

ВСТУП

Головною особливістю сучасного етапу розвитку систем стільникового зв'язку є перехід до систем шостого покоління – (6G). Найактуальнішою ця проблема є для операторів мереж першого покоління, які використовують стандарт NMT. Оператори мереж GSM також прикладають максимум зусиль для задоволення потреб своїх користувачів, особливо в області мобільної передачі даних. Перехід до мереж (6G) дозволяє якісно змінити ситуацію в області мобільного зв'язку та в сфері його застосування – для військових потреб.

Перш за все це пов'язано з тим, що мережі (6G) дозволяють надавати клієнтам широкий діапазон нових послуг, які можуть суттєво підвищити прибутки операторів, а виробникам збільшити обсяг продажу мережевого устаткування і телефонів.

Основною відмінністю систем (6G) від мереж другого покоління (2-5G), які експлуатуються зараз є можливість передачі великих об'ємів інформації з високими швидкостями. Це дозволяє отримати якісно новий рівень зв'язку, на основі якого можливе формування глобального інформаційного простору, доступ до якого не залежить від місця знаходження користувача та його переміщень. Внаслідок цього міняється і функціональне призначення наймобільнішого телефону - окрім засобу голосового спілкування він стає багатофункціональним пристроєм, призначеним для багатьох випадків життя.

Розроблено кілька стандартів мобільного зв'язку, в яких для забезпечення радіодоступу використовується технологія CDMA. Використання цієї технології надає ряд переваг в системах мобільного зв'язку: низький рівень потужності передавачів, висока ємність системи, висока ефективність використання частотного ресурсу та ін.

Нині технологія CDMA використовується як засіб побудови систем мобільного зв'язку третього покоління.

РОЗДІЛ 1

1.1. Аналіз перспектив розвитку сучасних систем мобільного зв'язку

У сучасному світі мобільний зв'язок став не просто зручним засобом комунікації, а критично важливою інфраструктурою, що забезпечує функціонування економіки, соціальної сфери, освіти, військової сфери та безпеки. В умовах стрімкої цифровізації суспільства постає питання не лише розширення можливостей мобільного зв'язку, а й глибокої трансформації його архітектури та функцій для потреб різних сфер функціонування.

Розглянемо еволюцію мобільного зв'язку, враховуючи як перші системи мобільного зв'язку (1G) з'явилися в 1980-х роках і забезпечували лише аналоговий голосовий зв'язок. Так і очікуване впровадження 6G після 2030 року відкриває нові горизонти: інтеграцію штучного інтелекту, повну автоматизацію, об'єднання фізичного та віртуального світів через XR (Extended Reality), квантові комунікації тощо. Про те з новими можливостями виникають нові загрози:

- зростання кіберзагроз вимагає нових підходів до захисту мереж;
- збирання великих обсягів даних може загрожувати персональній безпеці користувачів.
- високі витрати на розгортання 5G можуть призвести до цифрової нерівності.
- інфраструктурні бар'єри: у сільській місцевості та на тимчасово окупованих територіях доступ до сучасних технологій обмежений.

Становлення і розвиток систем мобільного зв'язку дає можливість зрозуміти виклики з якими стикнулися вчені, адже початок ери мобільного зв'язку був покладений ще у 1946 році в американському місті Сент-Луїс, де запрацювала перша радіотелефонна система, доступна для широкого загалу. У цій системі використовувалися радіотелефони, що працювали на фіксованих каналах зв'язку. У разі зайнятості певного каналу, абоненту доводилось вручну перемикається на інший, вільний канал. Обладнання тих часів вирізнялось громіздкістю та низькою зручністю в експлуатації.

У процесі технічного прогресу системи мобільного зв'язку поступово вдосконалювались: зменшувалися розміри пристроїв, впроваджувалися нові частотні діапазони, оновлювалось як базове, так і комутаційне обладнання, зокрема, через реалізацію функції автоматичного вибору вільного каналу. Проте разом із зростанням попиту виникли і нові труднощі.

Найсерйознішою проблемою стала обмеженість радіочастотного ресурсу: збільшення кількості каналів у межах обмеженого діапазону призводило до взаємних завад, особливо коли частоти були близькі.

Для вирішення цієї проблеми вчені з різних країн почали шукати нові концепції. Однією з ключових ідей стало розбиття території обслуговування на невеликі зони - комірки, кожна з яких покривається передавачем із визначеним радіусом дії та окремо призначеним частотним діапазоном. Ця технологія, запропонована у 1940-х роках лабораторією Bell Labs компанії AT&T, дала змогу повторно використовувати ті самі частоти в різних комірках без взаємного зашумлення.

До кінця 1970-х років п'ять північноєвропейських країн - Швеція, Фінляндія, Ісландія, Данія та Норвегія - ініціювали розробку спільного стандарту стільникового зв'язку, який отримав назву NMT-450 і був призначений для роботи в діапазоні 450 МГц. Перші системи на основі цього стандарту почали працювати у 1981 році, хоча в Саудівській Аравії запуск відбувся на місяць раніше.

Згодом мережі стандарту NMT-450 та його модифікації почали впроваджуватись у країнах Європи, Азії та Близького Сходу. У 1985 році було розроблено вдосконалений стандарт NMT-900, що забезпечував більшу абонентську ємність та розширені функції.

У США з 1983 року почала працювати перша комерційна мережа AMPS (Advanced Mobile Phone System), створена також на основі розробок Bell Laboratories. Великобританія у 1985 році затвердила національний стандарт TACS, модифікований у 1987 році до ETACS через зростання кількості користувачів у Лондоні.

Франція впровадила власний стандарт Radiocom-2000, а скандинавські країни - NMT-900. Усі перелічені системи відносяться до аналогового покоління мобільного зв'язку, яке використовувало частотну або фазову модуляцію для передавання сигналів. Однак ці системи мали істотні недоліки - можливість несанкціонованого прослуховування, низьку стійкість до завад, викликаних ландшафтом або рухомим абонентом.

До того ж, велика кількість стандартів і високе навантаження на частотні ресурси ускладнювали міждержавний зв'язок - іноді навіть сусідні країни мали несумісні мережі. Вирішенням проблеми могло стати лише або розширення частотного діапазону, або впровадження ефективніших схем частотного планування.

На межі 1980-1990-х років розвиток цифрових технологій відкрив новий етап - перехід до другого покоління мобільного зв'язку (2G), де застосовувались цифрові методи обробки сигналів. Це дозволило суттєво знизити вплив шуму, впровадити шифрування, кодування, пакетну передачу даних, компресію та забезпечити вищу якість зв'язку, що зрештою привело до появи глобального стандарту GSM.

Подальша еволюція стільникових мобільних мереж реалізується через розробку систем третього покоління (3G), головною особливістю яких є впровадження уніфікованого радіоінтерфейсу. Така інтегрована система повинна об'єднати наявні стільникові й бездротові мережі з інформаційними сервісами нового цифрового суспільства. Планується, що ці мережі матимуть єдину архітектуру та забезпечуватимуть якісний зв'язок незалежно від умов перебування абонента - чи то у транспорті, вдома чи в офісі.

У Європі ця концепція отримала назву UMTS (Universal Mobile Telecommunications System - Універсальна мобільна телекомунікаційна система). Вона передбачає інтеграцію технічних можливостей сучасних цифрових мереж у єдину глобальну систему третього покоління - FPLMTS (Future Public Land Mobile Telephone System), яка забезпечуватиме абонентів уніфікованим набором мобільних послуг. Розробку FPLMTS координує Міжнародний союз

електрозв’язку (ITU). Для реалізації цієї системи передбачено використання частот у діапазоні від 1 до 3 ГГц, із виділенням 60 МГц для стаціонарних базових станцій і 170 МГц - для мобільних. Перші польові випробування наземних компонентів очікувалися у 2000 році, а запуск супутникового сегменту, що працюватиме в діапазонах 1980–2010 МГц і 2170–2200 МГц, планувався на 2010 рік.

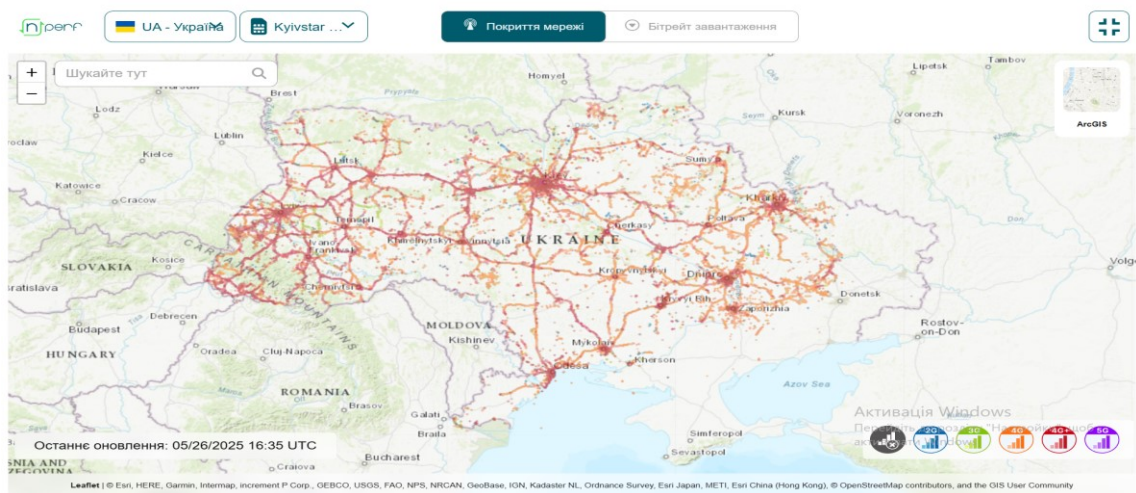


Рис. 1.1 – Карта покриття 2G-5G мобільного оператора Київстар території України.

Про те, проміжнім етапом між 1G та 6G, є технології 2G та 3G, що дозволили передавати текстові повідомлення та дані. 4G забезпечило високошвидкісний інтернет, а сучасні системи 5G кардинально змінюють архітектуру мережі, забезпечуючи мінімальну затримку, високу швидкість і масовий обсяг підключень.

Враховуючи те, що цифрові системи мобільного зв’язку, на відміну від аналогових, надають користувачам ширший спектр послуг, покращену якість з’єднання та можливість інтеграції з цифровими мережами ISDN і сервісами пакетної передачі даних (PDN). Характеристики цифрових стандартів представлені в табл. 1.1. Подальший розвиток цифрових систем мобільного зв’язку здійснюється в рамках створення проектів систем третього, четвертого і п’ятого поколінь (3G, 4G, 5G), які відрізнятимуться уніфікованою системою радіодоступу.

Таблиця 1.1 - Порівняння цифрових стандартів мобільного зв’язку

Стандарт	Покол	Метод	Частотний	Модуляції	Швидкість	Ключові можливості
----------	-------	-------	-----------	-----------	-----------	--------------------

	іння	доступу	діапазон	я	передачі	
GSM (DCS-1800)	2G	TDMA	900/1800/1900 МГц	GMSK	до 270 кбіт/с	Голос, SMS, GPRS
D-AMPS (IS-54/136)	2G	TDMA	800/1900 МГц	$\pi/4$ DQPSK	до 64 кбіт/с	Голос, обмежена передача даних
CDMA (IS-95)	2G	CDMA	800/1900 МГц	QPSK	до 115 кбіт/с	Підвищена ємність, передача голосу й даних
WCDMA (UMTS)	3G	CDMA	2100 МГц	QPSK	до 2 Мбіт/с	Відеозв'язок, мобільний інтернет
HSPA/HSPA+	3.5G	CDMA	850/900/1900/2100 МГц	QPSK, 16QAM	до 42 Мбіт/с (DL)	Швидке завантаження/вивантаження даних
LTE (4G)	4G	OFDMA (DL), SC-FDMA (UL)	700–2600 МГц	QPSK, 16QAM, 64QAM	до 300 Мбіт/с (DL)	Високошвидкісний мобільний інтернет, VoLTE
5G NR	5G	OFDMA, Massive MIMO	<1 ГГц, 3.5 ГГц, 26–100 ГГц	QPSK, 256QAM	до 10 Гбіт/с (теоретично)	Наднизька затримка, IoT, віртуальна реальність

Отже, масовими напрямками розвитку систем мобільного зв'язку і світі є:

- підключення пристроїв (Massive IoT): 5G вже дозволяє мільйонам пристроїв підключатися до мережі без втрати якості зв'язку.
- Low Latency (низька затримка): критично важлива для автономного транспорту, телемедицини, AR/VR технологій.
- Edge Computing: обробка даних ближче до джерела їхнього виникнення для прискорення взаємодії.
- Штучний інтелект: оптимізація управління мережами та передбачення навантаження.
- Енергоефективність: нові протоколи зв'язку знижують енергоспоживання, що важливо для сталого розвитку.

Що стосується розвитку систем мобільного зв'язку в Україні, враховуючи «Стратегію розвитку сфери електронних комунікацій України – 2030», то в нашій державі активно впроваджує технології 4G/5G, зокрема в містах та на магістральних маршрутах. З 2023 року уряд анонсував активну підтримку розгортання 5G через пілотні проекти та стратегію цифрової трансформації.

Сучасні системи мобільного зв'язку виступають важливим рушієм трансформації суспільства, сприяючи переходу до *третьої хвилі* за Елвіном Тоффлером - інформаційної епохи, де ключову роль відіграють знання, технології та комунікації. Україна має як технічний потенціал, так і наукову базу для активної участі у глобальному процесі переходу до 5G та 6G. Підтримка наукових досліджень, державні ініціативи здатні зробити Україну не лише споживачем, а й повноцінним творцем інновацій у сфері мобільного зв'язку.

1.2. Аналіз використання широкосмугових сигналів в перспективних системах мобільного зв'язку

У сучасних телекомунікаційних системах спостерігається стрімке зростання обсягів передавання інформації, потреба в високій швидкості, надійності та захищеності зв'язку. У зв'язку з цим широкосмугові сигнали (ШС-сигнали) стали ключовою технологією в побудові новітніх бездротових мереж, зокрема систем 3G, 4G (LTE) і 5G, а також у розробках наступного покоління - 6G.

До широкосмугових належать такі сигнали, спектральна ширина яких набагато перевищує мінімально необхідну смугу частот для передавання інформації - тобто перевищує межу Найквіста. Наприклад, для одновірних двійкових сигналів умова широкосмуговості виглядає як:

$$\Delta f_{\min} = R_{\text{кан}}, \quad (1.1)$$

де $R_{\text{кан}}$ – швидкість двійкових символів в каналі зв'язку.

Це означає, що широкосмугові сигнали найчастіше використовуються в цифрових системах зв'язку. Їх також називають сигналами з розширеним спектром. Розширення спектра у таких сигналах є свідомим технологічним прийомом, який забезпечує низку важливих властивостей:

- зменшення спектральної густини потужності, що дозволяє реалізовувати приховану передачу інформації. Це особливо важливо для військового зв'язку, де необхідна низька помітність сигналу.

- стійкість до вузькосмугових завад - сигнал з розширеним спектром значно менш чутливий до перешкод, що надходять в обмеженому частотному

діапазоні. Така властивість широко використовується в бездротових технологіях, зокрема в Bluetooth (2,45 ГГц).

- кореляційні властивості, які дозволяють ефективно розділяти сигнали в середовищі з багатьма джерелами. Це ключовий принцип у системах з кодовим розділенням каналів (CDMA), де багато абонентів передають дані через спільний радіоканал.

Таблиця 1.2 - Практичне застосування широкосмугових сигналів у мобільному зв'язку

Технологія / Покоління	Ключова особливість	Тип сигналу	Переваги
CDMA / 3G (UMTS)	Кодовий множинний доступ (Code Division Multiple Access)	Пряме розширення спектра (DSSS)	- Паралельна передача від багатьох користувачів - Захищеність від завад
OFDMA / 4G (LTE)	Ортогональний частотний розподіл каналів	Мультиплексовані сигнали (OFDMA)	- Ефективне розділення користувачів - Висока спектральна ефективність
OFDMA + Massive MIMO / 5G NR	Комбінація широкосмугових методів і багатопроменевого доступу	Широкосмугові канали (до 100 МГц і більше)	- Надвисока пропускна здатність - Ультранизька затримка - Підтримка IoT

Отже, у системах кодового множинного доступу (КМД) переважно використовуються сигнали з прямим розширенням спектра, що досягається шляхом модуляції інформаційних символів псевдовипадковою послідовністю з високою швидкістю зміни чипів, яка істотно перевищує швидкість передавання даних. Суть методу полягає у множенні кожного інформаційного символу на псевдовипадкову послідовність (ПВП) з високою швидкістю зміни чипів (елементів), що значно перевищує швидкість передавання самих даних:

$$F_{chip} \gg R_b \quad (1.2)$$

Сформований таким чином сигнал подається на вхід модулятора (наприклад, ФМ-2). Структура модулятора зображена на рис. 1.2 і включає: ДЦС - джерело цифрових сигналів, ГПВП - генератор псевдовипадкової послідовності, ФНЧ - фільтр нижніх частот, ОГ - опорний генератор.

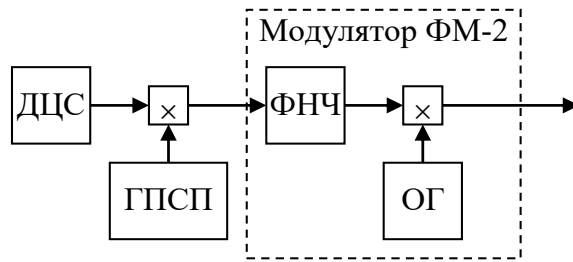


Рис.1.2 – Схема модулятора з прямим розширенням спектру

В схемі модулятора наявність ФНЧ, АЧХ якого $\sqrt{N(f)}$, де $N(f)$ – спектр Найквіста. Задача ФНЧ полягає в обмеженні спектра широкосмугового сигналу з метою економії полоси частот. У підсумку, спектральна ширина сигналу з прямим розширенням при використанні частотної маніпуляції типу ФМ-2 визначається за такою залежністю:

$$\Delta f_{\text{пр}} = (1 + \alpha) R_{\text{чип}} = (1 + \alpha) N R_{\text{кан}}, \quad (1.3)$$

де α – коефіцієнт округлення спектру Найквіста;

N – число елементів (чипів) ПСП, які припадають на один тактовий інтервал.

В якості ГПСЧ можна використати одну з функцій Уолша $\psi_i(t)$. Функції Уолша створюють систему ортогональних сигналів і є послідовністю $N = 2^i$ двохрівневих імпульсів, знаки яких задаються відповідною матрицею Адамара H_N , тут $i = 0, 1, 2, \dots$ матриці Адамара будуються за наступним правилом:

$$H_1 = [1]; \quad H_N = \begin{bmatrix} H_{N/2} & H_{N/2} \\ H_{N/2} & -H_{N/2} \end{bmatrix}. \quad (1.3)$$

Отже, використання функції Уолша у цифрових системах зв'язку, зокрема при реалізації сигналів з розширеним спектром у технологіях множинного доступу, таких як CDMA (Code Division Multiple Access) дозволяє вирішити задачі: забезпечення ефективного доступу великої кількості користувачів до

обмеженого ресурсу - середовища передавання даних. Це завдання умовно поділяється на два основні аспекти:

- розподіл доступного ресурсу на окремі логічні канали передавання;
- призначення сформованих каналів конкретним абонентським пристроям.

Ці функції створюють ортогональну систему сигналів, тобто кожна функція Волша є ортогональною до всіх інших у наборі. Це дозволяє використовувати їх для поділу загального каналу між кількома користувачами, забезпечуючи незалежність переданих сигналів та зменшення взаємних завад.

Існує низка базових методів множинного доступу, які ще називають методами ущільнення або мультиплексуванням. Вони реалізуються за рахунок поділу між абонентами одного або кількох параметрів середовища — таких як частота, час, код або простір — із метою мінімізації взаємних завад і максимально ефективного використання доступного радіоресурсу.

Серед основних технологій поділу середовища виділяють:

- FDMA (Frequency Division Multiple Access) — розділення за частотою;
- TDMA (Time Division Multiple Access) — розділення за часом;
- CDMA (Code Division Multiple Access) — розділення за кодом;
- SDMA (Space Division Multiple Access) — просторове розділення.

FDMA — це технологія, за якої кожному користувачу надається окрема смуга частот із загального діапазону, причому вона залишається за абонентом постійно — на 100% часу. Таким чином, розділення здійснюється виключно по частотному параметру, без часової сегментації.

Цей метод широко застосовувався в аналогових стільникових мережах першого покоління, а також використовується в сучасних цифрових системах зв'язку — здебільшого у комбінації з іншими методами множинного доступу. FDMA забезпечує просту реалізацію, однак має нижчу спектральну ефективність порівняно з сучаснішими методами (CDMA, OFDMA), де один частотний діапазон може одночасно використовуватися декількома користувачами за рахунок кодового чи часово-кодової модуляції.

1.3. Огляд сучасних методів генерації широкосмугових сигналів, орієнтованих на використання в системах синхронізації за часом

Огляд методів генерації широкосмугових сигналів для систем часової синхронізації є важливим етапом у розробці високоточних навігаційних, комунікаційних і часових систем. У таких системах використовуються сигнали зі значною шириною спектру для досягнення високої роздільної здатності за часом і стійкості до завад. Нижче наведено огляд найпоширеніших методів формування широкосмугових сигналів.

Метод прямої послідовності розширення спектру (DSSS — Direct Sequence Spread Spectrum, GPS L1 C/A (1.023 МГц ПБП), Galileo E1 OS) базується на принципі модуляції інформаційного сигналу за допомогою псевдовипадкової послідовності (ПБП) з високою частотою, що значно перевищує частоту даних. Основні характеристики: ПБП має високі кореляційні властивості, висока завадостійкість, висока точність синхронізації (до наносекунд). Метод частотного розширення спектру (FHSS — Frequency Hopping Spread Spectrum) - передача сигналу на різних частотах, що швидко змінюються відповідно до певної псевдовипадкової послідовності. Характеристики: менша точність синхронізації порівняно з DSSS, краще захищений від вузькосмугових перешкод, обмежене використання в сучасних системах синхронізації.

Ультраширокосмугові сигнали (UWB — Ultra-Wideband) - передача надкоротких імпульсів (наносекунди), які займають дуже широкий спектр (від сотень МГц до кількох ГГц). Характеристики: надвисока точність визначення часу (до пікосекунд), використовується в мікронавігації, локалізації в приміщеннях, слабкий рівень сигналу — мінімальний вплив на інші системи. Застосовується в: IEEE 802.15.4a (UWB), Apple AirTag, системи RTLS (Real-Time Location Systems).

Сигнали з лінійною частотною модуляцією (LFM — Linear Frequency Modulation) - зміна частоти сигналу лінійно з часом (часто у вигляді «чипу»).

Характеристики: високі кореляційні властивості, висока роздільна здатність у часі, стійкість до доплерівських зсувів. Застосування: радарні системи, деякі спеціалізовані часові системи.

Комбіновані методи (наприклад, BOC — Binary Offset Carrier) - комбінація методів для досягнення оптимального балансу між точністю, завадостійкістю і енергоспоживанням.

Таблиця 1.3 – порівняльні характеристики методів широкосмугових сигналів для систем часової синхронізації

Метод	Ширина спектру	Точність синхронізації	Завадостійкість	Приклади застосування
DSSS	Висока	Висока (нс)	Висока	GPS, Galileo, GLONASS
FHSS	Середня	Середня	Висока	Старі військові системи
UWB	Дуже висока	Дуже висока (пс)	Висока	RTLS, UWB-сенсори
LFM	Висока	Висока	Середня	Радар, спеціалізовані системи
BOC та інші	Висока	Висока	Висока	Galileo, модернізований GPS

Незважаючи на велику кількість методів передачі широкосмугових сигналів для систем часової синхронізації, майже у всіх використовують автокореляційну функцію.

Висновки за розділом

У даному розділі було проведено аналіз широкосмугових сигналів як основи для реалізації сучасних систем бездротового зв'язку з підвищеними вимогами до надійності, завадостійкості та ефективного використання спектра.

1. Широкосмугові сигнали характеризуються великим відношенням ширини спектра до швидкості передачі даних, що забезпечує високу завадостійкість та захищеність переданої інформації.
2. Сигнали з розширенням спектра (spread spectrum), включаючи DSSS і FHSS.
3. Особливу увагу приділено псевдовипадковим (псевдошумовим) послідовностям, зокрема m-послідовностям та Gold-послідовностям, які

мають гарні кореляційні властивості та широко застосовуються у стандартах CDMA, LTE та 5G.

4. Проаналізовано кореляційні функції широкосмугових сигналів. Було показано, що:

- автокореляційна функція має яскраво виражений пік при нульовому зсуві, що забезпечує точне виявлення сигналу.
- взаємкореляційна функція між різними кодами має низькі значення, що дозволяє ефективно розділяти канали в багатокористувацьких системах.

5. Обґрунтовано доцільність застосування широкосмугових сигналів у сучасних та перспективних системах зв'язку, зокрема у 5G, 6G, IoT, радіолокації, бездротових сенсорних мережах та безпілотних системах.

Таким чином, широкосмугові сигнали є ключовим елементом сучасних технологій зв'язку, забезпечуючи високу якість обміну даними в умовах складного радіоелектронного середовища.

РОЗДІЛ 2

КОДОВЕ РОЗДІЛЕННЯ КАНАЛІВ

2.1 Множинний доступ до цифрових каналів зв'язку

Одним із основних завдань під час проєктування бездротових систем є забезпечення ефективного доступу великої кількості користувачів до спільного й обмеженого ресурсу — середовища передавання даних. Процес реалізації множинного доступу умовно поділяється на два етапи:

- розподіл загального ресурсу на індивідуальні канали передачі;
- закріплення цих каналів за конкретними пристроями або абонентами.

Сьогодні застосовується низка базових підходів до множинного доступу, які також називають методами мультиплексування або ущільнення. Вони реалізують розділення спільного каналу за одним або кількома з параметрів — частотою, часом, кодом чи просторовим розміщенням. Для зменшення взаємних завад та забезпечення максимально ефективного використання доступного радіочастотного ресурсу застосовують різні методи розділення каналів, зокрема:

- розділення за частотою (FDMA — Frequency Division Multiple Access);
- розділення за часом (TDMA — Time Division Multiple Access);
- розділення за кодом (CDMA — Code Division Multiple Access);
- розділення за просторовими ознаками (SDMA — Space Division Multiple Access).

2.1.1 Методи організації множинного доступу в бездротових системах зв'язку

FDMA — метод, за якого кожному користувачу виділяється окрема смуга частот тобто канали зв'язку розділяються за частотою. Стандарт FDMA широко використовується як в традиційних аналогових системах стільникового зв'язку, так і в сучасних цифрових системах (як правило, у поєднанні з іншими методами). Зі всього доступного діапазону кожному абонентові виділяється своя смуга частот, яку він може використовувати всі 100% часу. Таким чином, не часові інтервали, а тільки відмінності в частоті використовуються для розділення інформації абонентів.

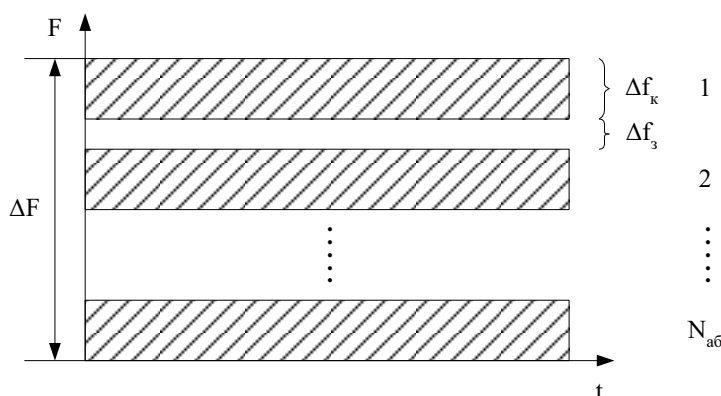


Рис.2.1. Принцип розподілу каналів за частотними діапазонами

Цей підхід має помітні переваги: вся інформація передається в реальному часі, і абонент дістає можливість використовувати всю смугу пропускання, виділеного йому сегменту. Ширина смуги сегменту може змінюватися залежно від використовуваної системи зв'язку. У межах визначеного частотного діапазону ΔF кількість доступних користувачів визначається наступним чином:

$$N_{аб} = \frac{\Delta F}{\Delta f_к + \Delta f_з}, \quad (2.1)$$

де $\Delta f_к$ — це смуга частот каналу, яку займає корисний сигнал, зазвичай нормована на рівні — 20 дБ від його максимального значення; $\Delta f_з$ — захисний інтервал, що забезпечує розділення між сусідніми сигналами для уникнення взаємних завад.

Підвищити ефективність використання частотного спектра — а саме збільшити кількість одночасно активних абонентів без зниження швидкості передачі даних у кожному каналі — можна шляхом використання багатопозиційних методів модуляції (КАМ-64, КАМ-128, КАМ-256, КАМ -128). Це дає змогу зменшити ширину частотної смуги, необхідної для одного каналу. Наприклад, перехід від модуляції ФМ-2 до КАМ-64 забезпечує кратне зростання спектральної ефективності в 6 раз. Водночас існують фундаментальні обмеження щодо мінімізації використовуваної смуги частот.

Основною перевагою технології FDMA є простота реалізації обладнання, особливо у порівнянні з TDMA. Застосування FDMA не вимагає синхронізації між каналами, оскільки кожен із них працює автономно. Найважливішим недоліком FDMA є обмеження на кількість абонентських станцій — вона не може перевищувати значення $N_{аб}$ (2.1).

2.1.2 Множинний доступ із розподілом каналів за часовими інтервалами

TDMA – система організовує множинний доступ з часовим розділенням до каналів зв'язку. Стандарт TDMA активно використовується сучасними цифровими системами рухомого зв'язку. На відміну від систем з частотним розділенням, у системах TDMA всі абоненти працюють у спільному частотному діапазоні, проте доступ до каналу зв'язку для кожного з них обмежується певним часовим інтервалом. Кожному абоненту надається визначений часовий слот (кадр), протягом якого дозволяється передавати або приймати інформацію.

Коли один абонент завершує передачу, право користування всім частотним діапазоном переходить до наступного, потім — до третього, і так по колу. Після обслуговування всіх абонентів цикл повторюється. З точки зору користувача, його активність виглядає як періодичні імпульси. Чим більше абонентів у системі, тим рідше кожен із них отримує доступ до передачі, а отже — тим менше обсяг даних, який він може передати. Якщо встановити обмеження на обсяг даних, який може передавати один абонент, можна оцінити максимальну кількість користувачів, що реально може обслуговувати система з часовим розділенням. Як правило, часовий поділ каналів поєднується з частотним, і передавання даних здійснюється в межах виділеної частотної смуги.

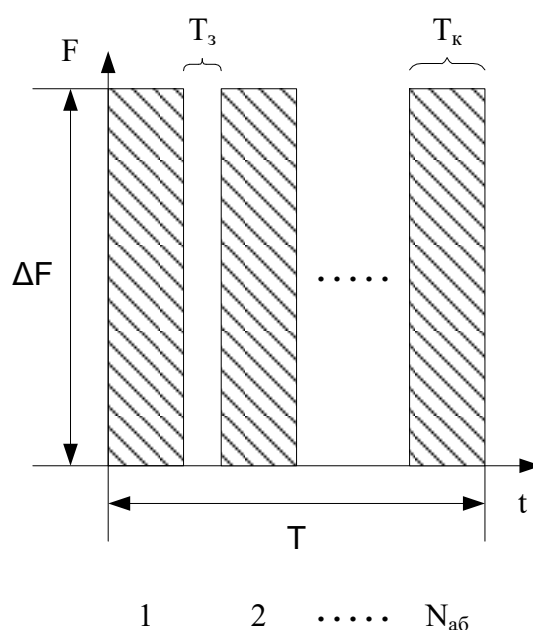


Рисунок 2.2 - Принцип розподілу каналів за часовими інтервалам

Отже, метод TDMA дозволяє організувати кілька фізичних каналів у межах одного частотного діапазону. Для практичного використання TDMA необхідне перетворення сигналів у цифровий формат. Кожній абонентській станції надається повна смуга частот, але лише на визначений часовий інтервал T_k . Між часовими інтервалами T_k вводяться захисні інтервали T_z , які дозволяють знизити взаємні завади між сусідніми часовими каналами до допустимого рівня.

Загальне число абонентів для TDMA схеми визначається виразом:

$$N_{аб} = \frac{T}{T_k + T_z} \quad (2.2)$$

На практиці у бездротових системах зв'язку часто застосовується комбінований підхід, який поєднує методи FDMA та TDMA. У таких системах частотний спектр поділяється на певну кількість окремих частотних каналів, а кожен з них, у свою чергу, розділяється за часом на кілька часових інтервалів. Ця схема дозволяє ефективніше використовувати доступні ресурси радіочастотного спектра. Подібна структура характерна для таких систем, як GSM, IS-54/136 та японська стільникова система PDC.

У порівнянні з чистим FDMA, технологія TDMA забезпечує гнучкіший розподіл ресурсів між абонентами. Завдяки здатності абонентських станцій (АС) здійснювати прийом у заданому частотному діапазоні та одночасно моніторити кілька часових каналів, можливе оперативне встановлення зв'язку без затримок. Це суттєво спрощує управління ресурсами мережі.

Разом із цим, системи на основі TDMA мають підвищені вимоги до точної синхронізації між передавачами та приймачами. Важливу роль відіграє стабільність переходів між часовими інтервалами. Крім того, для підтримки синхронізації необхідно регулярно передавати спеціальні сигнали, що збільшує обсяг службової інформації у переданих пакетах та впливає на загальну ефективність використання пропускну здатності.

Множинний доступ за допомогою кодового розподілу каналів зв'язку

2.1.3 Множинний доступ за допомогою кодового розділення каналів зв'язку

CDMA (Code Division Multiple Access) – це метод множинного доступу, при якому всі користувачі передають свої дані в одному і тому ж частотному діапазоні одночасно, але кожному абоненту призначається унікальний код розширення спектра. Завдяки цьому коду інформаційні потоки стають відмінними один від одного та можуть передаватися одночасно без взаємних завад.

У системах CDMA передача даних відбувається в загальній широкій смузі частот, яку одночасно використовують усі абоненти. Кожен передавач «розтягує» свій сигнал по всій смузі за допомогою псевдовипадкового кодового послідовності (PN-коду), унікального для кожного користувача. На приймальній стороні той самий код використовується для виділення потрібного сигналу з-поміж усіх інших та зниження рівня шуму і перешкод.

Головна особливість CDMA — те, що всі користувачі поділяють один і той самий частотний канал, але сигнал кожного користувача виділяється за допомогою коду. Це дозволяє ефективно використовувати доступний спектр, оскільки весь частотний діапазон залишається спільним для всіх. Кожен голосовий або даний потік займає всю ширину частотної смуги, що робить канал дуже широкосмуговим.

До переваг CDMA можна віднести високу стійкість до перешкод, підвищену безпеку передавання та гнучкість у використанні ресурсів мережі. Проте для коректної роботи таких систем необхідна точна синхронізація та складні алгоритми обробки сигналів, що ускладнює реалізацію обладнання. Системи CDMA широко використовуються в мобільному зв'язку, зокрема в таких стандартах, як IS-95 (cdmaOne) та cdma2000.

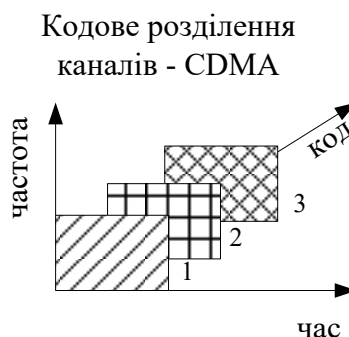


Рис. 2.3 – Принцип кодового розділення каналів

Метод CDMA пропонує відповідь проблему малої ємності. Основна особливість CDMA – використання шумоподібних сигналів. Замість розділення спектра частот для передачі інформації, або часових інтервалів, кожен користувач використовує шумоподібний сигнал. Головною перевагою використання шумоподібних сигналів є зменшення чутливості впливу шуму.

Метод CDMA може поєднуватися з іншими технологіями множинного доступу, зокрема з FDMA та TDMA. У разі інтеграції CDMA з FDMA спочатку увесь доступний частотний спектр розподіляється на окремі смуги, і в межах кожної з них застосовується кодове розділення каналів. Якщо ж CDMA

комбінується з TDMA, то часовий кадр поділяється на окремі слоти, у кожному з яких передача даних відбувається із використанням унікальних кодів CDMA. Такий підхід дозволяє гнучко організовувати ресурсне управління системою та підвищувати її ефективність.

2.1.4 Особливості використання методу CDMA в системах стільникового зв'язку

У технології CDMA одночасно може працювати велика кількість користувачів (зазвичай від 30 до 50), які використовують спільну смугу частот, що є відносно широкою (не менше 1 МГц). Поділ доступу до каналу відбувається шляхом призначення кожному користувачу унікального коду. У цьому методі немає поділу в часі — усі користувачі одночасно мають доступ до всього частотного діапазону. Хоча сигнали абонентів накладаються один на одного, завдяки застосуванню різних кодів їх можна безпомилково розпізнати. Як і TDMA, CDMA реалізується виключно в цифровому вигляді.

Ключовими перевагами методу CDMA, що базується на принципі спектрального розширення та кодового розділення фізичних каналів, є стійкість до завад, висока ефективність в умовах багатопроменевого поширення сигналу та значна місткість системи.

У CDMA використовуються кілька технічних прийомів, таких як контроль рівнів сигналу, застосування секторних антен на базових станціях, а також режим мовної активності (випромінювання сигналу лише під час розмови). Крім того, можливість динамічно змінювати кількість активних каналів у межах наявного ресурсу дозволяє працювати при мінімально допустимому співвідношенні сигнал/шум. Завдяки цьому система досягає максимальної пропускної здатності та місткості. Водночас, впровадження таких рішень вимагає складної технічної реалізації.

Ще однією особливістю CDMA є відсутність необхідності у плануванні частот. Усі комірки працюють в одному і тому ж частотному діапазоні. Наприклад, згідно зі стандартом Qualcomm, якщо для CDMA виділена смуга ширша за мінімально необхідну (1,23 МГц), то в кожній комірці використовуються ідентичні піддіапазони шириною 1,23 МГц. У цьому випадку коефіцієнт ефективності повторного використання частот становить приблизно $2/3$, що означає, що в кожній комірці кількість доступних каналів зменшується приблизно в 1,5 раза внаслідок перешкод від сусідніх комірок. Для порівняння, у схемі з 7-комірковим кластером для TDMA та FDMA ці значення відповідно становлять $1/7$ і 7.

CDMA також підтримує механізм «м'якої передачі з'єднання». Коли мобільний абонент наближається до межі зони покриття і рівень сигналів від поточної та сусідньої базових станцій приблизно зрівнюється за потужністю, система починає формувати додатковий канал через сусідню базову станцію. У цей час обидва канали працюють паралельно, дозволяючи терміналу приймати сигнали з обох станцій завдяки використанню Rake-приймача. Такий режим триває доти, доки сигнал від нової базової станції не стане явно сильнішим за попередній. Лише після цього попередній канал закривається, завершуючи процес передачі з'єднання.

Метод CDMA потребує точної синхронізації базових станцій системи. Це можна забезпечити, наприклад, за допомогою супутникової навігаційної системи GPS, проте в такому випадку система стільникового зв'язку перестає бути автономною.

У реальних системах зв'язку на основі CDMA забезпечується підвищена конфіденційність переданої інформації завдяки використанню довгих кодових послідовностей. Висока завадостійкість CDMA та розподіл енергії по широкій частотній смузі дозволяють одночасно працювати в цій смузі декільком вузькосмуговим каналам зв'язку з мінімальним рівнем взаємних перешкод.

Метод CDMA забезпечує високу надійність передачі завдяки стійкості до завад і здатності функціонувати в складних умовах багатопроменевого середовища. Крім того, не використовується частотне планування, дозволяє «м'яку передачу обслуговування», але все це вимагає обов'язкового використання достатньо складних технічних рішень: акуратного регулювання рівня сигналів, застосування секторних антен і оцінки «мовної активності», точної синхронізації БС, причому останнє може бути пов'язане з втратою автономності системи.

Як оцінка ємності системи, в термінах еквівалентного числа фізичних каналів на комірку, іноді приводять коефіцієнт збільшення порядку 20 порівняно з методом FDMA стандарту AMPS. Якщо врахувати, що перехід від FDMA до TDMA збільшує число фізичних каналів в три рази, а при напівшвидкісному кодуванні в шість разів, перехід від TDMA до CDMA може забезпечити приблизно триразове збільшення числа каналів.

Проте фактично можливий сильніший вплив завад в CDMA, чим приймалося в розрахунках, а також в деяких ситуаціях може виникнути необхідність щільнішого розташування БС. Ці чинники ведуть до зниження ємності системи. Крім того, метод TDMA має додаткові можливості: стрибки по частоті (передбачені, зокрема, стандартом GSM), які, у поєднанні з імпульсним випромінюванням (оцінка «мовної активності») і оперативним регулюванням

потужності випромінювання, пом'якшують вплив релесівських завмирань і знижують середній рівень завад, тобто дозволяють реалізувати великі значення коефіцієнта повторного використання частот. Системи зв'язку на базі методу CDMA, володіючи рядом переваг вказаних вище, мають велику перспективу для подальшого використання як системи 3G.

2.2 Пряме розширення спектра сигналів

Є кілька методів розширення спектра сигналів:

- використання прямого розширення спектра – DSSS;
- використання стрибків частоти – FHSS;
- використання випадкового часу передачі – TBSS;
- використання комбінованих методів.

Використання методу CDMA неможливе без попереднього розширення спектра передаваних сигналів. Для цього кожному абоненту призначається унікальна кодова послідовність, яка дозволяє відокремити з загального ефірного потоку саме той сигнал, адресований конкретному користувачу. Завдяки можливості генерувати велику кількість унікальних кодів, система може одночасно обслуговувати значно більше з'єднань, ніж методи, що базуються на розподілі частотної смуги на окремі канали.

Найпоширенішим є метод прямого розширення спектра сигналів (англ. Direct Sequence Spread Spectrum — DSSS). У результаті спектр модуляційного сигналу значно розширюється, а його амплітуда зменшується.

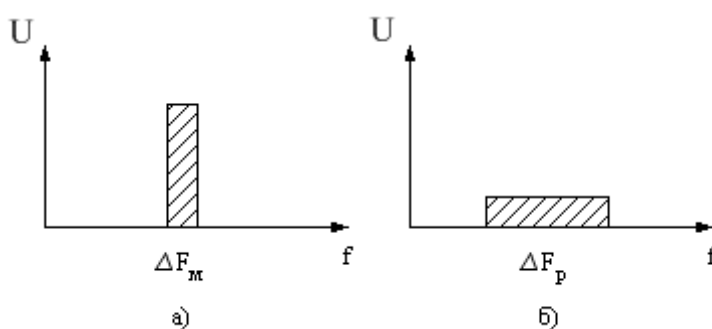


Рис.2.4. Амплітудний спектр модульованого сигналу:
а) вузькосмугового, б) з розширеним спектром

За визначенням [5] відношення розширеної ширини спектра ΔF_p модульованого сигналу до мінімальної ширини спектра ΔF_m , необхідної для передачі певного сигналу, називається коефіцієнтом розширення спектра тобто базою сигналу:

$$G = \frac{\Delta F_p}{\Delta F_m} \quad (2.3)$$

Після розширення спектра цифровий сигнал застосовується для модуляції несучої частоти. В результаті спектр такого сигналу стає схожим на шум, а передана потужність рівномірно розподіляється по широкій частотній смузі. У системах типу DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) розширення спектра здійснюється шляхом безпосереднього множення інформаційного потоку на псевдовипадкову бінарну послідовність.

Нехай тривалість одного інформаційного біта становить T_b . Для його кодування застосовується кодова послідовність довжиною G . Кожен елемент цієї послідовності, що називається чіпом, має тривалість $T_c = T_b/G$ секунд (див. рис. 2.5). У результаті такого перетворення формується сигнал з розширеним спектром, ширина якого визначається параметрами псевдовипадкової послідовності й збільшується приблизно в G разів порівняно з початковим інформаційним сигналом.

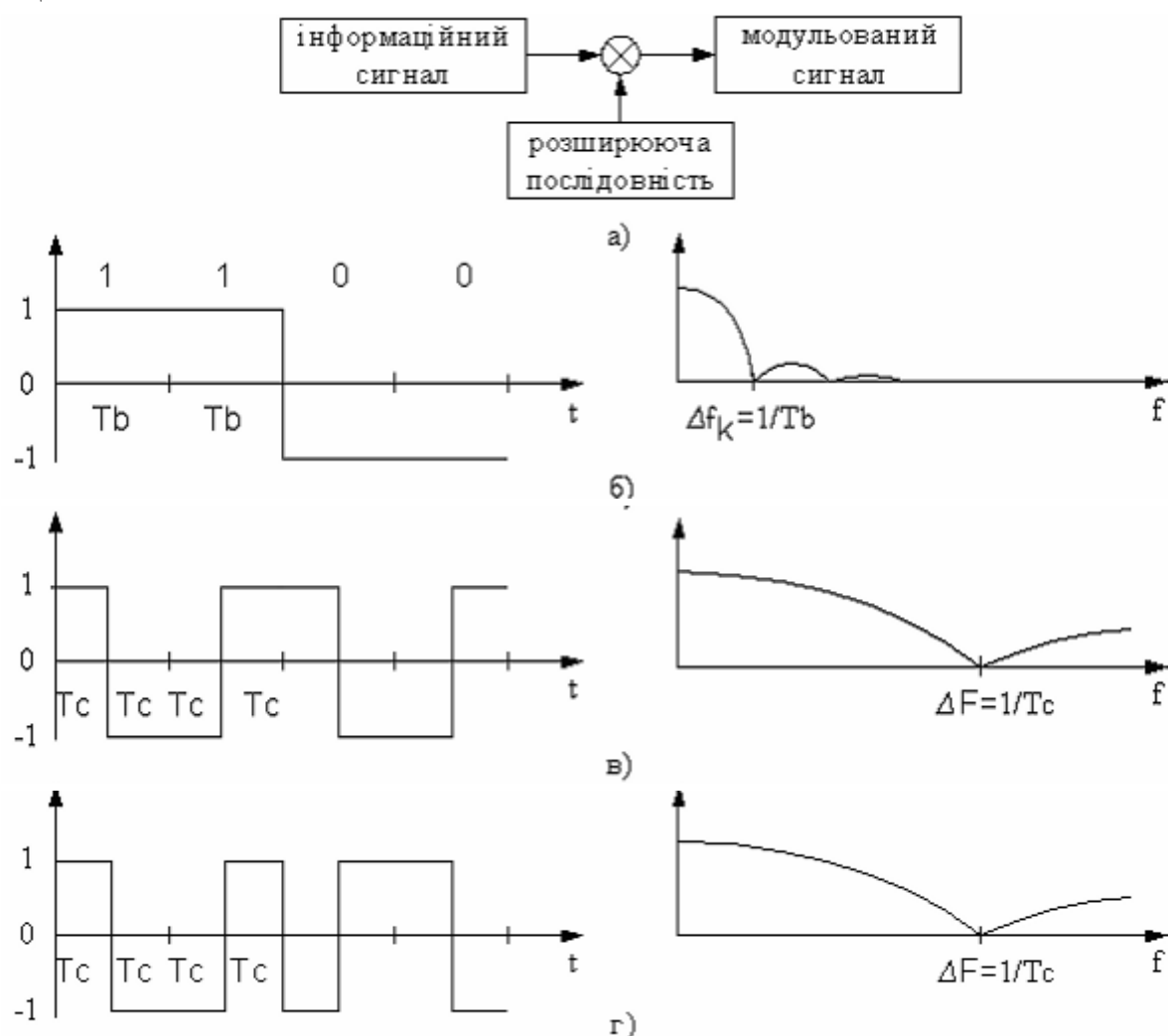


Рисунок 2.5 – Формування широкосмугового моделюючого сигналу методом DSSS

а) блок-схема формувача шумоподібного сигналу, б) вхідний сигнал (П-імпульс) та його спектр, в) унікальна кодова послідовність для розширення спектра, г) широкосмуговий модульований сигнал

Ширина смуги інформаційного сигналу в системах з розширенням спектра може збільшуватися в десятки, сотні й навіть тисячі разів (коефіцієнт розширення G від 10 до 10 000) за допомогою представлення сигналу спеціальними бінарними послідовностями. Такі послідовності формуються таким чином, щоб для зовнішнього спостерігача вони виглядали як випадковий шум — тобто мали властивості, максимально наближені до білого шуму. Завдяки цьому забезпечується скритність передачі та захист від перехоплення.

Оскільки тривалість кожного елемента цієї послідовності — чіпа — значно менша за тривалість інформаційного біта, спектр сигналу розширюється у відповідну кількість разів. Наприклад, якщо тривалість біта T_b , а послідовність складається з G чіпів, тривалість одного чіпа буде $T_c = T_b/G$, а ширина спектра зросте приблизно в G разів. Це дозволяє формувати сигнал з високою завадостійкістю і забезпечити більшу кількість одночасних користувачів.

Перевага широкосмугових сигналів полягає в їхній низькій чутливості до різноманітних перешкод. При поширенні між базовою станцією та мобільним пристроєм сигнал неодноразово відбивається від будівель, поверхонь, споруд тощо. Це викликає явище багатопроменевого поширення, коли до приймача доходить не лише прямий сигнал, а й кілька його копій з різними затримками й фазовими змінами. Такий ефект призводить до інтерференції, яка може або підсилювати, або ослаблювати сигнал — у випадку конструктивної або деструктивної інтерференції відповідно. Зниження рівня сигналу в результаті цього явища відоме як федінг (fading), і може бути критичним для звичайних вузькосмугових систем.

Для боротьби з цим ефектом у приймачах CDMA використовуються спеціалізовані пристрої — Rake-приймачі. Вони здатні виявляти та обробляти кілька копій одного і того ж сигналу, що прийшли з різною затримкою, синхронізуючись із найсильнішою складовою. Інші копії можуть або додаватися, або відкидатися в процесі кореляційної обробки, що дозволяє значно покращити якість прийому в умовах багатопроменевості.

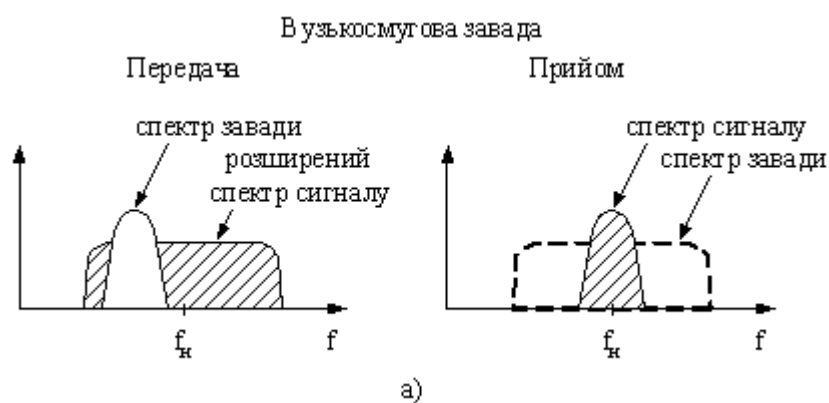
Процес передачі в системах DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) базується на множенні інформаційної послідовності на псевдовипадкову кодову послідовність у передавачі. Це призводить до значного розширення спектра. У

приймачі сигнал знову перемножується на ту ж саму кодову послідовність, у результаті чого спектр звужується до початкової ширини. Це властивість сигналів з розширеним спектром критично важлива для боротьби з завадами.

Уявімо, що в каналі присутня вузькосмугова завада (наприклад, сигнал перешкоди). Коли на вхід приймача потрапляє і корисний сигнал, і завада, кореляційний процес у DSSS дозволяє "звужити" корисний сигнал до його початкового вигляду, тоді як спектр завади, що не корелює з кодом, залишиться розширеним. Завдяки цьому, при фільтрації корисного сигналу лише незначна частка енергії завади потрапляє в корисну смугу, що значно знижує її вплив. Саме через цю властивість навіть інтенсивні перешкоди не викликають серйозного погіршення якості зв'язку.

Додатково, широкосмугові сигнали дозволяють ефективно справлятися з втратами внаслідок завмирання, оскільки ефекти федінгу зазвичай впливають лише на вузький фрагмент частотного спектра. Завдяки розширенню спектра, інформація, що втратилася в одному частотному діапазоні, все ще може бути відновлена з інших незашкоджених частин сигналу.

На сьогодні технологія CDMA та методи DSSS активно використовуються в різних галузях бездротового зв'язку — зокрема, в стільникових мережах 3G (наприклад, WCDMA), у військовому зв'язку, супутникових системах та інших сферах, де важливі стійкість до завад, конфіденційність переданих даних і ефективне використання спектра



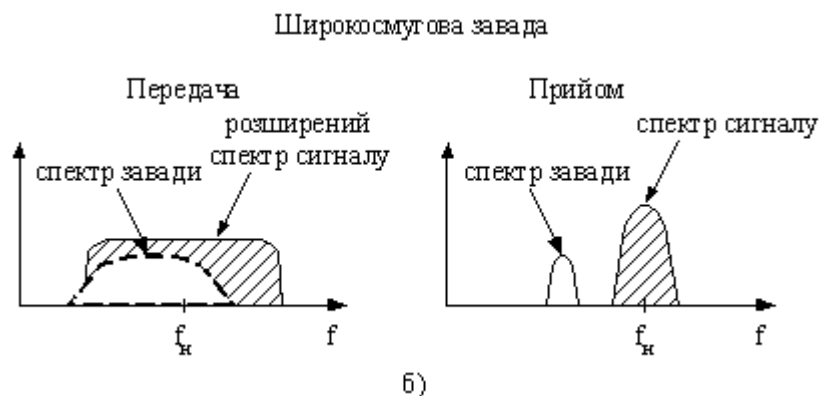


Рис.2.6. Стійкість широкопasmутового сигналу до перешкод:

а) вузькопasmутової завади з обмеженим частотним діапазоном, б) широкопasmутової завади без обмеження частотного діапазону

У системах із розширеним спектром сигнал може бути прийнятий лише за умови знання кодової послідовності, з якою був перемножений корисний сигнал під час передавання. Без цієї інформації сигнал сприймається як звичайний шум (звідси й походження назви методу). Для коректної роботи такої системи необхідно, щоб абонентські пристрої, що перебувають у зоні однієї базової станції й працюють на тій самій частоті, але з різними кодовими послідовностями, не створювали взаємних перешкод.

2.3 Кореляційний аналіз як метод виявлення подібності сигналів

Автокореляційна функція $R(\tau)$ описує ступінь подібності між сигналом $s(t)$ тобто показує, наскільки сигнал корелює сам із собою при зсуві на величину τ копією цього сигналу $s(t-\tau)$. Взаємна кореляційна функція (ВКФ) використовується для оцінювання схожості між двома різними сигналами.

Кореляційна функція (КФ) випадкового процесу $X(t)$ це математичне сподівання добутку значень процесу, які він набуває в два різні моменти часу t_1 і t_2 :

$$K_X(t_1, t_2) = \overline{X(t_1) \cdot X(t_2)}. \quad (2.3)$$

Значення кореляційної функції КФ $K_X(t_1, t_2)$ характеризує ступінь статистичної залежності між значеннями випадкового процесу в моменти часу t_1 і t_2 .

У разі стаціонарного процесу ступінь залежність визначається не конкретними моментами часу, а лише їх різницею — зсувом t_1 і t_2 , ($\tau = t_2 - t_1$). В такому випадку кореляційна функція позначається як $K_X(\tau)$. Надалі розгляд

обмежується лише стаціонарними процесами, які, до того ж, вважаються ергодичними. Кореляційна функція для ергодичних процесів визначається:

$$K_X(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) x(t + \tau) dt, \quad (2.4)$$

де $x(t)$ – конкретна реалізація випадкового процесу $X(t)$.

Чим менше значення $K_X(\tau)$ у порівняно з $K_X(0)$, тим слабша статистична залежність між значеннями процесу, віддаленими один від одного на інтервал часу τ . Якщо $K_X(\tau) = 0$, то значення випадкового процесу $X(t)$, розташовані на відстані на такий інтервал τ , є некорельованими. Для зручнішого порівняння значень $K_X(\tau)$ і $K_X(0)$ використовують нормовану функцію кореляційної [5].

$$R_X(\tau) = \frac{K_X(\tau)}{K_X(0)}. \quad (2.5)$$

Значення $R_X(0) = 1$ і $-1 \leq R_X(\tau) \leq 1$.

Кореляційна функція також є характеристикою детермінованого сигналу, хоча її значення тут відрізняється від тлумачення для випадкового процесу. Для неперіодичного детермінованого сигналу кореляційна функція визначається як [5]:

$$K_s(\tau) = \int_0^{T_s} s(t) s(t + \tau) dt, \quad (2.6)$$

де T_s – тривалість модульованого сигналу $s(t)$.

Кореляційну функцію детермінованого сигналу можна виміряти за допомогою корелометра, в якому інтегрування здійснюється на інтервалі $(0, T_s)$ і причому перед інтегралом відсутній множник.

Розглянемо випадок коли $s(t)$ – П-імпульс з амплітуди A і тривалості T_i

$$s(t) = \begin{cases} A, & 0 \leq t < T_i, \\ 0, & t < 0, \quad t \geq T_i. \end{cases} \quad (2.7)$$

Після підстановки (1.7) в (1.8) отримаємо

$$K_s(\tau) = \begin{cases} A^2 T_i (1 - |\tau|/T_i), & |\tau| \leq T_i, \\ 0, & |\tau| > T_i. \end{cases} \quad (2.8)$$

Функція автокореляції неперіодичного сигналу $s_1(t)$ і функція взаємної кореляції неперіодичних сигналів $s_1(t)$ і $s_2(t)$ тривалістю T визначаються для $-T \leq \tau \leq T$ наступним чином:

$$K_{s1}(\tau) = \int_{-T}^T s_1(t) s_1(t + \tau) dt; \quad K_{s1s2}(\tau) = \int_{-T}^T s_1(t) s_2(t + \tau) dt. \quad (2.9)$$

Якщо вхідними сигналами будуть складні послідовності П-імпульсів:

$$s_i(t) = \sum_{n=0}^{N-1} p_{i,n} \Pi(t - n\tau_0), \quad (2.10)$$

де $\Pi(t)$ – П-імпульс з амплітудою, що дорівнює 1, і тривалістю τ_0 ;

$p_{i,n}$ – коефіцієнти, які набувають значення $+1$ або -1 , $n = 0, 1, \dots, N-1$

N – кількість імпульсів у заданій послідовності.

У сигналів, які формуються з П-імпульсів, функція кореляції має вигляд ламаних ліній, тому для їх графічного зображення достатньо обчислити значення функцій у точках, де τ , є кратним τ_0 . В результаті підстановки виразу (2.9) в (2.10) отримуємо співвідношення, що визначають значення функції кореляції сигналів для значень τ , кратних τ_0 :

$$K_{s1}(k\tau_0) = \sum_{n=0}^{N-1} p_{1,n} p_{1,n+k}, \quad K_{s1s2}(k\tau_0) = \sum_{n=0}^{N-1} p_{1,n} p_{2,n+k}. \quad (2.11)$$

Тривалість вхідного сигналу $T = N\tau_0$, тому потрібно обчислити значення кореляційних функцій для $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm(N-1)$, для $k \geq \pm N$ значення кореляційних функцій дорівнюють нулю.

Як приклад виконаємо обчислення кореляційної функції для переносника $\psi_5(t)$. Оскільки кореляційна функція кореляції сигналу є парною, достатньо обчислити значення $K_{\psi_5}(\tau)$ лише для $k \geq 0$. Розрахунки у відповідності до виразу (2.11) зручно провести, використовуючи спрощене подання функції Уолша (2.3). Приклад такого обчислення наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Розрахунок функції кореляції переносника $\psi_5(t)$ для перших трьох значень

$k = 0$	$\begin{array}{cccccccccc} \times & + & - & + & - & - & + & - & + \\ & + & - & + & - & - & + & - & + \\ \hline & + & + & + & + & + & + & + & + \end{array}$	$K_{\psi_5}(0) = 8$
$k = 1$	$\begin{array}{cccccccccc} \times & + & - & + & - & - & + & - & + \\ & + & - & + & - & - & + & - & + \\ \hline & - & - & - & + & - & - & - \end{array}$	$K_{\psi_5}(\tau_0) = -5$
$k = 2$	$\begin{array}{cccccccccc} \times & + & - & + & - & - & + & - & + \\ \hline & + & - & + & - & - & + & - & + \\ \hline & + & + & - & - & + & + \end{array}$	$K_{\psi_5}(2\tau_0) = 2$

На рис. 2.7 наведено графік розрахунку нормованої функції кореляції переносника $\psi_5(t)$.

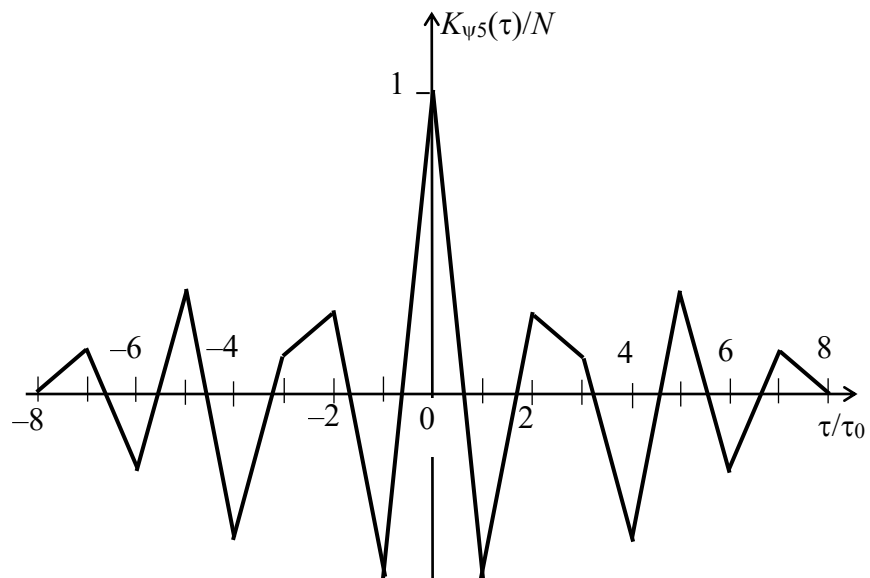


Рисунок 2.7 – Функція кореляції, нормована відносно максимального значення переносника $\psi_5(t)$

Для прикладу проведемо розрахунок функції взаємної кореляції переносників $\psi_3(t)$ і $\psi_5(t)$. Значення цієї функції слід визначати в діапазоні $-(N-1) \leq k \leq N-1$.

Графік нормованої функції взаємної кореляції переносників $\psi_3(t)$ і $\psi_5(t)$ наведено на рис. 2.8.

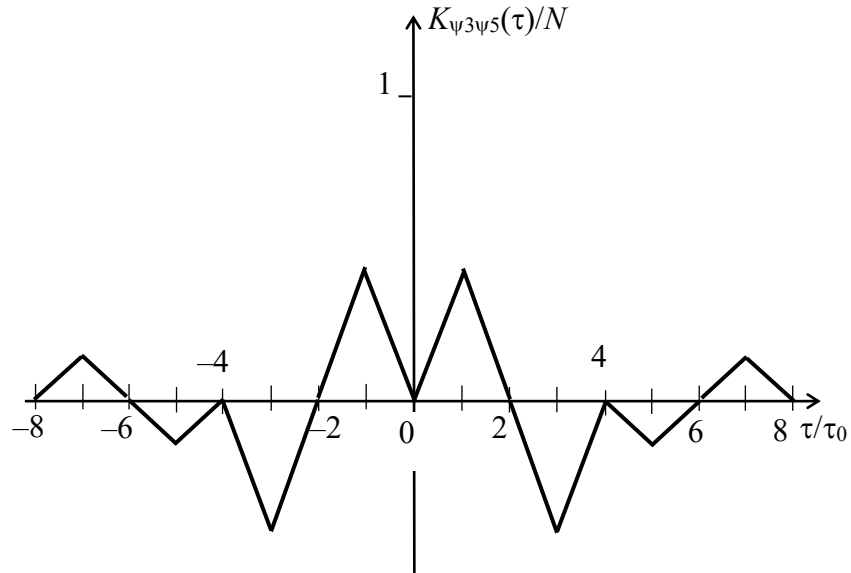


Рис. 2.8 – Приведена до одиничного рівня функція взаємної кореляції переносників $\psi_3(t)$ і $\psi_5(t)$

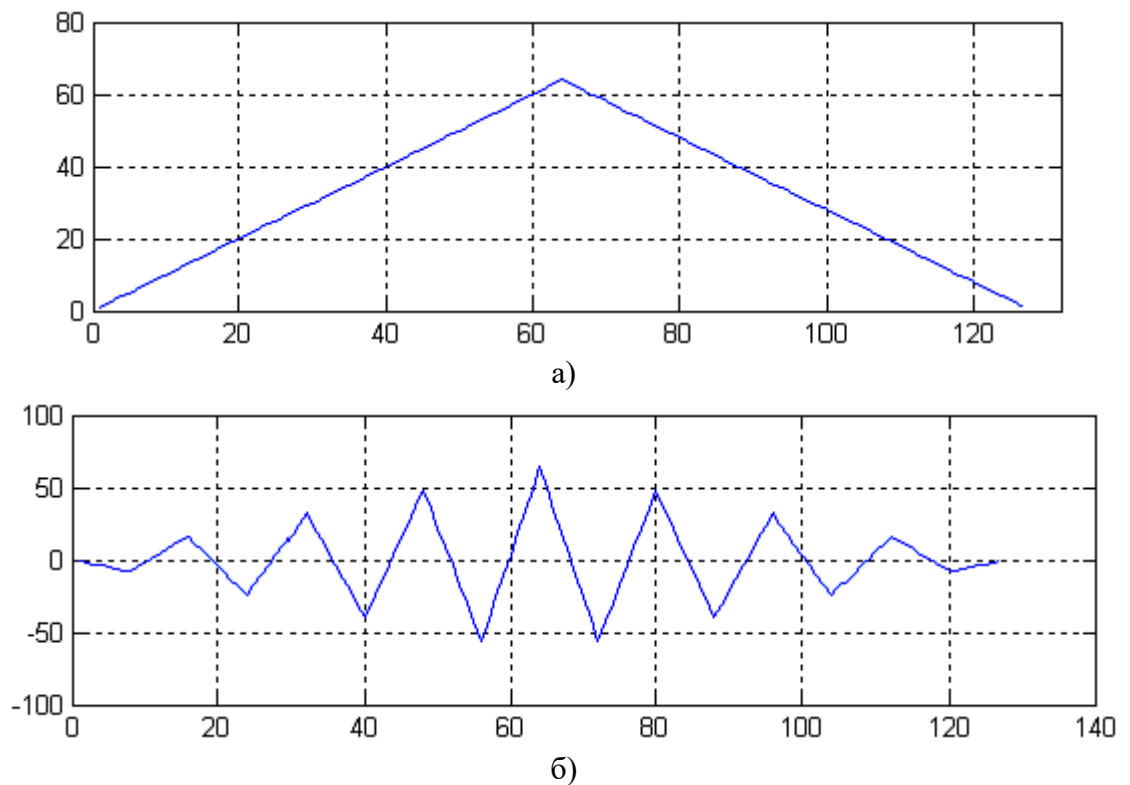
Обчислення функції кореляції за формулою (2.11) при умові спрощеного подання функцій Уолша. Приклад такого обчислення наведено в табл.2.2.

Таблиця 2.2 – Результати обчислень функції взаємної кореляції переносників $\psi_3(t)$ і $\psi_5(t)$ при умові спрощеного подання функцій Уолша

$k = 7$	$\times$ <table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>+</td><td>+</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>+</td><td>+</td></tr><tr><td>+</td><td>-</td><td>+</td><td>-</td><td>-</td><td>+</td><td>-</td><td>+</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td colspan="14"> </td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>+</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>								+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	+	-	+																													+								$K_{\psi 3\psi 5}(7\tau_0) = 1$
							+	+	-	-	-	-	+	+																																															
+	-	+	-	-	+	-	+																																																						
							+																																																						
$k = 6$	$\times$ <table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>+</td><td>+</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>+</td><td>+</td></tr><tr><td></td><td>+</td><td>-</td><td>+</td><td>-</td><td>-</td><td>+</td><td>-</td><td>+</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td colspan="14"> </td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>-</td><td>+</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>								+	+	-	-	-	-	+	+		+	-	+	-	-	+	-	+																												-	+							$K_{\psi 3\psi 5}(6\tau_0) = 0$
							+	+	-	-	-	-	+	+																																															
	+	-	+	-	-	+	-	+																																																					
							-	+																																																					
$\vdots$																																																													
$k = 3$	$\times$ <table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>+</td><td>+</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>+</td><td>+</td></tr><tr><td></td><td></td><td>+</td><td>-</td><td>+</td><td>-</td><td>-</td><td>+</td><td>-</td><td>+</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td colspan="14"> </td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>+</td><td>-</td><td></td><td></td><td></td></tr></table>								+	+	-	-	-	-	+	+			+	-	+	-	-	+	-	+																											-	-	-	+	-				$K_{\psi 3\psi 5}(3\tau_0) = -3$
							+	+	-	-	-	-	+	+																																															
		+	-	+	-	-	+	-	+																																																				
							-	-	-	+	-																																																		

$\vdots$		
$k = 0$	$\begin{array}{cccccccc} & & \times & + & + & - & - & - & - & + & + \\ & & & + & - & + & - & - & + & - & + \\ \hline & & & + & - & - & + & + & - & - & + \end{array}$	$K_{\Psi 3\Psi 5}(0) = 0$
$\vdots$		
$k = -5$	$\begin{array}{cccccccc} & & \times & + & + & - & - & - & - & + & + \\ & & & + & - & + & - & - & + & - & + \\ \hline & & & - & - & + & & & & & \end{array}$	$K_{\Psi 3\Psi 5}(-5\tau_0) = -1$

Результати розрахунків функції кореляції представлені на рис. 2.8. Графік кореляційну функцію, яка має характерну трикутну форму з максимумом у центрі це відповідає нульовому зсуву ($\tau = 0$), що характеризує максимальну подібність послідовності. При ненульових зсувах ($\tau \neq 0$), значення функції зменшуються, що означає низький рівень автокореляції при зсуві. Значення до лівого і правого боку піку дзеркальні — це підтверджує, що кореляція симетрична, це характерно для більшості детермінованих сигналів.



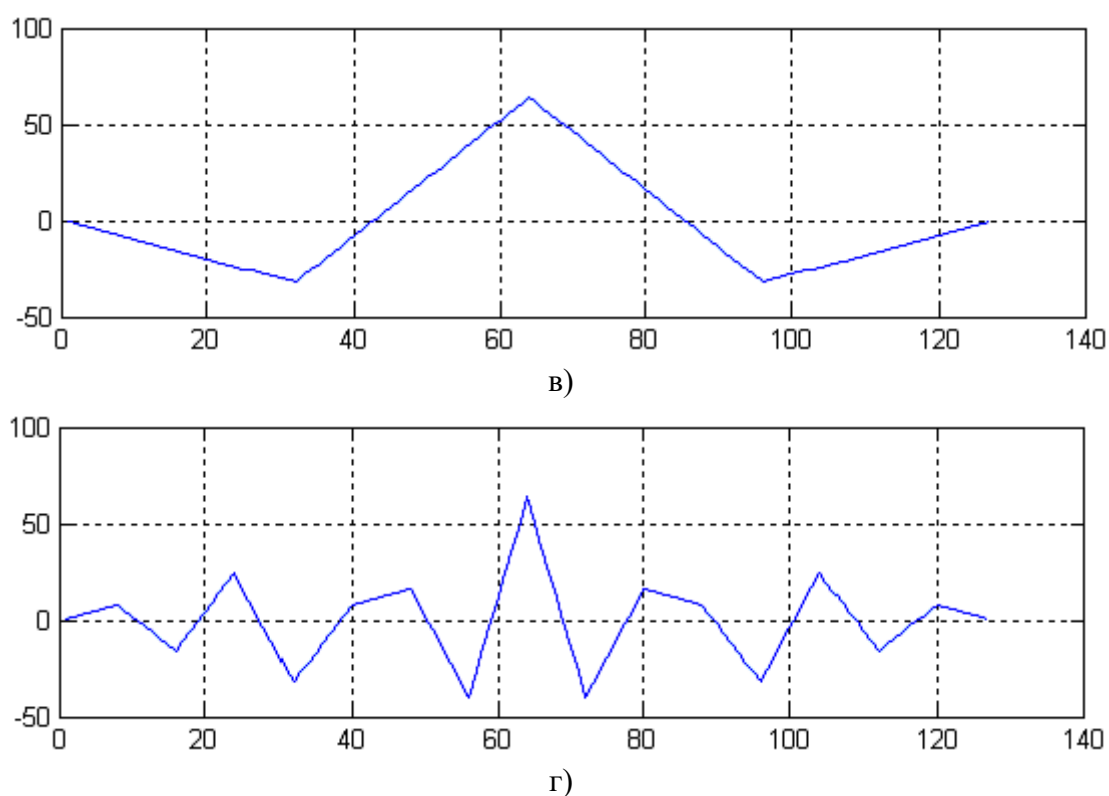
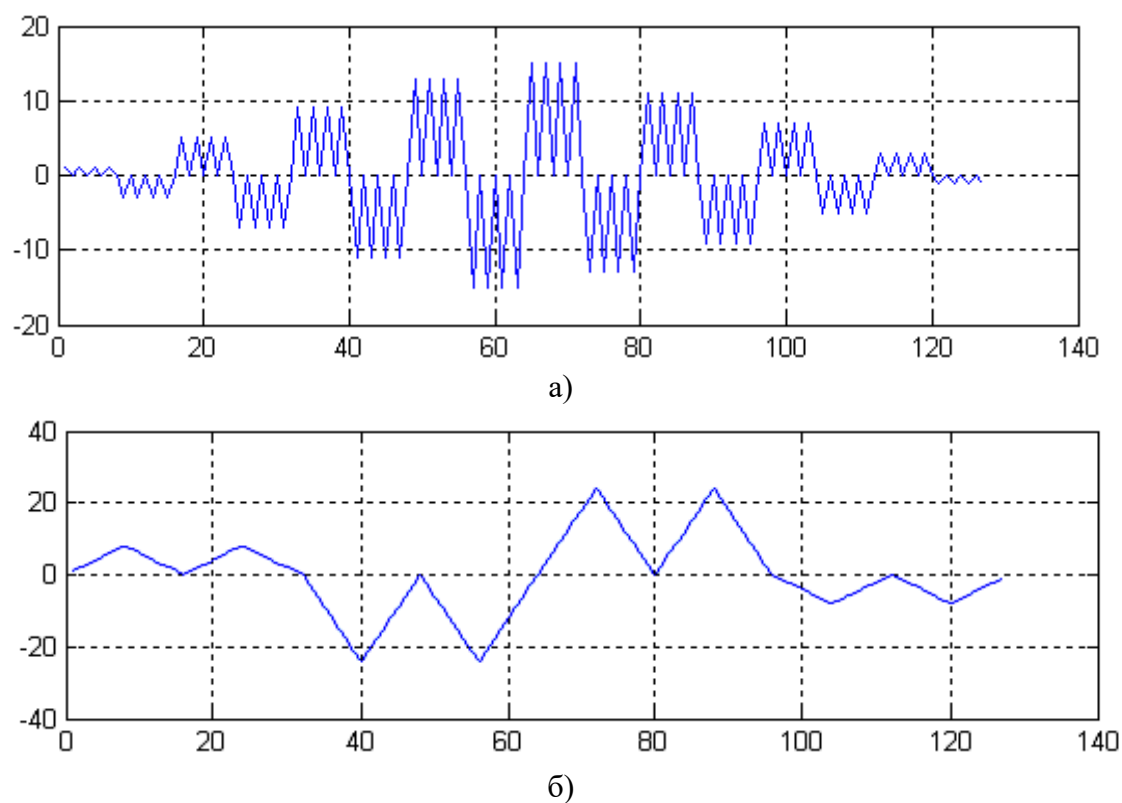


Рис.2.8. АКФ для последовательностей Уолша а) W_0 , б) W_8 , в) W_{32} , г) W_{40}

Результаты расчетов функции взаимокорреляции представлены на рис. 2.9. Если последовательности ортогональные (некоррелированы), взаимокорреляция будет приблизительно равна нулю на всех сдвигах.



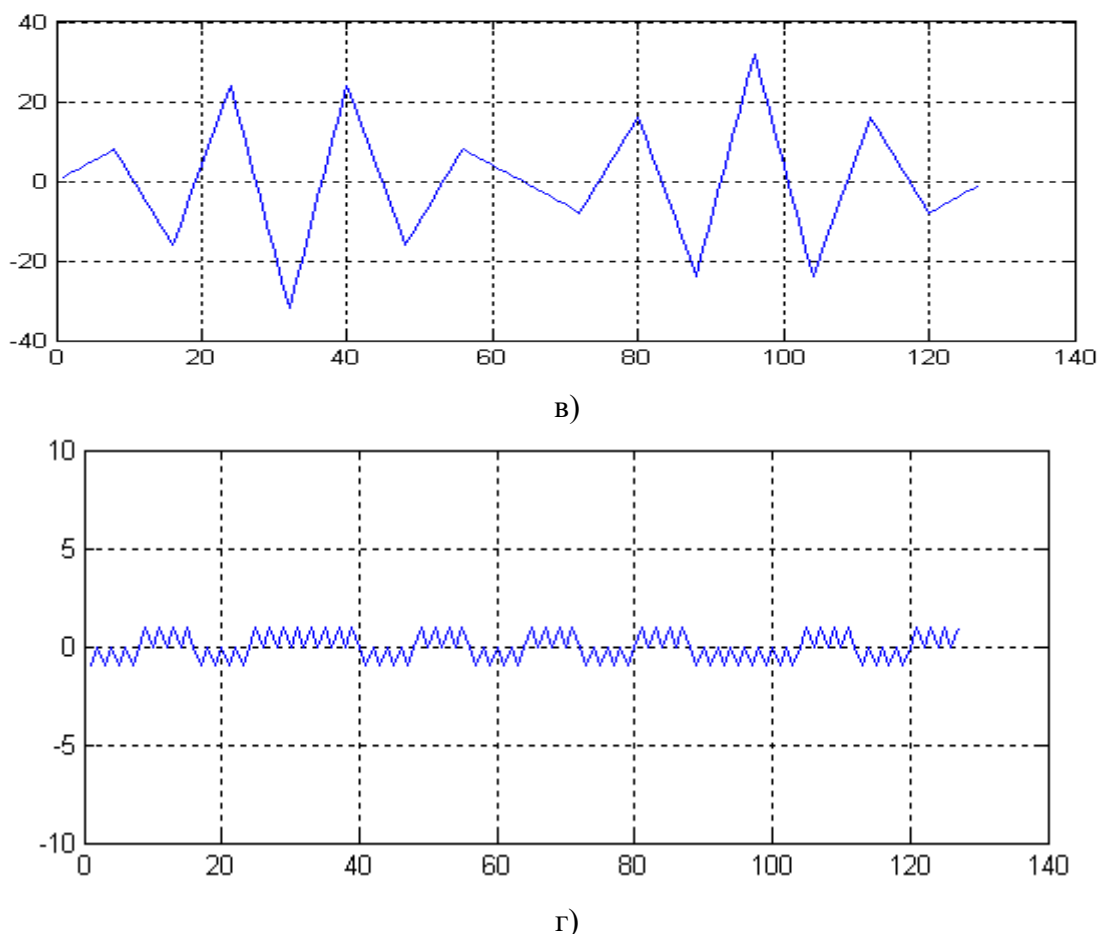


Рис.2.9. ВКФ для послідовностей Уолша
а) W_8 і W_9 , б) W_{32} і W_{40} , в) W_8 і W_{40} , г) б) W_9 і W_{32}

Аналізуючи отриману функцію взаємкореляції, можна зробити такі висновки:

1. Відсутність вираженого піку при нульовому зсуві — це свідчить про те, що досліджувані послідовності не є ідентичними, а отже, між ними відсутня сильна кореляція. Це є позитивним фактором у контексті багатокористувацьких систем зв'язку, де важлива взаємна некорельованість сигналів.
2. Можлива поява слабких бічних піків — наявність невеликих флуктуацій за межами нульового зсуву свідчить про часткову кореляцію на окремих зсувах. Однак невеликі значення таких піків дозволяють говорити про задовільні властивості досліджуваних послідовностей.

Отримана взаємкореляційна функція демонструє низький рівень взаємозалежності між сигналами, що робить ці послідовності придатними для використання у системах з множинним доступом, зокрема у CDMA та NOMA.

Висновки за розділом

У другому розділі було проаналізовано основні методи організації множинного доступу до каналу зв'язку, зокрема FDMA, TDMA та CDMA, які дозволяють забезпечити ефективне використання обмеженого частотного ресурсу при одночасному обслуговуванні великої кількості користувачів.

Аналіз показав, що:

- Метод FDMA відзначається простою реалізацією, але має обмежену ємність через необхідність виділення окремих частот для кожного абонента.
- Метод TDMA забезпечує гнучке часово-фазове управління каналами, проте вимагає точної синхронізації та підвищеної частки службової інформації.
- Метод CDMA є найбільш ефективним з точки зору спектральної ефективності, завадостійкості та здатності до обслуговування великої кількості абонентів без жорсткого частотного планування. Його реалізація вимагає складного технічного оснащення та точної синхронізації, однак це компенсується широкими можливостями масштабування, підтримкою «м'якої передачі обслуговування» і високою конфіденційністю передачі.

У підрозділі 2.2 детально проаналізовано метод прямого розширення спектра сигналів (DSSS), як базову технологію для реалізації CDMA. Показано, що завдяки використанню псевдовипадкових послідовностей і шумоподібних сигналів, системи DSSS демонструють високу стійкість до завад, інтерференції та багатопроменевого поширення.

Особливістю технології є те, що навіть при наявності потужних вузькосмугових завад, система здатна ефективно виділити корисний сигнал завдяки властивостям кореляції та зворотному звуженню спектра в приймачі.

Таким чином, застосування кодового розділення каналів із використанням розширеного спектра сигналів є доцільним рішенням для сучасних систем зв'язку з високими вимогами до надійності, захищеності та пропускну здатності.

РОЗДІЛ 3 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ У БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖАХ

3.1 Структурна схема імітаційної моделі

Для дослідження властивостей узгоджуючого фільтра з широкосмуговими сигналами, а саме його здатності забезпечувати максимальне відношення сигнал/шум при прийомі сигналу на фоні адитивної гауссової завади, розроблено імітаційну модель. Модель реалізована на основі стандартного підходу до цифрової обробки сигналів із використанням пакету візуально-об'єктного програмування *HPVEE* (Visual Engineering Environment), що дозволяє створювати гнучкі і наочні схеми обробки сигналів у середовищі з графічним інтерфейсом.

Модель включає наступні функціональні блоки (рис. 3.1):

1. Генератор інформаційного сигналу, що формує сигнал визначеної форми (П-імпульс, радіоімпульс, коди Баркера та коди Уолша). Основні параметри сигналів: тривалість, частота і форма.
2. Блок шуму (генератор АБГШ). Формує адитивний білий гауссовий шум заданого рівня. Зміна відношення сигнал/шум дозволяє досліджувати чутливість фільтра.
3. Суматор сигналів. Складає сигнал заданої форми і шум, що імітує прийнятий сигнал на вході приймача.
4. Узгоджуючий фільтр (*matched filter*). Здійснює згортку вхідного сигналу з часово оберненим зразком опорного сигналу. Саме цей етап відповідає за детектування корисного сигналу та максимізацію вихідного рівня сигнал/шум (SNR).
5. Модуль обчислення вихідної форми сигналу. Проводить обчислення та будує графік вихідного сигналу фільтра що, дозволяє оцінити його форму, пік і рівень завад.

6. Модуль оцінки ефективності (аналіз автокореляції). Обчислюється функція автокореляції опорного сигналу та проводиться аналіз її властивостей (ширина головного піку, рівень бокових пелюстків).
7. Аналізатор спектрів вхідного та вихідного сигналів. Проводить обчислення та будує графік спектрів вхідного та вихідного сигналу, дозволяє оцінити його форму, пік і ширину сигналу.

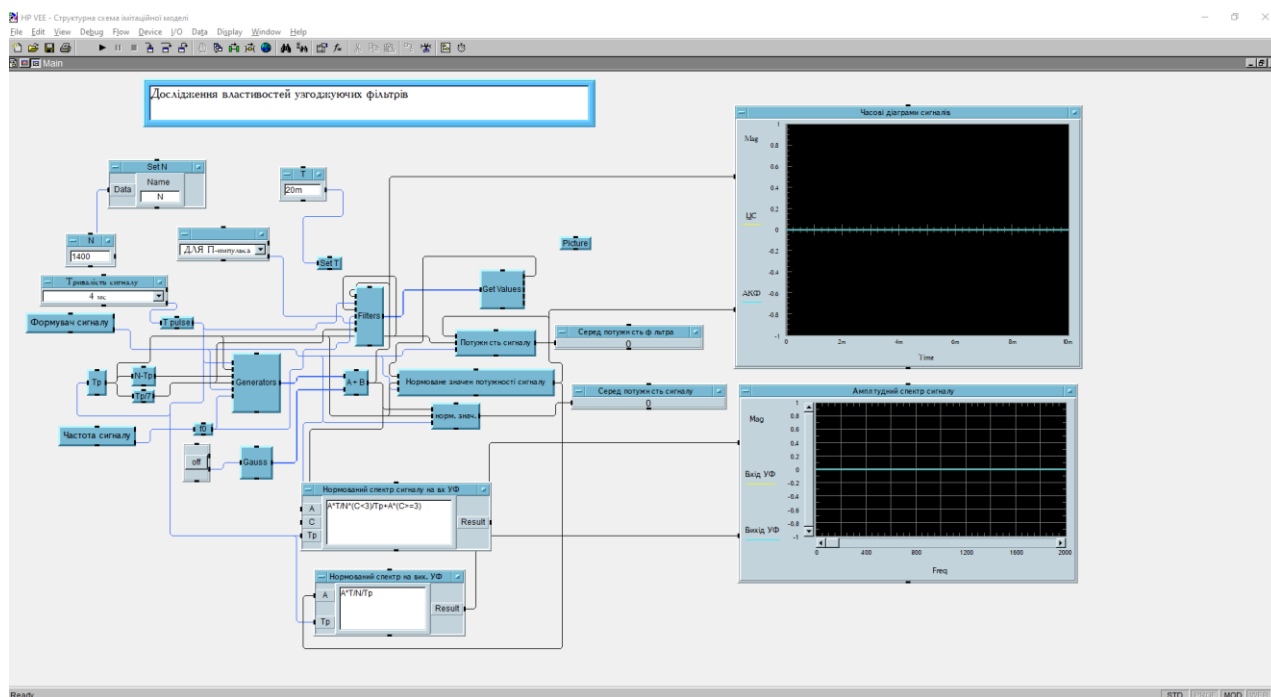


Рисунок 3.1 – Схема імітаційної моделі для дослідження властивостей узгоджуючого фільтра

Узгоджуючий фільтр є оптимальним приймачем при наявності адитивної білої гауссової завади. У моделі також може бути реалізовано порівняння з нефільтрованим сигналом, що дозволяє кількісно оцінити виграш у завадостійкості. При виборі типу сигналу (наприклад, П-імпульс або код Баркера), змінюється форма автокореляційної функції, що впливає на точність синхронізації та здатність розпізнавати сигнал на фоні шуму.

Для моделювання адитивної гауссової завади та генерації шумових процесів, які використовуються в каналі зв'язку застосовується спеціалізований блок

генерації випадкових чисел. Математична модель гауссової завади представлена на рис. 3.2.

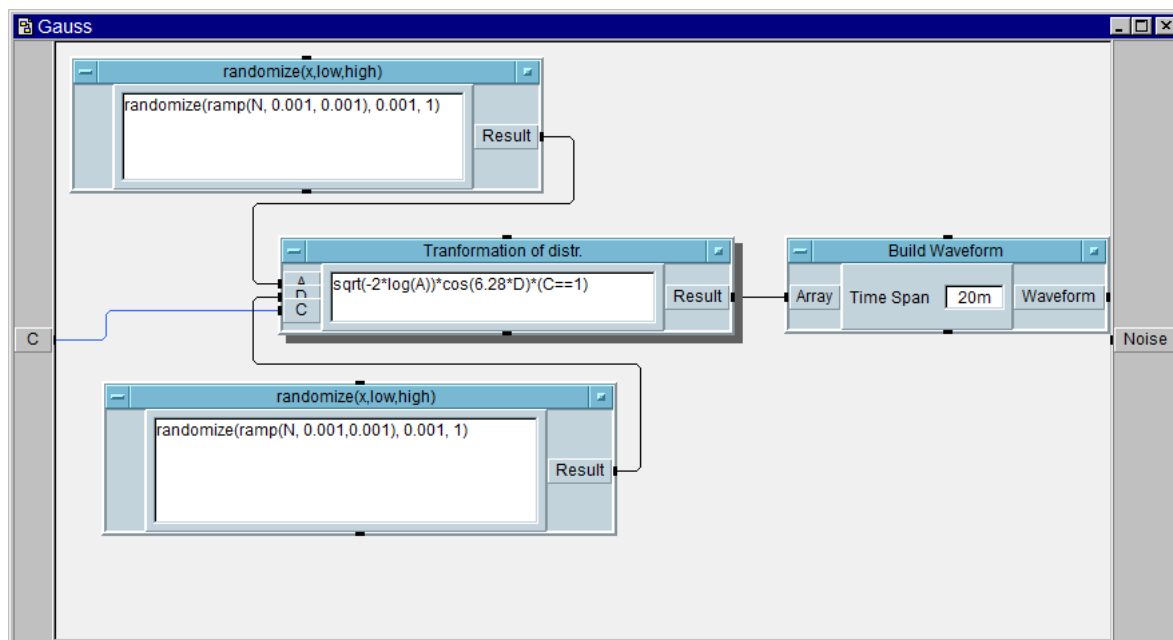


Рисунок 3.2 – Структура підпрограми для формування Гауссової завади

Підпрограма призначена для генерації послідовності випадкових значень з нормальним (гауссовим) розподілом, які додаються до інформаційного сигналу для моделювання адитивного білого гауссового шуму (АБГШ). Ця підпрограма є важливою складовою імітаційної моделі систем зв'язку. Вона забезпечує реалістичне моделювання АБГШ, дозволяє контролювати співвідношення сигнал/шум (SNR) та оцінювати ефективність різних методів модуляції і кодування.

Реалізація узгодженого фільтра (matched filter), який максимізує відношення сигнал/шум на виході при наявності адитивної гауссової завади, забезпечуючи оптимальне виявлення відомого сигналу $s(t)$ представлено на рис. 3.3.

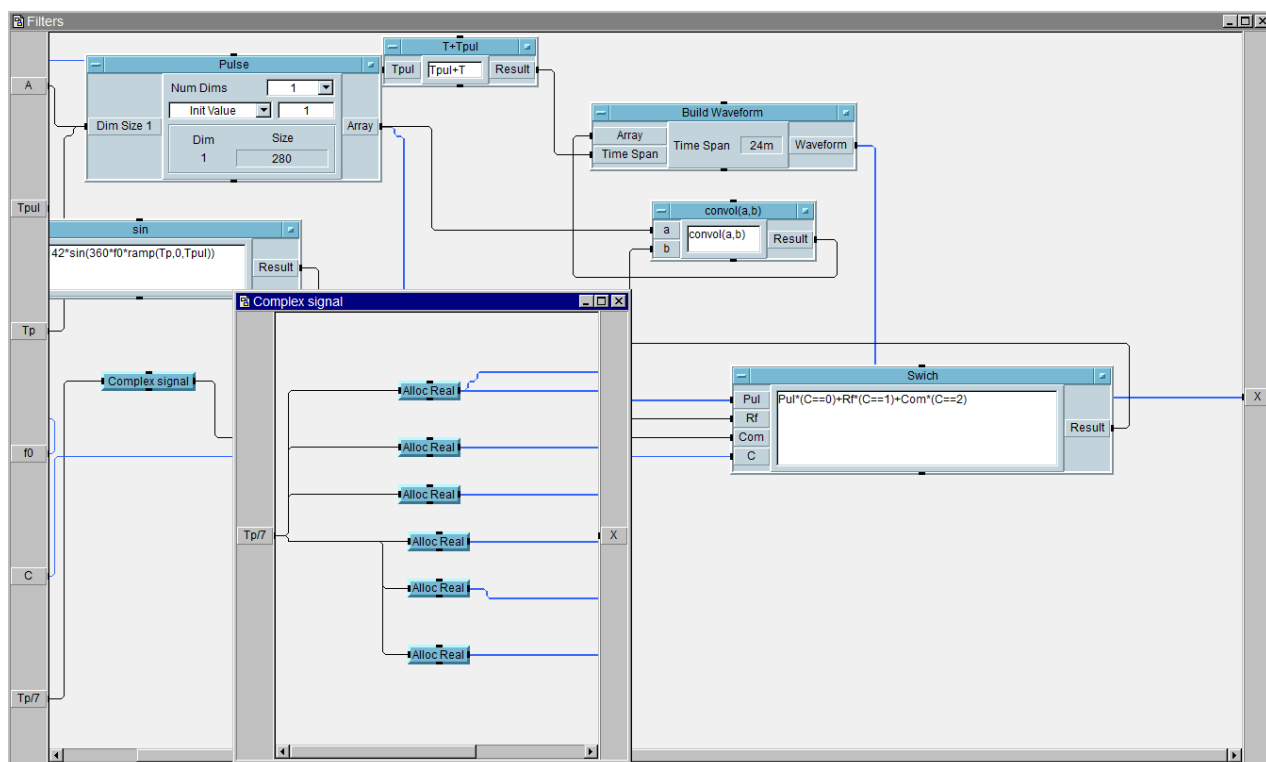


Рисунок 3.3 – Структура підпрограми узгоджувачого фільтра

Основні етапи підпрограми включають:

1. Вибір інформаційного сигналу за формою та тривалістю
2. Обчислення згортки вхідного сигналу з формою сигналу узгоджувачого фільтра.
3. Формування імпульсної реакції узгоджувачого фільтра.

Проведемо дослідження властивостей узгоджувачого фільтра на П-імпульс.

Метою даного дослідження є вивчення реакції узгодженого фільтра на сигнал у вигляді прямокутного імпульсу в присутності шуму, а також дослідження властивостей фільтра на основі автокореляційної функції, яка визначає здатність виявляти сигнал на фоні завад. Результати такого дослідження приведені на рис. 3.4 (функція автокореляції П-імпульсу) та рис. 3.5 (функція взаємної кореляції П-імпульсу)

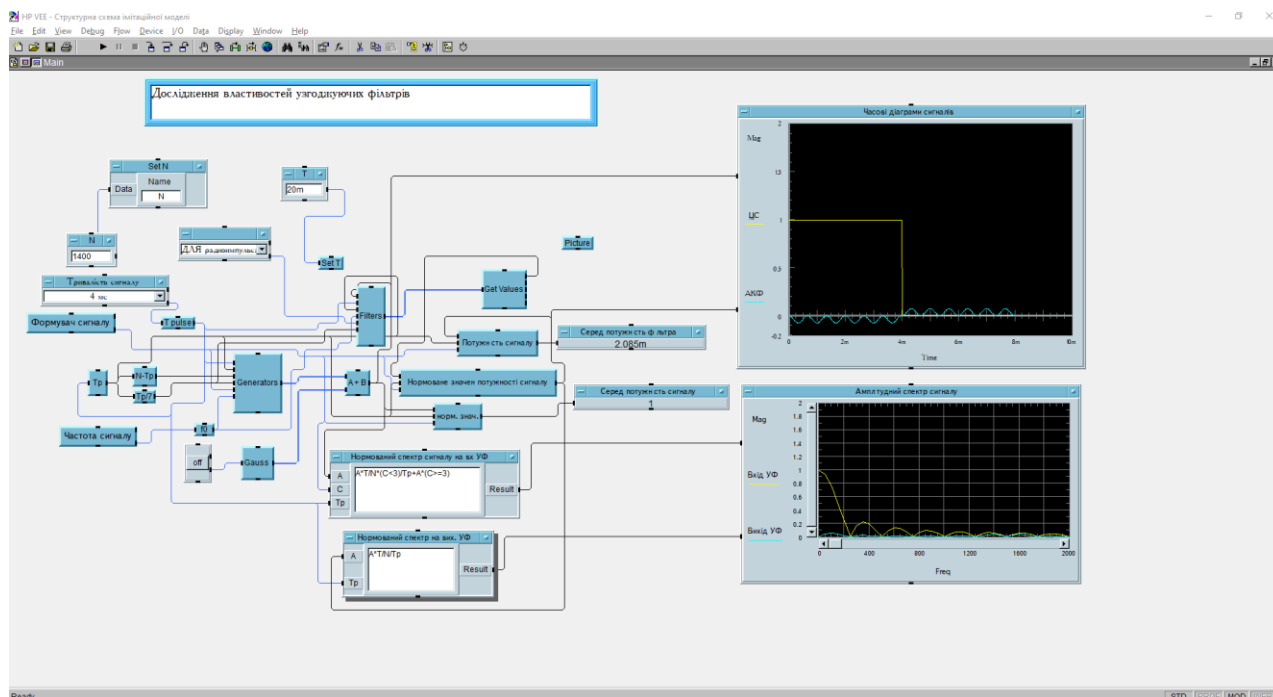


Рисунок 3.5 – Результати дослідження узгоджувачого фільтра з П-імпульсом (функція взаємкореляції на радіосигнал)

За результатами дослідження (рис. 3.5) видно, що функція взаємної кореляції між П-імпульсом та прийнятим радіосигналом не досягає максимуму в момент завершення дії П-імпульсу. Це свідчить про те, що форма сигналу, з яким проводиться взаємкореляція, відрізняється від П-імпульсу, що призводить до зміщення піку кореляційної функції в часі або до його зменшення. Аналогічні результати дослідження узгоджувачого фільтра узгодженого з П-імпульсом (функція взаємкореляції на складний сигнал коду Баркера при $n=7$) представлені на рис.3.6)

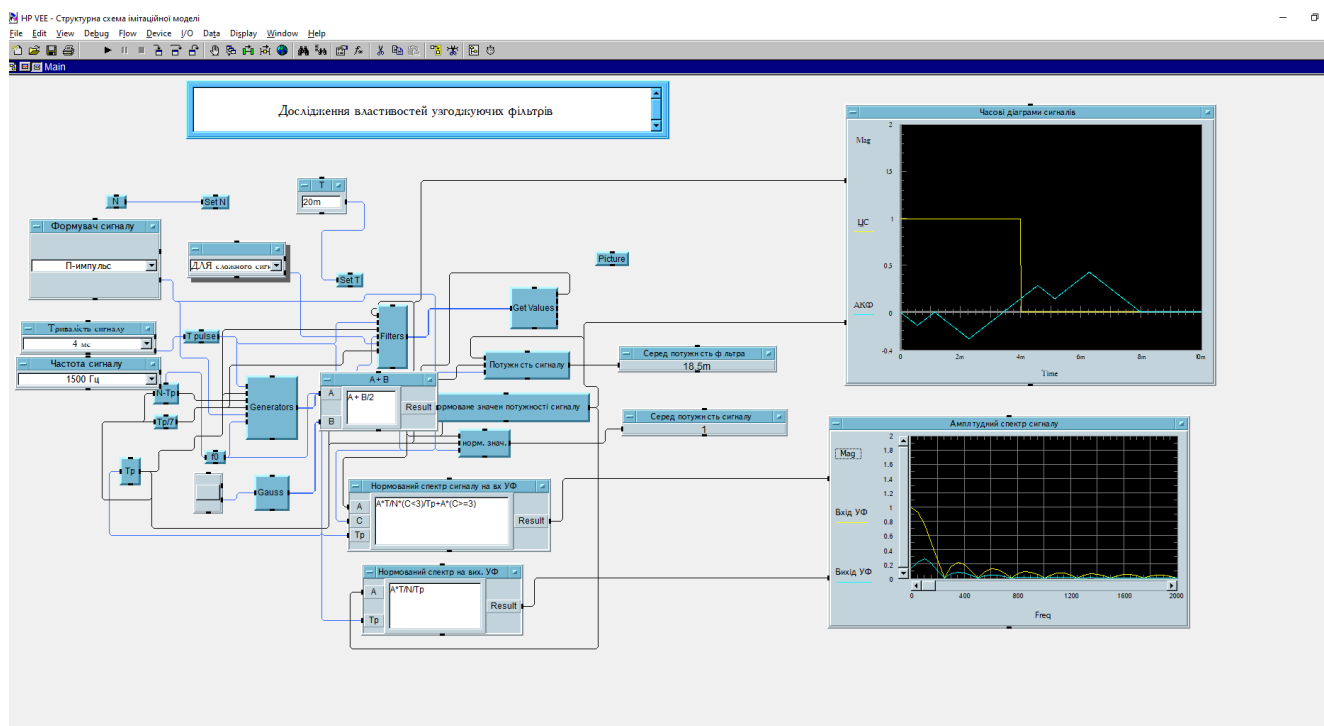


Рисунок 3.6 – Результати дослідження узгоджувача з П-імпульсом (функція взаємкореляції на складний сигнал коду Баркера при $n=7$)

Для оцінки ефективності виявлення сигналу в умовах дії адитивної гауссової завади було проведено моделювання взаємкореляційної та автокореляційної функцій сигналів при різних рівнях шуму.

У ході дослідження аналізувався вплив відношення сигнал/шум на форму та амплітуду кореляційних функцій. Результати досліджень приведені на рис 3.6. Ці дослідження показують, наскільки стійкою залишається кореляційна характеристика при зростанні рівня завади.

The screenshot displays the NI-VEE (National Instruments Virtual Engineering Environment) software interface. The main window shows a LabVIEW block diagram for signal processing. The diagram includes several key components:

- Signal Source:** A 'Генератор' (Generator) block is configured with a frequency of 1500 Hz and a period of 4 ns.
- Filtering:** A 'Фільтр' (Filter) block is used to process the signal.
- Measurement:** A 'Потужність сигналу' (Signal Power) block is used to measure the power of the signal.
- Display:** Two graphs are shown:
 - Часові діаграми сигналів (Signal Time Diagrams):** A plot of signal magnitude (Mag) versus time (Time). The signal is a noisy waveform oscillating between approximately -4 and 4.
 - Амплітудний спектр сигналу (Signal Amplitude Spectrum):** A plot of signal magnitude (Mag) versus frequency (Freq). The spectrum shows a peak at 1500 Hz, with a magnitude of approximately 1.0.

The interface is in Ukrainian, and the title bar indicates the software is running on a Windows operating system.

Рисунок 3.8 – Результати дослідження узгоджуючого фільтра з П-імпульсом з урахуванням АБГШ (функція автокореляції) при відношенні сигнал/шум рівне 0 дБ

За результатами досліджень можна зробити наступні висновки

- автокореляційна функція П-імпульсу у безшумовому середовищі має чіткий пік на моменті нульового зсуву, що вказує на точне узгодження.
- у присутності шуму пік автокореляційної функції зменшується, з'являються флуктуації (випадкові відхилення), що ускладнює точне виявлення сигналу.
- взаємкореляція між П-імпульсом і зашумленим сигналом також демонструє зниження амплітуди основного піка, що свідчить про погіршення здатності до синхронізації та виявлення.
- при зниженні відношення сигнал/шум до 0 дБ (рис. 3.8), кореляційна функція практично втрачає інформаційний характер — пік зливається з шумовим фоном.

Проведемо аналогічні дослідження властивостей узгодженого фільтра зі складним сигналом коду Баркера ($n=7$)

Результати такого дослідження приведені на рис. 3.9 (функція автокореляції коду Баркера ($n=7$)) та рис. 3.10 (функція взаємної кореляції на П-імпульс)

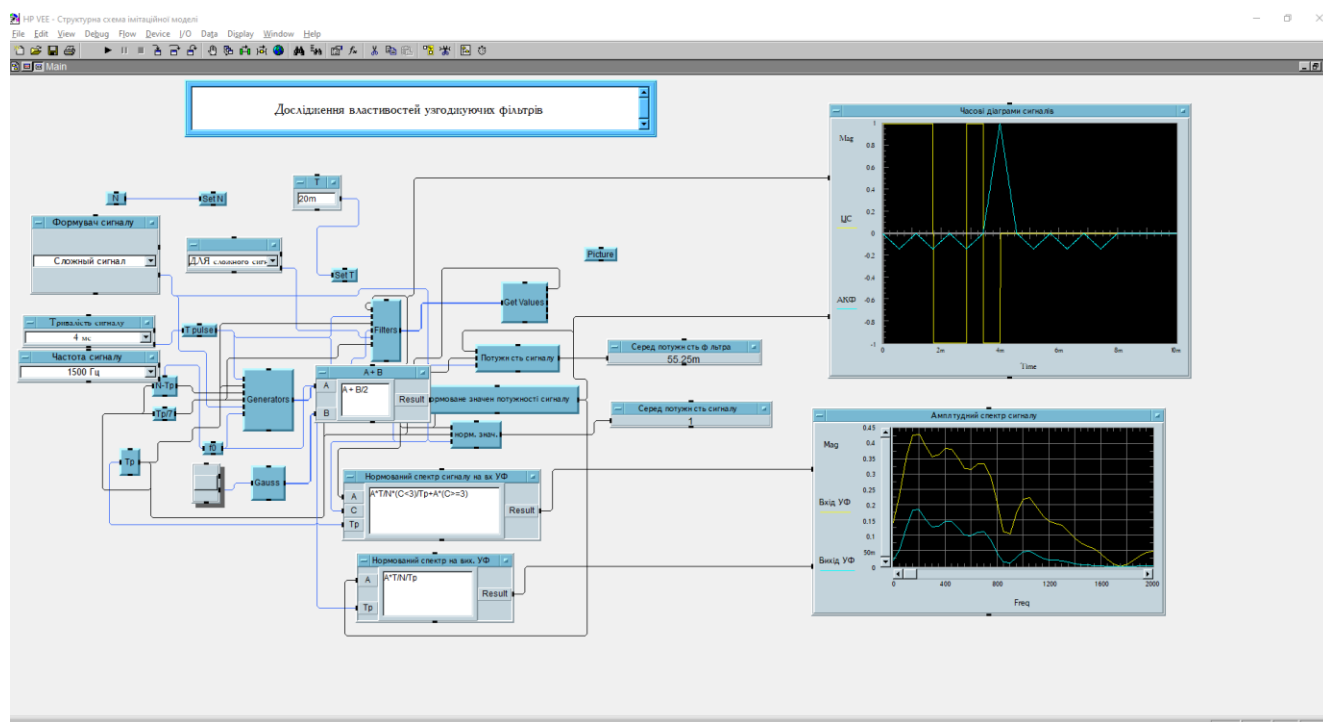


Рисунок 3.9 – Результати дослідження узгоджувача узгодженого з кодом Баркера при $n=7$ (функція автокореляції)

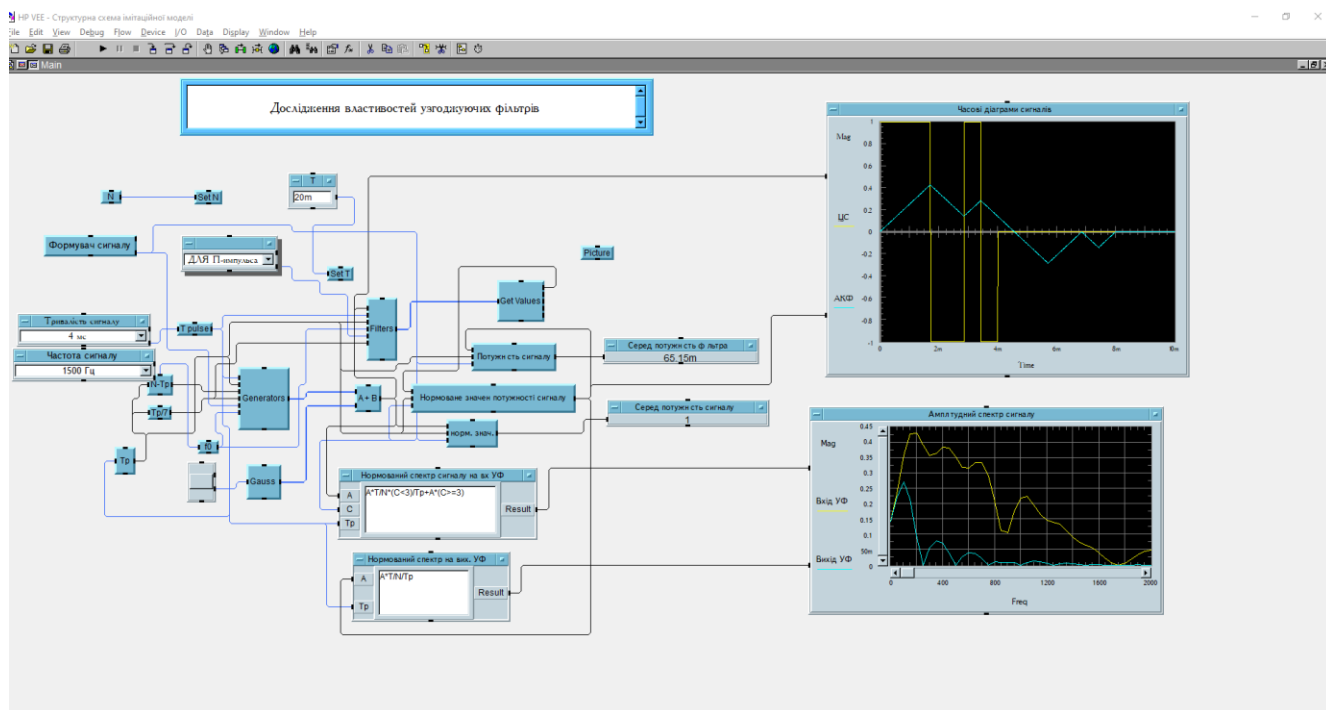


Рисунок 3.10 – Результати дослідження узгоджувачого фільтра з кодом Баркера при $n=7$ (функція взаємкореляції на Π -імпульс)

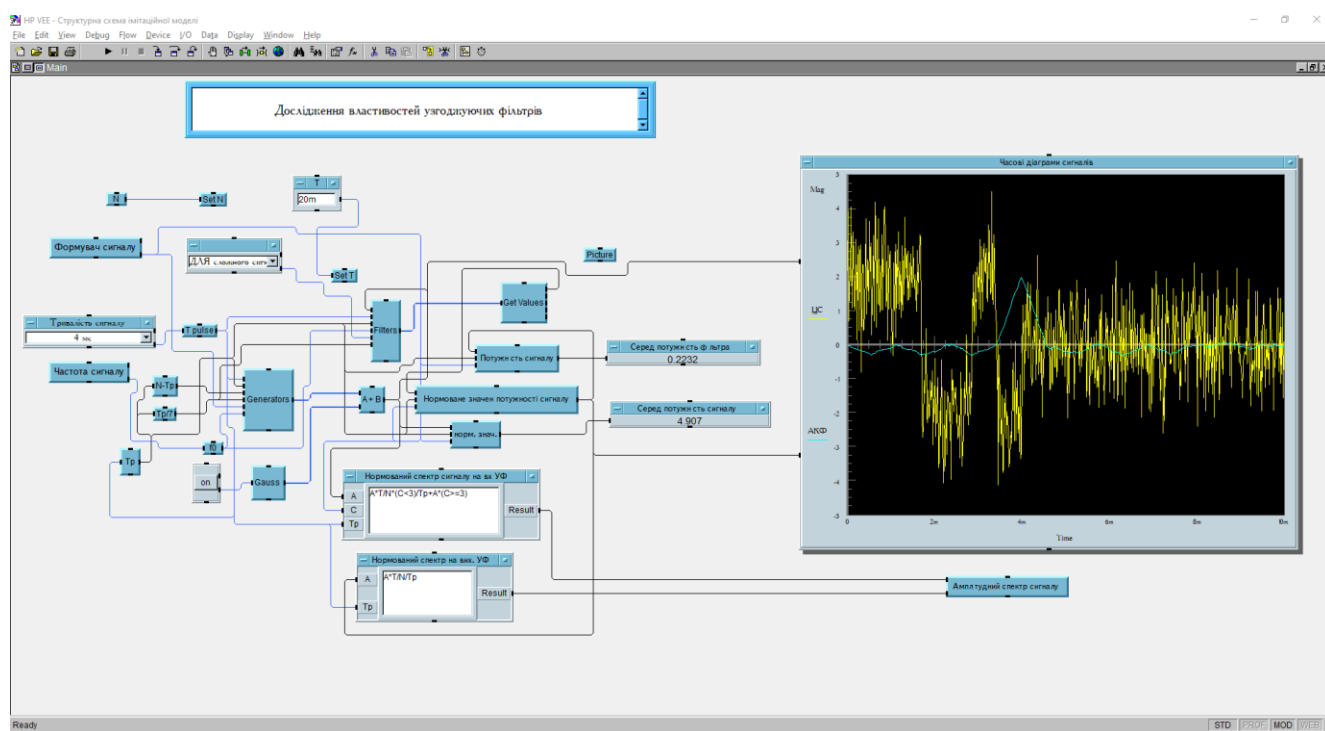


Рисунок 3.11 – Результати дослідження узгоджувачого фільтра з кодом Баркера при $n=7$ при дії АБГШ (відношення сигнал/шум рівне 3 дБ)

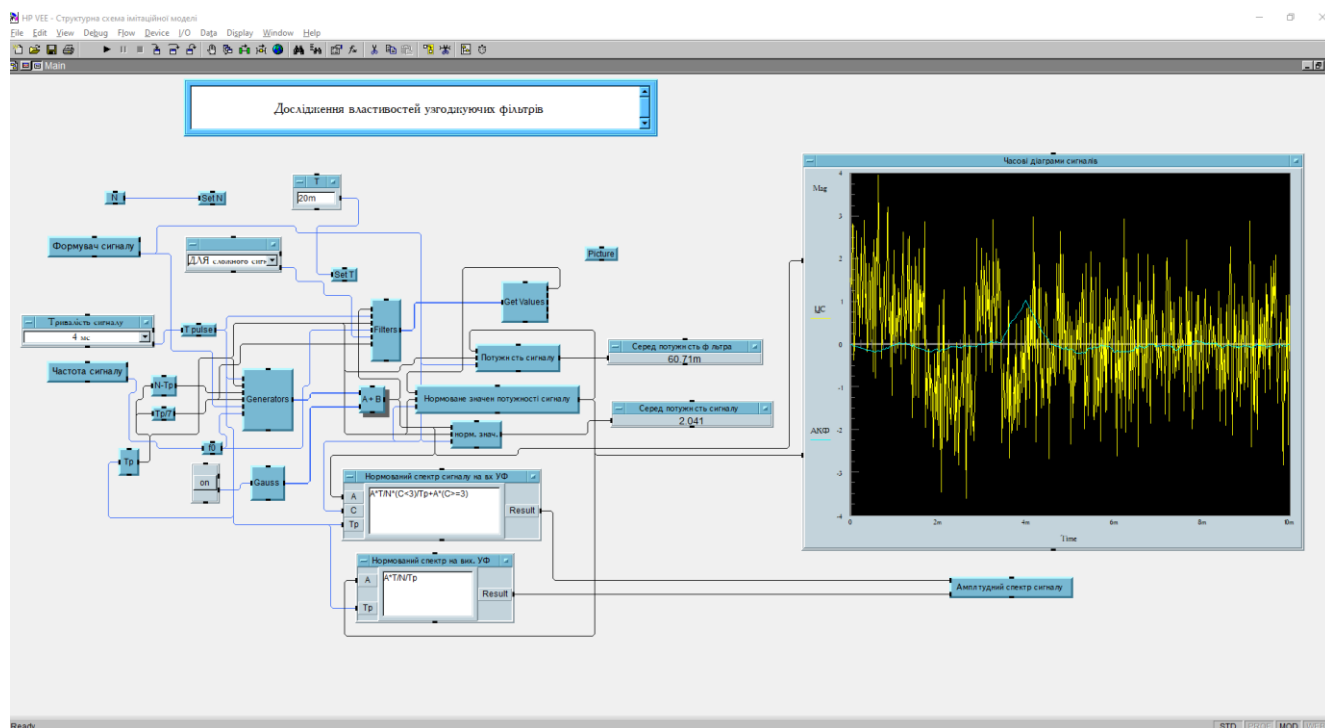


Рисунок 3.12 – Результати дослідження узгоджувачого фільтра з кодом Баркера при $n=7$ при дії АБГШ (відношення сигнал/шум рівне 0 дБ)

За результатами досліджень можна зробити наступні висновки:

- автокореляційна функція сигналу при наявності шуму зберігає головний пік на нульовому зсуві, але його амплітуда зменшується в порівнянні з випадком без шуму.
- бічні пелюстки автокореляційної функції стають менш чіткими та частково зашумлені, але основна кореляційна структура коду зберігається.
- співвідношення піка до фону дозволяє виділити сигнал, але чутливість системи до помилок зростає.
- рівень шуму призводить до невеликих флуктуацій у значеннях кореляційної функції, особливо за межами центрального піку.

Таким чином, узгоджений фільтр відіграє ключову роль у підвищенні завадостійкості широкосмугових сигналів у бездротових системах доступу. Завдяки своїй здатності максимально виділяти сигнал із шумового середовища, він дозволяє значно покращити якість прийому навіть при низькому відношенні сигнал/шум. Особливо ефективним є його використання у поєднанні з

технологією DSSS (пряме розширення спектру) та короткими ортогональними кодами, зокрема кодами Баркера, які забезпечують сприятливі кореляційні властивості.

У наступному підрозділі буде проведено дослідження завадостійкості широкосмугових сигналів у типових умовах бездротових каналів, включаючи дії АБГШ та релеевських замирань. Дослідження дозволить оцінити ефективність застосування узгодженого фільтра в реальних умовах передачі даних та порівняти різні типи модулювання і кодування за критерієм ймовірності помилки бітів (BER) залежно від SNR.

3.2 Дослідження завадостійкості широкосмугових сигналів у системах бездротового доступу

Для підвищення завадостійкості у системах бездротового доступу широко застосовують різні методи множинного доступу, зокрема OFDM (ортогональний частотний поділ), DSSS (пряме розширення спектру) та FHSS (модуляція зі стрибками частоти). У цьому розділі проведемо дослідження завадостійкості системи при застосуванні методу DSSS у різних типах каналів зв'язку.

Для методів модуляції потрібно зробити порівняльну характеристику ефективності.

Для цього розглядаємо канал з АБГШ і релеевський канал.

Вихідними даними будуть:

- допустима ймовірність помилки біта дорівнює $P_b = 10^{-5}$;
- швидкість цифрового потоку – $R=100$ (Мбіт/с).

Для визначення необхідного відношення E_b / N_0 при заданій ймовірності помилки потрібно скористатися формулами, приведеними в таблиці 3.1 та таблиці 3.2.

Таблиця 3.1 – Ймовірність помилки біта для модуляцій у каналі з АБГШ

Модуляція	P_b
PSK (когерентне)	$V \left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} \right)$
DQPSK (когерентне)	$\frac{1}{2} e^{\left(-\frac{E_b}{N_0} \right)}$

FSK (когерентне)	$V\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right)$
FSK (некогерентне)	$\frac{1}{2}e^{\left(-\frac{1}{2}\frac{E_b}{N_0}\right)}$

Таблиця 3.2 – Ймовірність помилки біта у релєєвському каналі (де $(E_b / N_0)E(\alpha^2) \gg 1$)

Модуляція	P_b
PSK (когерентне)	$\frac{1}{4(E_b / N_0)E(\alpha^2)}$
DQPSK (когерентне)	$\frac{1}{2(E_b / N_0)E(\alpha^2)}$
FSK (когерентне)	$\frac{1}{2(E_b / N_0)E(\alpha^2)}$
FSK (некогерентне)	$\frac{1}{(E_b / N_0)E(\alpha^2)}$

Для практичних розрахунків можна зробити деякі спрощення. Величина $E(\alpha^2) = D(\alpha)$ – виражає дисперсію. Розглядати формули будемо в області $r_0 \geq 0$, прийнемо що $\sigma^2 = 1$ – це необхідно для нормування релєєвського розподілу:

$$p(r_0) = r_0 e^{-\frac{1}{2}r_0^2} \quad (3.1)$$

Дисперсія обчислюється за формулою:

$$D(r_0) = \int_0^{\infty} r_0^2 p(r_0) dr_0 \quad (3.2)$$

Скориставшись MathCAD для розрахунку даного інтеграла одержуємо $E(\alpha^2) = D(r_0) = 2$. Цей результат далі потрібно використати для розрахунку й побудови графіків.[14, 15]

$$\sigma^2 = 1$$

$$\int_0^{\infty} \alpha^2 \frac{\alpha \cdot e^{\frac{-\alpha^2}{2\sigma^2}}}{\sigma^2} d\alpha = 2$$

$$\int_0^{\infty} e^{\frac{-u^2}{2}} du$$

$$Q(x) = \frac{x}{\sqrt{2\pi}}$$

$$db = 0..60$$

$$raz(db) = 10^{\frac{db}{10}}$$

$$Pb_Relley_PSK(db) = \frac{1}{8raz(db)}$$

$$Pb_Gaus_PSK(db) = Q(\sqrt{2raz(db)})$$

$$Pb_Relley_DQPSK(db) = \frac{1}{4raz(db)}$$

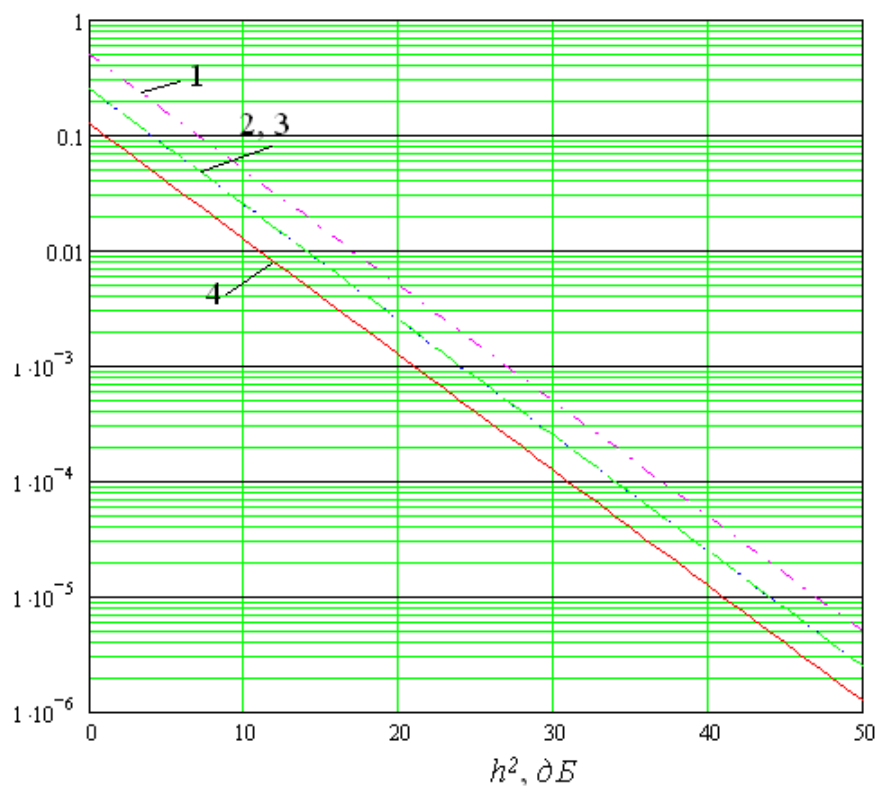
$$Pb_Gaus_DQPSK(db) = 0.5e^{-raz(db)}$$

$$Pb_Relley_FSK_{\text{коз}}(db) = \frac{1}{4raz(db)}$$

$$Pb_Gaus_FSK_{\text{коз}}(db) = Q(\sqrt{raz(db)})$$

$$Pb_Relley_FSK_{\text{некоз}}(db) = \frac{1}{2raz(db)}$$

$$Pb_Gaus_FSK_{\text{некоз}}(db) = 0.5e^{-0.5raz(db)}$$



1 - FSK (некогерентне)

2 - FSK (когерентне)

3 - DQPSK (когерентне)

4 - PSK (когерентне)

Рисунок 3.12 – Графіки завадостійкості для релеевського каналу

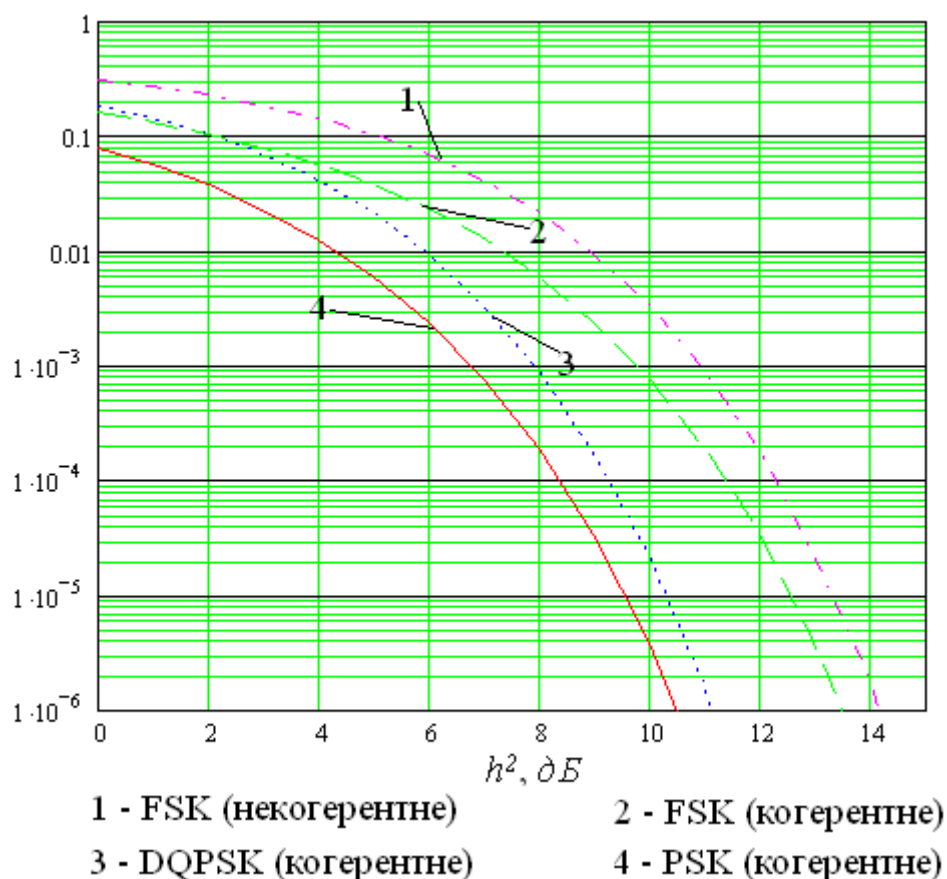
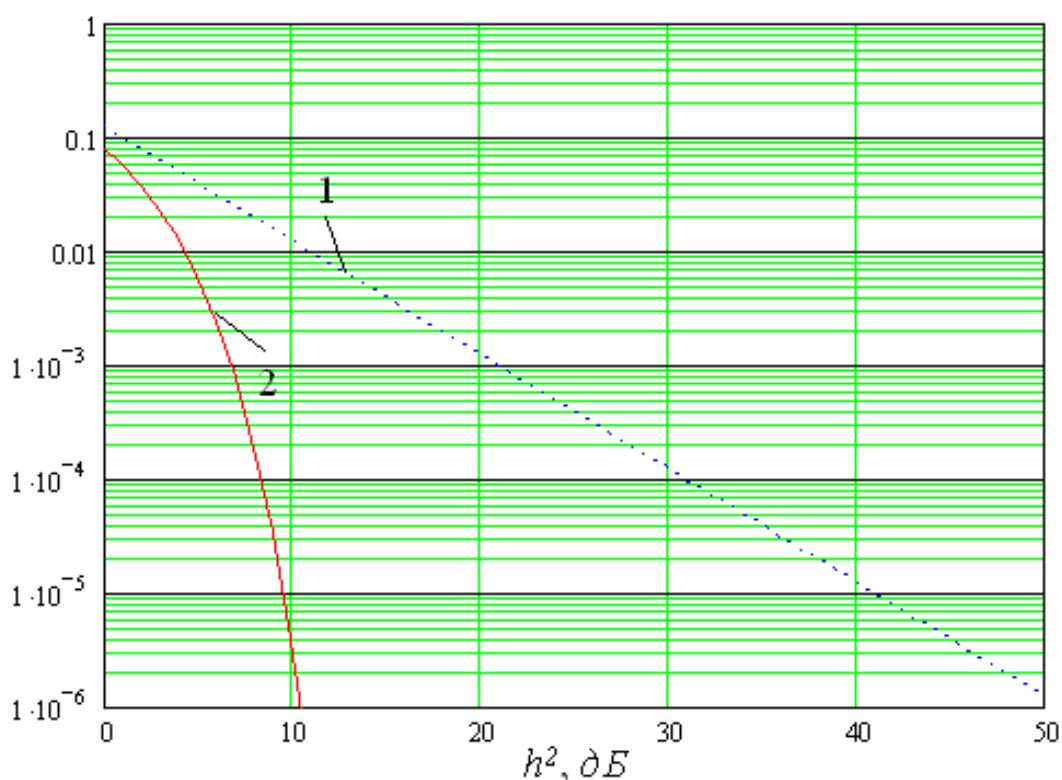


Рисунок 3.13 – Графіки завадостійкості для каналу з АБГШ

Проведено порівняння енергетичних витрат різних методів модуляції для досягнення ймовірності бітової помилки 10^{-5} у релєєвському та гаусовому каналах. З аналізу видно, що, у гаусовому каналі з адитивним білим гаусовим шумом (АБГШ) всі типи модуляції потребують значно менших енергетичних затрат для забезпечення однакової завадостійкості, ніж у релєєвському каналі, де відбувається згасання сигналів.

Для модуляції PSK енергетичний виграш становить 32,6 дБ, для DQPSK – 34,9 дБ, для когерентної FSK – 32,8 дБ, для некогерентної FSK – 34,9 дБ.

Це свідчить про те, що наявність завмирань у релєєвському каналі суттєво погіршує ефективність зв'язку і вимагає значно більших ресурсів для забезпечення необхідної якості. Відповідно, при проектуванні систем бездротового зв'язку особливу увагу слід приділяти методам компенсації завмирань або використанню адаптивних модуляцій.



1 - PSK релеевський канал

2 - PSK канал з АБГШ

Рисунок 3.14 – Графіки завадостійкості при використанні модуляції PSK для релеевського каналу та каналу за АБГШ

Енергетичною характеристикою цього методу модуляції є його завадостійкість, що визначається мінімально необхідним відношенням середньої енергії сигналу в одному біті інформації E_{bit} до спектральної щільності потужності шуму на вході приймального пристрою при якому забезпечується прийом інформації із заданою достовірністю. До спектральних характеристик методу модуляції відносяться мінімально необхідна смуга пропускання, потрібна для передачі інформації із заданою швидкістю, і рівень випромінювання поза цією смугою.

Одним з методів поліпшення характеристик системи є використання розширення спектра, наприклад методом прямої послідовності (DSSS). Не складно одержати математичне вираження для імовірності бітової помилки при використанні розширення спектра. У випадку використання широкосмугових сигналів у багатопроменовому каналі, кожен промінь можна розглядати, як окремий канал з АБГШ. Так само варто враховувати те, що взаємна кореляція сигналів, що прийшли по різних променях, створює перешкоди. Еквівалентне відношення $(E_b / N_0)_{\text{екв}}$ визначається за формулою:

$$\left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{\text{екв}} = \frac{E_b}{N_0 + \sum_L E_b \frac{0,5}{SF}}, \quad (3.3)$$

де SF – коефіцієнт розширення спектра;

L – кількість променів. Кількість променів у даній системі можна взяти рівне 2-3.

Дисперсія бічних викидів функції кореляції при використанні широкосмугових сигналів у багатопроменовому каналі дорівнює $\sigma_{\text{БВФК}}^2 = 0,5 / SF$.

Нехай енергія сигналу, що приходить по кожному з променів, буде однаковою, тоді формула прийме вигляд:

$$\left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{\text{екв}} = \frac{E_b}{N_0 + (L-1)E_b \frac{0,5}{SF}}, \quad (3.4)$$

Проведемо деякі спрощення у формулі:

$$\left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{\text{екв}} = \frac{1}{\frac{N_0}{E_b} + (L-1) \frac{0,5}{SF}}, \quad (3.5)$$

$$\left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{\text{екв}} = \frac{1}{\frac{1}{E_b / N_0} + (L-1) \frac{0,5}{SF}}. \quad (3.6)$$

Розглянемо модуляцію DQPSK з розширенням спектра методом прямої послідовності за допомогою коду Баркера ($SF=11$). Кількість променів $L=2$. Дану формулу необхідно підставити у вираз 3.6 для ймовірності помилки біта модуляції DQPSK.

Для того щоб порівняльна характеристика була як можна повніше, необхідно розрахувати ефективність систем передачі з модуляціями DPSK і DQPSK у релеєвському каналі з розширенням спектра кодом Баркера. У випадку використання сигналів з розширенням спектра, формула для розрахунку ширини спектра прийме наступний вид:

$$F = \frac{(1+\alpha)R}{\log_2 M} \cdot SF \quad (3.7)$$

де $SF=11$.

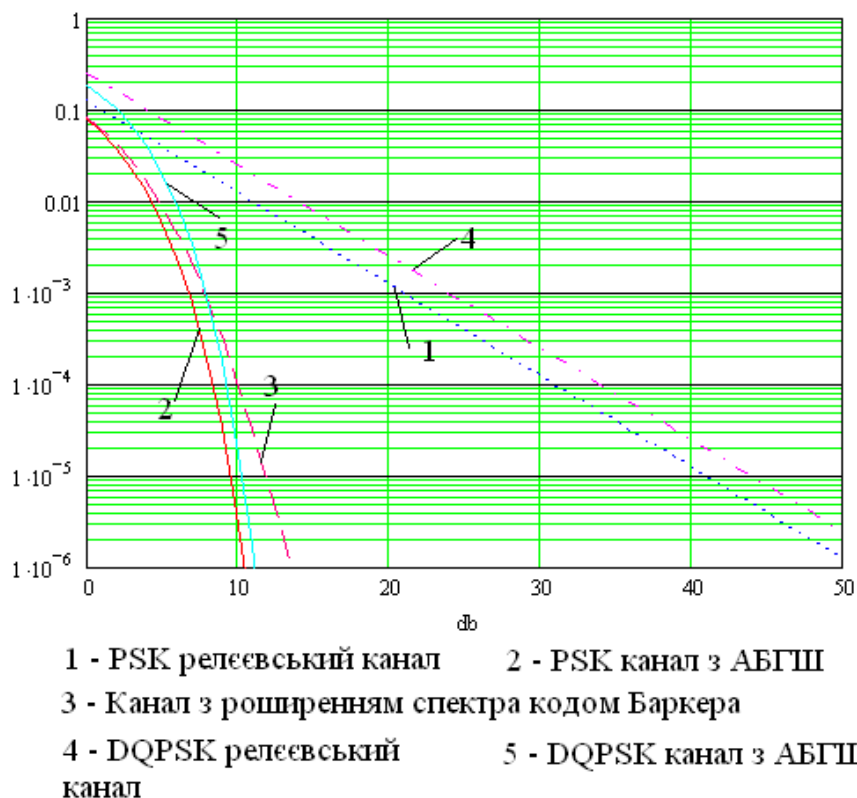


Рисунок 3.15 – Графік ефективності з використанням кода Баркера

Для оцінки ефективності DSSS було використано стандартні формули ймовірності бітової помилки (BER) для модуляцій BPSK та QPSK у релеевському та гаусовському каналах, табл.3.3.

Таблиця 3.3 – Порівняння методів модуляції за завадостійкістю

Модуляція / Метод	Канал зв'язку	Пояснення
BPSK / QPSK	Рейліївський	Погіршення BER через багатопроменевість
BPSK / QPSK	Гаусівський (AWGN)	Ідеалізований канал; менша завадостійкість у складних умовах
DSSS	Багатопроменевий	Підвищення завадостійкості при збільшенні коефіцієнта n або зменшенні L

На графіках нижче (рис.3.13-3.16) зображено зміну ймовірності бітової помилки для методу DSSS за різних значень параметрів L (кількість променів) та n (коефіцієнт розширення спектру). Очікується, що зі зростанням n при фіксованому h , показник BER знижується, що свідчить про покращення завадостійкості.

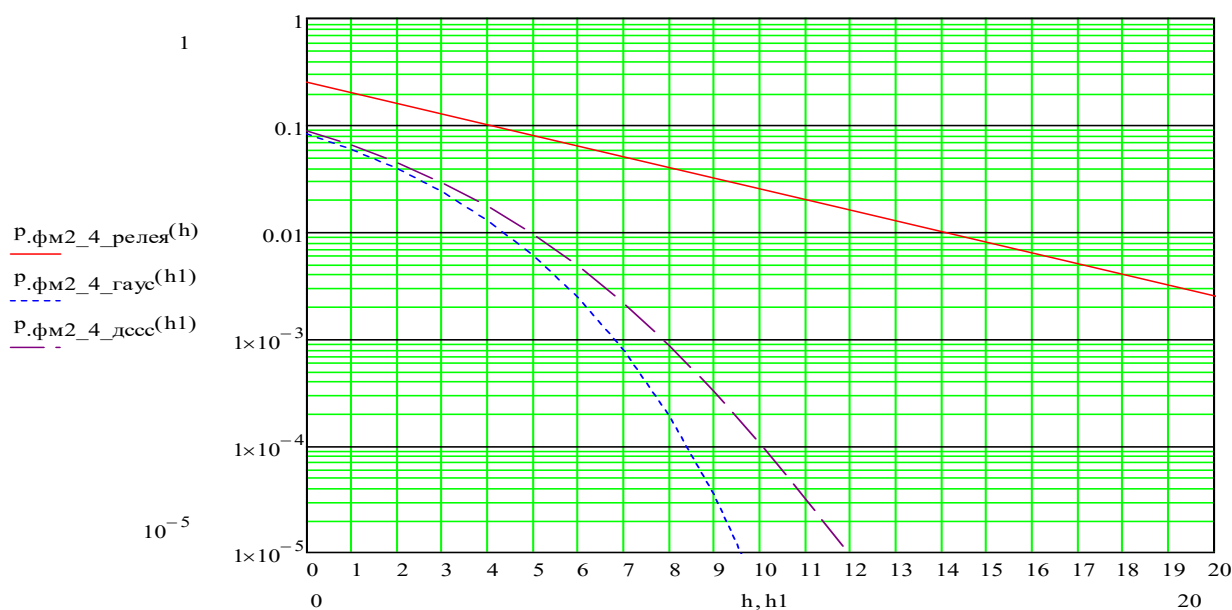


Рисунок 3.16 - Графіки залежності ймовірності бітової помилки для модулій BPSK та QPSK у релеевському та гаусівському каналах при застосуванні методу DSSS (з параметрами: $n = 11, L=2$).

На основі графіків залежності ймовірності бітової помилки (BER) від відношення сигнал/шум h для модулій BPSK та QPSK у релеевському, гаусівському каналах та при використанні методу DSSS (за параметрами $n=11, L=2$) можна зробити такі висновки:

- метод DSSS демонструє найвищу завадостійкість серед усіх досліджуваних варіантів. Графік залежності ймовірності помилки від відношення сигнал/шум для DSSS забезпечує кращу завадостійкість по відношенню до і однакових значеннях h спостерігається найменша ймовірність помилки, що свідчить про ефективне придушення завад і покращення якості передачі за рахунок розширення спектру та кодування;
- гаусівський канал (AWGN) має кращу завадостійкість, ніж релеевський. Крива BER у AWGN для BPSK/QPSK проходить нижче, ніж у Rayleigh-каналі - тобто в умовах, коли відсутні багатопроменеві викривлення, точність передачі вища. Це підтверджує класичну модель: Rayleigh-канал характеризується гіршими умовами через завмирання;
- завдяки використанню значень $n = 11$ та $L = 2$ (тобто достатньо великому коефіцієнту розширення спектру та помірній багатопроменевості), DSSS

демонструє суттєве зменшення ймовірності помилки порівняно з класичними модуляціями.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

В роботі проаналізовано етапи розвитку систем мобільного зв'язку від аналогових до сучасних цифрових систем з кодовим розділенням каналів та узагальнено технічні переваги широкосмугових сигналів: висока завадостійкість, захищеність переданої інформації, здатність до ефективного поділу ресурсу між абонентами. Проаналізовано принцип дії та реалізацію систем з кодовим розділенням каналів, зокрема DSSS/CDMA, які використовуються у стандартах 3G, 4G, 5G і перспективних 6G мережах.

Проведено розрахунки кореляційних функцій для сигналів із розширеним спектром, досліджено властивості автокореляції та взаємокореляції, що є критичними для надійності синхронізації та розділення сигналів.

Побудовано математичні моделі DSSS-модулятора, на основі яких продемонстровано ефективність використання кодів Уолша для просторово-кодових схем.

Встановлено, що використання псевдошумових сигналів (коди Баркера) для розширення спектру забезпечує високу завадостійкість, можливість передачі інформації багатьох користувачів у спільній смузі частот та високу ефективність її використання.

Проведено дослідження кореляційних характеристик послідовностей коду Баркера. Встановлено, що послідовності коду Баркера є взаємно ортогональними при нульовому часовому зсуві. Результат взаємної кореляції цих послідовностей є відмінним від нуля, що дозволяє зробити висновок про можливі помилки прийому сигналів при різних потужності корисного і заважаючого сигналів.

Оскільки послідовності коду Баркера корелюють між собою при часовому зсуві, система зв'язку в якій вони використовуються буде чутливою до затримок поширення сигналів, багатопроменевого поширення сигналів та можливі помилки під час прийому сигналів.

Таким чином, широкосмугові сигнали відіграють ключову роль у сучасних та майбутніх системах зв'язку. Їх використання у поєднанні з методами кодового множинного доступу забезпечує новий рівень надійності, продуктивності та захищеності у сфері бездротових комунікацій. Результати дипломної роботи мають практичне значення для проектування сучасних телекомунікаційних систем та можуть бути основою для подальших наукових досліджень.

Додаток А

Результати розрахунків функції кореляції у математичному середовищі
Mathcad

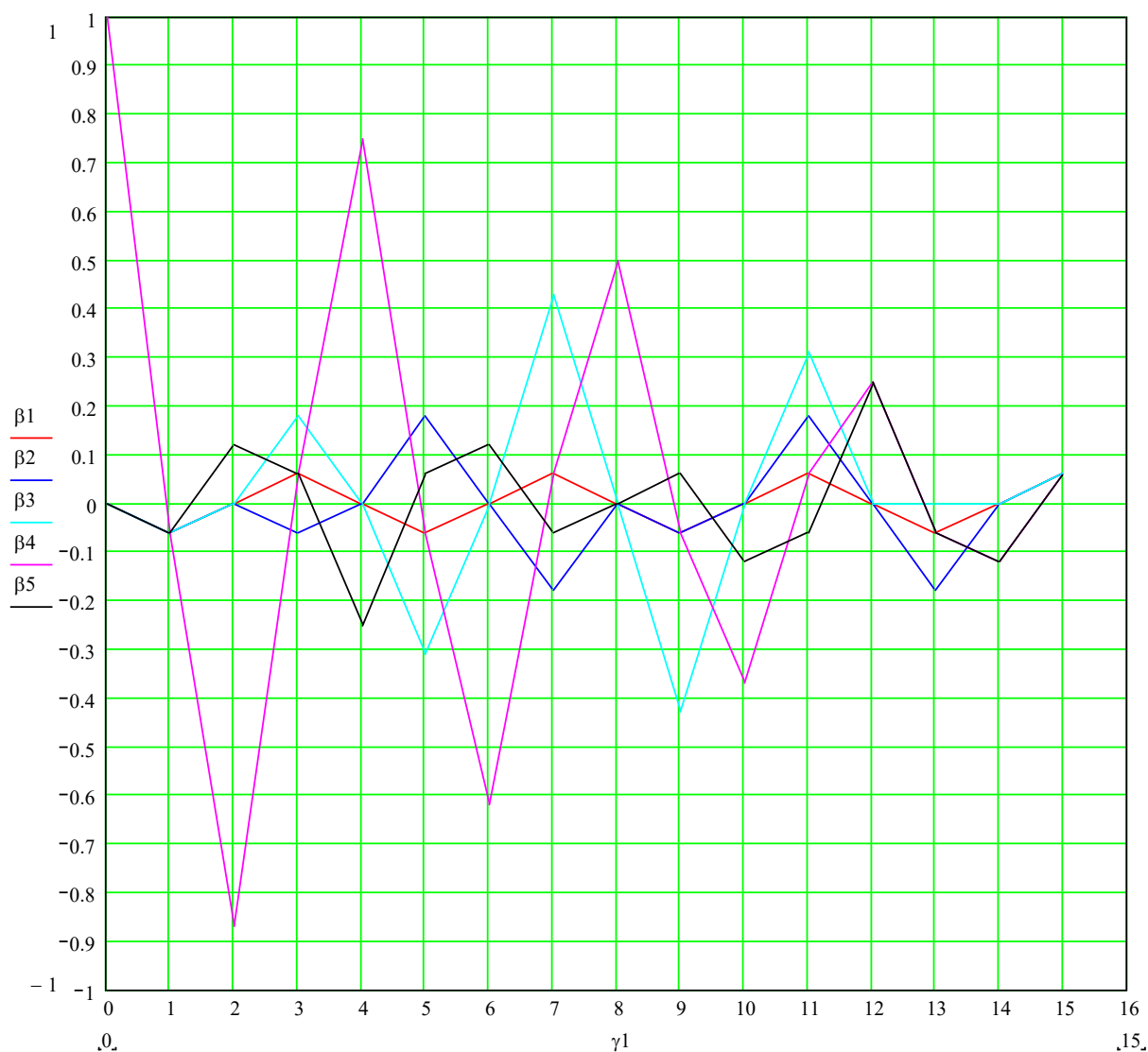


Рисунок А.1 – Функція кореляції кодів Уолша

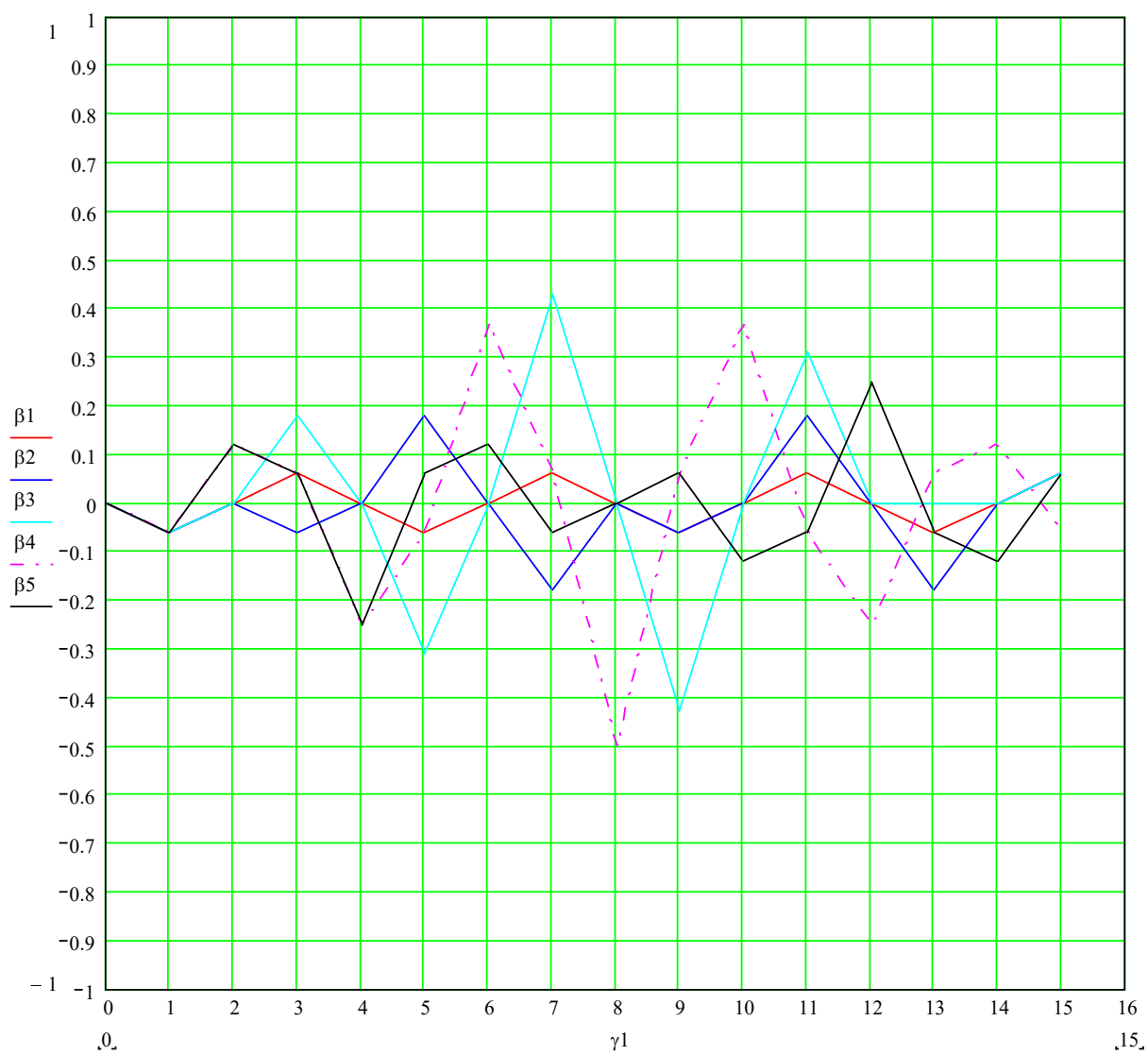


Рисунок А.2 – Функція взаємкореляції кодів Уолша

