

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ СИСТЕМ БЕЗПРОВОДОВОГО ДОСТУПУ, ПОБУДОВАНОЇ НА ОСНОВІ ОПТИМАЛЬНИХ ОРТОГОНАЛЬНИХ БАГАТОЧАСТОТНИХ СИГНАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

*Чернігівський державний технологічний університет, Чернігів, Україна

**Управління Державної служби спеціального зв'язку та захисту інформації України в Чернігівській області, Чернігів, Україна

Анотація. У роботі проведено оцінку інформаційної ефективності технології побудови системи OFDM-FHSS на основі оптимальних частотно-часових сигнально-кодкових конструкцій та зроблено її порівняння з технологією OFDM.

Ключові слова: інформаційна ефективність, технологія OFDM, багатопозиційні багаточастотні сигнали, частотно-часові послідовності.

Аннотация. В работе проведена оценка информационной эффективности технологии построения системы OFDM-FHSS на основе оптимальных частотно-временных сигнально-кодковых конструкций и сделано её сравнение с технологией OFDM.

Ключевые слова: информационная эффективность, технология OFDM, многопозиционные много-частотные сигналы, частотно-временные последовательности.

Abstract. In this paper we evaluated the effectiveness of information technology of constructing a system of OFDM-FHSS based on optimal time-frequency signal-code structures and its comparison with the OFDM technology was made.

Keywords: information efficiency, OFDM technology, multi-position multi-frequency signals, time-frequency sequences.

1. Вступ

У роботах [1, 2] показано, що існуючі безпроводові інформаційно-телекомунікаційні системи не здатні повністю задовольнити вимоги мереж доступу NGN. Тому на сьогоднішній день залишається актуальним питання щодо проведення їх вдосконалення. І значне місце тут відводиться розробці нових інформаційних технологій фізичного рівня, що, насамперед, визначається ефективністю моделювання сигнально-кодкових конструкцій у системах передачі, які використовують широкосмугові сигнали і характеризуються високою достовірністю прийому інформації.

Для забезпечення всіх вимог мереж доступу NGN необхідно підвищувати інформаційну ефективність існуючих безпроводових інформаційно-телекомунікаційних систем. Відомо [1–3], що це можливо зробити за рахунок використання для побудови фізичного рівня складних сигналів у поєднанні з технологіями множинного радіодоступу OFDMA.

Однак на даний час недостатньо досліджена інформаційна технологія побудови системи OFDM-FHSS на основі оптимальних частотно-часових сигнально-кодкових конструкцій, що не дає змогу оцінити її ефективність для мереж NGN.

2. Постановка завдання

З теорії інформації відомо, що універсально оцінити ефективність інформаційної технології побудови безпроводових інформаційно-телекомунікаційних систем можливо за двома показниками: 1) частотна ефективність $\nu = V / \Delta f_c$ (де V – швидкість передавання інформації, а Δf_c – ефективна ширина смуги частот сигналу); 2) енергетична ефективність $Q^2 = E_c / G_0$ (де E_c – енергія сигналу, а G_0 – спектральна щільність потужності шуму). При

цьому оцінка повинна проводитися при забезпеченні заданої достовірності інформації (для заданої ймовірності помилкового прийому інформаційних біт $P_{ном}$). Межа інформаційної ефективності визначається таким співвідношенням:

$$Q^2 = \frac{2^v - 1}{v}. \quad (1)$$

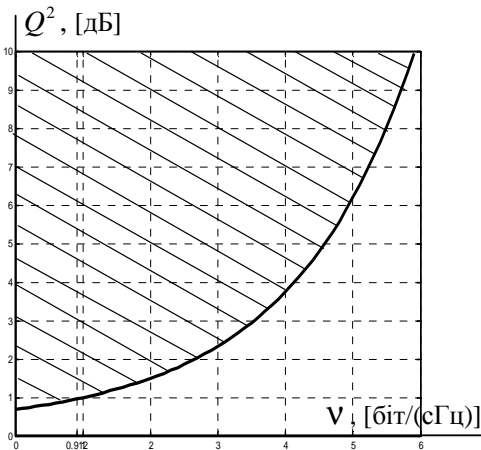


Рис. 1. Межа інформаційної ефективності

Цей вираз встановлює взаємний зв'язок між показниками інформаційної ефективності для каналів зв'язку, в яких повністю реалізується пропускна здатність по Шеннону. Побудована у відповідності з (1) залежність між Q^2 та V представлена на рис. 1. Точки заштрихованої області можуть бути реалізовані, а ті, що знаходяться за її межами, не можуть бути реалізованими. Інформаційна ефективність інформаційно-телекомунікаційних систем оцінюється по наближенню точок, що визначаються її показниками, у заштрихованій області до межі. Найбільш ефективними є системи, в яких точки знаходяться поблизу межі інформаційної ефективності. Ця межа є спільною для всіх систем передавання інформації незалежно від значення $P_{ном}$. Отже, для проведення

оцінки інформаційної ефективності технології побудови системи OFDM-FHSS на основі оптимальних частотно-часових сигнально-кодових конструкцій необхідно при заданому значенні $P_{ном}$ та Q^2 знайти V й порівняти її значення з перспективними відомими технологіями.

3. Виклад основного матеріалу

Аналіз, проведений в роботі [1], показав, що на сьогоднішній день найбільш перспективною для побудови фізичного рівня систем безпроводового доступу є технологія з ортогональною частотною модуляцією – OFDM. Дана технологія дає змогу забезпечити передачу інформації зі швидкістю до 80 Мбіт/с [1]. Застосування OFDM підвищує ефективність боротьби з замираннями, які виникають внаслідок багатопроменевого поширення радіохвиль [4]. Основу цієї технології складає принцип демультимплексування високошвидкісного потоку даних на декілька низькошвидкісних потоків. Потім ці потоки паралельно передаються на декількох піднесучих, що зсунуті одна відносно іншої на величину ортогонального зсуву. Визначена смуга частот поділяється на канали (смуги) шириною Δf_{OFDM} кожен. У

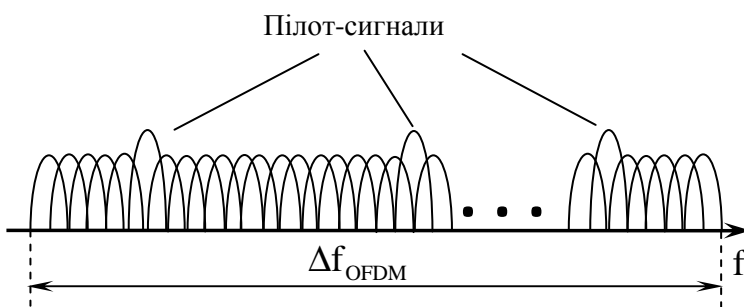


Рис. 2. Структура OFDM сигналу в частотній області

свою чергу, кожен із таких частотних каналів Δf_{OFDM} розбивається на P -ортогональних підканалів, як це видно зі структури OFDM сигналу в частотній області, зображеній на рис. 2. Для передавання даних виділяється U -піднесучих (підканалів), інші $P-U$ (пілот-сигнали) призначені для кодів корекції помилок. Щоб забезпечити необхідні швидкості

передавання інформації, використовуються різні ступені кодування згортаючим кодом та

різні види модуляції піднесучих сигналу. Кожна з U -піднесучих модулюється своїм потоком даних, причому ступінь кодування і вид модуляції залежать від швидкості передавання даних. Пілот-сигнали використовуються з метою підвищення стійкості до фазового шуму й забезпечення когерентного прийому сигналів OFDM і модулюються за допомогою бінарної фазової модуляції (BPSK) у відповідності з двоїчною псевдовипадковою послідовністю. Перетворення кожної групи модульованих P -піднесучих в часову область відбувається завдяки зворотному швидкому перетворенню Фур'є (ШПФ), а з часової в частотну область – прямому ШПФ. При цьому кількість точок ШПФ N вибирають рівною ступеню двійки, що значно спрощує реалізацію такого пристрою і підвищує ефективність його роботи. Виходячи з цього, при $N = 512$ і $\Delta f_{\text{OFDM}} = 5$ МГц смуга частот на одну точку Фур'є $\Delta f_N = \Delta f_{\text{OFDM}} / N = 5 / 512 = 9,766$ кГц. Сформований сигнал переноситься в необхідну смугу частот.

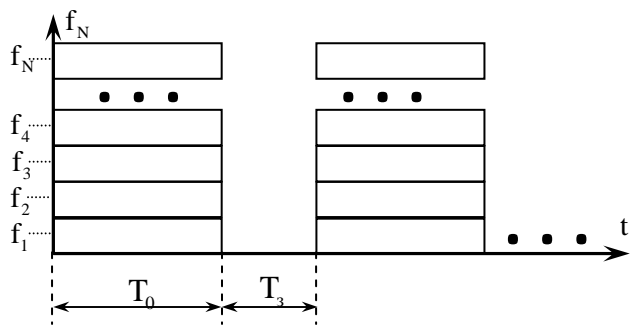


Рис. 3. Структура OFDM сигналу в частотно-часовій області

Принцип передачі із застосуванням OFDM видно із структури OFDM сигналів у частотно-часовій області, яка показана на рис. 3. За час $T_0 = 1 / \Delta f_N = 1 / 9,766 = 102,4$ мкс – тривалість одного символу OFDM (тривалість ШПФ) на одній несучій частоті буде передано $n = \log_2 m$ біт, де m – рівень модуляції. Для забезпечення завадостійкості відносно взаємних завад між субканалами відводиться захисний інтервал $T_3 = T_0 / 9 = 11,3$ мкс. Отже, швидкість пе-

редавання, яка забезпечується на одній частоті, буде визначатися як

$$V_0 = \log_2 m / (T_0 + T_3). \quad (2)$$

Сумарна швидкість передавання, без урахування пілот-сигналів, знаходиться як $V_\Sigma = U \cdot V_0$. Враховуючи (2), отримуємо

$$V_\Sigma = \frac{U \cdot \log_2 m}{T_0 + T_3}. \quad (3)$$

При застосуванні кодування зі швидкістю R швидкість передавання інформації $V'_\Sigma = V_\Sigma \cdot R$ або, з урахуванням (3),

$$V'_\Sigma = \frac{R \cdot U}{T_0 + T_3} \cdot \log_2 m. \quad (4)$$

Враховуючи зазначене, розрахунки максимально допустимих швидкостей передавання інформації при використанні технології OFDM із зазначеними вище параметрами, які можливо забезпечити при повному використанні піднесучих (у тому числі й пілот-сигналів), наведені в табл. 1.

Отже, як видно з виразу (4), швидкість передавання інформації буде меншою за швидкість передавання символів. Різниця між ними визначається ступенем кодування інформації. Таким чином, технологія OFDM забезпечує суттєво більші інформаційні можливості у порівнянні з іншими технологіями. До недоліків таких сигналів можливо віднести необхідність у великих потужностях передавача і це пов'язано з одночасним випромінюванням сигналу на всій смузі каналу, що зменшує радіус дії таких пристроїв. Крім того,

для усунення міжсимвольної інтерференції між символами OFDM необхідний захисний інтервал, що зменшує інформаційні можливості систем безпроводового доступу.

Таблиця 1. Граничні швидкості передавання інформації при використанні технології OFDM

Швидкість передачі даних, Мбіт/с	Вид модуляції	T_0 , мкс	T_3 , мкс	Кількість біт на піднесучу	Кількість біт на один символ OFDM
4,5	BPSK	102,4	11,38	1	512
9	QPSK			2	1024
13,5	8PSK			3	1536
18	16QAM			4	2048
22,5	32QAM			5	2560
27	64-QAM			6	3072

Проведемо порівняння ефективності технології OFDMA з технологією побудови системи OFDM-FHSS на основі оптимальних частотно-часових сигнально-кодових конструкцій [2]. Для цього визначимо максимальні інформаційні можливості систем безпроводового доступу, в яких як несучий базис будуть використовуватися багатопозиційні багаточастотні сигнали.

У роботах [2, 3] розглянута інформаційна технологія побудови безпроводових інформаційно-телекомунікаційних систем, в яких як базис використовуються багатопозиційні багаточастотні сигнали (ББЧС). У цих роботах також показана можливість побудови оптимального ансамблю ББЧС, що складається з певної кількості ортогональних частотно-часових послідовностей (ЧЧП) у вигляді радіоімпульсів, несучі частоти яких змінюються. Можливі значення несучих частот f_1, f_2, \dots, f_M визначаються відношенням

$$f_i = f_0 + \frac{[i - (M+1)/2]}{\tau_0}, \quad (5)$$

де $i \in 1, M$ – номер частоти;

M – кількість частот у наборі ($M+1$ – просте число);

f_0 – центральна несуча частота ББЧС;

τ_0 – тривалість частотно-часового елемента.

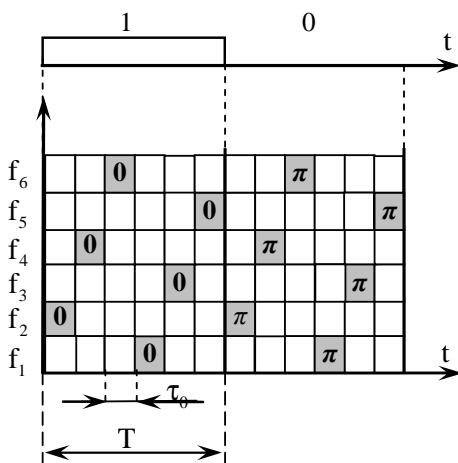


Рис. 4. Принцип передачі повідомлень за допомогою оптимальних ЧЧП

Ортогональність частотно-часових елементів ББЧС забезпечується використанням зсуву частот $\Delta f_p = |f_i - f_{i-1}| = 1/\tau_0$. Для забезпечення найкращих кореляційних властивостей закони стрибкоподібної зміни частот в оптимальних ЧЧП визначаються певним чином. Модель визначення порядку зміни частот детально описана в роботі [3]. У відведеній для радіосистеми смузі частот можуть паралельно працювати M інформаційних стволів (каналів). При цьому ознакою, що відрізняє кожен інформаційний ствол, є вид псевдовипадкової послідовності наборів несучих частот, які у процесі передавання даних періодично повторюються. Одна із таких оптимальних ЧЧП з зако-

ном зміни частот $f_2, f_4, f_6, f_1, f_3, f_5$ при $M = 6$ приведена на рис. 4.

Для передавання дискретних повідомлень у вигляді блоків із n – бітів необхідно здійснити маніпуляцію радіоімпульсів ЧЧП з застосуванням різних методів багатопозиційного кодування по фазі (BPSK, QPSK, 8-QPSK) або по фазі й амплітуді (16-QAM, 32-QAM, 64-QAM).

Багатопозиційні багаточастотні сигнали з зовнішньою маніпуляцією

Розглянемо спочатку випадок, коли всі частотно-часові елементи тривалістю τ_0 , в середині широкосмугового сигналу (ШСС) довжиною T , після модуляції будуть мати однакові амплітуди й однакові приращення фази, як це показано на рис. 1 для випадку застосування BPSK. Таку модуляцію ШСС будемо називати зовнішньою маніпуляцією. Якщо зовнішня маніпуляція характеризується параметром позиційності коду m , то довжина вхідного блоку буде дорівнювати $n = \log_2 m$, а технічна швидкість передавання буде дорівнювати $V = n/T = (\log_2 m)/T$. Якщо для роботи радіосистеми виділена смуга частот Δf_c , то швидкість передавання буде становити

$$V = \frac{\log_2 m}{M \cdot \tau_0} = \frac{\log_2 m \cdot \Delta f_c}{M^2} \tag{6}$$

У формулі (6) передбачається, що ширина спектра ББЧС дорівнює $\Delta f_c = M/\tau_0$, а ширина спектра одного частотно-часового елемента – $\Delta f_0 = 1/\tau_0$ [3].

У випадку, коли у смузі частот Δf_c паралельно і синхронно працює M інформаційних стволів, то граничні інформаційні можливості такої радіосистеми визначаються її сумарною пропускнуою здатністю при відсутності завад, яка дорівнює

$$V_\Sigma = V \cdot M = \frac{\Delta f_c \cdot \log_2 m}{M} \tag{7}$$

Значення максимально-допустимих швидкостей передавання інформації в смузі частот $\Delta f_c = 5$ МГц при використанні ББЧС з зовнішньою маніпуляцією, що розраховані за формулами (6) і (7), приведені в табл. 2.

Таблиця 2. Граничні швидкості передавання інформації при використанні ББЧС із зовнішньою маніпуляцією

M	W	BPSK m = 2		QPSK m = 4		8PSK m = 8		16QAM m = 16		32QAM m = 32		64QAM m = 64		Δf_{0k} Гц
		V, кбіт/ с	V_Σ , кбіт/ с	V, кбіт/ с	V_Σ , кбіт/ с	V, кбіт/ с	V_Σ , кбіт/ с	V, кбіт/ с	V_Σ , кбіт/ с	V, кбіт/ с	V_Σ , кбіт/ с	V, кбіт/ с	V_Σ , кбіт/ с	
4	16	312,5	1250	625	2500	937,5	3750	1250	5000	1562,5	6250	1875	7500	1250
6	36	138,9	833,3	277,8	1666,7	416,7	2500	555,6	3333,3	694,4	4166,7	833,3	5000	833,3
10	100	50	500	100	1000	150	1500	200	2000	250	2500	300	3000	500
12	144	34,7	416,7	69,4	833,3	104,2	1250	138,9	1666,7	173,6	2083,3	208,3	2500	416,7
16	256	19,5	312,5	39	625	58,6	937,5	78,1	1250	97,7	1562,5	117,2	1875	312,5

Всі сигналні конструкції, представлені в табл. 2, характеризуються базою $W = \Delta f_c \cdot T > 1$. Відомо [5], що для шумових завад широкосмугові сигнали з базою $W > 1$ не мають будь-яких переваг у порівнянні з простими сигналами з $W_c = 1$. Переваги склад-

них сигналів проявляються при наявності на радіолінії завад з вузькою смугою, а також системних і цілеспрямованих завад, або при багатопроменовому поширенні радіохвиль і створенні радіосистем з розділенням каналів по формі сигналів. З табл. 2 видно, що зі збільшенням M база сигналу W збільшується, а відповідно й завадостійкість цих радіоліній також буде збільшуватися. Як наслідок, це веде до зменшення граничних швидкостей передавання інформації. При фіксованому значенні виділеної для роботи радіолінії смуги пропускання Δf_c , при збільшенні M , смуга частот одного частотно-часового елемента Δf_0 буде зменшуватися. При цьому, чим меншим буде значення Δf_0 , тим менше кожен елемент піддається впливу частотно-селективних замирань. Нагадаємо, що частотно-селективні замирання в багатопроменовій радіолінії відсутні, коли $\Delta f_0 < \Delta f_{\text{кор.}}$, де $\Delta f_{\text{кор.}}$ – інтервал частотної кореляції багатопроменової радіолінії [5]. З іншого боку, чим більшим буде рознесення частот $\Delta f_p = \Delta f_0$, тим сильніше буде виявлятися статистична відмінність у замираннях різних частотно-часових елементів ББЧС і тим вищою стає еквівалентна кратність рознесення в радіолінії. Для умов, що визначаються інтервалом частотної кореляції $\Delta f_{\text{кор.}}$, завжди можливо визначити оптимальне значення $\Delta f_p = \Delta f_0$, а відповідно кількість частот M в ЧЧП [6]. Гранична кількість різних інформаційних стволів у радіолінії, яка аналізується, дорівнює M .

Багатопозиційні багаточастотні сигнали з незалежною внутрішньою маніпуляцією

Зробимо аналіз способу передавання, який оснований на тому, що кожен елемент ББЧС піддається незалежній внутрішній маніпуляції з використанням m -позиційного коду (*BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAM, 32QAM, 64QAM*). Тоді за час тривалості одного ББЧС $T = M\tau_0$ буде передаватися блок з n -біт. Причому, $2^n = m^M$ або $n = M \log_2 m$. Виходячи з цього, швидкість передавання з розрахунку на один інформаційний ствол буде дорівнювати

$$V = \frac{M \log_2 m}{M\tau_0} = \frac{\Delta f_c \log_2 m}{M}. \quad (8)$$

Отже, врахувавши (8) при паралельній і синхронній роботі M інформаційних стволів, сумарна швидкість передавання інформації буде дорівнювати

$$V_\Sigma = \Delta f_c \log_2 m. \quad (9)$$

Порівнявши формули (7) і (9), видно, що пропускна здатність цієї системи по відношенню до системи з наявністю тільки зовнішньої маніпуляції ББЧС, при умові відсутності завад, збільшується в M разів. При цьому досягається гранична можливість частотної ефективності радіосистеми, що дорівнює

$$v = \frac{V_\Sigma}{\Delta f_c} = \log_2 m. \quad (10)$$

З (10) видно, що при використанні ББЧС з незалежною внутрішньою маніпуляцією кожного частотно-часового елемента повністю відсутня частотна надлишковість ($W = 1$). Сам принцип передавання, в даному варіанті використання ББЧС, відрізняється від звичайного способу передавання дискретних сигналів з використанням багаточастотної модуляції лише тим, що кожен черговий блок $\log_2 m$ бітів передається на новій несучій частоті з наявного набору f_i , де $i \in 1, M$. При цьому забезпечується певний рівень завадостійкості й покращання якості зв'язку в умовах замирань.

Деякі значення граничних швидкостей передавання інформації в інформаційному стволі й системі в цілому, що розраховані за формулами (9) і (10) у смузі частот $\Delta f_c = 5$ МГц для різних M і застосування різних видів внутрішньої маніпуляції кожного частотно-часового елемента, наведені в табл. 3.

З табл. 3 видно, що при використанні незалежної внутрішньої маніпуляції кожного частотно-часового елемента є можливість забезпечити високі швидкості передавання інформації. При цьому в заданій смузі частот сумарна швидкість передавання інформації в такій системі безпроводового доступу не залежить від структури ББЧС (від M), а визначається лише видом внутрішньої маніпуляції частотно-часових елементів. На відміну від V_Σ , швидкість передавання в одному інформаційному стволі залежить від структури ББЧС та виду внутрішньої маніпуляції. Також видно, що чим більшим буде M при умові застосування одного виду внутрішньої маніпуляції, тим меншою буде швидкість передавання інформації в одному інформаційному стволі й тим більшою буде їх кількість.

Таблиця 3. Граничні швидкості передавання інформації при використанні ББЧС із внутрішньою маніпуляцією

M	BPSK (m=2)		QPSK (m=4)		8-PSK (m=8)		16-QAM (m=16)		32-QAM (m=32)		64-QAM (m=64)	
	V, Мбіт/с	V $_\Sigma$, Мбіт/с	V, Мбіт/с	V $_\Sigma$, Мбіт/с	V, Мбіт/с	V $_\Sigma$, Мбіт/с	V, Мбіт/с	V $_\Sigma$, Мбіт/с	V, Мбіт/с	V $_\Sigma$, Мбіт/с	V, Мбіт/с	V $_\Sigma$, Мбіт/с
4	1,25	5	2,5	10	3,75	15	5	20	6,25	25	7,5	30
6	0,833	5	1,667	10	2,5	15	3,3	20	4,167	25	5	30
10	0,5	5	1	10	1,5	15	2	20	2,5	25	3	30
12	0,417	5	0,833	10	1,25	15	1,667	20	2,083	25	2,5	30
16	0,313	5	0,625	10	0,938	15	1,25	20	1,563	25	1,875	30

Для порівняння достовірності передавання інформації при використанні технології OFDM та технології OFDM-FHSS на основі оптимальних частотно-часових сигнально-кодових конструкцій за результатами робіт [6, 7] проведено моделювання в еквівалентних умовах. Результати моделювання показали, що розглянуті технології мають приблизно однакову завадостійкість. Так, для прикладу, при використанні інформаційної технології OFDM-FHSS на основі оптимальних частотно-часових сигнальних конструкцій при відношенні сигнал/шум $Q^2 = 9,5$ дБ, застосуванні внутрішньої маніпуляції 8QPSK, швидкості кодування $R = 1$ розмірністю сигналу $M = 10$ буде забезпечуватися ймовірність помилкового прийому бітів $P_{ном} = 1 \times 10^{-3}$. При цьому, враховуючи розрахунки, наведені в табл. 3, неважко визначити, що частотна ефективність такої системи буде $\nu = 3$ біт/(сГц). При тому ж значенні $Q^2 = 9,5$ дБ технологія OFDM забезпечує бітову помилку $P_{ном} = 1 \times 10^{-3}$ при застосуванні внутрішньої маніпуляції 8QPSK з $R = 1$ та 16QAM з $R = 3/4$, а з урахуванням розрахунків, наведених в табл. 1, її частотна ефективність буде становити $\nu = 2,7$ біт/(сГц). Точки, що відповідають цим показникам інформаційної ефективності на графіку гра-

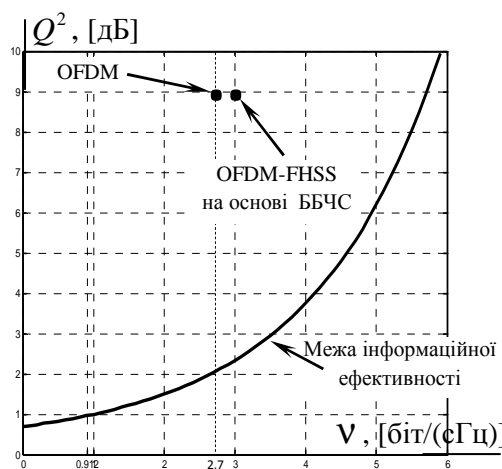


Рис. 5. Порівняння технологій OFDM-FHSS на основі ББЧС з технологією OFDM

фіку гра-

нично-досяжних значень інформаційної ефективності, показано на рис. 5.

4. Висновки

З наведеного порівняння видно, що при використанні інформаційної технології OFDM-FHSS на основі оптимальних частотно-часових сигнально-кодових конструкцій достовірність передачі інформації майже не відрізняється від технології OFDM, але при цьому до ортогональних частотно-часових послідовностей не застосовуються досить складне завадостійке кодування та адаптивне еквалайзерне регулювання амплітудно-частотної характеристики приймального тракту. Це збільшує їх інформаційні можливості й підвищує ефективність використання. Не менш важливою перевагою інформаційної технології, що досліджувалася, є значно простіший процес обробки сигналів. Це дає змогу спростити виготовлення такого обладнання й зменшити його собівартість. Зазначені переваги стосовно завадостійкості сигнально-кодових конструкцій у вигляді оптимальних частотно-часових послідовностей забезпечуються завдяки тому, що інформаційна послідовність бітів передається на різних частотах і на прийомі використовується кореляційна обробка таких послідовностей. Тобто застосування цих сигнальних конструкцій забезпечує передавання з частотним рознесенням. Для розглянутого вище прикладу у смузі частот $\Delta f_c = 5$ МГц забезпечується десятикратне рознесення ($M = 10$). Це забезпечує однакові показники достовірності передачі інформації технології OFDM-FHSS на основі оптимальних частотно-часових сигнально-кодових конструкцій з технологіями, що використовують складне завадостійке кодування.

За результатами проведеного аналізу можна стверджувати про перспективність використання для побудови безпроводових інформаційно-телекомунікаційних систем інформації технології OFDM-FHSS на основі оптимальних частотно-часових сигнально-кодових конструкцій. Ця технологія дає змогу забезпечити сигнально-кодову адаптацію та динамічний розподіл інформаційного ресурсу в системах безпроводового доступу і повністю відповідає вимогам мереж NGN.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Яриловець А.В. Аналіз стану та перспективи розвитку телекомунікаційних мереж / А.В. Яриловець, В.Д. Назарук, С.В. Зайцев // Вісник Черніг. держ. технол. ун-ту. – 2012. – Вип. 2. – С. 60 – 70.
2. Зайцев С.В. Інформаційна технологія побудови системи OFDM-FHSS на основі оптимальних частотно-часових сигнально-кодових конструкцій / С.В. Зайцев, А.В. Яриловець, В.Д. Назарук // Математичні машини і системи. – 2013. – № 1. – С. 83 – 94.
3. Яриловець А.В. Алгоритм побудови оптимальних частотно-часових сигнальних конструкцій / А.В. Яриловець, В.Д. Назарук, С.В. Зайцев С.В. // Математичні машини і системи. – 2012. – № 4. – С. 94 – 102.
4. Гельгор А.Л. Технология LTE мобильной передачи данных: учеб. пособие / А.Л. Гельгор, Е.А. Попов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 204 с.
5. Голдсмит А. Беспроводные коммуникации / Голдсмит А. – Москва: Техносфера, 2011. – 904 с.
6. Яриловець А.В. Модель системи рухомого зв'язку на основі фазо-частотно-часових послідовностей в умовах багатопроменевого поширення радіохвиль / А.В. Яриловець // Спеціальні телекомунікаційні системи та захист інформації: зб. наук. праць. – 2009. – Вип. 1. – С. 25 – 32.
7. Петренко Б.П. Оценка помехоустойчивости OFDM сигналов в системах передачи информации при воздействии дестабилизирующих факторов [Электронный ресурс] / Б.П. Петренко // Электронное научно-техническое издание НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ. – 2012. – № 3. – Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/359356.html>.

Стаття надійшла до редакції 11.12.2013