

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інститут інформатики та радіоелектроніки
Факультет радіоелектроніки і телекомунікацій
(повне найменування інституту, назва факультету)

Радіотехніки та телекомунікацій
(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

до магістерської роботи

Друшій (маістерський)
(рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень))

на тему: "Моделювання каналу зв'язку з використанням методів OFDM"

Виконав: студент IV курсу, групи РТ-218м

спеціальності (напряму підготовки)

172 "Телекомунікації та радіотехніка"

(код і назва напряму підготовки, спеціальності)

ОПП "Радіотехніка"

Смоляр М. О.

(прізвище та ініціали)

Керівник Чорнобородов М. П.

(прізвище та ініціали)

Рецензент: Гурманова Н.І.

м. Запоріжжя

2019 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут інформатики та радіоелектроніки, факультет радіоелектроніки та телекомунікацій
Кафедра Радіотехніки та телекомунікацій
Ступінь вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
Освітня програма радіотехніка
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри РТТ
к.т.н., доц. Моршавка С.В.
«16» грудня 2019 року

ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТА (КИ)

Смоляр Михайло Олександрович
(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Моделювання каналу зв'язку з використанням методів OFDM.

керівник роботи Чорнобородов М.П.
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «8» листопада 2019 року № 365

2. Строк подання студентом роботи 16 грудня 2019 року.

3. Вихідні дані до роботи Вислідити модель каналу зв'язку з моделюванням, з використанням методів OFDM.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Ім'я області дослідження й постановка завдання.

2. Розробка інтеграційної моделі

3. Еквівалентні розрахунки

4. Оцінка критерію безпеки у надзвичайних ситуаціях.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Презентація. 6 слайдів.

6. Консультанти розділів роботи

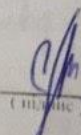
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконання завдання
1 розділ	Олександр Чернотородов М.П.		
2 розділ	Чернотородов М.П.		
Бюджетіка	Лівошис Т.В. доц. ФТН БД		
Охорона праці	Хіміщов Ю.В.		
Н-копінг	Мороз Т.В. маістр пар РТУ		

7. Дата видачі завдання « 2 » бересня 2019 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

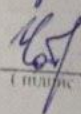
№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд об'єкту дослідження й постановка завдання.	30.09.19	
2.	Розробка імітаційної моделі	10.10.19	
3.	Організаційно-економічна пасивка (економічні розрахунки)	20.10.19	
4.	Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях.	10.12.19	

Студент(ка)


(підпис)

Смоляр М.О.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Чернотородов М.П.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 100 стор., 18 рис., 12 табл., 7 джерел

Мета роботи – моделювання каналу зв'язку з використанням методів OFDM.

Наукова новизна роботи полягає у створенні моделі радіоканалу з використанням методів OFDM.

За виконання роботи застосовувалися сучасні методи проектування. Проектування здійснювалося на фаховому програмному забезпеченні й обчислювальній техніці.

IEEE-802.11, Wi-Fi, OFDM, УЗГОДЖЕНИЙ ФІЛЬТР,
АВТОКОРЕЛЯЦІЙНА ФУНКЦІЯ, ШПФ

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	7
ВСТУП	8
1 ОГЛЯД ОБЛАСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ Й ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ..	10
1.1 Часові характеристики сигналів з OFDM.....	10
1.2 Спектральні характеристики випадкової послідовності сигналів з OFDM	17
1.3 Смуга займаних частот і спектральні маски	21
1.4 Формування сигналів з OFDM	23
1.5 Прийом сигналів з OFDM	25
1.6 Стандарт IEEE 802.11a	27
1.7 Загасання і інтерференція	29
1.8 Методи модуляції OFDM-сигналу	30
1.9 Моделі каналів розповсюдження OFDM-сигналів.....	36
1.10 Параметри, що характеризують завадостійкість радіотрактів багаточастотних широкосмугових сигналів.....	41
1.11 Імітаційний метод оцінки завадостійкості	42
1.12 Висновки до розділу	47
1.13 Постановка задачі дослідження.....	48
2 РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ	50
2.1 Структура.....	52
2.2 Основні параметри фізичного рівня стандарту 802.11a	53
2.3 Структура фрейму.....	54
2.4 Математичний опис сигналів фрейму	59
2.5 Формування фрейму фізичного рівня стандарту IEEE 802.11a.....	62
2.6 Допустимі помилки в амплітуді за модуляції.....	64
2.7 Оцінка завадостійкості	65
3 ЕКОНОМІЧНІ РОЗРАХУНКИ.....	67

3.1 Обґрунтування актуальності теми з позиції маркетингу.....	67
3.2 Визначення трудомісткості та тривалості роботи.....	70
3.3 Розрахунок кошторису витрат на практичну реалізацію магістерської роботи.....	73
3.4 Розрахунок вартості матеріалів.....	74
3.5 Спеціальне устаткування.....	75
3.6 Розрахунок заробітної плати.....	76
3.7 Відрахування на соціальне страхування.....	77
3.8 Загальновиробничі витрати.....	78
3.9 Бальна оцінка економічної ефективності проекту.....	78
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	82
4.1 Аналіз потенційних небезпек.....	82
4.2 Заходи по забезпеченню техніки безпеки.....	83
4.3 Заходи з пожежної безпеки.....	94
4.4 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях.....	96

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

OFDM	– Orthogonal frequency-division multiplexing
АЦП	– аналогово-цифрове перетворення
АЧХ	– амплітудно-частотна характеристика.
ЗПФ	– зворотне перетворення Фур'є
ПЛІС	– програмована логічна інтегральна схема
СБЧШСС	– система багаточастотних широкосмугових сигналів
СШСР	– системи широкосмугового радіодоступу
ЦАП	– цифро-аналоговий перетворювач
ЦОС	– цифрова обробка сигналів
ЦСП	– цифровий сигнальний процесор
ШБД	– широкосмуговий бездротовий доступ
ШПФ	– швидке перетворення Фур'є

ВСТУП

У системах широкосмугового бездротового доступу основним руйнівним фактором для цифрового каналу є завади від багатопроменевого прийому. Цей вид завад дуже характерний для ефірного прийому у містах з різноповерховою забудовою через багаторазові перевідбиття радіосигналу від будинків і інших споруд.

Радикальним подоланням цієї проблеми є застосування технології ортогонального частотного мультиплексування OFDM, яку було спеціально розроблено для боротьби з завадами за багатопроменевого прийому. Різновид технології - метод COFDM (сполучення канального кодування і OFDM) - добре відома і широко використовується в цифрових системах радіомовлення в Європі, Канаді і Японії.

За OFDM послідовна цифрова течія перетворюється на велике число рівнобіжних течій (субтечій), кожна з яких передається на окремій носійній.

Основною перевагою OFDM порівняно до схеми з однією носійною є його здатність протистояти складним умовам у каналі. Наприклад, боротись з загасанням в області ВЧ у довгих мідних дротах, вузькосмуговими завадами і частотно-вибірковим загасанням, викликаним багатопроменевим характером поширення, без використання складних фільтрів-еквалайзерів.

Канальна еквалізація спрощується внаслідок того, що OFDM сигнал може розглядатися як безліч вузькосмугових сигналів, які повільно модулюються. Низька символна швидкість уможливорює використання захисного інтервалу між символами, що дозволяє впоратися з часовим розсіюванням і усувати міжсимвольні спотворення.

Стандарт OFDM характеризується сильним перекриттям спектрів сусідніх підносійних, що дозволяє зменшити в двічі значення частотного рознесення і в стільки ж разів підвищити щільність передавання цифрової інформації (біт/с)/Гц.

Завдяки ортогональному методу демодуляції підносійних групового спектра, відбувається компенсація завад від сусідніх частот, незважаючи на те, що їхні бічні смуги взаємно перекриваються.

1 ОГЛЯД ОБЛАСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ Й ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

1.1 Часові характеристики сигналів з OFDM

Ідея передачі даних сигналами з OFDM ґрунтується на техніці передавання даних з використанням безлічі носійних і полягає в тому, що потік переданих даних розподіляється безліччю частотних підканалів (підносійних), і передача здійснюється на них паралельно. За рахунок поділу переданої високошвидкісної течії даних на велику (100-1000) кількість відносно низькошвидкісних підтечій (каналів), кожен з яких модулюється своєю підносійною, сигнали з OFDM забезпечують високу завадостійкість прийому в умовах міжсимвольної інтерференції.

Сигнали з OFDM формуються за допомоги пристрою, що виконує зворотнє дискретне перетворення Фур'є. Отримані на виході цього пристрою часові відліки через цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) і вихідні кола передавача надходять до безперервного каналу передачі. Сигнали на підносійних частотах - ортогональні.

На рис. 1.1 схематично наведено сигнал з OFDM в частотній часовій області для випадку чотирьох підносійних і двійкової фазової маніпуляції. За віссю частот наведено значення амплітуд $A_0, \dots, A_3$ коливань сигналів на підносійних частотах $F_0, \dots, F_3$, а за віссю часу T - обвідні мовних сигналів на кожній частоті за часом. Рознесення частот між підносійними становить $1/T$.

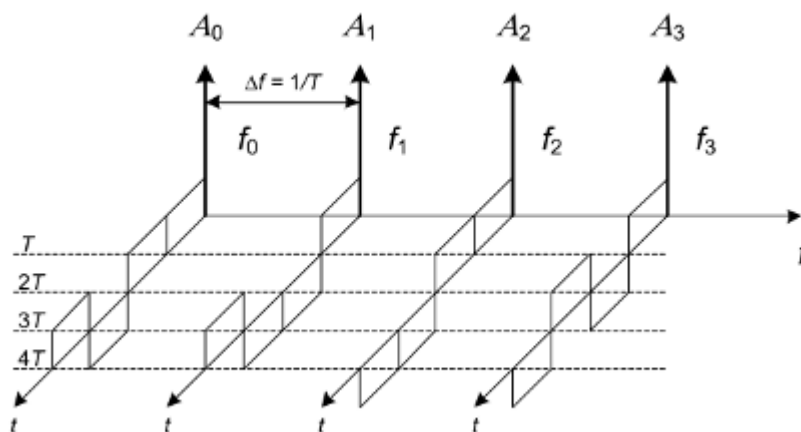


Рисунок 1.1 – Сигнали з OFDM в частотній і часовій областях

У часовій області на інтервалі часу тривалості T вміщується ціле число періодів коливань i -х підносійних. Енергетичний спектр випадкової послідовності сигналів з OFDM визначається сумою енергетичних спектрів випадкових послідовностей сигналів на кожній підносійній частоті. Наприклад, для сигналів рис. 1.1, енергетичний спектр визначатиметься формою спектра сигналів з прямокутною обвідною тривалістю T .

Сигнали з OFDM широко застосовуються в каналах передавання з міжсимвольною інтерференцією, викликаною відбиттями від об'єктів. Ступінь завадової дії міжсимвольної інтерференції і ймовірність помилкового прийому залежать від ступеню перекриття переданих інформаційних символів. Тому для поліпшення якості прийому сигналів в таких умовах доречно збільшувати тривалість символу T . Це можна зробити за рахунок зниження інформаційної швидкості передачі, що не завжди прийнятно.

Одним з відомих способів боротьби з міжсимвольною інтерференцією, що ґрунтується на збільшенні тривалості символу T , є застосування методів багатопозиційної модуляції, за якої тривалість T_c символу на виході модулятора збільшується в $\log_2 M$ порівняно до тривалості T_b інформаційного символу:

$$T_c = T_b \cdot \log_2 M, \quad (1.1)$$

де M - число можливих елементарних сигналів (сигнальних крапок).

За формування таких сигналів з OFDM використовуються методи фазової маніпуляції ФМ-2, ФМ-4, КАМ-16 і КАМ-64.

Для боротьби з міжсимвольною інтерференцією застосовується захисний інтервал, який додається до переданого сигналу з OFDM, пілот-сигнали і завадостійке кодування в поєднанні з перемежуванням. Вставляючи захисний інтервал достатньої тривалості на початку кожного блоку символів, можна практично повністю виключити вплив міжсимвольної інтерференції. Захисний інтервал є частиною часового інтервалу, відведеного для передавання блоку символів, який вставляється перед початком символу.

У сигналах з OFDM застосовуються ортогональні носійні, частоти яких вибираються з умови:

$$\int_0^T \sin(2\pi f_l t) \sin(2\pi f_k t) dt = 0, k \neq l,$$

де T – тривалість символу,

f_k, f_l - носійні частоти каналів k і l .

За виконання умови ортогональності, міжканальна інтерференція - відсутня. За рахунок більш щільного розташування підканалів за частотою, спектральна ефективність сигналів з OFDM, порівняно до спектральної ефективності класичних сигналів з частотною маніпуляцією, - значно вища.

На інтервалі часу від 0 до T сигнали з OFDM на носійній частоті f_n мають вигляд:

$$z(t) = \operatorname{Re} \left\{ \exp(j2\pi f_n t) \sum_{n=0}^{N-1} y_n \exp(j\omega_n t) \right\} = \operatorname{Re} \{ \exp(j2\pi f_n t) s(t) \},$$

$$\omega_n = n\omega_1 = 2\pi n \frac{1}{T} \quad (1.2)$$

де $\omega_1 = 2 \cdot \pi / T$,

ω_n - n-а підносійна частота,

N - кількість підносійних частот,

u_n - комплексний символ канального алфавіту, призначений для маніпуляції підносійної n-ої частоти.

На рис. 1.2 наведено форму послідовності сигналів з OFDM в основній смузі частот для значення числа підносійних частот $N = 1024$ і смуги робочих частот сигналу з OFDM $F_s = 10$ МГц. На кожній частоті, використовується маніпуляція ФМ-4. Швидкість передачі даних на кожній частоті, складає 10,9 кбіт/с.

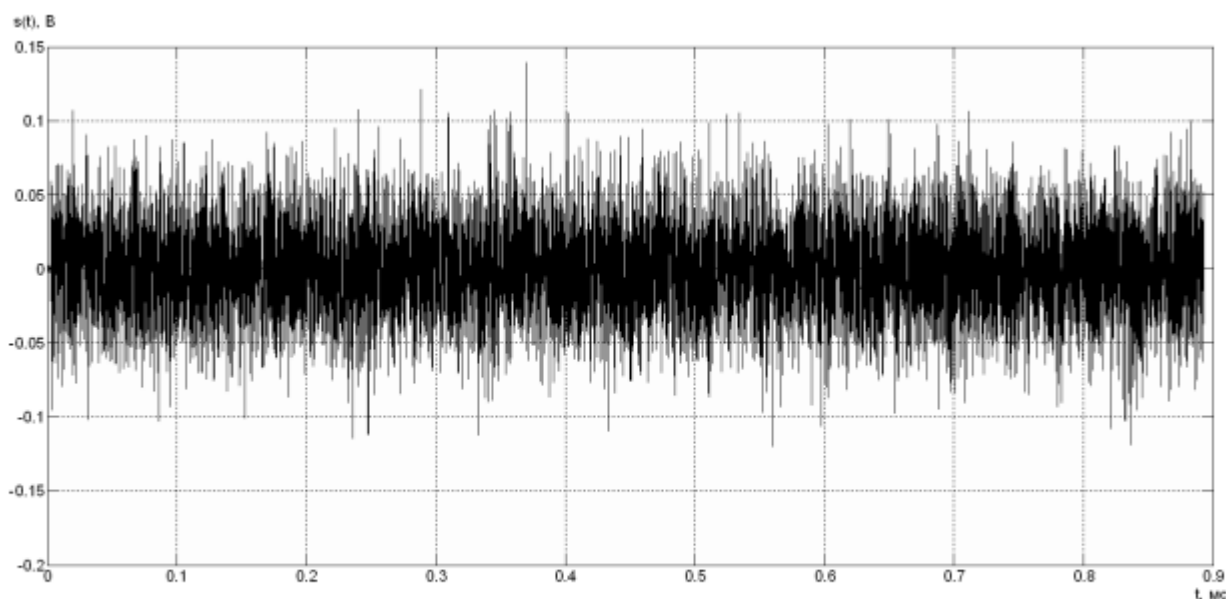


Рисунок 1.2 - Вид сигналу з OFDM для $N=1024$, $F_s=11,2$ МГц

У часовій області сигнал з OFDM є суперпозицією великої кількості відрізків гармонійних коливань різної частоти (див. рис. 1.2). Як видно з цього малюнка, пік-фактор такого сигналу може набувати відносно високих значень. Пік-фактор Π сигналів з OFDM - це відношення найбільшої (пікової) потужнос-

ті до середньої потужності сигналу $s(t)$:

$$\Pi = \frac{\max_{t \in [0; T]} |s(t)|^2}{P_{\text{cp}}}, \quad P_{\text{cp}} = \frac{1}{T} \int_0^T |s(t)|^2 dt. \quad (1.3)$$

Для сигналу з OFDM виду (1.2) з урахуванням того, що справедливо умова ортогональності:

$$\frac{1}{T} \int_0^T \exp(j(\omega_n - \omega_m)t) dt = \begin{cases} 1, & n = m \\ 0, & n \neq m \end{cases}, \quad (1.4)$$

отримуємо:

$$\begin{aligned} P_{\text{cp}} &= \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} \sum_{m=-N/2}^{N/2-1} y_n y_m^* \exp(j(\omega_n - \omega_m)t) dt = \\ &= \frac{1}{T} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} \sum_{m=-N/2}^{N/2-1} y_n y_m^* \int_0^T \exp(j(\omega_n - \omega_m)t) dt = \sum_{n=0}^{N-1} |y_n|^2. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Миттєва потужність сигналу з OFDM дорівнює:

$$|s(t)|^2 = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} \sum_{m=-N/2}^{N/2-1} y_n y_m^* \exp(j(\omega_n - \omega_m)t), \quad t \in [0; T]. \quad (1.6)$$

Тоді пік-фактор сигналу з OFDM визначається наступним виразом:

$$\Pi = \frac{\max_{t \in [0; T]} |s(t)|^2}{P_{\text{cp}}} = \frac{\max_{t \in [0; T]} \left\{ \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} \sum_{m=-N/2}^{N/2-1} y_n y_m^* \exp(j(\omega_n - \omega_m)t) \right\}}{\sum_{n=-N/2}^{N/2-1} |y_n|^2}. \quad (1.7)$$

Для випадку, коли на підносійних частотах використовується фазова маніпуляція, середня потужність сигналу $P_{\text{ср}} = \sum_{n=0}^{N-1} |y_n|^2$ не залежить від значень символів канального алфавіту. Для багаторівневих видів фазової маніпуляції (амплітудно-фазова маніпуляція АФМ, квадратурна амплітудна маніпуляція КАМ) за досить великого N , середня потужність сигналу також приблизно стала. Таким чином:

$$P_{\text{ср}} = \sum_{n=0}^{N-1} |y_n|^2 \cong \text{const}(y_n).$$

На рис. 1.3 наведено значення миттєвої потужності сигналів з OFDM з використанням на кожній підносійній частоті двійкової фазової маніпуляції ФМ-2 для значень числа підносійних частот $N = 64$ і частоті дискретизації $F_s = 11,2$ МГц. Тут за віссю ординат відкладені значення миттєвої потужності сигналу з OFDM, а за віссю абсцис - час. З цього малюнка видно, що пік-фактор зображеного сигналу дорівнює 7,8 дБ, тоді як пік-фактор сигналів з одною носійною і фазовою маніпуляцією дорівнює двійці. За переходу до багатопозиційних амплітудно-фазових методів маніпуляції, збільшення пік-фактора сигналів з OFDM ще більш значне.

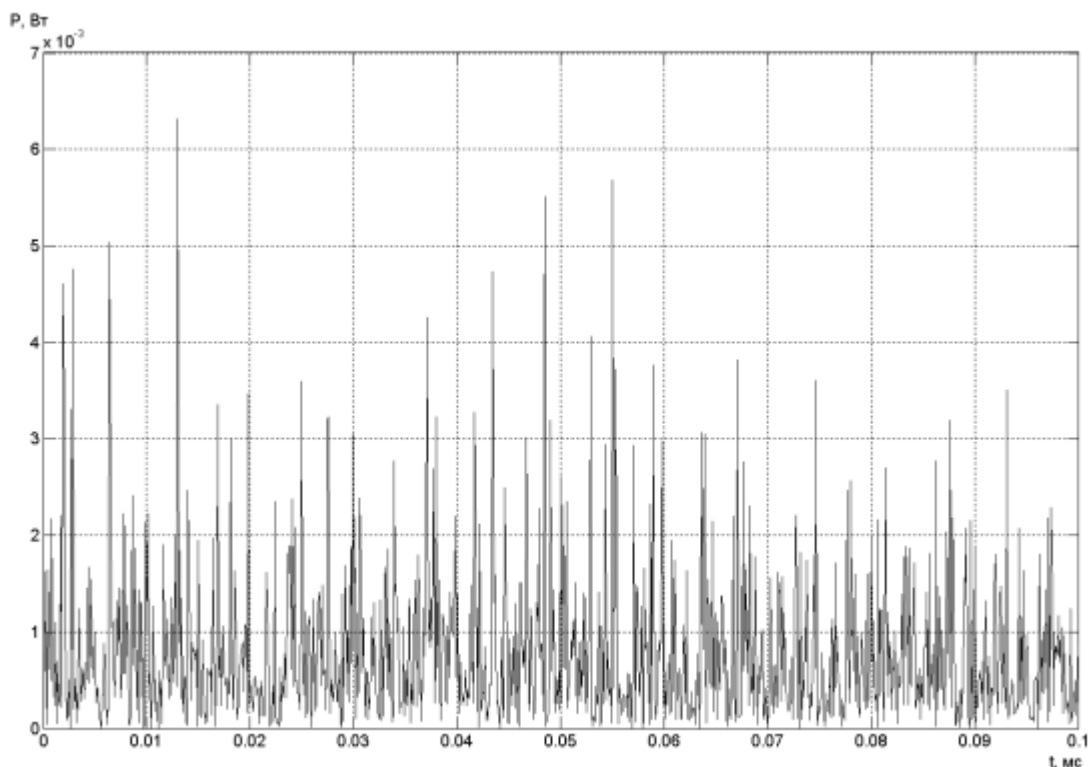


Рисунок 1.3 – Миттєва потужність сигналу з OFDM для $N = 64$, $F_s = 11,2$ МГц

За великих обсягу каналного алфавіту і числа підносійних частот можна вважати, що пік-фактор сигналу з OFDM є випадковою величиною, значення якої визначається конкретним набором випадкових символів y_n , де $n=0, \dots, N-1$.

Велика увага до вивчення можливостей зниження пік-фактора коливань пов'язано, в першу чергу, з тим, що саме цей параметр сигналів з OFDM істотно обмежує область їх застосування, особливо - в портативних приймально-передавальних пристроях з малим споживанням потужності. Високі значення пік-фактора коливань призводить до амплітудного обмеження сигналів з OFDM у вихідних колах передавача і появи в сигналі міжканальних завад. Як наслідок - до зниження завадостійкості прийому інформації та збільшення значень рівня позасмугових випромінювань.

1.2 Спектральні характеристики випадкової послідовності сигналів з OFDM

Визначимо спектральну щільність середньої потужності випадкової послідовності сигналів з OFDM. На інтервалі часу від $-T/2$ до $T/2$ сигнал з OFDM з комплексними амплітудами y_n :

$$s(t) = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} y_n \exp(j\omega_n t), \quad t \in -T/2; T/2, \quad \omega_n = n\omega_1 = 2\pi n \frac{1}{T} \quad (1.9)$$

або:

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} y_{nk} \exp(j\omega_n t) a(t - kT), \quad t \in (-\infty; \infty), \quad (1.10)$$

де $a(t)$ - сигнал обвідної на кожній підносійній.

Розглянемо випадковий процес такого вигляду

$$\xi(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} y_{nk} \exp(j\omega_n t) a(t - kT), \quad t \in (-\infty; \infty)$$

і його усічену k -реалізацію на інтервалі t від 0 до T_A :

$$\xi_{T_A}^{(k)}(t) = \sum_{k=1}^{L-1} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} y_{nk} \exp(j\omega_n t) a(t - kT), \quad T_A = LT.$$

Визначимо спектр обвідної $a(t)$ у загальному випадку прямокутної форми у вигляді:

$$S_a(\omega) = \mathbb{E}\{a(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} a(t) \exp(-j\omega t) dt.$$

Тоді спектр $\xi_{T_A}^{(k)}(t)$ дорівнює:

$$\begin{aligned} S_{T_A}^{(k)}(\omega) &= \mathbb{E}\{\xi_{T_A}^{(k)}(t)\} = \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} y_n k \int_{-\infty}^{+\infty} a(t - kT) \exp(j\omega_n t) \exp(-j\omega t) dt = \\ &= \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} y_{nk} S_a(\omega - \omega_n) \exp(-j\omega kT) \end{aligned}$$

Математичне сподівання енергетичного спектра $|S_{T_A}^{(k)}(\omega)|^2$ дорівнює:

$$\begin{aligned} m\{|S_{T_A}^{(k)}(\omega)|^2\} &= \\ &= \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{r=0}^{L-1} \exp(-j\omega(k-r)T) \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} \sum_{m=-N/2}^{N/2-1} m\{y_{nk} y_{mr}^*\} S_a(\omega - \omega_n) S_a^*(\omega - \omega_m), \end{aligned}$$

при чому у випадку статистично незалежних комплексних символів каналного алфавіту:

$$m\{y_{nk} y_{mr}^*\} = \begin{cases} 1, & n = m, k = r \\ 0, & n \neq m, k \neq r \end{cases}$$

та

$$m\{|S_{T_A}^{(k)}(\omega)|^2\} = \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} |S_a(\omega - \omega_n)|^2 = L \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} |S_a(\omega - \omega_n)|^2.$$

На відміну від випадку детермінованих сигналів, складова енергетичного спектра досліджуваних випадкових послідовностей сигналів з OFDM, обумовлена перехресними добутками $S_a(\omega - \omega_n)S_a^*(\omega - \omega_m)$, при $n \neq m$, дорівнює нулю. Остаточно маємо:

$$G(\omega) = \lim_{LT \rightarrow \infty} \frac{1}{LT} L \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} |S_a(\omega - \omega_n)|^2.$$

Таким чином, спектральна щільність середньої потужності сигналу визначається наступним виразом:

$$G(\omega) = \frac{1}{T} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} |S_a(\omega - \omega_n)|^2,$$

$$G_{OFDM}(\omega) = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} G(\omega - \omega_n),$$

тобто спектральна щільність середньої потужності сигналу з OFDM дорівнює сумі зсунутих копій спектральних густин середньої потужності одночасотного сигналу.

Розглянемо приклад енергетичного спектру сигналів з OFDM для випадку, коли обвідна сигналів, що передаються на кожній частоті, має прямокутний вигляд:

$$G(\omega) = A^2 T^2 \frac{\sin^2(\omega T / 2)}{(\omega T / 2)^2},$$

де A - амплітуда обвідної,

T - тривалість обвідної.

Спектральна щільність середньої потужності сигналу з OFDM з прямоку-

тною обвідною в квадратурних складових на кожній підносійній:

$$G_{\text{rect}}(\omega) = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} A_n^2 T^2 \frac{\sin^2((\omega T - 2\pi n) / 2)}{((\omega T - 2\pi n) / 2)^2},$$

де A_n - амплітуда n -підносійної, рівна нулеві, якщо підносійна не використовується в сигналі з OFDM, і одиниці, якщо використовується.

Енергетичний спектр сигналу з OFDM з 64 підносійними, прямокульно огибають на підносійних і ФМ-2 представлений на рис. 1.4. Тут за віссю ординат відкладені значення спектральної щільності середньої потужності сигналу, а за віссю абсцис - частота, нормована до частоти дискретизації сигналу. Спектр сигналу з OFDM є суперпозицією спектрів всіх підносійних.

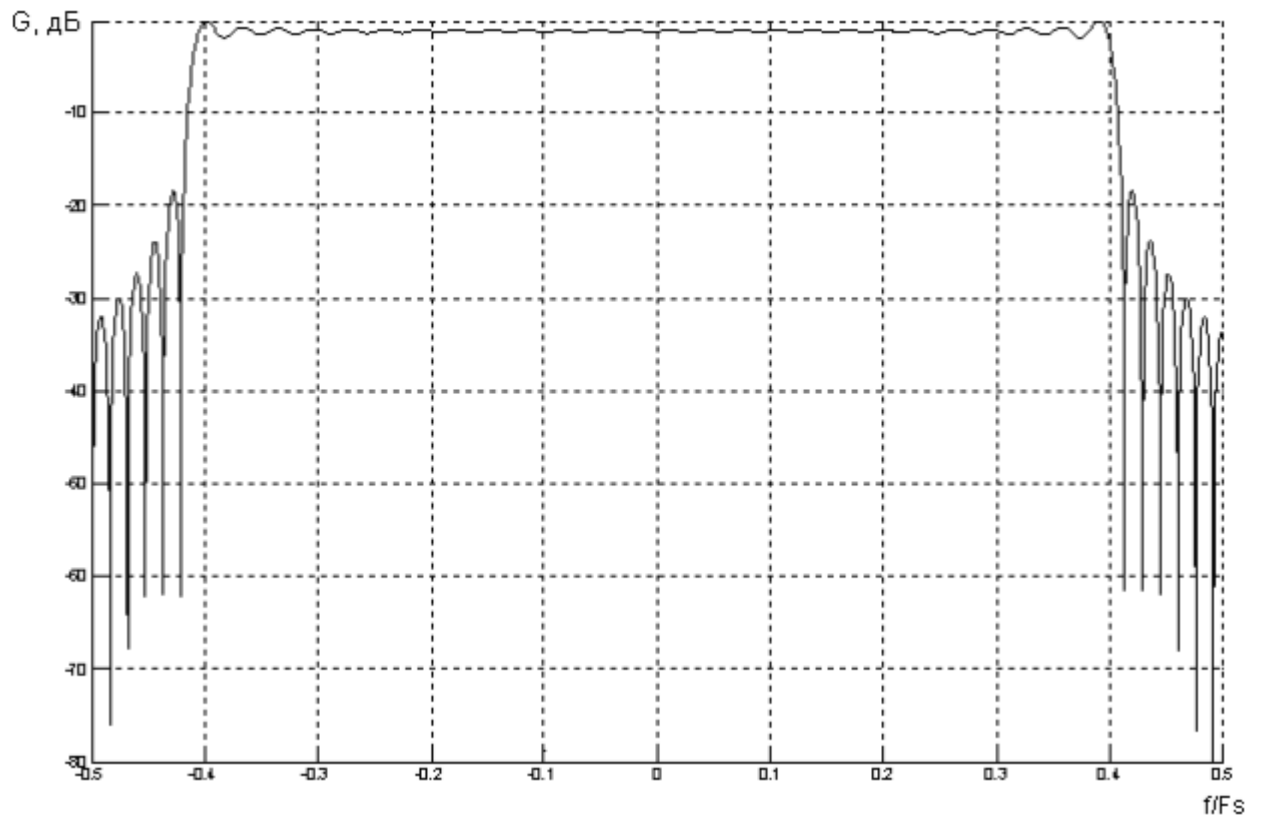


Рисунок 1.4 - Енергетичний спектр сигналу з OFDM з $N = 64$

1.3 Сму́га займаних частот і спектральні маски

Відповідно до норм ГКРЧ на ширину смуги радіочастот та позасмугових випромінювання цивільного застосування, контрольна ширина смуги частот випромінювання визначається за рівнем -30 дБ. За межами такої смуги будь яка дискретна складова спектра позасмугових радіовипромінювань або спектральна щільність потужності позасмугових радіовипромінювань ослаблені не менше, ніж на 30 дБ відносно заданого (вихідного) рівня 0 дБ.

Позасмуговим радіовипромінюванням називається випромінювання на частоті або частотах, що безпосередньо прилягають до необхідної ширини смуги частот, і яке є результатом процесу модуляції, але не включає побічних випромінювань. Норми на позасмугові випромінювання встановлені за значеннями ширини смуги частот радіовипромінювання на рівнях -40, -50 і -60 дБ відносно заданого (вихідного) рівня 0 дБ.

Розрізняють необхідну ΔF_n і займану ΔF_z смуги частот (див. рис. 1.5).

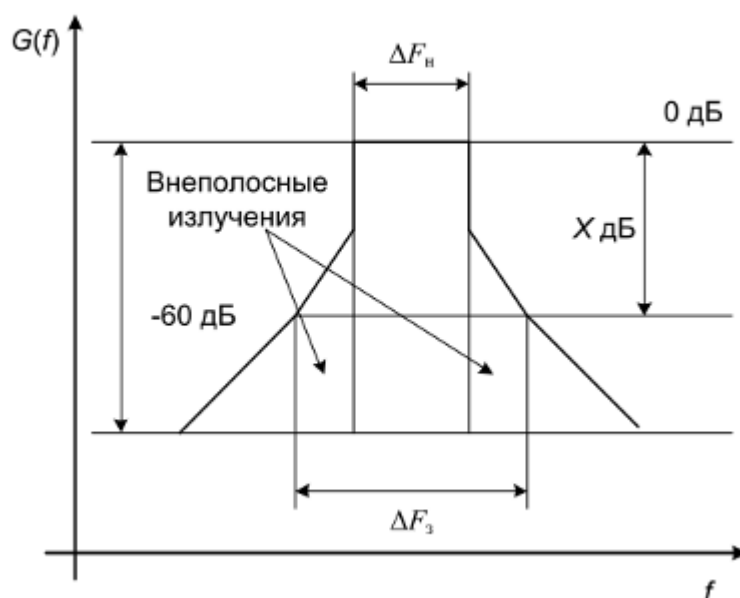


Рисунок 1.5 - Необхідна і займана смуги частот і позасмугових випромінювання

радіосигналу

В якості займаної смуги частот звичайно приймається смуга, за межами якої зосереджена деяка задана частина середньої потужності випромінюваних коливань.

Для чисельної оцінки ΔF вводять поняття обмежувальної лінії внелінійного випромінювання. Це лінія на площині координат (рівень - частота), яка встановлюється для кожного класу випромінювання і являється верхньою межею максимально допустимих значень рівнів складаючих внелінійний спектр випромінювання, виражених в децибелах відповідно заданого (вихідного) рівня 0 дБ. Нижнім рівнем вимірюваної потужності випромінювання зазвичай вважають - 60 дБ. За вибору форми застосовуваних сигналів, необхідно прагнути до того, щоб ΔF була якомога ближче за значенням до ΔF_m .

Бездротові мережі широкосмугового доступу мусять задовольняти стандартам IEEE 802.11 b, g, n (Wi-Fi).

Так, наприклад, координати точок перегину масок спектру для сигналів з OFDM з різною смугою частот представлені в табл. 1.1. Допустимий рівень побічних випромінювань в діапазоні частот від 1 до 10 ГГц становить -50дБм.

Таблиця 1.1 – Координати точок перегину масок спектра

Смуга частот, МГц	A	B	C	D	E	F
1,25	0,625	0,625	0,893	1,321	2,500	3,125
1,5	0,750	0,750	1,071	1,586	3,000	3,750
1,75	0,875	0,875	1,250	1,850	3,500	4,375
2,5	1,250	1,250	1,785	2,643	5,000	6,250
3	1,500	1,500	2,142	3,171	6,000	7,500
3,5	1,750	1,750	2,499	3,700	7,000	8,750
5	2,500	2,500	3,570	5,285	10,000	12,500
6	3,000	3,000	4,284	6,342	12,000	15,000
7	3,500	3,500	4,998	7,399	14,000	17,500
8,75	4,375	4,375	6,248	9,249	17,500	21,875
10	5,000	5,000	7,140	10,570	20,000	25,000
12	6,000	6,000	8,568	12,684	24,000	30,000
14	7,000	7,000	9,996	14,798	28,000	35,000
15	7,500	7,500	10,710	15,855	30,000	37,500
17,5	8,750	8,750	12,495	18,498	35,000	43,750
20	10,000	10,000	14,280	21,140	40,000	50,000
24	12,000	12,000	17,136	25,368	48,000	60,000
28	14,000	14,000	19,992	29,596	56,000	70,000

Визначення займаної смуги частот за рівнем -60 дБ визначатиме і смугу частот сигналів з OFDM. У цьому зв'язку, смуга частот сигналів визначається видом енергетичного спектра випадкової послідовності сигналів. При цьому, оскільки швидкість спаду рівня нелінійних випромінювань у таких сигналів велими низька, смуга займаних частот виявляється досить великою.

1.4 Формування сигналів з OFDM

Однією з переваг класичних сигналів з OFDM є використання за їх формування та прийому методів дискретного перетворення Фур'є. Це істотно спрощує практичну реалізацію приймально-передавальних трактів радіомодемів.

При формуванні сигналів з OFDM цифровий потік інформаційних символів надходить на блок завадостійкого кодування, з виходу якого каналні символи подаються на модулятор сигналів (див. рис. 1.6). Модулятор сигналів проводить перетворення каналних символів двійкового алфавіту в комплексні модуляційні символи у відповідності з обраним законом маніпуляції. Далі отримані символи надходять на перетворювач послідовного потіку даних в паралельний. Формування групового сигналу в цифровому вигляді здійснюється за допомогою зворотного (швидкого) дискретного перетворення Фур'є. На цьому етапі здійснюється додавання в груповий сигнал пілотних підносійних, які використовуються для оцінки параметрів каналу. Перетворення сигналу в аналогову форму проводиться за допомогою ЦАП.



Рисунок 1.6 – Узагальнена структурна схема пристрою формування сигналів з OFDM

Спектр дискретного сигналу є періодичною функцією за період, рівний частоті дискретизації F_s . Відновлення аналогового сигналу здійснюється за допомогою ЦАП і фільтра нижніх частот (ФНЧ) із смугою пропускання ΔF . Амплітудно-частотна характеристика ФНЧ повинна бути плоскою в області основної пелюстки спектру сигналу з OFDM і швидко спадати поза основної пелюстки, щоб ефективно подавити копії спектра дискретного сигналу.

У реальних умовах апаратура формування сигналів з OFDM включає в

себе блоки завадостійкого кодування, перемеження, блоки тактовою і циклової синхронізації, блоки введення захисного інтервала та ін. Так, наприклад, при побудові апаратури формування сигналів з OFDM в стандарті IEEE 802.11a в режимі WirelessLAN, використовуються наступні параметри:

- кількість крапок ЗШПФ $N = 256$;
- число використовуваних частот: 200 (192 інформаційних підносійних і 8 підносійних для пілот-сигналів);

Частота дискретизації F_s і тривалість сигналу T визначаються з табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Параметри сигналу з OFDM в стандарті IEEE 802.16e-2005 для різних значень ΔF_3

ΔF_3 , МГц	1,75	3,5	7	14	28
F_s , МГц	2	4	8	16	32
$T = N / F_s$, мкс	128	64	32	16	8

1.5 Прийом сигналів з OFDM

Основним блоком пристроїв прийому сигналів з OFDM є цифровий блок дискретного (швидкого) перетворення Фур'є. Застосування ШПФ істотно спрощує практичну реалізацію прийомних трактів радіомодемів.

На рис. 1.7 наведена узагальнена структурна схема пристрою прийому сигналів з OFDM. На цій схемі вхідний сигнал надходить на змішувач, в якому здійснюється перенесення спектра сигналу в основну смугу частот, далі сигнал подається на ФНЧ з смугою пропускання ΔF і перетворюється в цифровий вигляд за допомогою АЦП.

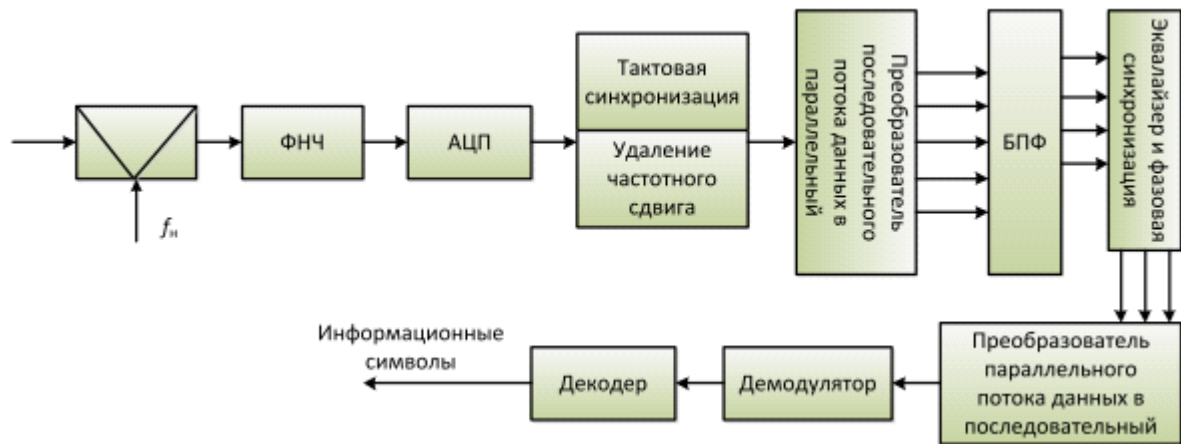


Рисунок 1.7 – Узагальнена структурна схема пристрою прийому сигналів з OFDM

У цифровій частині приймача виконуються процедури тактовою та фазової синхронізації, корекції передавальної характеристики каналу (еквалайзер), демодуляції і декодування. У бездротових системах передачі даних для реалізації тактової синхронізації застосовується преамбула - сигнал з OFDM з повністю відомими параметрами і хорошими автокореляційними властивостями. Також на етапі тактової синхронізації здійснюється корекція можливого зсуву сигналу по частоті. Наявність блоку видалення частотного зсуву обов'язкова, тому що сигнали з OFDM чутливі до помилок неортогональності, що виникають унаслідок зсуву сигналу по частоті.

У приймачі, показаному на рис. 1.7, реалізується когерентний алгоритм прийому сигналів з OFDM, який забезпечується формуванням всередині блоку ШПФ когерентних опорних коливань на кожній підносійній, паралельного множення вхідного сигналу на опорні коливання і інтегрування добутків на тривалості сигналу.

Всі зазначені операції здійснюються всередині блоку ШПФ, на вихід блоку надходять результати інтегрування (підсумовування) для кожної підносійної. Таким чином, когерентний прийом сигналів з OFDM з прямокутною обвідною в дискретній формі здійснюється на основі алгоритму швидкого перетворення Фур'є. Маємо:

$$\hat{C}_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} x_k \exp(-j2\pi kn / N),$$

де $x_k = \mu s_{rk} + n_k$ - часові відліки сигналу на виході ЦАП,

C_n - вихід суматора на n -підносійній в момент часу, що відповідає закінченню сигналу.

Таким чином, всі дії з реалізації когерентного прийому сигналів з OFDM здійснюються в блоці ШПФ паралельно. Блок ШПФ реалізує банк кореляторів, кожен з яких налаштований на певну підносійну.

Фазова синхронізація і корекція передавальної характеристики каналу здійснюється в еквалайзері на основі пілотних підносійних. Пілотні підносійні є спеціально виділеними частотами, рівномірно розподілені в смузі займаних частот, на яких передається заздалегідь відома інформація. На основі аналізу прийнятих і переданих символів на пілотних підносійних можна оцінити комплексний коефіцієнт передачі каналу і зсув фази на цих частотах і далі вирішити завдання інтерполяції передавальної характеристики каналу у всій смузі займаних частот.

В демодуляторі здійснюється перетворення отриманих комплексних модуляційних символів у каналні символи довічного алфавіта. Канальні символи надходять на блок декодера завадозахищеного коду і далі до одержувача повідомлень.

1.6 Стандарт IEEE 802.11a

Технологія побудови радіоканалу на основі мультиплексування з ортогональним поділом частот була реалізована в стандарті IEEE 802.11a. Діапазон частот в сигналі OFDM складається з двох частотних смуг загальною шириною 300 МГц. Перша смуга 5,15-5,35 ГГц, друга - 5,725-5,825 ГГц. При цьому перша

смука розділена на дві 100-МГц частини. Таким чином, для передачі використовується три 100-МГц які не перекриваються, кожен з яких передбачає різні обмеження на потужність: 50 мВт в "нижньому", 250 мВт в "середньому" і до 1 Вт в "верхньому".

Стандарт 802.11a визначає перехід на метод кодованого ортогонального частотного мультиплексування, швидкість передачі даних досягає 54 Мбіт/с. Робота з такою швидкістю можлива завдяки розбиттю одного "швидкого" 20 МГц каналу на 52 "повільних" 300-кГц носійних.

Наявні специфікації дозволяють одночасно працювати тільки одному пристрою (котрі використовують всі 52 носійних). У стандарті визначено три обов'язкові швидкості передачі даних (6, 12 і 24 Мбіт / с) і п'ять додаткових (9, 18, 24, 48 і 54 Мбіт / с). Є можливість одночасного використання двох каналів, швидкість при цьому подвоюється. Внаслідок складності виробництва більш високочастотного обладнання, реальний випуск пристроїв стандарту 802.11a почався тільки наприкінці 2001р. Відповідно до правил FCC частотний діапазон UNII розбитий на три 100-мегагерцевого піддіапазону, що розрізняються обмеженнями по максимальній потужності випромінювання. Нижчий діапазон (від 5,15 до 5,25 ГГц) передбачає потужність всього 50 мВт, середній діапазон (від 5,25 до 5,35 ГГц) - 250 мВт, а верхній діапазон (від 5,725 до 5,825 ГГц) - 1 Вт. Використання трьох частотних піддіапазонів із загальною шириною 300 МГц робить стандарт 802.11a самим, так би мовити, широкосмуговим з сімейства стандартів 802.11 і дозволяє розбити весь частотний діапазон на 12 каналів, кожен з яких має ширину 20 МГц, вісім з яких лежать в 200-мегагерцовому діапазоні від 5,15 до 5,35 ГГц, а решта чотири канали - у 100-мегагерцовому діапазоні від 5,725 до 5,825 ГГц. При цьому чотири верхніх частотних каналів, що передбачають найбільшу потужність передачі, використовуються переважно для передачі сигналів поза приміщеннями.

Передбачена протоколом 802.11a ширина каналу 20 МГц цілком достатня для організації високошвидкісної передачі. Використання ж частот понад 5 ГГц

і обмеження потужності передачі призводять до виникнення ряду проблем при спробі організувати високошвидкісну передачу даних, і це необхідно враховувати при виборі методу кодування даних.

1.7 Загасання і інтерференція

Поширення будь-якого сигналу неминуче супроводжується його загасанням, причому величина загасання сигналу залежить як від відстані від точки передачі, так і від частоти сигналу. При вимірюванні в децибелах величини загасання сигналу користуються формулою:

$$L_f = X \lg \left(\frac{4\pi df}{c} \right),$$

де X - коефіцієнт ослаблення, рівний 20 для відкритого простору,

d - відстань від точки передачі,

f - частота сигналу,

c - швидкість світла.

З цієї формули безпосередньо випливає, що зі збільшенням частоти переданого сигналу збільшується і його загасання. Так, при поширенні сигналу у відкритому просторі з частотою 2,4 ГГц він слабшає на 60 дБ при видаленні від джерела на 10 м. Якщо ж частота дорівнює 5 ГГц, слабшання сигналу при видаленні на 10 м складе вже 66 дБ.

Враховуючи, що правила FCC диктують використання істотно меншої потужності випромінювання в нижніх піддіапазонах UNII, ніж в діапазоні ISM 2,4 ГГц, стає зрозуміло, що використання більш високих частот у протоколі 802.11a призводить до дещо меншому радіусу дії мережі, ніж в протоколі 802.11b, що представляє собою розширення базового стандарту IEEE 802.11, який припускав можливість передачі даних по радіоканалу на швидкості 1 Мбіт

/ с і опціонально на швидкості 2 Мбіт / с (у стандарті IEEE 802.11b були вже додані більш високі швидкості передачі - 5,5 і 11 Мбіт / с. Стандартом IEEE 802.11b передбачено використання частотного діапазону від 2,4 до 2,4835 ГГц, який призначений для безліцензійного використання в промисловості, науці та медицині).

Тепер розглянемо інтерференцію. У точці прийому результуючий сигнал являє собою суперпозицію багатьох сигналів з різними амплітудами і зміщеними відносно один одного за часом, що еквівалентно додаванню сигналів з різними фазами. Якщо припустити, що передавач поширює гармонійний сигнал:

$$y_{in}=A\sin (2 \pi vt)$$

з частотою носійної v і амплітудою A , то в приймачі буде отриманий сигнал:

$$y_{out} = \sum_{i=1}^N A_i \sin 2\pi v(t - t_i)$$

де t_i - затримка поширення сигналу по i -му шляху.

Найбільш негативно на спотворенні сигналу позначається міжсимвольні інтерференція. Оскільки символ - це дискретне стан сигналу, що характеризується значеннями частоти носійної, амплітуди і фази, то для різних символів змінюються амплітуда і фаза сигналу, тому відновити вихідний сигнал вкрай складно.

1.8 Методи модуляції OFDM-сигналу

OFDM модуляція передбачає використання ряду ортогональних підносій-

них, модуляція яких здійснюється комплексними інформаційними символами. Введемо інтервал часу, на якому поднесушие будуть ортогональними. Ортогональність забезпечується умовами:

$$\int_0^{T_u} f_l(t) f_m(t) dt \neq 0, l = m;$$

$$\int_0^{T_u} f_l(t) f_m(t) dt = 0, l \neq m;$$

де $\dot{F}_n = F_n e^{j\varphi_n}$ - комплексний інформаційний модулюючий символ,

F_n - амплітуда символу,

φ_n - фаза символу, $n = 0, 1, \dots, N-1$.

Безперервний сигнал на інтервалі часу T_u , що складається з N підносійних $f_n(t) = \cos(2\pi f_n t)$, модульованих символами $\dot{F}_n(t)$:

$$S(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} F_n \cos(2\pi f_n(t) + \varphi_n) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \operatorname{Re}(\dot{F}_n e^{j2\pi f_n t}) ,$$

де $f_n(t)$ - частота n -підносійної.

Таким чином, для забезпечення ортогональності модульованих підносійних, достатньо виконання умови:

$$f_{n+1} - f_n = \Delta f = 1/T_u .$$

Перейдемо від безперервного сигналу до дискретного, а період дискретизації виберемо з умови:

$$T_u/T = N.$$

В результаті, отримаємо форму сигналу:

$$S_k = S(kT) = \frac{1}{N} \operatorname{Re} \sum_{n=0}^{N-1} \dot{F}_n e^{j2\pi n k \frac{T}{T_u}} = \frac{1}{N} \operatorname{Re} \sum_{n=0}^{N-1} \dot{F}_n e^{jn k \frac{2\pi}{N}},$$

де S_k - значення сигналу в момент часу kT .

Таким чином, ми перейшли від безперервної форми опису OFDM-сигналу до дискретного. Отриманий вираз є дійсною частиною зворотного дискретного перетворення Фур'є. У збудувачах, ЗДПФ здійснюється в комплексній формі, тому сигнал набуває вигляду:

$$\dot{S}_k = \dot{S}(kT) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \dot{F}_n e^{jn k \frac{2\pi}{N}}.$$

Розкриємо цей вираз, попередньо опустивши коефіцієнт $1/N$. В результаті отримаємо систему з N рівнянь, кожне з яких з точністю до постійного коефіцієнта визначає значення сигналу в момент часу (kT):

$$\begin{aligned} \dot{S}(0) &= \dot{F}_0 + \dot{F}_1 + \dots + \dot{F}_n \dots + \dot{F}_{N-1} \\ \dot{S}(T) &= \dot{F}_0 + \dot{F}_1 e^{j\frac{2\pi}{N}} + \dots + \dot{F}_n e^{j\frac{2\pi n}{N}} \dots + \dot{F}_{N-1} e^{j\frac{2\pi(N-1)}{N}} \\ &\vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ \dot{S}(kT) &= \dot{F}_0 + \dot{F}_1 e^{jk\frac{2\pi}{N}} + \dots + \dot{F}_n e^{jk\frac{2\pi n}{N}} \dots + \dot{F}_{N-1} e^{jk\frac{2\pi(N-1)}{N}} \\ &\vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ \dot{S}((N-1)T) &= \dot{F}_0 + \dot{F}_1 e^{j(N-1)\frac{2\pi}{N}} + \dots + \dot{F}_n e^{j(N-1)\frac{2\pi n}{N}} \dots + \dot{F}_{N-1} e^{j(N-1)\frac{2\pi(N-1)}{N}} \end{aligned}$$

Дана система рівнянь відображає процес модуляції підносійної інформаційними символами $\dot{F}_n(t)$. При цьому:

- кожен символ модулює тільки одну поднесущую;
- у формуванні кожного відліку беруть участь всі символи;
- процеси формування підносійних і їх модуляції в рамках ОДПФ суміщені.

Для того, щоб цей вид модуляції міг бути застосований на практиці, а саме можна було як передавати так і приймати сигнал сформований таким чином, покажемо, що його можна демодулювати. При цьому будемо вважати, що в приймальному пристрої на основі прийнятого сигналу сформовані відліки $\dot{S}(kT)$. Застосуємо до них пряме дискретне перетворення Фур'є:

$$\dot{F}_n = \sum_{k=0}^{N-1} \dot{S}(kT) e^{-jnk \frac{2\pi}{N}}.$$

Розкриємо отриманий вираз. В результаті отримаємо систему з N рівнянь, кожне з яких визначає значення комплексного інформаційного символу $\dot{F}_n$:

$$\begin{aligned} \dot{F}_0 &= \dot{S}(0) + \dot{S}(T) + \dots + \dot{S}(kT) \dots + \dot{S}((N-1)T) \\ \dot{F}_1 &= \dot{S}(0) + \dot{S}(T)e^{-j\frac{2\pi}{N}} + \dots + \dot{S}(kT)e^{-j\frac{2\pi k}{N}} \dots + \dot{S}((N-1)T)e^{-j\frac{2\pi(N-1)}{N}} \\ &\quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ \dot{F}_n &= \dot{S}(0) + \dot{S}(T)e^{-jn\frac{2\pi}{N}} + \dots + \dot{S}(kT)e^{-jn\frac{2\pi k}{N}} \dots + \dot{S}((N-1)T)e^{-jn\frac{2\pi(N-1)}{N}} \\ &\quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ \dot{F}_{N-1} &= \dot{S}(0) + \dot{S}(T)e^{-j(N-1)\frac{2\pi}{N}} + \dots + \dot{S}(kT)e^{-j(N-1)\frac{2\pi k}{N}} \dots + \dot{S}((N-1)T)e^{-j(N-1)\frac{2\pi(N-1)}{N}} \end{aligned}$$

Аналіз цієї системи рівнянь показує, що виділення кожного символу реалізується шляхом інтегрування на інтервалі часу T_u добутки комплексного зна-

чення OFDM-сигналу на певну комплексну експоненту і стає можливим завдяки ортогональності системи.

Таким чином, ми показали можливість демодуляції OFDM - сигналу, смодульованого за допомогою ОДПФ. Тепер перетворимо формулу модуляції, виділивши дійсну і уявну частини:

$$\begin{aligned}\dot{S}_k &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \dot{F}_n e^{jn k \frac{2\pi}{N}} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \dot{F}_n \left(\cos\left(\frac{2\pi n k}{N}\right) + j \sin\left(\frac{2\pi n k}{N}\right) \right) = \\ &= \frac{1}{N} \left[\sum_{n=0}^{N-1} \dot{F}_n \cos\left(\frac{2\pi n k}{N}\right) + j \sum_{n=0}^{N-1} \dot{F}_n \sin\left(\frac{2\pi n k}{N}\right) \right]\end{aligned}$$

За цією формулою і будемо здійснювати модуляцію з використанням емпіричних функцій синуса і косинуса.

У формулі по якій ми здійснюємо даний метод модуляції присутні тригонометричні функції $\sin$ і $\cos$. Комп'ютер обчислює їх шляхом розкладання в ряд і внаслідок це займає багато часу. Розглянемо інші методи обчислення тригонометричних функцій на прикладі синуса. Якщо обчислювати синус звичайним оператором $\sin$, то це дає точний результат. Таким методом зручно користуватися, якщо значення синуса потрібно обчислити один або кілька разів. Якщо ж синус доводиться рахувати багато разів, то буде зручно скористатися іншим методом, який буде витрачати менше часу.

Суть методу полягає в тому, що спочатку вираховуються значення синуса аргументів, які беруться з невеликим інтервалом. Ці значення запам'ятовуються. А потім, коли нам потрібно обчислити синус, то ми із заповнених значень відшукуємо те значення, яке відповідає аргументу, найбільш наближеному до того, який потрібно порахувати. При цьому може утворитися похибка. Вона буде тим менше, чим менше ми будемо вибирати крок, з яким вважалися значення синуса для запам'ятовування. Ще один метод обчислення синуса - за допомогою розкладання в ряд Маклорена.

Подамо функцію синуса у вигляді перших двох членів розкладання ряду Маклорена:

$$f(x) = k_1 x - k_2 x^3.$$

Для того, щоб знайти коефіцієнти і спочатку візьмемо похідну цієї функції і знайдемо точки екстремумів, потім прирівняємо значення функції в точках, відповідних максимуму, - одиниці, як максимальному значенню синуса:

$$f'(x) = k_1 - 3k_2 x^2$$

$$k_1 - 3k_2 x^2 = 0$$

$$x^2 = \frac{k_1}{3k_2}$$

$$x = \sqrt{\frac{k_1}{3k_2}}$$

$$f(x)_{\max} = k_1 - k_2 \left(\sqrt{\frac{k_1}{3k_2}} \right)^3 = 1$$

Для того щоб знайти коефіцієнти k_1 і k_2 , потрібно ще одне рівняння. Підставимо у вихідне розкладання синуса $x = \frac{\pi}{6}$ і прирівняємо до $f(x)$ к $\frac{1}{2}$:

$$k_1 \frac{\pi}{6} - k_2 \left(\frac{\pi}{6} \right)^3 = \frac{1}{2}.$$

Виходить система рівнянь:

$$\begin{cases} k_1 - k_2 \left(\sqrt{\frac{k_1}{3k_2}} \right)^3 = 1 \\ k_1 \frac{\pi}{6} - k_2 \left(\frac{\pi}{6} \right)^3 = \frac{1}{2} \end{cases}$$

Вирішуючи цю систему, отримаємо:

$$k_1 = 0.99904$$

$$k_2 = 0.16037$$

Таким чином, синус в діапазоні від 0 до $\frac{\pi}{6}$ можна вважати за формулою:

$$(\sin x) = x (0.99904 - 0.16037x^2)$$

Аналогічно можна зробити і для косинуса:

$$(\cos x) = 0.99809 - 0.4749x^2$$

1.9 Моделі каналів розповсюдження OFDM-сигналів

Канал з адитивним білим гаусовим шумом. Адитивний білий гаусів шум (АБГШ, англ. Additive white Gaussian noise, AWGN) - вид білого шуму, що заважає в каналі передачі інформації.

Характеризується рівномірною спектральною щільністю, нормально розподіленням значенням амплітуди і адитивним способом впливу на сигнал. Найбільш поширений вид шуму, який використовується для розрахунку і моделювання систем радіозв'язку. Термін "адитивний" означає, що даний вид шуму підсумовується з корисним сигналом. На противагу адитивному, можна вказати мультиплікативний шум - шум, який перемножується з сигналом.

Широкопasmовий шум випромінюється від багатьох природних джерел, таких як теплові коливання атомів в провідниках (теплові шуми або шуми Найквіста), дробовий шум, випромінювання абсолютно чорного тіла від землі та

інших теплих об'єктів, і з небесних джерел, таких як Сонце. Центральна гранична теорема з теорії ймовірностей означає, що підсумовування багатьох випадкових процесів буде мати тенденцію до гауссівського або звичайного розподілу. Часто використовується як модель каналу, в якому погіршення у зв'язку являє собою лінійне додавання білого шуму з постійною спектральною щільністю (вираженої як ват в герцах від пропускної здатності) із гаусовим розподілом амплітуди.

Модель не враховує завмирання, частотну селективність, інтерференцію, нелінійність або дисперсію.

Тим не менш, він виробляє прості і податливі математичні моделі, які корисні для отримання розуміння основної поведінки системи, перш ніж ці інші явища розглядаються.

Канал АБГШ є гарною моделлю для багатьох супутникових ліній зв'язку та ліній зв'язку для далекого космосу. Це не дуже хороша модель для більшості наземних ліній зв'язку через багатопроменевість, блокування місцевості, інтерференції і т.д. Проте, при моделюванні таких ліній, AWGN зазвичай використовується для імітації фоновому шуму каналу в стадії вивчення, на додаток до явищ багатопроменевості, блокування місцевості, інтерференції, шумів землі і само втручання, з якими сучасні радіо системи можуть зіткнутися.

Пропускна здатність каналу. Канал АБГШ представлений серією виходів Y_i на індекс подій дискретного часу i . Y_i є сумою вхідного сигналу X_i і шуму, Z_i , де Z_i є незалежні і однаково розподілені, взяті з нульового середнього нормального розподілу з дисперсією n (шум). Z_i далі планується не корелювати з X_i :

$$Z_i \sim N(0, n)$$

$$Y_i = X_i + Z_i \sim N(X_i, n).$$

Пропускна здатність каналу нескінченна, якщо шум n не дорівнює нулю, і X_i в достатній мірі обмежені. Найбільш поширеним обмеженням на вході є таке обмеження, при якому для кодового слова $(x_1, x_2, \dots, x_k)$, переданого через канал, маємо:

$$\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i^2 \leq P,$$

де P - максимальна потужність каналу.

Таким чином, пропускна здатність каналу для каналу з обмеженою потужністю визначається за формулою:

$$C = \max_{f(x) \text{ s.t. } E(x^2) \leq P} I(X;Y),$$

де $f(x)$ - це функція розподілу X .

Запишемо $I(X;Y)$, в термінах диференціальної ентропії. Диференціальна ентропія - частина ентропії джерела безперервних повідомлень, яка залежить від щільності ймовірності сигналу, що видається джерелом:

$$I(X;Y) = h(Y) - h(Y | X) = h(Y) - h(X + Z | X) = h(Y) - h(Z | X)$$

Але X і Z незалежні, тому:

$$I(X;Y) = h(Y) - h(Z)$$

Оцінюючи диференціальну ентропію як гауссову маємо:

$$h(Z) = \frac{1}{2} \log(2\pi en)$$

Тому X і Z незалежні і їх сума дає Y :

$$E(Y^2) = E(X + Z)^2 = E(X^2) + 2E(X)E(Z) + E(Z^2) = P + n$$

За цією оцінкою, з властивості диференціальної ентропії випливає, що

$$h(Y) \leq \frac{1}{2} \log(2\pi e(P + n))$$

Тому пропускна здатність каналу задається максимально можливою границею взаємної інформації:

$$I(X; Y) \leq \frac{1}{2} \log(2\pi e(P + n)) - \frac{1}{2} \log(2\pi en)$$

Де $I(X; Y)$ максимізує, коли:

$$X \sim N(0, P)$$

Таким чином, пропускна здатність каналу C для каналу з AWGN визначається за формулою:

$$C = \frac{1}{2} \log\left(1 + \frac{P}{n}\right)$$

Існує ряд моделей каналів, стандартизованих і рекомендованих до застосування при моделюванні систем рухомого зв'язку. Широке поширення отримали моделі, рекомендовані Міжнародним Союзом Електрозв'язку (ITU), такі як Channel model A, B, C та D.

Данні моделі розробленні для перевірки та визначення параметрів обладнання, але на відміну від таких же моделей 3GPP, націлені на мережевих проєктувальників для побудови системи та перевірки працездатності. Оскільки не має сенсу для побудови моделей всіх можливих варіантів середовищ розповсюдження, МСЕ запропонувало набір тестових середовищ, що адекватно охоплює загальний діапазон можливої експлуатації середовища та мобільність користувача.

У табл. 1.3 та табл. 1.4 наведені основні параметри для моделі каналу рухомого зв'язку Channel A та B.

Моделі мають 6 променів із заданими затримками і потужностями. Загмирання в каналі мають релеєвський розподіл, а доплерівська частота залежить від швидкості руху абонента.

Таблиця 1.3 – Параметри моделі каналу Channel A

Промінь	Затримка, нс	Середня потужність, дБ
1	0	0.0
2	310	-1.0
3	710	9.0
4	1090	10.0
5	1730	15.0
6	2510	20.0

Таблиця 1.4 – Параметри моделі каналу Channel B

Промінь	Затримка, нс	Середня потужність, дБ
1	0	-2.5
2	300	0
3	8910	-12.8
4	12900	-10.0
5	17100	-25.2
6	20000	-16.0

Моделі каналу Channel A та B використовуються для моделювання закритих (офіси, робочі приміщення, тощо) та відкритих (великі площі з можливим пересуванням значних мас людей) середовищ передачі, моделі C і D призначенні для розгляду каналу в середовищі швидкого переміщення абонентського терміналу (авто-, мототехніка, авіація, громадський транспорт).

1.10 Параметри, що характеризують завадостійкість радіотрактів багаточастотних широкосмугових сигналів

Завадостійкість - здатність обладнання функціонувати за призначенням без погіршення його роботи за наявності електромагнітних завад. Серед параметрів, що характеризують завадостійкість радіотрактів багаточастотних широкосмугових сигналів слід виділити відношення сигнал/шум та ймовірність помилки прийому сигналу.

Співвідношення сигнал/шум - міра, що застосовується в науці та інженерії для визначення наскільки сильно сигнал спотворений шумом. Визначається як відношення потужності корисного сигналу до потужності шуму. Співвідношення вище ніж 1:1 вказує, що сигнал більший за шум.

Іншими словами, співвідношення сигнал/шум порівнює рівень бажаного сигналу (для прикладу, музики) та рівень фонового шуму. Чим більше SNR тим менш помітний фоновий шум.

Співвідношення сигнал/шум визначається як відношення потужності сигналу (значимої інформації) до потужності фонового шуму (небажаного сигналу) $SNR = P_c / P_{ш}$, де P середня потужність. Сигнал і шум обидва повинні бути виміряні в тій же або еквівалентній точці в системі, в межах однієї і тої ж смуги пропускання системи.

Для кількісної оцінки впливу завад та інших факторів, що викликають відміну прийнятої послідовності від переданої, вводиться критерій оцінки якості

прийнятої інформації. При передачі дискретних повідомлень за такий критерій приймають ймовірність помилки прийому одного елемента двійкової послідовності.

Середня ймовірність помилки визначається за формулою:

$$P_{\text{ном.}} = p(0) * p(1/0) + p(0/1).$$

Ймовірність помилки залежить: від виду модуляції, способу детектування (когерентний, некогерентний), способу фільтрації сигналів в приймачі (оптимальний фільтр, неоптимальний фільтр), потужності P_c (енергії E_c) сигналу, потужності P_n (спектральної щільності N_0) завади. Якщо в приймачі використовується неоптимальний фільтр, ймовірність помилки залежить від величини відношення потужності сигналу до потужності завади (відношення сигнал/шум по потужності) $h^2 = P_c/P_n$.

При використанні в приймачі оптимального фільтра ймовірність помилки визначається величиною відносини енергії елемента сигналу до спектральної щільності потужності завади:

$$h_0^2 = E_s / N_0 = P_s * T_c / N_0.$$

У приймачі з оптимальним фільтром відношення сигнал / шум більше, ніж в приймачі з неоптимальним фільтром і, відповідно, завадостійкість вище.

Приймач з оптимальним фільтром і когерентним способом прийому забезпечує потенційну завадостійкість для заданого виду модуляції.

1.11 Імітаційний метод оцінки завадостійкості

Під аналізом в режимі реального часу мається на увазі, що аналіз даних здійснюється відразу ж після їх збору. Якщо програма повинна виконувати

якісь дії в залежності від зміни параметрів сигналу, отже, необхідно проводити аналіз даних відразу після отримання. Аналізуючи зміни сигналу, можна змінювати поведінку програми у відповідності з ними, наприклад, зберігати певні дані на диск або міняти частоту оцифровки, а також виконувати функції автоматичного керування. Це лише кілька прикладів, на ділі ж існують тисячі додатків, в яких потрібна та чи інша ступінь "інтелектуальності" і здатності приймати рішення в залежності від різних умов - адаптованості. Все це можна реалізувати тільки шляхом вбудовування алгоритмів аналізу в програму.

Зазвичай рішення, засновані на результатах вимірів, приймаються в автоматичному режимі, тобто в програму вбудовується логіка роботи в певних умовах. Наприклад, система автоматизації на виробництві може включити світлову індикацію, коли температура піднімається вище заданого порогу. Однак автоматичний режим прийняття рішення підходить не для всіх додатків. Дуже часто необхідно особисто контролювати процес виконання програми, щоб уникнути ситуацій, коли користувачі зберігають дані у файли або базу даних, а потім витягують і аналізують їх лише для того, щоб виявити помилки і скоригувати процес збору. У таких випадках застосування повинне надати користувачеві зібрані і оброблені дані в максимально зручному для сприйняття вигляді.

Незалежно від методу аналізу, програми надають користувачеві набори математичних функцій і функцій аналізу, які природним чином взаємодіють з функціями збору даних і відбиття інформації. При цьому користувач позбавлений від необхідності конвертації даних з одних форматів в інші, що вимагається при роботі з декількома різними інструментами збору та аналізу даних. Крім цього, є можливість проведення аналізу по точкам - методу, найбільш відповідного для додатків, що працюють в режимі реального часу.

Більшість середовищ розробки не дозволяють вести одночасно і збір даних та їх відбиття в одному додатку. Типовий продукт - це або мова програмування загального призначення з мінімумом бібліотек для обробки сигналів, придатний в основному для розробки додатків по збору даних, або середу з ве-

личезною кількістю інструментів для аналізу сигналів, але обмеженою підтримкою роботи з обладнанням. У результаті доводиться витратити час на конвертацію та передачу даних з однієї програми в іншу.

Функції які повинна виконувати програма:

- спектральні вимірювання;
- виміри спотворень;
- тональні вимірювання;
- вимірювання амплітуди та рівня;
- вимірювання перехідних процесів;
- апроксимація кривих;
- статистика;
- згортка та кореляційні функції;
- імітація та моделювання сигналів;
- маскування і обмеження;
- згладжування і передискретизація.

Simulink і продукти для обробки сигналів дозволяють аналізувати сигнали, що надходять з інструментів та інших джерел даних. У цих продуктах реалізовано повноцінне середовище для отримання сигналу, аналізу, обробки, візуалізації і розробки алгоритму. Пропоновані підходи до вирішення завдань легко освоїти: розробник не зобов'язаний бути фахівцем в області цифрової обробки сигналів.

Продукти MathWorks дозволяють отримувати та обробляти сигнали в єдиному середовищі. Сигнали в реальному часі надходять в робоче середовище безпосередньо з підключених осцилографів, генераторів функцій і інших сумісних з персональним комп'ютером апаратних засобів і інструментів для тестування і вимірювань.

За допомогою вбудованих засобів можна проводити аналіз характеристик отриманих сигналів і використовувати різні варіанти візуалізації: графіки у часовій і частотній області, двовимірні та тривимірні графіки, об'ємні уявлення та

ін.

Вбудовані бібліотеки дозволяють досліджувати ідеї і тестувати їх реалізацію в системі обробки сигналів. Для цього в них реалізована вся необхідна функціональність: перетворення сигналу, віконні функції, швидкісні і статистичні операції обробки сигналу, методи розробки фільтрів. Завдяки цим бібліотекам стає можливим прискорення ітерацій розробки, оптимізація швидкодії та точності, вибір кращого алгоритму для системи.

Для вирішення складних завдань, які зачіпають різні сфери інженерної діяльності, розробник може застосувати алгоритми обробки зображень, статистики, управління та бібліотеки сучасних чисельних обчислень.

Після розробки алгоритму для цифрової обробки сигналів можна негайно надати його кінцевому користувачеві, не переписуючи код на інші мови програмування. `Compiler™` дозволяє створювати з додатків MATLAB незалежні виконувані модулі або спільні бібліотеки. При цьому кінцевий користувач може запускати додаток поза середовища MATLAB. Таким чином можна заощадити час розробника, не переписуючи код алгоритму на інші мови програмування.

Системи зв'язку MATLAB, Simulink і спеціальні інструменти для систем зв'язку надають відкрите розширюване середовище моделювання, взаємозв'язок з обладнанням третіх виробників і засоби для розробки C / C++ і HDL коду.

Інженери працюють в середовищі розробки і моделювання яка:

- надає великий набір інструментів для розробки алгоритмів і дослідження архітектури виробів;
- дозволяє спільно працювати співробітникам займаються різними напрямками;
- сприяє інтеграції зі старим кодом і обладнанням третіх виробників;
- дозволяє проводити швидку верифікацію моделі і алгоритмів протягом всього циклу розробки.

Програма Simulink є додатком до пакету MATLAB. При моделюванні з

використанням Simulink реалізується принцип візуального програмування, відповідно до якого, користувач на екрані з бібліотеки стандартних блоків створює модель пристрою і здійснює розрахунки.

При цьому, на відміну від класичних способів моделювання, користувачеві не потрібно досконально вивчати мову програмування і чисельні методи математики, а досить загальних знань потрібних при роботі на комп'ютері і знань тієї предметної області, в якій він працює. Є досить самостійним інструментом MATLAB і при роботі з ним зовсім не потрібно знати сам MATLAB і інші його додатки. З іншого боку доступ до функцій MATLAB і іншим його інструментам залишається відкритим і їх можна використовувати в Simulink. Частина входять до складу пакетів які мають інструменти, що вбудовуються в Simulink (наприклад, LTI-Viewer програми Control System Toolbox - пакету для розробки систем управління). Є також додаткові бібліотеки блоків для різних галузей застосування (наприклад, Power System Blockset - моделювання електротехнічних пристроїв, Digital Signal Processing Blockset - набір блоків для розробки цифрових пристроїв і т. д).

При роботі з Simulink користувач має можливість модернізувати бібліотечні блоки, створювати свої власні, а також складати нові бібліотеки блоків.

При моделюванні користувач може вибирати метод розв'язання диференціальних рівнянь, а також спосіб зміни модельного часу (з фіксованим або змінним кроком). У ході моделювання є можливість стежити за процесами, що відбуваються в системі. Для цього використовуються спеціальні пристрої спостереження, які входять до складу бібліотеки Simulink. Результати моделювання можуть бути представлені у вигляді графіків або таблиць.

Перевага Simulink полягає також у тому, що він дозволяє поповнювати бібліотеки блоків за допомогою підпрограм написаних як мовою MATLAB, так і на мовах C, Fortran і Ada.

Практична стійкість передачі інформації в каналах з шумами і завадами залежить від вибору каналних сигналів і від типу коригувальних кодів. Зава-

достійкість каналу передачі від інформаційного потоку на вході до вихідного потоку у споживача інформації зазвичай називають наскрізною. Навіть при простих моделях передачі виникає багато обчислювальних труднощів визначення кривих наскрізний завадостійкості. Особливо великі труднощі при складанні формул розрахунку наскрізних кривих виникають при використанні багатоступеневих каскадних кодів. Для подолання розрахункових труднощів хорошим засобом є моделювання в середовищі MATLAB, Simulink. Особливо цінним є моделювання в середовищі MATLAB, Simulink тому, що крім кривих завадостійкості можна порівнювати вхідні та вихідні потоки інформаційних символів і на основі цього визначати наскрізну завадостійкість. У добавок MATLAB дозволяє перевіряти деякі теоретичні передумови. Якщо в каналі використовувати різні М-ступінчасті каскадні коди і різні каналні сигнали, то отримаємо цілу серію кривих завадостійкості, на основі аналізу яких не так вже й легко вибрати оптимальні варіанти складових компонент.

Імітація моделей каналів передачі розроблялося в середовищі MATLAB за допомогою програмних модулів Simulink, Communication Toolbox і Communication Blockset. Це середовище дозволяє отримати результати моделювання або у вигляді кривих наскрізної завадостійкості (BER від відносини S/M в безперервної частини каналу передачі) шляхом порівняння вхідного і вихідного інформаційних потоків, або у вигляді прямого порівняння результатів (message error). При одноразовому випробуванні моделі результат прямого порівняння є випадковою величиною, але дозволяє при відповідній організації моделювання з'ясувати тонкі аспекти завадостійкості компонентів моделі. Коректність виконання процесів моделювання та отримання результатів для аналізу з допомогою програми MATLAB під сумнів не ставилися. Однак результати моделювання мають певний випадковий характер через кінцевий обсяг даних моделювання.

1.12 Висновки до розділу

Сигнали з OFDM широко застосовуються в каналах передачі з міжсимвольною інтерференцією, викликаною відбиттями від об'єктів. Ступінь заважає дії міжсимвольної інтерференції і ймовірність помилкового прийому залежать від ступеня-перекриття переданих інформаційних символів. Тому для поліпшення якості прийому сигналів в таких умовах доцільно збільшувати тривалість символу T . Це можна зробити за рахунок зниження інформаційної швидкості передачі, що не завжди прийнятно.

Одним з відомих способів боротьби з міжсимвольною інтерференцією, засновані на збільшенні тривалості символу T , є застосування методів многопозиційної модуляції, при яких тривалість T_c символу на виході модулятора збільшується в $\log_2 M$ порівняно з тривалістю T_b інформаційного символу: $T_c = T_b \cdot \log_2 M$, де M - число можливих елементарних сигналів (сигнальних точок). При формуванні таких сигналів з OFDM використовуються методи фазової маніпуляції ФМ-2, ФМ-4, КАМ-16 і КАМ-64.

Для боротьби з міжсимвольною інтерференцією застосовується захисний інтервал, який додається до переданого сигналу з OFDM, пілот-сигнали і завадостійке кодування в поєднанні з перемежуванням. Вставляючи захисний інтервал достатній тривалості на початку кожного блоку символів, можна практично повністю виключити вплив міжсимвольної інтерференції.

1.13 Постановка задачі дослідження

Розглянувши роль та важливість OFDM у застосуванні в нових системах передачі, як дротових так і радіо, стає зрозумілим що даний вид модуляції є перспективним. OFDM застосовується в багатьох сучасних стандартах бездротового доступу IEEE, ETSI та у стандартах інститутів інших країн, саме завдяки властивості зниження впливу різного виду завад. Але механізм реалізації є досить громіздким, таким чином постає питання про вибір можливої альтернативи використанню OFDM-технології, з відповідним порівняльним аналізом та по-

будовою імітаційної моделі оцінки завадостійкості, для певного виду модуляції та відповідно стандарту бездротового широкосмугового доступу.

Для дослідження завадостійкості радіотрактів СБШС модель повинна враховувати особливості багатопроменевого розповсюдження зазначених сигналів, бути чутливою до бітового відношення сигнал/шум в каналі розповсюдження та повторювати механізм формування сигналу досліджуваного стандарту.

Операції завадостійкого кодування, перемежування та відповідні їм операції при демодуляції сигналу є незалежними від завадостійкості самих радіотрактів і в моделі можна їх не враховувати.

Оцінка завадостійкості радіотракту здійснюється за величиною імовірності помилки переданого біта (дискрета) на ділянці від входу модулятора передавача до вих. демодулятора приймача. Під демодулятором мається на увазі пристрій переносу спектру OFDM-сигналу з ВЧ носійного коливання на частоту обробки (відеочастоту) в приймачі.

2 РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ

Модель (див. рис. 2.1) показує смуги модель кінця в кінець фізичного рівня бездротової локальної мережі (WLAN) за стандартом IEEE 802.11a. Модель підтримує всі обов'язкові і необов'язкові швидкості передачі даних: 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 і 54 Мбіт / с. Модель також ілюструє адаптивну модуляцію і кодування над диспергирующей багатопроменевого завмирання каналу, в результаті чого моделювання змінюється швидкість передачі даних динамічно. Зверніть увагу, що модель використовує штучно високий рівень завмирання каналу, щоб зробити зміни швидкості передачі даних швидше і тим самим зробити візуалізацію більш анімованою і повчальною.

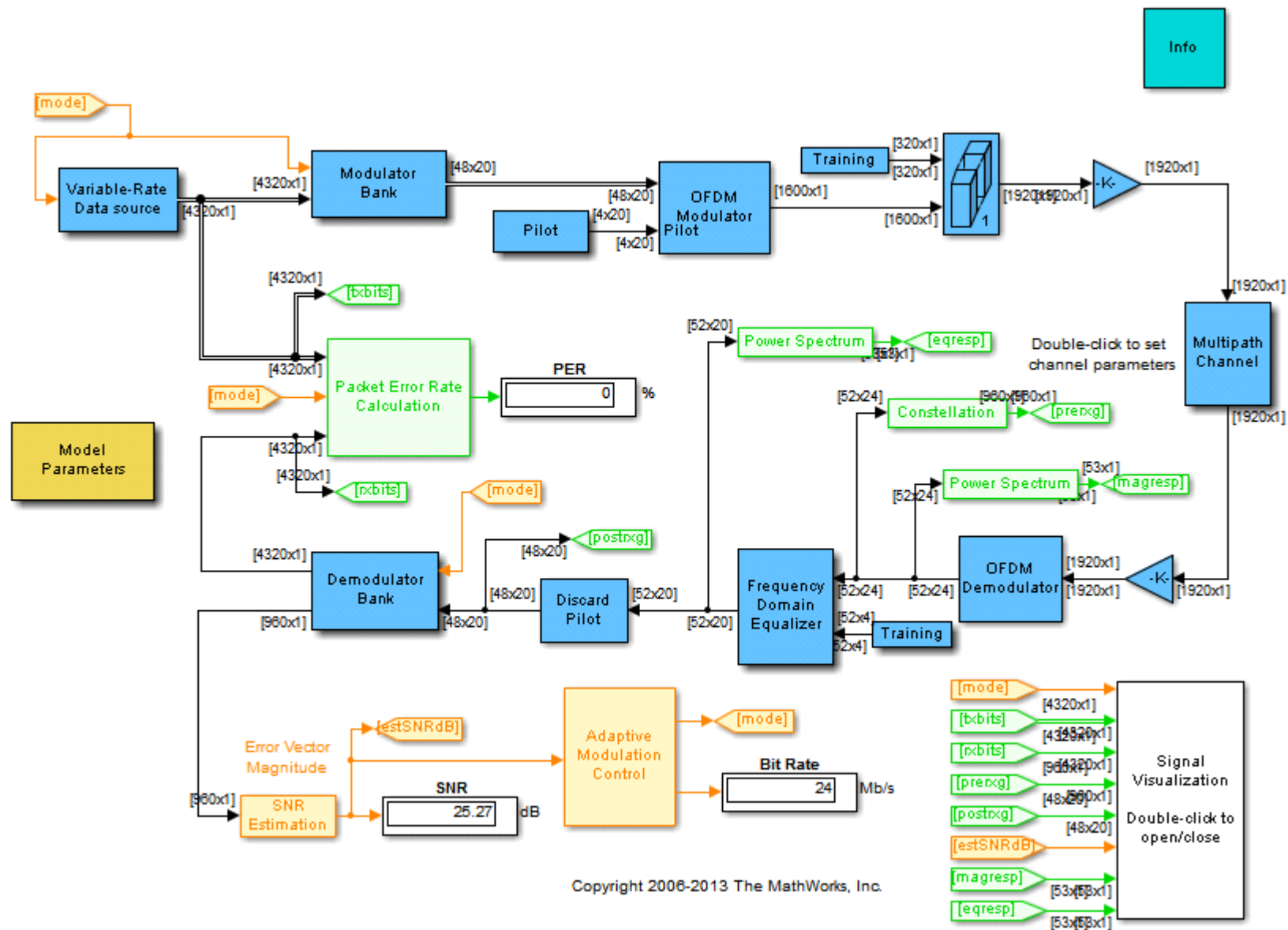


Рисунок 2.1 – Сигнали з OFDM в частотній і часовій областях

2.1 Структура

Модель містить компоненти, що моделюють основні функції стандарту WLAN 802.11a. Верхній ряд блоків містить компоненти передавача, а нижня рядок містить компоненти приймача.

Система зв'язку в даному прикладі виконує наступні задачі:

- генерування випадкових даних на швидкості, яка змінюється в процесі моделювання;
- кодування, перемеження і модуляцію з використанням одного з декількох схем, визначених у стандарті.

Різній швидкості передачі даних здійснюється періодично, дозволяючи блок джерела протягом часу, який залежить від бажаної швидкості передачі даних.

Щоб дослідити ці операції, виберіть блок модулятор банку та оберіть подивіться під маскою з меню Правка вікна. Потім виберіть будь-який з модулятора блоків у підсистемі і виберіть подивитися під маскою з меню Правка вікна.

Зокрема, кожен модулятор блок в банку виконує такі завдання:

- згортального кодування і проколювання за темпу 1/2, 2/3 і 3/4;
- тип модуляції: BPSK, QPSK, 16-QAM і 64-QAM;
- OFDM (мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів) передачі з використанням 52 підносійних даних, 4 пілотів, 64-точкові ШПФ і 16-символьний циклічний префікс;
- преамбула PLCP (протоколу конвергенції фізичного рівня) моделюється як чотири довгих послідовностей, що навчаються;
- дисперсійні багатопроменеві завмирання каналу;
- вирівнювання у приймачі;
- фіксована кількість символів даних у кожному пакеті;
- невинна робота від кадру до кадру з опускання хвостових бітів, які

були б використані для скидання стану декодера;

- виправлення рівня потужності передачі, замість зміни середньої ЗСШ каналу.

В моделі не враховуються такі аспекти стандарту IEEE 802.11a:

- MAC / PHY інтерфейс і PLCP заголовки (TXVECTOR / RXVECTOR);
- зкремблювання даних, оскільки дані є випадковими;
- короткі послідовності навчання (для автоматичного регулювання посилення, випадковість шумових процесів тощо).

2.2 Основні параметри фізичного рівня стандарту 802.11a

Стандарт 802.11a розроблений американським інститутом IEEE та специфікує фізичний рівень (PHY) передачі даних в локальних обчислювальних мережах нового покоління, що працюють в частотному діапазоні 5 ГГц і забезпечують швидкість передачі даних до 54 Мбіт/с. Основні параметри стандарту 802.11a наведені в табл. 2.1 і будуть пояснені нижче.

Таблиця 2.1 – Основні параметри стандарту 802.11a.

Параметр	Значение
Ширина полосы частот	20 МГц
Число поднесущих для данных (N_{SD})	48
Число поднесущих для пилот-сигналов (N_{SP})	4
Полное число поднесущих (N_{ST})	52
Частотный разнос поднесущих, Δ_F	0.3125 МГц (=20 MHz/64)
Период Фурье преобразований, T_{FFT}	3.2 мкс ($1/\Delta_F$)
Размерность Фурье преобразований	64
Длительность преамбулы ($T_{PREAMBLE}$)	16 мкс ($T_{SHORT}+T_{LONG}$)
Длительность OFDM-символа (T_{SIGNAL})	4.0 мкс ($T_{GI}+T_{FFT}$)
Длительность защитного интервала (T_{GI})	0.8 мкс ($T_{FFT}/4$)
Длительность короткой тренирующей послед-ти (T_{SHORT})	8 мкс ($10 \times T_{FFT}/4$)
Длительность длинной тренирующей послед-ти (T_{LONG})	8 мкс ($2 \times T_{GI} + 2 \times T_{FFT}$)

2.3 Структура фрейму

Стандартом 802.11a передбачається пакетний (фреймовий) режим передавання даних. На рис. 2.2 показаний один фрейм. Видно, що він складається з трьох основних частин (субфреймів): преамбули ("PREAMBLE"), поля "SIGNAL" і переданих даних ("DATA"). Частотна структура OFDM-фрейма наведена на рис. 2.3, а часова структура преамбули та поля "SIGNAL" показана на рис. 2.4.

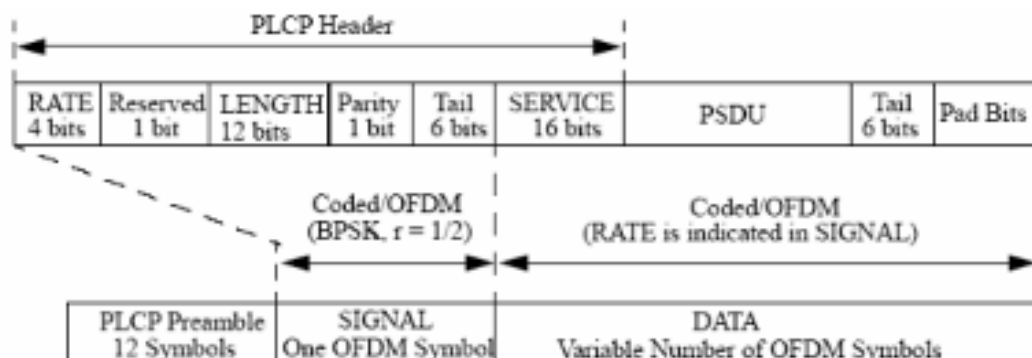


Рисунок 2.2 – Структура фрейма фізичного рівня стандарту 802.11a

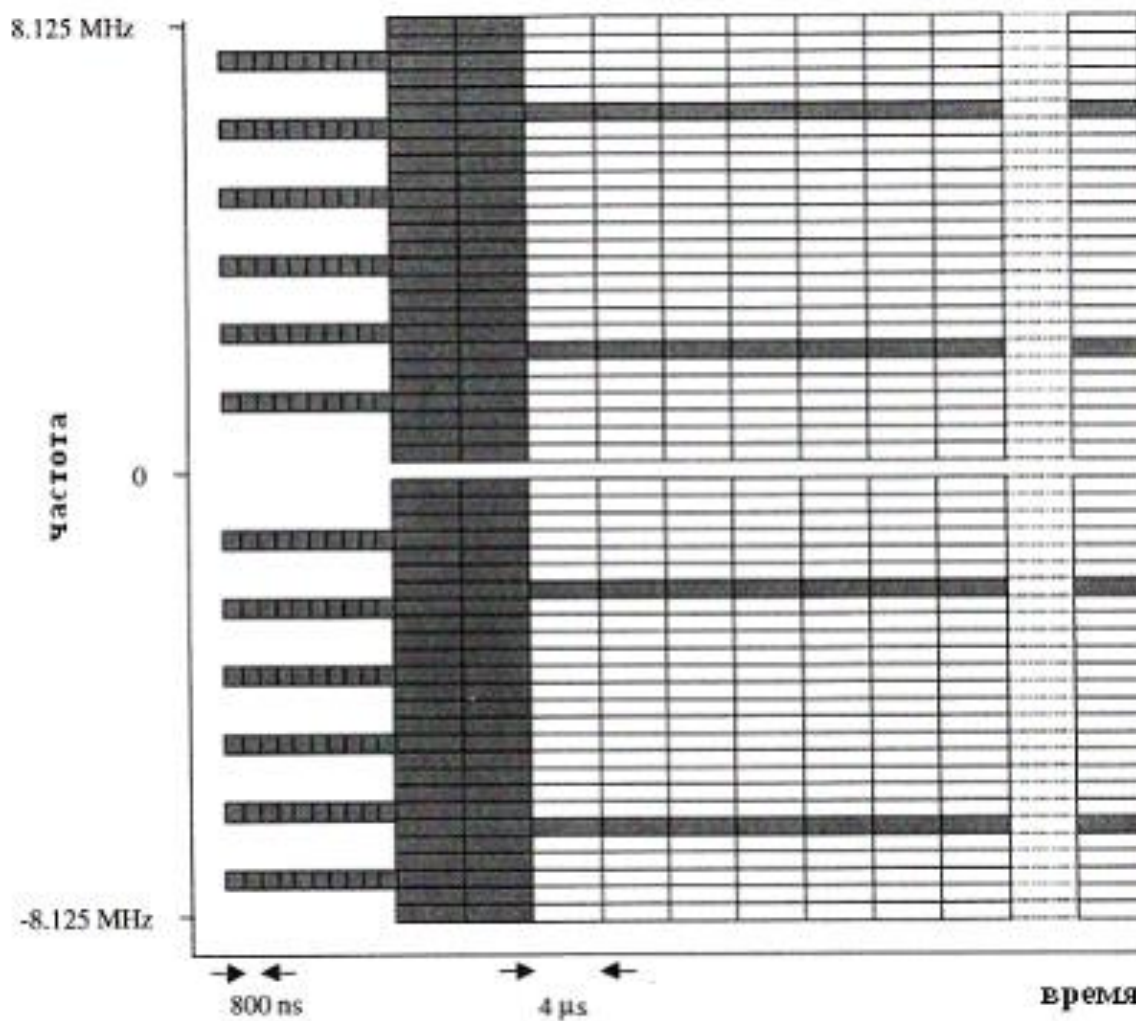


Рисунок 2.3 – Частотна структура фрейма OFDM-системи стандарту 802.11a

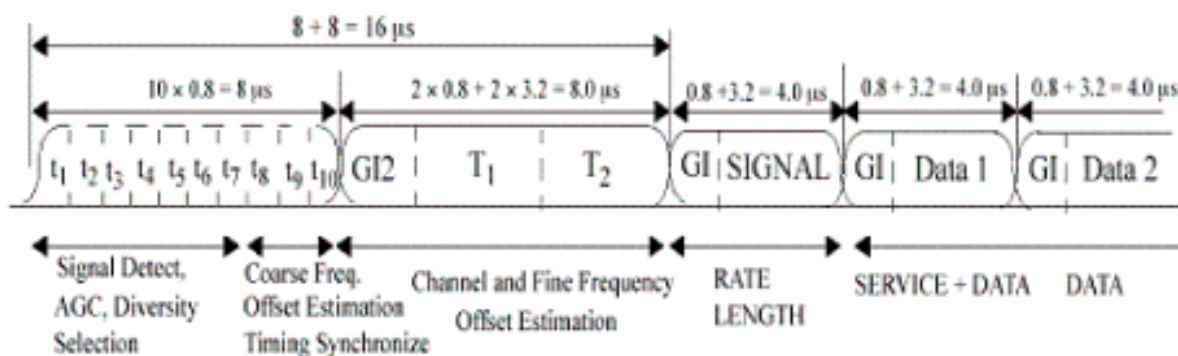


Рисунок 2.4 – Часова структура преамбули і заголовка кадру

Кожен фрейм починається з преамбули (субфрейм "PREAMBLE"). Тривалість преамбули становить 16 мкс. Вона складається з 10 коротких тренуючих OFDM-символів тривалістю 0.8 мкс кожен і з 2 довгих тренуючих OFDM-символів тривалістю 4.0 мкс кожен (див. рис. 2.2).

Короткі навчальні символи необхідні для детектування (визначення наявності) сигналу, синхронізації і грубої оцінки зсуву частоти між приймачем і передавачем.

Навчальна послідовність, що складається з двох довгих однакових навчальних символів T_1 , T_2 і подвоєного захисного інтервалу G_{12} , призначена для точного оцінювання частоти і частотної характеристики просторового каналу зв'язку. Для передачі преамбули використовується BPSK-модуляція з темпом $1/2$.

За стандартом 802.11a розлаштування частоти між приймачем і передавачем (після точного підстроювання частоти) не повинна перевищувати $2 \cdot 10^{-5}$ (0,002% від носійної частоти), тобто в даному випадку (діапазон 5 ГГц) розлаштування частоти між приймачем і передавачем повинна бути менше 100 кГц. Таким чином, при максимально можливій розстройке, фаза може збиватися на π за час 5 мкс. За цей час може бути переданий тільки один символ.

Після преамбули передається субфрейм "SIGNAL", який являє собою один OFDM-символ тривалістю 4 мкс і показаний на рис. 2.4. Структура цього субфрейма показана на рис. 2.5.

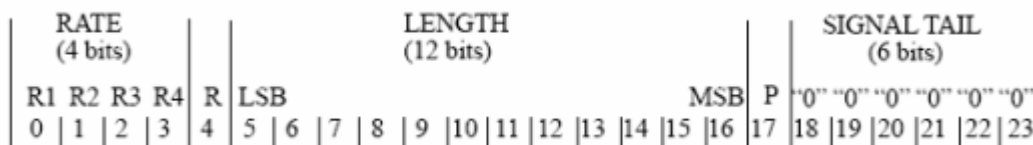


Рисунок 2.5 – Структура заголовка кадру

Заголовок складається з 24 біт. Перші 4 біта (R1 - R4) з поля "RATE" застосовуються для повідомлення про використаний темп для передачі даних (див. табл. 2.2). 5-ий біт зарезервований на майбутнє. Наступні 12 біт (поле "LENGTH") застосовуються для повідомлення про тривалість даних, які будуть передано у цьому фреймі. 18-ий біт - біт парності. Нарешті, останні 6 біт (поле "SIGNAL TAIL") - це нульові біти, необхідні для приведення регістрів декодерів в нульовий стан. Для передачі субфрейма "SIGNAL" використовується BPSK-модуляція з темпом 1/2.

Таблиця 2.2 – Значення перших чотирьох біт заголовка кадру

Темп (Мбит/с)	Значення біт (R1 – R4)
6	1101
9	1111
12	0101
18	0111
24	1001
36	1011
48	0001
54	0011

Після субфрейма "SIGNAL" починається передача субфрейма даних (див. рис. 2.2). З рис. 2.3 видно, що для передачі даних в системі використовуються 48 частотних підканалів (підносійних). Решта 4 підканала, звані пілотними під-

носії немі використовуються насамперед для синхронізації і підстроювання фази в процесі передачі інформації. Пілотні подносійні розподілені в часі і в частотному спектрі OFDM-сигналу, їх амплітуди і фази відомі в точці прийому, тому їх можна використовувати також для отримання відомостей про характеристики каналу передачі.

Субфрейм даних, у свою чергу, складається з чотирьох полів (див. рис. 2.2): SERVICE, PSDU, TAIL, Pad Bits. Всі біти цього субфрейма піддаються операції шифрування (scrambling) шляхом їх перестановки. Поле SERVICE складається з 16 біт. Перших 7 біт - це нульові біти, які використовуються для синхронізації дешифровщика (дескремблера) на приймальному кінці лінії з шифровщиком (скремблером) на передавальному кінці лінії. Решта бітів (Також нульові) зарезервовані на майбутнє. Поле PSDU (інформаційне поле) містить безпосередньо передаючі дані. Його тривалість є змінною і може досягати 3 мсек. Наступне поле TAIL складається з 6 нульових біт, необхідних для приведення регістрів декодера в нульовий стан.

Поле Pad Bits складається з доданих біт, число яких вибирається з умови, щоб довжина поля PSDU була кратна числу кодованих біт в OFDM-символів (N_{CBPS}). Щоб забезпечити виконання такої вимоги довжина повідомлення повинна бути збільшена, щоб бути кратною числу біт переданих даних на OFDM символ (N_{DBPS}). Для цього використовуються спеціальні додаткові нульові біти (так звані "набивкові" біти), об'єднані в поле PAD. Число біт в поля PAD можна розрахувати за формулами

$$\begin{cases} N_{SYM} = \text{ceiling}\left(\frac{16 + 8 \cdot LENGTH + 6}{N_{DBPS}}\right) \\ N_{DATA} = N_{SYM} \cdot N_{DBPS} \\ N_{PAD} = N_{DATA} - (16 + 8 \cdot LENGTH + 6) \end{cases},$$

де функція $\text{ceiling}(x)$ повертає найближче ціле значення, яка дорівнює або пере-

вищує x ,

LENGTH - довжина поля PSDU.

2.4 Математичний опис сигналів фрейму

Переданий OFDM-сигнал для довільного фрейма (пакета) фізичного рівня можна представити у вигляді

$$r(t) = \text{Re}\{r(t) \exp(j2\pi f_c t)\},$$

де $\text{Re}\{.\}$ – реальна частина,

f_c – носійна частота.

Вузькосмугова обвідна складається з окремих OFDM-символів, що входять в склад фрейма, і може бути записана як:

$$r_{\text{PACKET}}(t) = r_{\text{PREAMBLE}}(t) + r_{\text{SIGNAL}}(t - t_{\text{SIGNAL}}) + r_{\text{DATA}}(t - t_{\text{DATA}})$$

,

де затримки $t_{\text{SIGNAL}} = 16$ мкс і $t_{\text{DATA}} = 20$ мкс показують, що передача субфрейма "SIGNAL" субфрейма "DATA" починається через 16 мкс і 20 мкс, відповідно, початку передачі кадру. Всі три субфрейма ("PREAMBLE", "SIGNAL" і "DATA") формуються з помістю зворотного перетворення Фур'є від набору відповідних коефіцієнтів C_k (будуть визначені нижче) і можуть бути представлені у вигляді

$$r_{\text{SUBFRAME}}(t) = w_{T\text{-SUBFRAME}}(t) \sum_{k=-N_{ST}/2}^{N_{ST}/2} C_k \exp(j2\pi k \Delta_f)(t - T_{\text{GUARD}}).$$

У цій формулі ΔF позначає розніс сусідніх піднесуть, а N_{ST} - повне число підносійних.

Результуючий сигнал має період $T_{FFT}=1/\Delta F$. Часова затримка T_{GUARD} створює захисний інтервал, що використовується для придушення міжсимвольної інтерференції, обумовленої дисперсією в просторовому каналі зв'язку. Тривалість захисного інтервалу для довгої тренуючої послідовності дорівнює 1.6 мкс ($2 \cdot T_{GI}$), а для даних - 0.8 мкс (T_{GI}).

Функція "вікна" описує форму відповідного сигналу тривалості T . Ця тривалість може бути рівною одному або декільком періодам перетворення Фур'є ($T_{wSUBFRAME} T_{FFT}$, що пояснюється рис. 2.6).

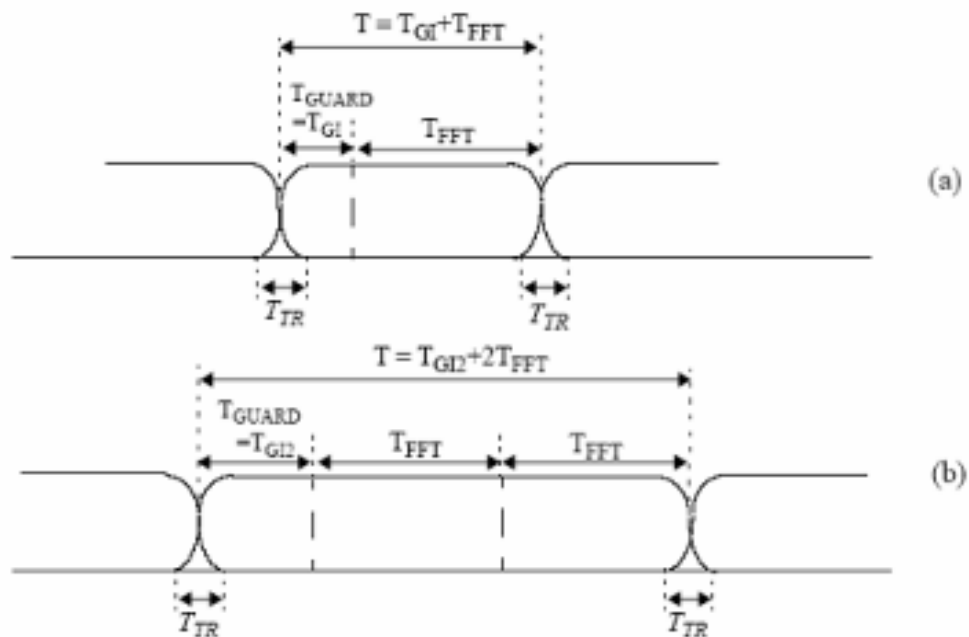


Рисунок 2.6 - OFDM-фрейма із захисним інтервалом і функція "вікна" для одного (a) і двох (b) періодів перетворення Фур'є

Математичне представлення функції "вікна" має вигляд

$$w_T(t) = \begin{cases} \sin^2[0.5\pi(0.5 + t/T_{TR})], & (-0.5T_{TR} < t < 0.5T_{TR}) \\ 1, & (0.5T_{TR} < t < T - 0.5T_{TR}) \\ \sin^2[0.5\pi(0.5 - (t-T)/T_{TR})], & (T - 0.5T_{TR} < t < T + 0.5T_{TR}) \end{cases},$$

Відповідний результуючий сигнал має період рівний $1/(4\Delta F)$. Розріджені частоти є ортогональними на меншому часовому інтервалі 0.8 мкс, а не на повному інтервалі 4.0 мкс. Амплітуди сигналів на підносійних можна записати у вигляді 53-мірного вектора S (включаючи нульову амплітуду на нульовій частоті) з компонентами у вигляді

$$S = (13/6)^{1/2} \times (0, 0, 1+j, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0),$$

де $(13/6)^{0.5}$ - нормуючий множник.

Тоді відповідний сигнал можна записати як

$$r_{SHORT} = w_{T-SHORT}(t) \sum_{k=-26}^{26} S_k \exp(j2\pi k \Delta_F t),$$

де $w_{T-SHORT}(t)$ - функція обвідної відповідного імпульсу.

Для передачі довгих тренуючих OFDM-символів використовуються всі 52 підносійні частоти. Амплітуди на підносійних можна записати у вигляді 53-мірного вектора L (включаючи нульову амплітуду на нульовій частоті) з компонентами у вигляді:

$$L = (1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, -1, -1, -1, -1, 1, 1, -1, -1, 1, -1, 1, 1, 1, 1).$$

Тоді відповідний довгий навчальний OFDM-сигнал має вигляд:

$$r_{LONG} = w_{T-LONG}(t) \sum_{k=-26}^{26} L_k \exp(j2\pi k \Delta_F (t - T_{G12}))$$

де $w_{T-LONG}(t)$ - функція обвідної імпульсу,

$T_{G12}=1.6$ мкс, а $T_{LONG}=(1.6+2\times 3.2)=8$ мкс.

В результаті маємо обвідну сигналу преамбули:

$$r_{PREAMBLE}(t) = r_{SHORT}(t) + r_{LONG}(t - T_{SHORT}) ,$$

де затримка $t_{SHORT}=8$ мкс показують, що передача довгих тренуючих OFDM-символів починається через 8 мкс, після початку передачі кадру. Спосіб застосування зворотного Фур'є-перетворення наступний. Використовується 64-точкове швидке Фур'є-перетворення, а число використовуваних в стандарті підносійних одно 52. Тому 52 коефіцієнта C_k доповнюються до 64 за допомогою 12 нульових коефіцієнтів.

2.5 Формування фрейму фізичного рівня стандарту IEEE 802.11a

Процедури формування фрейму і шифрування/дешифрування даних передбачають:

- згорткове кодування, перемежування даних;
- модуляція даних;
- формування OFDM-символу;
- використання діапазона частот;
- визначення рівня потужності передавача;
- спектр випромінюваного сигналу (спектральна маска).
- додавання помилок в амплітуді за модуляції;
- додавання необхідної ймовірності фреймових (пакетних) помилок і необхідної чутливості приймача;

Відповідно до стандарту IEEE 802.11a, процес формування фрейму представляє собою наступну послідовність кроків:

- створення преамбули, що складається з 10 повторень короткої тренувальної послідовності і 2 повторень довгої тренувальної послідовності, представлена захисним інтервалом (GI);

- створення заголовка кадру з полів RATE, LENGTH і SERVICE і заповнення відповідних полів;
- кодування поля SIGNAL в OFDM символ також має на увазі виконання наступних кроків:
 - а) згорткове кодування;
 - б) процедура перемежування;
 - в) BPSK модуляція;
 - г) додавання пілотних сигналів;
 - д) виконання зворотного перетворення Фур'є;
 - е) додавання захисного інтервалу для передачі даних з темпом 6 Мбіт/с; за цього вміст поля SIGNAL нескремблюється;
- на підставі даних поля RATE здійснюється обчислення числа біт даних на OFDM символ, числа кодованих біт на підносійну, числа кодованих біт на OFDM символ;
- формування поля DATA;
- ініціалізація шифратора (scrambler) псевдовипадковою послідовністю, генерування послідовності шифру і виконання шифрування бітів поля DATA;
- заміна 6 зашифрованих бітів поля TAIL шістьма нульовими бітами;
- кодування поля DATA сверточним кодером з темпом 1/2;
- виконання процедури виколювання (пунктуації) для досягнення бажаного темпу кодування (по даними поля RATE заголовка фрейму);
- закодована послідовність бітів розбивається на групи по N_{CBPS} біт; всередині кожної групи виконується процедура перестановки розрядів у відповідності з обраним темпом кодування;
- отримана бітова послідовність розбивається на групи по N_{BPSK} біт; кожна група перетворюється на послідовність комплексних чисел згідно з таблицями модуляції;
- послідовність комплексних чисел розбивається на групи по 48 чисел (за числом підносійних, використовуваних для передачі даних, кожна група асоці-

юється з одним OFDM символом) так, що у кожній групі комплексні числа нумеруються від 0 до 47 і передаються на підносійні з наступними номерами: з -26 до -22, з -20 до -8, з -6 до -1, з 1 до 6, з 8 до 20, з 22 до 26, а підносійні обробляються наступним чином:

а) з номерами -27, -7, 7, 21 пропускаються для додавання пілотних сигналів;

б) підносійна з номером 0 асоціюється з центральною частотою і заповнюється нульовим значенням;

– здійснюється додавання пілотних сигналів на підносійних з номерами 21, -7, 7 і 21: загальне число використуваних підносійних таким чином складатиме 52;

– для кожного OFDM символу (група з 52 підносійних з номерами від -26 до 26, включаючи центральну частоту) обчислюється зворотне перетворення Фур'є (перехід в часову область) і формування захисного інтервалу;

– формування послідовності з OFDM символів, отриманих на основі поля DATA;

– перенесення зформованої послідовності до радіочастотного діапазону на центральну частоту,

після чого моделюється передача даних до приймача.

2.6 Допустимі помилки в амплітуді за модуляції

Відносні середньоквадратичні помилки, усереднені за усіма частотами, не повинні перевищувати таких величин: -5, -8, -10, -13, -16, -19, -22 і -25 дБ для швидкостей передачі даних 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 і 54 Мбіт / сек, відповідно.

Імовірність фреймових (пакетних) помилок (packet error rate - PER) не повинна перевищувати 10% за довжини пакета 1000 біт і при рівні сигналу на вході антени -82, -81, -79, -77, -74, -70, -66 і -65 дБ щодо мВт, для швидкостей передачі даних 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 і 54 Мбіт / сек, відповідно. Приймач

повинен забезпечити максимальну ймовірність пакетних помилок не більше 10% при довжині пакета 1000 біт і при максимальній величині сигналу на вході антени - 30 дБ щодо мВт для всіх швидкостей передачі даних.

2.7 Оцінка завадостійкості

Основним параметром для оцінки завадостійкості радіотракту є частота бітових помилок (PER) за відповідних значень середнього відношення сигнал/шум (SNR).

Вихідні дані для моделювання:

- ширина смуги пропускання каналу: 10 МГц;
- кількість OFDM-символів на 1 субфрейм: 2;
- тип модуляції: QPSK;
- відношення сигнал/шум: від 0,1 до 3 дБ.

За підсумками моделювання, отримано залежність частоти бітової помилки від середнього відношення сигнал\шум (див. рис. 2.7): із збільшенням відношення сигнал/шум знижується і кількість помилок.

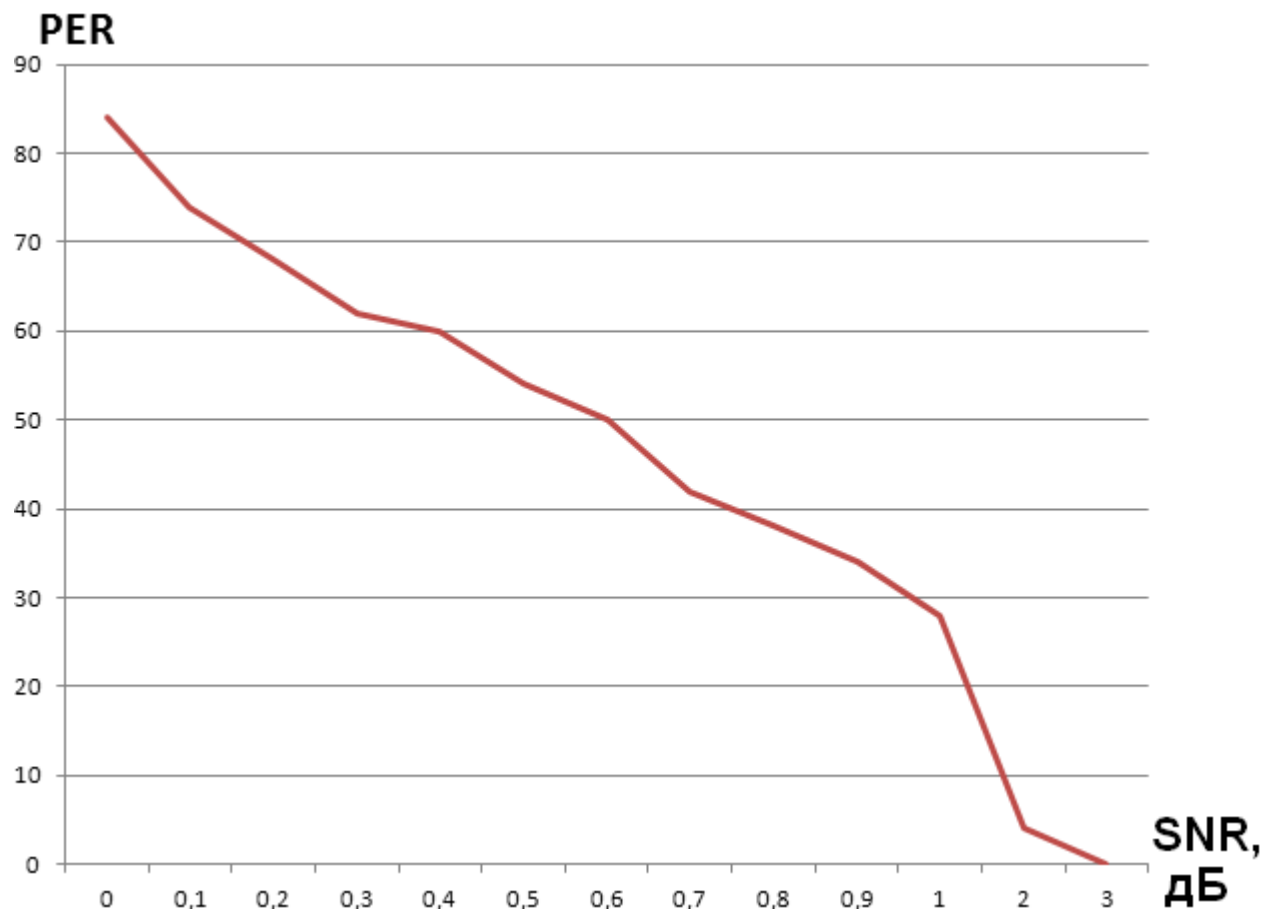


Рисунок 2.7 – Залежність частоти бітової помилки від середнього відношення сигнал\шум

Отримані результати моделювання добре узгоджуються з теоретичними відомостями, що підтверджує адекватність розробленої моделі радіоканалу з використанням методів OFDM.

3 ЕКОНОМІЧНІ РОЗРАХУНКИ

3.1 Обґрунтування актуальності теми з позиції маркетингу

Аналіз, дослідження та робота над даною темою носить актуальних характер в сучасних мовах. Про це також свідчить активізація активності досліджень та нових розробок у заданому напрямі.

Телекомунікаційний ринок є одним з найбільш перспективних та швидко зростаючих напрямків галузі зв'язку України. На даний час система телекомунікацій в Україні знаходиться на шляху швидкого розвитку, що в цілому орієнтоване на вхід української системи зв'язку в світову, як рівноправного партнера. Однією з галузей зв'язку, що має бурний розвиток, є мобільний зв'язок. Щороку відбувається злиття та поглинання одних мобільних операторів іншими, а самі мобільні оператори розширюють спектр послуг, які вони надають, з метою отримання більшої частки на ринку. Традиційні методи моделювання розвитку даного ринку ускладнені постійною появою нових технологій, що кардинально змінюють характер розвитку ринку.

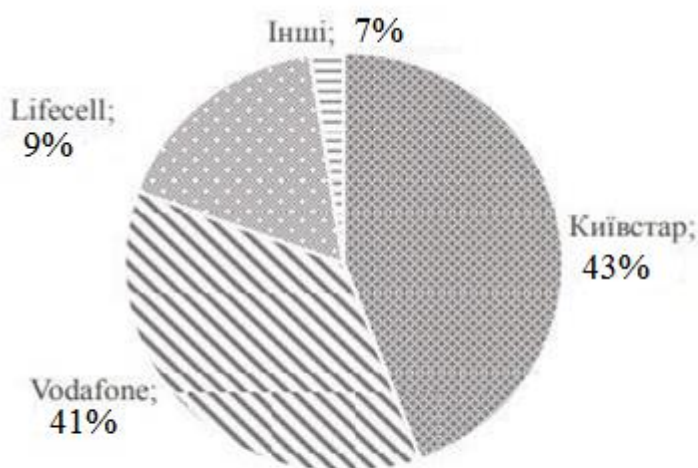


Рисунок 3.1 – Структура ринку мобільного зв'язку України на 2019 р.

Індекс Херфиндаля-Хиршмана – це показник рівня монополізації ринку. Вираховується він за наступною формулою:

$$HHI = \sum_{i=1}^n S_i^2$$

$$HHI = S_1^2 + S_2^2 + \dots + S_n^2 \quad (3.1)$$

де S – доля учасника ринку, %.

Звідси:

$$HHI = 432 + 412 + 92 + 72 = 3660.$$

Таблиця 3.1 – Залежність індексу Херфиндаля-Хиршмана від ринкової частки домінуючої фірми

Частка провідної фірми	Індекс Херфиндаля - Хиршмана
0,01	більше 0,0001
0,10	0,01
0,20	0,04
0,30	0,09
0,40	0,16
0,50	0,25
0,60	0,36
0,70	0,49
0,80	0,64
0,90	0,81
1,00	1,00

В принципі, класифікація за рівнем конкуренції може бути будь-якою.

Однак, базуючись на нашому зразку, виведемо три основні групи:

I група – ринки з високим рівнем монополізації (концентрації) (монополістичні ринки) $1\ 800 < \text{HHI} < 10\ 000$.

II група – ринки з сильним рівнем монополізації (концентрації) (олігополістичні ринки) $1\ 000 < \text{HHI} < 1\ 800$.

III тип – ринки з низьким рівнем монополізації (концентрації) (конкурентні ринки) $\text{HHI} < 1\ 000$.

Як бачимо, ринок мобільного зв'язку відноситься до першої групи.

Оскільки з кожним роком все більше зростає кількість користувачів мобільним зв'язком, це означає збільшення обсягу передавання інформації, а отже збільшення навантаження на технічну частину, що обслуговує абонентів. Цю проблему вирішують цифрові методи модуляції.

Більш складні за алгоритмом роботи цифрові методи модуляції (у порівнянні з аналоговими методами) вимагають ускладнення апаратурної (технічної) реалізації системи. Саме цифрові методи модуляції використовуються у більшості сучасних системах мобільного зв'язку.

Темою дипломного проекту є «Моделювання каналу зв'язку з використанням методів MSK». Ця тема охоплює знання, які формують загальну інформацію про протоколи множинного доступу та їх призначення, як вони застосовуються в безпроводових мережах, засоби проектування, конструювання та матеріалізації відповідних технічних процесів та явищ у конкретних об'єктах та системах, які стосуються теми дипломного проекту.

Питання досліду цифрових методів модуляції, а саме створення спеціального програмного забезпечення для формування сигналів вивчалось недостатньо. Загалом матеріал викладено у навчальних посібниках носить загальний характер, у той час як у різних статтях та публікаціях за даною тематикою розглядаються більш вузькі питання, що стосуються заданої теми. Проте потребується більш детальніше врахувати сучасні умови при дослідженні проблематики заданої теми.

Висока значимість та недостатня практична розробленість визначають безсумнівну новизну даного дослідження, а отже й підвищують ступінь його значущості для нових технологій у сфері зв'язку.

3.2 Визначення трудомісткості та тривалості роботи

Основною умовою раціонального планування дослідження є скорочення строків виконання при мінімальних витратах трудових, матеріальних та грошових ресурсів. Для цього необхідно вирішити наступні питання: визначення трудомісткості та тривалості; складання календарного графіка виконання; визначення витрат на проведення і ефективність дослідження.

Комплекс науково – дослідницьких робіт може бути поділений на етапи. Для кожного етапу необхідно вказати його найменування, виконавців, трудомісткість і тривалість робіт. В даній роботі беруть участь один молодший науковий співробітник і один старший науковий співробітник. Результати розподілу наведені в таблиці 3.1.

Через те, що важко встановити трудомісткість виконання робіт, у зв'язку з елементами незвичайності, в процесі виконання більшості науково-дослідницьких робіт, використовується ймовірнісний метод. При цьому використовують дві або три вірогідних оцінки часу. Ці оцінки є вихідними для розрахунку очікуваного часу виконання роботи за формулою (3.1):

$$t_{оч} = \frac{3 \cdot t_{min} + 2 \cdot t_{max}}{5} \quad (3.2)$$

де $t_{оч}$ – очікувана оптимальна оцінка часу виконання роботи, днів;

t_{min} – мінімально необхідний час на виконання роботи при найбільш сприятливих умовах, днів;

t_{max} – максимальні витрати часу на виконання роботи за несприятливих умов, днів.

Таблиця 3.1 – Оцінка довготривалості та трудомісткості етапів робіт.

№	Етапи роботи	Часова оцінка, дн.			Дис- пер- сія	Виконавці		Трива- лість, днів
		tmin	tmax	точ		Спеціальність	Кіл- сть, чол.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Отримання технічного завдання	1	2	2	0,2	Молодший науковий співроб.	1	3
2	Огляд літературних джерел	3	7	5	0,8	Молодший науковий співроб.	1	2
3	Аналіз основних принципів організації	2	4	3	0,4	Молодший науковий співроб.	1	3
4	Підготовчий (техніко-економічне обґрунтування) етап	14	20	17	1,2	Молодший науковий співроб.	1	13
5	Написання модулюючої програми	13	15	14	0,4	Старший науковий співроб.	1	12
6	Аналіз результатів програми	13	19	16	1,2	Старший науковий співроб.	1	12

7	Вибір та купівля необхідного обладнання та матеріалів	2	4	3	0,4	Молодший науковий співроб.	1	3
---	---	---	---	---	-----	----------------------------	---	---

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
8	Експериментальні дослідження	20	22	21	0,6	Молодший науковий співроб.	1	20
9	Складання та обговорення технічного звіту	2	2	2	0,0	Старший науковий співроб.	1	1
10	Впровадження результатів	2	2	2	0,0	Молодший науковий співроб.	1	1
	Разом	72	97	85	—	—	—	70

Ступінь правильності визначення перевіряється розрахунком дисперсії – різниці між мінімальною та максимальною оцінками часу, що визначається за формулою (3.2):

$$\sigma = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{5} \quad (3.3)$$

Розраховані значення для кожного етапу занесені у табл. 3.1.

Дана дипломна робота повинна виконуватися поетапно, у лінійній послідовності, так без отримання необхідних результатів дослідів не можна виконувати наступний пункт. Використовуючи дані табл. 3.1, збудуємо лінійний

календар (рис. 3.3).

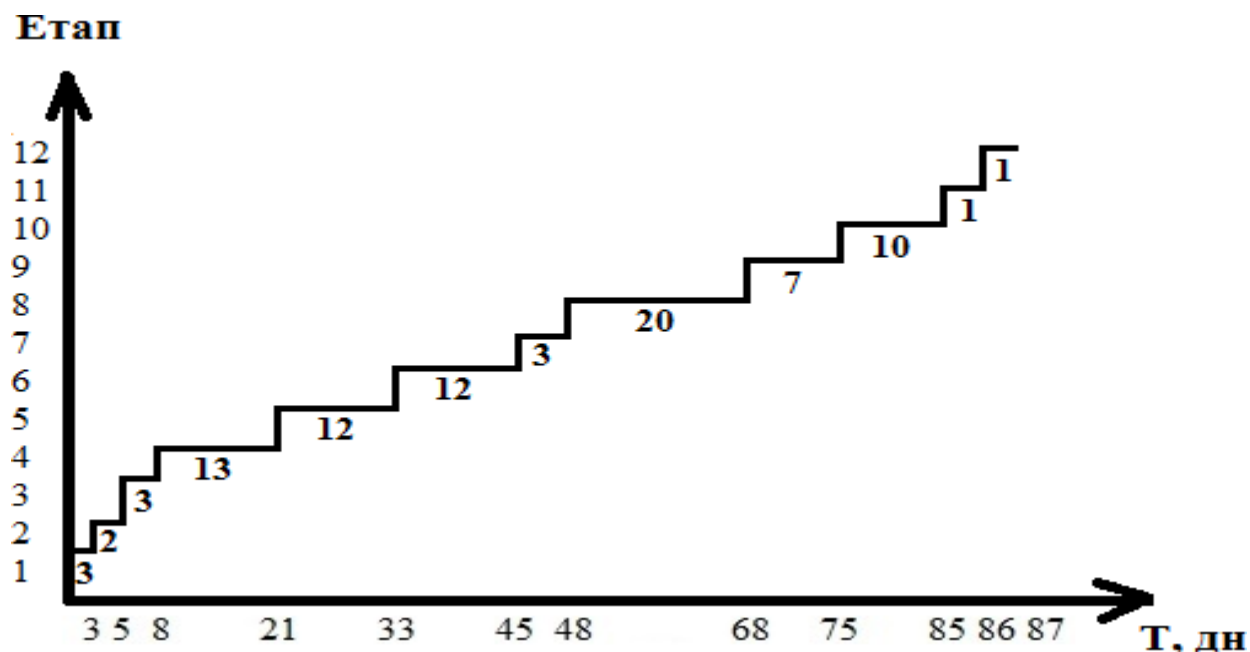


Рисунок 3.3 – Лінійний календарний графік

3.3 Розрахунок кошторису витрат на практичну реалізацію магістерської роботи

До складу витрат на реалізацію проекту враховується вартість усіх ресурсів, необхідних для проведення комплексу робіт. Проте в даному випадку, при роботі над заданою темою дипломного проекту розрахунок багатьох статей ускладнений через невизначеність, яка виражається в тому, що заздалегідь невідомо необхідну кількість деяких матеріалів, деталей, послуг, а також величини витрат.

Вирішенням даного питання є використання методики збільшених розрахунків. Дана методика передбачає по перше первинний розрахунок основної заробітної плати, а вже після цього – процентних частин інших статей витрат на реалізацію проекту.

Статті, витрати за якими можуть бути розраховані більш точно, розраховуються за звичайною методикою.

З метою визначення витрат на реалізацію проекту складено кошторис

витрат (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Кошторис витрат на реалізацію наукової роботи

Статті витрат	Умовне по- значення	Сума	
		грн.	частка, %
Матеріали, покупні вироби і напівфабрикати (за відрахуванням відходів, що реалізуються)	М	1168,5	2,34
Спеціальне устаткування для реалізації проекту	СУ	5200	42,1
Основна і додаткова заробітна плата виробничого персоналу	ЗП	24 103	26,1
Відрахування на соціальне страхування (від суми основної і додаткової заробітної плати)	ЄСВ	5302,66	5,74
Накладні витрати	НВ	15 899,94	23,7
Всього витрат на реалізацію проекту	–	51404,1	100

3.4 Розрахунок вартості матеріалів

До статті витрат на матеріали включаються вартість основних та допоміжних матеріалів, необхідних для розробки проекту. За період проведення науково-дослідницьких робіт співробітниками будуть використані наступні матеріали (табл. 3.3). Транспортно-заготівельні витрати: 3 - 10% від вартості матеріалів.

Таблиця 3.3 – Розрахунок вартості матеріалів

Матеріал	Марка, ГОСТ, ДСТУ, ТУ	Кількість	Ціна за одиницю, грн/шт.	Витрати за матеріали	Частка, %
Папір А4	UNI Office A4	500	0,25	125	76,9
Папір А2	Xerox A2	4	3	12	7,1
Папір А1	Xerox A1	5	5	25	14,8
Транспортно-заготівельні витрати	—	—	—	6,5	3,8
Разом	—	—	—	168,5	

3.5 Спеціальне устаткування

У цій статті враховуються витрати на оренду, доставку і монтаж лабораторних установок, вимірювальних та регулювальних пристроїв, приладів, випробувальної апаратури тощо (табл. 3.4).

Балансова вартість обчислювальної техніки становить 10000 грн. за один комп'ютер. Для проведення науково – дослідницької роботи використовується 1 комп'ютер.

Таблиця 3.4 – Витрати на спеціальне устаткування

Перелік устаткування	Марка, ГОСТ, ДСТУ, ТУ	Кількість	Ціна за одиницю, грн.	Собівартість експлуатації, грн./год.
Разом	Ноутбук	1	5000	5000

Транспортно-заготівельні витрати	—	—	—	200
Разом	—	—	—	5200

3.6 Розрахунок заробітної плати

Витрати на основну заробітну плату складаються з планового фонду заробітної плати всіх категорій працівників, зайнятих в розробці проектного пристрою.

Розрахунок заробітної плати ведеться на основі даних про трудомісткість (табл. 3.1). Результати розрахунків зведені в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Розрахунок основної заробітної плати.

Посада виконавця	Кількість людей	Місячний оклад, грн	Середньоденна зар.плата, грн.	Кількість робочих днів	Сума зар. плати, грн.
Старший науковий співробітник	1	6000	272	42	11424
Молодший науковий співробітник	1	4500	166,6	52	8663,2
Разом	2	—	—	94	20087,2

Додаткову заробітну плату приймаємо рівною 20% від основної заробітної плати. Розрахунок основної та додаткової заробітної плати наведено в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Основна та додаткова заробітна плата.

Спеціальність виконавця	Додаткова заробітна плата, грн.	Сума основної та додаткової заробітної платні, грн.
Старший науковий співробітник	2284	13708
Молодший науковий співробітник	1732,64	10 395
Разом	—	24 103

3.7 Відрахування на соціальне страхування

Відрахування на соціальне страхування й в інші фонди визначаються в розмірі 22 % від суми основної та додаткової заробітних плат.

Таким чином, відрахування на соціальне страхування становить:

$$Відр = (ЗП_{осн} + ЗП_{доп}) \cdot 0,22 \quad (3.4)$$

де $ЗП_{осн}$ – основна заробітна плата, грн.;

$ЗП_{доп}$ – додаткова заробітна плата, грн.

$$Відр = 24103 \cdot 0,22 = 5302,66 \text{ грн.}$$

3.8 Загальновиробничі витрати

До загальновиробничих витрат відносять витрати на загальне управління та загальногосподарські потреби (на заробітну плату апарату управління, канцелярські витрати та інше), на утримання і експлуатацію будівель і споруд.

ЗВВ витрати включаються у вартість проведення роботи непрямым шляхом – у відсотках від основної заробітної плати співробітників.

ЗВВ витрати становлять 80 – 100% від основної заробітної плати співробітників, що в нашому випадку становить: Умовно 90%

$$НВ = 20087,2 \cdot 0,9 = 18\,078,48 \text{ грн.}$$

3.9 Бальна оцінка економічної ефективності проекту

Наукові дослідження, прямий підрахунок економічної ефективності яких неможливий, оцінюють за допомогою бальної системи.

Бальна оцінка проводиться за наступними показниками:

- важливість розробки $K_1 = 1$, обирається з табл. 3.7;
- можливість використання результатів розробки $K_2 = 8$ (табл. 3.8);
- теоретична значимість і рівень новизни дослідження $K_3 = 2$ (табл.3.9)
- складність розробки $K_4 = 5$ (табл. 3.10).

Таблиця 3.7 – Шкала для оцінки важливості розробки K_1 .

№ з/п	Показник	Бали
1	Ініціативна робота, що не є частиною комплексної програми, або завданням відомчих органів	1
2	Робота, виконана за договором про науково технічну допомо-	3

	гу	
3	Робота представляє частину відомчої програми	5
4	Робота представляє частину відомчої комплексної програми	7
5	Робота представляє частину міжнародної комплексної програми	8

Таблиця 3.8 – Шкала оцінки можливості використання результатів розробки К2.

№ з/п	Показник	Бали
	У даному підрозділі	1
	У даній організації	3
	У багатьох організаціях	5
	У масштабах країни	8

Таблиця 3.9 – Шкала оцінки показників складності дослідження К4.

№ з/п	Показник	Бали
1	Аналіз, узагальнення й класифікація відомої інформації. Подібні результати були відомі в досліджуваній області	2
2	Одержання нової інформації, що доповнює знання про сутність досліджуваних процесів, не відомі в досліджуваній області	3
3	Одержання нової інформації, що змінює уявлення про сутність досліджуваних процесів, не відомої раніше	5
4	Створення нових теорій, методик	6

5	Одержання інформації, що сприяє формуванню напрямків, не відомих раніше	8
---	---	---

Таблиця 3.10 – Шкала оцінки показників складності дослідження К4.

№ з/п	Показник	Бали
1	Робота виконується одним підрозділом, витрати менш 10000 грн.	1
2	Робота виконується одним підрозділом, витрати 10000 - 50000 грн.	3
3	Робота виконується одним підрозділом, витрати 50000 - 100000 грн.	5
4	Робота виконується за участю багатьох підрозділів, витрати 100000 - 500000 грн.	7
5	Робота виконується декількома організаціями, витрати понад 500000 грн.	8

Загальна оцінка встановлюється за добутком коефіцієнтів:

$$P_c = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4, \quad (3.5)$$

$$P_c = 1 \cdot 8 \cdot 2 \cdot 5 = 80 \text{ балів.}$$

Питомий ефект на кожний бал – 1 000 грн. Загальний ефект від розробки

складає:

$$E = P_c \cdot 1000, (3.6)$$

$$E = 80 \cdot 1000 = 80000 \text{ грн.}$$

Економічна ефективність від реалізації дипломного проекту визначається за допомогою коефіцієнта ефективності, що характеризує частку загального ефекту від розробки, що приходить на одну грн. витрат (собівартості НДР) :

$$K_e = E/K_{\text{ндр}}, \quad (3.7)$$

$$K_e = 80000 / 51404,1 = 1,55.$$

В даному розділі було проведено аналіз і обґрунтування економічної ефективності науково – дослідницької роботи. Розраховано, що для проведення дослідження необхідно близько 70 днів. При цьому сумарні витрати на дослідження становлять 51404,1 грн., з них:

- заробітна плата – 24 103 грн. (44,04 %);
- накладні витрати – 15 899,94 грн. (33,03 %);
- спеціальне обладнання для реалізації проекту – 5200 грн. (10,8 %);
- відрахування на соціальне страхування – 5302,66 грн. (9,68 %);
- витратні матеріали, куповані вироби і напівфабрикати – 1168,5 грн. (2,42 %).

Обґрунтованість ефективності дослідження підтверджується розрахованим коефіцієнтом економічної ефективності, який становить – 1,55.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Аналіз потенційних небезпек

Оскільки тема магістерської роботи «Моделювання каналу зв'язку з використанням методів OFDM» передбачає роботу у приміщенні, обладнаному персональними комп'ютерами з візуальними дисплейними терміналами, необхідно розглянути заходи щодо забезпечення безпеки, виробничої санітарії, гігієни праці та пожежної безпеки приміщень з персональними комп'ютерами.

При аналізі технологічних процесів та обладнання, що використовується, згідно ГОСТ 12.0.003-74 (1999) «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация», виявляються небезпечні виробничі фактори, які при впливі на працюючих можуть призвести до погіршення умов праці або травматизму. Робоче місце представляє собою набір різноманітної комп'ютерної техніки з візуальними дисплейними терміналами та периферійні пристрої. Небезпека у ході робіт буде присутньою при використанні джерел живлення, підключенні та відключенні приладів за допомогою вилок, розеток, перехідних пристроїв, подовжувачів.

Потенційні небезпеки фізичного характеру:

- ураження електричним струмом через несправність електрообладнання, підвищене значення напруги в електричному ланцюзі або недотримання вимог безпеки при його експлуатації, що може призвести до травми або летального результату;
- ураження статичним струмом, що призводить до отримання неприємних відчуттів людиною та до виходу з ладу приладів;
- вплив електромагнітного випромінювання через підвищений рівень електромагнітних випромінювань, що призводить до розладу центральної нервової системи та захворювань серцево-судинної системи.

Потенційні небезпеки психофізіологічного характеру: недотримання режиму роботи за ПК, розумове перенапруження, перенапруження аналізаторів та емоційні перевантаження, що призводять до підвищення стомлюваності, зниження уваги і, як наслідок, до можливості травмування працівника.

Потенційні небезпеки, пов'язані із порушенням санітарно-гігієнічних вимог:

- погіршення самопочуття людини через підвищену чи знижену температуру повітря робочої зони, внаслідок з'являються порушення обмінних процесів в організмі та виникають різні гострі і хронічні простудні захворювання;

- потрапляння в легені і на слизові оболонки пилу через підвищену запиленість повітря робочої зони, що провокує появу алергічних захворювань органів зору та дихання;

- зорове стомлення і біль в очах через недостатню освітленість робочої зони, які призводять до зниження уваги і можливості травмування;

- пошкодження органів слуху та роздратування підвищеним рівнем шуму на робочому місці внаслідок чого відбувається зниження гостроти слуху, порушується функціональний стан серцево-судинної та нервової систем.

Потенційні небезпеки, пов'язані з порушенням правил пожежної безпеки: ризик для здоров'я та життя персоналу, через недотримання правил протипожежної безпеки, що може призвести до травм, летального результату та матеріальних втрат.

Потенційні небезпеки, пов'язані з проявом наслідків надзвичайних ситуацій: отримання травм і матеріальних втрат, через неправильну поведінку персоналу при НС.

4.2 Заходи по забезпеченню техніки безпеки

Під час проектування систем електропостачання, монтажу силового електрообладнання та електричного освітлення будівель та приміщень для ЕОМ

необхідно дотримуватись вимог ПВЕ, ПТЕ, ПБЕ, СН 357-77 «Инструкция по проектированию силового осветительного оборудования промышленных предприятий», затверджених Держбудом, ГОСТ 12.1.006, ГОСТ 12.1.030 «ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление», ГОСТ 12.1.019 «ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты», ГОСТ 12.1.045, ВСН 59-88 Держкомархітектури «Электрооборудование жилых и общественных зданий. Нормы проектирования», Правил пожежної безпеки в Україні, цих Правил, а також розділів СНиП, що стосуються штучного освітлення та електротехнічних пристроїв та вимог нормативно-технічної і експлуатаційної документації заводу-виробника ЕОМ.

Для виключення ураження електричним струмом передбачено:

- організаційні заходи: проведення навчання з правил електробезпеки, перевірка знань та атестація персоналу на кваліфікаційну групу з електробезпеки, згідно НПАОП 0.00-4.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці»;
- технічні заходи: встановлення аварійного резервного вимикачу, який може повністю вимкнути електричне живлення приміщення, окрім освітлення; використання підключення до мережі пристроїв за допомогою справних штепсельних з'єднань і електророзеток заводського виготовлення; проведено електромережу штепсельних розеток для живлення пристроїв уздовж стін приміщення, по підлозі поряд зі стінами приміщення, в металевих трубах і гнучких металевих рукавах з відводами відповідно до затвердженого плану розміщення обладнання та технічних характеристик обладнання; відповідність усіх пристроїв вимогам чинних в Україні стандартів, нормативних актів з охорони праці, а також пристрої закордонного виробництва додатково відповідають вимогам національних стандартів держав-виробників і мають відповідну позначку на корпусі, в паспорті або іншій експлуатаційній документації; використання захисного заземлення та занулення згідно «Правил устрою електроустановок» («ПУЕ»).

Для виключення ураження статичним струмом та впливу електромагнітного поля застосовується:

- організаційні заходи: проведення навчання з правил електробезпеки, перевірка знань та атестація персоналу на кваліфікаційну групу з електробезпеки, згідно НПАОП 0.00-4.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці»;

- технічні заходи: екранування джерела стенового харчування, згідно з ГОСТ 12.4.124-83 «Засоби захисту від статичної електрики. Загальні технічні вимоги»; використання покриття технологічних підлог з одношарового полівінілхлоридного антистатичного лінолеуму, для зниження величини виникаючих зарядів статичної електрики в робочому приміщенні; загальне і місцеве періодичне зволоження повітря.

Загальні заходи з техніки безпеки:

- перед початком роботи перевірка справності усіх приладів на робочому місці, очищення екрана відео терміналу від пилу та інших забруднень;

- після закінчення роботи відключення від електричної мережі усіх приладів, а також у разі виникнення аварійної ситуації негайне відключення усіх приладів від електричної мережі; дотримання режиму роботи з ПК та іншими приладами.

Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці Виробнича санітарія – система організаційних заходів і технічних засобів, що запобігають або зменшують дію шкідливих виробничих факторів на працюючих.

До шкідливих виробничих факторів відносяться:

- підвищена або знижена температура, вологість і рухливість повітря;
- підвищена запиленість і загазованість повітря;
- відсутність чи недолік природного світла;
- недостатня освітленість робочої зони;
- знижена контрастність об'єктів порівняно з фоном; прямі відблиски (прожекторне освітлення територій виробництв, світло фар автотранспорту) і

відображені відблиски (від пролитої води та інших рідин на поверхні території виробництва);

- підвищена пульсація світлового потоку;
- підвищений рівень шуму, вібрації, ультра- та інфразвуку;
- підвищена напруга в електричному ланцюзі, замикання якої може відбуватися через тіло людини;
- підвищений рівень статичної електрики.

Приміщення з ВДТ та ПЕОМ повинні бути обладнані системами опалення, кондиціювання повітря або припливно-витяжною вентиляцією відповідно до СНиП 2.04.05-91 «Отопления, вентиляция и кондиционирование».

Параметри мікроклімату, іонного складу повітря, вміст шкідливих речовин на робочих місцях, оснащених відео терміналами, відповідають вимогам пункту 2.4 СН 4088-86 «Санитарные нормы микроклимата производственных помещений», затверджених Міністерством охорони здоров'я СРСР (табл.4.1), ГОСТ 12.1.005-88 «ССБТ Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны», СН 2152-80 «Санитарно-гигиенические нормы допустимых уровней ионизации воздуха производственных и общественных помещений» (табл.4.2).

Таблиця 4.1 – Норми мікроклімату у приміщенні

Пора року	Категорія робіт згідно ГОСТ 12.1-005-88	Температура повітря, град. С	Відносна вологість повітря, %	Шкідливість руху повітря, м/с
		Оптимальна	оптимальна	Оптимальна
Холодна	легка -1 а	22 – 24	40 – 60	0,1
	легка -1 б	21 – 23	40 – 60	0,1
Тепла	легка -1 а	23 – 25	40 – 60	0,1
	легка -1 б	22 – 24	40 – 60	0,2

Таблиця 4.2 – Рівні іонізації повітря приміщень

Рівні	Кількість іонів в 1 см куб. повітря	
	+ N	- N
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500 – 3000	3000 – 5000
Максимально допустимі	50000	50000

Пил може здійснювати на людину фіброгенну дію, при якій в легенях відбувається розростання сполучних тканин, що порушує нормальну будову та функцію органу.

Основним напрямком в комплексі заходів по боротьбі з пилом є попередження її створення або надходження у повітря робочих приміщень. Найважливіше значення в цьому напрямку мають заходи технологічного характеру. Технологічні процеси, відповідні ГОСТ 12.1.005–88 «Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони», по-можливості, проводяться таким чином, щоб освіта пилу було повністю виключено, або, принаймні, зведено до мінімуму. З цією метою потрібно максимально замінювати сухі матеріали вологими, пастоподібними, розчинами і обробку їх вести вологим способом. При неможливості повного виключення пилоутворення, необхідно шляхом відповідної організації технологічного процесу і використання відповідного технологічного обладнання, не допускати виділення пилу в повітря робочих приміщень. Це досягається, головним чином, шляхом організації безперервного технологічного

процесу в повністю герметичній або, принаймні, максимально закритій апаратурі і комунікаціях.

Організація робочого місця користувача відеотерміналу та ЕОМ повинна забезпечувати відповідність усіх елементів робочого місця та їх розташування ергономічним вимогам ГОСТ 12.2.032 «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ, сидя. Общие эргономические требования», характеру та особливостям трудової діяльності.

Площа, виділена для одного робочого місця з відеотерміналом або персональною ЕОМ, повинна складати не менше 6 м^2 , а обсяг – не менше 20 м^3 . Робочі місця з відеотерміналами відносно світлових прорізів повинні розміщуватися так, щоб природне світло падало збоку, переважно зліва.

При розміщенні робочих місць з відеотерміналами та персональними ЕОМ необхідно дотримуватись таких вимог:

- робочі місця з відеотерміналами та персональними ЕОМ розміщуються на відстані не менше 1 м від стін зі світловими прорізами;
- відстань між бічними поверхнями відеотерміналів має бути не меншою за 1,2 м;
- відстань між тильною поверхнею одного відеотермінала та екраном іншого не повинна бути меншою 2,5 м;
- прохід між рядами робочих місць має бути не меншим 1 м.

Конструкція робочого місця користувача відеотермінала (при роботі сидячи) має забезпечувати підтримання оптимальної робочої пози з такими ергономічними характеристиками: ступні ніг – на підлозі або на підставці для ніг; стегна – в горизонтальній площині; передпліччя – вертикально; лікті – під кутом $70-90^\circ$ до вертикальної площини; зап'ястя зігнуті під кутом не більше 20° відносно горизонтальної площини, нахил голови – $15-20^\circ$ відносно вертикальної площини.

Висота робочої поверхні столу для відеотермінала має бути в межах 680-800 мм, а ширина – забезпечувати можливість виконання операцій в зоні дося-

жності моторного поля. Рекомендовані розміри столу: висота – 725 мм, ширина – 600-1400 мм, глибина – 800-1000 мм.

Для зниження статичного напруження м'язів рук необхідно застосовувати стаціонарні або знімні підлокітники довжиною не менше 250 мм, шириною – 50-70 мм, що регулюються по висоті над сидінням у межах 230 ± 30 мм та по відстані між підлокітниками в межах 350-500 мм.

Екран відеотермінала та клавіатура мають розташовуватися на оптимальній відстані відочей користувача, але не ближче 600 мм, з урахуванням розміру алфавітно-цифрових знаків та символів. Відстань від екрана до ока працівника повинна складати:

- при розмірі екрану по діагоналі 35/38 см (14" /15") – 600-700мм;
- при розмірі екрану по діагоналі 43 см (17") – 700-800мм;
- при розмірі екрану по діагоналі 48 см (19") – 800-900мм;
- при розмірі екрану по діагоналі 53 см (21") – 900-1000 мм.

Клавіатуру слід розміщувати на поверхні столу або на спеціальній, регульованій за висотою, робочій поверхні окремо від столу на відстані 100- 300 мм від краю, ближчого до працівника. Кут нахилу клавіатури має бути в межах 5-15'.

Розміщення принтера або іншого пристрою введення-виведення інформації на робочому місці має забезпечувати добру видимість екрану відеотермінала, зручність ручного керування пристроєм введення-виведення інформації в зоні досяжності моторного поля: по висоті 900-1300 мм, по глибині 400-500 мм.

При потребі високої концентрації уваги під час виконання робіт з високим рівнем напруженості суміжні робочі місця з відеотерміналами та персональними ЕОМ необхідно відділяти одне від одного перегородками висотою 1,5-2 м.

Приміщення з ЕОМ повинні мати природне і штучне освітлення відповідно до ДБН В.2.5-28-2006 «Природне та штучне освітлення». Природне світло повинно проникати через бічні світло прорізи, зорієнтовані, як правило, на пів-

ніч чи північний схід, і забезпечувати коефіцієнт природної освітленості (КПО) не нижче 1,5%. Розрахунки КПО проводяться відповідно до ДБН В.2.5-28-2006. Вікна приміщень з відеотерміналами повинні мати регульовальні пристрої для відкривання, а також жалюзі, штори, зовнішні козирки тощо.

Штучне освітлення приміщення з робочими місцями, обладнаними відеотерміналами ЕОМ загального та персонального користування, має бути обладнане системою загального рівномірного освітлення. У виробничих та адміністративно-громадських приміщеннях, де переважають роботи з документами, допускається вживати систему комбінованого освітлення (додатково до загального освітлення встановлюються світильники місцевого освітлення). Відношення яскравості екрану комп'ютера до яскравості оточуючих його поверхонь не повинно перевищувати у робочій зоні.

При розташуванні відеотерміналів ЕОМ за периметром приміщення лінії світильників штучного освітлення повинні розміщуватися локально над робочими місцями (табл.4.3).

Для забезпечення нормованих значень освітлення в приміщеннях з відеотерміналами ЕОМ загального та персонального користування необхідно очищати віконне скло та світильники не рідше ніж 2 рази на рік, та своєчасно проводити заміну ламп, що перегоріли.

Таблиця 4.3 – Норми освітленості в кабінетах і класах з ПК

Характеристика роботи	Робоча поверхня	Площина	Освітленість, лк	Примітка
Робота переважно з екранами дисплеїв ПК (50% та більше робочого часу)	Екран	В	200	не вище
	Клавіатура	Г	400	не нижче
	Стіл	Г	400	не нижче
Робота переважно з документами (з екранами дисплеїв ПК менше 50%)	Екран	В	200	не вище
	Клавіатура	Г	400	не нижче
	Стіл	Г	500	не нижче

робочого часу)	Дошка	В	500	не нижче
Проходи основні	Підлога	Г	100	

Примітки: В – вертикальна площина, Г – горизонтальна площина.

Загальне освітлення має бути виконане у вигляді суцільних або переривчатих ліній світильників, що розміщуються збоку від робочих місць (переважно зліва) паралельно лінії зору працівників. Допускається застосовувати світильники таких класів світлорозподілу:

- світильники прямого світла –П;
- переважно прямого світла –Н;
- переважно відбитого світла – В.

Приведемо розрахунок штучного освітлення для приміщення, розміри якого: довжина 5м, ширина 3м, висота 3м.

Розрахунок освітленості виконаємо методом коефіцієнта використання. Цей метод використовується для розрахунку загального рівномірного висвітлення горизонтальних поверхонь виробничих приміщень при відсутності затемнень.

Розрахунок освітлення методом коефіцієнта використання виконується по формулі:

$$\Phi = E \cdot S \cdot k \cdot z / (N \cdot \eta), \quad (4.1)$$

де Φ – необхідний світловий потік ламп у кожному світильнику, лм;

E – нормативна мінімальна освітленість, лк;

k – коефіцієнт запасу, вибирається;

S – освітлювана площа, м²;

z – коефіцієнт мінімальної освітленості, величина якого знаходиться в межах від 1,1 до 1,5 (при оптимальних відносинах відстані між світильниками до розрахункової висоти для ламп розжарювання і ДРЛ $z = 1,15$ і для люмінес-

центних ламп $z = 1,1$);

N – число світильників у приміщенні;

η – коефіцієнт використання світлового потоку.

Приймаємо: $E = 400$ лк; $k = 1,5$; $z = 1,1$.

Освітлювана площа приміщення визначається по формулі:

$$S = A \cdot B, \quad (4.2)$$

де S – освітлювана площа;

A – довжина приміщення, м;

B – ширина приміщення, м.

Отримуємо

$$S = 5 \cdot 3 = 15 \text{ м}^2.$$

Розміщення світильників у приміщенні при системі загального висвітлення залежить від розрахованої висоти їхнього підвісу h , що звичайно задається розмірами приміщень.

Найбільш вигідне співвідношення відстані між світильниками до розрахункової висоти підвісу:

$$\lambda = L/h \quad (4.3)$$

Примітка. Приймається по таблиці у залежності від типової кривої сили світла світильника. Для люмінесцентних ламп при косинусоїдальному типі кривої вибираємо $a = 1,4$.

Знаходимо розрахункову висоту підвісу по наступній формулі:

$$h = H - h_{\%} - h_p \quad (4.4)$$

де H – висота приміщення, м;

$h_{\%}$ - висота звису світильника (від перекриття), м;

h_p - висота робочої поверхні над підлогою, м.

Приймаємо: $H=3,9$ м,

$h_{\%}=0,7$ м,

$h_p=0,8$ м.

Тоді $h=3,9 - 0,7 - 0,8=2,4$ м.

Відстань між світильниками визначаємо з формули (4.5):

$$L=\lambda \cdot h, \quad (4.5)$$

$$L=2,4 \cdot 0,4=2,5 \text{ м}$$

З довідкової літератури вибираємо необхідну лампу.

Тип обраної лампи – ЛБ-30, $\Phi=2180$ лм, які розміщені в один ряд. У приміщенні встановлюємо 3 світильники по 2 лампи у кожному.

Шум у певних умовах може мати значний вплив на здоров'я та поведінку людини. Шум може викликати роздратування і агресію, артеріальну гіпертензію (підвищення артеріального тиску), тиннітус (шум у вухах), втрату слуху.

Рівні звукового тиску в октавних смугах частот 250-4000 Гц не повинні перевищувати значень, встановлених Санітарними нормами допустимих рівнів шуму на робочих місцях № 3223-85 «Санітарні норми допустимих рівнів шуму на робочих місцях» і ГОСТ 12.1.003-88 «Шум. Загальні вимоги безпеки».

Зниження шуму і вібрації, що впливають на людину, здійснюється наступними заходами:

- застосуванням звукоізолюючих пристроїв для ізоляції шумних агрегатів;
- вибором раціонального режиму праці і відпочинку, скороченням часу перебування в галасливих умовах.

Рівні ультрафіолетового випромінювання не повинні перевищувати допустимих відповідно до СН № 4557-88 «Санітарні норми ультрафіолетового випромінювання у виробничих приміщеннях», затверджених Міністерством охорони здоров'я та ДСанПІН 3.3.2-007-98.

Гранично допустима напруженість електростатичного поля на робочих місцях не повинна перевищувати рівнів, наведених в ГОСТ12.1.045 «ССБТ. Електромагнітні поля. Допустимі рівні на робочих місцях і вимоги до проведення контролю», СН № 1757-77 «Санітарно-гігієнічні норми допустимої напруги електростатичного поля» та ДСанПІН 3.3.2-007-98.

Потужність експозиційної дози рентгенівського випромінювання на відстані 0,05 м від екрана та корпусавідеотермінала при будь-яких положеннях регулювальних пристроїв відповідно до Норм радіаційної безпеки України (НРБУ-97), затверджених постановою державного санітарного лікаря Міністерства охорони здоров'я України від 18.08.97 № 58, не повинна перевищувати $7,74 \cdot 10^{-12}$ А/кГ, що відповідає еквівалентній дозі 0,1 мбер/год. (100 мкР/год.).

4.3 Заходи з пожежної безпеки

Пожежна безпека – це стан об'єкту, при якому виключається можливість пожежі, а у випадку її виникнення виключається дія на людей небезпечних факторів пожежі та забезпечується захист матеріальних цінностей.

Відповідно до Закону України «Про пожежну безпеку» пожежна безпека повинна забезпечуватися шляхом проведення організаційних, технічних та інших заходів, спрямованих на попередження пожеж, забезпечення безпеки людей, зниження можливих майнових втрат і зменшення негативних екологічних наслідків у разі їх виникнення, створення умов для швидкого виклику пожежних підрозділів та успішного гасіння пожеж.

Система активного пожежного захисту – це комплекс організаційних заходів і технічних засобів по боротьбі з пожежами і запобіганню дії на людей

небезпечних чинників пожежі, а також обмеження матеріальних збитків віднеї.

Основний напрямок діяльності пожежної охорони полягає у профілактиці пожеж і в обмеженні їх розмірів. Пожежі або вибухи на підприємствах завдають великих матеріальних збитків і майже завжди супроводжуються нещасними випадками з людьми (опіки, поранення)тощо.

Контроль за дотриманням затверджених відповідно до діючого законодавства норм і правил пожежної безпеки на об'єктах народного господарства здійснюють органи Державного пожежного нагляду (ДНП) управління пожежної охорони Міністерства надзвичайних ситуацій України.

Відповідальність за прийняття протипожежних заходів в організаціях покладається персонально на їх керівників без права передовіряти цю відповідальність іншим, підлеглим їм особам, вони здійснюють загальне керівництво роботою в галузі пожежної безпеки підприємств і організацій.

На підприємстві встановлюються первинні засоби пожежогасіння відповідно до вимог Правил пожежної безпеки України. У приміщеннях з

комп'ютерами рекомендується використовувати системи автоматичної пожежної сигналізації для виявлення пожежі та оповіщення працівників. Для приміщення, по якому проводиться розрахунок, потрібно влаштування місць утримання засобів пожежогасіння вогнегасників порошкових типу ОПУ-5 з вільним доступом у випадку необхідності їх використання.

Приміщення, згідно НАПБ Б.03.002-2007 «Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою» відноситься до категорії «Д», а клас можливої пожежі, згідно ДБН В.1.1.7-2002 «Пожежна безпека об'єктів будівництва», визначається, як «Е» (у зв'язку з тим, що у приміщенні багатокомп'ютерів).

Для даного класу пожежі підходять декілька типів вогнегасників, такі як: порошкові, хладонові та вуглекислі вогнегасники. Використовуючи ці дані згідно з НАПБ Б.03.001-2004 «Типові норми належності вогнегасників» і так як площа приміщення складає 15 м² достатньо одного порошкового вогнегасника

об'ємом 5 літрів.

4.4 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях

Для захисту життя та здоров'я в НС слід застосовувати наступні основні заходи цивільної оборони:

- укриття людей в пристосованих під потреби захисту населення приміщеннях виробничих, громадських і житлових будівель, а також у спеціальних захисних спорудах;
- евакуацію населення із зон НС;
- використання засобів індивідуального захисту органів дихання та шкірних покривів;
- проведення заходів медичного захисту;
- проведення аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт у зонах НС.

Укриття населення в пристосованих приміщеннях і в спеціальних захисних спорудах слід проводити за місцем постійного тимчасового перебування людей безпосередньо під час дії вражаючих чинників джерел НС, а також при загрозі їх виникнення.

Евакуація населення із зон НС. Евакуацію слід проводити у разі загрози виникнення або появи реальної небезпеки, формування в цих зонах під впливом руйнівних і шкідливих сил природи техногенних факторів та застосування сучасної зброї, критичних умов для безпечного перебування людей, а також при неможливості задовольнити стосовно жителів постраждалих територій мінімально необхідні вимоги і нормативи життєзабезпечення.

Евакуацію слід здійснювати шляхом організованого виведення та вивезення населення в довколишні безпечні місця, заздалегідь підготовлені за планами економічного і соціального розвитку відповідних регіонів, міст і населених пунктів та обладнані відповідно до вимог і нормативів тимчасового розмі-

щення, забезпечення життя і побутулюдей.

Використання засобів індивідуального захисту органів дихання та шкірних покривів. Засоби індивідуального захисту органів дихання і шкіри (ЗІЗ) в системі захисних заходів у зонах НС повинні запобігати наднормативному впливу на людей небезпечних і шкідливих аерозолів, газів і парів, що попали в навколишнє середовище при руйнуванні обладнання і комунікацій відповідних об'єктів, а також знижувати небажані ефекти дії на людину світлового, теплового та іонізуючого випромінювання.

В якості засобів індивідуального захисту органів дихання слід використовувати загальновійськові, цивільні і промислові протигази, що випускаються промисловістю, респіратори, простіші та підручні засоби.

В якості засобів індивідуального захисту шкіри слід використовувати загальновійськові захисні комплекти, різні захисні костюми промислового виробництва і простіші засоби захисту шкіри.

ЗІЗ, що випускаються промисловістю повинні бути направлені переважно для забезпечення особового складу формувань, що готуються для проведення рятувальних та інших невідкладних робіт в осередках ураження. Інше населення повинно використовувати простіші та підручні засоби.

Проведення заходів медичного захисту. Заходи медичного захисту населення при НС слід проводити з метою запобігання або зниження тяжкості уражень, шкоди для життя і здоров'я людей під впливом небезпечних і шкідливих факторів стихійного лиха, аварій і катастроф, а також для забезпечення епідемічного благополуччя в районах НС та у місцях дислокації евакуйованих. Дані цілі повинні досягатися застосуванням профілактичних медичних препаратів, антидотів, протекторів, стимуляторів резистентності, своєчасним наданням кваліфікованої медичної допомоги ураженим і їх спеціалізованим стаціонарним лікуванням до визначеного результату, імунопрофілактикою серед категорій осіб підвищеного ризику інфікування та проведенням інших протиепідемічних заходів.

Заходи медичного захисту в природних і техногенних НС слід планувати і здійснювати з використанням наявних сил і засобів міністерств і відомств, які безпосередньо вирішують завдання захисту життя і здоров'я людей, а також спеціалізованих функціональних підсистем: екстреної медичної допомоги, санітарно-епідеміологічного нагляду, захисту та життєзабезпечення населення в НС, екологічної безпеки та інших, з їх нарощуванням шляхом створення і розгортання необхідної кількості медичних формувань і установ.

Першу медичну допомогу потерпілим до їх евакуації в лікувальні установи надають безпосередньо в осередках ураження в ході рятувальних та інших невідкладних робіт. Надання цієї допомоги слід здійснювати за участю заздалегідь сформованих для такої мети з самого населення санітарних постів і санітарних дружин, до складу яких слід включати осіб, спеціально навчених загальним прийомом надання само- і взаємодопомоги і здатних організувати практичне виконання населенням цих прийомів в екстремальних умовах.

В рамках підготовки до виконання заходів медичного захисту населення в НС необхідно заздалегідь створювати також спеціальні медичні формування і установи; вести підготовку медичного персоналу; накопичувати медичні засоби захисту, медичного та спеціального майна і техніки для оснащення медичних формувань і установ; проводити профілактичні заходи і щеплення населення, готувати до розгортання додаткову коечну мережу, розробляти режими поведінки і дії населення в НС.

Проведення аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт у зонах НС. Аварійно-рятувальні та інші невідкладні роботи в зонах НС слід проводити з метою термінового надання допомоги населенню, яке піддалося безпосереднього або опосередкованого впливу руйнівних і шкідливих сил природи, техногенних аварій та катастроф, а також для обмеження масштабів, локалізації або ліквідації виниклих при цьому НС.

Комплексом аварійно-рятувальних робіт необхідно забезпечити пошук і видалення людей за межі зон дії небезпечних і шкідливих для їх життя та здо-

ров'я факторів, надання невідкладної медичної допомоги постраждалим і їх евакуацію в лікувальні установи, створення для врятованих необхідних умов фізіологічно нормального існування людського організму.

Невідкладні роботи повинні забезпечити блокування, локалізацію або нейтралізацію джерел небезпеки, зниження інтенсивності, обмеження розповсюдження та усунення дій полів вражаючих факторів в зоні лиха, аварії або катастрофи до рівнів, що дозволяють ефективно застосувати інші заходи захисту.

Аварійно-рятувальні та інші невідкладні роботи слід планувати і здійснювати з використанням сил і засобів міністерств і відомств, державних міжгалузевих консорціумів, корпорацій, концернів і асоціацій, а також територіальних, функціональних і відомчих підсистем за належністю підконтрольних їм територій та об'єктів, які мають необхідними фахівцями (охорони здоров'я, охорони правопорядку, матеріально-технічного постачання, соціального забезпечення та ін.) і технічними засобами, які придатні для використання в осередках ураження в цілях перевезень людей, у тому числі з травмами і пошкодженнями, виробництва демонтажних, монтажних, дорожніх, вантажно-розвантажувальних і земляних робіт; проведення дегазації, дезактивації, дезінфекції та інших спеціальних робіт.

У зонах ураження необхідно організувати життєзабезпечення населення і особового складу формувань, які залучаються до участі у рятувальних та інших невідкладних роботах.

Завчасна підготовка і введення в дію планів захисту населення в НС, зумовлених природними стихійними лихами, техногенними аваріями, катастрофами, а також застосуванням сучасної зброї, повинні передбачати проведення узгоджених за часом, цілям і засобам робіт з планування і здійснення комплексу організаційних, інженерно-технічних і спеціальних заходів цивільної оборони, а також формування необхідних для цього сил і засобів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Dahlman E. 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband / E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold // Elsevier, 2011. – 176 p.
2. Беркман Л. Н. Рангові методи прийому багатопозиційних сигналів / Л. Н. Беркман, О. І. Чумак, І. С. Щербина // Вісник УБЕНТЗ. – 2010. – № 3. – С. 17-23.
3. Прокис, Дж. Цифровая связь [Текст]. - М.: Радио и связь, 2000. - 800 с.
4. Гепко И. А. Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития [Текст] / И.А. Гепко, В.Ф. Олейник. - К.: "ЕКМО", 2009. - 672 с.
5. Ramirez-Mireles F. The benefits of DMT modulation for VDSL systems [Text] / F. Ramirez-Mireles, Q. Albrudi, S. Heidari, P. Sevalia. - Ikanos: Communications, 2012.
6. Слюсар В. Системи MIMO: принципи построение и обработки сигналов / В. Слюсар / Связь и Телекоммуникация. Электроника: Наука, Технология, Бизнес. - 2005. - № 8. - С. 52-58.
7. Alamouti S. M. A simple transmit diversity Technique for wireless communications / S. M. Alamouti // IEEE J. Select. Areas Commun. 2008. - № 8. - Vol.16. - P.1451 - 1458.
8. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Скляр Б.; пер. с англ. [2-е изд., испр.]. - М.: Вильямс, 2003. - 1104 с.