УДК 621.39

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РАДІОКАНАЛІВ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ Wi-Fi

І.В. ГОРБАТИЙ
Національний університет
“Львівська політехніка”

Abstract *– The technical efficiency is one of the most important characteristics of telecommunication systems and networks. The technical efficiency of such systems and networks depends on the apply methods of forming and processing of signals: the modulation methods, the correcting coding methods, the channels multiplexing methods and the methods of data transmission with automatic repeat request. The aim of this work is a research of technical efficiency of radio channels of telecommunication networks based on Wi-Fi technology. The signal efficiency as an offer complex characteristic for evaluation of the technical efficiency of telecommunication systems and networks was considered. The signal efficiency enables to estimate the influencing of each apply methods for forming and processing of signals on the technical efficiency of system or network. Dependence of the energy efficiency, the frequency efficiency, the informative efficiency and the signal efficiency of radio channel of telecommunication network based on Wi-Fi technology (IEEE 802.11n standard) from the applying signal-code construction was explored. How evidently from the research results, in Wi-Fi technology apply the signal-code constructions with the greater frequency efficiency for the data transmission rate increasing, however thus the energy efficiency diminishes. The informative efficiency in case of use of different signal-code constructions differs within the limits of 38%. The signal efficiency of researched radio channel in all cases is more the little from the informative efficiency of the applying signal-code construction, that it is related to influencing the method of data transmission.*

Анотація *– Розглянуто запропоновану комплексну характеристику для оцінювання технічної ефективності телекомунікаційних систем та мереж – сигнальну ефективність. Показано можливість оцінювання впливу кожного із застосованих методів формування й оброблення сигналів на технічну ефективність системи або мережі на прикладі радіоканалу телекомунікаційної мережі на основі технології Wi-Fi. Досліджено залежність енергетичної, частотної, інформаційної та сигнальної ефективності радіоканалу телекомунікаційної мережі на основі технології Wi-Fi (стандарт IEEE 802.11n) від застосованої сигнально-кодової конструкції.*

Аннотация *– Рассмотрено предложенную комплексную характеристику для оценивания технической эффективности телекоммуникационных систем и сетей – сигнальную эффективность. Показано возможность оценки влияния каждого из примененных методов формирования и обработки сигналов на техническую эффективность системы или сети на примере радиоканала телекоммуникационной сети на основе технологии Wi-Fi. Исследовано зависимость энергетической, частотной, информационной и сигнальной эффективности радиоканала телекоммуникационной сети на основе технологии Wi-Fi (стандарт IEEE 802.11n) от примененной сигнально-кодовой конструкции.*

Вступ

Як відомо [1, 2], однією із найбільш важливих характеристик телекомунікаційних систем та мереж є ефективність – їх властивість виконувати поставлену задачу в заданих умовах використання з необхідною якістю.

Ефективність є узагальненим показником оптимального функціонування телекомунікаційної системи чи мережі та залежить від характеристик якості. До локаль-

них показників ефективності належать: прагматична (ступінь задоволення системою чи мережею свого призначення), технічна (технічна досконаліть), технологічна (простота й технологічність розроблення та створення), експлуатаційна (зручність використання й обслуговування) та економічна (доцільність здійснених затрат для створення й функціонування системи чи мережі) ефективність.

Одним із найважливіших локальних показників ефективності є технічна ефективність. Згідно з [2], технічна ефективність телекомунікаційних систем та мереж залежить від застосованих методів формування й оброблення сигналів: методів модуляції, коригуючого або решіткового кодування, демодуляції, коригуючого або решіткового декодування, ущільнення/розділення каналів, методів передавання даних із керуючим зворотним зв'язком [2–4].

Дослідженню ефективності телекомунікаційних систем та мереж присвячено значну кількість публікацій [5–12]. Проте актуальною задачею залишається дослідження технічної ефективності таких систем та мереж, побудованих на основі сучасних технологій передачі даних. Цікавим напрямком є дослідження ефективності телекомунікаційних мереж на основі широко вживаної технології Wi-Fi. Метою цієї роботи є дослідження технічної ефективності радіоканалів телекомунікаційних мереж на основі технології Wi-Fi.

I. Характеристики технічної ефективності систем та мереж передавання даних, побудованих із використанням різноманітних методів формування й оброблення сигналів

Розглянемо детальніше один із найважливіших локальних показників ефективності – технічну ефективність [1, 10]. Для оцінювання технічної ефективності цифрової телекомунікаційної системи чи мережі традиційно застосовують поняття енергетичної ефективності β, частотної ефективності γ та інформаційної ефективності η [3]:

$$\beta = v_б / \rho_0 = N_0 / E_б, \quad (1)$$

де $v_б$ – швидкість передавання даних у телекомунікаційному каналі, системі чи мережі; ρ_0 – відношення потужності сигналу P_c до спектральної густини потужності N_0 білого шуму в каналі, системі чи мережі; $E_б$ – енергія одного біта інформації;

$$\gamma = v_б / \Delta F_c, \quad (2)$$

де ΔF_c – ширина спектра сигналу (припускають, що вона рівна смузі пропускання каналу, системи чи мережі $\Delta F_к$);

$$\eta = v_б / C_к, \quad (3)$$

де $C_к$ – пропускна здатність каналу, системи чи мережі.

Енергетичну ефективність β та частотну ефективність γ часто представляють в дБ.

Серед перерахованих коефіцієнтів найбільш важливим є інформаційна ефективність, що може приймати значення в межах від 0 до 1 і пов'язана з двома іншими коефіцієнтами так:

$$\eta = \frac{\gamma}{\log_2\left(\frac{\gamma}{\beta}+1\right)}. \qquad (4)$$

Традиційно ці показники застосовують для оцінювання телекомунікаційної системи чи мережі при застосуванні певного обраного методу модуляції сигналу. Якщо разом з модуляцією сигналу використовують кодування сигналу (тобто застосовують сигнально-кодову конструкцію), доцільно користуватись поняттями енергетичної ефективності модуляції $\beta_{мод}$, енергетичної ефективності кодування $\beta_{êîä}$, частотної ефективності модуляції $\gamma_{мод}$ та частотної ефективності кодування $\gamma_{код}$. У такому випадку енергетична $\beta_{СКК}$, частотна $\gamma_{СКК}$ та інформаційна $\eta_{СКК}$ ефективність сигнально-кодової конструкції відповідно дорівнюють:

$$\beta_{СКК} = \beta_{мод}\beta_{код}, \qquad (5)$$

$$\gamma_{СКК} = \gamma_{мод}\gamma_{код}, \qquad (6)$$

$$\eta_{СКК} = \frac{\gamma_{СКК}}{\log_2\left(\frac{\gamma_{СКК}}{\beta_{СКК}}+1\right)}. \qquad (7)$$

Для оцінювання ефективності системи чи мережі, в якій застосовують методи розділення/ущільнення каналів, користуються інформаційною ефективністю методу розділення каналів η_p:

$$\eta_p = \frac{1}{C_{c1}}\sum_{i=1}^{N_к} C_{к_i}, \qquad (8)$$

де C_{c1} – загальна пропускна здатність одноканальної телекомунікаційної системи з таким самим відношенням потужності сигналу до потужності шуму та смугою пропускання, що й у багатоканальної; $N_к$ – кількість каналів у багатоканальній телекомунікаційній системі; $C_{к_i}$ – пропускна здатність i-го каналу.

У ряді телекомунікаційних систем та мереж застосовують методи передавання даних (зокрема методи передавання даних з керуючим зворотним зв'язком), що дають змогу змінювати застосований вид модуляції, коригуючого кодування, повторно передавати пошкоджені в каналі зв'язку дані, передавати певні службові сигнали тощо, що впливає на загальну технічну ефективність. Ефективність методу передавання даних $\eta_{МП}$ у системі чи мережі визначають так:

$$\eta_{МП} = T_д / T_{інф}, \qquad (9)$$

де $T_д$ – час передавання даних; $T_{інф}$ – загальний час передавання певного обсягу інформації.

Час передавання даних залежить від часу поширення сигналів у системі чи мережі, а загальний час передавання певного обсягу інформації залежить від методу передавання та враховує час передавання даних та службової інформації.

II. Комплексна характеристика технічної ефективності систем та мереж передавання даних, побудованих із використанням різноманітних методів формування й оброблення сигналів

Технічна ефективність телекомунікаційних систем та мереж залежить від застосованих методів формування й оброблення сигналів: методів модуляції, коригуючого або решіткового кодування, демодуляції, коригуючого або решіткового декодування, ущільнення/розділення каналів, методів передавання даних із керуючим зворотним зв'язком. Проте, як видно із проведених досліджень, немає єдиної комплексної характеристики технічної ефективності, що враховує вплив усіх згаданих методів [13].

Важливість вироблення комплексної характеристики для оцінювання технічної ефективності телекомунікаційних систем та мереж, побудованих із використанням різноманітних методів формування й оброблення сигналів, полягає в наступному. Окремі відомі характеристики (1)–(9) дозволяють оцінити вплив окремих використаних методів на ефективність системи або мережі, але не можуть показати, який із методів найбільш істотно впливає на ефективність системи або мережі в цілому. Окремі характеристики ефективності доцільно застосовувати для вибору необхідного методу модуляції, кодування, ущільнення/розділення каналів і протоколу передачі даних при початковому проектуванні системи або мережі, яка буде працювати в стаціонарному режимі. Але при розробленні системи або мережі, що працює в нестаціонарному режимі, потрібно враховувати вплив застосування різних методів на її ефективність протягом сеансу зв'язку. Окрім цього, у ряді випадків виникає необхідність порівняти ефективність різних систем чи мереж, що з використанням декількох окремих характеристик вельми проблематично.

Тому для вирішення перерахованих вище задач існує потреба в удосконаленні теоретичних основ визначення технічної ефективності телекомунікаційних систем та мереж, побудованих із використанням різноманітних методів формування й оброблення сигналів, для вироблення комплексної характеристики. Така характеристика повинна враховувати вплив застосованих у системі чи мережі методів модуляції, коригуючого або решіткового кодування, демодуляції, коригуючого або решіткового декодування, ущільнення/розділення каналів, методів передавання даних із керуючим зворотним зв'язком.

Для комплексного оцінювання технічної ефективності телекомунікаційних систем та мереж передавання даних, побудованих із використанням різноманітних методів формування й оброблення сигналів, доцільно застосовувати запропоновану автором характеристику – коефіцієнт використання телекомунікаційної системи (мережі

чи каналу електрозв'язку) за застосованими методами формування й оброблення сигналів (сигнальну ефективність) η_c, що враховує інформаційну ефективність $\eta_{СКК}$ застосованих при формуванні сигнально-кодової конструкції методів модуляції та кодування, інформаційну ефективність методу розділення каналів η_p, ефективність методу передавання даних $\eta_{МП}$ і дорівнює [13]:

$$\eta_c = \eta_{СКК}\eta_p\eta_{МП}. \tag{10}$$

У випадку передавання даних через багатоканальну телекомунікаційну систему чи мережу, що характеризується змінною в часі пропускною здатністю $C_c(t)$ протягом тривалості $t_{зв}$ сеансу зв'язку (загального часу $T_{інф}$ передавання певного обсягу інформації), використовують декілька сигнально-кодових конструкцій, що забезпечують зміну швидкості $v_{б_i}(t)$ передавання даних у часі в i-х каналах, тоді сигнальну ефективність запропоновано обчислювати так:

$$\eta_c = \eta_{МП}\left(\sum_{i=1}^{N_к}\left(\int_{t_{зв1}}^{t_{зв2}} v_{б_i}(t)dt\right)\right)\Big/\left(\int_{t_{зв1}}^{t_{зв2}} C_c(t)dt\right). \tag{11}$$

Нехай ефективність методу передавання даних у i-му каналі

$$\eta_{МП_i} = \frac{1}{t_{зв_i}}\sum_{j=1}^{N_{t_i}}\left(t_{зв2_j} - t_{зв1_j}\right), \tag{12}$$

де $t_{зв_i}$ – час сеансу зв'язку в i-му каналі; $t_{зв1_j}$, $t_{зв2_j}$ – моменти часу початку та кінця N_{t_i} проміжків часу, у яких передають дані.

У такому випадку час передавання даних $T_{д_j} = \sum_{j=1}^{N_{t_i}}\left(t_{зв2_j} - t_{зв1_j}\right)$, а загальний час передавання певного обсягу інформації $T_{ПП_j} = t_{зв_j}$. Тоді сигнальна ефективність може бути обчислена за допомогою наступного співвідношення:

$$\eta_c = \left(\sum_{i=1}^{N_к}\left(\frac{1}{t_{зв_i}}\sum_{j=1}^{N_{t_i}}\left(\int_{t_{зв1_j}}^{t_{зв2_j}} v_{б_i}(t)dt\right)\right)\right)\Big/\left(\frac{1}{t_{зв}}\int_{t_{зв1}}^{t_{зв2}} C_c(t)dt\right). \tag{13}$$

Запропоновану сигнальну ефективність (10)–(13) доцільно застосувати при дослідженні технічної ефективності телекомунікаційних систем та мереж із обмеженими смугою пропускання та потужністю сигналу при передаванні даних в умовах завад для виявлення таких методів формування й оброблення сигналів (методів модуляції, коригуючого або решіткового кодування, демодуляції, коригуючого або решіткового декодування, ущільнення/розділення каналів, методів передавання даних із керуючим зворотним зв'язком), які забезпечують найвищу ефективність телекомунікаційних систем та мереж.

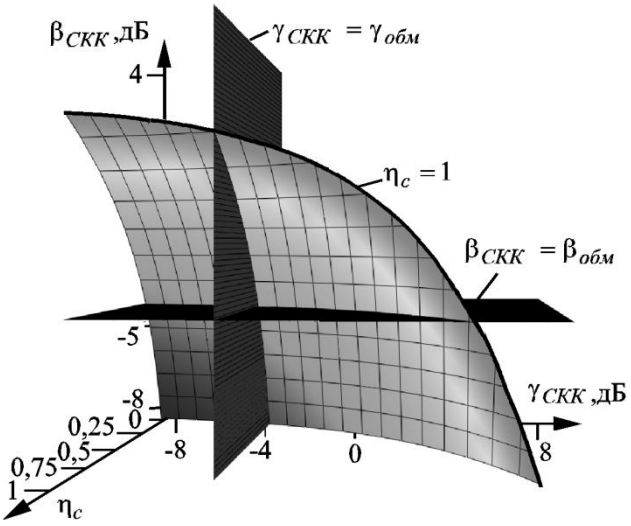

Рисунок. Залежність сигнальної ефективності η_c телекомунікаційної системи чи мережі від частотної $\gamma_{СКК}$ та енергетичної $\beta_{СКК}$ ефективності сигнально-кодової конструкції

У простішому випадку, коли телекомунікаційна система є одноканальною (ефективність методу розділення каналів $\eta_{\delta} = 1$) і характеризується незмінною в часі пропускною здатністю, залежність (10) сигнальної ефективності η_c від частотної $\gamma_{СКК}$ та енергетичної $\beta_{СКК}$ ефективності сигнально-кодової конструкції при ефективності методу передавання даних $\eta_{МП} = 1$ може бути представлена графічно у вигляді поверхні, зображеної на рисунку. Як видно з рисунка, сигнальна ефективність може досягнути максимального значення $\eta_c = 1$ на границі Шеннона лише при певних співвідношеннях частотної $\gamma_{СКК}$ та енергетичної $\beta_{СКК}$ ефективності сигнально-кодової конструкції. Проте на практиці телекомунікаційні системи чи мережі працюють в умовах обмеженої потужності сигналу P_c при дії шуму з потужністю $P_ш$ та обмеженої смуги пропускання ΔF системи чи мережі при необхідності забезпечувати задану швидкість передавання даних v_{δ}. Згідно співвідношень (1) і (2) такі обмеження однозначно задають обмежені значення енергетичної $\beta_{обм}$ та частотної $\gamma_{обм}$ ефективності. У такому разі діапазон можливих значень сигнальної ефективності системи чи мережі відповідає сукупності точок на поверхні, заданій співвідношенням (10), обмеженій площинами, заданими у вигляді $\beta_{СКК} = \beta_{обм}$, $\gamma_{СКК} = \gamma_{обм}$ і границею Шеннона, на якій $\eta_c = 1$. Значення сигнальної ефективності телекомунікаційної системи чи мережі при застосуванні певних обраних методів формування й оброблення сигналів може бути відображене у вигляді точок на цій поверхні, які для сучасних відомих методів є віддаленими від границі Шеннона, тобто сигнальна ефективність систем при їхньому застосуванні є меншою порівняно з максимально можливою. Тому реальна телекомунікаційна система чи мережа буде найбільш ефективною, якщо застосовані при її побудові методи формування й оброблення сигналів дозволять наблизитись до теоретичної максимально можливої ефективності системи чи мережі з урахуванням обмежуючих факторів.

Таким чином, використання запропонованої комплексної характеристики для оцінювання технічної ефективності телекомунікаційних систем та мереж – сигнальної ефективності – дає змогу:

- оцінити ступінь впливу кожного із застосованих методів формування й оброблення сигналів на ефективність системи або мережі в цілому;

- урахувати зміну ефективності системи чи мережі в часі при змінних у часі параметрах системи або мережі;
- порівняти різні системи чи мережі при передаванні даних на основі єдиного критерію;
- здійснювати оптимізацію методів формування й оброблення сигналів для підвищення технічної ефективності телекомунікаційних систем та мереж.

III. Результати математичного моделювання

З використанням співвідношень (5) – (7) і (10) досліджено енергетичну, частотну, інформаційну та сигнальну ефективність радіоканалу телекомунікаційної мережі на основі технології Wi-Fi згідно стандарту IEEE 802.11n, у якому при передаванні даних застосовують одну із восьми сигнально-кодових конструкцій MCS0 – MCS7, передбачених для використання в цьому стандарті [14]. Дослідження здійснене при передаванні даних у смузі частот 20 МГц з імовірністю бітової помилки $P_б = 7{,}37 \cdot 10^{-3}$ (що відповідає ймовірності пакетної помилки $P_{пак} = 0{,}1$ при передаванні пакетів Ethernet стандартної довжини) та $P_б = 1 \cdot 10^{-5}$. При дослідженні сигнальної ефективності враховано, що мережа працює в напівдуплексному режимі. Результати дослідження наведені в таблиці.

Таблиця. Енергетична, частотна, інформаційна та сигнальна ефективність радіоканалу телекомунікаційної мережі на основі технології Wi-Fi

Сигнально-кодова конструкція	$v_б$, Мбіт/с	$\gamma_{СКК}$, дБ	$P_{á} = 7{,}37 \cdot 10^{-3}$			$P_{á} = 1 \cdot 10^{-5}$		
			$\beta_{СКК}$, дБ	$\eta_{СКК}$, дБ	η_c	$\beta_{СКК}$, дБ	$\eta_{СКК}$, дБ	η_c
MCS0	6,5	-1.66	-0.93	0.771	0.386	-5.79	0.37	0.185
MCS1	13	1.35	-0.93	0.955	0.477	-5.79	0.519	0.26
MCS2	19,5	1.35	-2.23	0.796	0.398	-7.09	0.455	0.228
MCS3	26	4.36	-4.52	0.873	0.436	-9.63	0.58	0.29
MCS4	39	4.36	-5.82	0.776	0.388	-10.93	0.532	0.266
MCS5	52	6.12	-9.32	0.791	0.396	-14.69	0.591	0.295
MCS6	58	6.12	-9.92	0.763	0.381	-15.29	0.574	0.287
MCS7	65	6.12	-10.22	0.749	0.375	-15.59	0.567	0.283

Як видно з результатів дослідження, у технології Wi-Fi згідно зі стандартом IEEE 802.11n для збільшення швидкості передавання даних застосовують сигнально-кодові конструкції з більшою частотною ефективністю, проте при цьому енергетична ефективність зменшується. Тому високошвидкісне передавання даних можливе лише при великому відношенні потужності сигналу до потужності шуму в радіоканалі. Інформаційна ефективність при застосуванні різних сигнально-кодових конструкцій відрізняється в межах від 21% при імовірності бітової помилки $P_б = 7{,}37 \cdot 10^{-3}$ до 38% при імовірності бітової помилки $P_б = 1 \cdot 10^{-5}$. Сигнальна ефективність дослідженого

радіоканалу телекомунікаційної мережі на основі технології Wi-Fi у всіх випадках є меншою від інформаційної ефективності застосованої сигнально-кодової конструкції, що пов'язано з впливом методу передавання даних.

Висновки

Розглянуто запропоновану комплексну характеристику для оцінювання технічної ефективності телекомунікаційних систем та мереж – сигнальну ефективність. Показано можливість оцінювання ступеня впливу кожного із застосованих методів формування й оброблення сигналів на ефективність системи або мережі в цілому на прикладі радіоканалу телекомунікаційної мережі на основі технології Wi-Fi.

Досліджено енергетичну, частотну, інформаційну та сигнальну ефективність радіоканалу телекомунікаційної мережі на основі технології Wi-Fi згідно стандарту IEEE 802.11n залежно від застосованої для передавання даних сигнально-кодової конструкції. Як видно з результатів дослідження, у технології Wi-Fi для збільшення швидкості передавання даних застосовують сигнально-кодові конструкції з більшою частотною ефективністю, проте при цьому енергетична ефективність зменшується. Тому високошвидкісне передавання даних можливе лише при великому відношенні потужності сигналу до потужності шуму в радіоканалі. Інформаційна ефективність при застосуванні різних сигнально-кодових конструкцій відрізняється в межах 38%. Сигнальна ефективність дослідженого радіоканалу у всіх випадках є меншою від інформаційної ефективності застосованої сигнально-кодової конструкції, що пов'язано з впливом протоколу передавання даних.

Список літератури:

1. *Бройдо В.Л.* Вычислительные системы, сети и телекоммуникации : учебник для вузов. – 2-е изд. – СПб. : Питер, 2004. – 703 с. :

2. *Горбатий І.В., Бондарєв А.П.* Телекомунікаційні системи та мережі. Принципи функціонування, технології та протоколи : навчальний посібник. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2016. – 336 с.

3. 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.

4. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – 2-е изд., испр. – М. : Издательский дом "Вильямс", 2004. – 1104 с.

5.*Chi-Yu Li, Chunyi Peng, Peng Cheng, Songwu Lu, Xinbing Wang, Fengyuan Ren, Tao Wang*. An Energy Efficiency Perspective on Rate Adaptation for 802.11n NIC // IEEE Transactions on Mobile Computing. – 2016. – Vol. 15, Issue 6. – P. 1333–1347.

6. *Teuku Yuliar Arif, Rizal Munadi, Fardian*. Energy Efficiency Opportunity at Same Data Rate and Different MCS in IEEE 802.11n // Pros. of 2015 9th Asia Modelling Symposium (AMS). – 2015. – P. 142–147.

7. *Simon M.K.* Bandwidth-efficient digital modulation with application to deep-space communications : monograph. Editor-in-chief Joseph H. Yuen. – California : Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 2001. – 228 p.

8. *Прокис Дж.* Цифровая связь. Под ред. *Д.Д.* Кловского. – М. : Радио и связь, 2000. – 800 с.

9. *Галкин В.А.* Цифровая мобильная связь : учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 432 с.

10. *Горбатий І.В.* Системи дистанційного зондування Землі з космосу: монографія. – Львів : СПОЛОМ, 2011. – 612 с.

11. *Gorbatyy I.V.* Investigation of the technical efficiency of state-of-the-art telecommunication systems and networks with limited bandwidth and signal power // Automatic Control and Computer Sciences. – New York, 2014. – Vol. 48, No. 1. – P. 47–55.

12. *Gorbatyy I.V.* Optimization of signal-code constructions using the maximum efficiency criterion // Radioelectronics and communications systems. – New York, 2013. – Vol. 56, No. 12. – P. 560–567.

13. *Горбатый И.В.* Сигнальная эффективность радиотехнических и телекоммуникационных систем и сетей // Проблемы управления и информатики. – 2014. – №2. – С. 102–113.

14. Web-сайт про технологію Wi-Fi [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://wi-life.ru/texnologii/wi-fi/wi-fi-standarty/