентних джерел. Стійкий до декількох частково когерентних джерел або багатопроменевого поширення, а також до шуму (ефективно обробляє сигнали з відношенням S/N < 0). Не може обробляти корельовані багатопроменеві сигнали	ВЧ: 100 мс ОВЧ/УВЧ: 10 мс	Помірно складне застосування при аналізі в автономному режимі. В реальному часу складне застосування, що вимагає збільшення обчислювальних ресурсів. Функціональний у несприятливих радіосередовищах (міські райони, гірська місцевість). Для досягнення прийнятних результатів потрібно тривалий час інтеграції, протягом якого середа поширення сигналу повинна бути відносно стабільною

ПРИМІТКА 1. Широко поширені системи, що стабільно функціонують, в яких застосовується антена, підключена до кількох когерентних вимірювальних каналів. Мінімальна тривалість сигналу може бути меншою, якщо для кожного елемента антени використовується один приймач і всі виміри виконуються паралельно.

Контрольні питання

1. Що таке радіопеленгація і на чому вона базується?
2. В яких випадках застосовується радіопеленгація?
3. Які основні типи траєкторій надходження радіосигналів до радіопеленгатора?
4. Що таке пеленг та як він визначається?
5. Що таке азимут та кут місця?
6. Що є причинами появи похибок вимірювання при радіопеленгації?
7. З яких основних і додаткових функціональних елементів складається радіопеленгатор?
8. Які основні параметри радіопеленгаторів?
9. В чому полягає принцип роботи амплітудних радіопеленгаторів, їх переваги та недоліки?
10. В чому полягає принцип роботи фазових радіопеленгаторів, їх переваги та недоліки?
11. В чому полягає принцип роботи доплерівських радіопеленгаторів, їх переваги та недоліки?
12. В чому полягає принцип роботи інтерферометричних радіопеленгаторів, їх переваги та недоліки?
13. Основні вимоги до майданчика для пеленгатора.
14. Що є причинами появи похибок вимірювання при радіопеленгації?

5. Визначення місцезнаходження джерела радіовипромінювання

5.1. Принципи та методи визначення місцезнаходження джерела радіовипромінювання за допомогою радіопеленгації

Місцезнаходження ДРВ, тобто локалізація джерела передачі у просторі, можна визначити шляхом аналізу інформації про напрямки прийнятих сигналів від двох або більше просторово рознесених приймачів (або ж одного мобільного приймача).

***Визначення місцезнаходження ДРВ** – це встановлення його географічних координат з допомогою технічних засобів радіомоніторингу.*

Для визначення місцезнаходження використовуються чотири основні методи:

1) класичний метод: визначення місця розташування (вручну або за допомогою комп'ютера) на основі комбінації з двох або більше результатів виміру кута приходу (АОА) декількома радіопеленгаторами (РП);

1) класичний **метод триангуляції**, що полягає у визначенні місця розташування (вручну або за допомогою комп'ютера) за допомогою двох (рис. 4.2) і більше результатів вимірів кута приходу - *пеленгів* (AOA) від декількох стаціонарних радіопеленгаторів (РП);

2) **метод різниці часу приходу сигналів** (TDOA);

3) **метод наведення або дистанційний метод з допомогою одного мобільного пеленгатора**, з якого необхідно визначати пеленги на передавач із кількох місць приймання;

4) **метод визначення місця розташування однією станцією (SSL)** в діапазоні ВЧ при іоносферне поширення хвиль: дає можливість визначення місця розташування передавача з використанням лише однієї радіопеленгаторної станції, що видає на додаток до азимуту інформацію про кут місця.

Якщо ДРВ знаходиться на поверхні Землі в точці Б (рис. 5.1 а) і для спрощення припустити, що поширення радіохвиль завжди відбувається вздовж дуги великого кола, яка з'єднує ДРВ і місце прийому радіовипромінювань (точка А), то за умови застосування відповідного приймального обладнання, що вказує напрямок на джерело сигналу, можна отримати *пеленг* цього джерела (α) – кут між північним напрямком меридіана і напрямком від спостерігача на ДРВ.

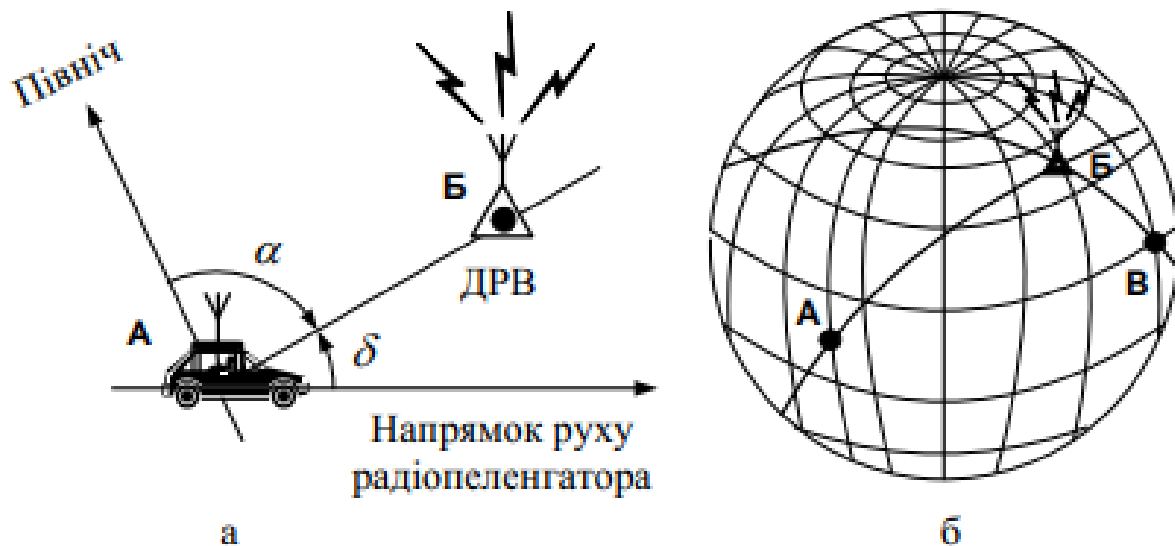


Рисунок 5.1. Визначення:

- а) пеленга на ДРВ одним радіопеленгатором;
- б) місцезнаходження ДРВ двома радіопеленгаторами

Найчастіше радіопеленг відраховується від північного напрямку меридіана за годинниковою стрілкою від 0° до 360° .

Комплект обладнання (пристрій), призначений для визначення напрямку або азимуту (і кут місця для ВЧ) на джерело випромінювання електромагнітних коливань називається **радіопеленгатором (РП)**. При цьому пеленгування може здійснюється шляхом обертання діаграми спрямованості (ДС) пеленгаторної антени до отримання на виході приймача певного значення рівня сигналу ДРВ, що пеленгується.

Для ефективного пеленгування ДРВ, необхідне виконання наступних умов:

- енергія (потужність) сигналу, що надходить на вхід вимірювального ПРМ, повинна бути достатньою для виявлення й вимірювання параметрів із заданими показниками якості;
- вимірювальний ПРМ повинен забезпечувати приймання сигналу на його несучій частоті;
- антена ПРМ повинна забезпечувати приймання сигналу відповідної поляризації та напрямку;
- ПРМ повинен забезпечувати приймання сигналу відповідних режимів випромінювання (імпульсний, безперервний тощо).

Якщо антена радіопеленгатора попередньо орієнтована відносно північного напрямку меридіана, то істинний пеленг визначається за кутом повороту ДН антени від її початкового положення. Кут між площиною меридіана точки спостереження й вертикальною площиною, що проходить через цю точку і спостережуваний предмет називається **азимутом**. Якщо ж антена пеленгатора попередньо орієнтована відносно подовжньої осі транспортного засобу, на якому встановлений пеленгатор, і пеленг визначається за кутом повороту ДС антени від цієї осі, то такий пеленг називається **відносним** або **бортовим** (кут δ на рис. 5.1 а). Різниця між вимірним значенням азимута на ДРВ та істинним (справжнім) значенням азимута на це ДРВ визначає *похибку пеленгування*.

Під час вирішення завдань технічного радіоконтролю пеленгування ДРВ здійснюється, як правило, за *азимутом*.

За допомогою одного радіопеленгатора можна визначити тільки пеленг – тобто азимут на ДРВ. Для визначення місцезнаходження ДРВ, що пеленгується, необхідно мати мінімум два радіопеленгатори, які рознесені на достатню відстань один від одного (рис. 5.1 б). **Місцезнаходження працюючого ДРВ визначається точкою перетину ліній пеленгів від обох радіопеленгаторів**, що знаходяться в точках А і В. Причому пеленги можуть бути отримані *одночасно* або *послідовно*. Однак за реальних умов пеленгування точне встановлення місцезнаходження ДРВ лише двома

радіопеленгаторами внаслідок значних похибок визначення пеленгів буває утрудненим, особливо у великих містах та на значній відстані від пеленгаторів до ДРВ.

Оскільки земна поверхня не плоска, то представляти лінії пеленгів прямими лініями можна тільки на відносно невеликих відстанях, які приблизно відповідають дальності прямої видимості. Для великих відстаней лінії пеленгів прокладаються у виді геодезичних ліній – ортодромій, які з'єднують найкоротшим шляхом дані точки земної поверхні.

5.2. Метод тріангуляції

Метод тріангуляції передбачає наявність мінімум двох, а краще - трьох ліній пеленгу пелюстки ДН (LoB). Перетин LoB визначає місце розташування випромінювача радіопеленгаторів в результаті виходить еліпс, що представляє можливе місце розташування випромінювача (рисунок 5.2).

Чим вище точність радіопеленгатора (РП) і що більш перпендикулярні пеленги, тим менше область невизначеності.

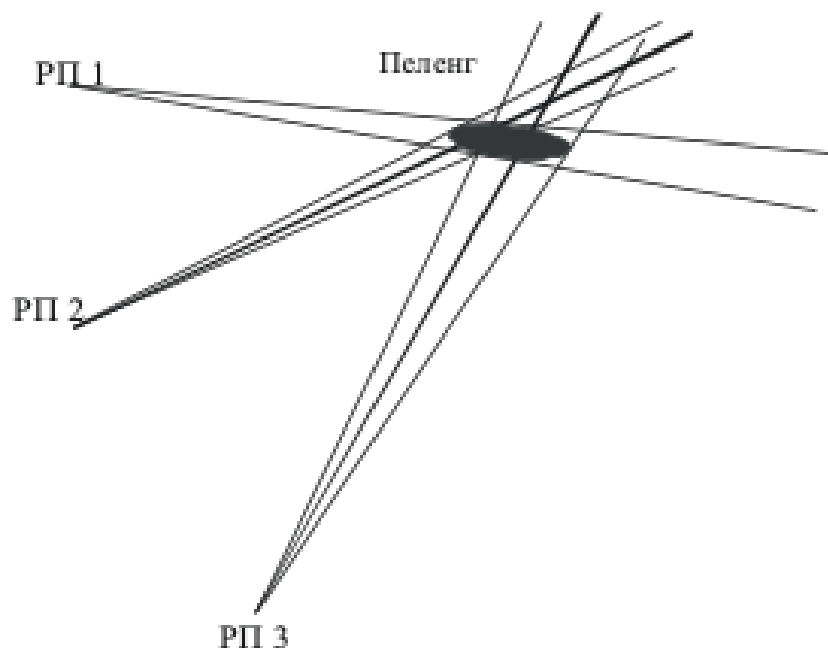


Рисунок 5.2. Визначення місцезнаходження за допомогою трьох стаціонарних радіопеленгаторів з використанням методу тріангуляції

Класичний **тріангуляційний (кутомірний) метод** оцінювання географічних координат ДРВ найчастіше застосовують в процесі проведення радіомоніторингу. Визначення місцезнаходження ДРВ засновано на алгоритмі розрахунку його координат за значеннями виміряних пеленгів кількома радіопеленгаторами з відомими координатами

власного місцезнаходження. Оскільки конкретне місцезнаходження ДРВ невідоме, то для якомога точнішого його визначення необхідно виміряти пеленги кількома територіально рознесеними радіопеленгаторами (РП) і на одному з них провести обчислення географічних координат ДРВ.

В разі застосування територіально – розподіленої системи пеленгування підвищити точність визначення місцезнаходження ДРВ дозволяє наявність хоча б одного рухомого радіопеленгатора. Однією з особливостей застосування рухомого радіопеленгатора є необхідність визначення координат власного місцезнаходження та курсового кута, що вирішується за допомогою різного роду навігаційних систем, серед яких найпоширенішою є система, що базується на глобальній супутниковій навігаційній системі *NAVSTAR GPS*. Тому кожен рухомий пеленгатор обладнується приймачем *GPS*. У сучасних рухомих радіопеленгаторах точність вимірювання координат власного місцезнаходження залежить від застосованого обладнання, особливостей рельєфу місцевості і складає від 5 м до 30 м (без диференціальної корекції), а точність вимірювання курсового кута залежить від довжини базової лінії і складає від 1° до 2° для відстані між антенами приймачів *GPS* близько 1 м.

Антени стаціонарних радіопеленгаторів установлюють, як правило, на дахах висотних будинків таким чином, щоб вони знаходилися вище інших будинків і щоб можна було повністю охопити район, який контролюється. Мінімальна кількість пеленгаторів для визначення місцезнаходження ДРВ – два, однак практично необхідна – не менше трьох (див. рис. 5.3), оскільки в цьому випадку *перетин їхніх пеленгів створює трикутник*, за яким можна розрахувати положення вірогідної точки місцезнаходження ДРВ.

Тріангуляційний метод визначення місцезнаходження ДРВ в основному використовується в діапазоні частот від 30 до 3000 МГц.

Перевагами тріангуляційного методу є:

- відсутність потреби точної часової синхронізації роботи радіопеленгаторів;
- невеликий обсяг інформації, що передається від пеленгатора до місця, де відбувається визначення координат (наприклад, одного із стаціонарних радіопеленгаторів);
- підвищена живучість – система зберігає повну працездатність у разі зменшення кількості радіопеленгаторів до двох.

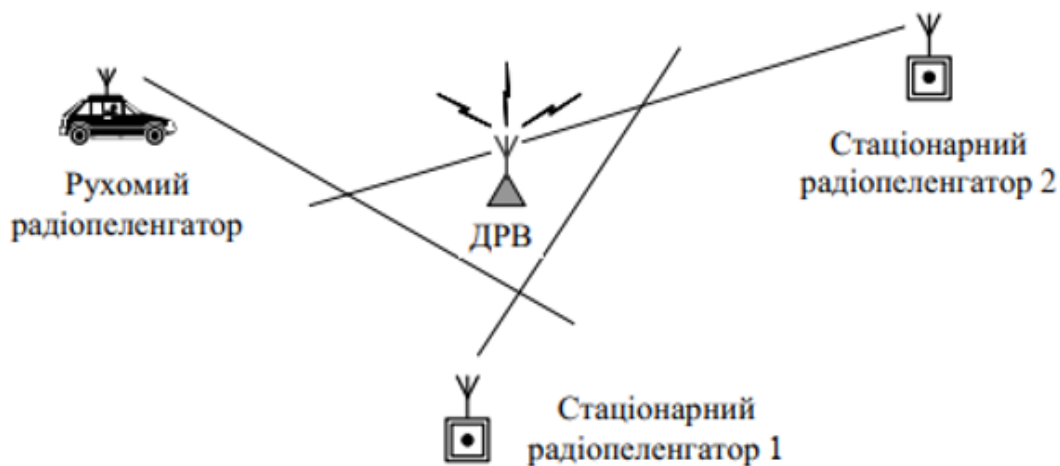


Рисунок 5.3. Визначення місцезнаходження ДРВ трьома радіопеленгаторами

До *недоліків* методу можна віднести наступне:

- залежність похибки обчислення координат від взаємного розміщення радіопеленгаторів і ДРВ;
- відносно висока вартість антенних систем (АС) радіопеленгаторів, (особливо широкодіапазонних);
- вплив на точність пеленгування виду модуляції та ширини спектра частот ДРВ (особливо для квазідоплерівських пеленгаторів).

Практично пеленгаційну “зарубку”, тобто точку перетину ліній пеленгів, можна отримати:

- при синхронній роботі трьох і більше стаціонарних радіопеленгаторів;
- при роботі одного рухомого радіопеленгатора;
- за допомогою переносного радіопеленгатора;
- комбінованими методами, наприклад, при синхронній роботі стаціонарного та рухомого радіопеленгаторів тощо.

За результатами спостережень кожен радіопеленгатор формує оцінку напрямку приходу плоскої радіохвилі від ДРВ – пеленг α . Розроблений цілий ряд методик визначення місцезнаходження ДРВ на основі аналізу вимірних пеленгів α_n у прямокутній декартовій системі координат. При цьому ігнорування радіуса кривизни Землі призводить до похибки визначення географічних координат, що не перевищує 1 м, за умови, що найбільша відстань між пеленгатором і ДРВ сягає 50 км.

В якості найпростішого алгоритму визначення координат ДРВ використовують оцінювання середнього значення координат точок перетину пеленгів (рис. 5.4), який враховує взаємне геометричне

розміщення пеленгаторів. В якості такого оцінювання в радіонавігації широко застосовується евристичне оцінювання за *критерієм найменших квадратів відстаней до ліній вимірюваних пеленгів*.

Відшукується точка, при якій кутові відхилення, необхідні для кожного пеленгу, щоб взяти точний напрямок на цю точку, будуть мінімальними.

Принцип дії даного алгоритму зображений на рисунку 5.4. Величини r_1 , r_2 , r_3 являють собою перпендикуляри, опущені з точки ймовірного місцезнаходження ДРВ на лінії пеленгів. Причому точка, в якій сума квадратів $\sum_{i=1}^N r_n^2$ мінімальна, і буде місцем, в якому знаходиться ДРВ. Очевидно, що для системи визначення місцезнаходження ДРВ трьома радіопеленгаторами найменша похибка буде в тому випадку, коли лінії пеленгів, що пересікаються, утворять правильний трикутник.

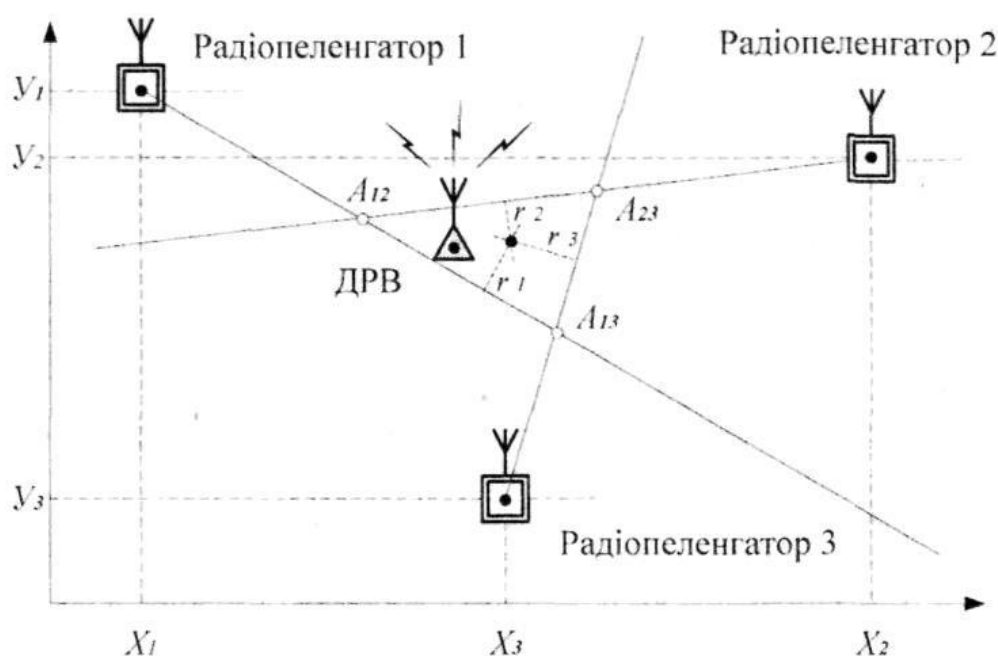


Рисунок 5.4. Принцип визначення координат ДРВ трьома радіопеленгаторами

Реалізація цього методу на комп'ютерах не викликає проблем. Слід, однак, пам'ятати, що за використання всіх цього методу обчислюється лише оцінка. Немає такої математичної формули, яка давала б точне місце розташування.

До недоліків алгоритму оцінювання за критерієм найменших квадратів можна віднести те, що він *не враховує рівновіддаленість пеленгаторів від ДРВ, а також можливу різну точність пеленгів*. Наявність завмирань під час поширення радіосигналів також може суттєво позначитися на точності пеленгування.

На рис. 5.5 дана схема послідовності розрахунку місця розташування.

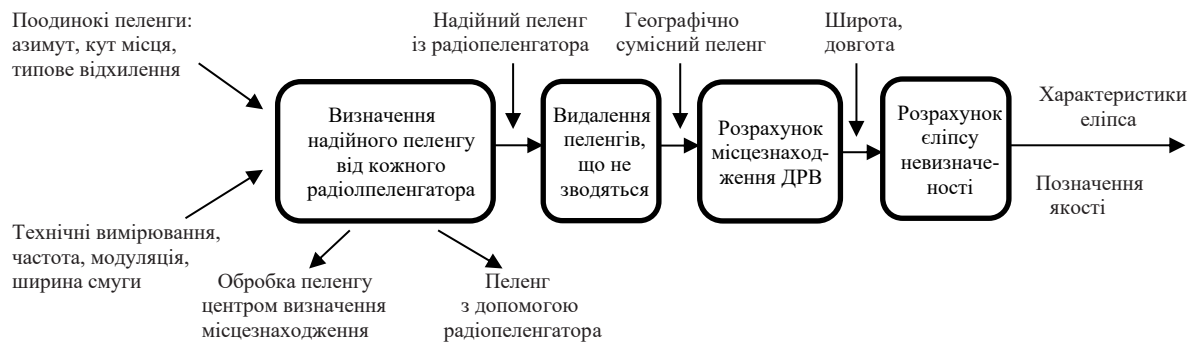


Рисунок 5.5. Схема послідовності розрахунку місця розташування

Комп'ютерну програму TRIANGULATION, яка зазвичай відповідає цим етапам, можна придбати у MCE.

Для визначення місцезнаходження ДРВ за даними пеленгування потрібно мати *цифрову карту*, на яку наносяться пеленги, отримані кожним пеленгатором, і вказане їхнє власне місцезнаходження. У випадку використання у складі системи визначення місцезнаходження ДРВ рухомих радіопеленгаторів необхідно також постійно враховувати та відображати на карті навігаційну інформацію, що динамічно змінюється, тобто дані про місцезнаходження та азимути рухомих пеленгаторів. Тому ці карти разом із даними *GPS* є важливим засобом визначення місцезнаходження та курсових кутів рухомих пеленгаторів. Приклад пеленгування з відображенням на карті наведено на рисунку 5.6.

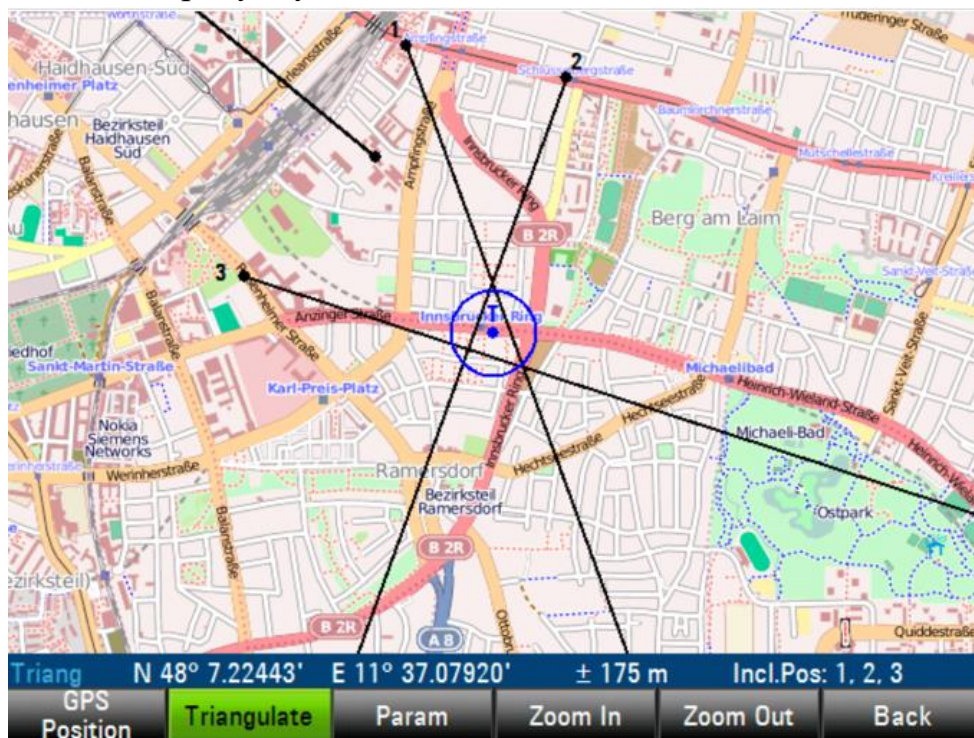


Рисунок 5.6. Приклад пеленгування ДРВ

До складу картографічної системи повинна входити спеціалізована база даних, яка дозволяє зберігати і в подальшому використовувати інформацію про пеленги та виявлені ДРВ з їхніми основними характеристиками: несучою частотою, часом виявлення або отримання пеленга, смуги займаних частот тощо.

5.3. Метод різниці часу приходу сигналів (TDOA);

При використанні методу різниці часу надходження сигналів (TDOA) розташування джерела випромінювання визначається на підставі відносних значень часу приходу сигналу кілька приймачів. Системи TDOA надають гнучкість у виборі типу та розміщення антени, оскільки на точність методу мінімально впливають близько розташовані відбивачі, а антени і кабелі зазвичай не вбудовані в приймачі TDOA. Подібна гнучкість дозволяє враховувати інші фактори, такі як розмір антени, функціональна складність станції, стійкість і діапазон частот, що перекривається. Можливість застосування простих, легко монтюваних антен дозволяє легко встановлювати системи геолокації, що використовують метод TDOA, що особливо важливо для тимчасових установок.

Сигнали з ширшою смугою мають часові характеристики з меншою тривалістю, що може позитивно вплинути на точність методу TDOA, особливо у несприятливих умовах багатопроменевого поширення. Однак на точність позиціонування впливають також відношення сигнал/шум прийнятих сигналів, яке, як правило, найкраще для вузькосмугових сигналів на нижніх частотах. Методи TDOA застосовні для більшості спеціально модульованих сигналів, але не можуть використовуватися для визначення немодульованого безперервного сигналу (оскільки не містить системи відліку часу).

В основі методу TDOA лежить проста концепція, за якою будь-яка різниця відстаней між джерелом електромагнітного сигналу та двома приймачами в системі визначення розташування може бути безпосередньо зіставлена з різницею в часі приходу сигналу на ці приймачі. З отриманої різниці в часі нескладно отримати різницю відстаней як добуток різниці часу на швидкість поширення сигналу. Різниця часу приходу сигналу на кожен метр різниці відстаней між двома трактами проходження прямого сигналу становить приблизно 3,3 нс.

У системі двох координат рівняння різниці відстаней $\Delta D = D_1 - D_2$ описує гіперболу. На рисунку 5.7 а) наведено гіперболи для п'яти різних значень ΔD . Джерело сигналу S розташований на одній із кривих.

Оскільки гіпербола представляє постійну різницю відстані, джерело сигналу може бути переміщений у будь-яку точку відображеної гіперболи, не впливаючи при цьому на різницю в часі приходу сигналу на приймачі R1 та R2. Очевидним наслідком цієї характеристики є необхідність наявності більше двох приймачів для визначення місця розташування за допомогою системи TDOA.

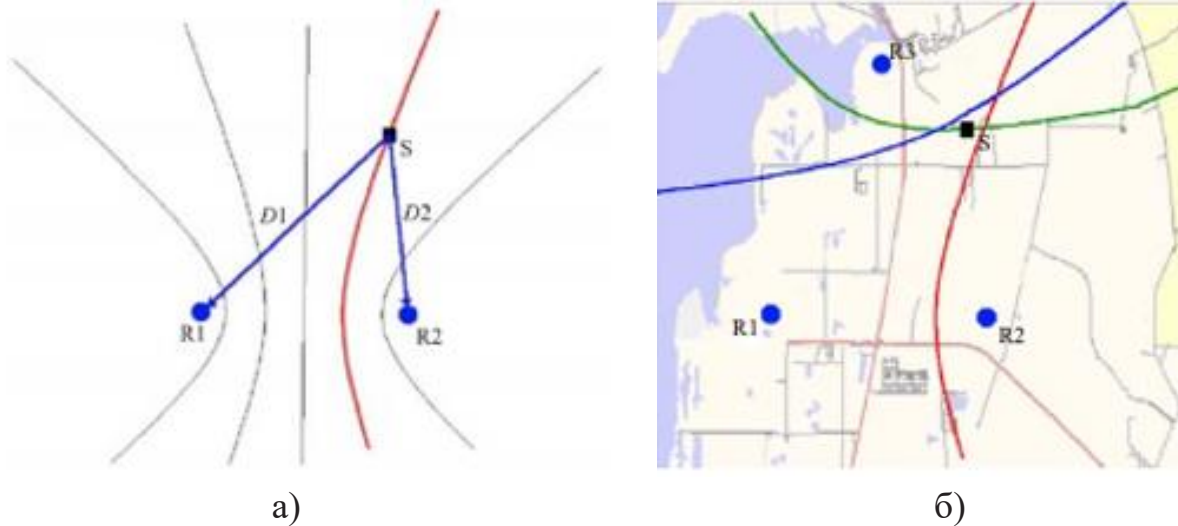


Рисунок 5.7

- а) різниця в часі на основі різниці відстаней $\Delta D = D_1 - D_2$ (два приймача)
 б) джерело сигналу на перетині двох або більше гіпербол (три приймача)

Якщо не брати до уваги геометричне розташування в особливих випадках, для систем TDOA необхідні як мінімум три приймачі для визначення розташування джерела у двох вимірах. Як показано на рисунку. 5.7 б), за наявності трьох приймачів утворюються три можливі парні комбінації приймачів, що видають три різні значення різниці часу і, відповідно, три різні гіперболи, які в ідеальних умовах перетинаються в одній точці. Джерело сигналу розташоване на перетині гіпербол. Хоча потрібні три приймачі, для геолокації необхідні лише дві парні комбінації приймачів. Теоретично третя парна комбінація є надмірною. Однак у неідеальних умовах якості даних, що описують різниця часу, відрізняється різними парних комбінацій приймачів. Наприклад, на рис. 5.7 б) джерело сигналу фізично розташований найближче до приймача R3. Якщо припустити, що в приймачі R3 вищий рівень сигналу, тоді комбінації R1-R3 і R2-R3 можуть дати більш точні розрахунки різниці часу, ніж комбінація R1-R2. Більш досконалі алгоритми визначення місця розташування часто використовують цю надмірність для підвищення точності вимірювання місця розташування.

Поширений прямий метод розрахунку розташування в системах TDOA полягає в початковому обчисленні різниці часу приходу сигналу для кожної парної комбінації приймачів. Далі за допомогою алгоритмів визначається точка перетину гіпербол, відповідних значень різниці часу. Це аналогічно методиці ліній пеленгу (LoB), що використовується в системах радіопеленгації. У системах радіопеленгації кутові похибки часто перешкоджають сходження трьох або більше ліній пеленгів в одній точці розташування. У системах TDOA похибки обчислення часу мають схожий вплив на гіперболи, як показано на рис. 5.7 б). Для розрахунку розташування можуть застосовуватися інші, зазвичай запатентовані обчислювальні методи. Ці методи зазвичай використовують ускладнені алгоритми для роботи з багатопроменевими множинними сигналами в суміщеному каналі, а також іншими проблемними сферами застосування методу TDOA. Ці методи можуть також включати інформацію про амплітуду, а у разі використання антенних решіток – інформацію про кути приходу. Результати обчислень часто видаються у формі карт ймовірності, на яких кольором або яскравістю позначаються місця ймовірного розташування джерела сигналу, як показано на рис. 5.7 б).

На точність визначення місця розташування методом TDOA впливають:

- відносне розташування приймачів та джерел сигналу;
- ширина смуги сигналу, періодичність та багатопроменеве поширення;
- точність синхронізації.

5.4. Визначення місцезнаходження ДРВ методом наведення з допомогою одного мобільного пеленгатора

Зі збільшенням кількості РЕЗ все проблематичнішим стає вирішення завдання щодо точного визначення місцезнаходження джерел радіозавад або інших невідомих ДРВ. Особливо тяжко визначити за допомогою стаціонарних радіопеленгаторів місцезнаходження невідомих ДРВ у щільно забудованих міських зонах. У таких випадках можуть використовуватися рухомі радіопеленгатори і портативне обладнання радіопеленгування (рисунки 5.8). При цьому радіопеленгатор встановлюється на будь-який транспортний засіб, який має для цього необхідні умови (обладнання, джерело електроживлення, можливість розміщення антен тощо). До рухомих засобів пеленгування також відносять переносні радіопеленгатори, які для проведення вимірювань можна встановлювати та розгортати в

потрібному місці. Використання рухомих і переносних радіопеленгаторів дозволяє застосувати меншу кількість стаціонарних пеленгаторів.



Рисунок 5.8. Приклади рухомого та переносного радіопеленгаторів

Основною перевагою рухомих радіопеленгаторів порівняно зі стаціонарними є можливість проведення радіопеленгування під час руху транспортного засобу, що дозволяє шляхом вимірювання пеленгів протягом певного часу, наприклад, двома рухомими пеленгаторами, обладнаними відповідними засобами радіозв'язку, досить швидко визначити координати місцезнаходження джерела радіозавад або невідомого ДРВ.

Рухомі радіопеленгатори найчастіше застосовуються для визначення місцезнаходження ДРВ в наступних обставинах:

- з малою потужністю випромінювання;
- у разі низької точності оцінювання місцезнаходження ДРВ стаціонарними радіопеленгаторами;
- за межами зони радіодосяжності стаціонарних радіопеленгаторів;
- для уточнення місцезнаходження ДРВ в умовах щільної міської забудови;
- у важкодоступних місцях, де проведення радіопеленгування іншими засобами неможливе.

Розрізняють два основні *методи пеленгування за допомогою рухомих радіопеленгаторів*:

- *дистанційний метод або метод відсторонення* (послідовних “зарубок” або квазістаціонарний) – полягає в переміщенні радіопеленгатора

навколо місця можливого знаходження ДРВ, отриманні декількох окремих пеленгів із вибраних фіксованих позицій (рис. 5.9);

– *метод наведення або приводний метод* (самонаведення) – базується на пеленгуванні ДРВ під час руху радіопеленгатора в напрямку приходу радіохвилі (в напрямку пеленга) з наступним усередненням пеленгів, які в процесі руху можуть змінюватися з різних причин.

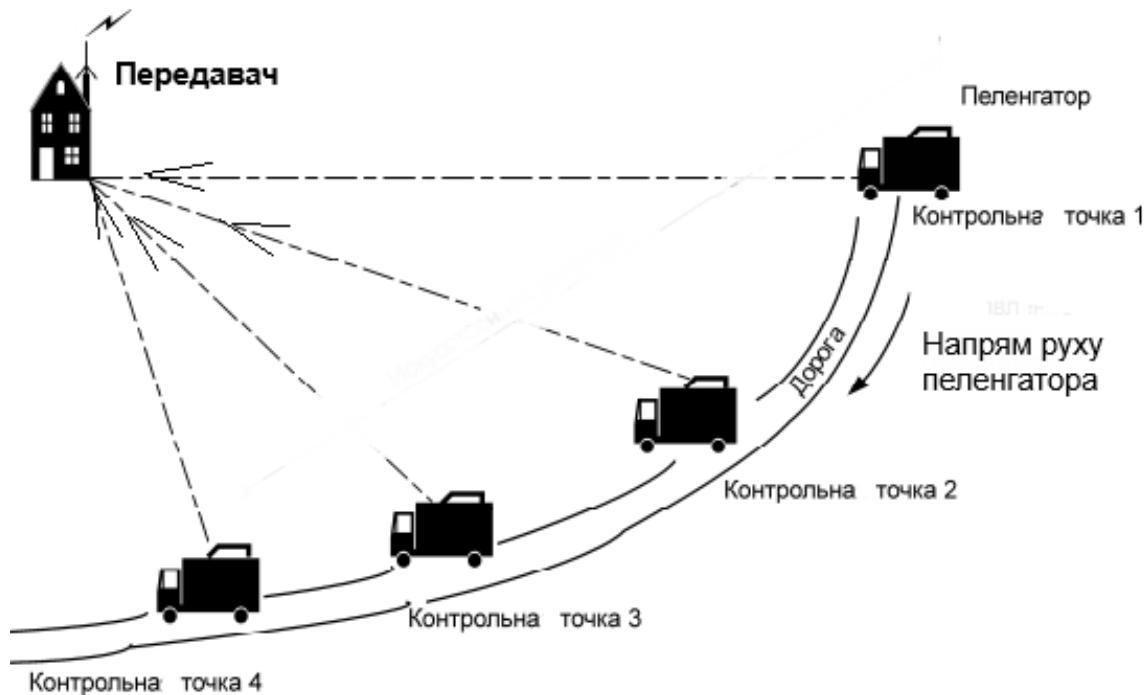


Рисунок 5.9. Приклад пеленгування ДРВ одним рухомих радіопеленгатором

Дистанційний метод полягає в отриманні декількох окремих вимірів ліній пеленгу з фіксованих позицій, розташованих на потрібній відстані від потрібного передавача. Відповідна відстань може залежати від точності системи РП, місцевого рельєфу чи інших умов. За допомогою лише однієї переносної або рухомої станції можна провести вимірювання в різних точках і потім підсумувати результати вимірювань з використанням стандартних методів триангуляції.

Цій спосіб дозволяє отримувати велику апертуру для пеленгації при роботі з пеленгаційною антеною малої апертури - спосіб так званої штучної апертури. При переміщенні антени у просторі вимірюється пеленг найбільш сильної складової сигналу у ряді точок на шляху пересування. Розмір такої апертури дорівнює відстані переміщення антени. Цим методом не можна визначити точний пеленг на джерело випромінювання у кожній точці вимірювань (рис. 5.9), але у динаміці він дає непогані результати.

Пеленгаційна антена мобільної станції РК має, як правило, відносно невелику апертуру в стаціонарному режимі. Тому вона дуже чутлива до локальних значенням фази спотвореного фронту хвилі, що приходить.

У разі пересування в умовах багатопроменеві станція РК може дати досить широкий розкид миттєвих значень виміряного пеленгу. При зупинці мобільної станції найімовірніше пеленг буде неправильним.

За допомогою пеленгаційної антени можна створити штучну апертуру двома методами. Перший спосіб полягає в тому, що, використовуючи спеціальне електронне обладнання на станції та виміряні значення пеленгів на зупинках мобільної станції, в межах розміру штучної апертури (рис. 5.9) можна розрахувати усереднений пеленг. Однак процес визначення пеленгу при цьому займає багато часу, так що отримати достовірний пеленг за малого часу роботи передавача неможливо. Якщо є можливість відлік пеленгу в контрольних точках у межах відстані штучної апертури брати у русі, то це значно скорочує час визначення місцезнаходження.

Другий спосіб заснований на здатності оператора по сукупності миттєвих відліків пеленга на дисплеї пеленгатора, що рухається, вибрати найбільш часто повторюване значення.

Недоліком дистанційного методу є той факт, що вибрані точки вимірювання схильні впливу перешкод, створюваних навколишніми об'єктами, і що найчастіше неможливо провести одночасні вимірювання у кількох точках. Час передачі сигналів або переміщення передавачі можуть призводити до похибок позиціонування. При виборі принципу радіопеленгації для цих видів вимірювань повинні враховуватись сприйнятливість до впливу умов у місці проведення вимірювання та апаратні конфігурації пересувних та переносних моделей обладнання.

Методи наведення успішно застосовуються з використанням рухомого обладнання мінімальної складності та помірної точності. Вони також ефективні при вжитті заходів щодо усунення завад з використанням рухомих засобів контролю.

Ця друга стратегія використовує рухоме обладнання (зазвичай встановлене на автомобілі або на літаку), здатне швидко переміщатися в район розташування передавача по *послідовним наближеним* значенням істинної лінії пеленгу.

По мірі зменшення відстані до передавача величина абсолютної похибки відстані також зменшується до контрольованого значення, навіть якщо відносна похибка в градусах залишається незмінною. Перевагами цієї стратегії є нижча вартість та складність обладнання, можливість отримання

прийнятних результатів протягом допустимого часу, а також той факт, що проблеми похибок через вплив місця розміщення мають набагато менше значення, оскільки пристрій рухливий і похибки можуть бути усереднені по великій базі, і нарешті, той факт, що інформація радіопеленгації може бути отримана з наднизькочастотної та локально накладеної модуляції системи наведення, яка не створює завад інформації, що передається.

Недоліки методу полягають у тому, що втрачається фактор скритності, властивий дистанційному методу, і що для належного позиціонування передавача потрібно кілька сеансів передачі сигналу протягом допустимого періоду часу.

Визначення місцезнаходження ДРВ одним рухомим радіопеленгатором вимагає значно більших затрат часу, ніж у разі використання високоточних стаціонарних радіопеленгаторів.

Особливо цей процес ускладнюється за умов великого міста, де електромагнітне поле, що приймається радіопеленгатором, завжди є сумарним результатом багатьох випадкових складників, зумовлених дифракцією радіохвиль та їх відбиттям від нерівностей рельєфу місцевості, будівель і споруд, побудованих із різних матеріалів, ліній електропередач, автомобілів тощо. Становище погіршується також тим, що в місті в більшості випадків між антеною ДРВ, що пеленгується, та антеною радіопеленгатора відсутня пряма видимість.

Точність пеленга, отримана у випадку приймання сигналів земної хвилі з незначними відбиттями, складає близько $\pm 2^\circ$. Для інших практичних умов пеленгування може бути досягнута точність $\pm 5^\circ$, яку можна підвищити, якщо обчислювати середнє значення пеленгів. З метою отримання якомога точніших результатів пеленгування радіопеленгаторне обладнання повинне бути ретельно відкаліброване разом з власними антенами та з іншим обладнанням, що встановлене на даху транспортного засобу. ***Для періодичної перевірки характеристик системи можна використовувати контрольні пеленги на відомі передавачі.***

Радіопеленгатори мобільних комплексів радіомоніторингу мають перевагу перед пеленгаторами стаціонарних РКП, оскільки практично завжди можна вибрати таке місце для мобільного комплексу радіомоніторингу, де буде відсутній або суттєво знижений вплив перешкод на результати вимірювання, а місцеві відбиття радіосигналів будуть мінімальними. Крім цього, рухомі пеленгатори, на відміну від стаціонарних, з метою зведення значень похибок до мінімальних, завжди можуть поступово рухатися на транспортному засобі в напрямку на ДРВ. Але

мобільний комплекс радіомоніторингу порівняно зі стаціонарним РКП має один суттєвий недолік, а саме – недостатність місця на ньому для розміщення гостронаправлених антен, які виключають вплив на результати вимірювання відбитих хвиль. Тому, враховуючи брак місця для розміщення габаритних антен і незручність роботи з ними під час руху, використовують багатоеlementні антенні решітки з малою апертурою.

5.5. Метод визначення місця розташування однією станцією (метод *SSL*)

Метод визначення місця розташування однією станцією, який дозволяє встановити географічне місцезнаходження ДРВ одним радіопеленгатором шляхом використання принципу кореляційної інтерферометрії, виходячи з припущення, що відбиття радіохвиль від іоносфери відбувається ніби від простого горизонтального дзеркала, розміщеного на певній висоті (h), тільки один раз (для діапазонів СЧ і ВЧ – тобто для радіочастот до 30 МГц за *іоносферною хвилею*) (рис. 5.10).

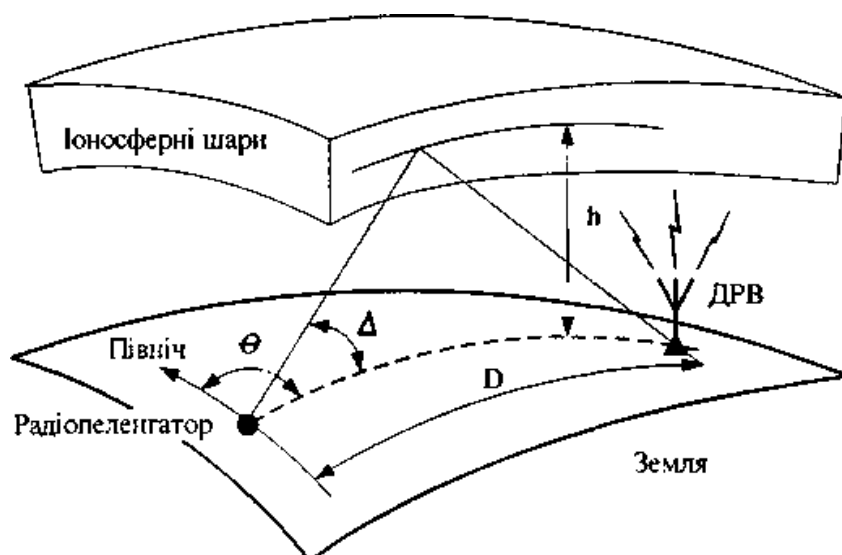


Рисунок 5.10. Принцип визначення місцезнаходження ДРВ одиночним радіопеленгатором

θ – географічний азимут; Δ – кут місця; D – відстань;
 h – діюча висота відбиття; R – радіус Землі.

Система обробки даних, що одержуються від радіопеленгатора (азимут, кут місця, позиція) з урахуванням прогнозу стану іоносфери дозволяє оцінити відстань між передавачем і радіопеленгатором. Таким чином, завдяки концепції *SSL* можна виконати завдання позиціонування у тих випадках, коли з територіальних, часових та експлуатаційних міркувань не можна встановити повну триангуляційну радіопеленгаторну систему

позиціонування передавача. *SSL* може також розглядатися як доповнення до існуючих систем визначення місцезнаходження.

Радіопеленгатори *SSL* видають одночасно азимут і кут місця сигналу, прийнятого антеною решіткою. Поширення може здійснюватися як земною, так і іоносферною хвилею по безлічі трас, що відповідають різним кутам місця. В результаті пеленгатор *SSL* видає кут місця, що свідчить про варіацію часу поширення через багатопроменеві завади. Алгоритми обробки застосовуються для визначення величин кутів, що відповідають вищезгаданим безлічі трас.

Цей метод, в залежності від частоти та умов поширення радіохвиль, добре працює на відстанях до 2500 км/ З'єднання даних про азимут, відстань до передавача та місце розташування радіопеленгатора дає можливість оцінити географічні координати ВЧ-передавача.

Основою підходу *SSL* є званий класичний метод оцінки відстаней. Цей метод заснований на припущенні, що справжнє проходження ВЧ-хвиль може бути змодельовано, виходячи з припущення, що відбиття відбувається як би від простого горизонтального дзеркала, розташованого на певній висоті. Висота такого дзеркала береться з іонограм вертикального падіння як діюча висота на частоті, яка називається еквівалентною частотою вертикального кута.

Основним недоліком методу *SSL* є те, що він базується на припущенні, ніби сигнал відбивається від іоносфери лише один раз (один стрибок), а оскільки значення висот h іоносфери не можуть бути однозначними внаслідок того, що густина іонів ніколи не буває стабільною і залежить від сезону, часу доби, циклічних змін сонячної активності, географічної широти та інших чинників, то можливі відбиття сигналу від шарів, які знаходяться на різних висотах, що призводить до отримання декількох різних відстаней до ДРВ. З цієї причини похибка пеленгів збільшується з висотою h і ростом кількості відбиттів, а також із зменшенням відстані до ДРВ.

Перспективність використання цього методу викладена в Рекомендації *MCE-P SM.854* і полягає в тому, що техніка, яка використовується в цих системах, придатна для створення густої мережі радіомоніторингу в ВЧ-діапазоні.

5.6. Порівняння методів позиціонування

Порівняння методів позиціонування зведено у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2

Порівняння методів позиціонування

Характеристика	Метод наведення/дистанційний метод	Тріангуляція	Визначення розташування методом TDOA	SSL (тільки ВЧ)
Необхідна кількість станцій	1 з можливостями методу наведення або дистанційного методу.	2 для визначення розташування з допомогою кута приходу. 3 для однозначного визначення розташування.	Необхідні як мінімум 3 станції, а додаткові станції сприяють виключенню неоднозначності вимірів.	1
Необхідне обладнання	Радіопеленгаторна антена на транспортному засобі. Мережа не потрібна.	Один радіопеленгатор на позицію. Мережа з низькою швидкістю передачі даних для обміну координатами та результатами визначення кута приходу.	Низькі вимоги до антени та приймачам. Розрахована на багато користувачів синхронізація (зазвичай характерна для систем GPS).	1 станція, що вимірює кут місця і азимут, і один із методів визначення характеристик іоносфери, наприклад іоносферний зонд, розрахунок прогнозованих значень або калібрування.
Робочі характеристики залежать від геометричного розташування передавача/системи визначення розташування	Не застосовується.	Висока точність вимірювання у центрі трикутника при використанні трьох радіо-пеленгаторів. За межами трикутника точність визначення розташування повільно знижується.	Найкраща точність у межах зони, обмеженою позиціями приймачів. За межами трикутника точність знижується для приблизного розрахунку однієї лінії пеленгу.	Метод SSL дає однозначні результати тільки для сигналів з одним стрибком.
Робочі характеристики залежать від ширини смуги вхідного сигналу	Ні. Вимагає постійних або тривалих сигналів.	Залежить від застосовуваного методу.	Метод TDOA не може бути незастосовний для сигналів з дуже вузькою смугою або немодульованих сигналів.	Ні.
Спеціальне призначення для рухомих або стаціонарних станцій	Тільки для рухомих.	Для стаціонарних та рухомих.	Для стаціонарних та рухомих; Застосування рухомих станцій може бути недоцільним, в залежності від вимог для передачі даних.	Для стаціонарних.
Здатність обробляти багатопроменеві сигнали/сигнали від множинних джерел.	Як правило, ні, оскільки часто використовуються звичайні методи, такі як інтерферометрія.	Див. таблицю 4.1 з інформацією про частково когерентних джерел.	Так, при використанні сучасних методів обробки TDOA.	Див. таблицю 4.1 з інформацією про частково когерентних джерел.

Загалом не існує єдиного методу, подібного до методів на основі вимірювання різниці часу приходу (TDOA) і кута приходу (AOA), який міг би забезпечити точний розрахунок розташування за будь-яких умов. У кожного методу є свої переваги та обмеження в тому, що стосується точності позиціонування.

Щоб досягти кращої точності місцезнаходження, необхідно розглядати комбінацію двох або більше схем позиціонування, що доповнюють друг друга.

Визначення розташування виконується на основі обробки інформації, отриманої з кожної станції, включаючи результати вимірювань кута приходу (AOA), результати вимірювань різниці часу приходу (TDOA), а також інформацію про розташування станції.

Використання методу AOA у поєднанні з методом TDOA може сприяти усуненню неоднозначності позиціонування, властивій методу TDOA, і підвищити точність визначення місцезнаходження. Це ілюструється на рисунку 5.11.

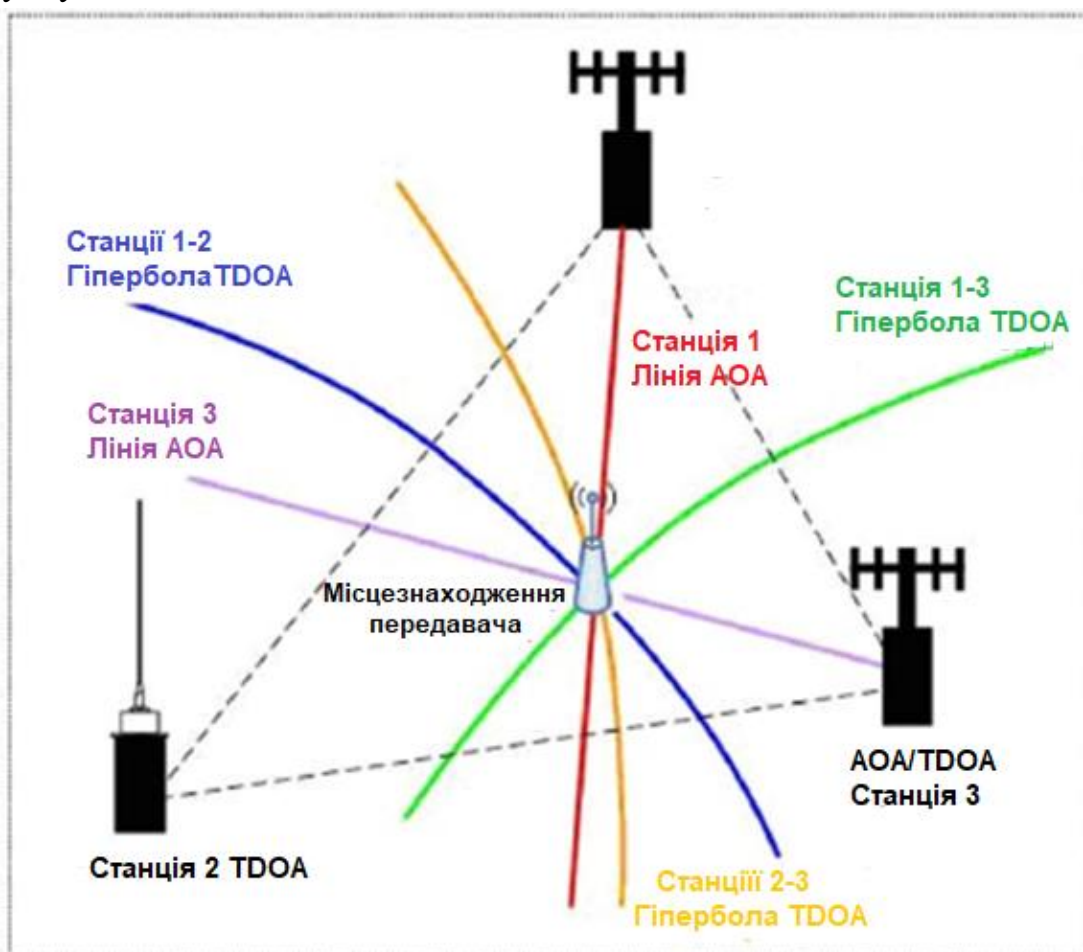


Рисунок 5.11. Поліпшення результатів за допомогою комбінації методів AOA/TDOA

Контрольні питання

1. Що розуміють під визначенням місцезнаходження джерела радіовипромінювання ?
2. Які основні методи визначення місця розташування джерела, в чому полягає їх сутність та особливості застосування?
3. Поясніть суть триангуляційного (кутомірного) методу оцінювання географічних координат ДРВ.
4. Основна перевага рухомих радіопеленгаторів - це
5. У яких випадках найчастіше застосовуються рухомі радіопеленгатори для визначення місцезнаходження ДРВ.
6. Якій основний метод визначення місця розташування ДРВ для радіочастот до 30 МГц за іоносферною хвилею?
7. Сутність метода наведення, необхідне обладнання та сфера застосування.

6. Радіоконтроль спектра та джерел радіовипромінювання

Основними об'єктами радіоконтролю служби радіоконтролю є:

- *Радіочастотний спектр* у заданій смузі частот, його зайнятість і завантаженість, що підлягають контролю і аналізу через виміряні параметри використання спектру радіозасобами та іншими джерелами радіовипромінювань;
- *Діючі РЕЗ* або угруповання РЕЗ та інші джерела радіовипромінювань, що підлягають контролю через *відповідність виміряних параметрів випромінювань* окремих радіозасобів або угруповання радіозасобів та інших джерел радіовипромінювань встановленим нормам цих параметрів;
- *Радіозавади*, що підлягають контролю через вимірювання параметрів завад;

6.1. Контроль відповідності параметрів випромінювань дозволених передавачів

Контроль параметрів випромінювань передавачів здійснюється з метою:

- визначення відповідності параметрів і характеристик випромінювання передавачів умовам користування радіочастотним спектром певним радіообладнанням (РЕЗ та ВП), визначених присвоєнням радіочастоти;
- перевірки стану електромагнітного середовища у певному місці (території);

– виявлення і визначення місцезнаходження джерела радіозавад для законно діючого радіообладнання.

Контроль здійснюється цілодобово в режимі 24/7.

Контроль здійснюється шляхом:

- виявлення випромінювань;
- вимірювання параметрів і визначення характеристик випромінювання;
- ідентифікації випромінювання та радіообладнання;
- перевірки відповідності параметрів випромінювань передавачів умовам наданих частотних присвоєнь.

Для прикладу вимірювань параметрів сигналу, що наведений на рисунку.

6.1, протокол вимірювань матиме наступний вигляд

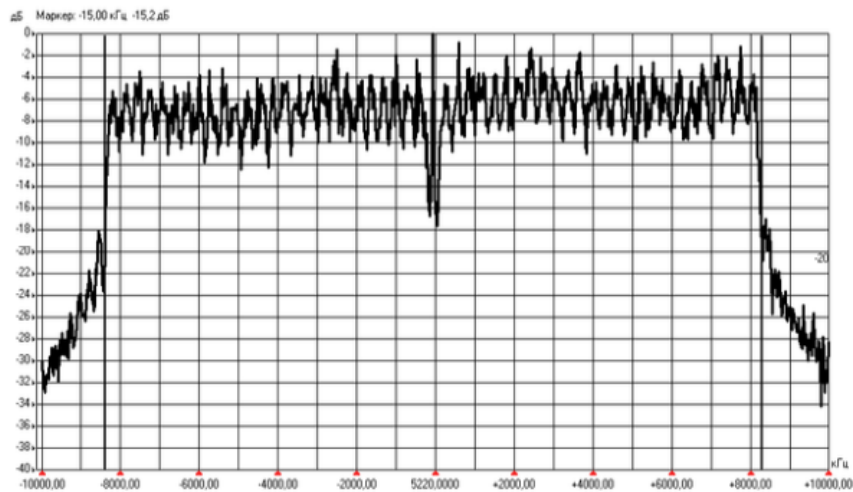


Рисунок. 6.1. Спектрограма вимірювання частоти та ширини смуги частот радіовипромінювання на несучій частоті 5 220,0 МГц у відносних одиницях

Спектрограма параметрів випромінювання РЕЗ та ВП

Умови вимірювання:

Місце вимірювання: 49°59'19.3" пш, 36°13'53.0" сд

Користувач: ООО "ХСПУ-2"

Дата: 11.02.2014.

Час: 11:45:59.

Засоби радіочастотного контролю: РМ-1300-Р4.

Параметри спектру сигналу:

Виміряна частота сигналу: 5219,983548 МГц

Виміряне відхилення частоти сигналу: -16,452 кГц

Виміряна ширина смуги частот випромінювання на рівні -20дБ:
16673,3 кГц (– 8371,0; + 8302,3)

Виміряний рівень сигналу: 84,3 дБ

Виділена частота сигналу: 5220,0000 МГц

Напруженість електромагнітного поля (дБмкВ/м): виміряна 103,1

Висновок: вказується відповідність параметрів і характеристик випромінювання передавачів умовам користування радіочастотним спектром радіообладнанням, що інспектується та визначеного у присвоєнні радіочастоти; результати перевірки стану електромагнітного середовища у місці встановлення обладнання (території) та наявності радіозавад.

У додатку В наведений приклад оформлення протоколу вимірювань УДЦР.

6.2. Виявлення недозволених випромінювань (передавачів)

Недозволеним випромінюванням вважається радіовипромінювання:

– яке створюється незаконно діючим радіообладнанням (РЕЗ або ВП) або

– випромінювання, якого не повинно бути згідно розрахунків електромагнітної сумісності, у певному місці та часі.

Згідно Закону України “Про електронні комунікації”, *незаконно діюче радіообладнання* (НДР) – радіообладнання, випромінювальний пристрій будь-якого призначення, експлуатація якого заборонена або не дозволена в Україні або щодо якого встановлений факт експлуатації без визначеного законодавством присвоєння радіочастоти.

Пошук радіозавад

Враховуючи апріорну невизначеність щодо фізичної суті і часових характеристик появи радіозавади та місцезнаходження джерел радіозавад, пошук і виявлення джерел радіозавад реалізується шляхом виконання таких послідовних процедур:

1. Встановлення факту наявності радіозавади в певному приймачі.
2. Встановлення факту появи радіозавади через вплив зовнішнього джерела випромінювання.
3. Визначення часових характеристик появи радіозавади.
4. Реєстрація радіозавади засобами радіочастотного моніторингу.
5. Ідентифікація радіозавади.
6. Пеленгування радіозавади.
7. Визначення місцезнаходження джерела радіозавади.
8. Прийняття заходів щодо усунення впливу радіозавади на певний РЕЗ користувача.

Пошук радіозавади проводиться, як правило, із застосуванням портативних засобів радіомоніторингу і спрямованих антен.

Ідентифікація радіозавад здійснюється за особливостями параметрів і характеристик радіовипромінювання, а саме, за:

- типом сигналу (аналоговий чи цифровий);
- несучою частотою;
- шириною смуги частот;
- формою спектра,
- тривалістю сигналу;
- видом і параметрами модуляції;
- методом мультиплексування.

Під *ідентифікацією* джерела радіовипромінювання мається на увазі визначення належності виявленого радіовипромінювання до певної радіотехнології та певного передавача на підставі аналізу та порівняння характеристик випромінювання з відомими.

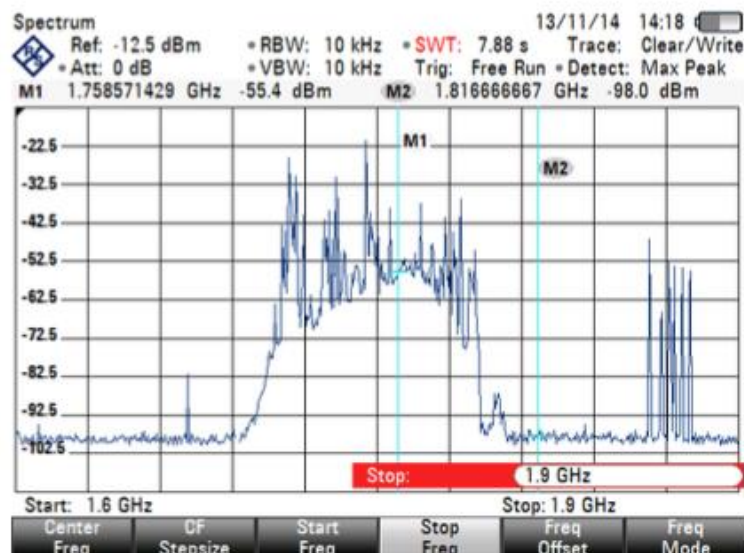
Приклад виявлення та ідентифікації радіозавад наведено на рис.6.2.

Пеленгування джерела радіозавади може здійснюватися як з використанням портативного приймача з портативною спрямованою антеною, так і автоматизованих радіопеленгаторних систем, розташованих на автомобілях (рис. 5.8).

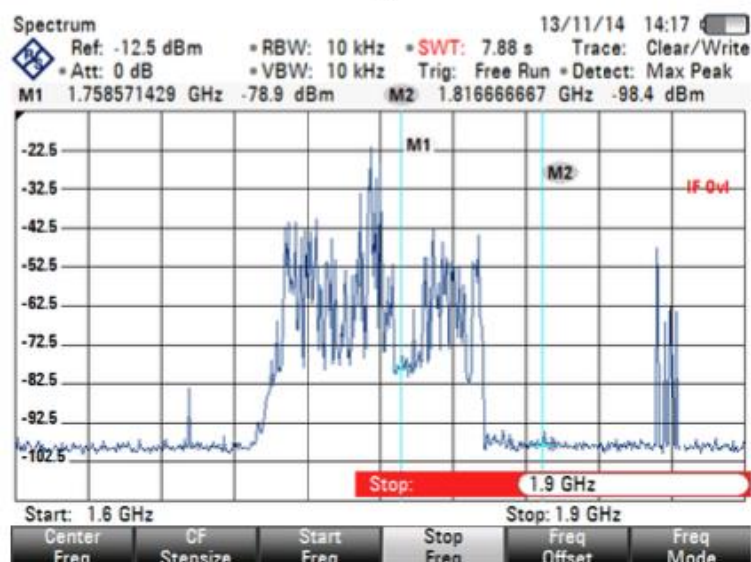
У разі виявлення незаконно діючого радіообладнання чи випромінювального пристрою регуляторний орган забезпечує вжиття заходів щодо припинення його роботи.

За результатами радіочастотного моніторингу та заходів, передбачених цією статтею, а також за результатами державного нагляду регуляторний орган забезпечує вжиття заходів щодо припинення роботи незаконно діючого радіообладнання та усунення дії джерел радіозавад у смугах радіочастот загального користування відповідно до закону.

У разі неможливості застосування заходів державного нагляду до суб'єкта, який експлуатує незаконно діюче радіообладнання чи випромінювальний пристрій, регуляторний орган звертається до органів Національної поліції України для проведення спільних заходів з метою встановлення особи порушника та інших фактичних даних, необхідних для оформлення матеріалів про адміністративне правопорушення відповідно до Кодексу України “Про адміністративні правопорушення”.



а)



б)

Рисунок 6.2. Спектрограми сигналів на вході приймача БС стандарту у смузі частот 1600 МГц – 1900 МГц:

- а) під азимутом 90° в умовах радіозавади ($M1 = -55,4$ дБм);
- б) під азимутом 135° без завади ($M1 = -78,9$ дБм).

6.3. Вимірювання зайнятості спектра

Термін “вимірювання зайнятості спектру” відноситься до запису випромінювань протягом деякого періоду часу. На основі отриманих необроблених даних може бути складено майже необмежену кількість графіків, таблиць тощо, наприклад, визначено розрахункову зайнятість на смугу частот або канал, що *перевищує граничний рівень*. Питання щодо ідентифікації того, хто, де і коли займає радіочастотний канал чи смугу, не стосуються зайнятості спектра, але вирішується окремо обговорюються при аналізі сигналів та впізнання передавачів.

У якості приймального обладнання використовуються вимірювальні приймачі (вузькосмугові або широкосмугові) або аналізатори спектру з характеристиками, що відповідають відповідним Рекомендаціям МСЕ-Р.

Контроль за використанням спектра може здійснюватися вручну, автоматично або обома способами одночасно.

Ручний контроль за використанням спектру на додаток до автоматичного потрібно в тих випадках, коли необхідні аналіз та впізнання спостережуваних випромінювань. Однак ручний контроль є дуже трудомістким і забирає багато часу, та його застосування доцільно тільки в тому випадку, якщо основні фіксовані характеристики не можуть бути зареєстровані автоматично.

Періоди використання даних або межі зайнятості смуги частот отримувати вручну недоцільно.

Якщо застосування згаданого вище ручного методу зберігання даних небажане, більше доцільно використати метод автоматичної реєстрації. Він заснований на різних завданнях контролю зайнятості діапазону.

Автоматичний контроль за використанням спектра може бути розділений на три різні методи вимірювань:

- *Сканування певної смуги частот* від початкової частоти до кінцевої за деяке число кроків частоти, наприклад 1000, з певним часом сканування (або часом розгортки, або часом перегляду), наприклад 10 секунд, за допомогою певного смугового фільтра. Цей процес зазвичай виконується за допомогою аналізатора спектра чи (швидкого) контрольного приймача. Результати, наведені на різних графіках, у таблицях тощо, відображають зайнятість у даній конкретній смузі частот протягом певного періоду часу зазвичай 24 годин. Дані вимірювання називаються вимірами зайнятості смуги частот (FBO) або реєстрацією смуги частот (Рекомендація МСЕ-Р SM.1809).

- *Вимірювання ряду попередньо заданих каналів*, необов'язково рознесених на однакову відстань між каналами. Ці виміри, як правило, виконуються за допомогою приймача і називаються вимірами зайнятості частотного каналу (Рекомендація МСЕ-Р SM.1536).

- *Для вимірювання зайнятості частотного каналу (FCO)* використовуються вимірювання смуги частот, як описано вище. Припустимо, що інтервал від початкової до кінцевої частоти поділено на 1000 кроків частоти, які можуть розглядатися як канали. Якщо час розгортки/сканування/перегляду становить, наприклад, 10 секунд, це означає, що для кожного кроку частоти цих 1000 каналів за 24-годинний

період вимірювання є приблизно 8630 вибірок. Ці результати можуть бути легко оброблені та використані як вимір зайнятості каналу (Рекомендація MCE-R SM.1793). Згідно дослідженням збільшення часу перегляду з 1 до 10 секунд не надає значного впливу результати, як показано на Рис. 6.3.

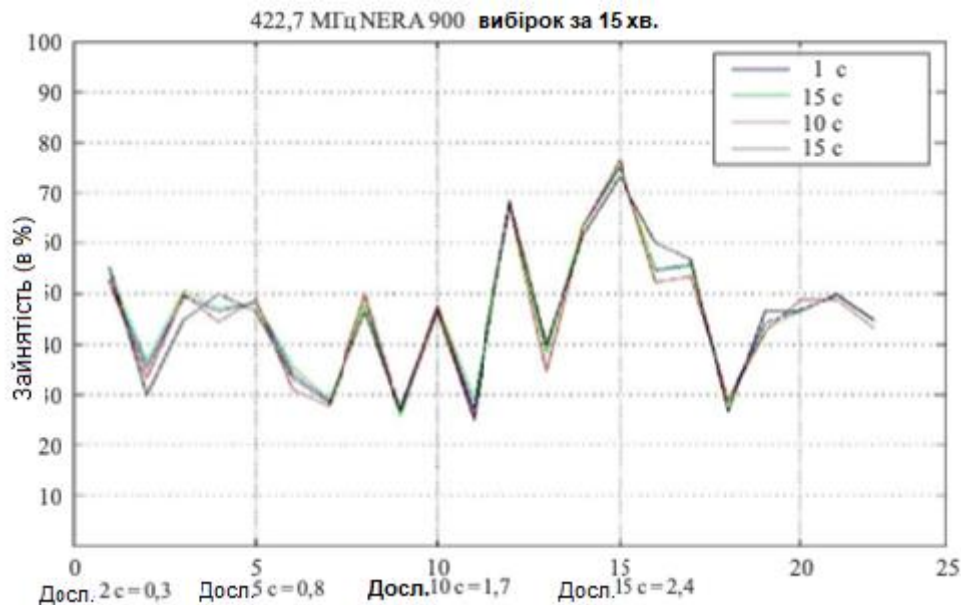


Рисунок 6.3. Порівняння різного часу перегляду

Щоб домогтися певної точності та статистичної достовірності, потрібно задане число вибірок. Для досягнення хорошого результату при 100% зайнятості необхідно всього лише кілька вибірок. Якщо зайнятість низька, для отримання такої точності і статистичної достовірності потрібно більше вибірок. Точність щодо кількості вибірок у заданий час значною мірою залежить від тривалості передачі у потрібній смузі частот і того, як часто вони виходять у ефір.

Для встановлення факту зайнятості тієї чи іншої частоти у багатьох системах автоматичного контролю зайнятості використовується пороговий рівень. Порогове значення також може бути визначено, якщо заздалегідь відомі рівні у місці проведення вимірів. У більшості випадків для визначення порогового значення рівня шуму можна додати запас в 8–12 дБ.

Простий автоматичний контроль не дозволяє розрізняти сигнали, що приймаються від станції А, від сигналів станції В (корисні та небажані випромінювання, відповідно). Сучасні засоби автоматичного контролю можуть розрізняти сигнали різних станцій.

Звіти в сучасних системах контролю за використанням спектру створюються за допомогою комп'ютерного програмного забезпечення. Звіти формуються на основі вимірів, але в них також можуть бути

використані різні технічні відомості з бази даних контролю використанням спектра та бази даних управління радіочастотним спектром. Повинен представлятися ціла низка звітів, включаючи інформацію про вихідний тракт, аналіз несучої, дату та смугу, статистичні дані про зайнятість каналу та його доступність, дані про довжину повідомлення, дані про потужність у каналі, журнал стану системи та аварійної сигналізації, а також план контролю за використанням спектра та графік роботи.

Типовий звіт, створений за допомогою комп'ютера, наведено на рисунку. 6.4.

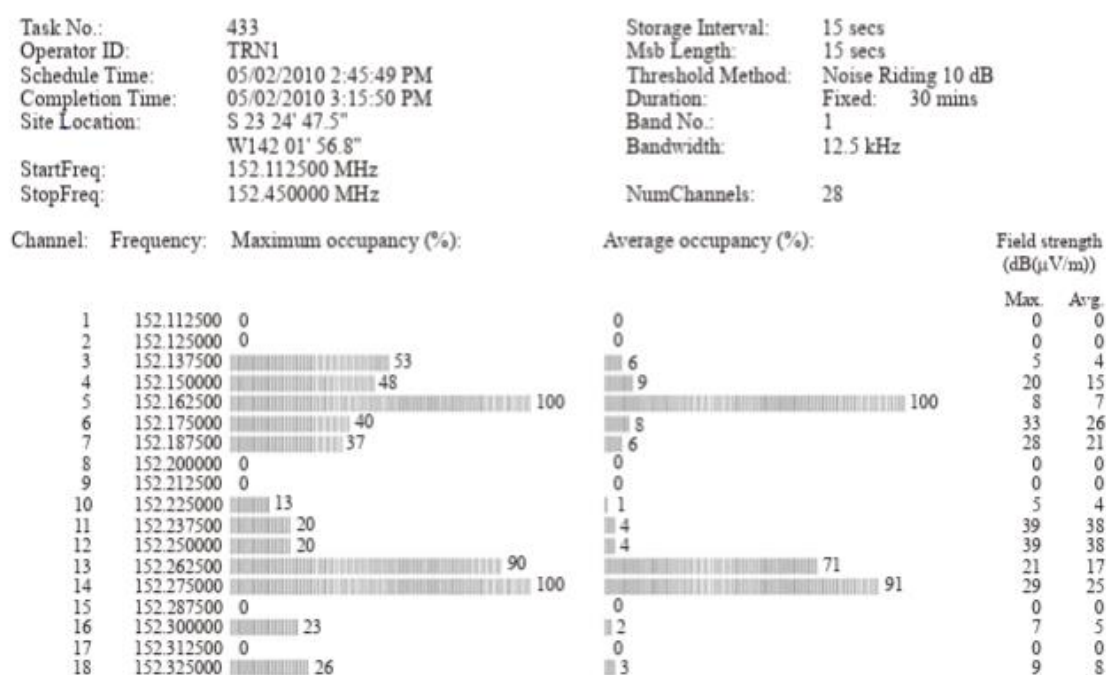


Рисунок 6.4. Зайнятість каналу.

Частина типового звіту про зайнятість за допомогою комп'ютера

Система повинна дозволяти змінювати вид звітів відповідно до вимог оператора. Звіти повинні формуватися автоматично з будь-яких результатів на екрані.

Оператор вибирає цікавий для нього вид звіту та дані вимірювань, які будуть використані; оператор запускає функцію “Звіт”, щоб на екрані автоматично з’явився текст звіту.

Звіти як графіків часто є кращим способом вивчення даних, оскільки вони дають уявлення про дані як про підсумкову інформацію та спрощують визначення тенденцій та винятків. За допомогою різних кольорів на одному графіку може бути представлено ще більше інформації.

Сучасна система має забезпечувати однакову можливість автоматизованого подання звітів на рухомий станції, фіксованої станції або

у системі управління. Можливість дистанційно створювати звіт на основі даних, що знаходяться в іншому місці, також є частиною типового програмного забезпечення.

Після того, як дані про зайнятість зібрані, необхідно проаналізувати результати та подати їх у прийнятному форматі. Дані мають бути перетворені на інформацію та в кінцевому рахунку у необхідні знання.

Система контролю, можливо, вже має описові та аналітичні функції, вбудовані в програмне забезпечення, що поставляється. Незалежно від того, чи включені ці функції програмне забезпечення для збору результатів вимірювань або поставляються у вигляді окремого додатку, відповідні процедури однакові.

Весь процес описується у 3 етапи:

1. Вимірювання та збір даних.
 2. Обробка та перетворення даних у інформацію (графіки, діаграми тощо).
 3. Подання результатів у звітах або відображення на веб-сайтах тощо.
- На основі зібраних необроблених даних можна скласти такі описові варіанти інформації:

- таблиці;
- текстові графіки;
- графіки;
- карти.

Деякі приклади вимірювання смуги частот представлені нижче.

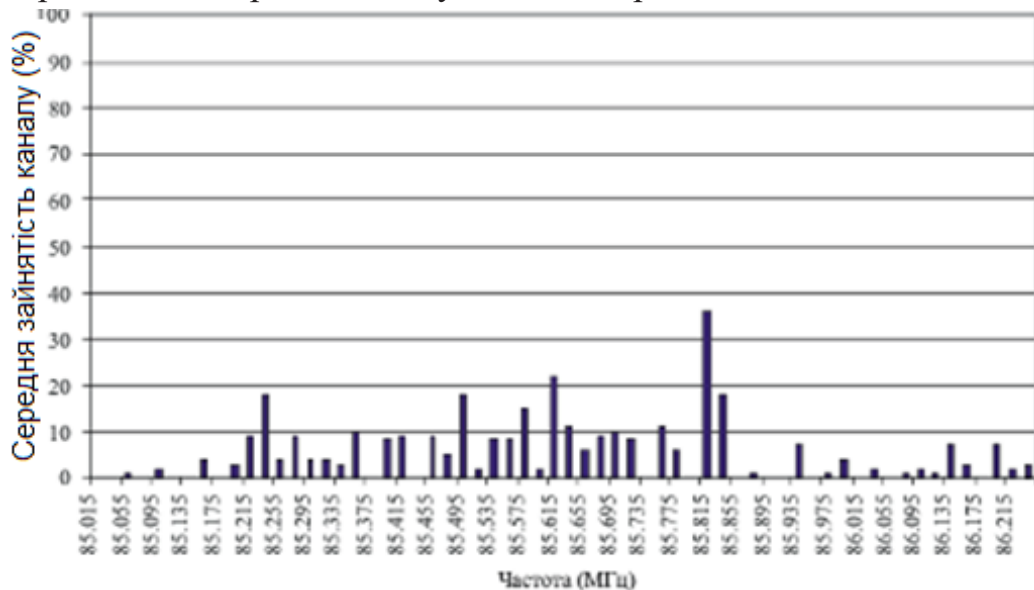


Рисунок. 6.5. Приклад вимірювання зайнятості каналу

Подання даних при вимірах зайнятості частотних каналів має як мінімум містити наступну інформацію:

- місце проведення контролю;
- дата та період проведення вимірювань;
- частота;
- тип користувача (ей);
- зайнятість у годину найбільшого навантаження.

У багатьох випадках для прийняття регуляторним органом рішення огляд зайнятості каналу повинен бути досить швидким. Такий огляд може бути створений на основі даних про зайнятість за допомогою програми електронних таблиць (Open Office, Excel). За допомогою двох клавіш, призначених для завдання меж, оцінка у будь-який момент може бути адаптована до поточних умов.

Приклад швидкого огляду вимірювань зайнятості каналу наданий на рис. 6.6.

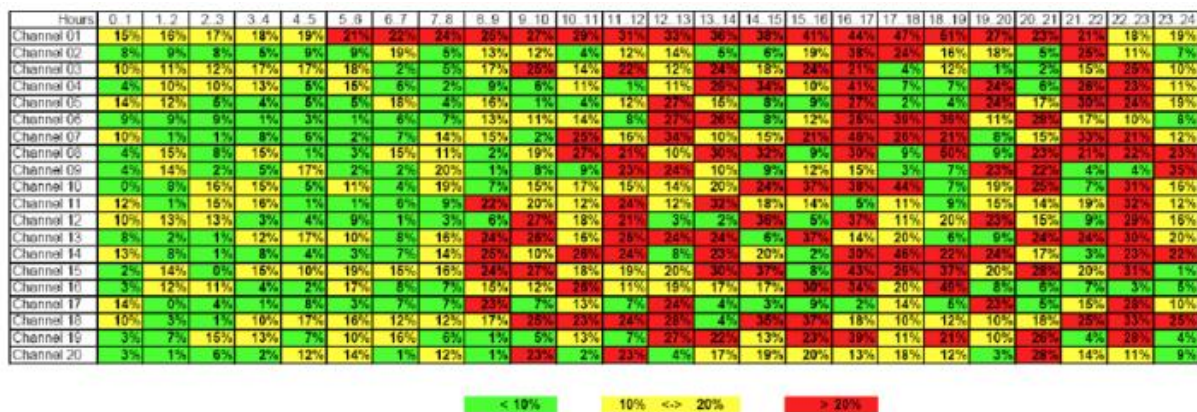


Рисунок 6.6. Зайнятість каналу в залежності від часу (короткий огляд)

Контрольні питання

1. Назвіть основні об'єкти радіоконтролю служби радіоконтролю.
2. Яким шляхом здійснюється контроль відповідності параметрів випромінювань дозволених передавачів?
3. Дати визначення недозволеного радіовипромінювання і пояснити процедуру його виявлення.
4. Чому важливо припиняти роботу незаконно діючого радіообладнання?
5. Назвіть методи вимірювань при автоматичному контролю за використанням спектра.
6. Яким чином здійснюється документування результатів радіоконтролю?
7. Якій державний орган забезпечує вжиття заходів щодо припинення роботи незаконно діючого радіообладнання чи випромінювального пристрою та які саме заходи вживає.

7. Автоматизовані інформаційні системи (АІС) управління радіочастотним спектром і системи радіоконтролю

7.1. Принципи побудови та склад АІС

Згідно із Рекомендації МСЕ-Р SM.1537, довідників МСЕ-Р (“Довідник з управління використанням спектру на національному рівні”, “Довідник з контролю за використанням спектра”) система радіочастотного моніторингу (СРЧМ) повинна бути інтегрована до єдиної автоматизованої (комп’ютеризованої) системи управління використанням спектра. Для забезпечення вирішення завдань радіомоніторингу на значних територіях (у межах великих за розмірами країн) структура СРЧМ повинна бути побудована за багаторівневим ієрархічним принципом.

Місце, мета, завдання та сфера повноважень СРЧМ в Україні визначаються Законом України “Про електронні комунікації”. Історично так склалося, що СРЧМ України складається із двох окремих систем:

- СРЧМ у смугах радіочастот *загального користування*;
- СРЧМ у смугах радіочастот *спеціального користування*.

При цьому обидві системи функціонують автономно та незалежно одна від одної. Взаємодія між ними організована на рівні надання іншій системі інформації за запитом.

Як відомо, відповідно до Закону України “Про електронні комунікації” Генеральний штаб Збройних Сил України здійснює повноваження щодо регулювання у сфері користування радіочастотним спектром спеціальними користувачами. СРЧМ у цих смугах складається з підсистем радіомоніторингу окремих відомств, які самостійно вирішують питання Міністерства Оборони, Служби безпеки України, Міністерства внутрішніх справ тощо.

Основними об’єктами радіоконтролю є:

- **радіочастотний спектр** у заданій смузі частот, його зайнятість і завантаженість, що підлягають контролю і аналізу через виміряні параметри використання спектру радіозасобами та іншими джерелами радіовипромінювань;
- **діючі РЕЗ** або **угруповання РЕЗ** та інші **джерела радіовипромінювань**, що підлягають контролю через відповідність виміряних параметрів випромінювань окремих радіозасобів або угруповання радіозасобів та інших джерел радіовипромінювань встановленим нормам цих параметрів;

– **джерела радіозавад**, що підлягають контролю через вимірювання параметрів завад.

У загальному вигляді можна виділити наступні елементи системи радіоконтролю:

- центральний пункт управління;
- регіональні підсистеми радіоконтролю у складі:
 - пункту управління регіональною підсистемою, оснащеного автоматизованими засобами обробки даних радіоконтролю;
 - стаціонарних і мобільних засобів радіоконтролю.

Узагальнена структура системи СРЧМ і її зв'язок з системою частотного планування (СУРП) наведена на рис. 7.1.

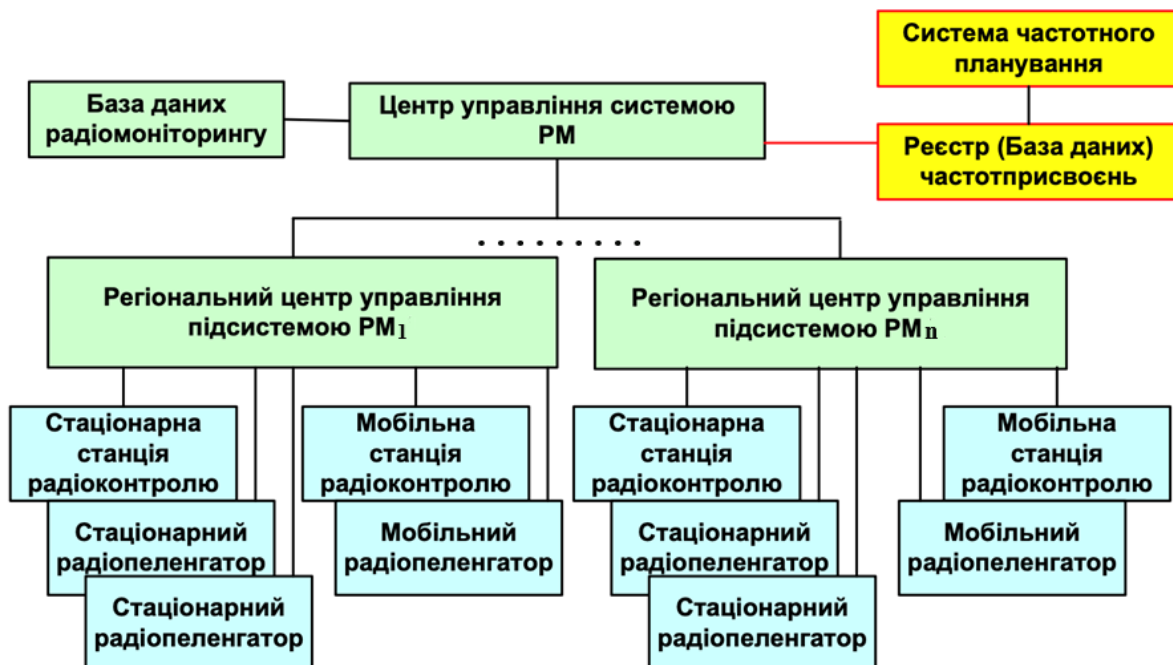


Рисунок 7.1. Узагальнена структура системи СРЧМ та її зв'язок з системою частотного планування (СЧП)

Перелік конкретних завдань, що покладаються на АСРМ, є основним чинником, який визначає структуру системи. Ці завдання поділяються на такі три групи:

1) завдання з *радіоконтролю РЕЗ*, коли основну увагу доцільно приділяти розгортанню стаціонарної мережі в районах підвищеної концентрації РЕЗ (у великих містах) із доповненням її мобільним компонентом;

2) завдання з пошуку передавачів, що діють незаконно (НДП), та усунення впливу радіозавад, виконання яких передбачає зосередження уваги на використанні переважно мобільних станцій, оснащених радіопеленгаторами, і портативних засобів;

3) завдання з оцінювання зайнятості та ступеня використання РЧС, розв'язання яких базується на використанні стаціонарних і транспортованих СРМ.

Для забезпечення ефективного вирішення завдань радіомоніторингу окремі станції радіомоніторингу (СРМ) об'єднані в єдину автоматизовану систему радіомоніторингу (АСРМ).

В Україні використовується Автоматизована система управління використанням спектру **ICS Suite**, розроблена компанією ATDI S.A. (Франція).

Основні цілі цієї системи – надання регуляторним органам допомоги в здійсненні адміністративних процедур, оптимізація використання спектра для всіх радіослужб, перевірка нових служб, запобігання перешкод існуючим системам і забезпечення безпечного зберігання адміністративно-технічних даних. Програмні засоби ATDI поділяються на три види: набір засобів клієнт-серверної архітектури для настільних ПК, засоби для вбудовування в інші системи і засоби з веб-інтерфейсом для виконання конкретних завдань з управління використанням спектра.

СУРС складається з трьох основних додатків:

- ICS manager – програмне забезпечення для управління використанням спектра;
- ICS telecom – програмне забезпечення для радіочастотного планування і технічного управління використанням спектра;
- ICS online – засіб публікації, що дозволяє розміщувати в мережі для загального доступу звіти з планування мереж і радіочастот.

7.2. Система радіочастотного моніторингу України

СРЧМ в смугах радіочастот загального користування в Україні розгорнута ДП “Український державний центр радіочастот” (УДЦР), основними складовими якого є (рис. 7.2):

- автоматизована система радіомоніторингу (АСРМ);
- сенсорна мережа радіомоніторингу;
- система контролю якості послуг рухомого (мобільного) зв'язку.

Оснoву технічної бази АСРМ УДЦР складають:

- 1) стаціонарні станції радіомоніторингу;
- 2) мобільні станції радіомоніторингу різного призначення, включаючи спеціалізовані станції технічного контролю і переносні засоби;
- 3) автоматизовані комплекси управління засобами радіомоніторингу (АРМ).

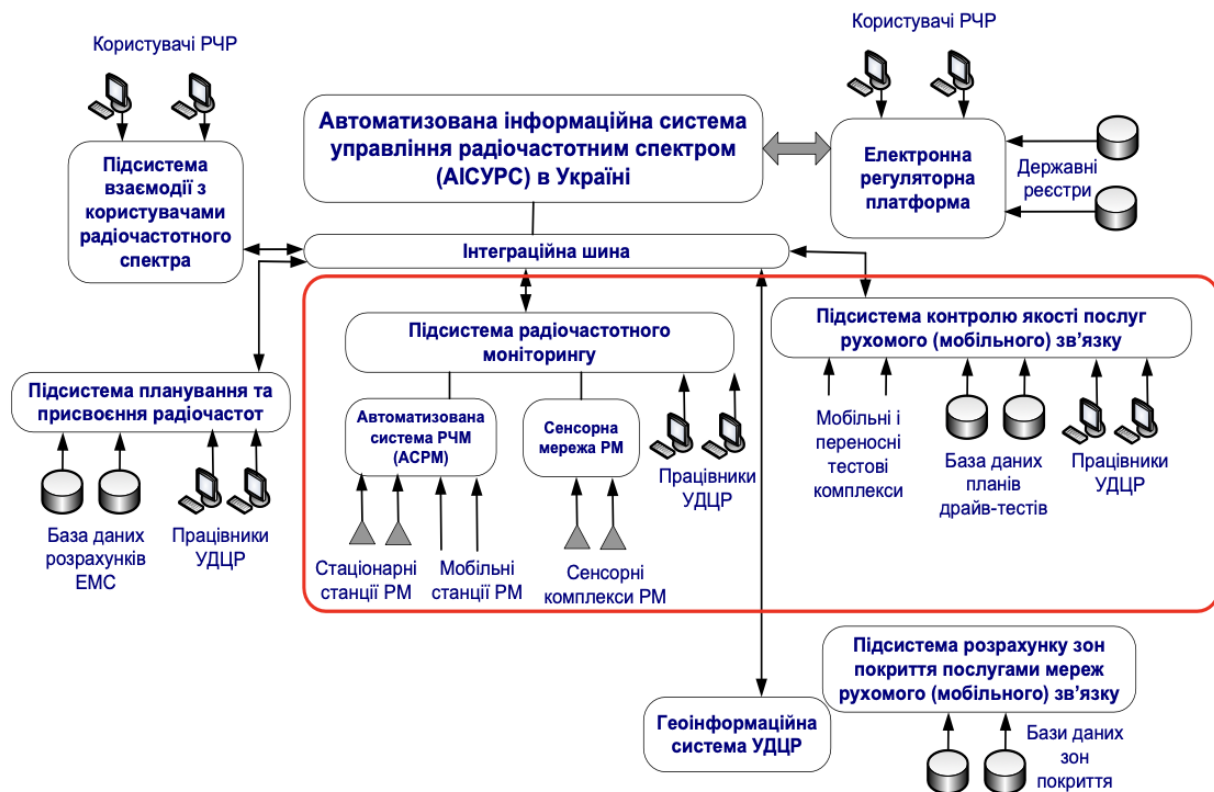


Рисунок 7.2. Структура СРЧМ в Україні

Сенсорна мережа дозволяє реалізувати розширений перелік функціональних завдань по здійсненню радіочастотного моніторингу використання радіочастотного спектру України. Тепер УДЦР має можливість здійснювати контроль за смугами частот у цілодобовому режимі 24/7, відстежувати зміни у параметрах випромінювання радіоелектронних засобів не виходячи за межі робочого місця, проводити аналіз зайнятості радіочастотного спектру на базі великого масиву даних.

Сенсорна мережа радіомоніторингу складається з:

- локальних сенсорних мереж в містах України;
- пункту управління та оброблення результатів.

Основними елементами підсистеми контролю якості послуг рухомого (мобільного) зв'язку є:

- мобільні та переносні тестові комплекси;
- обладнання оброблення результатів тестування.

Технічну основу СРЧМ УДЦР складає автоматизована система радіомоніторингу. Загальна структура взаємодії елементів пунктів управління АСРМ УДЦР наведена на рис. 7.3. Аналогічну структуру взаємодії елементів мають регіональні пункти РМ.

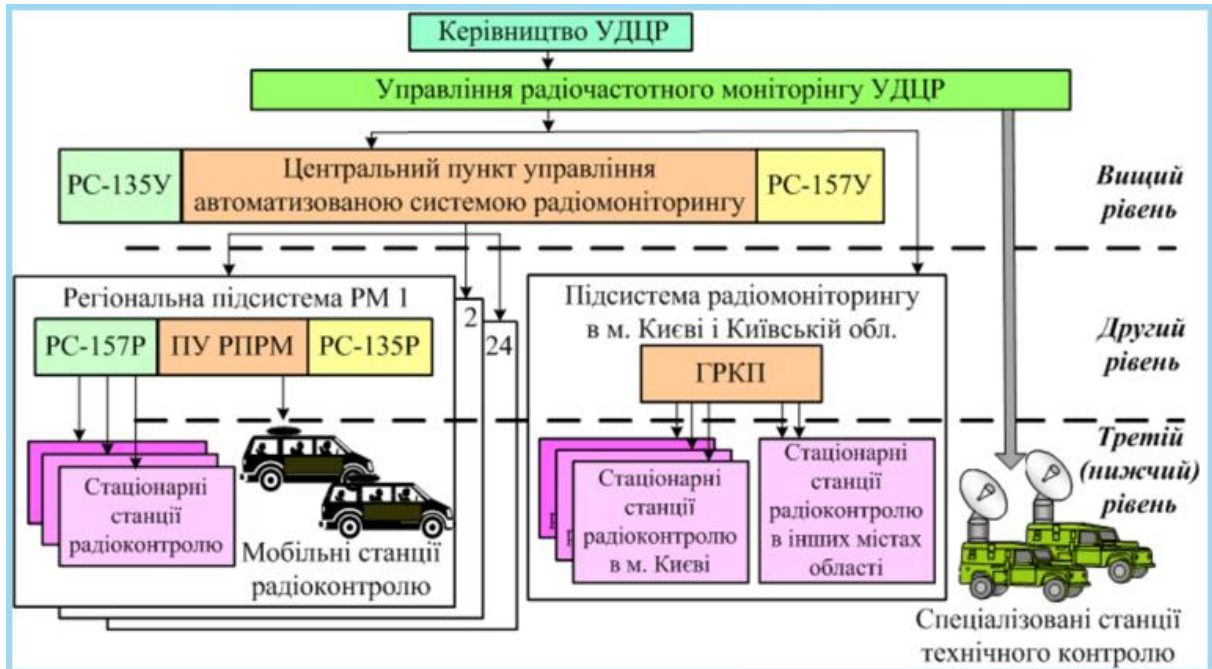


Рисунок 7.3. Узагальнена структура взаємодії елементів ПУ АСРМ УДЦР

ПУ АСРМ призначений для управління та координації робіт із радіомоніторингу і забезпечує:

- планування завдань радіомоніторингу для РПРМ та окремих РКП;
- формування завдань для РПРМ і окремих віддалених постів РКП;
- отримання інформації за результатами радіомоніторингу від РПРМ і окремих віддалених РКП;
- аналіз інформації, отриманої за результатами радіомоніторингу від РПРМ та окремих віддалених РКП;
- оброблення та збереження інформації радіомоніторингу;
- поточний моніторинг і контроль роботи РПРМ і окремих віддалених РКП;
- оновлення БД обліку частотних присвоєнь і РЕЗ у РПРМ.

Пункт управління АСРМ оснащений:

- АРМ оброблення та управління РС-157У (регіональні з літерою «Р»);

- АРМ автоматизованої системи інформаційного та розрахунково-аналітичного забезпечення робіт із частотними присвоєннями і користувачами РЧР РС-135У (регіональні з літерою «Р»).

За своїми функціональними можливостями АРМ РС-135Р здатне забезпечувати:

- планування радіомоніторингу для окремих РКП у складі РПРМ;
- супроводження, поповнення та збереження адміністративних і технічних даних стосовно частотних присвоєнь і РЕЗ, які територіально розташовані в межах області;
- формування звітних документів за результатами радіомоніторингу;
- перевірку функціонування АРМ РС-157Р шляхом надання контрольних завдань;
- підготовку завдань щодо моніторингу (контролю) роботи окремих РКП;
- розрахунок зон покриття РЕЗ.

Автоматизоване робоче місце збору та обробки даних ефірного радіоконтролю РС-157 призначене для роботи у складі регіональної системи радіомоніторингу в якості автоматизованого робочого місця оператора радіочастотного контролю і керування автоматизованими вимірювальними комплексами радіочастотного контролю, що входять до складу системи, та обробки інформації, яка надходить від них.

7.3. Станіонарні та мобільні станції радіомоніторингу

Станції радіоконтролю контролю повинні бути оснащені наступним вимірювальним обладнанням:

- всеспрямовані антени (для виявлення ДРВ);
- спрямовані антени (для вимірювання параметрів ДРВ);
- приймачі (одно або багатоканальні);
- радіопеленгатори з антенними системами;
- апаратура для вимірювання частот;
- апаратура для вимірювання напруженості поля;
- апаратура для вимірювання ширини смуги;
- апаратури для вимірювання зайнятості каналу;
- апаратури для реєстрації використання (зайнятості) діапазону частот;
- аналізатори спектра;
- аналізатори векторних сигналів чи аналізатори модуляції;
- декодери;

- генератори сигналів;
- записуюча апаратура.

Станції радіоконтролю забезпечуються лініями зв'язку з системою управління РЧС, а також системою геопозиціонування (GPS).

Слід зазначити, що сучасне вимірювальне обладнання може часто виконувати кілька функцій, що призводить до зменшення кількості стійок. Багато функцій можуть бути також реалізовані у програмному забезпеченні.

Зазвичай вимірювальне обладнання має охоплювати діапазон частот 9 кГц – 3 ГГц. Якщо планується використовувати окремі ВЧ- та ОВЧ/УВЧ-станції контролю, то цей діапазон частот можна розділити, наприклад, на 9 кГц – 30 МГц для ВЧ-станцій контролю та 20 МГц – 3 ГГц для ОВЧ/УВЧ-станцій контролю.

За діапазонами частот за функціональним призначенням СРМ розподіляються на декілька типів.

Усі типи СРМ повинні бути повністю автоматизовані та мати можливість роботи у двох режимах:

- робота віддаленої СРМ як місцевої в режимі online (під керуванням оператором);
- робота віддаленої СРМ у режимі дистанційного управління (“пакетний” режим), за якого СРМ виконує планові завдання радіомоніторингу автоматизовано.

З точки зору мобільності станції радіомоніторингу (СРМ) поділяються на:

- *стаціонарні (фіксовані);*
- *мобільні (рухомі);*
- *портативні;*
- *спеціалізовані.*

Стаціонарні станції (комплекси) радіомоніторингу призначені для забезпечення *постійного цілодобового* моніторингу та технічного радіоконтролю параметрів радіовипромінювання у межах міст із високою щільністю розташування РЕЗ та окремих населених пунктів, які мають важливе призначення (залізничних вузлів, портів міст, міст, поряд з якими розташовані електростанції, тощо) (рис. 7.4 та 7.5).

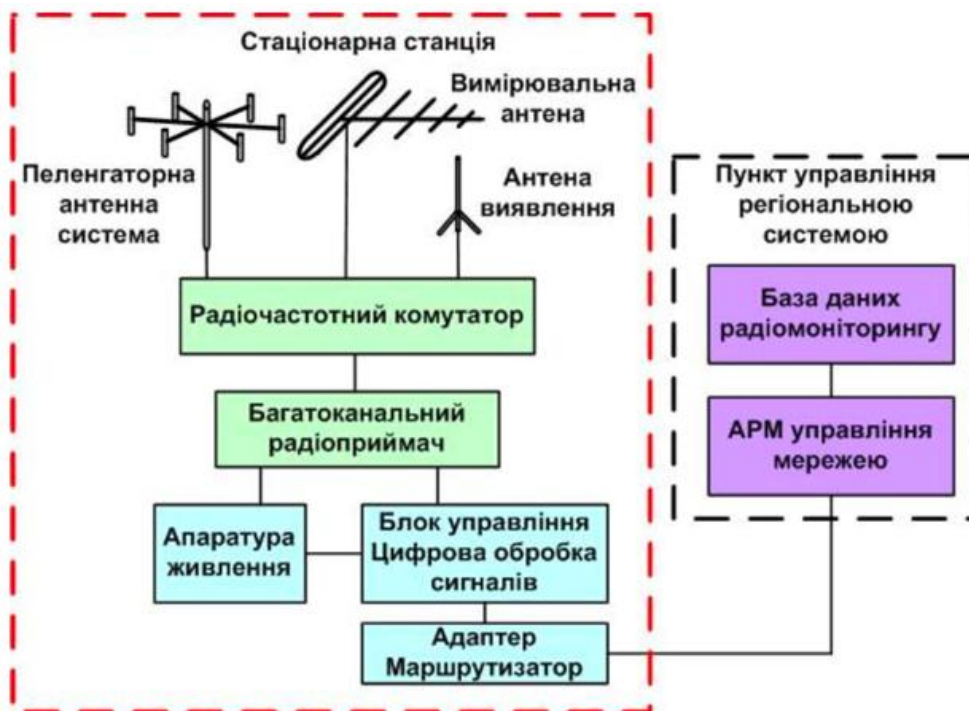


Рисунок 7.4. Узагальнена структурна схема стаціонарної станції радіомоніторингу

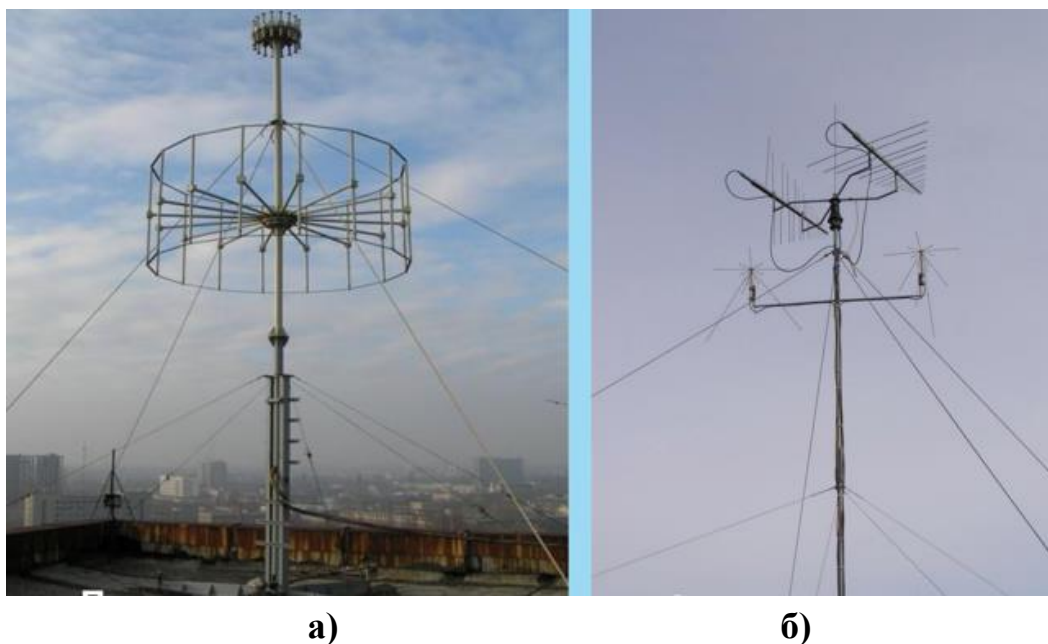


Рисунок 7.5. Приклади стаціонарних пеленгаторної антени (а) та антени виявлення і вимірювання (б)

Мобільні (рухомі) комплекси (станції) радіомоніторингу призначені для вирішення завдань радіомоніторингу за межами зон радіодоступності стаціонарних СРМ, а також у тих місцях, де проведення радіомоніторингу стаціонарними засобами неможливо (рис. 7.6 та 7.7).

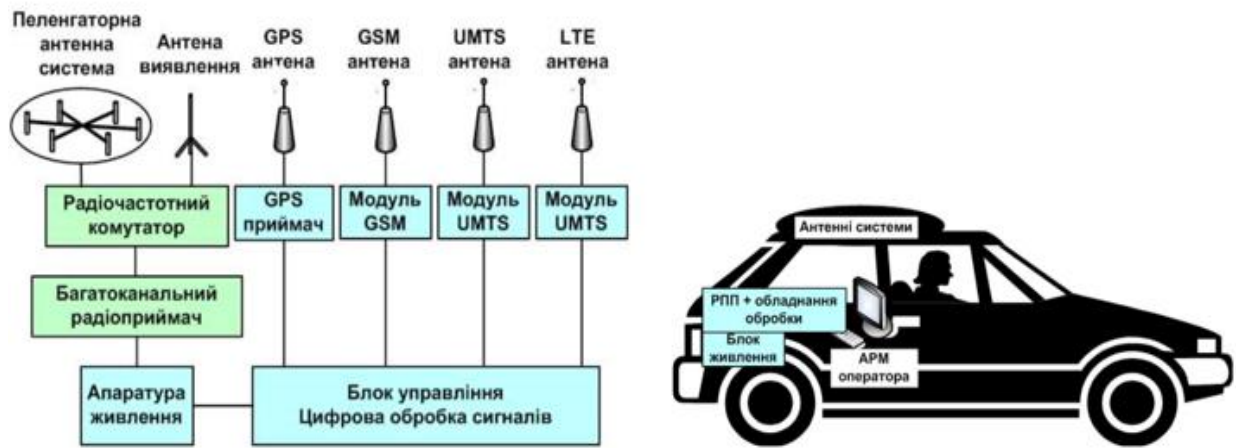


Рисунок 7.6. Узагальнена структурна схема мобільної станції радіомоніторингу



Рисунок 7.7. Мобільна станція радіомоніторингу РМ-1300-2РЗ

Відмітною особливістю таких комплексів є їх конструктивне виконання – пеленгаторні та вимірювальні антени монтуються в радіопрозорому пеналі на даху транспортного засобу. Апаратна частина являє собою комплект спеціалізованого обладнання на базі радіоприймачів під управлінням спеціалізованого програмного забезпечення АРМ. Мобільні комплекси оснащуються приймачами системи геопозиціонування (GPS) та каналами бездротового зв'язку (3G, 4G, 5G) для підключення до регіональних пунктів управління.

Використання двох ПРМ дозволяє здійснювати одночасно пеленгування та виявлення (вимірювання параметрів) радіовипромінювань у різних діапазонах частот (на різних частотах).

У разі застосування одного ПРМ пеленгування та виявлення забезпечуються за рахунок розподілу цих дій у часі.

В окремих випадках можуть додатково використовуватися *портативне обладнання* для виконання спеціальних вимірювань у місцях, де їх проведення іншими засобами неможливе (наприклад, у приміщеннях, на дахах будинків, на закритих територіях тощо) (рис. 4.6).

Можна виділити наступні *загальні вимоги* до функціональних і технічних можливостей станцій радіоконтролю СРЧМ:

- смуга радіочастот: 30 МГц – 3000 МГц;
- чутливість: не нижче 0 дБмкВ/м (1 мкВ/м);
- динамічний діапазон: не гірше 75 дБ;
- максимальна швидкість панорамного огляду: не менше 300 МГц/с;
- невизначеність вимірювання рівня: не більше 3 дБ;
- точність вимірювання частоти: не менше 10^{-6} .
- інструментальна похибка пеленгування: не гірша 2° ;
- зона пеленгування в азимутальній площині: 0° - 360° .

Спеціалізовані станції технічного контролю оснащуються висувними антенними щоглами або (та) опорно-поворотними пристроями для антен (рис. 7.9) та забезпечують:

- вимірювання параметрів радіовипромінювання РЕЗ у смузі частот від 9 кГц до 40 ГГц (з аналізатором спектра FSQ-40);
- вимірювання напруженості поля;
- автоматичне визначення свого місцязнаходження;
- автоматичне наведення антени на джерело випромінювання.



Рисунок 7.9. Спеціалізована станція технічного контролю ССТК-2

Може також знадобитися додаткове вимірювальне обладнання, включаючи обладнання для вимірів на більш високих частотах; це залежить від додаткових та спеціальних завдань служби контролю таких як:

- вимірювання напруженості поля вздовж маршруту;
- контроль технологій широкосмугового зв'язку, задіяних на частотах вище 3 ГГц, таких як деякі Wi-Fi, WiMAX та WLAN/RLAN системи;
- телевізійні вимірювання на відеосигналах (наприклад, яскравості та кольоровості);
- вимірювання конкретних параметрів цифрових мереж;
- контроль випромінювань у фіксованих лініях зв'язку;
- вимірювання супутникових сигналів.

Система радіомоніторингу УДЦР дозволяє також проводити роботи щодо *систем КХ та супутникового зв'язку*.

Основна відмінність системи КХ пеленгування від аналогічної системи в ДВЧ/УВЧ діапазонах частот полягає в тому, що для забезпечення практично такої самої (1,5...2°) інструментальної точності пеленгування розміри пеленгаторної КХ антенної системи мають бути на один-два порядки більшими. На практиці для КХ СРМ найчастіше використовують кільцеві антенні системи, які складаються із дев'яти антен, виконаних у вигляді монополів висотою від 7 до 12 м або схрещених рамок. Діаметр такої пеленгаторної антенної системи становить 50...120 м.

Ефективність роботи всієї СРЧМ значною мірою визначається рівнем автоматизації процесів радіомоніторингу. Застосування режимів дистанційного управління обладнанням радіомоніторингу в поєднанні з автоматизацією процесу вимірювання дозволяє продуктивніше використовувати ресурси СРЧМ і виконувати більш складні функції. Крім зменшення часу на виконання операцій радіомоніторингу, автоматизація сприяє не лише скороченню кількості персоналу, необхідного для експлуатації станцій, а й залученню кваліфікованого персоналу для вирішення більш пріоритетних завдань, зокрема, для роботи на МКРМ і проведення аналізу результатів радіомоніторингу.

За оціночними розрахунковими даними, максимальний радіус зони доступності радіозв'язку багатофункціональних стаціонарних СРМ, розташованих на домінуючих будівлях на висоті близько 30 м, у режимі виявлення радіовипромінювання передавачів з вихідною потужністю 10 Вт у діапазоні частот від 100 МГц до 1 ГГц складає приблизно (20 – 25) км.

В умовах щільної міської забудови максимальна відстань, на якій СРМ забезпечує вимірювання параметрів радіовипромінювання та пеленгування ДРВ у зазначеному діапазоні частот становить приблизно (10 – 15) км, а для створення суцільної зони визначення місцезнаходження ДРВ (з вихідною потужністю передавачів 10 Вт) орієнтовна відстань між сусідніми стаціонарними РКП діапазону НВЧ повинна бути не більшою (8-10) км.

Радіопеленгаторне обладнання, яке нині використовується для оснащення стаціонарних СРМ, забезпечує пеленгування в діапазонах частот СЧ/ВЧ (від 300 кГц до 30 МГц) або в діапазонах ДВЧ/УВЧ (від 30 МГц до 3 ГГц). На СРМ радіопеленгаторне обладнання може об'єднуватися із засобами вимірювальної техніки чи складатися із окремих блоків.

Контрольні запитання

1. Дайте визначення системи радіочастотного моніторингу (СРЧМ).
2. Які основні складові системи радіочастотного моніторингу України?
3. Що є основою технічної бази АСРМ УДЦР?
4. Яке призначення та функціональні можливості комплексів АРМ РС-135 та РС-157?
5. Як класифікуються станції радіомоніторингу з точки зору мобільності та в чому полягають особливості їх застосування?
6. Якій склад основного обладнання станцій радіомоніторингу та які основні вимоги до їх функціональних і технічних можливостей?
7. Радіоконтрольний пост (пост радіоконтролю, РКП) – завдання та оснащення.
8. Стаціонарна станція радіомоніторингу. Призначення та склад обладнання.
9. Мобільна станція (комплекс) радіомоніторингу. Призначення та склад обладнання.
10. Призначення та основні технічні характеристики спеціалізованих станцій технічного контролю.

Швидке перетворення Фур'є

Математичною основою спектрального аналізу сигналів є перетворення Фур'є. Якщо необхідно перетворити сигнал із часової області на частотну область, можна скористатися математичним методом, званим “перетворення Фур'є”.

Цей метод заснований на тому факті, що будь-який реальний сигнал, незалежно від його форми хвилі, може бути побудований шляхом додавання певної кількості синусоїдальних сигналів з різними амплітудами, частотами і фазами. І відповідно будь-який часовий сигнал можна розкласти на певну кількість різних синусоїдальних хвиль в частотній області.

Незважаючи на те, що на перший погляд може здатися, що метод перетворення Фур'є – це найкращий спосіб вирішити всі проблеми аналізу сигналів, існують певні обмеження, а також похибки у вимірах, що виникають як з необхідності використовувати аналого-цифрове перетворення, так і з самого методу перетворення Фур'є. Щоб зрозуміти ці обмеження, необхідно коротко описати принципи цього методу.

Жан Баптист Жозеф, барон де Фур'є, довів у 1822 року, що кожного разу явище змінної можна як складення певної кількості синусоїдальних частотних компонентів, кожен із яких має власну величину, частоту і фазу.

Він представив це у вигляді рядів Фур'є для періодичних сигналів та сигналів з обмеженою смугою, представлених у загальному вигляді рівнянням:

$$x(t) = \sum_{k=-N}^N C_k e^{j(\omega t)} . \quad (\text{A. 1})$$

Ряди Фур'є дійсні лише для періодичних сигналів, які мають взаємне гармонійне співвідношення один з одним, але на практиці найчастіше зустрічаються неперіодичні сигнали. Кількість компонентів, що утворюють форму хвилі, стає нескінченним. Тоді рівняння перетворюється на інтегральну форму наступного виду:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) \cdot e^{j(\omega t)} d\omega . \quad (\text{A. 2})$$

Інверсна функція цього рівняння може бути записана у вигляді

$$x(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t) \cdot e^{j(\omega t)} dt . \quad (\text{A. 3})$$

Це останнє рівняння робить теоретично можливим розрахувати комплексний спектр безперервного сигналу в частотній області з використанням його форми хвилі у часовій області.

На жаль, цей метод непридатний до розрахунку спектра довільних сигналів. Коли сигнали є безперервними та інтегрування має бути проведене від мінус нескінченності до плюс нескінченності, буде потрібно нескінченний обсяг обчислень. Проблема може бути вирішена, якщо шляхом вибірки зробити сигнал дискретним у часі і ввести **дискретне перетворення Фур'є** (ДПФ). Якщо сигнал має обмежену ширину смуги, його можна подати у вигляді вибірок, взятих у моменти часу $n \cdot T_s$, де: n - ціле число, що приймає значення від 0 до $N - 1$,

T_s - період вибірки

N - загальна кількість вибірок .

Застосовуючи алгоритм ДПФ до цього масиву N елементів вибірок у часовій області, вийде масив N елементів складових (сигналу) в частотній області.

Формула дискретного перетворення Фур'є виглядає так:

$$X[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j \frac{2\pi kn}{N}}. \quad (\text{A. 4})$$

Інверсна функція ДПФ така:

$$X[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x[k] \cdot e^{-j \frac{2\pi kn}{N}}. \quad (\text{A. 4})$$

де $X[k]$ – означає величину спектральної складової на частоті $k f_0 = k \frac{1}{N \cdot T_s}$,

а $x[n]$ це величина сигналу в часовій області в момент часу $n \cdot T_s$.

Комбінація обох рівнянь називається парою ДПФ.

Методом ДПФ можна обробляти блоки вибірок довільної довжини. Однак, якщо блок має довжину, яка зведена до ступеня 2, розрахунок можна виконати набагато швидше. Це називається **методом швидкого перетворення Фур'є** (ШПФ).

Перед тим як застосувати математичне перетворення Фур'є, певна кількість даних, що представляють довжину хвилі, повинна бути збережена в пам'яті як так званий “часовий запис” або “кадр”. Мінімальна тривалість цього часового запису – це період найменшої частоти, що підлягає обробці. Час, який потрібен для цієї обробки, називається часом збирання або часом дослідження. Потім аналізується вся форма хвилі одночасно і перетворюється математично на послідовність синусоїдальних хвиль з

різними амплітудами, фазами і частотами. В результаті виходить аналіз усієї частини спектра у певний момент часу.

Вихідним значенням перетворення Фур'є є комплексна величина незалежно від того, була вихідна форма часового сигналу дійсною або комплексною (наприклад, дійсною і уявною, або $I \& Q$). Якщо вихідна форма хвилі є лише дійсною, результат розрахунку спектра буде сполучено симетричним. Щоб вважати спектр потужності за результатами перетворення Фур'є, необхідно обчислення значення квадрата величини в кожній точці частоти. Спектр потужності – це параметр, який зазвичай усереднюється, коли використовується усереднення.

Перетворення Фур'є виявляє елементарну періодичність сигналу шляхом **розкладання** сигналу на його складові синусоїдальні частоти та ідентифікації величин та фаз цих складових частот.

Слово “розкладання” тут має вирішальне значення. Перетворення Фур'є вчить нас розглядати сигнал у часовій області як форму хвилі, що складається з базових синусоїдальних форм із різною величиною та фазою.

Для прикладу на наступному графіку (рисунок А.1) показано вихідний сигнал у вигляді меандру (синій колір) і перші вісім синусоїд у нескінченній серії.

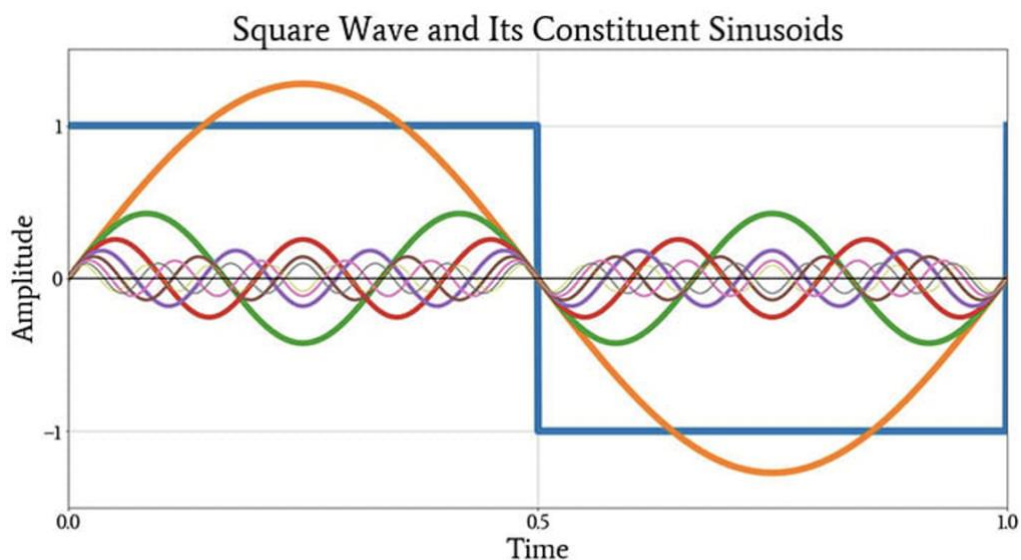


Рисунок А.1. Вихідний меандр (синій колір)
і перші вісім синусоїд у нескінченній серії

Подивившись на цей графік ви все ще можете бути трохи скептичними, що ці синусоїди можна об'єднати у квадратну хвилю. Проте наступний рисунок А.2 вас переконає. Він показує початкову прямокутну хвилю та форму хвилі, отриману шляхом додавання всіх складових синусоїд, показаних вище.

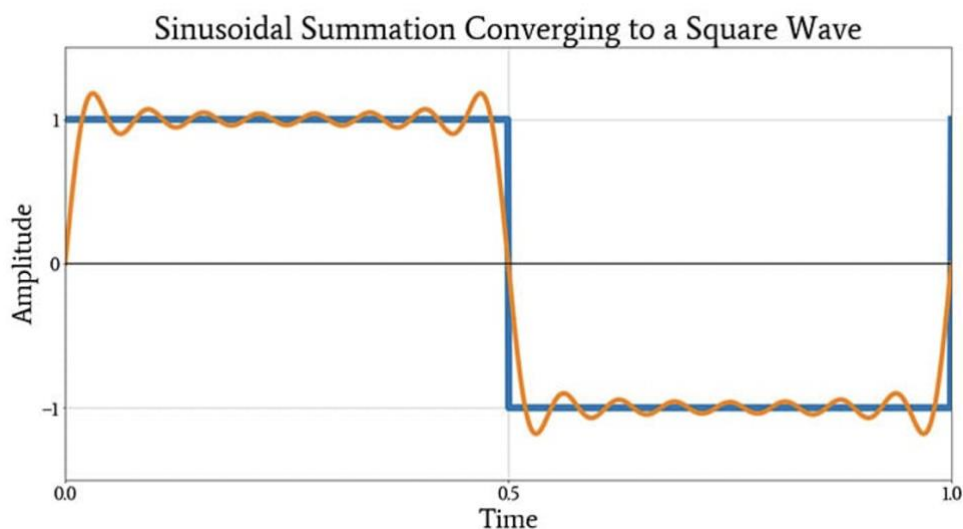


Рисунок А.2. Початковий прямокутний сигнал та форма сигналу, яка отримана шляхом додавання восьми складових синусоїд.

Області застосування

Методи швидкого перетворювання Фур'є (ШПФ) зазвичай застосовуються для аналізу спектра та контролю за використанням спектра. Нижче наведено неповний перелік параметрів, які можна виміряти з допомогою методів БПФ.

- рівень;
- частота;
- займана ширина смуги частот (метод Х-дБ та метод $\beta/2$);
- ступінь зайнятості спектра (спектрограми та завантаження частотного каналу);
- виявлення короткочасних випромінювань;
- виявлення сигналів, рівень яких нижчий від мінімального рівня шуму.

Оскільки при використанні комплексного перетворення Фур'є можна отримати інформацію та про амплітуд і про фазу, широкосмугові радіопеленгатори можуть використовувати алгоритми ШПФ для визначення пеленгу великої кількості сигналів в один і той самий час.

Причиною використання алгоритмів ШПФ є як поліпшені характеристики, так й можливість проведення безперервної обробки заданого спектра протягом часу, протягом якого неможливо провести аналогову обробку сканування. Наявність дешевих процесорів цифрової обробки (ЦОС) сигналів дозволяє здешевити виробництво обладнання, що використовує ШПФ, порівняно з їх традиційними аналоговими.

В даний час метод ШПФ широко застосовується у вимірювальному устаткуванні (приймачі або аналізатори спектру). Для досягнення більш високої точності дане обладнання може працювати на основі будь-якого стандарту частоти, наприклад за допомогою приймача GPS, вбудованого в обладнання.

Аналогово-цифрове перетворення

Перетворення Фур'є, будучи математичним процесом, найкраще може бути виконано процесором цифрової обробки сигналів (DSP), функції якого, в принципі, виконує спеціальний комп'ютер. З цією метою, часовий сигнал повинен бути представлений у цифрову форму. Для цього використовується аналого-цифрове перетворення (АЦП).

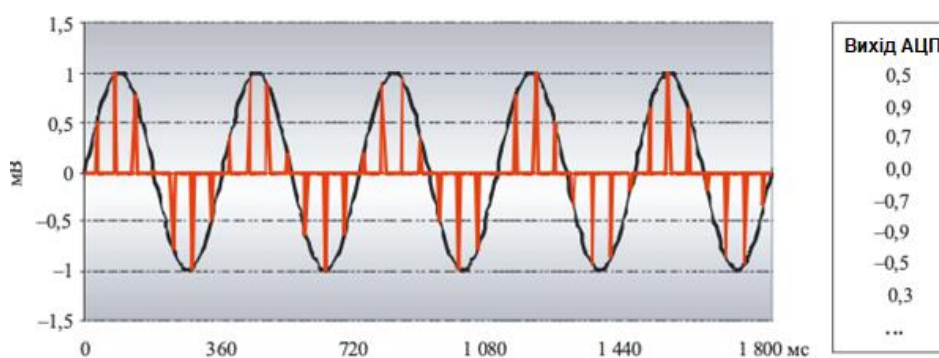


Рисунок Б.1. Вихідний сигнал із точками вибірки

Аналоговий сигнал перетворюється на цифровий сигнал шляхом взяття вибірок поточної амплітуди сигналу за певний період. У теоремі Найквіста стверджується, що частота вибірки має бути більше подвоєної ширини смуги сигналу, з якого проводиться вибірка:

$$f_s > 2b$$

Найквіст стверджував, що частота вибірки має бути більшою за подвійну найвищу частоту, присутній у формі хвилі, з якої проводиться вибірка:

$$f_s > 2f_{max}$$

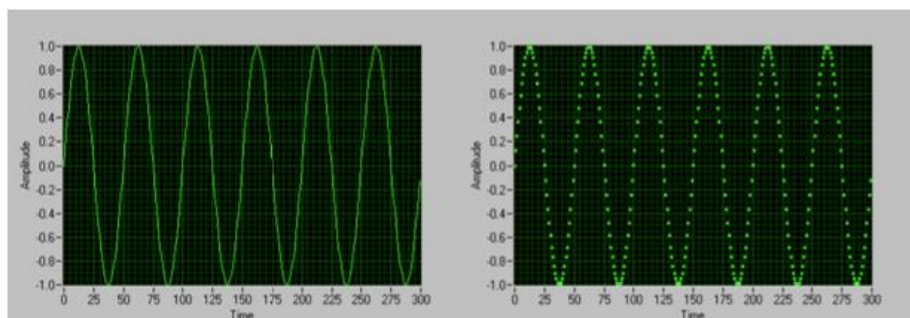
Це називається частотою Найквіста, яка застосовується до дійсних сигналів. Для комплексних сигналів, таких, які можуть бути отримані двома вибірками аналого-цифрового перетворення вихідного значення IQ демодулятора, частота вибірки має бути більшою ширини лінії сигналу ($f_s > b$). Інформація не буде втрачена, оскільки, у випадку з комплексними сигналами, одну вибірку припадають дві величини, тому щільність вибірки буде така сама, як і для дійсних сигналів з однією величиною на вибірку, але частота вибірки у своїй є подвоєної.

Результатом АЦП буде потік бітів, в якому число являє собою амплітуду вихідного сигналу на момент кожної вибірки.

Якщо частота вибірки досить висока, результат АЦП може бути єдиним чином відновлено у форму вихідної хвилі. Приклад вибірки наведено на рис. Б.2.

Точність цього цифрового уявлення залежить від кількості бітів, відведеної для кожного значення амплітуди. Типові значення роздільної здатності для АЦП становлять від 14 до 18 бітів, що в результаті дає до

262144 різних значень амплітуди. Хоча дискретні значення амплітуди не можуть точно відтворювати вихідний сигнал, помилка, викликана цим ефектом, може бути зведена до мінімуму шляхом правильного підбору інтервалу вибірки між двома кроками (вузький інтервал для малих значень амплітуди, широкий інтервал для великих значень). У цьому випадку динамічний діапазон оцифрованого сигналу буде кращим, ніж 100 дБ.



Форма хвилі

Дискретна форма хвилі

Рисунок Б.2. Вибірка

Частоти, що перевищують подвійну частоту вибірки, будуть оцифровані з недостатньою частотою дискретизації, що призведе до появи додаткових частотних складових у оцифрованих сигналах, яких не було у вихідному сигналі. Щоб уникнути цієї помилки необхідно пропустити аналоговий сигнал через фільтр нижніх частот, встановивши його перед АЦП.

Як впливає з вищесказаного, в принципі, точність процесу оцифровування обмежується лише швидкістю пристрою АЦП. Сучасні мікросхеми АЦП розраховані на частоти сигналів приблизно до 100 МГц і доступна глибина оцифрування розміром 18 бітів. Для аналізу вищих частот сигнал РЧ спочатку повинен бути перетворений зі зниженням частоти до діапазону, який може бути оцифрований.

Таким чином, щоб перетворити аналоговий сигнал на цифровий, потрібно:

1. Через кожні рівні інтервали робити вимірювання амплітуди сигналу та записувати значення. Ці інтервали повинні йти мінімум удвічі частіше, ніж верхня частота сигналу. Наприклад, верхні частоти, які чує людина 16 кГц, частота дискретизації повинна бути хоча б 32 кГц. (20 кГц – 44 кГц).

2. У кожному інтервалі вимірюється значення амплітуди. Дискрет рівня сингалу – ряд стандартних величин: 16, 20, 24 біти. 16 біт це 65536 значень.

3. Швидкість потоку. Наприклад 44 кГц множимо на 16 біт та отримуємо 704 кбіт/с. Це називається бітрейт.

4. Для зменшення потрібної швидкості цифрового потоку застосовують компресію. Компресія – зменшення швидкості цифрового потоку за рахунок скорочення його надмірності.

Оцінювання зони покриття та показників якості обслуговування в радіомережах

Мережі загального користування

Інструментальне оцінювання показників якості обслуговування (Quality Operating Service – QOS) і показників якості надання послуг (Quality of Service – QoS) реалізується лише використанням спеціалізованих мобільних комплексів радіоконтролю мереж загального користування, таких як мережі стільникового зв'язку, WLAN, цифрового телевізійного та звукового мовлення, і виконується об'їздом МСРМ передбачуваної зони радіопокриття БС (передавачів) і мереж зв'язку та проведенням інструментального оцінювання рівня напруженості поля випромінювання в заданих смугах частот (на заданих частотах).

За цим методом:

- вимірюється рівень напруженості електромагнітного поля вздовж маршруту руху мобільного комплексу;
- вимірюються показники якості послуг (QoS) та якості обслуговування (QOS).

Для проведення вимірювань використовується спеціальне обладнання під керуванням персональної обчислювальної машини (ПЕОМ) зі спеціалізованим ПЗ.

Оцінювання показників якості телекомунікаційних послуг (QoS) здійснюється контролем ступеня спотворення вихідної інформації (зображення, звуку, даних, що передаються) порівняно з еталонною або ступеня невідповідності її вимогам, що висуваються. У разі аналогового телебачення якість послуг оцінюється показником, який відбиває суб'єктивне сприйняття спотворення зображення на екрані телевізора (телевізійного приймача).

Якість послуг мереж мобільного зв'язку оцінюється такими безрозмірними величинами, як *доступність зв'язку, безперервність зв'язку, повнота послуги, безперервність послуги, доступність послуги* і т. ін.

Перелік телекомунікаційних послуг мереж рухомого зв'язку визначено стандартом ETSI TS 102 250. До основних послуг належать:

- послуги телефонії;
- послуги передавання коротких текстових повідомлень (SMS);
- послуги передавання мультимедійних повідомлень (MMS);
- послуги передавання даних.

Основним методом оцінювання зазначених показників якості є метод контрольних викликів.

Мета вимірювання покриття радіопередавачів та мереж [3]:

- перевірка прогнозів комп'ютеризованих інструментів, що використовуються для планування мережі;
- перевірка відповідності умовам ліцензії, якщо частиною ліцензії є покриття радіослужбою певної території, відсотка території або відсотка населення,
- перевірки якості обслуговування в певній зоні;
- оцінки умов прийому в певних місцях, де повідомляється про завади.

В аналогово-модульованих системах може бути достатньо виміряти напруженість поля. Через певні обставини та принципи, властиві прийому цифрово-модульованих систем, покриття цифрових наземних мереж має вимірюватися інакше, ніж в аналогових мережах.

Прогнозування покриття – це процедура розрахунку географічної зони, в межах якої можливий прийом послуги. Вона базується на параметрах передавача, моделях рельєфу та поширення радіохвиль і виконується за допомогою комп'ютеризованих інструментів. Результат являє собою визначену ймовірність розташування та часу.

Припущення про те, що певна зона буде покрита чи ні, є результатом процесу розрахунку, виконаного за допомогою інструменту прогнозування покриття, який враховує визначені умови та/або значення для:

- умов прийому (наприклад, стаціонарний або портативний прийом);
- втрати напруженості поля з відстанню через топографію та морфологію;
- моделі приймача (наприклад, чутливості та вибіркості);
- приймальної антени (висота, коефіцієнт підсилення та спрямованість);
- канал прийому (гаусівський, Райсів або Релеївський).

До атрибута “покритий” також додається певна ймовірність у часі та місці. За допомогою інструментів планування зона покриття розраховується для цієї ймовірності (наприклад, 50% часу та 50% місць). Тому не можна вважати, що прийом зі стандартним приймачем можливий у кожному окремому місці в межах зони, визначеної як покрита.

Важливо всебічно та однозначно визначити покриття певної мережі перед видачою ліцензії. В іншому випадку можуть виникнути неприємні дискусії, якщо між оператором мережі та регуляторним органом не буде досягнуто згоди щодо фактичного покриття.

Основний принцип вимірювання

Зазвичай неможливо виміряти напруженість поля або інші відповідні параметри у всіх точках зони інтересу. Фактично вимірюється відповідність прогнозу фактичному покриттю, а не саме покриття.

Зазвичай в аналогових системах напруженість поля вимірюється у статистично достатній кількості фіксованих місць або під час подорожі маршрутами. Обмежувальними факторами є доступність точок вимірювання та наявний час і робочі години. Виміряні значення напруженості поля потім порівнюються з прогнозованими значеннями напруженості поля.

Той самий принцип застосовується до системних параметрів або параметрів якості обслуговування в цифрових системах. Слід зазначити, що складні визначення покриття призводять до складних процедур вимірювання та оцінки.

Перш ніж проводити вимірювання, необхідно **визначити опорні зони або опорні маршрути**, що дозволяє екстраполювати результати вимірювань, отримані в опорній зоні, на покриття по всій зоні інтересу. Іншими словами, якщо прогнози точно відповідають фактичному покриттю в опорних зонах, можна припустити, що прогнози покриття, заявлені оператором мережі, також є достатньо точними поза опорними маршрутами та зонами.

Існує кілька варіантів планування маршрутів вимірювання. Одним з варіантів може бути **слідування радіальним лініям**, починаючи з центру зони обслуговування, і доки сигнал не буде послідовно погіршуватися за межі заданих параметрів з точки зору напруженості поля або інших відповідних параметрів.

Іншим варіантом було б перевірити регіони, які представляють **певні типи територій**, такі як густонаселені міські, приміські, промислові або сільські райони.

Нарешті, для перевірки покриття важливо, щоб вимірювання включали **ділянки на кордонах між охопленими та неохопленими районами**.

На рисунку В.1 наведено приклад результатів, отриманих з цих вимірювань.

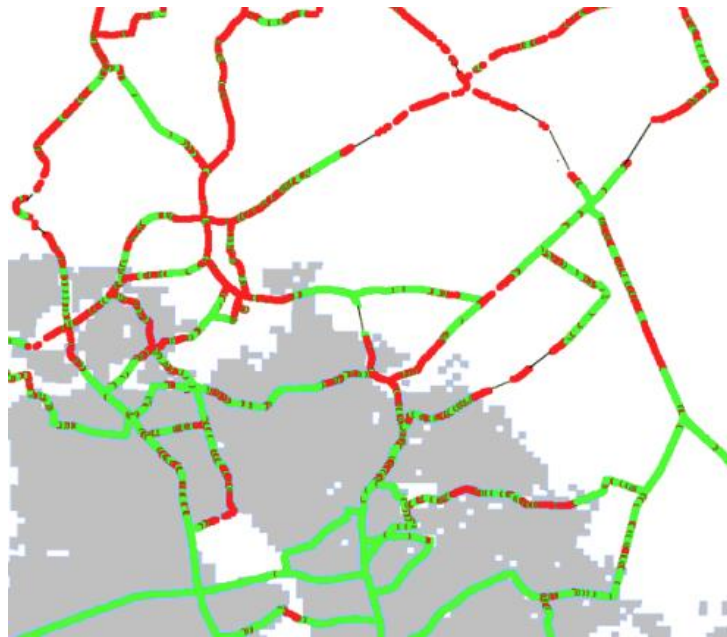


Рисунок В.1. Вибіркове вимірювання вздовж маршруту всередині контрольної зони

Зелений колір вказує на покриття, а червоний — на відсутність покриття. Сіра зона має бути покрита згідно з інструментом прогнозування, тоді як білі зони були передбачувані як непокриті.

Для спеціальних цілей, що впливають на покриття, вимірювання можуть проводитися на мостах, у тунелях, поблизу інфраструктури розподілу електроенергії або навіть у будівлях.

Результати вимірювань повинні реєструватися разом з даними про їх географічні координатах для визначення місцезнаходження вимірювальних пунктів та для нанесення на карту результатів, зібраних на найбільш доступних дорогах у зоні, що розглядається.

Системи цифрових мереж (типу GSM, DCS1800 та UMTS або DAB, DVB-T) чутливі до впливу прийнятих відбитих сигналів. У цьому випадку, крім вимірювання рівня сигналу, для оцінки експлуатаційних характеристик системи необхідно також вимірювати якість прийому за допомогою визначення коефіцієнта помилок за бітами (*BER*) чи імпульсної характеристики каналу. Якщо використовувати автоматичні дзвінки, такі вимірювання можна проводити на працюючих цифрових мережах без внесення будь-якого негативного впливу.

Для вимірювання вздовж маршруту потрібна безперервна передача.

Напруженість поля вздовж маршруту схильна до сильних флуктуацій під дією відбитих сигналів. Результат окремого виміру може відповідати мінімальному або максимальному рівню відображення, і на нього також

впливають обрана висота приймальної антени, пора року, погодні умови, наявність рослинності та рівень вологості на навколишньому місцевості, що роблять його неточним.

При обліку наведених вище факторів, що відтворюються результати вимірювань напруженості поля можна розрахувати з великої кількості необроблених показань за допомогою їх статистичної обробки.

Для статистичної оцінки кількість контрольних точок повинна бути обрана такою чином, щоб результати представляли процес повільної зміни напруженості поля (ефект тривалого замирання), а також більшою чи меншою мірою відображали місцеві (миттєві) особливості (ефект короткочасного замирання) розподілу напруженості поля сигналу.

Для отримання довірчого інтервалу 1 дБ навколо фактичного середнього значення контрольні точки треба вибирати для кожних $0,8 \cdot \lambda$ (довжина хвилі) на інтервалі усереднення $40 \cdot \lambda$ (50 виміряних значень не більше 40 довжин хвиль).

Після збору результатів вимірювань та обробки даних подання результатів може бути зроблено з допомогою ПК з кольоровим монітором, принтером або графобудівником такими способами:

Подання необроблених даних у вигляді таблиці

Переваги: Надається докладна інформація про місцеві явища замирань. Ці результати можна перетворити на будь-яку форму, зручну для перегляду результатів, за допомогою математичної чи статистичної обробки.

Недоліки: Занадто великий обсяг даних. Окремі результати не можуть бути повторені.

Побудова діаграм у прямокутних координатах

Графічне подання оброблених даних напруженості поля виконується в прямокутних координатах залежно від відстані із зазначенням розрахованих медіанних значень.

Переваги: Цей метод забезпечує швидке отримання зручних для перегляду результатів розподілу та місцезнаходженням з рівнем напруженості поля нижче заданого порогового значення.

Недоліки: Важко співвіднести результати з точним місцем виміру.

Відображення на картах

На карті доріг представляють кольоровими лініями оброблені рівні напруженості поля (наприклад, у масштабі 10 дБ(мкВ/м)) або ймовірність перевищення рівня (між 1 та 99%).

Вибраний масштаб картки повинен відповідати розміру досліджуваної зони, що охоплюється радіосигналами, та необхідному дозволу оброблених

результатів напруженості поля. Залежно від масштабу карти інтервали можуть включати кратні значення. інтервалів усереднення. Дозвіл наведених результатів слід вибирати так, щоб можна було відображати місцеві особливості без використання надто широкої гами кольорових ліній.

Якщо потрібно представляти інтервали усереднення з вищою роздільною здатністю (наприклад, при представлення результатів для мікростілникового зв'язку), система повинна мати здатність змінювати масштаб карти під час користування нею.

Якщо під час вимірювань одночасно реєструють дві серії даних (наприклад, рівні напруженості поля та BER), то доцільно представляти їх разом за допомогою двох паралельних кольорових ліній уздовж нанесених на карту доріг.

Переваги: Результати вимірювання можна об'єднувати за наявності точної точки вимірювання.

Цей метод забезпечує швидке отримання зручних для перегляду результатів щодо розподілу та отримання рівнів напруженості поля нижче заданого порогового значення.

Недоліки: Роздільна здатність для інтервалу на карті може бути більш, ніж для інтервалу обробки. Тому місцеві характеристики рівня напруженості поля можуть бути завищеними.

Відомчі мережі радіозв'язку

Відомчі мережі радіозв'язку як правило не призначені для надання послуг. У більшості випадків достатньо оцінити розміри зони обслуговування (покриття) та порівняти їх з розрахунковими.

У такому разі не потрібно використання спеціалізованих мобільних комплексів радіоконтролю. Для вимірювань можна використовувати широко доступні калібровані портативні монітори радіочастотного поля або, в у крайньому випадку, *навіть абонентські пристрої тих сухопутних систем мобільного зв'язку, що тестуються, з функціями польового моніторингу* [4]. Сучасні цифрові засоби радіозв'язку зможуть вимірювати рівень сигналу. При такому тестуванні вимірювання можна проводити досить швидко та з дуже обмеженими людськими та фінансовими ресурсами.

Але одного рівня сигналу для оцінювання зони обслуговування недостатньо. У зв'язку з наявністю радіозавад (у тому числі штучного походження, наприклад ліній електропередачі, багатопроменевого

поширенню радіохвиль тощо), потрібно крім рівня сигналу визначити якість цифрового радіозв'язку.

Існує два основних типи інформації про сигнали: *RSSI* та *LQI*.

RSSI або Received Signal Strength Indicator – *індикатор потужності* отриманого сигналу, це значення вказує на те, наскільки гучним є прийом. *RSSI* має бути вище рівня чутливості, щоб зрозуміти. Одиницями є дБм, вони починаються з 0 і знижуються, коли гучність стає нижчою (жорстка межа –130 дБм).

LQI або Link Quality Indicator – *індикатор якості зв'язку*, це значення вказує на те, скільки розмови зрозуміло, і в кінцевому підсумку все, що має значення. Одиницями є відсотки, де 100% означає, що кожен пакет отримано, а 0% означає, що пакети не отримані. Абстрактну оцінку саме цієї величини у величини, у вас питають другою половиною врази – “Як чуєте та розбираєте”.

Приклад графіків залежності показників потужності *RSSI* та якості сигналу *LQI* від часу наведено на рис. В.2

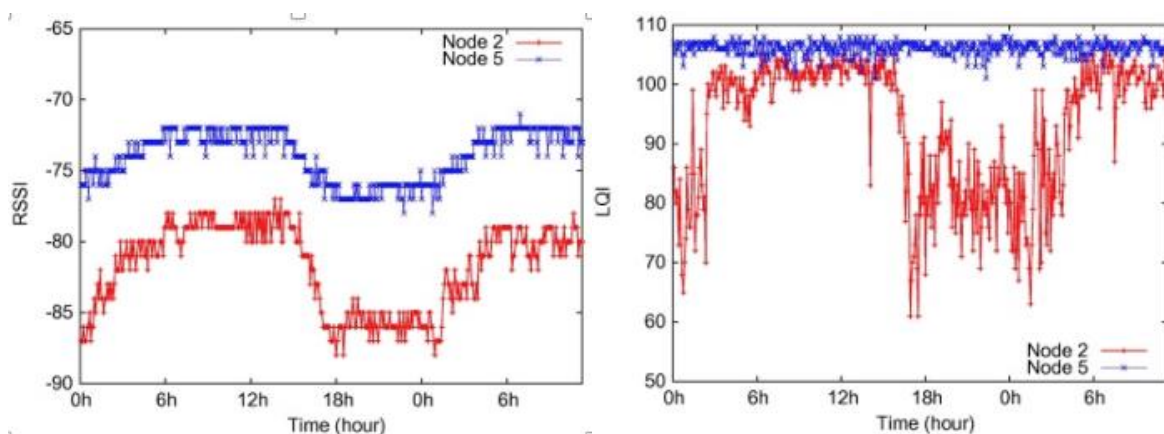


Рисунок В.2. Приклад графіків залежності показників потужності *RSSI* та якості сигналу *LQI* від часу

На практиці при застосування стандартного абонентського обладнання крім вимірювання рівня сигналу потрібно оцінити й його якість як мінімум за простими критеріями щодо наявності радіозв'язку, наприклад:

- стійкий радіозв'язок;
- не стійкий радіозв'язок;
- відсутність радіозв'язку.

Одночасне використання кількох терміналів, включаючи різні моделі, може бути розглянуто для підвищення надійності таких вимірювань або для дослідження покриття для різних типів терміналів, таких як автомобільні приймачі, портативні та портативні пристрої.

Антену зазвичай встановлюється на даху невеликих транспортних засобів для вимірювання покриття мобільного прийому,

Для вимірювання покриття відомчих систем радіозв'язку використовують різне термінальне обладнання:

- портативні радіостанції бажано різних типів різних виробників (зовні транспортного засобу на відкритій місцевості на рівні 1,5 м та розміщені всередині транспортного засобу з зовнішньою антеною, яка встановлена на даху);
- автомобільні радіостанції з зовнішньою антеною, яка встановлена на даху.

Система позиціонування складається з *GPS*-приймача. Для вимірювань покриття в цифровій системі необхідно використовувати спеціальні приймачі. Вони надають певні параметри, такі як коефіцієнт помилок у бітах (*BER*) та інші параметри якості, такі як, наприклад, обриви з'єднань.

Хоча чим більше вимірювань, тим кращий результат, для грубого тестування емпіричної моделі поширення радіохвиль може бути достатнім провести статичні вимірювання в зонах покриття принаймні двох або трьох існуючих радіопередавачів. Однак важливо переконатися, що ці зони покриття вибрані для тестування таким чином, щоб вони відображали найбільш типові умови розповсюдження в цьому регіоні (міські/приміські райони, щільність рослинності, нерівності рельєфу тощо). У кожній із вибраних зон покриття доцільно проводити польові вимірювання щонайменше на 15 – 20 різних відстанях від передавача. Для кожної з цих відстаней вибірка вимірювання повинна включати щонайменше 5 – 10 вимірювань, бажано здійснених у різних напрямках від передавача, щоб забезпечити правильну оцінку середньої напруженості поля. Якщо в перевірених передавачах використовуються спрямовані антени, слід подбати про те, щоб усі точки вимірювання знаходилися в межах головного променя антени передавача. Антена тестового приймача повинна бути розміщена на відповідній висоті, тобто 1,5 – 2 м для наземних мобільних служб.

Найзручніше проводити такі вимірювання вздовж наявного радіального маршруту (наприклад, дороги) в межах зони покриття та в точках із певними заданими відстанями між ними, скажімо, через кожний 1 км. Одна з можливих установок для кластеризації таких точок вимірювання показана на рис. В.3.

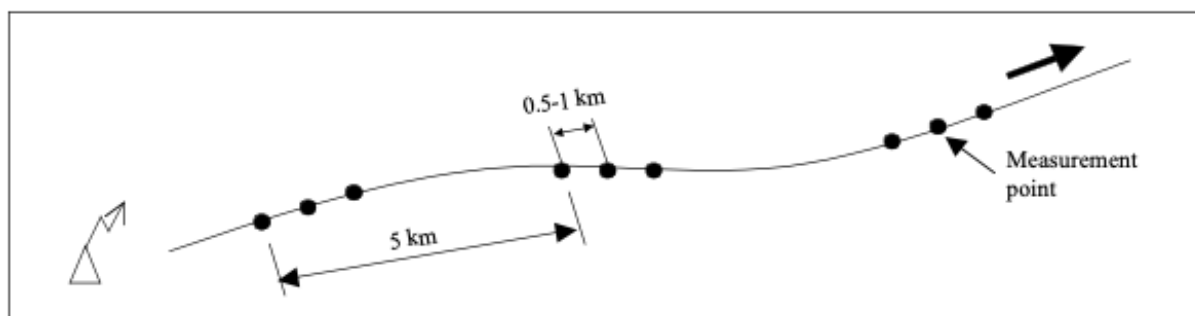


Рисунок В.3. Приклад кластеризації точок вимірювання вздовж радіальної лінії від опорного передавача

У кожній із точок вимірювання слід записати середню напруженість поля та відносну відстань від передавача. Оскільки в цьому випадку кількість вимірювань дуже обмежена, їх можна проводити без автоматизації, а з ручним записом виміряної напруженості поля. Відстань від передавача можна визначити будь-яким доступним способом: GPS-приймачем з можливістю диференціального вимірювання відстані, одометром автомобіля на строго радіальному маршруті або картою відповідного масштабу.

У результаті таких вимірювань буде отримано набір вимірянних значень напруженості поля для заданих відстаней. Потім ці вимірювання можна порівняти з результатами моделювання, звертаючи увагу на коригування параметрів моделі (висота антени, потужність випромінювання тощо) для кожного з маршрутів вимірювання, оскільки вони можуть відрізнятися, наприклад коефіцієнт підсилення антени і, отже, випромінювана потужність можуть бути різними в різних напрямки.

Якщо модель буде використовуватися в різних частотних діапазонах, то також бажано провести тестування в усіх цих частотних діапазонах. На рис. Е.3 показано приклад порівняння результатів вимірювання та моделювання.

Доцільно порівнювати вимірювання з розрахунковими результатами, отриманими за допомогою кількох моделей. Тоді навіть суб'єктивний аналіз таких порівнянь може бути використаний, щоб вирішити, яка з протестованих моделей працює найкраще та чи достатньо вона працює.

Наприклад, для того конкретного регіону, де були отримані приклади на рис. В.4, можна зробити висновок, що модель Окумура-Хата є найкращою та достатньою моделлю для моделювання напруженості поля в діапазоні 160 МГц VHF в міських/приміських умовах. Проте з того ж прикладу можна побачити, що модель Окумури-Хата повинна бути

викоректована перед застосуванням її для прогнозування розповсюдження в діапазоні 450 МГц у сільській місцевості.

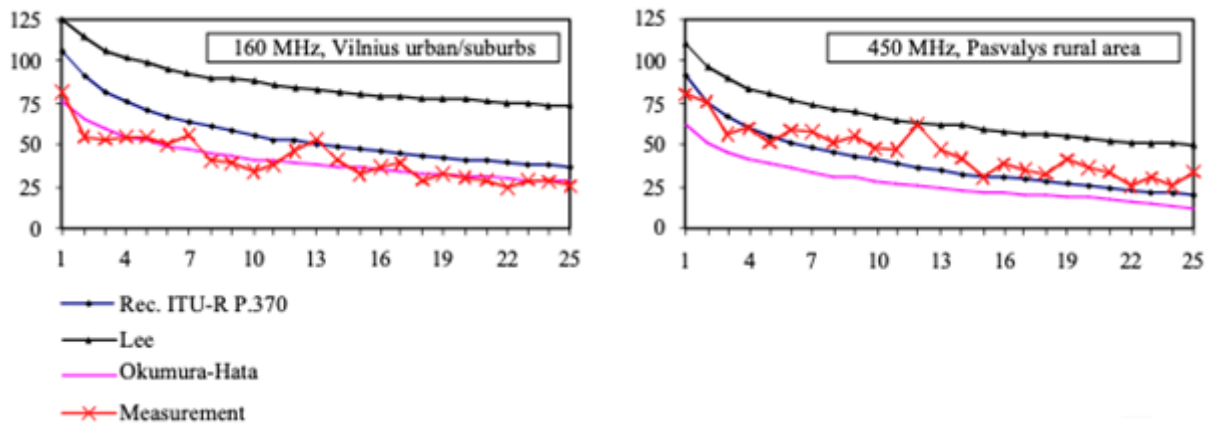
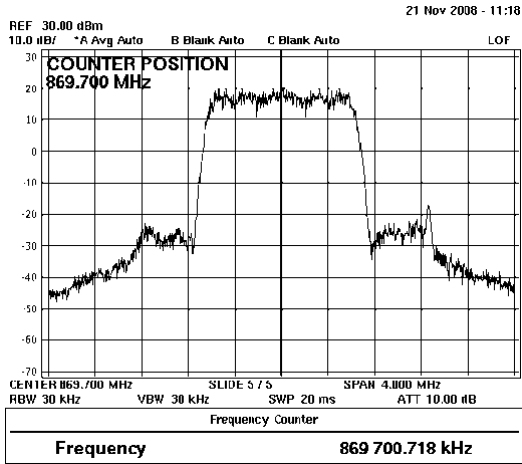


Рисунок В.4. Приклад порівняння результатів вимірювань з кількома емпіричними моделями, усереднена напруженість поля (мкВ/м) у порівнянні з відстанню від точок від передавальної станції вздовж радіальної лінії від опорного передавача, км

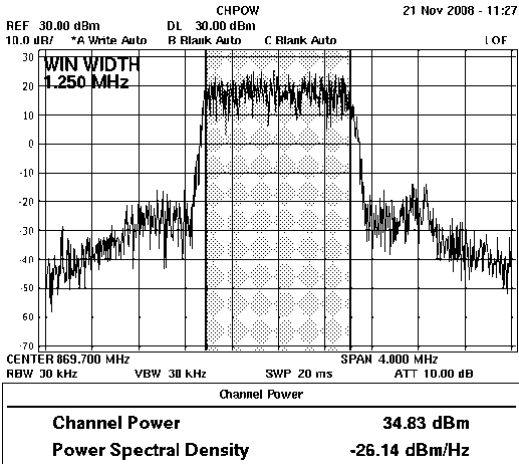
Однак небезпечно робити такі висновки на основі вимірювань лише в одній смузі частот/зоні покриття. Принаймні дві або три зони покриття (передавачі) повинні бути досліджені в кожному з діапазонів частот, і висновки можуть бути зроблені лише тоді, коли вони однаково підтверджені у всіх випадках.

Коли тестування показує, що точність обраної емпіричної моделі недостатня, модель потребує налаштування. Це можна зробити шляхом точного налаштування емпіричних параметрів моделі. Методика корегування представлена у довіднику МСЕ [3].

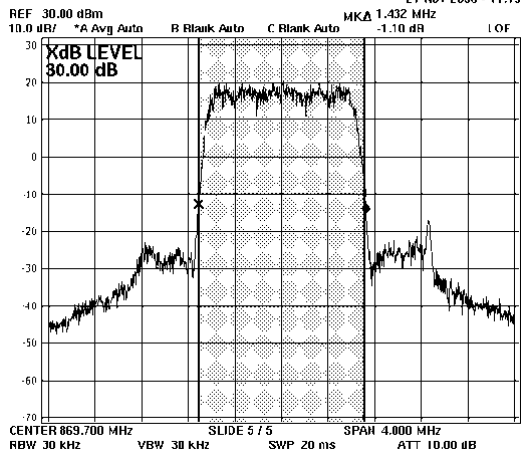
Додаток Г
Додаток до протоколу вимірювання параметрів РЕЗ (приклад)
Спектрограми випромінювання передавача (сектору) № _____ від " " 200_р.
(Приклад)



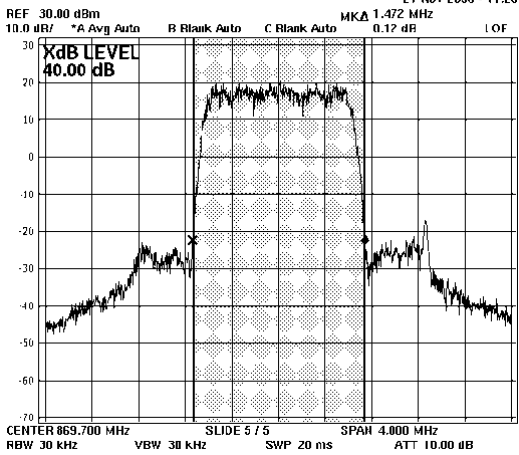
Мал. 1. Вимірювання відхилення несучої частоти передавача



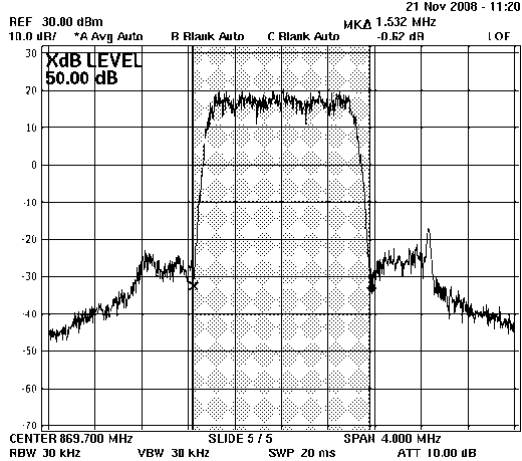
Мал. 2. Вимірювання каналної потужності



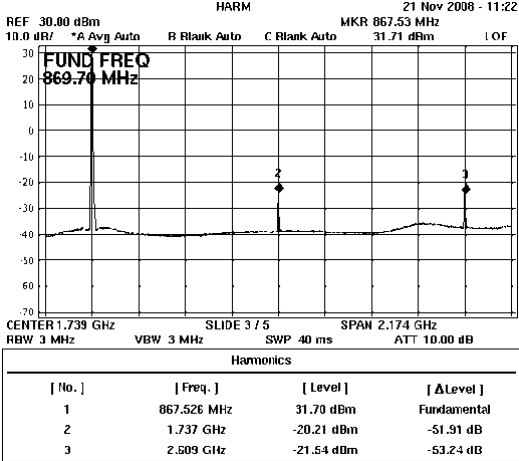
Мал. 3. Вимірювання ширини смуги випромінювання на контрольному рівні -30 дБ



Мал. 4. Вимірювання позасмугового випромінювання на рівні -40 дБ



Мал. 5. Вимірювання позасмугового випромінювання на рівні -50 дБ



Мал. 6. Вимірювання побічного випромінювання передавача

Примітка: ***) Спектрограми вимірювань повинні обов'язково містити інформацію про дату та час вимірювання. Кожному параметру РЕЗ, що вимірюється (таблиця п. 5), повинна відповідати своя спектрограма.

(посада особи, що виконувала вимірювання) (підпис) (П.І.Б.)



Зовнішній вигляд РЕЗ *****)

Примітка: *****) Фотографії передавача та антенофідерних споруд повинні забезпечувати ідентифікацію РЕЗ на місцевості, тобто включати елементи споруд, будинків та/або конструкцій веж, для можливості визначення місць встановлення антен.

(посада особи, що виконувала вимірювання)

(підпис)

(П.І.Б.)

SDR приймачі та аналізатори спектра

Додаток Д.1

SDR приймач RTL-SDR

Приклад одного з поширених SDR приймачів наведений на рис. Д.1.



Рисунок Д.1. SDR приймач RTL-SDR

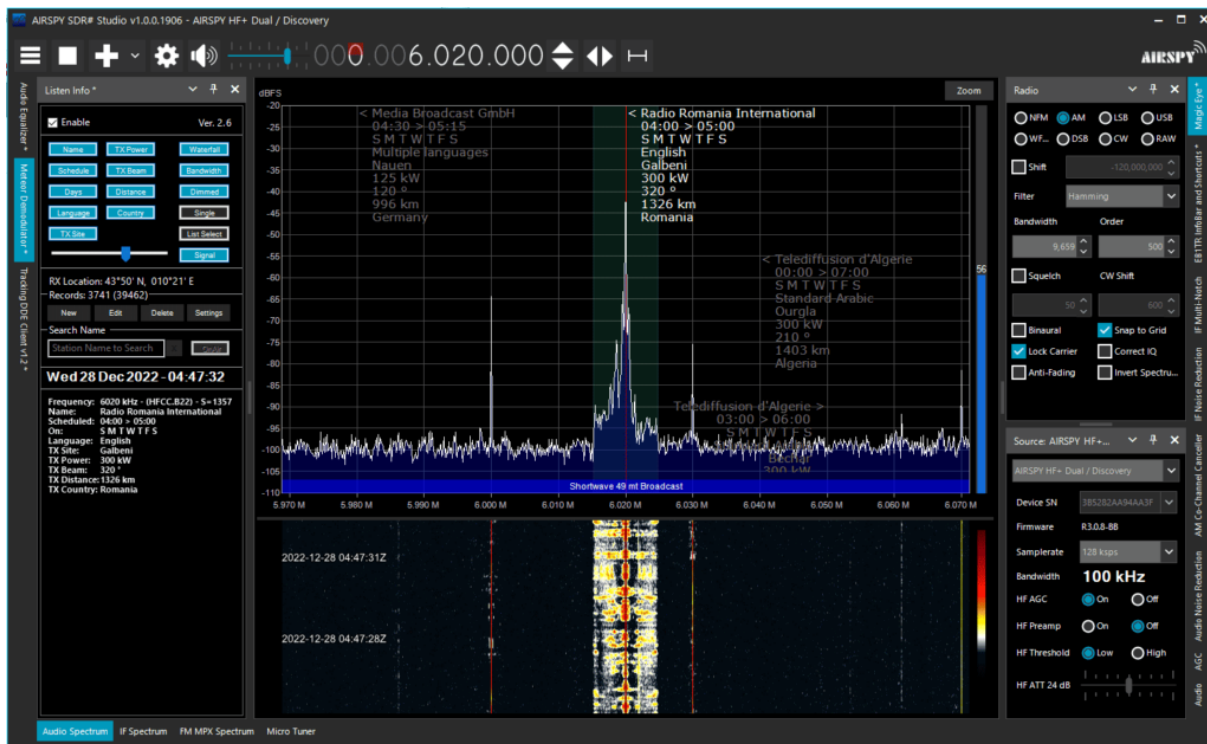
Це програмно-визначуваний радіоприймач RTL-SDR з мікросхемою АЦП RTL2832U, тюнером R820T2, TCXO 1PPM, роз'ємом SMA-F і алюмінієвим корпусом з пасивним охолодженням. Робочий діапазон частот від 500 кГц до 1,7 ГГц зі смугою пропускання до 3,2 МГц (стабільна 2,4 МГц). (ВЧ працює в режимі прямої вибірки). Підходить для використання як комп'ютерний радіосканер з безкоштовним програмним забезпеченням, таким як SDR, HSDR, SDR-Radio, GQRX або SDR Touch на Android. Працює з такими комп'ютерами, як Windows, OSX, Linux, Android. Вартість такого приймача на Ali-Express складає біля 30 доларів.

На рисунку Д.2 наведено скрин-шот монітора комп'ютера з підключеним RTL-SDR та встановленим програмним забезпеченням Soft-SDR.

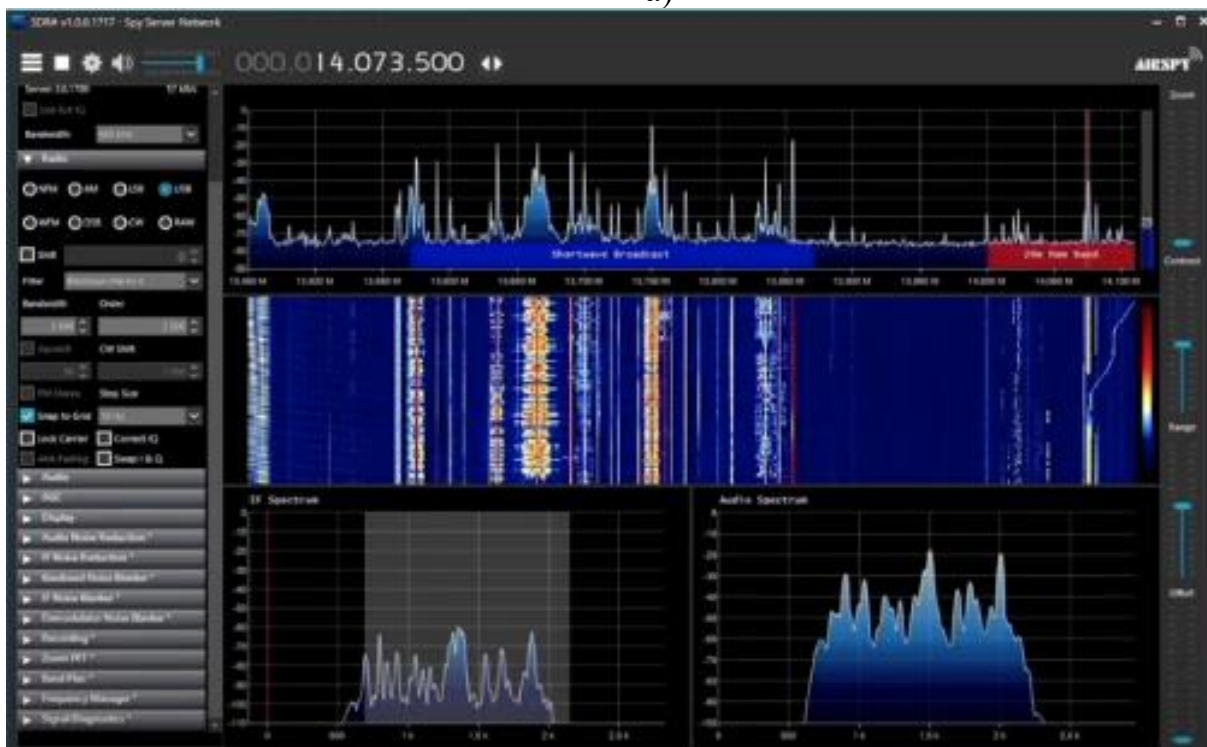
SDRSharp – програма для роботи з SDR–приймачами, розроблена для операційних платформ Windows та Linux.

SDRSharp має вбудований спектральний аналізатор, що дозволяє візуалізувати спектр сигналів у реальному часі. Програма у вкладці “Radio” є можливість вибору модуляції при детектуванні сигналу: NFM, AM, LSB, USB, WFM, DSB, CW, RAW. Додаткові плагіни та утіліти дозволяють

декодувати цифрові голосові сигнали цифрові та сигнали, як наприклад такі P25, DMR, NXDN, TETRA та ін.



а)



б)

Рисунок Д.2. Скрин-шот монітора комп'ютера з встановленим програмним забезпеченням а) Soft-SDR та б) SDR# (SDRSharp)

SDR приймач HackRF One

HackRF One – це багатофункціональний програмно-визначений радіоприймач (SDR), здатний працювати у широкому діапазоні частот від 1 МГц до 6 ГГц, рис. Д.3.).



Рисунок Д.3. SDR приймач HackRF One

Він підтримує прийом *та передачу* сигналів, що робить його універсальним інструментом для зв'язківців, дослідників та розробників бездротових систем. HackRF One може використовуватися для аналізу та моніторингу радіочастот із застосуванням вітчизняного програмного забезпечення *Spectrozir SA* (рис. Д.4).

HackRF One від розробника Great Scott Gadgets – це периферійне пристрій програмно-визначеного радіо, здатне передавати або приймати радіосигнали від 1 МГц до 6 ГГц. HackRF One, розроблений для тестування та розробки сучасних радіотехнологій наступного покоління – це апаратна платформа з відкритим вихідним кодом, яку можна використовувати як USB-периферійне пристрій або запрограмувати для автономної роботи.

Основні технічні характеристики:

- робоча частота від 1 МГц до 6 ГГц
- напівдуплексний приймач-передавач
- швидкість сканування – до 8200 МГц/с
- 8-бітні квадратурні АЦП (8-бітний I та 8-бітний Q)
- сумісний з GNU Radio, SDR# та іншими
- програмно-налаштовуване посилення RX та TX і фільтр основної смуги
- живлення порту антени з програмним керуванням (50 мА при 3,3 В)

- роз'єм антени SMA-мама
- живлення від USB
- апаратне забезпечення з відкритим вихідним кодом

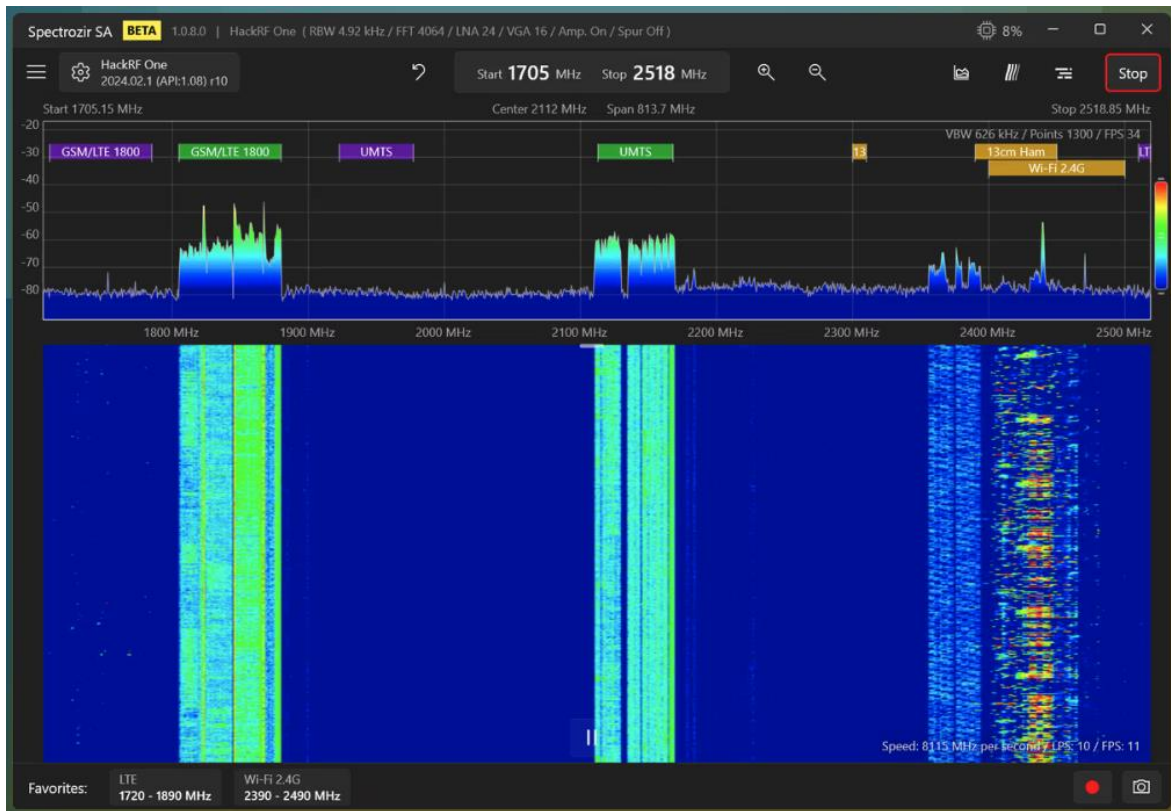


Рисунок Д.4. Скрин – шот монітора комп'ютера з встановленим програмним забезпеченням SpectroZir SA.

Аналізатор спектра TinySA Ultra+ ZS-407

Технологія SDR використовується і в аналізаторах спектра. Найбільш поширені **SDR-аналізатори спектра** с частотами до 6 (7) ГГц є TinySA ULTRA, TinySA ULTRA+ та SA6. Зовнішній вигляд аналізаторів (рис. Д.5)

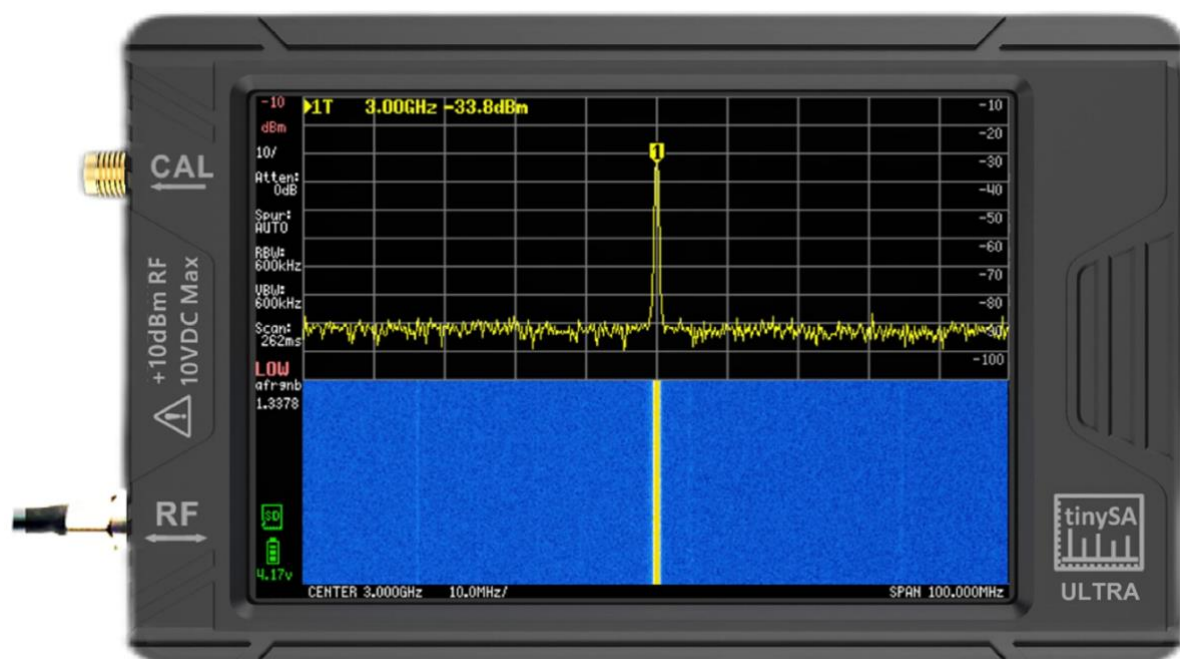


Рисунок Д.5. Зовнішній від аналізатора спектра TinySA ULTRA

Портативний аналізатор спектру tinySA Ultra+ оснащений 4,0-дюймовим резистивним сенсорним кольоровим дисплеєм, який відображає повний діапазон частот при 450 точках сканування, і має в комплекті акумуляторну батарею, що забезпечує до двох годин роботи в портативному режимі. Крім того, аналізатор має два різні режими: нормальний режим та ультрарежим. TinySA Ultra+ має безліч вбудованих опцій налаштування, таких як смуговий фільтр, що перемикається, і ступінчастий вхідний атенюатор. Важливо пам'ятати, що максимальний вхідний рівень tinySA становить +6 дБм. Якщо ви не впевнені у рівні вхідного сигналу, рекомендується використовувати атенюатор.

Коли tinySA Ultra+ не використовується як аналізатор спектру, його можна також використовувати як генератор сигналів синусоїдальної або прямокутної форми.

Аналізатор може повністю керуватися з ПК через USB-кабель. Він також оснащений автоматичною самодіагностикою та автокалібруванням, використовуючи вбудований генератор сигналів.

TinySA Ultra (ZS405) і TinySA Ultra+ (ZS407) – обидва портативні аналізатори спектра, проте Ultra+ має більш розширену специфікацію. TinySA Ultra+ підтримує більш широкий діапазон частот: 0,1-900 МГц (0,1-800 МГц для базової моделі TinySA Ultra) і до 7,3 ГГц в режимі Ultra (5,3 ГГц для TinySA Ultra). Окрім цього, TinySA Ultra+ також має вищі межі генерації сигналу: до 6,3 ГГц для прямокутних сигналів і 7,3 ГГц для тестових сигналів, на відміну від показників TinySA Ultra: 4,4 ГГц і 5,3 ГГц відповідно. Обидві моделі мають однакові екрани, слот для карт пам'яті microSD і пам'ять для зберігання результатів вимірювань і налаштувань. Покращена модель TinySA Ultra+ ідеально підійде для більш вимогливих задач та професійного використання.

Технічні характеристики аналізатора tinySA Ultra+

- Діапазон частот аналізатора:
 - від 100 кГц до 900 МГц (у звичайному режимі)
 - від 100 кГц до 7,3 ГГц (у режимі Ultra)
 - калібрований за рівнем сигналу до 7,3 ГГц
 - здатний спостерігати сигнали до 12 ГГц
- Вхідний імпеданс: 50 Ом (при вхідному атенюаторі > 10 дБ)
- Точка стиску на 1 дБ: -1 дБм (при внутрішньому атенюаторі 0 дБ)
- Фазовий шум: -100 дБ/Гц для зміщення на 10 кГц та -103 дБ/Гц для зміщення на 100 кГц
- Ручний або автоматичний вхідний атенюатор, що перемикається, від 0 дБ до 31 дБ з кроком 1 дБ (при вимкненому МШУ)
- Максимально допустимий рівень вхідного сигналу: +6 дБм при вхідному атенюаторі 0 дБ
- Максимально допустимий короткостроковий піковий рівень коротких вхідних сигналів: +20 дБм, при вхідному атенюаторі 30 дБ
- Рекомендований рівень вхідного сигналу при автоматичному режимі вхідного атенюатора: +0 дБм
- Для найкращих результатів вимірювань підтримуйте вхідний рівень сигналу <-25 дБм
- Максимальна вхідна напруга: ± 5 В по постійному струму
- Динамічний діапазон: 70 дБ (відсутні паразитні гармоніки при RBW 30 кГц)
- Роздільна здатність вимірювання потужності: 0,5 дБ
- Рівномірність частоти: ± 2 дБ до 5,3 ГГц, ± 5 дБ від 5,3 ГГц до 6 ГГц
- Абсолютна похибка вимірювання рівня потужності: ± 2 дБ (після калібрування)

- Точка перетину продуктів модуляції третього порядку (ІРЗ) на вході: +15 дБм, при внутрішньому атенюаторі 0 дБ

- Ширина смуги фільтрів роздільної здатності: 0.2, 1, 3, 10, 30, 100, 300, 600 та 850 кГц

- Швидкість сканування: більше 1000 пікселів/сек, при використанні фільтрів з найбільшою шириною смуги

- Роздільна здатність: 51, 101, 145, 290 або 450 точок вимірювання

- Автоматична оптимізація фактичних точок сканування для забезпечення покриття всього діапазону сканування незалежно від вибраного фільтра роздільної здатності

- Функція придушення паразитних перешкод для диференціації між відмітками від внутрішньо-генерованих гармонік та реальним вхідним сигналом

- Вбудований МШУ на 20 дБ і коефіцієнтом шуму 5 дБ

- Середній відображаємий рівень шуму (DANL)

- Найменший помітний рівень сигналу без МШУ на частоті 30 МГц та смузі роздільної здатності 30 кГц: -102 дБм

- Найменший помітний рівень сигналу з МШУ на частоті 30 МГц і смузі роздільної здатності 200 Гц: -145 дБм

Характеристики генератора сигналів

- Частотний діапазон:

- синусоїдальний вихід: 100 кГц – 900 МГц

- Вихідний сигнал прямокутний форми: до 6.3 ГГц, якщо не використовується як аналізатор спектру

- Гармоніки: < -40 дБн у діапазоні 100 кГц – 900 МГц

- Модуляція: АМ, УП-ФМ, ШП-ФМ

- Точність рівня: ± 2 дБ до 900 МГц для рівнів від -72 дБм до -18 дБм, зниження точності нижче -72 дБм.

- Роздільна здатність за частотою: 44 Гц (до 900 МГц)

Інтерфейс користувача

- Екран: сенсорний, резистивний

- 16 біт на піксель RGB

- Управління джог-перемикачем

- Управління через порт USB

- Лінійне джерело живлення для уникнення імпульсних перешкод

Комплектація

У комплект поставки аналізатора tinySA Ultra+ входить:

- 1 x SMA антена

- 1 x SMA перехідник гніздо-гніздо

- 2 x ALSR100 кабелю довжиною 30 см з роз'ємами SMA

- 1 x USB-C кабель

- 1 x 32ГБ MicroSD карта

Застосування приладів для контролю радіосигналів для виконання бойових завдань

Додаток Д.1

Портативний пристрій радіотехнічної розвідки на базі аналізатора спектру “TINY SA ULTRA”

Практичне застосування аналізатора спектру “TINY SA ULTRA” для виконання бойових завдань наведено у Настанові, яка розроблена Сергієм Бескrestновим (Флеш) на замовлення Командування підготовки сухопутних військ [19]. Варіант компоновки портативного пристрою радіотехнічної розвідки на базі аналізатора спектру “TINY SA ULTRA” наведений на рис. Е.1.



Рисунок Е.1. Варіант компоновки портативного пристрою радіотехнічної розвідки на базі аналізатора спектру “TINY SA ULTRA”

Пристрій складається з:

- аналізатора спектру “TINY SA ULTRA”;
- антени (як правило логоперіодична широкосмугова антена);
- корпусу з рукояткою та блендою;
- малошумного підсилювача (за потребою);
- джерела резервного живлення (powerbank).

Комплекс моніторингу спектра

Для забезпечення безпеки оператора системи використовують комплекс моніторингу БПЛА з дистанційним контролем та управлінням [21,22]. Варіант антенної системи наведений на рис. Е.2.



Рисунок.Е.2. Багатоелементна антенна система з комутацією антен.

Призначення комплексу:

– контролювати польоти основних БПЛА РФ з метою мінімізації ризиків від їх застосування противником.

Повторюваність:

– цей пристрій (далі за текстом приймач, пункт моніторингу, приймальний пристрій, пункт прийому) простий у виготовленні і був особисто перевірений протягом року на різних ділянках фронтів.

Застосування:

– фіксування типів БПЛА, відстані до них, переміщення. Фіксація вильотів та переміщення ударних БПЛА формату “Ланцет”. Моніторинг

польотів розвідувальних БПЛА в українському тилу (подібна активність майже завжди є “провісником” атаки тилових об’єктів). Аналіз активності БПЛА (що завжди є фактором активності військ РФ).

Реалізація:

- пункт моніторингу на локальному комп’ютері у точці прийому;
- віддалений пункт моніторингу (приймач в одному місці, оператор в іншому).

Опціональне застосування:

- контроль активності засобів РЕБ, контроль FPV дронів.

Варіант реалізації

Перед закупкою комплектуючих та збиранням треба зробити вибір варіанта виконання:

Варіант 1 (простий, рекомендую новачкам почати з нього)

Ви купуєте приймач SDR, підключаєте його до Вашого комп’ютера за місцем служби. На комп’ютер інсталуєте програму SDR#. До приймача підключаєте підсилювач сигналів LNA. Від підсилювача «тягнете» кабель 5-15 метрів на дах, де ставите антену.

Варіант 2

Вам потрібно “дивитися” сигнали від “приймача”, перебуваючи в іншому місці. Для цього Ви робите все так само, як і у варіанті 1, але на комп’ютер ставите програму віддаленого керування (наприклад TeamViewer). Монтуєте все у віддаленому місці, а керувати “приймачем” Ви будете зі свого комп’ютера.

Комплектуючі та складові

Основною системою є SDR приймач.

- Рекомендовано SDR HackRF, який можна купити в Україні (дорожче) або на «Алі» (дешевше за 80 доларів)
- Мінікомп’ютер (наприклад, Dell Optiplex, можливо не новий)
- Безкоштовна програма SDR#
- Малошумний підсилювач (англ. скорочення LNA)
- спрямована антена (або 2–4 спрямованих антени та антенний комутатор)
- або антена з круговою діаграмою спрямованості.

Індикатори (детектори) радіовипромінювань

У ряді випадків немає потреби у точному вимірюванні параметрів випромінювань. Достатньо отримати сигнальну інформацію (візуальну та звукову) про наявність випромінювань у насамперед визначених смугах частот (для ідентифікації джерела випромінювання) та мати приблизну оцінку відстані до джерела випромінювання (на підставі аналізу рівня сигналу).

Таки вимірювальні приймачі з обмеженою функціональністю та заздалегідь встановленими смугами частот для сканування іноді називаються **детекторами випромінювань**. Вони у декілька разів дешевше аналізаторів спектру, мають незначну вагу та габарити, мале споживання електроенергії. Як правило такі пристрої мають можливість зміни параметрів (наприклад смуг робочих частот) з допомогою зовнішніх комп'ютерів (планшетів, смартфонів) з відповідним програмним забезпеченням.

На даний час в Україні виробляється велика чісельність різних приладів, деякі з яких показані на рис. Е.3.

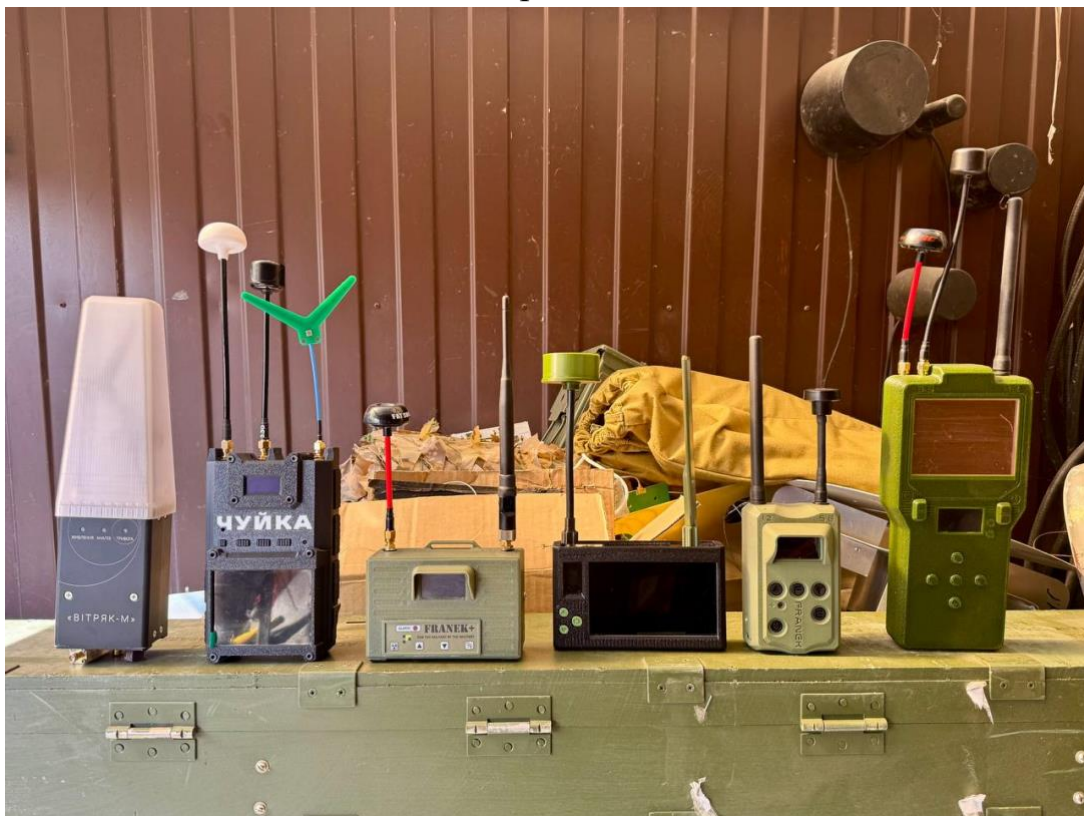


Рисунок Е.3. Зовнішній вигляд різних типів детекторів випромінювань

Детектори випромінювань розрізняються:

- діапазоном частот для сканування,
- кількістю смуг частот сканування,
- дальністю та швидкістю детекції,
- можливість детекції дронів по відеоканалу,
- можливістю оперативного переналаштування на інші частоти,
- наявністю індикатора спектра сигналу,
- захист від хибних спрацювань,
- малогабаритними показникам,
- часом автономної роботи,
- вартістю тощо.

Актуальну інформацію про стан та порівняння характеристик індикаторів (детекторів) радіовипромінювань можна отримати на спеціальних ресурсах.

Приклад. Детектор дронів “Тенета PRO” (Цукорок)

Частоти (400МГц–1050МГц; 2.4ГГц), Аналізатор, спектрометр БПЛА/FPV). Зовнішній вигляд детектора дронів “Тенета PRO” наведено на рис. Е.4.



Рисунок Е.4. Зовнішній вигляд детектор дронів “Тенета PRO”

Пристрій має мультимедійний та функціональний сенсорний екран. Працює від вбудованого Li-ion акумулятора. А також має зовнішні широкосмугові антени. Та боковий перемикач загального живлення пристрою.

Сканує такі несучі частоти:

- 415 МГц
- 433 МГц
- 750 МГц
- 868 МГц

- 915 МГц
- 921 МГц

Відстань сприйняття сигналу по результатам тестів від військових в реальних умовах:

- 100mW = 200 м
- 1W = від 500 м

Поточні налаштування пристрою включають:

- Можливість on/off звукових сигналів
- On/off вібрації
- Час вимкнення та блокування екрану (ніколи, 1, 5, 15, 30, 60 хв)
- Зміни яскравості дисплею (повзунок у відсотках)
- Поріг зміни детекції RSSI
- Час на частоту (200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 мс та 1с)
- Поріг пакетів (1, 2, 3, 4, 5)
- On/off звуку пакету LoRa
- Оновлення ПЗ (Оновлення по повітряю OTA)
- Нічний режим дисплея

“Час на частоту” – це час, впродовж якого детектор слухає на одному з варіантів модуляції (у межах від 200 мс – 1 с). Всього 6 варіантів модуляції та 6 несучих частот. Візьмемо за приклад налаштування в 400 мс. $6 \cdot 400 \text{ мс} = 2,4 \text{ с}$ – це час сканування 1 несучої частоти, отже для сканування всіх частот, необхідно $6 \cdot 2,4 \text{ с} = 14,4 \text{ с}$. Якщо ж час на частоту 300 мс, то відповідно так само розраховується. Зазначимо, що при зменшенні параметру “Час на частоту”, є вірогідність зменшення ефективності виявлення, так як банально не вистачить часу для виявлення пакету. Відповідно при збільшенні часу, зменшується швидкість виявлення. Значення в 400 мс, яке стоїть за замовчуванням є оптимальним.

Основні характеристики:

- Маса пристрою 90 г з антенами, 80 г без антен;
- Розміри корпусу без антен та бокового перемикача - 71x24x48 мм;
- Без антен та з перемикачем – 80x24x48 мм;
- З антенами та перемикачем – 80x24x97 мм;
- Можливість роботи під час зарядки – так;
- Час автономної роботи пристрою становить 7 год. 30 хв;
- Час до повної зарядки – 1 год. 30 хв (при 5V 1A);
- Екран: 1,28 – дюймовий IPS capacitive touch екран з роздільною здатністю у 240*240 пікселів;
- Ємність акумулятора (Li-ion) – 1300mAh.

Детектор має можливість підключення до смартфона Android через ПО “Teneta” для перегляду рівнів сигналу (RSSI) на частотах 415–1020 МГц.



Рисунок Е.5. Пристрій підключено до смартфона



Рисунок Е.6. Вигляд при виявленні пакетів з пульта ELRS 915МГц

ELRS, або ExpressLRS, це система дистанційного керування з відкритим кодом, що використовується для керування дронами та іншими радіокерованими моделями. Це відкритий проєкт, який розвивається спільнотою, і він відомий своєю високою швидкістю оновлення пакетів та великою дальністю зв'язку.

Детекція дронів по відеоканалу, перехоплення відеосигналів

Основний принцип роботи пристроїв – виявлення активності дронів саме через аналіз їхнього відеосигналу (у діапазонах 1.2 ГГц, 3,3 і 5.8 ГГц).

Деякі моделі детекторів випромінювань здатні визначати випромінювання на частотах, на яких передається відеосигнал, інші мають можливість перехоплення відеосигналів, але у більшості випадків аналогових відеосигналів. Якщо відеосигнал від FPV аналоговий та відкритий, то крилаті БПЛА шифрують канал відеопередачі.

Відеоканал зв'язку з FPV дроном завдяки відсутності необхідності кодування – декодування передається набагато швидше ніж цифровий та більш стійкий до впливу РЕБ. Для знешумлення сигналу використовуються шумові фільтри, а також розумні приймачі типу Clearview.

На даний час серійно виробляються портативні детектори FPV на 3 діапазони: 1.2/3.3/5.8 ГГц. Виробники: Дзига, Чуйка, Янголтя.

Далі представлено деякі моделі та їх стислий опис.

1. Детектор дронів по відеоканалу "ЧУЙКА 2.0". Детекція FPV-дронів: в діапазонах 1,3 Ghz та 5,8 Ghz

Чуйка 2.0 – це інноваційний український пристрій радіоелектронної розвідки, створений для виявлення та перехоплення відеоканалу від FPV-дронів. Розроблений відповідно до реальних бойових потреб, він забезпечує миттєве сканування частот і допомагає бійцям оперативно реагувати на загрозу з повітря. Має вбудований дисплей.



Рисунок Е.7. Зовнішній вигляд детектор дронів “ЧУЙКА 2.0”

Основні характеристики:

- Діапазони частот: 900 – 1680 МГц та 4990 – 6000 МГц
- Макс. дальність виявлення: до 4000 м (залежно від антен)
- Сканування всього діапазону: за 2 – 3 секунди
- Екран: показує кількість дронів, канали та частоти
- Перехоплення відео FPV: *вивід на екран того, що бачить пілот*
- Живлення: 2×21700 Li-ion (4500 мА·г) або USB Type-C
- Час автономної роботи: до 8 годин
- Вага: до 250 г
- Матеріал корпусу: пластик
- Звуковий та світловий сигнал тривоги при наближенні дронів
- Можливість перемикавання між джерелами сигналу

Особливості:

- Вміє відрізняти реальні FPV-сигнали від завад
- Підтримує інвертований відеосигнал (після скремблера)
- Має режим відеоприймача без автосканування
- Можливість заміни антен (оптимальні результати – з комплектними)

2. Детектор дронів із відеоперехопленням VIDIK.

Аналізатор FPV-сигналу 1.2/3.3/5.8 ГГц

Зовнішній вигляд відеоперехоплювача VIDIK наведений на рис.Е.8.



Рисунок Е.8. Зовнішній вигляд детектора дронів із відеоперехопленням VIDIK

Виробляється детектор на 3 діапазона частот у двох варіантах (в залежності від мобільності та наявності зовнішнього екрана).

Варіант #3 VIDIK-P v3. Переносний перехоплювач на 3 діапазони (1.2 ГГц, 3.3 ГГц та 5.8 ГГц). Все зібрано в одному корпусі для портативного користування. Екран, приймачі, антени, акумуляторна батарея - все в одному зручному корпусі.

Варіант #3 VIDIK-S v3. Стаціонарний перехоплювач на 3 діапазони (1.2 ГГц, 3.3 ГГц та 5.8 ГГц). Він має розділений екран від приймача з антенами, які з'єднуються кабелем типу віта пара UTP. Цей варіант буде більш ефективніший для використання в автомобілі, на броні, в окопі та інших подібних випадках. Унікальність цього рішення полягає в тому, що рознесення від екрану не погіршує прийом та якісь сигналу, за рахунок того, що від приймача до екрану через виту пару передається вже оброблений приймачем сигнал. Навпаки таке рішення позитивно впливає та покращує прийом, дальність перехоплення відеосигналу по вказаних в цьому пункті сферах застосування.

Опис

Діагональ екрану складає 7 дюймів, має роз'єм типу тюльпан для підключення зовнішнього монітору. Вбудований акумулятор на 10000 мАг, який дозволяє постійно працювати екрану в режимі постійного перегляду відео 5 годин, суто в режимі сканування 10 годин, час роботи змішаного режиму становить приблизно 7–9 годин. Зарядка батареї займає приблизно 6 годин, час залежить від потужності зарядного пристрою, порт підключення через Type-C роз'єм, може використовуватись зарядка від мобільного телефону, повербанка, автомобільна зарядка. На корпусі з правої сторони є світлодіодний індикатор заряду батареї, для перевірки залишку заряду потрібно щоб прилад був ввімкнений, натискаючи на кнопку біля індикатора буде показано рівень заряду. Антени підключаються через SMA конектор, на детекторі встановлено два роз'єми типу SMA Female (мама, зовнішня різьба).

Принцип роботи відеоперехоплювача VIDIK:

Після включення детектор автоматично починає сканувати ефір та шукати відеосигнал, натискати будь-які кнопки для початку сканування не потрібно. При цьому екран не світиться, інформація про те, що відеодетектор знаходиться в пошуку свідчить блимаючий червоний світлодіод на передній панелі приладу. Якщо VIDIK перехоплює

відеосигнал з дрону, то він автоматично зупиняється на цьому відео, екран сам вмикається, видає звуковий сигнал та постійно світиться червоним світлодіод. Для вимкнення звуку треба натиснути кнопку I, при наступному сканування на перехопленому відео знову спрацює звуковий сигнал. На екрані у верхньому лівому куті відображається перехоплена частота, на якій було знайдено відео, зверху по центру екрана відображається RSSI рівень сигналу, чим більше цифра, тим потужніший рівень сигналу. Якщо бажаєте пропустити знайдене відео при скануванні, наприклад відео зі свого дрона або детектор зупиняється на якійсь частоті помилково, то треба натиснути кнопку I на 10 секунд та на екрані з'явиться напис Ignore з цією частотою. Якщо бажаєте продовжити сканування, то натискаєте кнопку вгору або кнопку вниз. Різниця в кнопка в тому, що при натисканні вгору сканування буде йти на збільшення частоти і повертатися по колу, а натискання вниз буде йти на зменшення частоти і повертатися по колу. Час повного проходу сканування складає приблизно 15–20 секунд. Сканування відеосигналу виконується по частоті з шагом 2 МГц, а не по каналах. Кнопки + та – використовуються для плавного налаштування частоти з шагом 2 МГц. Поки відображається відео на екрані детектор не сканує наступні відео на інших частотах. Багато часу від часу переходить до режиму сканування, щоб знаходити нові відеоперехоплення.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Закон України “Про електронні комунікації”.
2. “План розподілу і користування радіочастотним спектром в Україні” затверджений постановою Кабінету Міністрів України від 19 грудня 2023 р. № 1340.
3. Довідник з контролю за використанням спектру //МСЕ, Бюро радіозв’язку. - Женева, - 2011.
4. ITU-R. HANDBOOK. TERRESTRIAL LAND MOBILE RADIOWAVE PROPAGATION IN THE VHF/UHF BANDS, 2009.
5. Брагін А.С., Нестеренко І.К. Основи управління використанням радіочастотного ресурсу: навч. посіб. – Київ: Інститут телекомунікаційних систем НТУУ Київський політехнічний інститут, 2003, 374 с.
6. В.С. Ступак, С.О. Долматов. Основи радіочастотного контролю. – К.: Фенікс, 2004.
7. Макарчук О.М. “Радіочастотний менеджмент”. Навчальний посібник / О.М. Макарчук, Т.Г. Гурський, І.В. Борисов – К.: ВІТІ, 2018. – 100 с.
8. Планування та електромагнітна сумісність в безпроводових інфокомунікаціях [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка / М. Ю. Ільченко, Т. М. Наритник, С. В. Капштик, Г. Л. Авдєєнко, В. І. Корсун, В. І. Присяжний ; КПІ ім. Ігоря Сікорського.– Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 275 с.
9. Системи мобільного зв’язку. Застосування засобів мобільного зв’язку [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою “Спеціальні системи електронних комунікацій” спец. 172 “Електронні комунікації та радіотехніка” / Головін Ю.О. та інші – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 187 с.
10. Головін Ю. О., Могилевич Д.І. Основи теорії радіозв'язку: теоретичні основи та практичні аспекти [Електронний ресурс] : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 248 с.
11. Radio Regulations: Article. ITU, Geneva, Edition of 2020.
12. Rec. ITU-R SM.328-11: Spectra and bandwidth of emissions.
13. Rec. ITU-R SM.1138-3 (10/2019): Determination of necessary bandwidths including examples for their calculation and associated examples for the designation of emissions.
14. Rec. ITU-R SM.1045-1: Frequency tolerance of transmitters.

15. Rec. ITU-R SM.377-4: Accuracy of frequency measurements at stations for international monitoring.
16. Rec. ITU-R SM.378-7: Field-strength measurements at monitoring stations.
17. Rec. ITU-R SM.443: Bandwidth measurement at monitoring stations.
18. Rec. ITU-R SM.1541: Unwanted emissions in the out-of-band domain.
19. Настанова “Практичне застосування аналізатора спектру «TINY SA ULTRA» для виконання бойових завдань”, Сергій Бескrestнов (Флеш) Київ, жовтень 2023, 31 с. На замовлення Командування підготовки сухопутних військ.
20. “Інструкція з протидії активності розвідувальних БПЛА РФ у прифронтовій зоні”. Сергій Бескrestнов (Флеш) Київ, 2024, 5 с.
21. “Комплекс моніторингу БПЛА РФ, Самостійне виготовлення та експлуатація”, Сергій Бескrestнов (Флеш) Київ, 2024, 18 с.
22. Додаток до документу “Комплекс моніторингу БПЛА РФ. Самостійне виготовлення та експлуатація”. Підключення виносного малошумлячого підсилювача (МШП або LNA) до SDR приймача для пункту радіомоніторингу, Сергій Бескrestнов (Флеш) Київ, 2024, 7 с.
23. Система спостереження за БПЛА противника. Інструкція щодо доступу до системи наведена у ресурсі Дельта.
24. Детектори випромінювань. <https://drone-spices.com/>.
25. Нестеренко І.К. “Робота засобів зв’язку під впливом РЕБ російської федерації, захист від засобів РЕБ та РЕР противника”. Довідник “Військового зв’язківця щодо наявних засобів радіоелектронної боротьби та розвідки, які використовуються російською федерацією”, ЗВП 6-00(27).01, березень 2024, с. 26-30.
26. Рекомендація MCE-R SM.1708-1. Вимірювання напруженості поля вздовж маршруту з реєстрацією географічних координат.
27. Recommendation ITU-R SM.1447-0. Monitoring of the radio coverage of land mobile networks to verify compliance with a given licence.

ДЛЯ НОТАТОК