

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій
(повна назва)
Кафедра Інфокомунікаційної інженерії імені В.В. Поповського
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Дослідження завадостійкості систем радіозв'язку з псевдопослідовним
переналаштуванням робочої частоти.
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи ТСММ-19-1
Цибульников Д.І.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми: освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма: Телекомунікаційні системи та мережі
(повна назва освітньої програми)

Керівник: доцент кафедри ІКІ ім. В.В.Поповського
Єпішкін С.О.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)
2021р.

Лемешко О.В.
(прізвище, ініціали)

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Інфокомунікацій
(повна назва)

Кафедра _____ Інфокомунікаційної інженерії імені В.В. Поповського
(повна назва)

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський)

Спеціальність _____ 172 Телекомунікації та радіотехніка
(код і повна назва)

Тип програми _____ освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма _____ Телекомунікаційні системи та мережі
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри _____
(підпис)

« _____ » _____ 2021р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту _____ Цибульникову Дмитру Ігоровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження завадостійкості систем радіозв'язку з псевдопослідовним переналаштуванням робочої частоти
затверджена наказом по університету від «15» березня 2021р. №355 Ст.
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 11.05.2021р.
3. Вихідні дані до роботи: параметри радіостанцій RF-7800H-MP, MPR-9600, RF-7850M-NN, використовувані модуляції M-FSK, QAM, QPSK, канал передачі даних гаусівський
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:
 - 1) Класифікація навмисних перешкод засобам радіозв'язку
 - 2) Аналіз методів розширення спектру, їх особливостей, переваг та недоліків
 - 3) Аналіз завадостійкості систем зв'язку з ППРЧ
 - 4) Побудова імітаційної моделі системи зв'язку з ППРЧ, її аналіз при впливі різних факторів

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслень, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій: Демонстраційний матеріал у вигляді ppt-презентації; узагальнена класифікація радіоавад; методи розширення спектру; алгоритм роботи сучасних засобів РЕБ; математична модель засобу радіозв'язку з ППРЧ; модель запропонованого пристрою.

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		(підпис)	(дата)
Основна частина	доцент Єпішкін Сергій Олексійович		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	15.02.2021	Виконано
2	Збір матеріалів для дослідження	28.02.2021	Виконано
3	Розробка 1 розділу	19.03.2021	Виконано
4	Розробка 2 розділу	02.04.2021	Виконано
5	Розробка 3 розділу	12.04.2021	Виконано
6	Розробка 4 розділу	23.04.2021	Виконано
7	Оформлення кваліфікаційної роботи	21.05.2021	Виконано

Дата видачі завдання 15 лютого 2021 року

Студент _____ Цибульников Д.І.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____ доцент Єпішкін С.О.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 75 с., 55 рис., 1 додаток, 20 джерел.

ППРЧ, ХОПСЕТ, ЗАВАДОЗАХИЩЕНІСТЬ, РАДІОЕЛЕКТРОННА ЗАВАДА.

Об'єкт дослідження – завадозахищеність систем радіозв'язку.

Предмет дослідження – метод розширення спектру шляхом псевдовипадкової перебудови робочої частоти.

Мета роботи – підвищення завадозахищеності засобів радіозв'язку з псевдовипадковою перебудовою робочої частоти.

Метод досліджень – емпіричний аналіз, формалізація та порівняння, моделювання у середовищі Simulink.

Телекомунікації являє собою процес, фундаментальний засіб для досягнення різних цілей. Значення телекомунікацій у економічному світі неоцінимо: вони слугують для розповсюдження інформації серед постачальників, споживачів, дослідників, аналітиків, законодавців, регуляторів тощо.

Засоби військового радіозв'язку тактичної ланки керування досягли значного рівня завадо захищеності.

Основною метою роботи було дослідження методу розширення спектру шляхом псевдовипадкової перебудови робочої частоти.

Було проведено розрахунки завадостійкості систем радіозв'язку з ППРЧ та частотною маніпуляцією при впливі різних типів навмисних завад. Побудовано графіки залежності ймовірності помилкового прийому від рівня сигналу радіоелектронної завади, співвідношення сигнал/завада, рівня перекриття корисного сигналу радіозавадою.

Також була побудована імітаційна модель системи зв'язку з ППРЧ, проведено аналіз її функціонування.

Запропоновано пристрій для підвищення завадозахищеності військових систем зв'язку з ППРЧ, проведено розрахунки його ефективності.

ABSTRACT

The report contains: 75 p., 55 fig., 1 application, 20 sources.

FHSS, HOPSET, INTERFERENCE IMMUNITY, ELECTRONIC INTERFERENCE.

A research object is the interference immunity of radio communication systems.

The subject of research is a method of frequency hopping spectrum spreading.

The purpose of the work is to increase the interference immunity of radio communication systems with frequency hopping spectrum spreading.

Research method – empirical analysis, formalization and comparison, modeling in Simulink.

Telecommunications is represent a way to achieve different goals. The importance of telecommunications in the economic world is invaluable: they serve to disseminate information among suppliers, consumers, researchers, analysts, legislators, regulators and more.

Tactical military radio communications have reached a significant level of security.

The main purpose of the work was studying of the method of spectrum expansion by frequency hopping spectrum spreading.

The interference immunity of radio communication systems with FHSS and frequency manipulation under the influence of different types of intentional interference was calculated. Graphs of the dependence of the probability of receiving with errors from the level of the electronic interference signal, the signal–noise ratio, the level of overlap of the useful signal by the radio interference are constructed.

A simulation model of the communication system with the FHSS was also built, and its functioning was analyzed.

Also, a device for increasing the noise immunity of military communication systems with FHSS has been proposed, and its efficiency has been calculated.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.....	8
Вступ.....	9
1 Класифікація та аналіз радіозавад.....	11
1.1 Загальна класифікація радіоелектронних завад.....	11
1.2 Радіоелектронні завади системам зв'язку з ППРЧ.....	17
2 Методи розширення спектру.....	18
2.1 Математичні основи розширення спектру.....	18
2.2 Розширення спектру методом прямої послідовності (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS).....	20
2.3 Розширення спектру методом псевдовипадкової перебудови робочої частоти (Frequency-Hopping Spread Spectrum, FHSS).....	22
2.4 Багатовимірні сигнали, багатовимірною частотною ортогональною модуляцією (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing).....	26
2.5 Широкопasmові сигнали з лінійною зміною частоти.....	30
2.6 Надширокопasmові сигнали (Ultra Wide Band).....	31
2.7 Висновки.....	32
3 Аналіз завадостійкості системи радіозв'язку з ппрч.....	33
3.1 Розрахунок загальної завадостійкості системи радіозв'язку з ППРЧ.....	34
3.2 Розрахунок середньої ймовірності помилки для ЗРЗ з частотною модуляцією та ППРЧ при впливі шумової завади у частині полоси.....	37
3.3 Розрахунок середньої ймовірності помилки для ЗРЗ з частотною модуляцією та ППРЧ при впливі шумової завади у відповідь.....	39
3.4 Розрахунок середньої ймовірності помилки для ЗРЗ з частотною модуляцією та ППРЧ при впливі гармонічних радіозавад.....	43
4 Побудова математичної моделі системи зв'язку з використанням псевдовипадкової перебудови робочої частоти.....	48
4.1 Побудова ідеальної математичної моделі системи	

зв'язку.....	48
4.2 Побудова математичної моделі системи зв'язку з ППРЧ.....	51
4.3 Дослідження впливу співвідношення сигнал/шум на значення BER для систем зв'язку з ППРЧ.....	54
4.4 Дослідження впливу різних радіоелектронних завад на значення BER для систем зв'язку з ППРЧ.....	57
5 Пристрій для аналізу та пошуку оптимальних параметрів каналів радіозв'язку.....	65
5.1 Опис загальних принципів функціонування.....	65
5.2 Розрахунок теоретичної ефективності запропонованого рішення.....	68
Висновки.....	72
Перелік джерел посилань.....	74
Додаток А	76

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ,
ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ

ЗРЗ – засіб радіозв'язку

ППРЧ – псевдовипадкова перебудова робочої частоти

РЕБ – радіоелектронна боротьба

РС – радіостанція.

BER – bit error ratio

FHSS – Frequency Hopping Spectrum Spreading

SDR – Software-defined radio

ВСТУП

Телекомунікації являє собою процес, фундаментальний засіб для досягнення різних цілей. Значення телекомунікацій у економічному світі неоцінимо: вони слугують для розповсюдження інформації серед постачальників, споживачів, дослідників, аналітиків, законодавців, регуляторів тощо. Телекомунікації присутні у всіх процесах економічного виробництва і є невід'ємною складовою практично будь-якої сучасної бізнес-діяльності, метою якої є продукування товарів та послуг для споживачів. У повсякденному житті телекомунікації є засобом для інформування, розваг та обміну досвідом. Телекомунікаційні мережі та послуги дозволяють здійснювати всі ці дії на великих відстанях та серед широкого кола користувачів. У огляді на сучасні події у світі, а особливо у нашій країні неможливо упустити з уваги засоби військового зв'язку.

Засоби військового радіозв'язку тактичної ланки керування досягли значного рівня завадозахищеності для виконання своєї першочергової задачі: – забезпечувати надійний та достовірний зв'язок в умовах активної протидії противником.

Таким чином, захист радіоліній зв'язку від придушення є одним з головних завдань як при розробці систем зв'язку, так і при побудові мережі зв'язку.

Метою цієї роботи є всебічне дослідження методу псевдовипадкової перебудови робочої частоти.

У першому розділі атестаційної роботи проведено аналіз основних типів навмисних активних перешкод.

Другий розділ присвячено аналізу методів розширення спектру. Описано загальний принцип, математичні аспекти розширення спектру. Розглянуті технології Orthogonal Frequency–Division Multiplexing, Frequency–Hopping Spread Spectrum та Ultra Wide Band.

Третій розділ присвячено аналізу завадозахищеності методу ППРЧ. Особлива увага при аналізі звертається на M–ічну частотну модуляцію.

Четвертий розділ присвячено опису математичної моделі ЗРЗ з ППРЧ, побудованої в середовищі Simulink. Також у цьому розділі проводиться аналіз впливу різних типів перешкод на побудовану імітаційну модель.

П'ятий розділ описує схему та принцип роботи запропонованого пристрою, мета якого забезпечити завадостійкість військових засобів радіозв'язку, що використовують технологію ППРЧ.

1 КЛАСИФІКАЦІЯ ТА АНАЛІЗ РАДІОЗАВАД

1.1 Загальна класифікація радіоелектронних завад

Радіоелектронною завадою називають електромагнітне випромінювання, яке призводить до ускладнення або унеможливлення прийом корисного радіосигналу. Вони можуть утворюватись як навмисно та і не навмисно.

Далі проведено класифікацію саме навмисних радіозавад.

Радіозавади розрізняють по їх впливу на результуючий сигнал. А саме на адитивні та мультиплікативні завади.

При впливі адитивної завади результуючий сигнал має вигляд:

$$f(x) = s(t) + \xi(t), \quad (1.1)$$

де: $s(t)$ – корисна інформація;

$\xi(t)$ – радіосигнал завади.

При впливі мультиплікативної завади результуючий сигнал має вигляд:

$$f(x) = s(t) \times \xi(t) \quad (1.2)$$

Приклади цих впливів наведені на рис.1.1, де інформаційний радіосигнал позначений 1, радіосигнал після впливу адитивної завади під номером 2. Вплив мультиплікативної завади демонструється під номером 3.

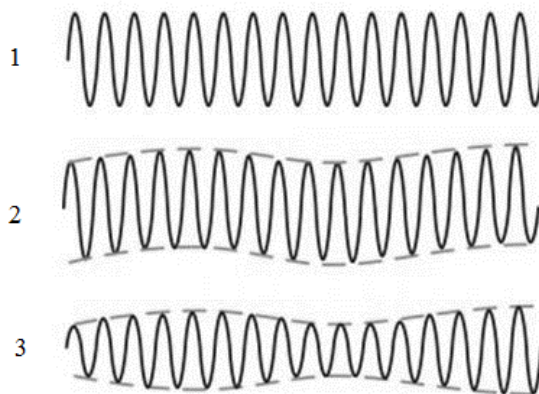


Рисунок 1.1 – Приклад впливу адитивної та мультиплікативної завади

Вплив навмисних радіозавад може призвести до таких наслідків, як перевантаження приймального пристрою, маскування чи спотворення корисного радіосигналу або його імітації. На кінцевий результат дії навмисних радіозавад впливають такі фактори:

- співвідношення сигнал/завада на вході радіоприймача, що піддається впливу завади;
- співвідношення ширини спектру корисного радіосигналу до сигналу радіозавади;
- особливості побудови засобу радіозв'язку, параметри його роботи (модуляція, частота роботи, потужність передавача та чутливість приймача) та структури корисного сигналу(використання кодування, методи розширення спектру);
- параметри самих радіозавад.

Класифікація навмисних радіозавад доволі широка, може ділитись по багатьом параметрам. Стисла класифікація наведена на рис. 1.2.

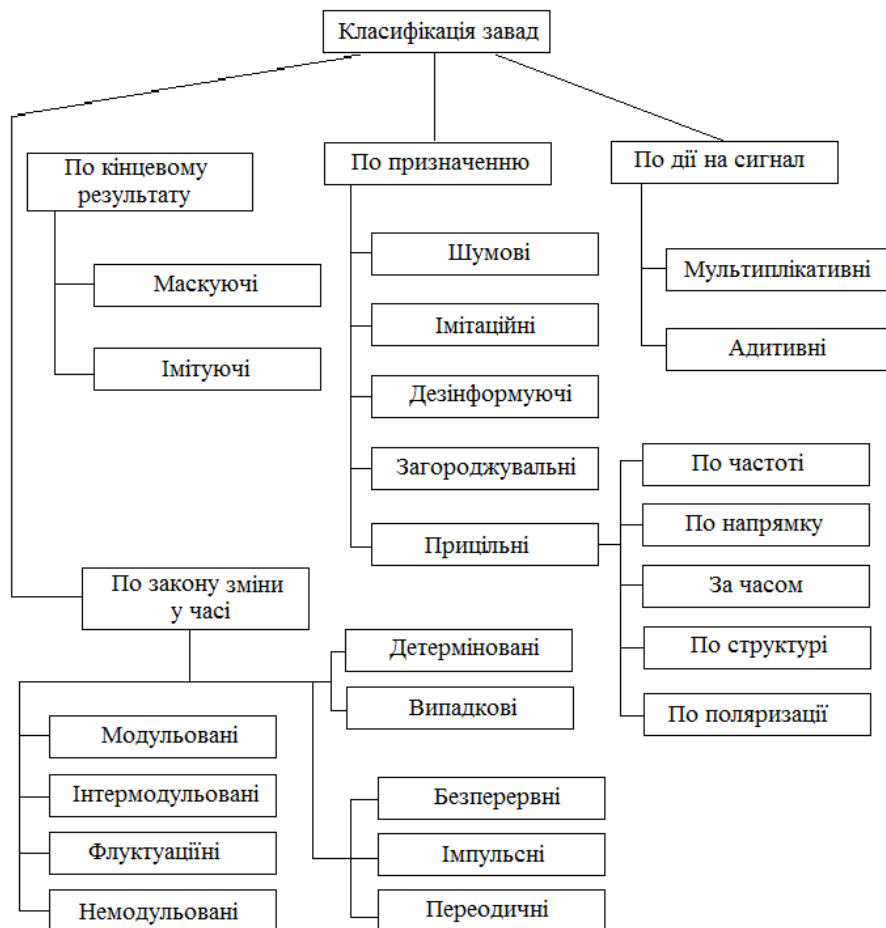


Рисунок 1.2 – Загальна класифікація навмисних активних радіозавад

За параметрами більш детально радіозавади класифікуються за:

- джерелом походження. Розрізняють завади які з'явилися у наслідку природних явищ та штучні – утворені пристроями, що випромінюють енергію електромагнітних хвиль;
- виду випромінюваної енергії. Існують електромагнітні, оптичні та акустичні завади;
- співвідношенню спектрів. Завади, чий спектр значно перевищує спектр корисного сигналу називають загороджувальними. Прицільними називають такі завади, чий спектр порівняний с спектром корисного сигналу, а частота змінюється у діапазоні роботи ЗРЗ;
- структурою випромінювання. Розрізняють імпульсні завади, що являють собою серії модульованих або не модульованих радіоімпульсів, та безперервні, які можуть бути промодульовані по частоті, фазі чи амплітуді;
- характером впливу на ЗРЗ. Розрізняють маскуючі, що ускладнюють виявлення та розпізнавання параметрів прийнятого корисного радіосигналу. Іншим видом є імітуючі радіозавади, мета яких створити помилкові (не вірні) радіосигнали на вході приймача;
- потужності. Слабкі радіозавади, чий рівень не перевищує рівень корисного сигналу та викликає втрату не більше ніж 25% корисної інформації. Середні радіозавади по рівню потужності можна порівняти з рівнем корисного сигналу, вони можуть викликати втрату не менше 50% корисної інформації. Сильні радіозавади по рівню потужності значно перевищують корисний сигнал, можуть привести до повної втрати корисної інформації. В окремих випадках можуть перевищувати динамічний діапазон радіоприймального пристрою.

Пасивні радіоелектронні завади створюються завдяки відбиттю (розсіюванню) електромагнітного випромінювання, що надходить від інших радіоелектронних пристроїв. Це випромінювання може надходити завдяки відбиттю від штучних об'єктів, таких як дипольні та кутові відбивачі, лінзи Люнеберка, аерозолі, тощо. Зазвичай, результуючий сигнал утворений відбиттям є сумою елементарних сигналів з випадковими параметрами амплітуди, частоти і фази.

Активні радіоелектронні завади створюються з використанням спеціальних пристроїв – генераторів завад чи станцій постановки завад. Параметри сигналу завади визначаються призначенням, структурою цих генераторів перешкод.

Далі проведено опис основних видів активних радіоперешкод.

Найбільш універсальною за сферами використання є загороджувальна шумова завада, що являє собою білий гаусівський шум з певною спектральною щільністю потужності у обмеженій полосі частот. Як виходить з назви, полоса частот завади перекриває діапазон роботи засобу радіозв'язку. Спектральну щільність потужності можна визначити за формулою (1.3):

$$G_z = \frac{P_z}{\Delta f_c} \quad (1.3)$$

де: P_z – потужність радіозавади;

Δf_c – ширина спектру радіозавади.

Найбільш ефективно загороджувальна радіозавада діє у випадках, коли рівень потужності радіозасобу, що подавлюється нижче або дорівнює рівню самої завади, але такі випадки рідкі. Рис. 1.3 демонструє ситуацію, де спектр корисного сигналу перекритий завадою, але його рівень потужності значно вищий ніж рівень завади.

Світло-сірим показана завада, чорно-сірим корисний сигнал

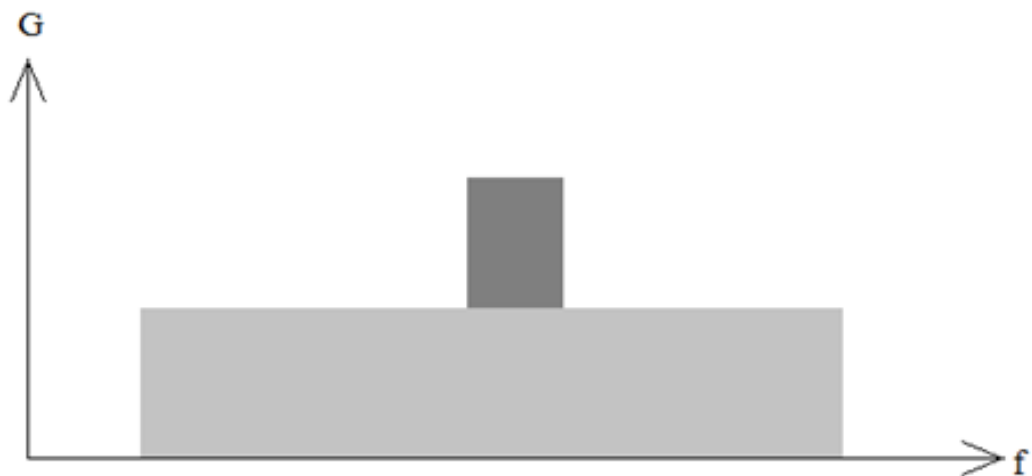


Рисунок 1.3 – Найбільш ефективний вплив загороджувальної завади

Різновидом загороджувальної шумової завади є шумова завада у частині смуги. Спектральна щільність потужності цієї завади може бути описана системою рівнянь.

Перше для завади у смугі $\gamma \Delta f_c$.

Друге відповідно $(1 - \gamma \Delta f_c)$.

$$G_z = \begin{cases} \frac{P_z}{\gamma \Delta f_c}, \\ 0 \end{cases} \quad (1.4)$$

де: γ – коефіцієнт, що характеризує частину спектру сигналу, на якій діє завада. Його значення лежить у діапазоні $0 \leq \gamma \leq 1$.



Рисунок 1.4 – Загороджувальна завада у частині смуги

Маскуючи радіозавади мають на меті ускладнення виявлення корисного сигналу (збільшення ймовірності помилкової тривоги) шляхом створення завадового фону на приймальній частині засобу зв'язку. На рівень завданого ускладнення впливають співвідношення частотних, часових та структурних параметрів корисного сигналу та радіозавади. У якості активних маскуючи радіозавад зазвичай використовуються безперервні шумові завади

Прицільні радіоперешкоди характеризуються тим, що їх спектр співвідносний чи повністю збігається зі спектром корисного сигналу ЗРЗ що подавлюється.

Імітуючи радіозавади мають на меті внести хибну інформацію на приймальній стороні ЗРЗ що подавлюється. Параметри такої завади зазвичай близькі до значень параметрів корисного сигналу, що імітується. В деяких випадках у якості сигналу, що імітує, може бути використана частина корисного сигналу, яка починає ретранслюватися станцією завад.

1.2 Радіоелектронні завади системам зв'язку з ППРЧ

Розглянемо окремо радіозавади, що використовуються для придушення ліній зв'язку з розширенням спектру.

Для придушення ліній зв'язку з використанням методів розширення спектру можуть використовуватись наступні види завад:

- шумова загороджувальна радіозавада;
- полігармонійна радіозавада;
- імітуюча (ретрансльована) радіозавада.

Полігармонійна (багатотональна) завада представляє з себе набір не модульованих гармонійних коливань, що розподілені по діапазону. Дана завада є найбільш ефективною проти ЗРЗ с ППРЧ. Спектральне представлення полігармонійної завади наведено на рис. 1.5.

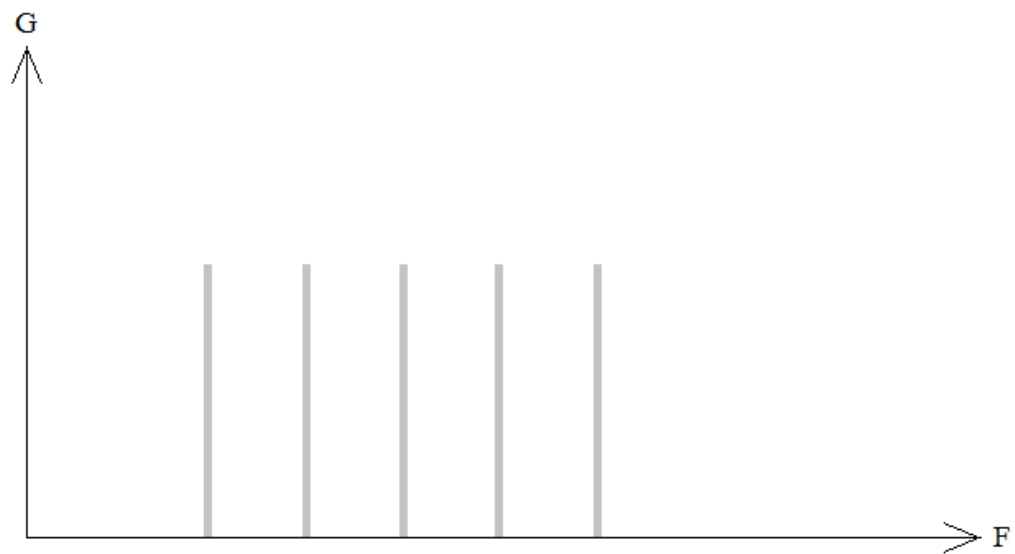


Рисунок 1.5 – Полігармонійна завада

Сигнал полігармонійної завади має вигляд:

$$S_z(t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{2P_z}{N}} \cos(\omega_{ji}t + \varphi_{ji}) \quad (1.5)$$

де: N – кількість не модульованих гармонічних коливань;

P_z –потужність радіозавади.

На ефективність полігармонійної радіозавади впливає співвідношення фаз корисного сигналу і завади. Для найбільш ефективного впливу також необхідне

точне визначення центральної частоти корисного сигналу та наведення радіозавади на нього.

Необхідна потужність на вході приймача ЗРЗ для його придушення визначається за формулою:

$$\frac{P_z}{N} = \frac{P_s}{\alpha}, \quad (1.6)$$

де: P_z – потужність радіозавади;

N – кількість не модульованих гармонічних коливань;

P_s – потужність корисного сигналу на вході приймача;

α – коефіцієнт розподілу потужності.

Після даного огляду стає зрозуміло, що у сучасному радіоелектронному конфлікті атакуюча сторона має великий арсенал засобів радіоелектронного впливу на системи зв'язку. Розуміння механізмів їх впливу є необхідним не тільки для конструювання та експлуатації сучасних засобів зв'язку.

2. МЕТОДИ РОЗШИРЕННЯ СПЕКТРУ

2.1 Математичні основи розширення спектру

Виконання завдання по забезпеченню надійного радіозв'язку в умовах впливу ненавмисних і організованих радіозавад а, також, забезпечення роботи засобів радіозв'язку у режимі багатостанційного доступу може бути вирішено завдяки використанню методів розширення спектру сигналу, що передається.

При розширенні спектру корисний сигнал займає полосу частот значно ширшу, порівняно з мінімально необхідною для передачі інформації.

Розширення відбувається завдяки використанню на передавальній та приймальній стороні спеціального коду, незалежного від початкової інформації, завдяки котрому проводиться модуляція та демодуляція інформаційного сигналу.

Спрощена схема типової системи зв'язку з розширенням спектру наведено на рис. 2.1:

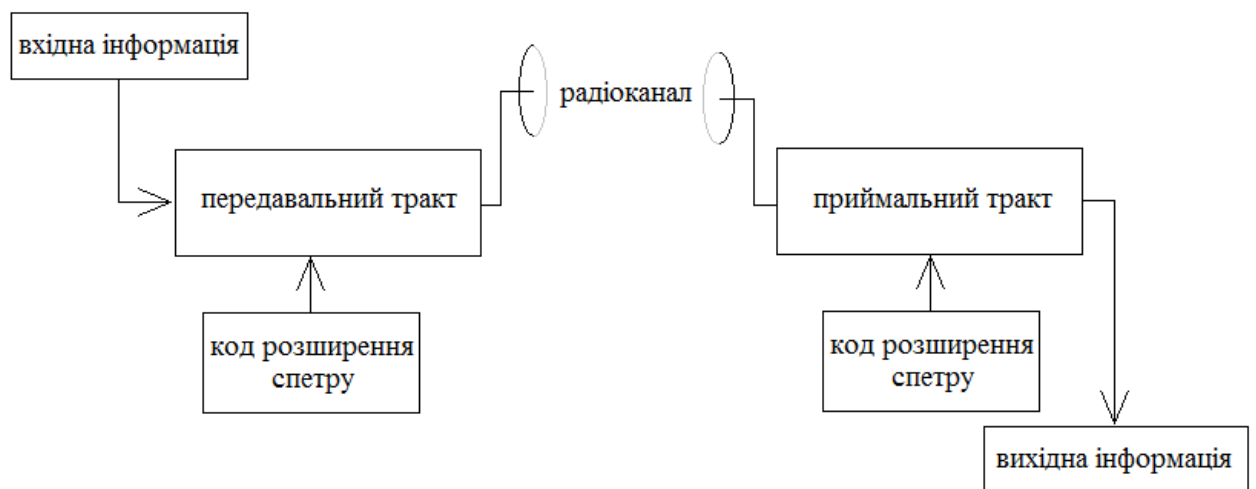


Рисунок 2.1 – Спрощена схема системи зв'язку з розширенням спектру

Підвищення заводозахищеності має цілий ряд переваг:

- підвищення енергетичної прихованості радіосигналу ЗРЗ;
- можливість ефективно протидіяти навмисним завадам;
- можливість забезпечення кодового розділення сигналів при багатостанційному доступі;
- вирішення проблеми багатопроменевого поширення радіосигналів.

Теоретично розширення спектру можливо обґрунтувати використовуючи теорему Шеннона і Хартлі про пропускну здатність каналу.

$$C = B \times \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right), \quad (2.1)$$

де C – пропускну здатність каналу в бітах в секунду (біт / с), яка являє собою максимальну швидкість передачі даних для теоретичної частоти помилок по бітам (BER);

B – задана полоса пропускання каналу зв'язку у Гц;

$\frac{S}{N}$ – є співвідношенням сигнал/шум.

Для більш складних та реалістичних умов (занижене співвідношенням сигнал/шум через вплив намисних чи ненамисних завад) існує теорема Шеннона для каналу з шумами з якої виходить, що можливо підвищити пропускну здатність каналу зв'язку (C) за рахунок збільшення заданої полоси пропускання (B).

$$\frac{C}{B} = (1 / \ln 2) \times \ln \left(1 + \frac{S}{N} \right) = 1,443 \times \ln \left(1 + \frac{S}{N} \right), \quad (2.2)$$

Використавши у формулі 2.2 число Нап'єра можливо отримати наступне:

$$\ln(1 + x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \dots + (-1)^{k+1} \frac{x^k}{k} + \dots \quad (2.3)$$

$$\frac{C}{B} = 1,443 \times \left(\frac{S}{N} - \frac{1}{2} \times \left(\frac{S}{N} \right)^2 + \frac{1}{3} \times \left(\frac{S}{N} \right)^3 - \dots \right) \quad (2.4)$$

Зважаючи на низьке співвідношення сигнал/шум у системах з розширенням спектру (теорема Шеннона не забороняє умову коли потужність сигналу нижче мінімального рівня шуму) можливо зробити припущення при якому $\frac{S}{N} \ll 1$ отримуємо:

$$\frac{C}{B} \approx 1,433 \times \frac{S}{N} \quad (2.5)$$

або:

$$\frac{C}{B} \approx \frac{S}{N} \quad (2.6)$$

$$\frac{N}{S} \approx \frac{B}{C} \quad (2.7)$$

З зазначених вище співвідношень виходить, що для забезпечення передачі інформації з мінімальною імовірністю помилки для заданого співвідношення сигнал/шум необхідно виконати розширення спектру сигналу – збільшити полосу пропускання радіосигналу.

Як було відмічено вище, усі існуючі методи розширення спектру основані на додаванні спеціального коду на приймальній та передавальній стороні каналу зв'язку. Інформація розповсюджується по більш великій полосі спектру, а на приймальній стороні знов стискається, тим самим, інформація відновлюється до початкової полоси. Від способу яким цей код вводиться до каналу зв'язку і залежить метод розширення спектру.

2.2. Розширення спектру методом прямої послідовності (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS)

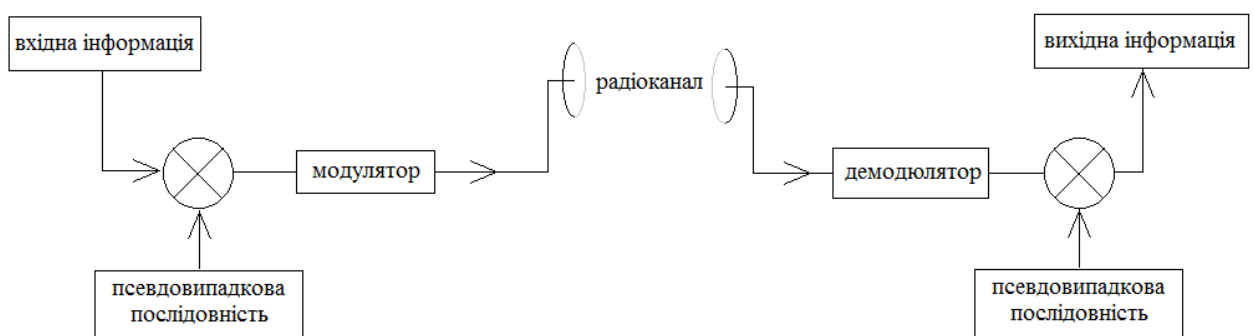


Рис 2.2 – Спрощена схема системи зв'язку з методом прямої послідовності

При методі розширення спектру методом прямої послідовності псевдовипадкова послідовність застосовується безпосередньо до інформації, що передається, перед модулятором. При цьому спектр сигналу починає займати значно більшу полосу пропуску ніж початкова інформація, також у спектрі зникають чітко виражені піки. Графічно це показано на рис. 2.3, де початковий сигнал зображено чорно-сірим піком, сигнал після процедури розширення спектру – чорним, а світло сірим показаний рівень сигналу у каналі зв'язку.

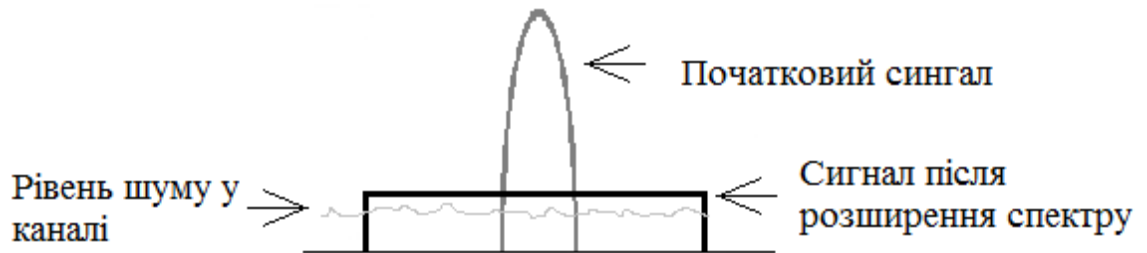


Рисунок 2.3 – Сигнали до та після розширення спектру методом прямої послідовності

Як виходить із вище описаного, через розширення спектру корисного сигналу цей метод розширення спектру забезпечує швидкий фазовий перехід даних. Залежність ширини полоси пропуску сигналу (B) від періоду сигналу (T).

$$R = \frac{1}{T} = 2B \quad (2.8)$$

Графічно це представлено нижче, початковий сигнал зображений товстою сірою лінією, а широкопосмуговий тонкою чорною.

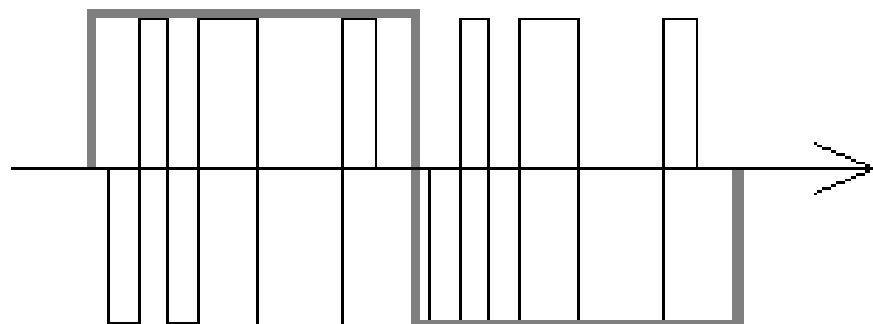


Рисунок 2.4 – Період імпульсів сигналів

До основних особливостей систем зв'язку з розширення спектру методом прямої послідовності можна віднести:

- через значний спектр сигналу при впливі вузькосмугової завади у кожний окремий проміжок часу сигнал завади впливає на окрему частину спектра загального сигналу. З цього випливає стійкість DSSS до вузько смугових завад;
- системи DSSS мають значно вищу стійкість до багатопроменевого розповсюдження між аналогічній без розширення спектру. Завдяки кореляційному прийому, (кожен окремий біт має свій код, отриманий завдяки помноженню на

псевдовипадкову послідовність) прийняті із запізненням сигнали будуть ідентифікуватися приймачем як сторонній;

- спрощення організації мереж зв'язку обумовлену можливістю роботи багатьох засобів зв'язку у одному частотному діапазоні.

2.3. Розширення спектру методом псевдовипадкової перебудови робочої частоти (Frequency–Hopping Spread Spectrum, FHSS)

Окремим видом розширення спектру є псевдовипадкова перебудова робочої частоти. При цьому методі розширення спектру відбувається завдяки швидкій (стрибкоподібній) перебудові несучої частоти передавача за псевдовипадковим законом у певному діапазоні частот.

Методи ППРЧ розділяють на 2 загальні класи:

- швидка псевдовипадкова перебудова робочої частоти (Fast Frequency Hopping – FFH);
- повільна псевдовипадкова перебудова робочої частоти (Slow Frequency Hopping – SFH).

При FFH несуча частота за період передачі 1 символу змінюється декілька разів. Проще кажучи, частота зміни частотних підканалів більша, ніж швидкість передачі даних у каналі радіозв'язку. Спрощена частотно – часова схема роботи FFH наведена на рис. 2.5, де сірим кольором позначається сингал бінарного нуля, чорним – бінарної одиниці.

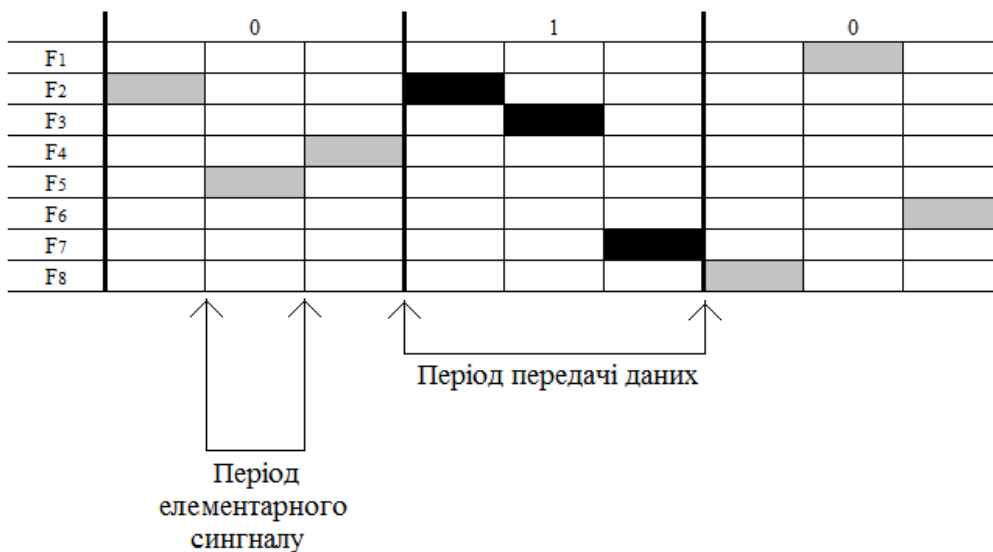


Рисунок 2.5 – Пояснення швидкої перебудови робочої частоти

Завдяки тому, що символ передається на декількох частотах послідовно його спотворення прицільною вузькосмуговою завадою може бути значно зменшено або відсутнє взагалі. Також швидке ППРЧ значно стійкіше до перешкоди «вдогін», коли вузькосмугова радіозавада починає випромінюватись на частоті корисного сигналу при його виявленні станцією радіозавад.

При повільній ППРЧ частота зміни частотних підканалів менша, ніж швидкість передачі даних у каналі радіозв'язку. На рис. 2.6 наведений приклад (позначення бінарних нуля та одиниці такі ж як і в рис 2.5).



Рисунок 2.6 – Пояснення повільної перебудови робочої частоти

Повільне ППРЧ має меншу завадостійкість порівняно зі швидким, але також воно значно простіше у реалізації.

Системи з швидким і повільним ППРЧ мають однаковий принцип реалізації

Вхідна інформація поступає на модулятор звідки надходить до одного з входів змішувача. На інший його вхід подаються високочастотні коливання, що отримуються від синтезатора частот. Після змішувача отримується радіосигнал, зі стрибкоподібною зміною частот. Послідовність частот залежить від генератора псевдовипадкової послідовності.

На приймальній стороні для отримання інформаційного сигналу процес проводиться у зворотному напрямку. Слід звернути увагу, що псевдовипадкова послідовність повинна бути однаковою як на передавальній так і на прийомній

стороні. Приклад структури системи зв'язку, що реалізує ППРЧ наведено на рис. 2.7.

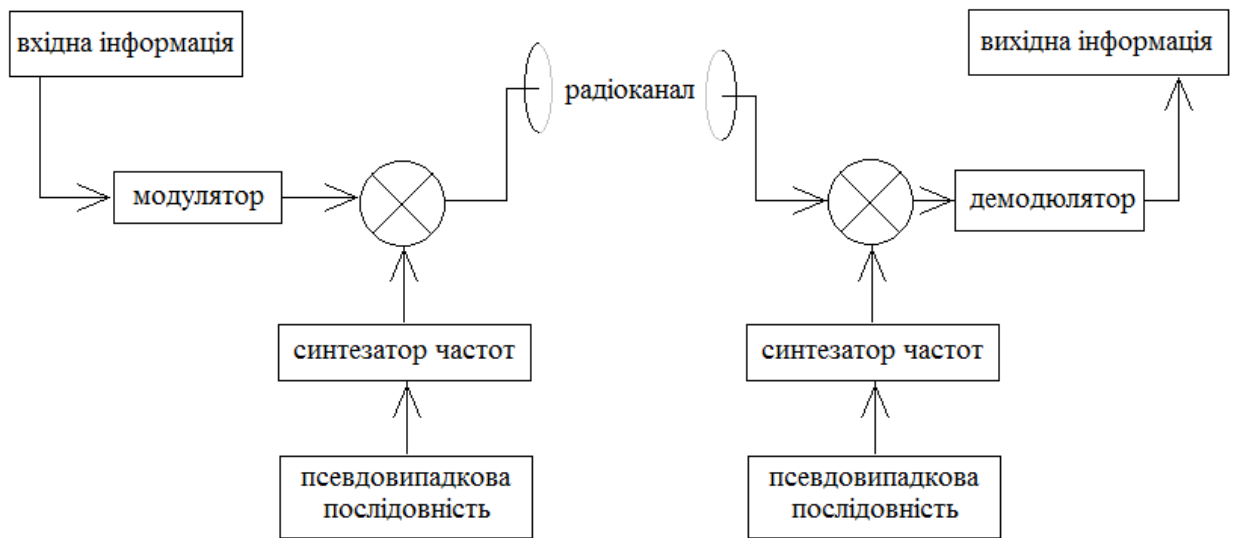


Рис 2.7 – спрощена схема системи зв'язку з ППРЧ

Математичне описання методу ППРЧ може бути представлено наступним чином:

Вихідний сигнал після розширення спектру можливо записати у вигляді:

$$s(t) = b(t) \cos[(\omega_0 + n\Delta\omega)t + \varphi_0], \quad (2.9)$$

де: $b(t)$ сигнал, отриманий на виході модулятора;

$\cos[(\omega_0 + n\Delta\omega)t + \varphi_0]$ є сигналом псевдовипадкової перебудови робочої частоти, отриманий після синтезатору частот;

$$n = 0, 1, 2, \dots, N-1,$$

$\Delta\omega$ відстань між частотами, що формулюються синтезатором частот;

$\Delta\omega = 2\pi/T$, T період між перебудовами частот;

φ_0 початкова фаза.

Прийнятий після проходження радіоканалу сигнал можна записати у вигляді:

$$y(t) = s(t) + n(t) + J(t), \quad (2.10)$$

де: $s(t)$ – переданий сигнал(з розширенням спектру);

$n(t)$ – завади(шуми);

$J(t)$ – інтерференція.

Для отримання вихідного сигналу прийнятий сигнал помножується на сигнал, отриманий з виходу синтезатора частот. Математично це можливо представити так:

$$\begin{aligned}
 b'(t) &= y(t)\cos[(\omega_0 + n\Delta\omega)t + \varphi_0] \\
 &= [s(t) + n(t) + J(t)]\cos[(\omega_0 + n\Delta\omega)t + \varphi_0] \\
 &= \frac{1}{2}b(t)[1 + \cos[2(\omega_0 + n\Delta\omega)t + 2\varphi_0]] + [n(t) + J(t)]\cos[(\omega_0 + n\Delta\omega)t + \varphi_0] \\
 &= \frac{1}{2}b(t) + \frac{1}{2}b(t)\cos[2(\omega_0 + n\Delta\omega)t + 2\varphi_0] + [n(t) + J(t)]\cos[(\omega_0 + n\Delta\omega)t + \varphi_0]
 \end{aligned}$$

Приклад сигналу з псевдовипадковою перебудовою частоти приведено на рис. 2.8

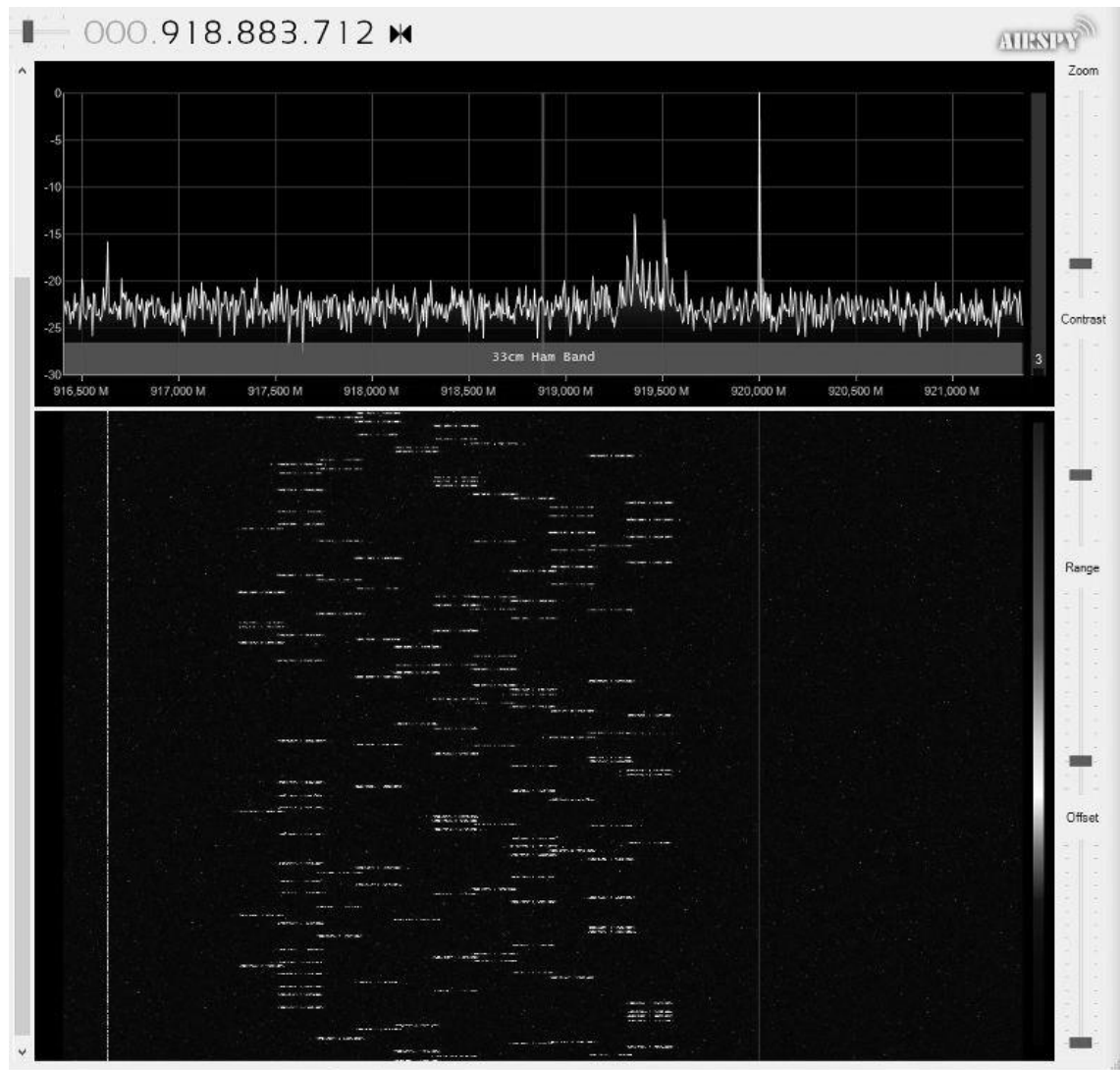


Рисунок 2.8 – Приклад сигналу з ППРЧ

На рис. 2.8 показаний запис, зроблений з використанням SDR приймача та програми SDRSharp. У верхній частині рисунку показане спектральне відображення сигналу. На нижній відображений «водоспад» – спектрально–часове відображення сигналу, при якому по осі X відображається часові інтервали, по осі Y – частота та інтенсивність сигналу показується зміною його забарвлення (біліший – потужніший).

2.4 Багатовимірні сигнали, багатовимірна частотна ортогональна модуляція(Orthogonal Frequency–Division Multiplexing, OFDM)

Багатовимірні сигнали являють собою набір з N паралельних цифрових сигналів, кожен з яких має свою швидкість передачі, отриманих шляхом поділу вихідного модульованого інформаційного сигналу. Загальна займана полоса отриманих N цифрових сигналів дорівнює полосі початкового модульованого інформаційного сигналу.

Часове представлення багатовимірного сигналу наведено на рис 2.9.

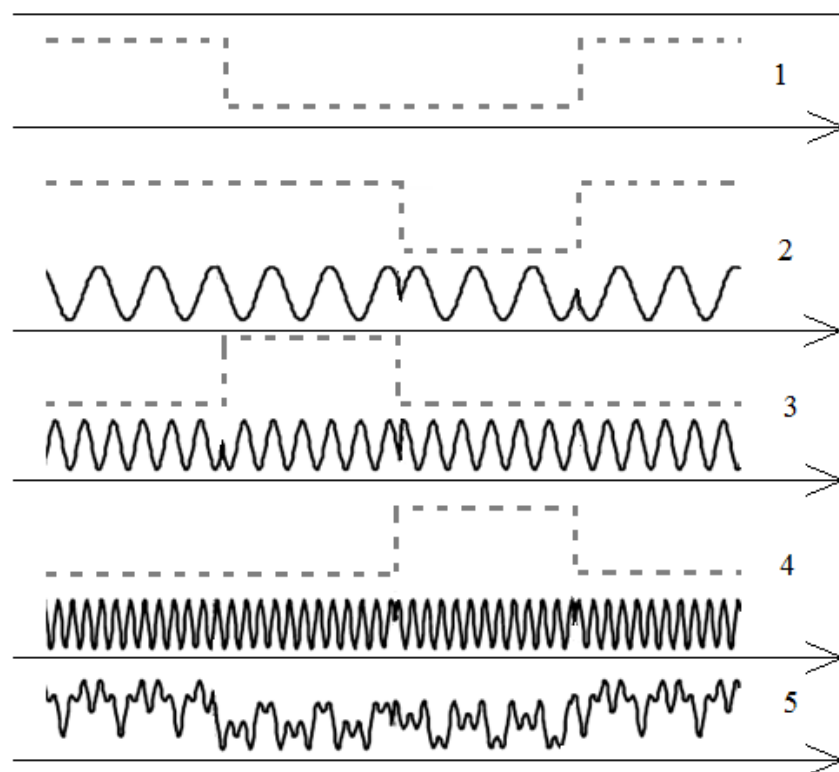


Рисунок 2.9 – Часове представлення багатовимірного сигналу

На рис. 2.9 інформаційний сигнал позначено сірою пунктирною лінією, промодульований – чорною. Під номерами 1 – 4 позначені сигнали відповідно 1 – 4 частотних каналів, під 5 номером – вихідний багатовимірний сигнал.

Бітова швидкість передачі для цих сигналів дорівнює:

$$D = \frac{R}{N}, \quad (2.11)$$

де: $R = \frac{1}{T_b}$ – швидкість передачі інформації початкового сигналу;

T_b – тривалість імпульсу.

У спектральному поданні багатовимірний радіосигнал представлений на рис. 2.10, де вихідний модульований радіосигнал позначений сірим, багатовимірний – чорним.

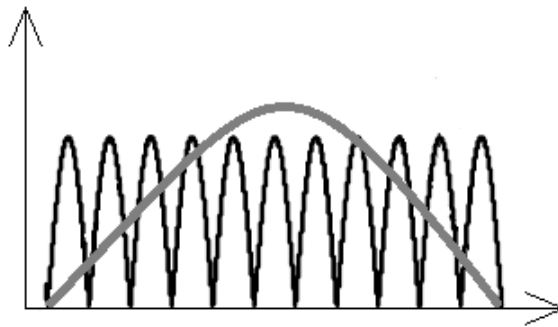


Рисунок 2.10 – Спектри багатовимірного та звичайного радіосигналів

Як результат, відбувається збільшення тривалості імпульсів для кожного з N низькошвидкісного цифрового сигналу (підсигналу) при незмінних бітовій швидкості передачі (R) та займаній полосі спектру. Це дає значне зменшення впливу багатопробеневого розповсюдження радіосигналів та, відповідно, збільшення якості зв'язку.

Окремим випадком багатовимірних сигналів є багатовимірна частотна ортогональна модуляція – OFDM. Дана модуляція передає данні з використанням великої кількості ортогональних(перпендикулярних) несучих частот розташованих у певному діапазоні частот. Використання ортогональних несучих дозволяє їх формування без внутрішньої межсимвольної інтенференції. Математично сигнали несучих можливо записати в вигляді формули:

$$S_n(t) = U_0 \cos \left[2\pi \times \left(f_0 + \frac{n}{T_s} \right) t \right], \quad (2.12)$$

де: f_0 – початок частотного інтервалу де проходить частотне ущільнення;

n – номер несучої частоти;

T_s – час, необхідний для передачі одного символу.

Для додаткового захисту від межсимвольних викривлень використовується захисний інтервал між кожним переданим інформаційним символом, у якому передається фрагмент корисного сигналу. Це дає змогу зберегти ортогональність несучих частот.

Схема, що пояснює принцип формування багатовимірної OFDM сигналу показана на рис.2.11.

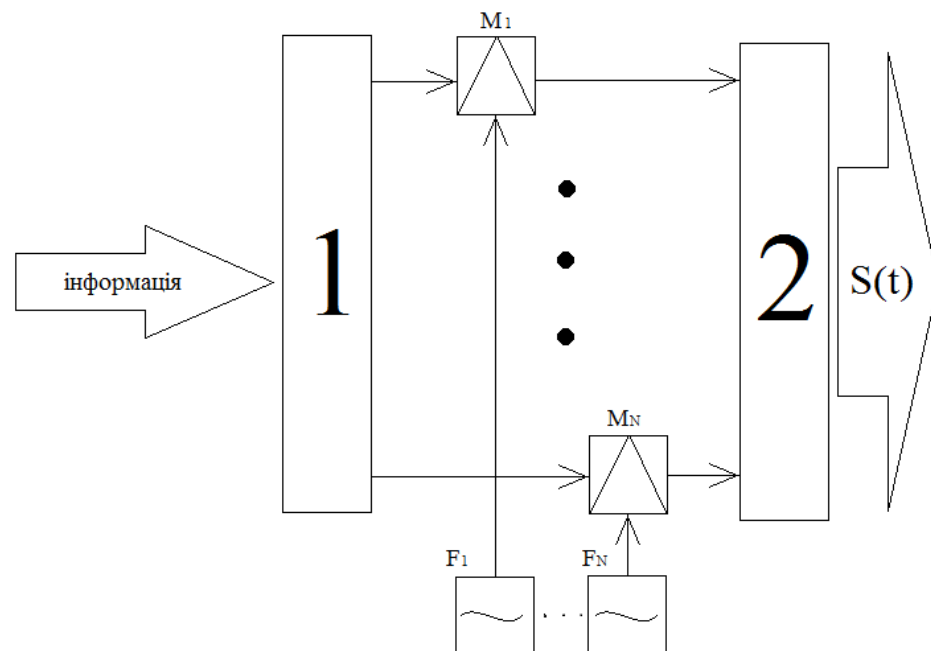


Рисунок 2.11 – Спрощена структурна схема пристрою формування OFDM

Інформація надходить на вхід блоку розпаралелювання потоків позначеного номером 1, який проводить розділ вхідного потоку інформації на декілька паралельних потоків. Їх кількість дорівнює кількості частотних каналів. Кожний потік поступає на окремий модулятор (на схемі позначені M), де проводиться модуляція однієї з ортогональних несучих. Радіосигнал, що модулює надходить від генератора частоти позначеного на малюнку $F_1 \dots F_N$. У якості модуляцій можуть використовуватися DBPSK, QPSK або QAM.

Останнім кроком є сумування усіх частотних каналів на суматорі (позначений на рис.2.11 цифрою 2).

Системи зв'язку з використанням OFDM модульованого сигналу побудовані з використанням швидкого перетворення Фур'є. На передавальній стороні зворотне швидке перетворення Фур'є (ЗШПФ на схемі) проводить перемноження потоків, отриманих від перетворювача послідовного потоку у паралельний, на гармонійні коливання різних частот та їх сумування. Для подальшої передачі використовується блок цифро–аналогового перетворення. На приймальній стороні проводиться аналого–цифрове перетворення та проводиться швидке перетворення Фур'є (ШПФ).

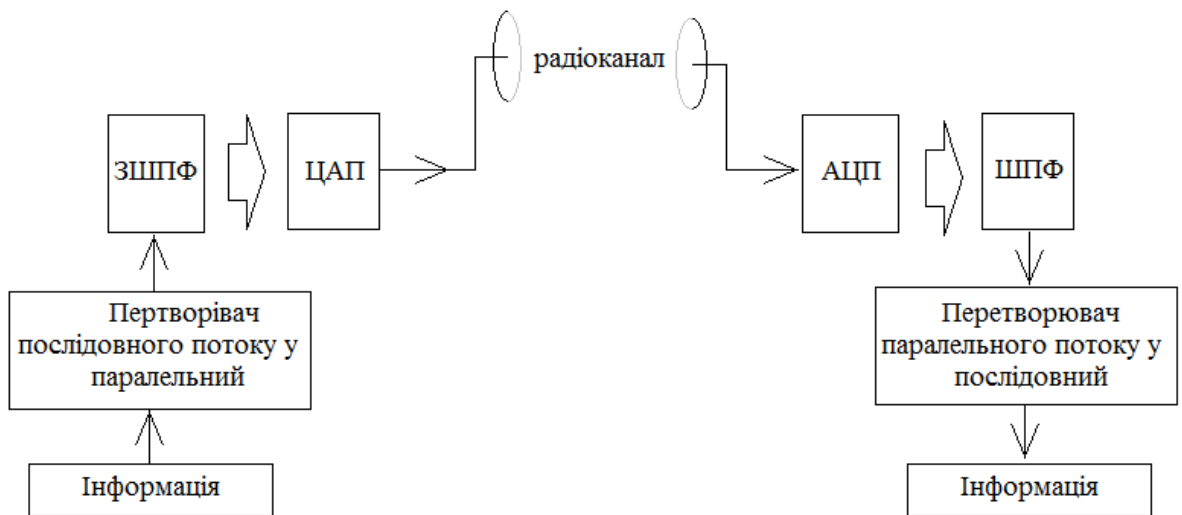


Рисунок 2.12 – Спрощена структурна схема системи зв'язку з OFDM

Зазвичай, описану вище схему реалізують на програмованих логічних інтегральних схемах та використовують при кількості несучих частот у сотні чи тисячі.

Основними перевагами OFDM є:

- використання ортогональних несучих дозволяє протидіяти межсимвольній інтерференції та вузькосмуговим завадам;
- простота реалізації з використанням цифрової обробки сигналів;
- можливість використання різних методів модуляції для різних піднесучих частот дає можливість гнучкої адаптації до необхідних вимог якості зв'язку.

До недоліків можна записати чутливість до ефекту Доплера та високі вимоги до системи синхронізації як по часу так і по частоті.

2.5 Широкопasmові сигнали з лінійною зміною частоти

Даний тип розширення спектру характеризується лінійною зміною частоти девіації (різниці між максимальною та мінімальною миттєвою частотами) впродовж символного інтервалу, при цьому величина розширення спектру не залежить від переданої інформації. Математично ця зміна частоти має вигляд:

$$f(t) = f_0 + b \times t, \quad -\frac{T_c}{2} \leq t \leq \frac{T_c}{2}, \quad (2.13)$$

де: $f_0 = (F_{\max} + F_{\min})/2$ – центральна частота спектру сигналу;

$b = (F_{\max} - F_{\min})/T_c$;

T_c – тривалість сигналу;

F_{\max}, F_{\min} – максимальне та мінімальне значення частоти спектру радіосигналу.

Загальний вигляд сигналу ЛЧМ сигналу можна описати так:

$$S(t) = S_0 \cos\{\varphi_0 + \varphi(t)\} = S_0 \cos\left\{\varphi_0 + 2\pi\left(f_0 t + \frac{b}{2} t^2\right)\right\}, \quad (2.14)$$

де: S_0 – амплітуда сигналу;

φ_0 – початкова фаза сигналу.

Приклад модуляції ЛЧМ сигналом приведений на рисунку 2.13.

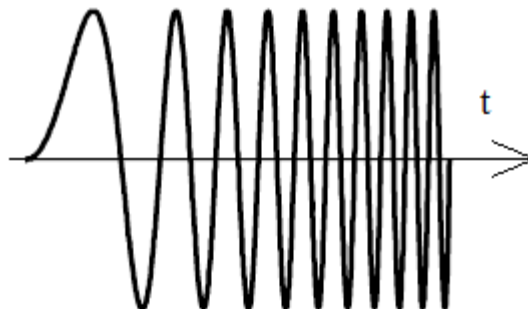


Рисунок 2.13 – Відображення радіосигналу з ЛЧМ у часовій формі

Формування таких радіосигналів зазвичай проводиться завдяки використанню широкопasmових автогенераторів або генераторів, керованих напругою. Як виходить із назви, на вхід керування поступає сигнал з змінною

амплітудою, яка зменшується чи збільшується. Вихідна частота цих генераторів лінійно змінюється відносно середнього значення частоти

2.6 Надширокосмугові сигнали (Ultra Wide Band)

При використанні широкосмугових сигналів поліпшення параметрів якості радіозв'язку пропорційно відношенню спектру широкополосного сигналу до спектру частоти вихідного інформаційного сигналу. На даний час найбільший цей показник у надширокосмугових сигналів і може становити до кількох сотень. Технології надширокосмугових сигналів зазвичай використовуються для систем радіозв'язку з малим радіусом дії та низьких рівнях сигналу. Надширокосмуговими прийнято називати сигнали, чия полоса пропускання більша ніж 500 МГц, або відносна полоса пропускання більша 20%.

Для передачі інформації при використанні UWB зазвичай використовуються позиційно-часові модуляції, при яких для передачі бінарної одиниці використовується випередження імпульсу надширокополосного сигналу відносно деякого синхронізованого положення. Бінарний нуль передається шляхом затримки надширокополосного сигналу.

Також прикладом використання є стандарт IEEE 802.15.4a де для розширення спектру використовується лінійна частотна внутріімпульсна модуляція.

У якості приклада можливо привести сигнал «Манчестер». Спектральна потужність такого сигналу розраховується за формулою:

$$P(f) = T \frac{\sin^2\left(\frac{\pi f T_s}{2}\right)}{\frac{\pi f T_s}{2}} \quad (2.15)$$

Через надвелику ширину спектру значно змінюються умови розповсюдження радіохвиль, з цього випливає головна перевага цих сигналів: надвисока стійкість до проблем багатопроменевого розповсюдження. Також, через великий спектр майже неможливо ефективно спотворити корисний радіосигнал. Це є причиною стійкості надширокосмугових сигналів до навмисних та не навмисних радіозавад.

До недоліків відносяться складність технічної реалізації зумовленої необхідністю високошвидкісної синхронізації між приймачем та передавачем.

Значну проблему становить електромагнітна сумісність з іншими системами радіозв'язку, для яких сигнал UWB стає сторонньою завадою.

2.7 Висновки

Технології розширення спектру знайшли своє використання у багатьох сферах не тільки у галузі телекомунікації. Методи розширення спектру активно використовуються у стандартах зв'язку 3G, W-LAN (IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11g) , Bluetooth а, також, системах глобального позиціонування(GPS).

Математичні основи розширення спектру дозволяють ефективно та швидко проводити обробку сигналів на основі сучасних програмно-апаратних комплексів. Прикладом таких комплексів може виступати програмована логічна інтегральна схема.

3. АНАЛІЗ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ СИСТЕМИ РАДІОЗВ'ЯЗКУ З ППРЧ

Під завадозахищеністю розуміють можливість ЗРЗ функціонувати з забезпеченням заданих параметрів якості зв'язку при впливі навмисних та ненавмисних радіозавад.

Для розуміння факторів, які впливають на завадозахищеність засобів радіозв'язку розглянемо загальні принципи роботи сучасної станції РЕБ засобам радіозв'язку.

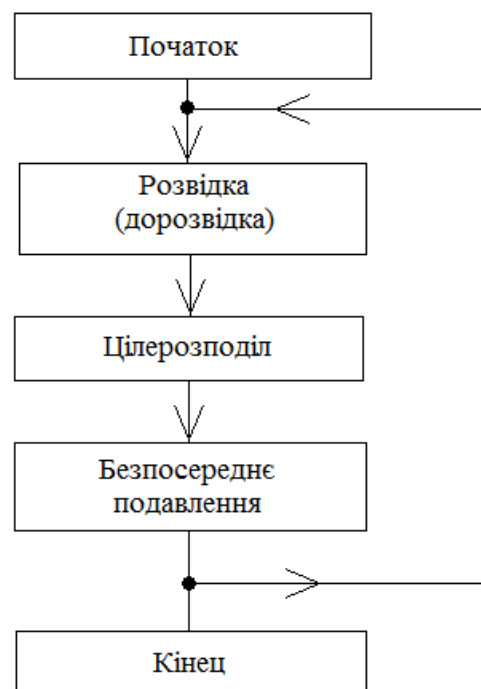


Рисунок 3.1 – Спрощений алгоритм роботи станції завад

Першим кроком при початку придушення будь-яких ліній радіозв'язку є їх пошук та визначення характеристик – розвідка. Проводиться дискретизація та класифікація виявлених сигналів за їх параметрами: напрямком приходу радіосигналу, частотно-часовими і амплітудними характеристиками тощо.

Наступним етапом є обрання пріоритетних для придушення радіочастот (Цілерозподіл). Це необхідно з 2 причин:

- енергетичний ресурс станції завад обмежен, кількість частот, що придушуються одночасно обмежена кількістю передавачів станції завади;
- необхідність виключення впливу на дружні засоби зв'язку.

Безпосереднє подавлення. При роботі станції РЕБ на випромінювання завод розвідка (дорозвідка) нових джерел не проводиться. У цей час виконується робота по цілерозподілу – вибору з раніше обраних частот групи для обробки у наступному циклі безпосереднього подавлення.

Контроль результатів. Виконується завдяки дорозвідці для контролю чи не змінили лінії зв'язку, що подавляються своїх частотних параметрів з метою «піти» від завади.

Виходячи з вищеописаного можна зробити 2 висновки:

- для ефективного придушення ЗРЗ с ППРЧ станція завод повинна мати достатню швидкість реакції для виявлення та придушення лінії зв'язку;
- для системи радіозв'язку с ППРЧ критичним при протидії сучасним засобам РЕБ є частота зміни частотних каналів (хопсетів).

Також на результат протидії цих 2 систем впливають і інші фактори, наприклад параметри самих системи РЕБ та ЗРЗ, відстані між ними, умови розповсюдження радіохвиль, тощо.

3.1 Розрахунок загальної заводостійкості системи радіозв'язку з ППРЧ

Для визначення оцінки рівня заводозахищеності використовується ймовірність прийому одного інформаційного біта з помилкою – P_{er} .

Ймовірність помилкового прийому визначається за формулою:

$$P_{er} = p \times P_b' + (1 - p)P_b'' \quad (3.1)$$

де: P_b' – ймовірність помилкового прийому інформаційного символу з потужність сигналу P_c та впливі радіозавади та шуму з рівнями потужності P_z та P_n відповідно;

P_b'' – ймовірність помилкового прийому інформаційного при відсутності радіозавади;

$p = \frac{k}{N}$ – ймовірність враження частотного каналу радіозавадою;

У свою чергу, N – загальна кількість частотних каналів, k – кількість частотних каналів, на які впливає радіозавада.

Розберемо цю формулу більш детально.

Ймовірність помилкового прийому інформаційного біту при відсутності радіозавад для частотної маніпуляції (FSK) має вигляд:

$$P_b'' = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{h^2}{2}\right) \quad (3.2)$$

Параметр h^2 є нічим іншим, як співвідношенням сигнал/завада на інтервалі передачі 1 біту інформації. Маючи це на увазі, можливо привести формулу [3.2] до наступного вигляду:

$$P_b'' = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{P_c}{2N_0W_{dat}}\right), \quad (3.3)$$

де: W_{dat} – полоса пропуску фільтру на приймальній стороні, яка дорівнює швидкості передачі даних.

Проведемо побудову графіку залежності ймовірності помилкового прийому від співвідношення сигнал/шум. Текст програми для розрахунків та побудови графіків наведено у додатку А.

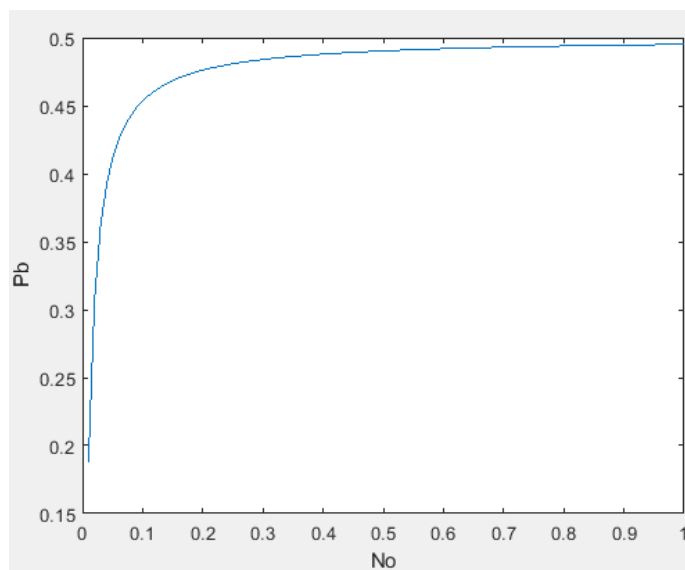


Рисунок 3.2 – Залежність ймовірності помилкового прийому від впливу шуму (N_0)

Для ймовірності помилкового прийому інформаційного символу при впливі радіозавади та шуму – P_b' використавши вище описане отримаємо:

$$P_b' = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{P_c}{2\left(\frac{P_j}{k} + N_0 W_{\text{dat}}\right)}\right) \quad (3.4)$$

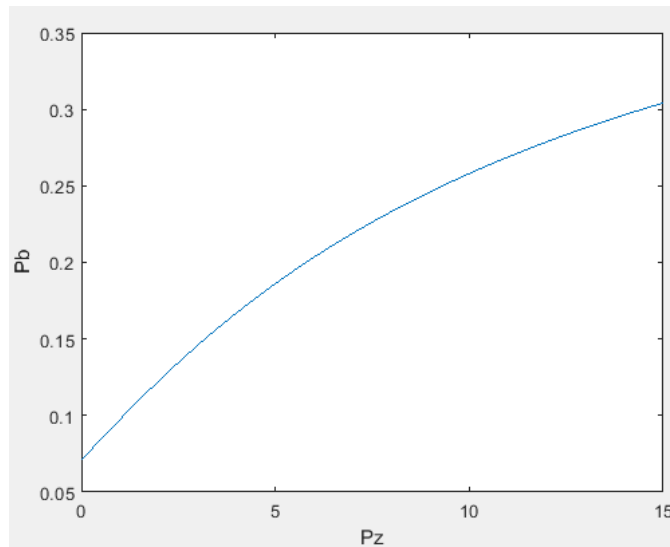


Рисунок 3.3 – Залежність ймовірності помилкового прийому від впливу радіозавади (P_j)

Використавши формули (3.3) та (3.4) для початкової формули (3.1) та отримуємо:

$$P_{\text{er}} = \frac{k}{2N} \exp\left(-\frac{P_c}{2\left(\frac{P_j}{k} + P_n\right)}\right) + \left(1 - \frac{k}{N}\right) \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{P_c}{2P_n}\right) \quad (3.5)$$

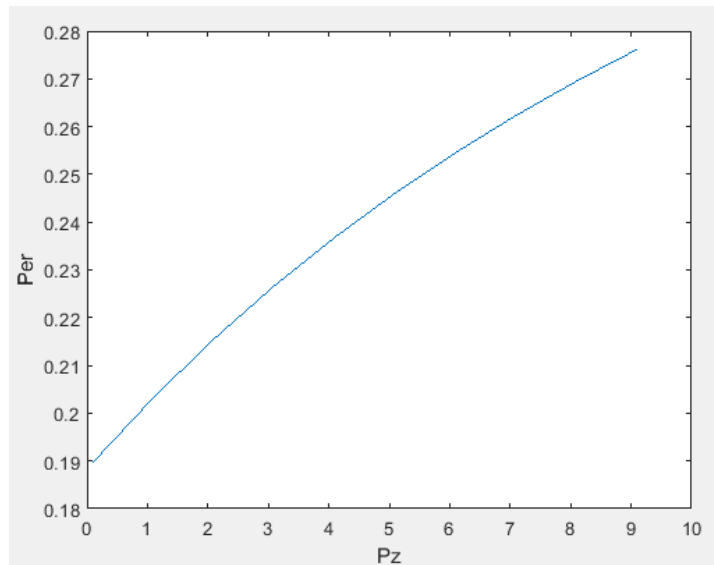


Рисунок 3.4 – Залежність ймовірності помилкового прийому від впливу шуму та радіозавади

3.2 Розрахунок середньої ймовірності помилки для ЗРЗ з частотною модуляцією та ППРЧ при впливі шумової завади у частині полоси

Для визначення оцінки рівня завадозахищеності системи зв'язку зазвичай використовується ймовірність прийому одного інформаційного біта з помилкою – P_{er} .

Для системи зв'язку з ЧМ при використанні ППРЧ розраховується по формулі 3.6.

$$P_{er} = \frac{1}{2} \gamma e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{G_0}{E_s} + \frac{P_j}{\gamma K_s P_s} \right)^{-1}} + \frac{1}{2} (1 - \gamma) e^{-\frac{E_s}{2G_0}}, \quad (3.6)$$

де: E_s – енергія сигналу (інформаційного біту);

G_0 – енергія шуму у каналі;

P_s – потужність корисного сигналу;

P_j – потужність радіозавади;

K_s – коефіцієнт підсилення в системі;

γ – коефіцієнт, що визначає перекриття полоси частот корисного сигналу та сигналу радіозавади.

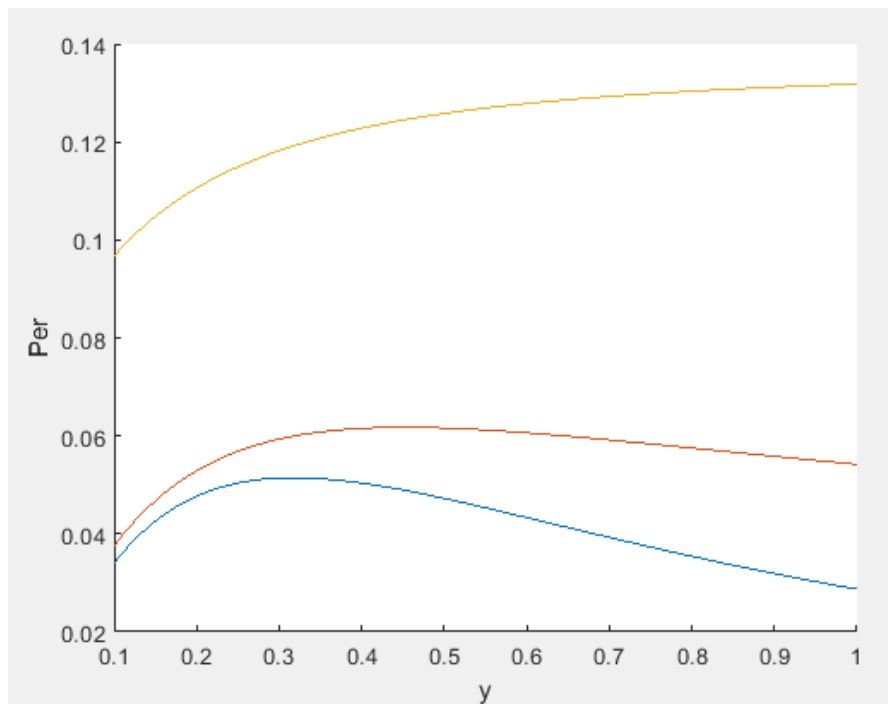


Рисунок 3.5 – Залежність ймовірності помилкового прийому від коефіцієнту γ при різних співвідношеннях сигнал/шум+завада

Проаналізувавши графік на рис 3.5 можна зробити висновок, що коефіцієнт γ має оптимальні значення для різних значень співвідношення сигнал/завада, при яких ймовірність помилкового прийому має максимальне значення.

Значення максимальної середньої ймовірності помилкового прийому можна знайти вирішивши рівняння $\delta P_E / \delta \gamma$ (при умові, що енергія сигналу значно більша ніж шуму).

$$P_E(\max) \approx \begin{cases} \frac{P_j e^{-1}}{K_s P_s}; \quad \frac{P_j}{K_s P_s} \leq 1 & \gamma = \gamma_{opt} \\ \frac{1}{2} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{P_j}{K_s P_s}\right)\right]; \quad \frac{P_j}{K_s P_s} > 1 & \lambda = 1 \end{cases} \quad (3.7)$$

Для загального випадку багатопозиційної частотної маніпуляції при впливі найбільш ефективної радіоелектронної завади середня ймовірність помилкового прийому дорівнює:

$$P_E(\max) = \begin{cases} \frac{\beta G_j}{E_s}; \quad \rho \leq \frac{E_s}{G_j}, \quad \gamma = \gamma_{opt} \\ \frac{M}{4} e^{-\frac{k E_s}{2 G_j}}; \quad \rho > \frac{E_s}{G_j}, \quad \gamma = 1 \end{cases}, \quad (3.8)$$

де: $M = 2^k$ ($k = 1, 2, 3, \dots$) кількість позицій ЧМ.

Також у формулі (3.3) $\frac{E_s}{G_j}$ є співвідношенням енергії корисного сигналу на біт до спектральної щільності потужності радіозавади, та розраховується за формулою:

$$\frac{E_s}{G_j} = \frac{P_s}{P_j} \frac{W_s}{R_b} = \frac{K_s P_s}{P_j}, \quad (3.9)$$

де: R_b швидкість передачі двійкових символів та дорівнює $\frac{1}{T_b}$.

При впливі шумової завади з рівномірно розподіленою спектральною потужністю на систему зв'язку з M -ічною ЧМ та ППРЧ розрахунок ймовірності проводиться за формулою:

$$P_E(\max) = \frac{1}{2(M-1)} \sum_{m=2}^M (-1)^m C_M^m \exp \left[-k \left(1 - \frac{1}{m} \right) \left(\frac{G_0}{E_s} + \frac{P_j}{K_s P_s} \right)^{-1} \right], \quad (3.10)$$

$$\text{де: } C_M^m = \frac{M!}{m!(M-m)!}.$$

Проаналізувавши результати розрахунків $P_E(\max)$ можна зробити наступні висновки:

- має місце лінійна залежність максимального значення середньої ймовірності помилкового для ЗРЗ з M -ічною ЧМ та ППРЧ при впливі найгіршої багатотональної радіозавади для значень цієї ймовірності $< \frac{1}{2}$;
- найгірші багатотональні радіозавади більш ефективні ніж найгірші шумові радіозавади;
- ефективність найгірших багатотональних радіозавад відносно найгірших шумових завад зменшується при $k = 1, M = 2$.

3.3 Розрахунок середньої ймовірності помилки для ЗРЗ з частотною модуляцією та ППРЧ при впливі шумової завади у відповідь

Шумові завади у відповідь є найбільш небезпечними для ЗРЗ с ППРЧ, при завадах у відповідь (удогін) станція перешкод починає випромінювати

радіозаваду у спектрі частотного каналу хопсету при його виявленні. При цьому частина корисної інформації радіосигналу неминуче буде спотворено.

Середня ймовірність помилкового прийому при впливі такої завади визначається за формулою:

$$P_{er} = \rho P_{E1} \left(\frac{E_s}{G_0 + G_j} \right) + (1 - \rho) P_{E0} \left(\frac{E_s}{G_0} \right), \quad (3.11)$$

де: P_{E1} – середня ймовірність помилкового прийому для ЗРС без ППРЧ при впливі радіозавади;

P_{E0} – середня ймовірність помилкового прийому для ЗРС без ППРЧ при впливі тільки шуму;

ρ – коефіцієнт, що характеризує частину частотного елемента з хопсету, яку вразила радіозавада.

Коефіцієнт ρ може приймати значення від 0 до 1, відповідно 1 свідчить про повне перекриття частотного елемента корисного сигналу радіозавадою. Приклад неповного перекриття наведено на рис 3.1, де корисний сигнал представлено прямокутником з контуром, сигнал завади – сірим прямокутником.

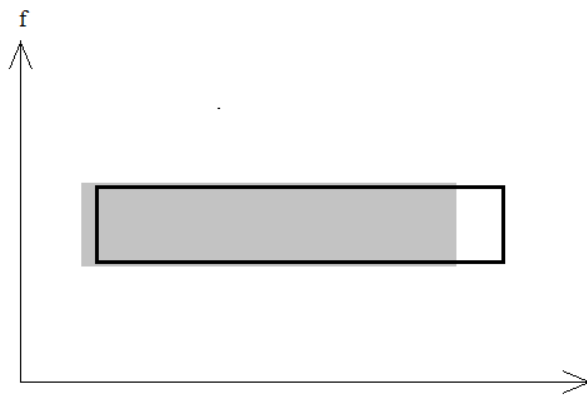


Рисунок 3.6 – Коефіцієнт ρ

Для двійкової частотної маніпуляції розраховуються окремо вірогідності P_E для основного та додаткового каналів демодулятора ЗРЗ.

Розрахунок вірогідності помилкового прийому для основного (3.12) та додаткового (3.4) каналів наведені нижче:

$$P_E(\text{main}) = \frac{1}{2+\beta} \exp \left[- \left(\frac{2G_0}{E_s} + \frac{P_j}{P_s} \right)^{-1} \right] \quad (3.12)$$

$$P_E(\text{second}) = \frac{1+\beta}{2+\beta} \exp \left[- \left(\frac{2G_0}{E_s} + \frac{P_j}{P_s} \right)^{-1} \right], \quad (3.13)$$

$$\text{де: } \beta = \frac{E_s P_j}{G_0 P_s}.$$

У випадку одночасного впливу завади на основний та додатковий канали ймовірність помилкового прийому має вигляд:

$$P_E(2) = \frac{1}{2} \exp \left[- \left(\frac{2G_0}{E_s} + \frac{P_j}{P_s} \right)^{-1} \right] \quad (3.14)$$

Графіки залежності ймовірності помилкового прийому від співвідношення сигнал/завада при впливі завади на різні канали демодулятора наведені на рис. 3.7–3.9.

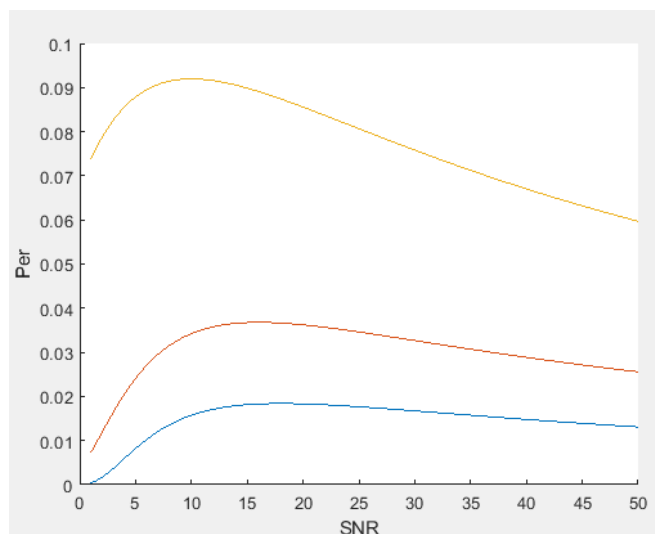


Рисунок 3.7 – Залежність ймовірності помилкового прийому при впливі завади на основний канал

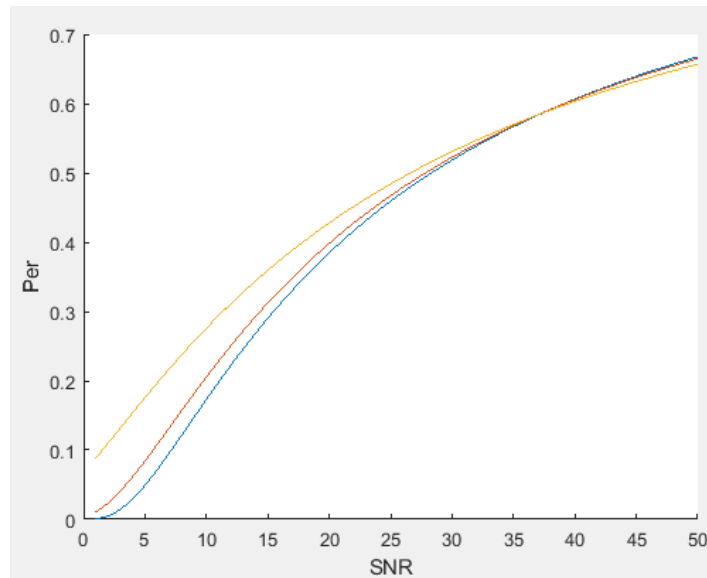


Рисунок 3.8 – Залежність ймовірності помилкового прийому при впливі завади на додатковий канал

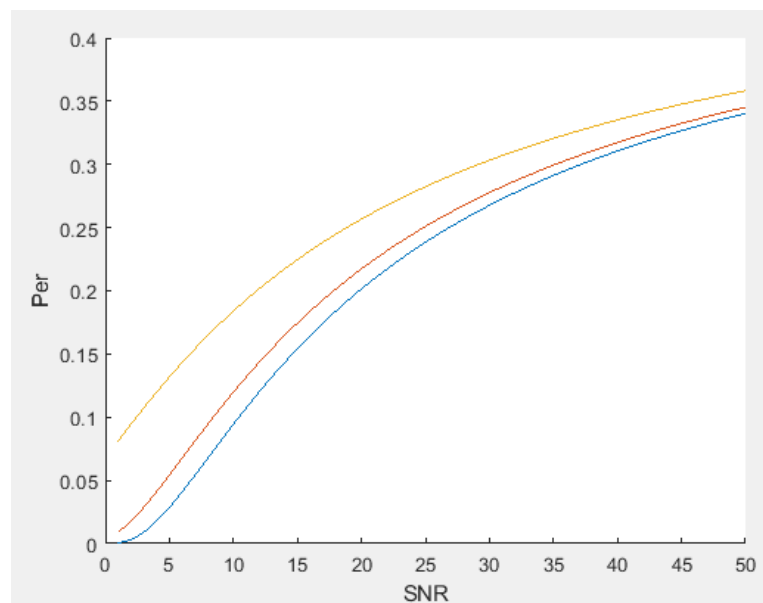


Рисунок 3.9 – Залежність ймовірності помилкового прийому при впливі завади на обидва канали

Для визначення максимальної ймовірності помилкового прийому для основного каналу прийому необхідно вирішити рівняння $dP_E/d(P_s/P_j)=0$ по відношенню до формули (3.3).

$$P_E(\text{main}) \approx \begin{cases} \frac{G_0}{E_s} e^{-1}; & P_j = P_s - 2\sigma_0^2 > 0 \\ \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{E_s}{2G_0}\right); & P_j = P_s - 2\sigma_0^2 \leq 0 \end{cases} \quad (3.15)$$

З цих розрахунків виходить, що шумова радіозавада найбільш ефективна у невеликій частині відносно $\frac{P_s}{P_j}$.

При $P_j \approx P_s$ найгірша шумова завада перестає ефективно впливати на корисний сигнал, у цих умовах станція завад вичерпує свої енергетичні можливості.

Шумова завада у відповідь найбільш ефективна при її впливі на додатковий канал демодулятора, бо шумова завада у каналі зв'язку виступає у ролі корисного сигналу. Максимальне значення ймовірності помилкового прийому виходить при співвідношенні $P_s / P_j \rightarrow 0$.

Наступним по ефективності є вплив одночасно на обидва канали. Виконавши розрахунки при однакових вхідних параметрах по формулах (3.12) і (3.12) можна зробити висновок, що:

$$\frac{P_E(2)}{P_E(\text{main})} > 1 \quad (3.16)$$

Максимальна ефективність при впливі на обидва канали отримується при $P_s / P_j \rightarrow 0$.

Для багатопозиційної частотної модуляції P_{er}

$$P_E(\text{main}) = \frac{M}{2(M-1)} \sum_{m=1}^{M-1} \frac{(-1)^{m+1} C_{M+1}^m}{m+1} \times \frac{1}{1+m\beta(m+1)} \exp \left[-k \left(\frac{P_j}{P_s} + \frac{m+1}{m} \frac{G_0}{E_s} \right)^{-1} \right] \quad (3.17)$$

де: M – розмір алфавіту частотної модуляції.

Розмір алфавіту радіосигналу (M) при інших незмінних параметрів призводить до зменшення P_E , та отже і ефективності шумових завад у відповідь.

3.4 Розрахунок середньої ймовірності помилки для ЗРЗ з частотною модуляцією та ППРЧ при впливі гармонічних радіозавад

Гармонічні радіозавади представляють з себе вузькосмуговий модульований радіосигнал зосереджений по спектру. Вплив гармонічної радіозавади, при умові

збігу частот корисного сигналу та радіозавади і рівномірному розподілу фази на основний канал демодулятора для випадку повного перекриття частотного елемента корисного сигналу радіозавадою ($\rho = 0$) розраховується з використанням формули (3.18):

$$P_E(\text{main}) = \frac{1}{2} \exp\left[-\frac{E_s}{2G_0}\left(1 + \frac{P_j}{P_s}\right)\right] I_0\left(\frac{E_s}{G_s} \sqrt{\frac{P_j}{P_s}}\right) \quad (3.18)$$

Залежність ймовірності помилкового прийому від співвідношення сигнал/шум+радіозавада для випадків впливу гармонічної радіозавади на основний канал демодулятора та обидва канали наведені відповідно на рис. 3.10 та 3.11.

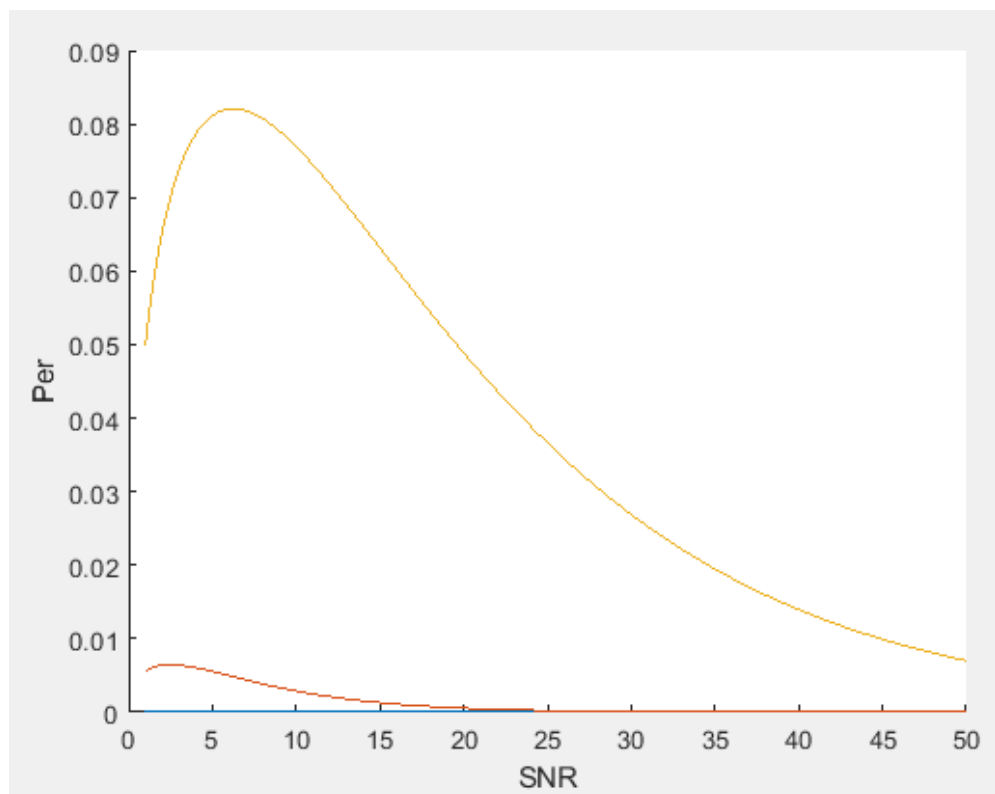


Рисунок 3.10 – Залежність ймовірності помилкового прийому при впливі завади на основний канал

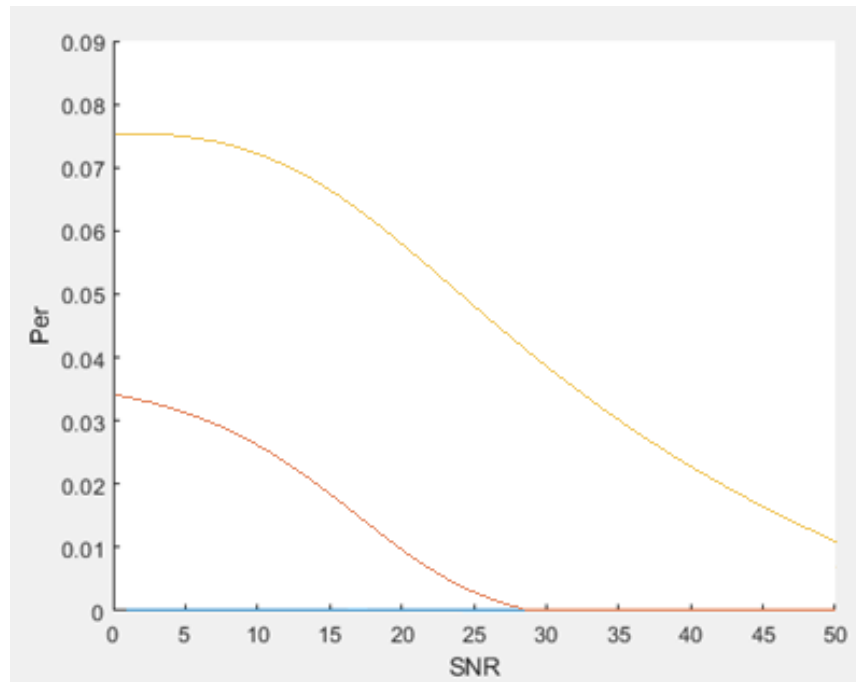


Рисунок 3.11 – Залежність ймовірності помилкового прийому при впливі завади на обидва канал

При $P_s < P_j$ середня ймовірність помилкового прийому знижується.

Вплив найгіршої гармонічної завади приводить до такого значення $P_E(\text{main})$:

$$P_E(\text{main}) \approx \frac{1}{2} \sqrt{\frac{G_0}{2\pi E_s}} \quad (3.19)$$

При умові $P_j \approx P_s \gg \sigma_0^2$ станція завад також вичерпує свої можливості по подавленню ЗРЗ, при подальшому зрості потужності сигнал завади приводить до того, що радіозавада починає виконувати роль корисного сигналу.

Ймовірність помилкового прийому при впливі радіоелектронних завад одночасно на основний та додатковий канал демодулятора має вигляд:

$$P_E(\text{all}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left\{ \begin{aligned} & Q \left[\sqrt{\frac{E_s}{G_0} \frac{P_j}{P_s}}, \sqrt{\frac{E_s}{G_0} \left(1 + \frac{P_j}{P_s} + 2\sqrt{\frac{P_j}{P_s} \cos\theta} \right)} \right] - \\ & \frac{1}{2} \exp \left[-\frac{E_s}{G_0} \left(\frac{1}{2} + \frac{P_j}{P_s} + \sqrt{\frac{P_j}{P_s} \cos\theta} \right) \right] I_0 \times \\ & \times \left[\frac{E_s}{G_0} \sqrt{\frac{P_j}{P_s} \left(1 + \frac{P_j}{P_s} + 2\sqrt{\frac{P_j}{P_s} \cos\theta} \right)} \right] \end{aligned} \right\} d\theta \quad (3.20)$$

У даному рівнянні використовується функція Маркума (Q), яка у свою чергу, розраховується за формулою:

$$Q(\alpha, \beta) = \int_{\beta}^{\infty} x [I_0(\alpha x)] \times \exp \left(-\frac{\alpha^2 + x^2}{2} \right) dx \quad (3.21)$$

Виконавши розрахунки можливо зробити висновки, що гармонічна радіоелектронна завада, що впливає на обидва канали демодулятора більш ефективна ніж завада, яка впливає тільки на основний канал.

Вплив радіозавади тільки на додатковий канал демодулятора призводить до такої ймовірності помилкового прийому:

$$P_E(\text{second}) = Q \left(\sqrt{\frac{E_s}{G_0} \frac{P_j}{P_s}}, \sqrt{\frac{E_s}{G_0}} \right) - \frac{1}{2} \exp \left[-\frac{E_s}{G_0} \left(1 + \frac{P_j}{P_s} \right) \right] I_0 \left(\frac{E_s}{G_0} \sqrt{\frac{P_j}{P_s}} \right) \quad (3.22)$$

Для M-ічної частотної модуляції при впливі гармонічної радіозавади на основний канал $P_E(\text{main})$ становить:

$$P_E(\text{main}) = \frac{M}{2(M-1)} \sum_{m=1}^{M-1} \frac{(-1)^{m+1}}{m+1} C_{M-1}^m \times \exp \left[-\frac{kE_s}{G_0} \left(1 + \frac{P_j}{P_s} \right) \frac{m}{m+1} \right] \times \\ \times I_0 \left(\frac{2m}{m+1} \frac{kE_s}{G_0} \sqrt{\frac{P_j}{P_s}} \right) \quad (3.23)$$

Максимальне значення $P_E(\text{max})$ та, відповідно, максимальна ефективність завади отримується при $P_s = P_j \gg \sigma_0^2$ та дорівнює:

$$P_E(\text{max main}) \approx \frac{M}{2(M-1)} \sum_{m=1}^{M-1} \frac{(-1)^{m+1}}{m+1} C_{M-1}^m \times \frac{1}{2} \sqrt{\frac{(m+1)G_0}{\pi m k E_s}} \quad (3.24)$$

Після проведення аналізу результатів розрахунків та побудованих графіків можна зробити наступні висновки:

- при певних умовах кожна радіоелектронна завада, незважаючи на можливість подальшого збільшення потужності, перестає ефективно впливати на корисний інформаційний сигнал;
- найбільш ефективні радіоелектронні завади при впливі на обидва канали демодулятора (при випадку використання ЧМ);
- час роботи засобу радіозв'язку з ППРЧ на одній частоті є найбільш критичним при аналізі його завадостійкості.

4 ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ З ВИКОРИСТАННЯМ ПСЕВДОВИПАДКОВОЇ ПЕРЕБУДОВИ РОБОЧОЇ ЧАСТОТИ

Системи зв'язку з псевдовипадковою перебудовою робочої частоти мають значну складність технічної реалізації: високі вимоги до систем частотно–часової синхронізації є причиною значної вартості таких систем. Отже, для їх дослідження доцільно використовувати їх моделі.

4.1 Побудова ідеальної математичної моделі системи зв'язку

Першим кроком дослідження є побудова ідеальної моделі каналу зв'язку без використання методу розширення спектру псевдовипадковою перебудовою робочої частоти.

Модель системи зв'язку побудовано у системі інтерактивного моделювання, імітації та аналізу Simulink з використанням об'єктів та функцій набору інструментів Communications Toolbox. Цей набір має у своєму складі генератори сигналів, блоків модуляторів–демодуляторів, моделей каналів зв'язку та великий набір методів та алгоритмів аналізу результатів роботи побудованої моделі. Використання даного набору інструментів дозволяє проводити напівнатурне моделювання систем радіозв'язку.

Загальний вигляд побудованої моделі каналу зв'язку без розширення спектру наведено на рис. 4.1.

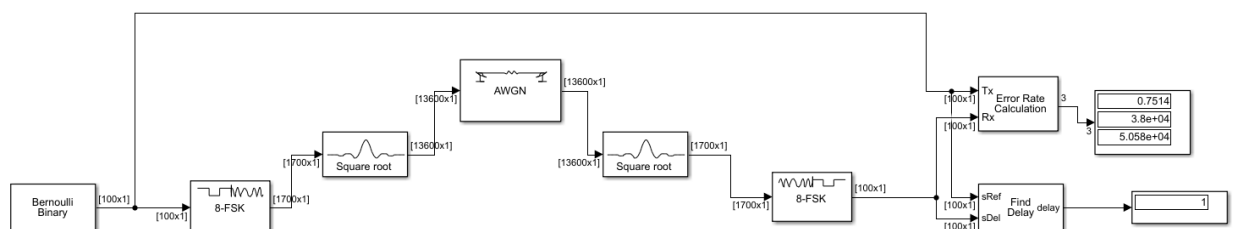


Рисунок 4.1 – Загальний вигляд побудованої математичної моделі

Математична модель налаштована на роботу з дискретними сигналами, що реалізовано завдяки налаштуванню Solver: discrete (no continuous states).

У якості джерела інформації для каналів використовується блок Bernoulli Binary, що генерує випадкові числа з використанням розподілу Бернуллі.

Вихідним типом даних встановлено Double.

Також були змінені параметри Sample time – час вибірки вихідного сигналу, встановлений рівним 200 кГц та кількість відліків на кадр вихідного сигналу – Samples per frame встановлений 10.

Результат функціонування блоку наведений на рис. 4.2. Отриманий завдяки інструменту Time Scope демонструє результат роботи блоку.

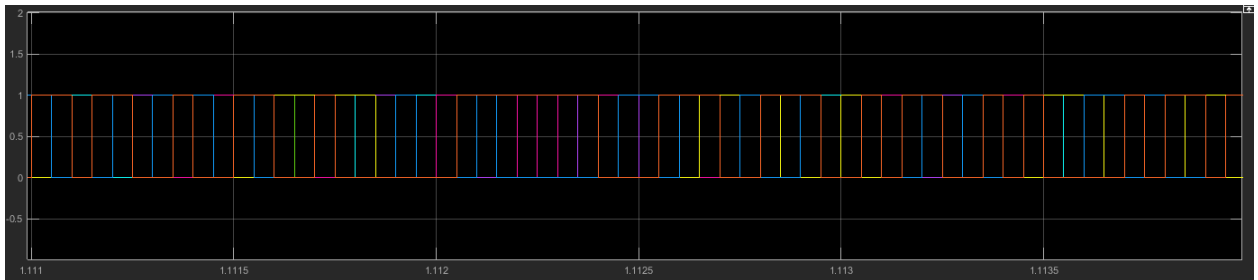


Рисунок 4.2 – Генерований сигнал блоку

У якості модуляції було обрано M-FSK, що є різновидом частотної модуляції, де використовується декілька частот для передачі інформації.

Реалізована вона завдяки блокам M-FSK Modulator Baseband та M-FSK Demodulator Baseband відповідно.

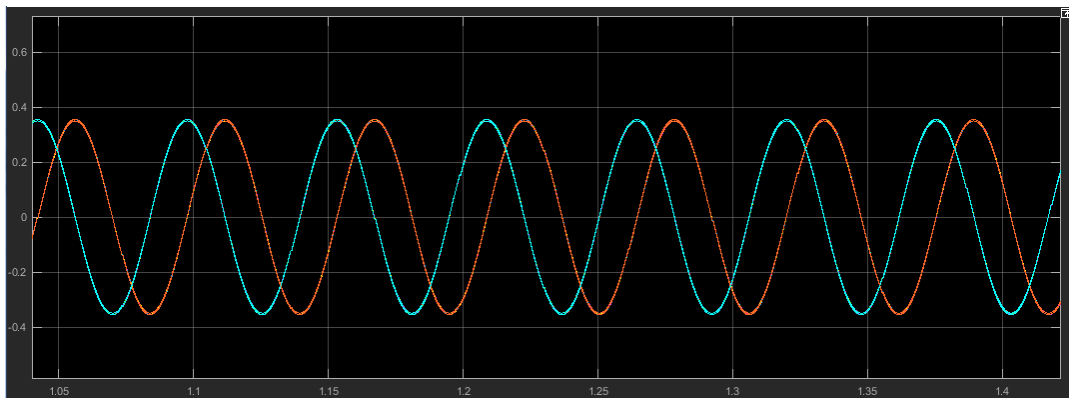


Рисунок 4.3 – Сигнал після модуляції

Фільтрація вихідного та вхідного (на приймальній стороні) сигналу проводиться відповідно Raised Cosine Transmit Filter та Raised Cosine Receiver Filter. Даний тип фільтрів допомагає зменшити міжсимвольні викривлення сигналу.

Головним його параметром є коефіцієнт спаду – Rolloff factor, що визначає надлишкову полосу пропускання фільтру.

В ролі каналу зв'язку виступає канал адитивного білого гаусівського шуму –AWGN Channel. Шум у цьому каналі має нормальне розподілення (Гаусівське), спектральна потужність рівномірна у усій полосі частот. Блок AWGN Channel генерує шум з використанням іншого блоку – Random Source. Початкове значення, яке буде використовуватись у алгоритмі генерації випадкових значень можна встановити завдяки параметру Initial seed.

Найбільш важливим параметром є Mode – Variance mode, що відповідає за те, яким співвідношенням буде розраховуватись спектральна потужність шуму у каналі.

Можливі такі варіанти:

- $\frac{E_b}{N_0}$ (dB) – співвідношення енергії інформаційних бітів на символ до спектральної щільності потужності шуму у децибелах;

- $\frac{E_s}{N_0}$ (dB) – співвідношення енергії інформаційного символу на символ до спектральної щільності потужності шуму у децибелах;

- SNR(dB) – співвідношення потужності корисного сигналу до потужності шуму у децибелах.

Для визначення ефективності роботи каналу зв'язку використовується Error Rate Calculator. Цей блок вираховує частоту помилково переданих бітів шляхом ділення кількості переданих бітів з помилкою до загальної кількості переданих бітів. Завдяки параметру Output data результати виводяться через порт у блок Display. Блок Display виводить 3 параметри:

- частота виникнення помилок;
- загальна кількість переданих з помилкою біт;
- загальна кількість переданих біт (кількість зроблених порівнянь).

Також Error Rate Calculator забезпечує зупинку роботи симуляції після передачі 10000000 біт. Реалізовано це з використанням функції Stop Simulation та параметра Maximum number of symbols.

Для коректного підрахунку частоти виникнення помилок необхідно чітко знати затримку між передавальною та приймальною частинами моделі. Пошук цієї затримки реалізовано завдяки блоку Find Delay, який отримує на свої вхідні

порти обидва сигнали, вираховує їх затримку та виводить значення затримки у блок Display. Отриману затримку потрібно внести, як параметр блоку Error Rate Calculator – Receive delay.

Сам параметр BER (Bit error rate) – допомагає оцінити усю систему, а не окремі її компоненти: передавальний тракт, канал зв'язку та приймальний тракт. Математично він розраховується так:

$$\text{BER} = \frac{N_{\text{er}}}{N_{\text{bit}}}, \quad (4.1)$$

де: N_{er} – кількість біт переданих з помилкою;

N_{bit} – загальна кількість переданих біт.

Із формули випливає, що:

- чим нижче показник BER, тим краще працює система зв'язку;
- для збільшення достовірності отриманого показника необхідно збільшити об'єм переданих даних, бо вимірювання має статистичний характер.

Основні фактори, які впливають на BER, це шуми каналу зв'язку, навмисні та ненавмисні завади, спотворення сигналу, зриви синхронізації у системах зв'язку, проблеми багатопроменевого розповсюдження радіоімпульсів (завмирання радіосигналу).

Для зменшення значення BER використовують такі засоби:

- збільшення рівня прийнятого сигналу шляхом збільшення потужності передавача чи використання підсилювачів потужності радіосигналу;
- зниження швидкості передачі інформації;
- зміною типу використовуваної модуляції;
- використання методів розширення спектру;
- використання завадозахишеного кодування сигналів.

4.2 Побудова математичної моделі системи зв'язку з ППРЧ

Наступним етапом є дообладнання побудованої вище моделі до такої, що реалізує метод ППРЧ. Необхідні блоки, наведені на рис. 4.4.

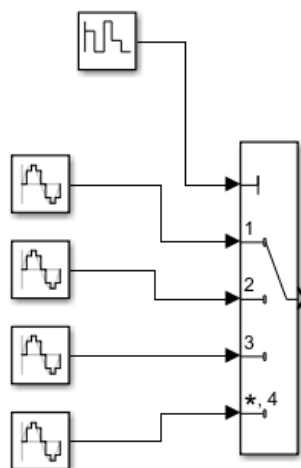


Рисунок 4.4 – Блоки, що реалізують метод ППРЧ

Реалізація розширення спектру методом псевдовипадкової перебудови робочої частоти реалізована завдяки дообладнанням створеної моделі додатковими блоками, а саме:

- Multiport switch;
- Sine Wave;
- Repeating Sequence Stair;
- Product.

Блок Multiport switch – є комутатором з декількома (у заданому випадку 4) входами, комутація яких до вихідного порту залежить від сигналу, що подається на керуючий вхід. Multiport switch у даній моделі реалізує генератор псевдовипадкової частоти шляхом підключення 1 з 4 генераторів

Блоки Sine Wave використовуються для генерації частот, що подаються на інформаційні порти Multiport switch. Основним параметром блоку є частота, яку він генерує. Встановлення цього параметра відбувається у радіанах на секунду. Для блоків, що використовуються в моделі, цей параметр становить відповідно:

- 120 МГц для 1-го;
- 125 МГц для 2-го;
- 130 МГц для 3-го;
- 135 МГц для 4-го;

Repeating Sequence Stair генерує встановлену послідовність, (у даному випадку 3, 1, 4, 2, 1) яка встановлюється параметром–Vector of output values. Ця послідовність постійно повторюється. Виконує роль генератора псевдовипадкового коду для передавальної та приймальної сторони. Значення

встановленої послідовності визначають, який інформаційний вихід Multiport switch, а отже і Sine Wave буде використовуватись. Синхронність роботи передавальної та приймальної сторони забезпечується через надходження псевдовипадкової послідовності з однаковим вектором вихідних значень.

Блок Product передавальній стороні проводить множення модульованого інформаційного сигналу на псевдовипадковий сигнал, отриманий з блоків, описаних вище. На приймальній стороні проводиться зворотна операція.

Оскільки модель каналу зв'язку у даній моделі не створює затримки між передавальною та приймальною стороною, а процедури по розширенню спектра корисного сигналу проводиться до та після блоків фільтрів, синхронізація між генераторами псевдовипадкової послідовності на передавальній та приймальній стороні не потрібна.

Загальний вигляд моделі представлений на рис. 4.5.

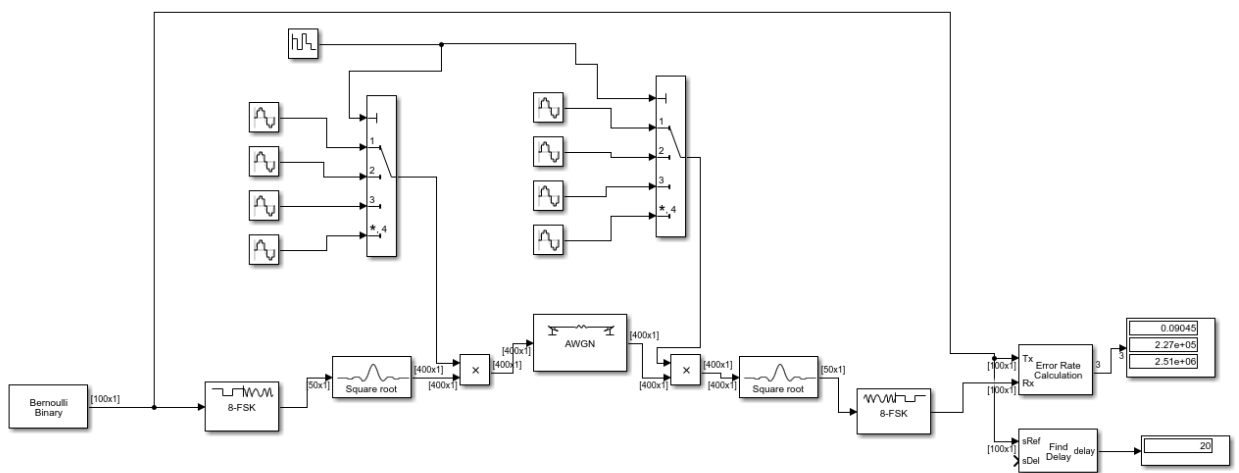


Рисунок 4.5 – Загальний вигляд математичної моделі з реалізацією ППРЧ

Слід також звернути увагу на необхідність коректного налаштування параметрів Sample time – часу вибірки для генераторів псевдовипадкової послідовності та джерела корисної інформації. Виконати перевірку на коректність налаштувань можливо завдяки відображенню часових параметрів у пункті меню Display та обравши Sample Time Legend.

Для рішення проблеми неузгодженості часових параметрів також може бути використано блок Rate Transition. Цей блок проводить змину швидкості передачі даних з виходу блоку, підключеного до свого входу на вхід іншого блоку, що

підключений до його виходу. Вигляд некоректно та коректно налаштованих моделей при відображенні Sample Time Legend наведені на рис. 4.6.

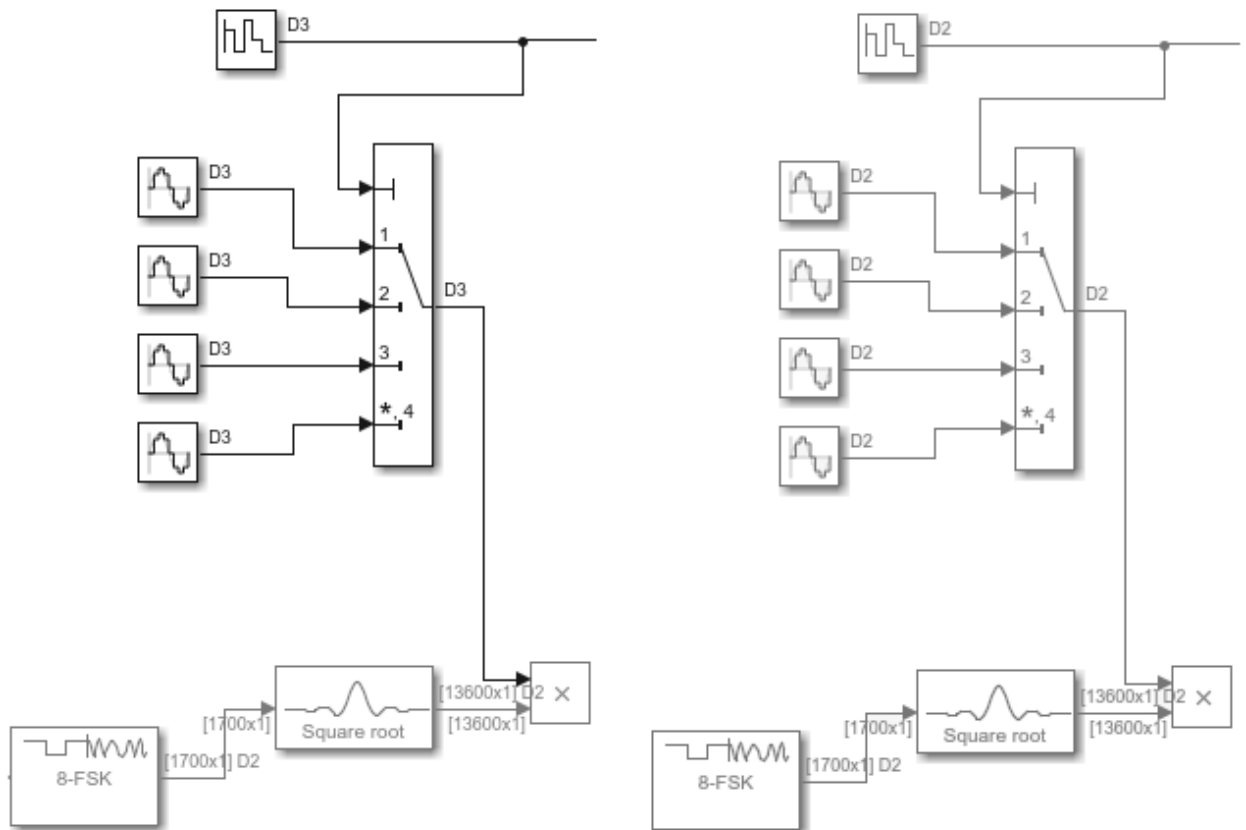


Рисунок 4.6 – Приклад невірною та вірного налаштування

4.3 Дослідження впливу співвідношення сигнал/шум на значення BER для систем зв'язку з ППРЧ

Одним з основних параметрів у радіозв'язку є співвідношення сигнал/завада. Параметр показує співвідношення рівня корисного радіосигналу у каналі зв'язку до рівня сигналу шуму. Також SNR можливо розрахувати завдяки середньоквадратичному значенню амплітуди сигналу та шуму у полосі пропускання приймача.

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}} = \frac{A_{\text{signal}}^2}{A_{\text{noise}}^2}, \quad (4.2)$$

де: P – значення середньої потужності;

A – значення середньоквадратичної амплітуди.

Також SNR може бути виміряний у децибелах.

$$\text{SNR(dB)} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{\text{signal}}}{A_{\text{noise}}} \right) \quad (4.3)$$

У середовищі MATLAB Simulink зімітувати вплив шумів на систему радіозв'язку можливо з використанням блоку канал адитивного білого гаусівського шуму (AWGN). Оскільки даний блок вже було описано, слід зауважити що параметр SNR в ньому встановлюється у децибелах.

Дослідження впливу шуму проведено завдяки проведенню моделювання роботи системи зі різними значенням параметра SNR: 15, 10, 5, 2, 1.5 та 1 dB.

Моделювання проводиться для систем з M-FSK, QAM та QPSK модуляцій.

Таблиця 4.1 – Значення параметра BER для різних значень співвідношення сигнал/завада

SNR	M-FSK	QAM	QPSK
15	0,0291	0,0351	0,0339
10	0,0407	0,0615	0,0577
5	0,0729	0,1132	0,1075
2	0,121	0,1676	0,1605
1,5	0,1375	0,1709	0,171
1	0,1528	0,201	0,1915

Графіки залежності BER від співвідношення сигнал/шум приведені окремо для кожної модуляції на рис 4.7 – 4.9.

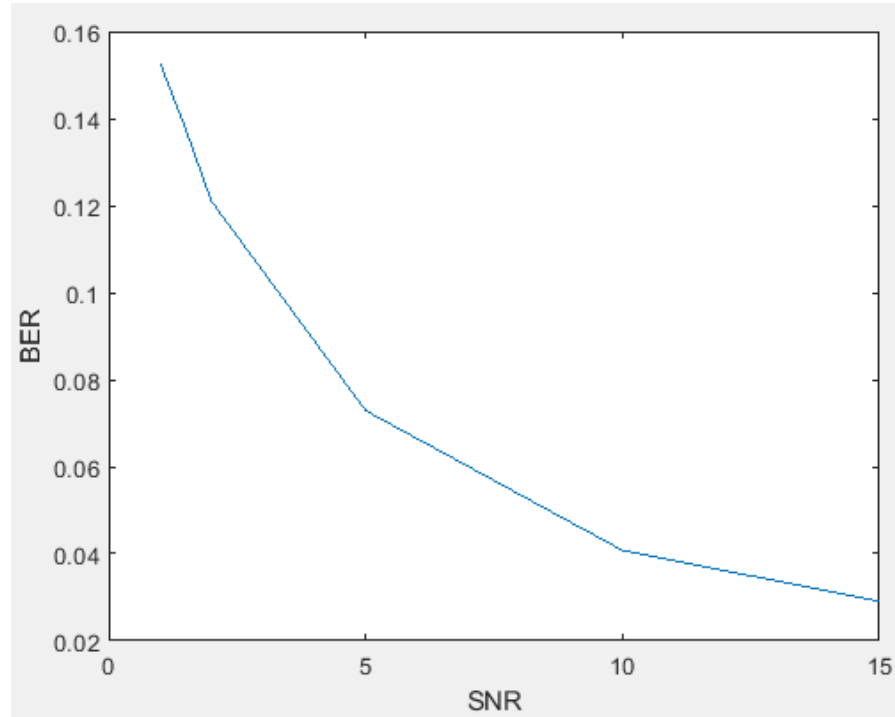


Рисунок 4.7 – Графік залежності для M-FSK

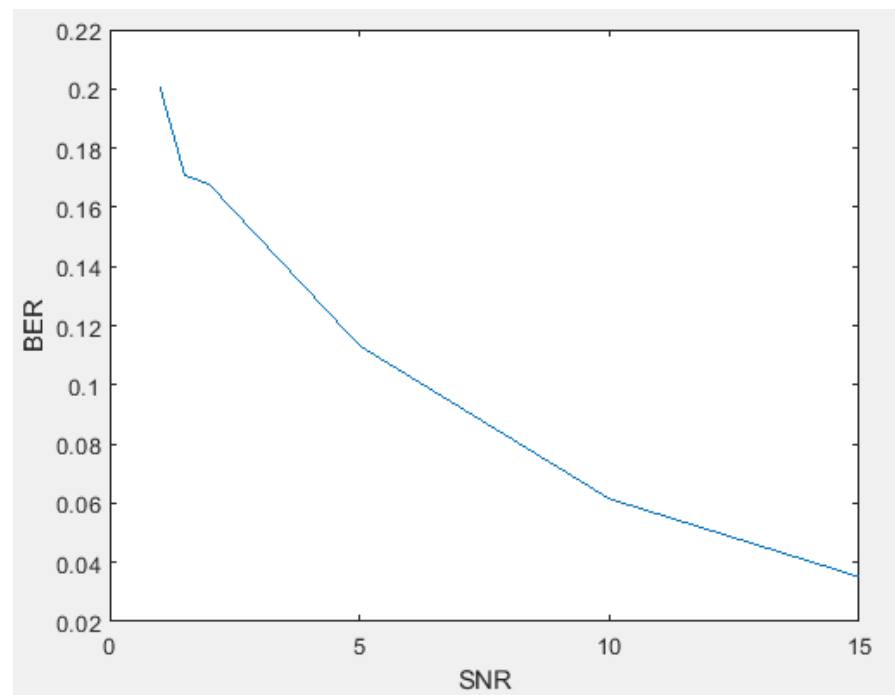


Рисунок 4.8 – Графік залежності для QAM

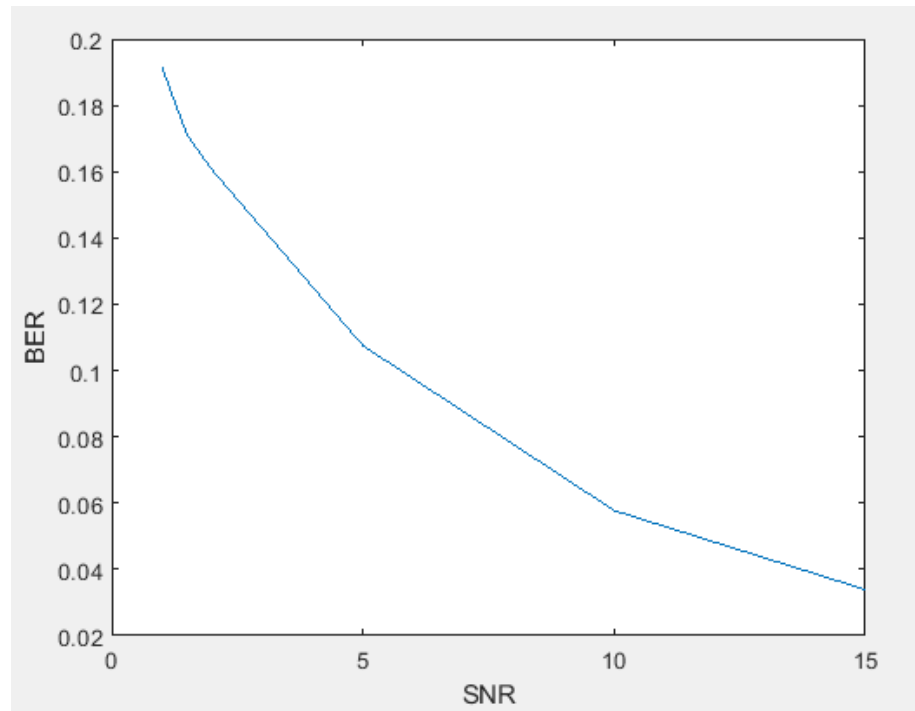


Рисунок 4.9 – Графік залежності для QPSK

4.4 Дослідження впливу різних радіоелектронних завад на значення BER для систем зв'язку з ППРЧ

Шумова завада модульована за амплітудою є основною та найпростішою радіо завадою для систем зв'язку. Таку заваду можна представити у вигляді:

$$J(t) = An(t)\cos[\omega_c t + \varphi_0], \quad (4.4)$$

де: A – амплітуда завади;

$n(t)$ – білий гаусівський шум;

ω_c – несуча частота;

φ_0 – початкова фаза сигналу завади.

Для дослідження впливу радіозавад було побудовано імітаційну модель генератору, наведену на рис. 4.10.

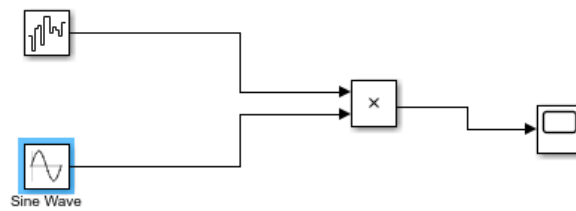


Рисунок 4.10 – Схема генератора шумової завади

Модель складається з таких блоків:

- Band-Limited White Noise;
- Sine Wave;
- Product.

Band-Limited White Noise – блок, що генерує випадкові значення з нормальним (гаусівським) законом розподілу. Його основним параметром є Noise power, завдяки цьому параметру можна встановлювати амплітуду шуму. Цей параметр буде використовуватись як змінна при дослідженні моделей систем зв'язку.

Sine Wave – визначає несучу частоту (ω_c) радіозавади. Значення цього параметру дорівнюватиме 125 МГц для всіх симуляцій.

Product сумує сигнали, що надходять від Band-Limited White Noise та Sine Wave, чим і утворює результуючу заваду.

Частотне представлення отриманої радіозавади з параметром Noise power, що дорівнює 0.1 наведено на рис 4.11.

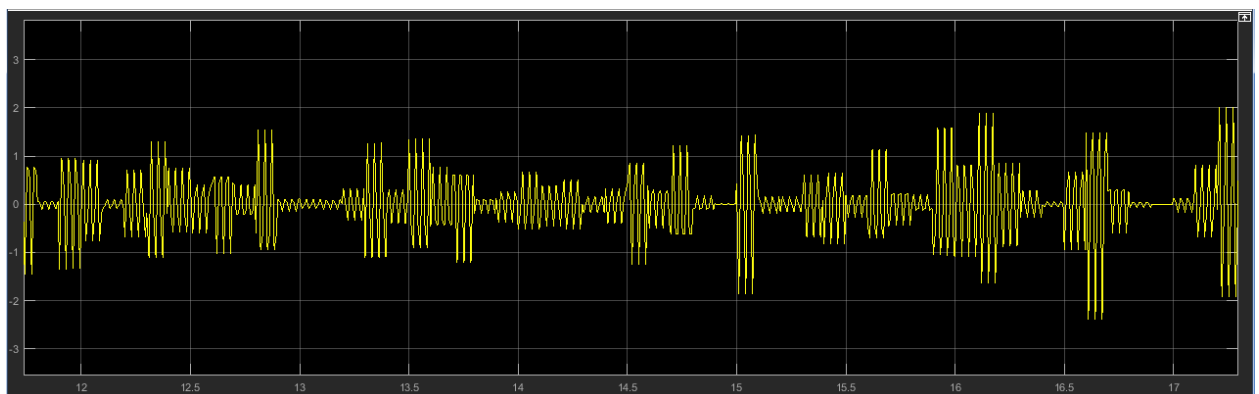


Рисунок 4.11 – Частотна характеристика отриманої радіозавади

При виконанні моделювання генератор завад буде встановлено після каналу зв'язку. Введення завади до каналу радіозв'язку відбувається через блок Product. Для узгодження часових параметрів перед Product встановлено блок Rate Transition. Подібна структура буде використовуватись у подальших дослідженнях и приведена на рис. 4.12.

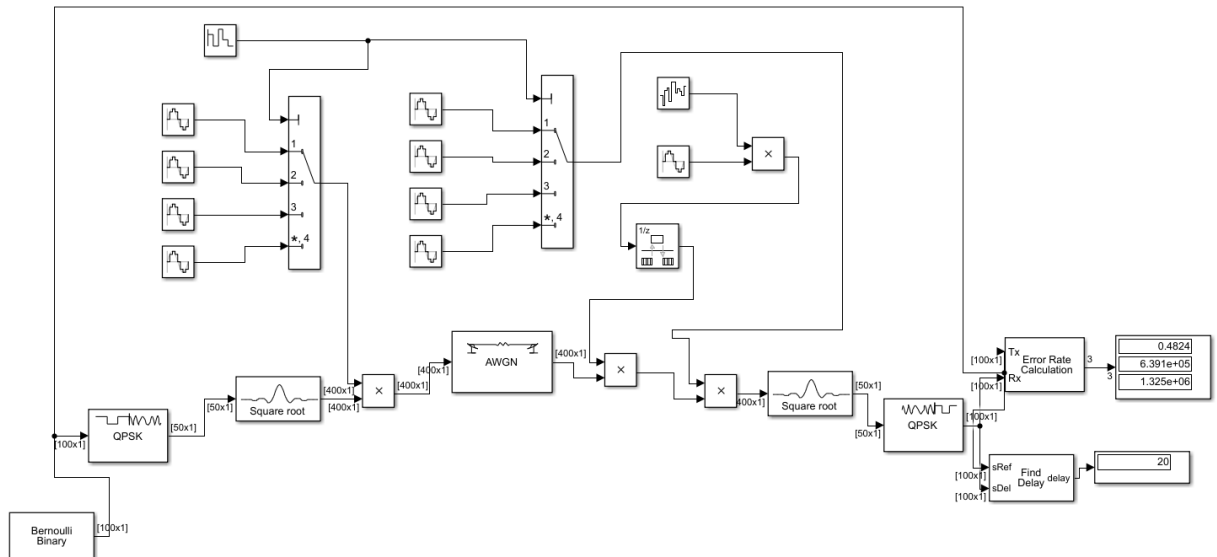


Рисунок 4.12 – Схема імітаційної моделі впливу завади на ЗРЗ з ППРЧ

Результати функціонування моделі для різних модуляцій та значень параметру Noise power приведено нижче:

Таблиця 4.2 – Значення параметра BER для різних значень параметру Noise power

Noise power	M-FSK	QAM	QPSK
0,01	0,3923	0,5102	0,5389
0,05	0,4112	0,598	0,5615
0,1	0,4358	0,6782	0,6284

Графіки залежності BER від залежності потужності завади приведено на рис. 4.13 – 4.15.

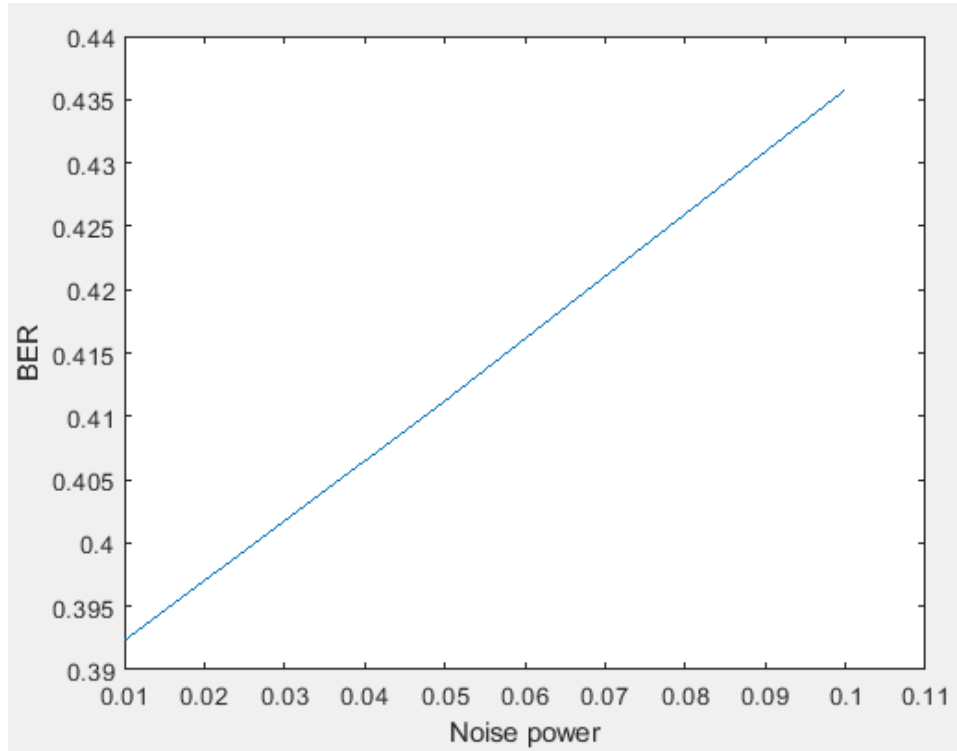


Рисунок 4.13 – Графік залежності для M-FSK

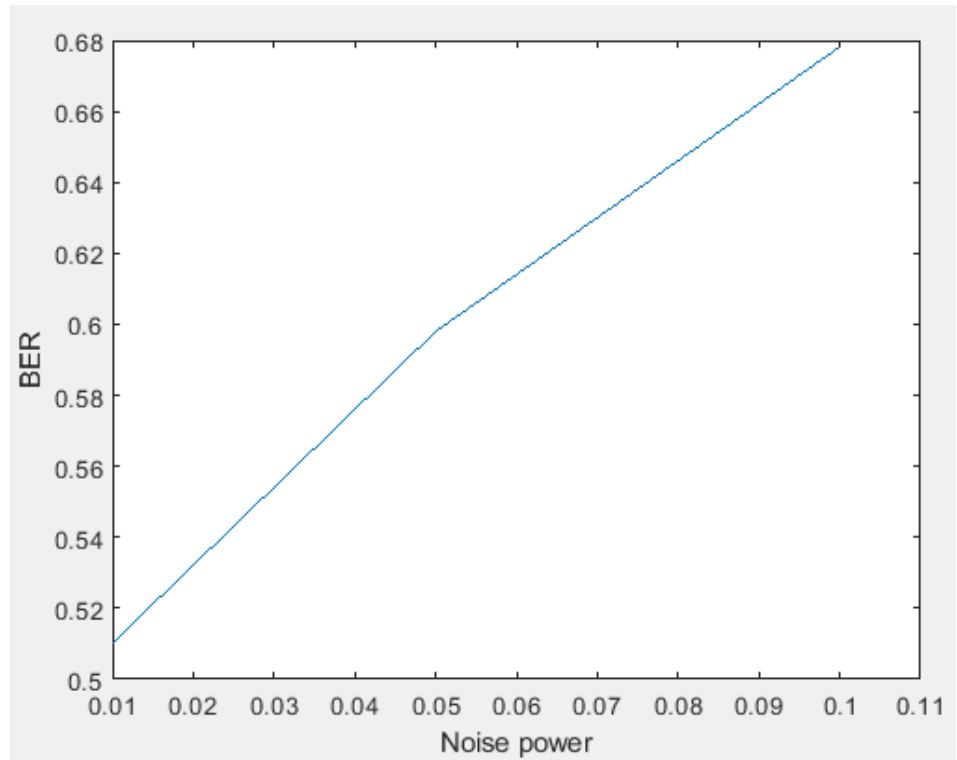


Рисунок 4.14 – Графік залежності для QAM

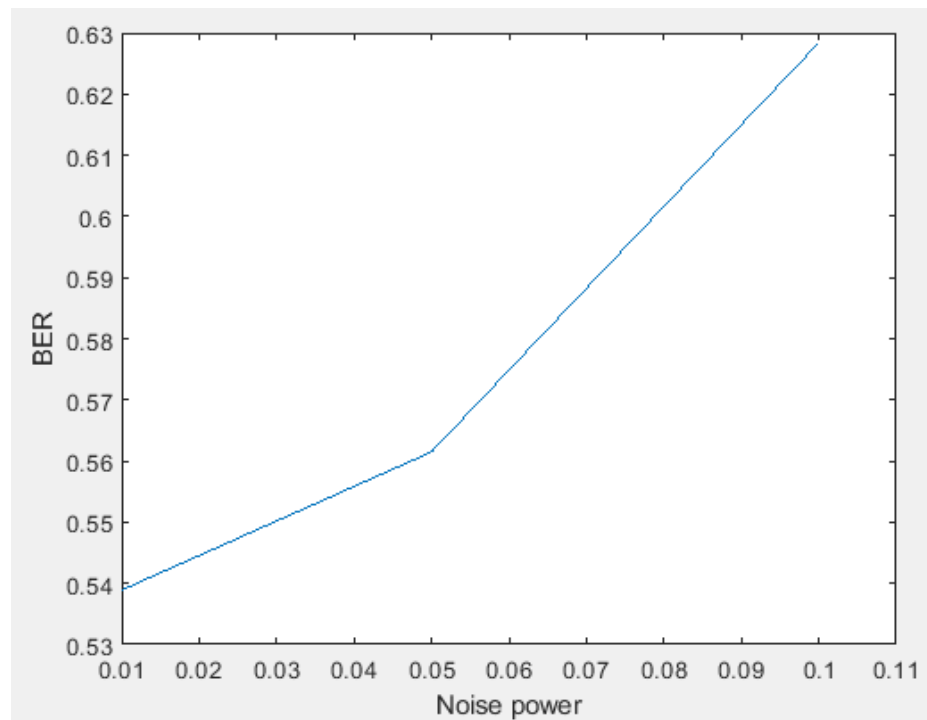


Рисунок 4.15 – Графік залежності для QPSK

Наступним для дослідження обрано багатотональну радіозаваду. Математично цю заваду можливо представити як суму декількох коливань.

$$J(t) = \sum_{i=0}^i S_i(t) \quad (4.5)$$

Схема моделі генератора якої приведено на рис. 4.16.

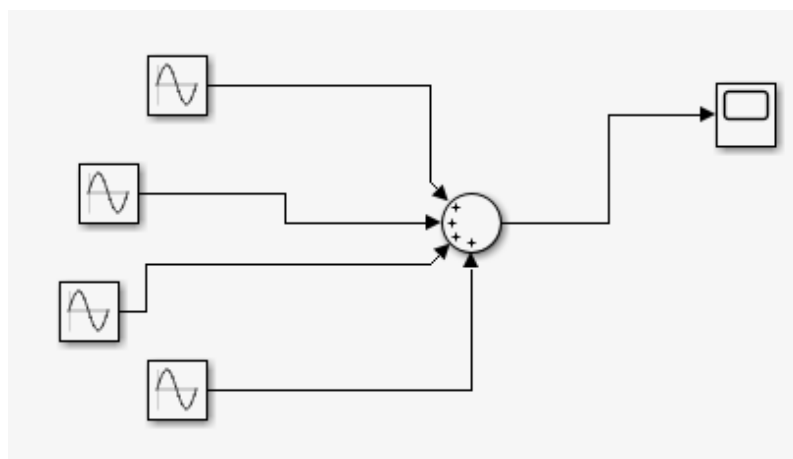


Рисунок 4.16 – Схема генератора багатотональної завади

Дана модель складається з таких блоків:

- Sine Wave;
- Sum.

Як і у минулій моделі генератору, блок Sine Wave використовується для створення 1 з декількох частот, що утворюють результуючий сигнал завади.

Блок Sum виконує сумування утворених блоками Sine Wave сигналів, чим і утворює результуючий сигнал завади. Сам сигнал завади у частотному представленні приведено на рис. 4.17.

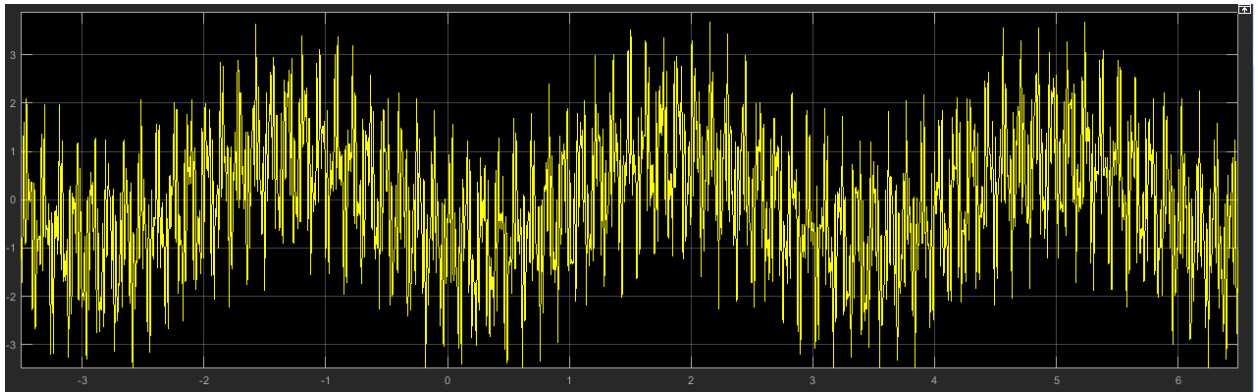


Рисунок 4.17 – Частотна характеристика отриманої радіозавади

У якості змінної при дослідженнях буде використовуватись зміна кількості генераторів Sine Wave, що впливає на кількість гармонік у результуючому сигналі радіозавади.

Таблиця 4.3 – Значення параметра BER для різних значень параметру Noise power

№ гармонік	M-FSK	QAM	QPSK
2	0,4898	0,5238	0,4998
3	0,5064	0,5576	0,5325
4	0,5921	0,6	0,598

Графіки залежності BER від залежності потужності завади приведено на рис. 4.18 – 4.20

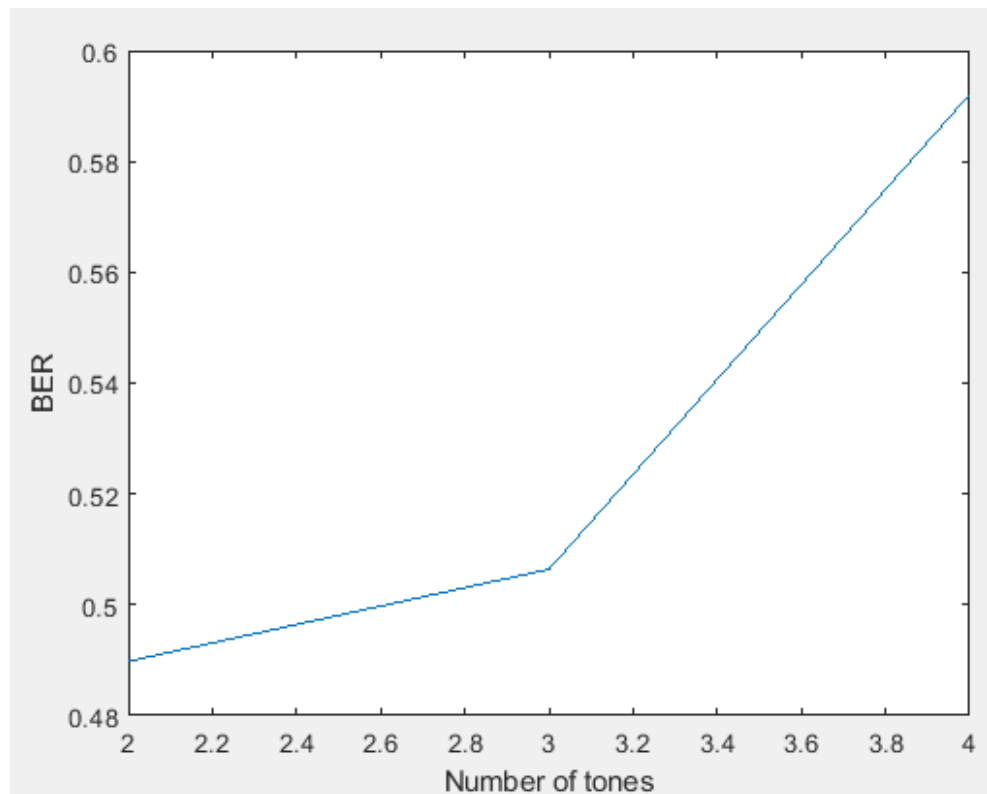


Рисунок 4.18 – Графік залежності для M-FSK

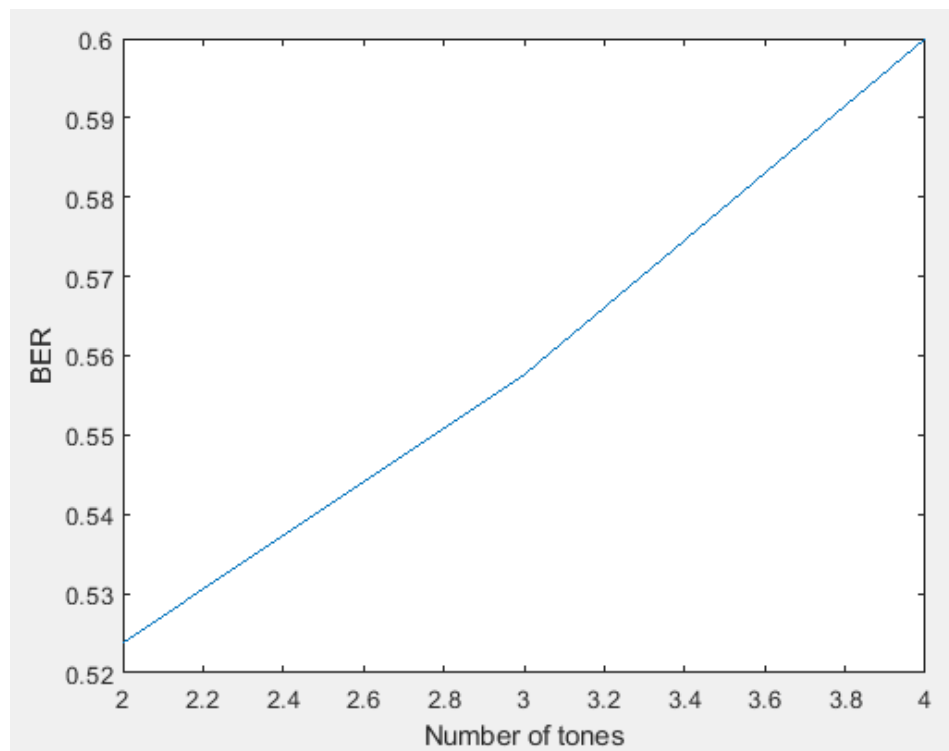


Рисунок 4.19 – Графік залежності для QAM

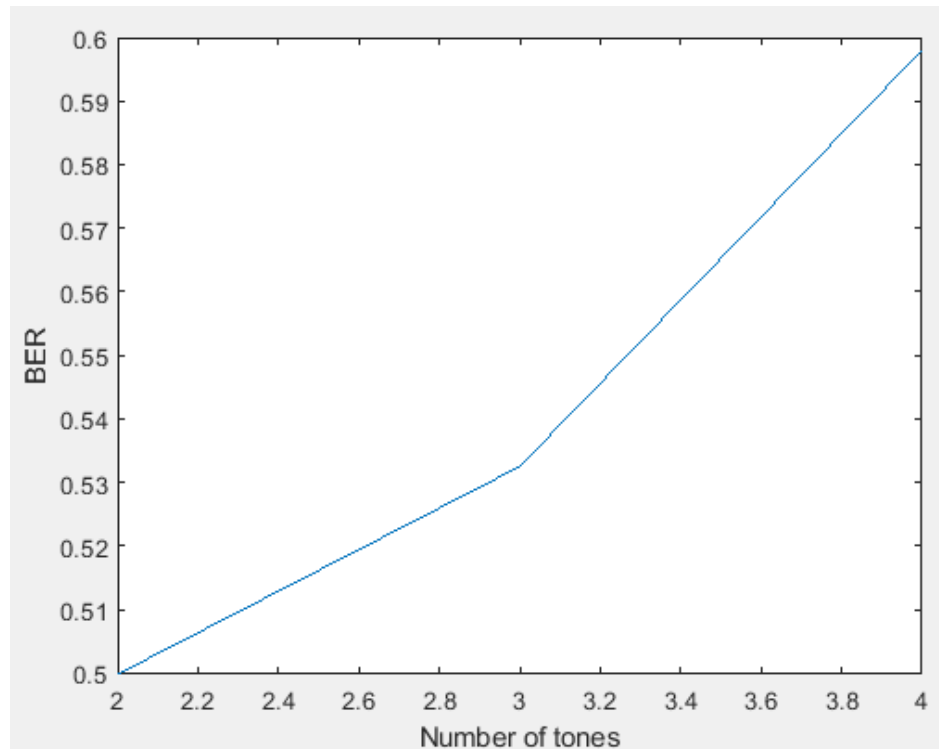


Рисунок 4.19 – Графік залежності для QPSK

Проаналізувавши отримані результати можливо зробити такі висновки:

- M-ічна частотна модуляція демонструє кращу завадостійкість у порівнянні з QPSK та QAM модуляціями. Це можливо пояснити більшою стійкістю M-FSK модуляцій до міжфазних викривлень сигналів;
- з досліджуваних факторів які впливають на якість прийому найбільш ефективним у плані погіршення якості зв'язку є багатотональна радіоелектронна завада, яка призводить до значень параметру BER близьких до випадкових.

5 ПРИСТРІЙ ДЛЯ АНАЛІЗУ ТА ПОШУКУ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ КАНАЛІВ РАДІОЗВ'ЯЗКУ

5.1 Опис загальних принципів функціонування

Як було відмічено вище, радіозасоби, які використовують методи розширення спектру з використанням ППРЧ, мають складну технічну будову та жорсткі вимоги до апаратних складових. Це у свою чергу впливає і на вартість подібних систем.

Але, незважаючи на ці факти, доволі часто можливо побачити, що декілька станції однієї моделі змонтовані у єдині функціональні системи. Подібне можна побачити у пунктах зв'язку, КШМ. Кожна радіостанція виділяється для роботи у окремій мережі (окремі мережі використовуються для різних підрозділів тощо) зі своїми конкретними параметрами, як, наприклад, перелік частот, що використовуються у алгоритмі ППРЧ, або сам алгоритм. Приклад подібних рішень наведені нижче:



Рис 5.1 – радіостанції RF 7800M-V250 умонтовані у раму з підсилювачем потужності

Для розуміння принципу роботи пристрою, розглянемо деякі аспекти роботи та налаштування радіостанцій сімейства Falcon III. Радіостанції цього сімейства є мультидіапазонними сучасними засобами військового зв'язку.

Підтримувані класи випромінювань також співпадають. Це USB або одно смугова модуляція по верхній бічній (є основною для роботи), LSB одно смугова по нижній бічній, амплітудна АМЕ з повною несучою для роботи з аналоговими радіо засобами, частотна телеграфія АТ та частотна модуляція FM (FSK для передачі інформації).

Усі радіостанції даної серії мають режим ППРЧ (НОР). Для RF-7800H-MP MPR-9600 швидкість перебудови обмежена 8,9 стрибків на секунду.

Частотні діапазони відмінні відповідно до моделей:

- RF-7800H-MP – 1,5 – 59,9999 МГц;
- MPR-9600 – 1,6 – 29,9999 МГц;
- RF-7850M-HH – 30 – 512 МГц.

Також реалізовані деякі методи адаптації до заводової обстановки. Це режим частотної адаптації ALE (Automatic Link Establishment), що полягає у послідовному встановленні зв'язку радіостанцією на 100 заздалегідь записаних частотах, аналізу якості зв'язку і пошуку першої придатної для зв'язку. Час, необхідний для аналізу 1 частоти дорівнює 30 с. Нескладно розрахувати, що у найгіршій ситуації загальний час аналізу усіх частот складатиме 50 хвилин. Другий режим 3G – режим частотної адаптації третього покоління має подібну логіку, але в цьому режимі пошук частоти проходить у одному з 24 наборів по 10 частот. Аналіз кожної займає 3 с. Оператор спроможний обирати, який набір частот буде використовуватись. Зазвичай кожен набір відводиться під окремий підрозділ, мережу тощо.

Інформація для передачі надходить від двох роз'ємів: J3 DATA – для підключення кінцевого обладнання передачі даних та J1 AUDIO – для підключення телефонної трубки.

Налаштування параметрів радіозв'язку можливе як через клавіатуру так и через COM з використанням спеціального програмного забезпечення (CPA) по роз'єму J5 USB. Останнє важливо, бо саме це и дає змогу реалізувати запропонований метод.

Зважаючи на інтенсивність, з якою змінюється заводова та електромагнітна обстановка загалом на сучасному полі бою, можливість швидкого аналізу стану

радіоканалів є необхідною, а оператор не здатний виконувати подібні задачі оперативно.

Рішенням цієї проблеми може бути створення окремої системи, яка буде брати на себе функції аналізу стану каналів зв'язку за встановленими критеріями, зміни параметрів налаштування радіозасобів у відповідь на зміну умов передачі у каналах.

Структурну схему такого пристрою наведено на рис. 5.2.

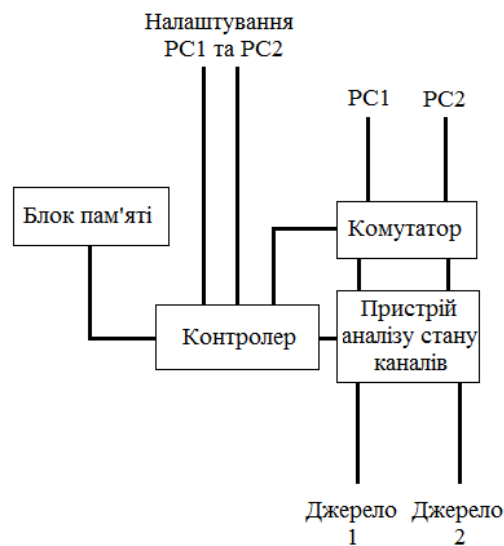


Рисунок 5.2 – Структурна схема пристрою

Роботу пристрою можна розділити на такі етапи.

1) Початковий ввід параметрів радіоканалів до пам'яті пристрою, обмежень для змін параметрів пріоритетного каналу (дозволений діапазон перебудови, частоти, алгоритми ППРЧ тощо). Встановлення пріоритетного та вторинного джерела інформації для передачі.

2) Початок роботи, перенесення параметрів з пристрою до радіостанцій через роз'єм J5 USB та їх програмування.

3) При зниженні якості зв'язку нижче заздалегідь встановленого рівня виконуються такі кроки:

- непріоритетне джерело інформації відмикається від порту передачі даних радіостанції(програмно). На цей порт починає надходити інформація з пріоритетного джерела;

- параметри радіостанції (алгоритм ППРЧ), до якої було підключене непріоритетне джерело змінюються на заздалегідь записані у пам'ять пристрою.

Ці параметри повинні бути відмінні від встановлених для радіостанції, що передає інформацію пріоритетного джерела.

4) Контроль результатів. При роботі проводиться контроль якості зв'язку у обох каналах,

Спрощена схема взаємодії пристрою з 2 радіостанціями RF 7800H зазначено на рис. 5.3. Інформація подається від кінцевої апаратури на роз'єми J3 DATA радіостанцій (позначені товстою шиною зі стрілками, спрямованими у обидва напрямки), зміна параметрів (програмування) проводиться через роз'єми J5 USB (тонка односпрямована шина).

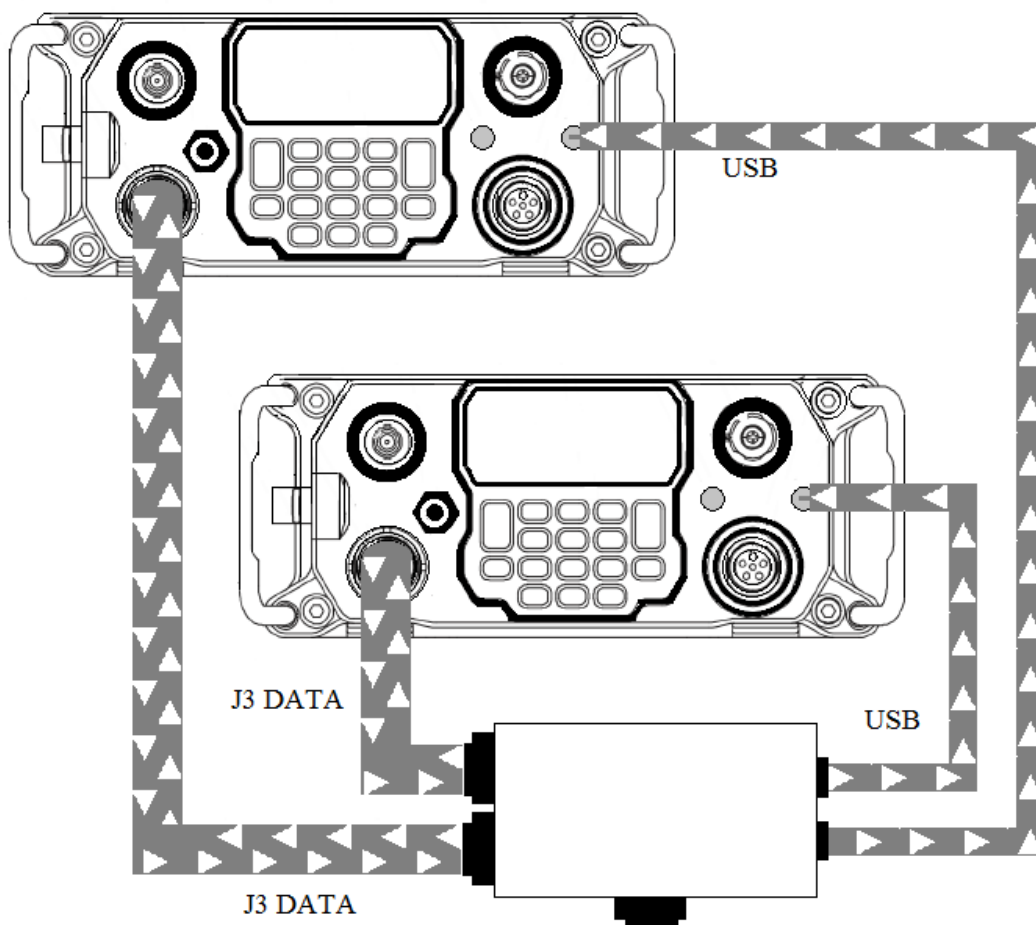


Рис 5.3 – Схема підключення PC до пристрою

5.2 Розрахунок теоретичної ефективності запропонованого рішення

Оскільки 2 радіостанції передають одну і ту саму інформацію і працюють у рамках однієї системи це дає змогу рахувати кількість частотних каналів усієї системи як суму каналів радіостанцій, що приєднані до неї.

Змінивши формулу (3.3) для розрахунку ймовірності помилкового прийому корисного сигналу при впливі радіозавади можемо отримати дані для аналізу ефективності запропонованого методу.

$$P_{er} = p \times P_b' + (1 - p)P_b'' \quad (5.1)$$

$$\text{де: } p = \frac{k}{N * n}.$$

Як і у оригінальній формулі N – загальна кількість частотних каналів, k – кількість частотних каналів, на які впливає радіозавада, n – кількість радіостанцій у системі.

Проведемо розрахунки P_{er} для 1 радіостанції та системи, що керує двома радіостанціями. Результати розрахунків наведені на рис. 5.4, де червоним позначена залежність ймовірності помилкового прийому від рівня завади для 1 РС. Голубим – для системи з двох РС.

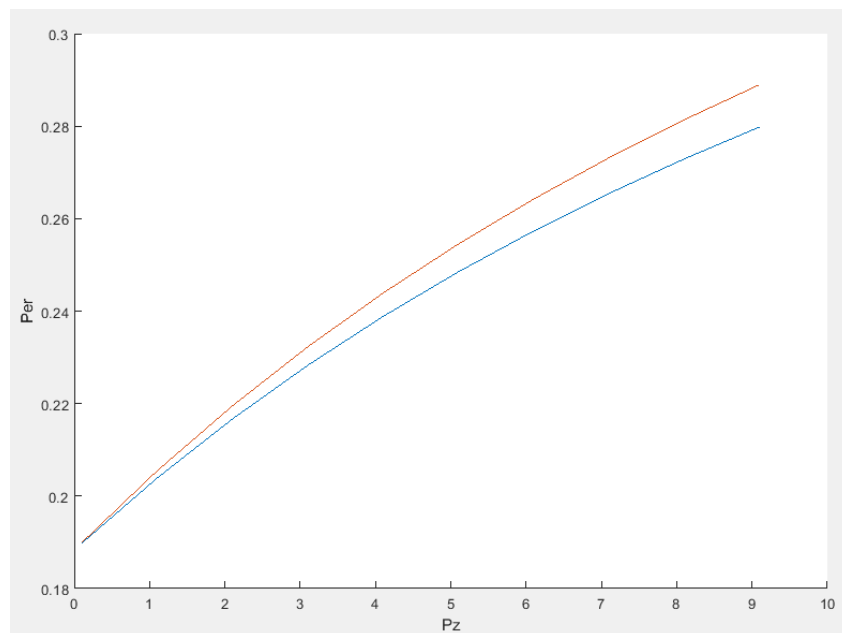


Рисунок 5.4 – Графік залежності вірогідності помилкового прийому від рівня завади для 1 РС та системи утвореної пристроєм

З результатів розрахунків можна зробити висновок про ефективність запропонованого методу.

Також опираючись на раніше отримані результати по розробці математичної моделі ЗРЗ з ППРЧ, побудуємо модель цієї системи.

Система складатиметься з 2 каналів з ППРЧ, кожний з яких має свій набір частот. Генератори псевдовипадкової послідовності також мають різні вектори значень.

Отримана математична модель приведена на рис. 5.5.

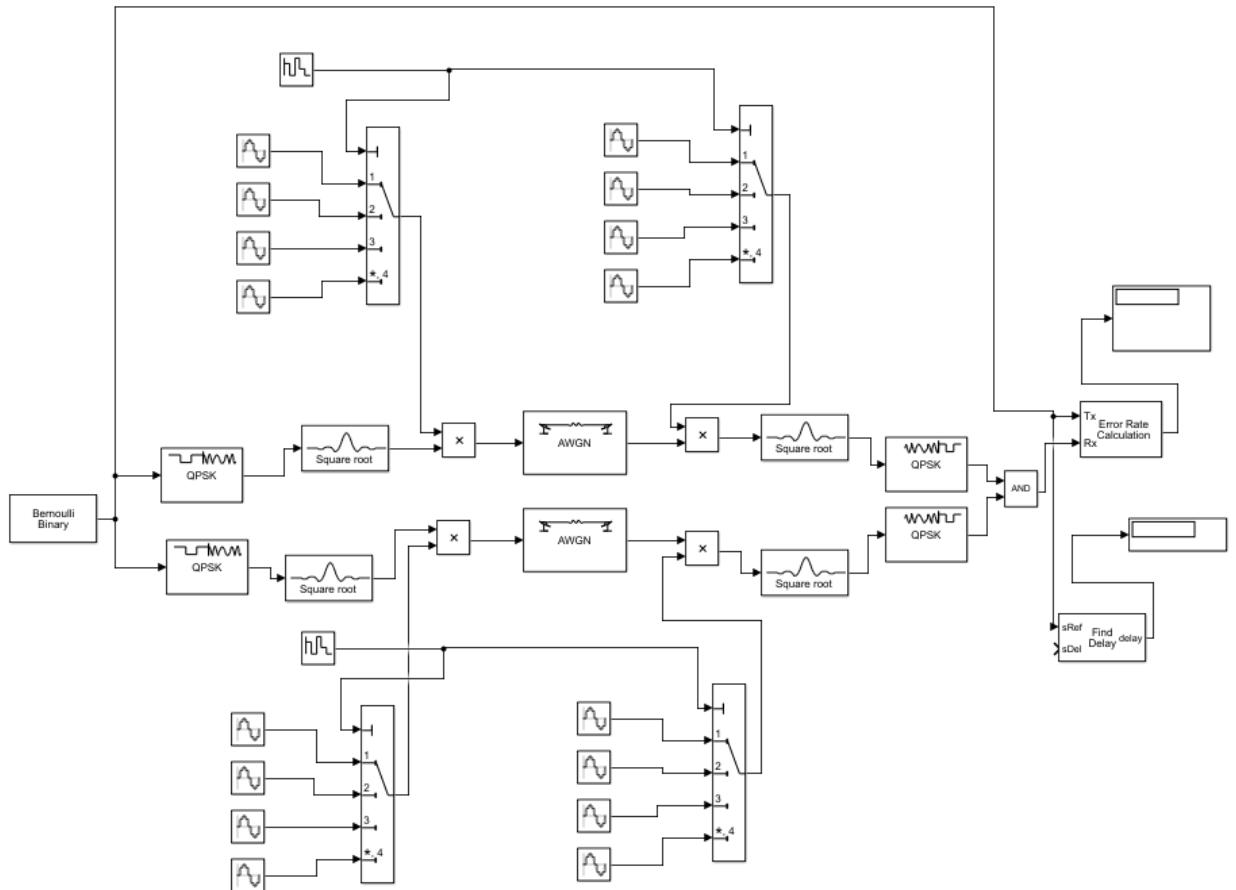


Рисунок 5.5 – Математична модель, що реалізує запропонований принцип

Після моделювання отримані значення BER становлять:

- для моделі з 1 каналом – 0,2159;
- для моделі з 2 каналами – 0,138.

Графічно результати моделювання наведені у вигляді діаграми на рис.5.6

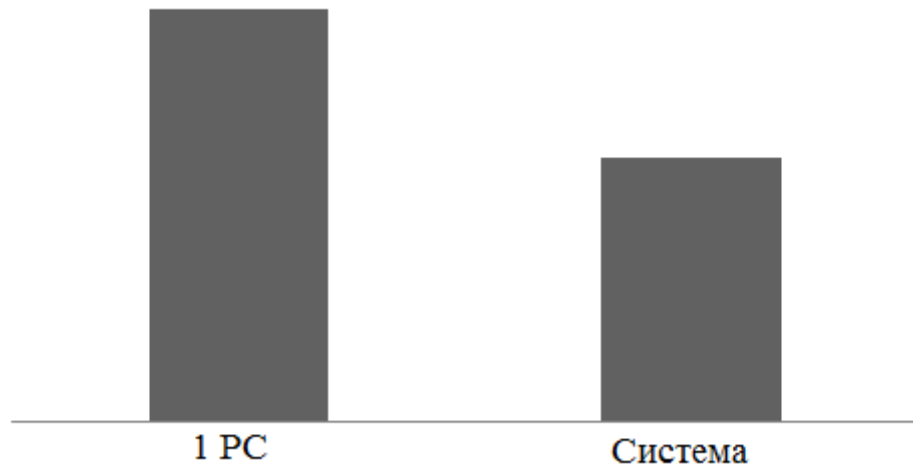


Рисунок 5.6 – Діаграма порівняння значень BER

Результати розрахунків та моделювання підтверджують теоретичну ефективність запропонованого методу. Для більш детального дослідження ефективності необхідно проводити додаткові розрахунки та моделювання.

Слід зауважити, що даний пристрій/метод може використовуватись у крайніх випадках (зриві зв'язку) для забезпечення зв'язку між командними пунктами, бо забезпечуватиметься робота тільки 1 радіомережі.

ВИСНОВКИ

При виконанні атестаційної роботи були проаналізовані основні методи розширення спектру, під час аналізу кожного приведені математичні основи цих методів, структурні схеми передавальних та приймальних пристроїв. До цих методів відносяться:

- Direct Sequence Spread Spectrum;
- Orthogonal Frequency–Division Multiplexing;
- Ultra Wide Band сигнали;
- широкосмугові сигнали з лінійною зміною частоти.

Основну увагу було звернуто на метод псевдовипадкової перебудови робочої частоти.

Проведено детальний аналіз завадостійкості при впливі різних типів навмисних завад на засіб радіозв'язку, що використовує ЧМ.

Розглянуто вплив шумової завади у частині полоси, шумової завади у відповідь та гармонічної радіозавади при їх впливі на основний та додатковий канали демодулятора.

Встановлені залежності ймовірності помилкового прийому від різних параметрів та факторів, що впливають на канал радіозв'язку. Приведені графіки цих залежностей.

Виконано побудову математичної моделі системи зв'язку з використанням методу розширення спектру шляхом псевдовипадкової перебудови робочої частоти. Аналіз цієї моделі виконувався з використанням різних видів модуляції. Зімітовано вплив на модель навмисних радіоелектронних завад, для імітацій яких також було побудовано моделі генераторів цих завад.

Після аналізу результатів моделювання можна стверджувати, що використання у системах зв'язку з ППРЧ M-FSK модуляції є найбільш доцільним, бо система з її використанням продемонструвала найбільш низький показник BER. Результати моделювання також співпадають з тенденцією розробки сучасних засобів військового зв'язку, в яких все активніше використовуються M-ічна частотна маніпуляція.

Представлено концепт пристрою для аналізу та пошуку оптимальних параметрів каналів радіозв'язку. Проведення розрахунків з використанням видозміненої формули, описаної у 3 розділі, дають можливість говорити о

гіпотетичній ефективності даного пристрою. Також, спираючись на результати, отримані при розробці моделей систем зв'язку з ППРЧ, було розроблено модель, що імітує роботу цього пристрою. Результати роботи цієї моделі демонструють більшу ефективність по завадозахищеності при впливі шуму ніж звичайні системи з ППРЧ.

Окремі результати цієї роботи опубліковані у наукових конференціях:

1) Шостій міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сумісності перспективних безпроводових мереж зв'язку» (EMC-2020), а саме:

- вдосконалення методу підвищення завадозахищеності засобу радіозв'язку з декількома передавачами;
- алгоритм підвищення завадозахищеності засобів радіозв'язку від навмисних завад з декількома передавачами.

2) Міжнародному молодіжному форумі «Радіотехніка та молодь у XXI столітті»:

- підвищення ефективності протидії широкополосним завадам.

Також робота презентувалась на I та II туру Всеукраїнського конкурсі студентських наукових робіт з технічних наук, напрям «Телекомунікації».

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Макаренко С. И. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Монография. / С. И. Макаренко, М. С. Иванов, С. А. Попов. – СПб: Свое издательство, 2013. – 166 с.
2. Кривенко О. В. Методи формування сигналу в радіозасобаз з ППРЧ в умовах впливу навмисних шумових завад. / О. В. Кривенко. // Системи озброєння і військова техніка. – 2017.
3. Волков Л. Н. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики: Учеб. пособие / Л. Н. Волков, М. С. Немировский, Ю. С. Шинаков., 2005. – 392 с
4. Максимов М. В. Защита от радиопомех / М. В. Максимов., 1976. – 496 с.
5. Скляр Б. Цифровая связь Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр; пер. с англ. Под общ. Ред. А.В. Назаренко. – М.: «Вильямс», 2003 – 1104 с.
6. Борисов В. И. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В. И. Борисов, В. М. Зинчук, А. Е. Лимарев., 2008. – 512 с.
7. Н. П. Кадет, А. В. Шишацкий, В. В. Лютов, М. В. Зірка, Оцінка впливу навмисних завад на системи радіозв'язку з псевдовипадковою перестройкою робочої частоти [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <http://jrnl.nau.edu.ua/index.php/PIU/article/view/10334>
8. Гуський Т.Г. Напрямки застосування псевдовипадкових послідовностей в радіомережах спеціального призначення / Т.Г. Гуський, О.Г. Жук, С.О. Клімович //Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2012. – №6.
9. Барушев С.В., Передерий А.В. Разработка перспективных систем связи вооруженных сил США и объединенных вооруженных сил НАТО/Зарубежная радиоэлектроника. – 2000. №27. – С. 2–20.
10. В.Г. Шолудько, М.Ю. Єсаулов, О.В. Вакуленко Організація військового зв'язку. Навчальний посібник. – К.: ВІТІ, 2017 р. – 282 с.

11. Лебедько Е.Г. Математические основы передача информации, ч. 5: учебное пособие для вузов. СПб: СПбГУИТМО, 2010. – 93 с.
12. S. Talarico. Optimization of an Adaptive Frequency-Hopping Network/S. Talarico M. C. Valenti, D. Torrieri, // IEEE Military Commun. Conf. (MILCOM), 2015.
13. Кувшинов О.В. Вибір параметрів системи рухомого радіозв'язку з ППРЧ при впливі ретрансльованої завади / О.В. Кувшинов, В.І. Глуцький, С.П. Лівенець // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ «КПІ». – 2003. – Вип. 6.
14. M. C. Valenti. Adjacent-channel interference in frequency-hoppinh ad hoc networks / M. C. Valenti, D. Torrieri, S. Talarico // in Proc. IEEE Int. Conf on Commun. (ICC), (Budapest, Hungary), Jun. 2013
15. Investigating communication architecture for tactical radio network design / [B. Suman, S.C. Sharma, M. Pant, S. Kumar] // International Journal of Research in Engineering & Applied Science.– 2012. – Vol. 2, Issue 2.
16. Computation of bit error rate of M-ary PSK with Gray code bit mapping / P.J. Lee // IEEE Trans. Commun 1986 No 34.
17. Multi-Carrier Digiatl Communications-Theory and Applications of OFDM/R. Ahmad, S. Bahai, R. Burton. – Saltzberg: WiFi Planet, 2002.
18. Цибульників Д.І. Аналіз методу підвищення заводоза-хишеності засобу радіозв'язку з декількома передавачами./ Проблеми сумісності перспективних безпроводових мереж зв'язку(EMC-2020)/ Цибульників Д.І. Єпішкін С.О.// Збірник наукових праць 2020. – Стр. 65–66.
19. Цибульників Д.І. Алгоритм підвищення заводозахищеності засобів радіозв'язку від навмисних завод з декількома передавачами / Проблеми сумісності перспективних безпроводових мереж зв'язку(EMC-2020)/ Цибульників Д.І. Єпішкін С.О.// Збірник наукових праць 2020. – Стр 67–68
20. RF-780M-НН. Multiband Networking Handheld Radio. Operational Manual – Harris Corporation< RF Communications Division, New York, 2014. 237 p.