

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПІДКАНАЛІВ БЕЗПРОВІДНИХ МЕРЕЖ, ПОБУДОВАНИХ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЙ LTE / LTE-ADVANCED, ПРИ ВИКОРИСТАННІ РІЗНИХ ВИДІВ МОДУЛЯЦІЇ СИГНАЛУ

© Горбатий І. В., 2015

Здійснено теоретичні дослідження ймовірності бітової помилки й ефективності підканалів безпроводних мереж, побудованих на основі технологій LTE / LTE-Advanced, з використанням квадратурної фазової маніпуляції (КФМн), М-позиційної квадратурної амплітудної модуляції (М-КАМ) та запропонованої М-позиційної амплітудної модуляції багатьох складових (М-АМБС). Теоретичні дослідження ймовірності бітової помилки виконано з використанням запропонованого співвідношення. За результатами теоретичних досліджень підтверджено адекватність запропонованого співвідношення та можливість його застосування для обчислення ймовірності бітової помилки під час використання в підканалах телекомунікаційних безпроводних мереж, побудованих на основі технологій LTE/LTE-Advanced, різновидів модуляції сигналу КФМн, М-КАМ і М-АМБС. Також досліджено ефективність таких мереж з використанням наведених різновидів модуляції сигналу. За результатами досліджень встановлено, що запропонована модуляція М-АМБС перспективна для застосування у мережах, побудованих на основі технологій LTE/LTE-Advanced, з метою зменшення ймовірності бітової помилки під час передавання даних та підвищення ефективності мережі порівняно з використанням КФМн і М-КАМ.

Ключові слова: технологія LTE, технологія LTE-Advanced, ймовірність бітової помилки, ефективність безпроводної мережі, квадратурна фазова маніпуляція, квадратурна амплітудна модуляція, амплітудна модуляція багатьох складових.

I. V. Gorbatyy

Lviv Polytechnic National University,
Department of theoretical radio engineering and radio measurement

RESEARCHES OF EFFICIENCY OF SUBCHANNELS OF WIRELESS NETWORKS BASED ON LTE / LTE-ADVANCED TECHNOLOGIES IN CASE OF USE OF DIFFERENT KINDS OF SIGNAL MODULATION

© Gorbatyy I. V., 2015

It carried out the theoretical researches of bit error probability and efficiency of subchannels of wireless networks based on LTE / LTE-Advanced technologies in case of use of quadrature phase manipulation (QPSK), M-ary quadrature amplitude modulation (M-QAM) and offer M-ary amplitude modulation of many components (M-AMMC). The theoretical researches of bit error probability executed in case of use of offer correlation. As a result of theoretical researches it exposed the adequacy of offer correlation and possibility of his application for the calculation of bit error probability in case of use the varieties of signal modulation QPSK, M-QAM, and M-AMMC in subchannels of telecommunication wireless networks based on LTE / LTE-Advanced technologies. As a result of researches it sets, that in case of attitude of average energy of one data bit toward the spectral power density of white noise $E_{b_{avr}} / N_0 = 13,4$ dB the bit error probability in subchannels in case of use of 8-AMMC

will more the little in 27 time by comparison to the use of 8-QAM at the identical maximal power and informing of modulated signal.

Also the efficiency of such networks in case of use of lead varieties of signal modulation was explored. As a result of researches it sets, that informative efficiency of subchannels of wireless networks based on LTE / LTE-Advanced technologies in case of use of 8-AMMC with shift the amplitude levels of modulating signals higher from using 8-QAM on 6,1 % and from QPSK – on 20 %, that is why offered AMMC expediently to use in the modern wireless networks in case of data transmission for the rise of their efficiency.

So as a result of researches it sets, that an offer modulation M-AMMC is perspective for application in networks based on LTE / LTE-Advanced technologies with the purpose of reduction of bit error probability in case of data transmission and rise of network efficiency by comparison to the use of QPSK and M-QAM.

Key words: LTE technology, LTE-Advanced technology, bit error probability, network efficiency, quadrature phase manipulation (QPSK), M-ary quadrature amplitude modulation (M-QAM), M-ary amplitude modulation of many components (M-AMMC).

Вступ

У рекомендаціях [1] Міжнародного союзу електрозв'язку (МСЕ, International Telecommunications Union – ITU) визначено технології наземних радіоінтерфейсів перспективних систем Міжнародного мобільного зв'язку IMT-Advanced. На відміну від попередньої версії Міжнародного мобільного зв'язку IMT-2000, системи IMT-Advanced мають нові можливості, зокрема забезпечують мобільні послуги в мережах мобільного та фіксованого зв'язку з комутацією пакетів, забезпечують можливість застосування додатків із рівнем мобільності від низького до високого з великим діапазоном підтримуваних швидкостей передавання даних відповідно до потреб користувачів і служб у середовищах з великою кількістю користувачів, забезпечують можливість застосування мультимедійних додатків з високою якістю в широкому спектрі послуг і платформ з істотним поліпшенням показників якості роботи та якості наданих послуг, забезпечують підвищені пікові рівні швидкості передавання даних для забезпечення вдосконалених послуг і додатків (до 100 Мбіт/с для застосувань з високою рухливістю і 1 Гбіт/с для застосувань з низькою рухливістю). Рекомендаціями [1] МСЕ визначено, що для наземного сегмента перспективних систем IMT-Advanced доцільно застосовувати такі технології радіоінтерфейсів: LTE-Advanced і Wireless MAN-Advanced.

Попередницею технології LTE-Advanced є технологія LTE (Long Term Evolution), що належить до сім'ї технологій 3GPP [2]. Її почали впроваджувати в 2009 р. Технологія LTE передбачає можливість передавання даних зі швидкістю до 300 Мбіт/с, якщо затримка в безпроводній мережі не перевищує 5 мс. Із застосуванням цієї технології досягнуто суттєвого підвищення частотної ефективності мережі, а також розроблена нова архітектура безпроводної мережі, котра дає змогу значно спростити її структуру. Технологія LTE підтримує частотний дуплекс (FDD) і часовий дуплекс (TDD), а також орієнтована як на взаємодію з простішими мережами 3GPP, так і на взаємодію зі складнішими мережами 3GPP2.

Наступним кроком до підвищення швидкості передавання даних із забезпеченням високої якості послуг у безпроводних мережах є технологія LTE-Advanced, що визнана безпроводним стандартом 4G. Ця технологія підтримує IP-адресацію й забезпечує можливість перемикання між мережами 4G, 3G і Wi-Fi. У радіоінтерфейсах, виконаних на основі технології LTE-Advanced, забезпечується смуга робочих частот до 100 МГц, що дозволяє здійснювати передавання даних зі швидкістю до 3 Гбіт/с у низхідному потоці та 1,5 Гбіт/с у висхідному потоці. У разі передавання даних у низхідному потоці здійснюють ортогональне частотне мультиплексування (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing), щоб забезпечити високий ступінь стійкості зі спрощенням реалізації приймачів навіть за дуже широких смуг пропускання. У висхідному потоці формують сигнал із використанням OFDM з розширенням спектра дискретним перетворенням Фур'є (DFTS-OFDM), що зумовлено низьким відношенням пікової потужності до середньої потужності переданого сигналу порівняно зі звичайним методом OFDM. Це дає змогу ефективніше використовувати підсилювач потужності терміналу, що забезпечує збільшення зони покриття або зниження споживаної потужності терміналом. У радіоканалі для формування висхідного та

низхідного потоків застосовують каналне коректувальне кодування для боротьби з помилками декодування на приймальній стороні. Застосовують різновиди модуляції КФМн, 16-КАМ і 64-КАМ. Вибрані кодова швидкість каналного коректувального кодування й різновид модуляції залежать від розміру пакета даних і виділеного ресурсу. Схеми передавання з декількома антенами (МІМО) є невід’ємною частиною обох технологій радіоінтерфейсу.

На підставі сказаного вище можна зробити висновок, що на швидкість та якість передавання даних через радіоінтерфейс системи ІМТ-Advanced впливають вибрані різновиди модуляції сигналу та коректувального кодування. Важливим показником якості є ймовірність бітової помилки під час передавання даних. Актуальною задачею залишається пошук таких різновидів каналного кодування та модуляції сигналу, застосування яких забезпечить мінімальну ймовірність бітової помилки за максимальної досягнутої швидкості передавання та наявності завад у радіоканалі, що свідчитиме про досягнуту високу технічну ефективність телекомунікаційної системи чи мережі.

Досліджено завадозахищеність та якість телекомунікаційних систем та мереж у разі застосування відомих різновидів модуляції сигналу й коректувального кодування у значній кількості публікацій. У працях [3–6] детально розглянуті сучасні відомі різновиди модуляції сигналу, зокрема різновиди фазової та амплітудно-фазової модуляції, досліджені їх характеристики, а також проаналізовані відомі широкоживані методи коректувального кодування.

У зв’язку з необхідністю подальшого поліпшення якості мереж доцільно застосовувати нові запропоновані різновиди модуляції сигналу [7] та коректувального кодування [8]. Актуальною задачею, розв’язання якої потребує додаткових наукових досліджень, є порівняння властивостей нових та відомих різновидів модуляції сигналу й коректувального кодування з метою виявлення таких, що забезпечать найвищу якість телекомунікаційних систем та мереж в умовах завад.

Метою цієї роботи є теоретичні дослідження ймовірності помилки та ефективності підканалів безпроводних мереж, побудованих на основі технологій LTE / LTE-Advanced, з використанням КФМн, М-КАМ та нової запропонованої М-АМБС під час передавання даних в умовах завад.

Сучасні різновиди модуляції сигналу в безпроводних мережах передавання даних

У сучасних безпроводних мережах передавання даних, побудованих на основі технологій LTE / LTE-Advanced, використовують різновиди фазової та амплітудно-фазової маніпуляції. Розглянемо характеристики модуляції, що впливають на якість та ефективність безпроводних мереж. До найживаніших модуляцій належить КФМн, для якої кількість комбінацій модульовальних інформаційних сигналів, за яких одержують неповторювані КФМн-сигнали (а значить і кількість символів), дорівнює $M = 4$. При цьому за час передавання одного інформаційного символу може бути передано $\log_2 4 = 2$ біти інформації. КФМн-сигнал (В) представляють у вигляді суми двох ортогональних складових – косинусоїдальної (синфазної) та синусоїдальної (квадратурної):

$$u_{\text{КФМн}}(t) = U_0 a_I u_{mI}(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + U_0 a_Q u_{mQ}(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0 - (\pi/2)), \quad (1)$$

де a_I, a_Q – коефіцієнти пропорційності (В⁻²) для синфазного I та квадратурного Q каналів; $u_{mI}(t), u_{mQ}(t)$ – модульовальні сигнали (В) на синфазному I та квадратурному Q входах модулятора; U_0, ω_0 і φ_0 – амплітуда (В), кутова частота (рад/с) й початкова фаза (рад) носійного коливання.

Сигнальне сузір’я КФМн-сигналу представлено на рис. 1, а (d – мінімальна відстань між сигнальними точками). Якщо необхідно передавати більше інформації протягом одного інформаційного такту, тоді застосовують амплітудно-фазомодульовані сигнали, зокрема М-КАМ [4, 9]. М-КАМ-сигнал (В) подають у вигляді суми двох ортогональних складових – синфазної та квадратурної (1), але, на відміну від КФМн, модульовальні сигнали $u_{mI}(t), u_{mQ}(t)$ є не дворівневими, а багаторівневими.

Кількість комбінацій модульовальних інформаційних сигналів, за яких отримують неповторювані М-КАМ-сигнали (а значить і кількість можливих символів), становить:

$$M = (M_U)^2, \quad (2)$$

де M_U – кількість можливих рівнів амплітуди модульовальних сигналів.

При цьому протягом тривалості одного інформаційного символу може бути передано $\log_2 M$ біт інформації. Сигнальні сузір'я деяких КАМ-сигналів зображені на рис. 1, б – г.

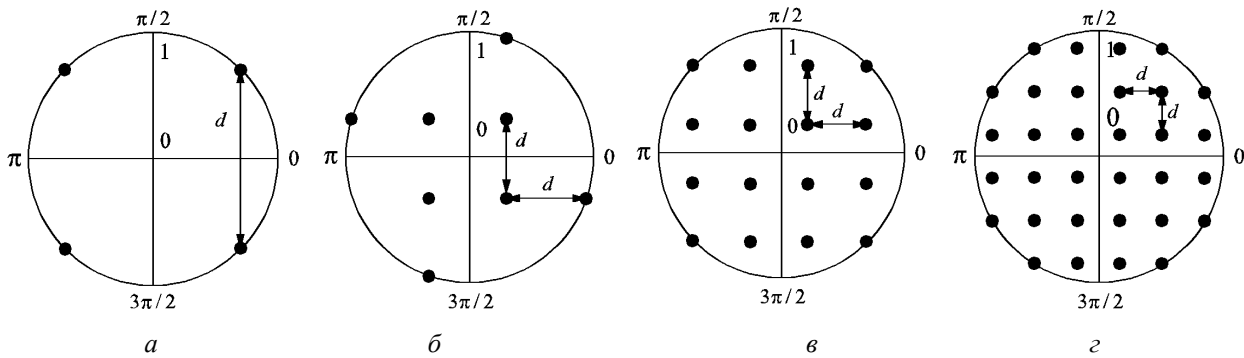


Рис. 1. Сигнальні сузір'я: а – КФМн; б – 8-КАМ; в – 16-КАМ; г – 32-КАМ

Для підвищення якості й ефективності безпроводних мереж передавання даних запропоновано використовувати нову сім'ю модуляцій на основі АМБС (amplitude modulation of many components – АММС). АМБС-сигнал формують у вигляді суми N модульованих за амплітудою гармонічних складових, що відрізняються початковими фазами φ_n [7, 9, 10]:

$$u_{AMBC}(t) = \sum_{n=1}^N U_0 a_n u_{m_n}(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi_n), \quad (3)$$

де a_n – коефіцієнти пропорційності для n -х каналів модулятора, що є параметрами модулятора; $u_{m_n}(t)$ – модульовальні сигнали на n -х входах модулятора.

До такої сім'ї модуляцій, крім традиційної АМБС, належить запропонована амплітудна маніпуляція багатьох складових (АМнБС, amplitude shift keying of many components – АСКМС), під час здійснення якої модульовальні сигнали є дискретними. Іншим різновидом запропонованої сім'ї модуляцій є М-АМБС зі зсувом модульовальних сигналів один відносно одного в часі (M-ary offset amplitude modulation of many components – М-ОАММС).

Із практичного погляду заслуговує на увагу АМБС-сигнал, що формують у вигляді суми складових, зсунутих між собою на фазові кути

$$\Delta\varphi = \pi / N. \quad (4)$$

Загальна кількість символів, що можна отримати з використанням усіх можливих комбінацій модульовальних інформаційних сигналів за довільних початкових фаз складових АМБС-сигналу,

$$M_{tot} = (M_U)^N. \quad (5)$$

Кількість комбінацій модульовальних інформаційних сигналів, за яких отримують неповторювані АМБС-сигнали (а значить, і ефективну кількість символів), при $N = 3$, початкових фазах складових, що задовольняють (4), дорівнює

$$M_{eff} = 3M_U (M_U - 1) + 1, \quad (6)$$

а кількість переданої інформації протягом тривалості одного символу становить $\log_2 M_{eff}$ біт.

Для здійснення АМБС необхідно застосувати модулятор та демодулятор АМБС, що детально розглянуто в [9, 10]. Особливістю запропонованих модуляторів і демодуляторів АМБС є можливість формувати й обробляти АМБС-сигнали з найрізноманітнішими сигнальними сузір'ями. При цьому сигнальне сузір'я АМБС-сигналу із N складовими вписується в $2N$ -кутник. Із практичного погляду цікаві сузір'я із трьома та шістьма складовими. Зокрема, сигнальні сузір'я

АМБС-сигналів із $N = 3$ складовими й трьома можливими рівнями амплітуди модулювальних сигналів зі зсувом з використанням 8 точок (8-АМБС-зі зсувом), 16 точок (16-АМБС-зі зсувом), а також чотирма можливими рівнями амплітуди модулювальних сигналів у разі використання 32 точок (32-АМБС-зі зсувом) зображені на рис. 2.

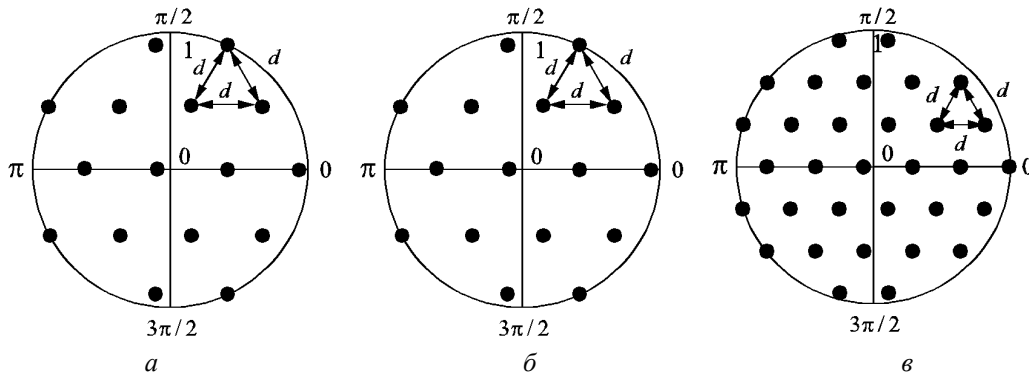


Рис. 2. Сигнальні сузір'я: а – 8-АМБС зі зсувом; б – 16-АМБС зі зсувом; в – 32-АМБС зі зсувом

Дослідження ймовірності бітової помилки та ефективності підканалів у безпроводних мережах за використання різних видів модуляції сигналу

Для комплексного оцінювання переваг М-АМБС необхідно провести дослідження ймовірності бітової помилки залежно від застосованого різновиду модуляції та порівняти ці параметри для різних видів модуляції сигналу КФМн (частотна ефективність 2 біт/с/Гц), 8-КАМ (3 біт/с/Гц), 16-КАМ (4 біт/с/Гц) і 32-КАМ (5 біт/с/Гц) з 8-АМБС зі зсувом (3 біт/с/Гц), 16-АМБС зі зсувом (4 біт/с/Гц) і 32-АМБС зі зсувом (5 біт/с/Гц) з однаковою кількістю сигнальних точок. Обчислення ймовірності бітової помилки у разі використання АМБС-сигналів здійснено згідно із запропонованою формулою [11]:

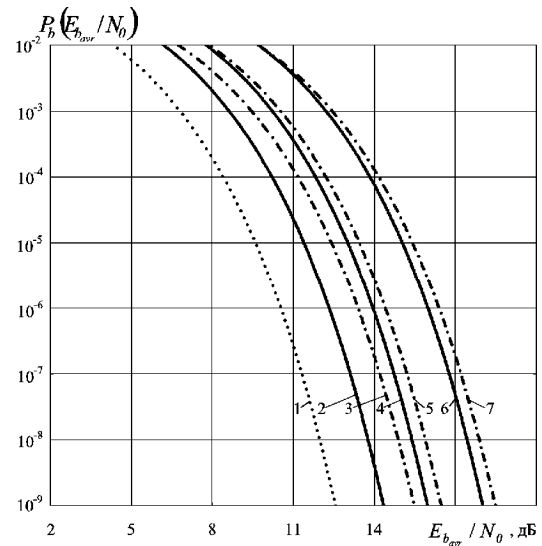
$$P_{b_{\text{АМБС}}} \cong \frac{n_m}{\log_2(M_{\text{eff}})} \cdot Q_1 \left(\sqrt{K_E \cdot \log_2(M_{\text{eff}}) \cdot \frac{E_{b_{\text{avr}}}}{2N_0}} \right), \quad (7)$$

де n_m – коефіцієнт, що дорівнює середній кількості сусідніх точок, котрі розміщені навколо однієї з точок сигнального сузір'я; K_E – коефіцієнт, що дорівнює відношенню мінімально можливої енергії різниці двох символів, котрі відповідають сусіднім точкам сигнального сузір'я, до середньої енергії всіх символів, котрі відповідають неповторюваним точкам сигнального сузір'я; $E_{b_{\text{avr}}}$ – середня енергія одного біта інформації; N_0 – спектральна густина потужності білого шуму.

Установлено, що формула (7) придатна у разі застосування КФМн, КАМ та АМБС для обчислення ймовірності бітової помилки, що не перевищує 0,1.

Математичне моделювання безпроводної мережі здійснене за допомогою персональної електронно-обчислювальної машини й розробленої програми в середовищі MathCAD [12]. Отримані залежності ймовірності бітової помилки P_b від відношення $E_{b_{\text{avr}}} / N_0$ в підканалі безпроводної мережі передавання даних в умовах дії білого шуму із застосуванням досліджених різновидів модуляції сигналу наведені на рис. 3. Як видно з рис. 3, для досягнення ймовірності бітової помилки $P_b = 1 \cdot 10^{-6}$ в безпроводній мережі за різних видів модуляції сигналу необхідно забезпечити, щоб відношення $E_{b_{\text{avr}}} / N_0$ були такі: для КФМн – 10,5 дБ; для 8-АМБС зі зсувом – 12,3 дБ; для 8-КАМ – 13,4 дБ; для 16-АМБС зі зсувом – 13,9 дБ; для 16-КАМ – 14,4 дБ; для 32-АМБС зі зсувом – 16,0 дБ; і для 32-КАМ – 16,4 дБ. Отже, ймовірність бітової помилки для КФМн найменша порівняно з іншими наведеними модуляціями сигналу. За однакової кількості символів ймовірність бітової помилки у разі застосування досліджених різновидів М-АМБС менша порівняно з М-КАМ, зокрема для відношення $E_{b_{\text{avr}}} / N_0 = 13,4$ дБ ймовірність бітової помилки в підканалі з використанням 8-АМБС зі зсувом менша у 27 раз порівняно з 8-КАМ.

Рис. 3. Залежність імовірності бітової помилки P_b від відношення $E_{b_{avr}} / N_0$ в безпроводній мережі для різних видів модуляції сигналу: 1 – КФМн, 2 – 8-АМБС зі зсувом, 3 – 8-КАМ, 4 – 16-АМБС зі зсувом, 5 – 16-КАМ, 6 – 32-АМБС зі зсувом, 7 – 32-КАМ



Установлено, що оцінка якості підканалів мережі з погляду забезпечення мінімальної ймовірності помилки за заданої швидкості передавання даних або максимальної швидкості передавання даних за заданої максимально допустимої імовірності помилки не є достатнім критерієм для порівняння декількох різних мереж. Універсальним критерієм оцінки підканалів мережі є інформаційна ефективність, що дає змогу порівняти їх за швидкістю передавання даних за заданих необхідної смуги пропускання ΔF_{sn} , відношення $E_{b_{avr}} / N_0$ і ймовірності помилки. Тому саме інформаційна ефективність вибрана для подальшого порівняння якості підканалів мережі із застосуванням розглянутих вище модуляцій сигналу. Інформаційна ефективність підканалу мережі

$$\eta = \gamma / \log_2((\gamma/\beta) + 1), \quad (8)$$

де γ – частотна ефективність підканалу мережі, залежна від швидкості v_b передавання даних у підканалі та смуги пропускання підканалу ΔF_{sn} ; β – енергетична ефективність підканалу мережі, залежна від відношення $E_{b_{avr}} / N_0$.

Результати дослідження енергетичної, частотної та інформаційної ефективності підканалів безпроводних мереж, побудованих на основі технологій LTE / LTE-Advanced, з використанням досліджених різновидів модуляції наведено на рис. 4.

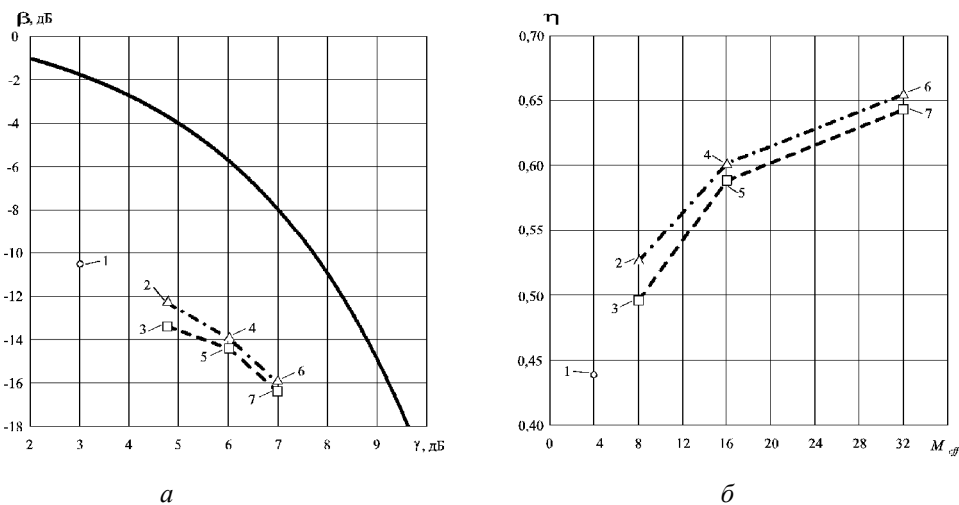


Рис. 4. Залежності частотної (а) та інформаційної (б) ефективності підканалів безпроводних мереж за використання досліджених різновидів модуляції сигналу: 1 – КФМн, 2 – 8-АМБС зі зсувом, 3 – 8-КАМ, 4 – 16-АМБС зі зсувом, 5 – 16-КАМ, 6 – 32-АМБС зі зсувом, 7 – 32-КАМ

За результатами досліджень встановлено, що ефективність підканалів безпроводних мереж, побудованих на основі технологій LTE / LTE-Advanced із використанням АМБС, вища порівняно із застосуванням інших розглянутих різновидів модуляції, зокрема інформаційна ефективність 8-АМБС зі зсувом більша на 20 % порівняно з КФМн і на 6,1 % порівняно з 8-КАМ, інформаційна ефективність 16-АМБС зі зсувом більша на 37 % порівняно із КФМн і на 2,3 % порівняно з 16-КАМ, а інформаційна ефективність 32-АМБС зі зсувом більша на 49 % порівняно з КФМн і на 1,8 % порівняно з 32-КАМ, тому запропоновану АМБС доцільно використовувати в сучасних безпроводних мережах під час передавання даних для підвищення їх ефективності.

Висновки

Проведено теоретичні дослідження ймовірності бітової помилки та ефективності одного підканалу безпроводних мереж, побудованих на основі технологій LTE / LTE-Advanced, що використовують фазову чи амплітудно-фазову модуляцію. За результатами досліджень різних сучасних відомих та запропонованих нових різновидів модуляції сигналу підтверджено, що запропонована АМБС перспективна для застосування в безпроводних мережах для підвищення достовірності (а саме зменшення ймовірності бітової помилки) під час передавання даних.

Зокрема, за відношення $E_{b,avr} / N_0$ 13,4 дБ ймовірність бітової помилки в підканалі у разі використання 8-АМБС зі зсувом менша у 27 раз порівняно з використанням 8-КАМ за однакових максимальної потужності та інформативності модульованого сигналу. Ймовірність бітової помилки в підканалі із застосуванням 8-АМБС зі зсувом, 16-АМБС зі зсувом та 32-АМБС зі зсувом менша в усьому діапазоні значень відношення $E_{b,avr} / N_0$ порівняно з 8-КАМ, 16-КАМ та 32-КАМ відповідно.

Також за результатами досліджень встановлено, що інформаційна ефективність підканалу безпроводних мереж, побудованих на основі технологій LTE / LTE-Advanced, у разі використання 8-АМБС зі зсувом вища від 8-КАМ на 6,1 % і від КФМн – на 20 %, тому запропоновану АМБС доцільно використовувати для удосконалення сучасних безпроводних мереж на основі технологій LTE / LTE-Advanced та інших сучасних технологій (наприклад, WiMax) для підвищення їх ефективності та достовірності під час передавання даних.

1. Рекомендация МСЭ-R М.2012. Подробные спецификации наземных радиоинтерфейсов перспективной Международной подвижной электросвязи (IMT-Advanced). – Женева : МСЭ, 2012. – 107 с. 2. Technical Specification ETSI TS 126 131. Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Terminal acoustic characteristics for telephony; Requirements (3GPP TS 26.131 version 10.2.0 Release 10). – Sophia Antipolis Cedex – France : ETSI, 2011. – 36 p. 3. Marvin K. Simon, Bandwidth-Efficient Digital Modulation with Application to Deep-Space Communications, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 2001. – 228 p. 4. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение : [пер. с англ.] / Б. Скляр. – 2-е изд., испр. – М. : Издательский дом “Вильямс”, 2004. – 1104 с. : ил. 5. Прокуис Д. Цифровая связь: пер. с англ. / под. ред. Д. Д. Кловского. – М.: Радио и связь. 2000. – 800 с.: ил. 6. Теория передачи сигналов: учебник для вузов / А. Г. Зюко, Д. Д. Кловский, М. В. Назаров, Л. М. Финк. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.: ил. 7. Горбатий І. В. Амплітудна модуляція багатьох складових / І. В. Горбатий // Зб. наук. пр. (Ін-т проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України). – Київ, 2009. – Вип. 50. – С. 186–190. 8. Банкет В. Л. Сигнально-кодовые конструкции в телекоммуникационных системах / В. Л. Банкет. – Одесса: Фенікс, 2009. – 180 с. 9. Горбатий І. В. Системи дистанційного зондування Землі з космосу : монографія / І. В. Горбатий. – Львів : СПОЛОМ, 2011. – 612 с. 10. Горбатий І. В. Метод та пристрій для здійснення амплітудної модуляції багатьох складових / І. В. Горбатий // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – Львів, 2009. – № 646 : Електроніка. – С. 185–190. 11. Горбатий І. В. Дослідження інформаційної ефективності амплітудної модуляції багатьох складових / І. В. Горбатий // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – Львів, 2010. – № 681 : Електроніка. – С. 191–196. 12. Горбатий І. В. Дослідження й оптимізація модуляції сигналу засобами математичного моделювання / І. В. Горбатий, М. М. Климаш // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – Львів, 2010. – № 680 : Радіоелектроніка і телекомунікації. – С. 217–224.