

ЕЛЕКТРОНІКА, РАДІОТЕХНІКА ТА ЗАСОБИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

УДК 621.391

Л.О. Уривський, А.В. Мошинська,
К.А. Прокопенко

СПІВВІДНОШЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ І ПРОДУКТИВНОСТІ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ UMTS

Вступ

Сучасне суспільство широко використовує різні методи передачі інформації, які постійно вдосконалюються [1–3]. Основною метою їх розвитку є збільшення обсягів інформації, яка передається, дальності дії її та поліпшення якості зв'язку. Однак при розробці сучасних технологій фахівці не завжди звертаються до категорії теорії інформації. Тим часом основною мірою інформації є пропускна здатність у тому вигляді, в якому її описав К. Шеннон [4]. Застосування інформаційних критеріїв при оцінці сучасних технологій є досить актуальним, оскільки дає можливість оцінити обсяги інформації, яка передається від джерела по каналу зв'язку.

Постановка задачі

Згідно з положеннями теорії інформації, найбільша швидкість передачі символів, яка може бути досягнута в каналі із завадами, визначається як пропускна здатність C цього каналу. Швидкість R передачі символів, якої можна реально досягти в каналі за умов даної межі достовірності, в подальшому в статті визначатиметься як продуктивність каналу зв'язку, де $R \leq C$.

Метою статті є послідовний аналіз трансформації показників продуктивності каналів телекомунікацій по етапах перетворення інформації на кожній ділянці системи передачі дискретної інформації відносно показників пропускної здатності каналу, модель якого в даній статті запропоновано.

Вихідні положення

Для дискретних повідомлень, які передаються по каналу із швидкістю $\nu = 1/\tau$ (τ – тривалість одного переданого символу) m -х символів за секунду і приймаються з вірогідніс-

тю $p_{\text{пом}}$, швидкість передачі інформації не може бути більшою, ніж значення пропускної здатності такого каналу [4]:

$$C_{\text{д.к.з}} = \nu \left[\log m + p_{\text{пом}} \log \left(\frac{p_{\text{пом}}}{m-1} \right) + (1 - p_{\text{пом}}) \log(1 - p_{\text{пом}}) \right], \quad (1)$$

де $p_{\text{пом}}$ – вірогідність помилкового прийому символу, яка залежить від виду модуляції і способу прийому; m – основа коду.

Модель каналу зв'язку, яка відповідає формулі (1), наведено на рис. 1.



Рис. 1. Модель системи передачі дискретної інформації

Основними елементами моделі є пара “джерело-отримувач” інформації, модем та лінія зв'язку із завадами. Модем містить у собі модулятор і демодулятор, якими забезпечується перетворення символів джерела в m -ну послідовність модульованих сигналів для узгодження з лінією зв'язку та демодульованих з кінцевою вірогідністю $p_{\text{пом}}$ через дію завад.

Класифікація перетворень у системах передачі на базі технології стандарту UMTS

Прикладом сучасної технології, де застосовуються згадані і більш складні перетворення, є безпроводові системи на основі UMTS [2].

У стандарті UMTS для транспортування інформації використовується канал з діапазоном 5 МГц. Для передачі інформації від базової станції (БС) до абонентської станції (АС) та в зворотному напрямку використовуються способи багатопозиційної маніпуляції – квадратурна фазова маніпуляція (QPSK, $m = 4$) і квадратурна амплітудна модуляція (QAM16, $m = 16$). При цьому швидкість передачі елементарних символів (чипів) – $\nu = 3,84$ Мчип/с.

Скориставшись формулою (1), отримаємо значення пропускної здатності C_{UMTS} для значень $m = 4$ і 16 та вірогідностей помилки $p_{\text{пом}}$ для QPSK і QAM16, які визначаються за формулами [4]

$$P_{\text{помQPSK}}(h^2) = 0,5[1 - \Phi(\sqrt{h^2})],$$

$$P_{\text{помQAM16}}(h^2) = 1 - \left(1 - \frac{1,5}{\sqrt{2\pi}} \int_{\sqrt{0,2h^2}}^{\infty} \exp\left(\frac{-u^2}{2}\right) du \right)^2 \quad (2)$$

На рис. 2 наведено залежності, отримані за формулою (1) із врахуванням (2). При незмінній швидкості в каналі ν зростання енергетичних параметрів призводить до зростання пропускної здатності до того моменту, поки $P_{\text{пом}}$ не досягне значень, близьких до 0. Тоді зростання енергетичних параметрів перестає впливати на значення пропускної здатності $C_{\text{UMTS}} \rightarrow \nu \log m$. Очевидно, що у випадку QPSK межа C_{UMTS} досягається при менших значеннях h^2 у зв'язку з більшою завадостійкістю; проте інформаційні можливості QAM16 відповідно більші.

Швидкість передачі інформації при подальших перетвореннях обмежена границею Шеннона (1).

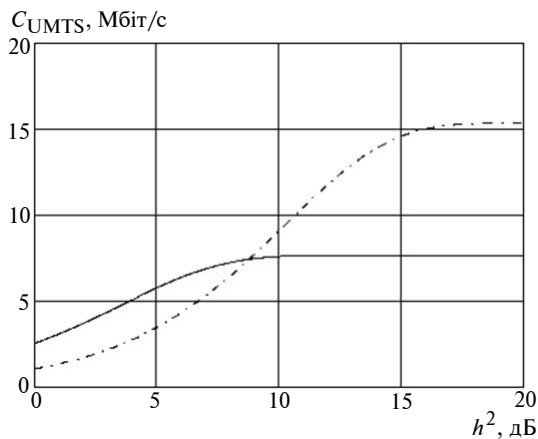


Рис. 2. Залежність пропускної здатності каналу від енергетичних параметрів каналу при різних видах багатопозиційної маніпуляції: — — $C(\text{QPSK})$; - - - $C(\text{QAM16})$

У доповнення до спрощеної схеми (див. рис. 1) у сучасних системах (в тому числі і стандарті UMTS) використовуються інші перетворення при транспортуванні символів від джерела інформації до її отримувача (рис. 3).

До додаткових перетворень належить завадостійке кодування (ланка "кодер"), розширення спектра сигналів на основі ортогонального базису Уолша (ланка "Уолш"). Зберігається використання багатопозиційної маніпуляції для передачі по каналу зв'язку в m -му вигляді (ланка "модулятор").

Кожне перетворення символів джерела інформації впливає відповідно на загальну продуктивність системи передачі: чим більше перетворень, тим менше інформаційних символів у послідовності, яка передається в каналі. Ці перетворення змінюють продуктивність каналу зв'язку $R_{\text{д.к.з}}$ таким чином, що досягти передачі інформації із швидкістю $\nu = C_{\text{д.к.з}}$ неможливо. Розглянемо послідовно етапи перетворення інформаційних символів на кожній з ділянок наведеної моделі на рис. 3.

Співвідношення пропускної здатності і продуктивності систем передачі на базі технології UMTS із врахуванням функції розширення спектра

Призначення етапу розширення спектра сигналів на основі ортогонального базису Уолша полягає в забезпеченні ідентифікації фізичних каналів різних користувачів. Кожному абонентському терміналу в технології UMTS виділяється унікальний каналний код. У випадках, коли для збільшення швидкості передачі БС передає повідомлення для кількох АС одночасно, застосовуються каналотворювальні сигнали на основі ортогонального базису.

Можливість адаптації системи UMTS до різних потреб абонентів у швидкостях передачі



Рис. 3. Модель системи передачі дискретної інформації

даних забезпечується каналотворювальними сигналами із змінним коефіцієнтом розширення спектра OVSF (Orthogonal Variable Spreading Factor). Ортогональність сигналів різних користувачів дотримується в межах стільника. Коефіцієнт розширення показує, скільки чипів використовується на один символ у радіоканалі або в скільки разів розширюється сигнал. Коефіцієнт розширення K для прямого каналу однозначно задає відповідність між швидкістю проходження символів і біт у прямому каналі та розраховується як $K = 2^x$ при $x = 2, 3, \dots, 9$. Це розширення сигналів також вносить свою частку до зміни продуктивності каналу.

При невеликій кількості активних користувачів система, яка використовує функції Уолша для розділення користувачів, має значну коригуючу здатність, яка реалізується автоматично як результат розділення сигналів. У той же час, при повному завантаженні каналів система істотно поступається системі з часовим розділенням сигналів через порушення ортогональності внаслідок дії завад [5]. Тому в розрахунках наведено випадок, коли всі ресурси системи використовуються для обслуговування одного абонента при незмінній швидкості.

Таким чином, етап ущільнення можна розглядати як кодування з еквівалентною швидкістю $r_v = 1/K$, де K – коефіцієнт розширення.

Продуктивність на цьому етапі становить

$$R_y = vr_y \left(\log m + p_{\text{пому}} \log \left(\frac{p_{\text{пому}}}{m-1} \right) + (1 - p_{\text{пому}}) \log(1 - p_{\text{пому}}) \right) \leq C_{\text{UMTS}}, \quad (3)$$

де $p_{\text{пому}}$ – вірогідність помилки, отриманої після декодування функцій Уолша.

Слід зазначити, що $p_{\text{пому}}$ в даному випадку відповідає вірогідності помилки, коли всі ресурси системи використовуються для обслуговування одного абонента.

На рис. 4 наведено розраховані залежності. В дужках вказано вид маніпуляції, яка використовується, та коефіцієнт розширення за умови, що в системі лише один користувач.

При використанні системи одним абонентом перетворення Уолша збільшує енергетичні показники пропорційно коефіцієнту розширення [5]. У випадку повної завантаженості системи послідовностями Уолша дане перетворення знижує завадостійкість системи.

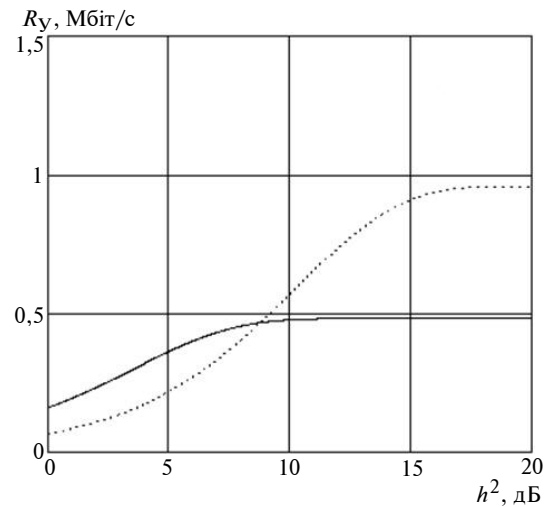


Рис. 4. Залежність пропускної здатності каналу від енергетичних параметрів каналу на етапі перетворення Уолша: — — R_y QPSK ($r_y = 16$); — R_y QAM16 ($r_y = 16$)

Співвідношення пропускної здатності і продуктивності систем передачі на базі технології UMTS із врахуванням завадостійкого кодування

Наступним етапом перетворення є завадостійке кодування. Призначення його полягає в поліпшенні показників достовірності порівняно із значенням $p_{\text{пом}}$ за виразом (1). Ціною за поліпшення достовірності є подальше зниження продуктивності каналу передачі інформації через надмірність коду.

Розглянемо більш детально ці фактори.

У стандарті UMTS блок “кодер” використовує завадостійке кодування. Однією з опцій стандарту UMTS передбачено кодування згортковим кодом. Згорткові коди використовуються для кодування з інформаційною швидкістю не більше 32 кбіт/с. Швидкість кодування набуває значення $r_{з.к} = 1/2$ і $r_{з.к} = 1/3$. Довжина кодового обмеження в обох випадках дорівнює 9.

Одна з найважливіших характеристик згорткового коду – це вільна відстань d_f . Вона є мірою розпізнавання двох найбільш близьких кодових послідовностей нескінченної довжини на виході кодера та значною мірою визначає завадостійкість системи із згортковим кодуванням.

Крім параметрів $r_{з.к}$ і d_f , кожний згортковий код характеризується набором коефіцієнтів

ентів S_k , які називаються спектром ваги згорткового коду [4, 6], що показує сумарне число помилок на виході декодера, коли замість правильного шляху по решітчастій діаграмі вибираються помилкові шляхи, віддалені від правильного на величину $d_f = k$.

Розрахунок вірогідності на біт на виході декодера збігається з обчисленням ваги коду за формулою [6]

$$p_{\text{пом біт}} \leq \sum_{k=d_f}^{\infty} S_k P_k, \quad (4)$$

де P_k – вірогідність помилки декодованого символу для випадку гнучкого рішення; S_k – коефіцієнти, які є складовими спектра ваги.

Результати розрахунку наведено на рис. 5. Можна бачити, що достовірність залежить від послідовності декодування. Якщо помилковий шлях на решітчастій діаграмі відрізняється від правильного шляху на k символів і на виході демодулятора маємо жорсткі рішення (дискретний канал з двійковим виходом), то вірогідність визначається за умов, що на довжині послідовності на вході декодера, яка складається з k символів, буде $(k+1)/2$ і більше помилок, тобто

$$\left\{ \begin{aligned} P_k &= \sum_{i=\frac{k+1}{2}}^k C_k^i P_{\text{пом к}}^i (1 - P_{\text{пом к}})^{k-i} \text{ при парному } k, \\ P_k &= \sum_{i=\frac{k+1}{2}}^k C_k^i P_{\text{пом к}}^i (1 - P_{\text{пом к}})^{k-i} + \\ &+ \frac{1}{2} C_k^{k/2} P_{\text{пом к}}^{k/2} (1 - P_{\text{пом к}})^{k/2} \text{ при непарному } k, \end{aligned} \right. \quad (5)$$

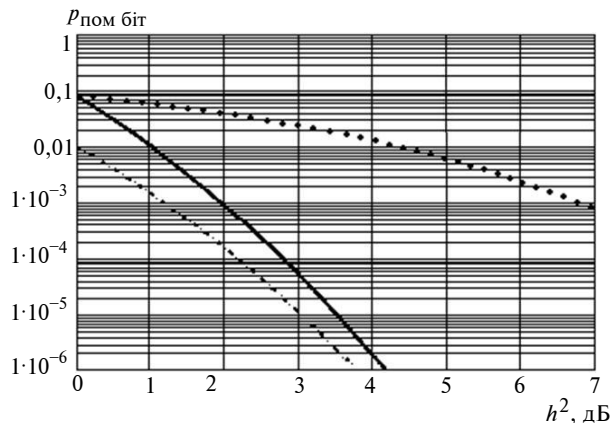


Рис. 5. Вірогідність прийняття символів при застосуванні згорткових кодів, які використовуються в стандарті UMTS: — — $r = 1/2$; - - - $r = 1/3$; — BPSK

де $P_{\text{пом к}}$ – вірогідність помилок у каналі [4].

Із врахуванням відомостей про достовірність прийняття символів після декодера завадостійкого кодування продуктивність каналу на ділянці від джерела до отримувача інформації становитиме

$$R_k = v r_y r_{зк} \log m (1 + p_{\text{пом біт}} \log p_{\text{пом біт}} + (1 - p_{\text{пом біт}}) \log (1 - p_{\text{пом}})) \ll C_{\text{UMTS}}, \quad (6)$$

де $r_{зк}$ – швидкість завадостійкого кодування; $p_{\text{пом біт}}$ – вірогідність помилки біта інформації, яка визначається за формулою (4) із врахуванням (2) і (5).

Результати розрахунку продуктивності R_{UMTS} наведено на рис. 6.

Максимальні значення $R_{\text{UMTS макс}} = v r_y r_{зк}$ відповідно до сигналів QPSK досягаються досить швидко, що пояснюється високою енергетичною ефективністю сигналів QPSK. У даному випадку продуктивність напрямку залежить від швидкості кодування.

Для QAM16 спостерігається аналогічна ситуація, тільки при швидкості кодування $r_{зк} = 1/3$ гранична продуктивність досягається раніше, ніж для випадку $r_{зк} = 1/2$, що пояснюється більшою завадостійкістю коду $r_{зк} = 1/3$, хоч продуктивність у випадку з кодом $r_{зк} = 1/3$ менша.

З рис. 6 видно, що комплексне використання заходів для збільшення завадостійкості

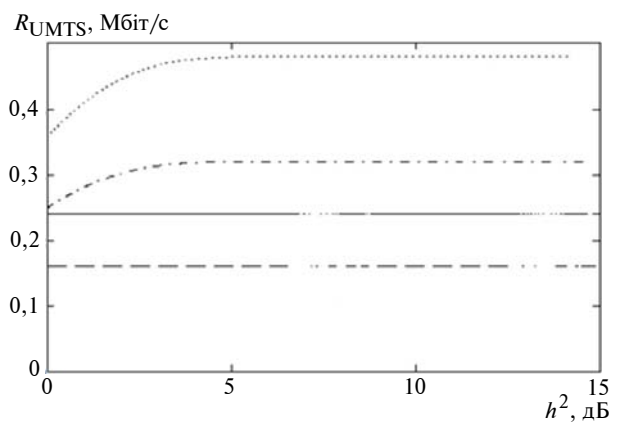


Рис. 6. Залежність продуктивності каналу від енергетичних параметрів каналу із врахуванням завадостійкого кодування: — — QPSK, $r_y = 16$, $r_{зк} = 1/2$; — QAM16, $r_y = 16$, $r_{зк} = 1/2$; - - - QPSK, $r_y = 16$, $r_{зк} = 1/3$; - - - QAM16, $r_y = 16$, $r_{зк} = 1/2$

може призвести до зниження продуктивності до $K/r_{п.к} \gg 1$ разів порівняно з пропускною здатністю C_{UMTS} , а використання сигналів багатопозиційної маніпуляції підвищує продуктивність в $\log m$ разів порівняно з випадком використання бінарних маніпульованих сигналів. Так, при швидкості передачі елементарних символів застосування QAM16 при значеннях $h^2 = 4$ дБ досягається пропускна здатність каналу $C_{UMTS} = 3,5$ Мбіт/с (див. рис. 2). При цьому використання коду із швидкістю $r_{з.к} = 1/2$ і коефіцієнтом розширення $K=16$ дає можливість забезпечити кінцеву швидкість передачі інформації (продуктивність) всього лише $R_{UMTS} = 0,5$ Мбіт/с (рис. 6), але при підвищенні достовірності на чотири порядки (з 10^{-2} до 10^{-6}).

Висновки

На прикладі розгляду сучасної технології безпроводового зв'язку UMTS обґрунтовано

місце кожного з перетворень інформації в технологіях передачі, проте із збільшенням ступенів перетворень сигналів джерела в каналі зменшується частка інформаційних символів у послідовності, яка передається по лінії зв'язку.

Використання багатопозиційних маніпуляцій збільшує пропускну здатність каналу зв'язку, але при цьому погіршуються показники достовірності.

Етап перетворення Уолша призначений для ущільнення каналів і збільшення завадостійкості, проте кожна з цих функцій виконується, погіршуючи іншу. Загальна продуктивність зменшується в будь-якому випадку порівняно з пропускною здатністю каналу зв'язку.

Завадостійке кодування призводить до того, що гранична продуктивність досягається при достатньо низьких енергетичних параметрах, але при цьому рівень продуктивності, яка може бути досягнута, значно поступається пропускній здатності каналу зв'язку з відомими енергетичними характеристиками.

Л.А. Урывский, А.В. Мошинская, Е.А. Прокопенко
СООТНОШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИИ UMTS

Приведено описание понятия "пропускная способность" в таком виде, в каком ее подал К. Шеннон. Предложена модель системы передачи дискретной информации. На примере технологии UMTS приводится трансформация оригинальной формулы пропускной способности Шеннона по мере преобразования информации на каждом участке модели системы передачи.

L.O. Urywsky, A.V. Moshinska, K.A. Prokopenko
CORRESPONDENCE BETWEEN CAPACITY AND PRODUCTIVITY OF THE SYSTEMS OF TRANSMISSION ON THE BASE OF A TECHNOLOGY UMTS

In this paper, we consider K. Shannon's description of the channel capacity. On the experimental side, we propose the model of the system for discrete information transfer. We exemplify it by utilizing the UMTS technology and the transformation of original formulas of Shannon's capacity when the information is transformed on every segment of the model of transmission system.

1. *Льченко М.Ю., Кравчук С.О.* Сучасні телекомунікаційні системи. – К.: Наук. думка, 2008. – 328 с.
2. *Гепко И.А., Олейник В.Ф., Чайка Ю.Д., Бондаренко А.В.* Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития. – К.: ЕКМО, 2009. – 672 с.
3. *Спилкер Дж.* Цифровая спутниковая связь. – М.: Связь, 1979. – 592 с.
4. *Зюко А.Г., Кловский Д.Д., Коржик В.И., Назаров М.В.*

Теория электрической связи. – М.: Радио и связь, 1999. – 432 с.

5. *Дядюнов Н.Г., Сенин А.И.* Ортогональные и квазиортогональные сигналы / Под ред. Е.М. Тарасенко. – М.: Связь. – 1977. – 224 с.
6. *Кларк Дж., Кейн Дж.* Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи / Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1987. – 382 с.