

ЕЛЕКТРОНІКА, РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.391

DOI: 10.20535/1810-0546.2016.2.65965

Л.О. Уривський, А.В. Мошинська, С.М. Вергун
Національний технічний університет України “КПІ”, Київ, Україна

АНАЛІЗ ПРОДУКТИВНОСТІ ЗАВАДОЗАХИЩЕНИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАВАННЯ ДИСКРЕТНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Background. Efficient use of energy and frequency resource of telecommunications channels is needed.

Objective. The main objective is favor of a discrete communication channel productivity analysis through the identification of behavior reliability patterns of the demodulated multiposition signal manipulation by using redundant error-correcting codes.

Methods. Estimation of capacity and productivity extremum search is carried out in a gradual increase in the symbol rate. Potential noise immunity given estimated error probability value in the telecommunications channel with white noise. The error probability is achieved by correcting the reliability of the demodulator output using the error-correcting code.

Results. Analysis of capacity and productivity without coding, and with coding showed the extremum in the respective energy condition in the channel. At the same time at the point of extremum signals QAM-16 are more productive than the signals QAM-64. This demonstrates the rationality of using signals QAM-64 in wireless systems (e.g., LTE), that are useful to apply in a wide area wireless systems (e.g., UMTS).

Conclusions. Efficient use of energy resources and frequency of communication channels occurs at the point of extremum performance in well-defined values of the transfer rate. If the maximum is to the left of it is advisable to increase the symbol rate, and if the maximum is to the right the signal energy can be reduced.

Keywords: channel capacity; productivity; error probability; multiposition signals; productivity extremum.

Вступ

Неспинне зростання обсягів інформації, що передається за допомогою телекомунікаційних систем, змушує розвиватися галузь зв'язку досить стрімко. Її розвиток визначається реалізацією більш швидкісних технологій передачі різних видів трафіку. Наприклад, у світі активно розроблюються мережі 5G [1].

Однак зростання потреб у передаванні якісної інформації об'єктивно не супроводжується пропорційним зростанням частотних та енергетичних ресурсів, необхідних для забезпечення роботи відповідних телекомунікаційних систем. Це значною мірою стосується безпроводових телекомунікацій.

Отже, поряд із завданням створення технологій, які дають змогу швидко передавати великі обсяги інформації, існує проблема раціонального використання наявного ресурсу: частотного, енергетичного.

Для вирішення цієї проблеми недостатньо тільки архітектурних рішень щодо побудови мереж або впровадження нових методів і алгоритмів збору, зберігання, обробки і транспортування інформації. Також слід звернутися до інформаційного підходу реалізації сучасних мереж. Це означає, що без знання і розуміння аспектів класичної та сучасної теорії інформації [2], зокрема прикладної теорії інформації

для телекомунікацій, неможливо вирішити завдання раціонального використання та економії ресурсів.

Дослідження останніх років у галузі сучасної теорії інформації демонструють ефективне використання завадозахищених кодів та сигнально-кодових конструкцій у задачах підвищення інформаційної ємності сигналів [3, 4].

Розуміння і використання інструменту коректного аналізу пропускної здатності та продуктивності каналів зв'язку уможливує розвиток принципів системного аналізу в прикладній теорії інформації для телекомунікацій.

Постановка задачі

Центральним завданням роботи є аналіз продуктивності дискретного каналу зв'язку через виявлення закономірностей поведінки достовірності демодульованих символів сигналів багатопозиційної маніпуляції та визначення умов досягнення максимуму продуктивності каналу зв'язку за наявних енергетичного, часового та частотного ресурсів.

Дослідження змін пропускної здатності у завадозахищених системах

Традиційні в теорії інформації показники пропускної здатності та завадостійкості в дійсній роботі досліджуються оригінальним шляхом.

З одного боку, ці показники розглядаються як функція енергетичного параметра h^2 , характерного для дослідження достовірності передачі сигналів. З іншого боку, головною змінною аргументів виступає швидкість передачі символів V_C .

У такому підході виявляється головна особливість прикладної теорії інформації для телекомунікацій: вивчення інформаційних властивостей каналів зв'язку через характеристики, властиві телекомунікаційним системам.

Оцінка пропускної здатності та пошук екстремуму продуктивності ведеться в умовах поступового збільшення швидкості передачі символів. Вибір цього параметра зумовлений його зрозумілістю широкому колу користувачів та провайдерів телекомунікаційних послуг. Збільшення швидкості не тільки задовольняє потреби користувачів, але й приводить до збільшення результуючої продуктивності та пропускної здатності.

Припустимо, що на вхід каналу зв'язку можна подавати сигнали від різних джерел, які характеризуються різними розподілами ймовірностей помилки. Кожне з таких джерел передає каналом деяку кількість інформації. Максимальне за всіма багатовимірними розподілами ймовірностей помилки вихідного сигналу значення швидкості передачі інформації каналом зв'язку при відповідному узгодженні джерела з каналом називається пропускною здатністю [5]:

$$C = V_C \cdot \left[\log_2 M + p_{\text{сим}} \cdot \log_2 \frac{p_{\text{сим}}}{M-1} + (1 - p_{\text{сим}}) \cdot \log_2 (1 - p_{\text{сим}}) \right], \quad (1)$$

де V_C – швидкість передачі символів; $p_{\text{сим}}$ – ймовірність символної помилки; M – кратність маніпуляції.

Формула (1) містить у своєму складі множники, які мають суперечливі за знаком похідні: зі збільшенням значення V_C зростає ймовірність $p_{\text{сим}}$, і, як наслідок, зменшується ентропія переданого символу.

Відповідно до теореми Шеннона, в дискретному каналі може бути досягнута як завгодно мала ймовірність помилки прийому інформаційних символів за рахунок надлишкового кодування, якщо кількість інформації, що генерується джерелом (продуктивність), не перевищує пропускної здатності каналу [5].

Пропускна здатність можна розцінювати як границю Шеннона для дискретного каналу зв'язку. Особливість її поведінки полягає в тому, що вона може зміщуватися відповідно до змін параметрів дискретного каналу зв'язку, які приводять до зміни значень $p_{\text{сим}}$.

Продуктивність джерела дискретних сигналів R – кількість інформації, що фактично передається від джерела до отримувача за одиницю часу. В загальному випадку аналітично продуктивність визначається формулою [2]

$$R = V_S \cdot [1 + p_{\text{біт}} \cdot \log_2 p_{\text{біт}} + (1 - p_{\text{біт}}) \cdot \log_2 (1 - p_{\text{біт}})],$$

де V_S – швидкість формування символів; $p_{\text{біт}}$ – ймовірність бітової помилки.

Інтегральним показником, що відображає просторово-енергетичні параметри каналу зв'язку, виступає параметр h^2 – безрозмірна величина, яка характеризує відношення середньої енергії сигналу в точці прийому до односторонньої спектральної потужності шуму [2]:

$$h^2 = \frac{P_C}{V_C \cdot N_0},$$

де V_C – швидкість передачі символів у дискретному каналі.

Іншим показником, що пов'язує енергетичні характеристики сигналу та завади, є показник α :

$$\alpha = \frac{P_C}{N_0},$$

тобто

$$h^2 = \frac{\alpha}{V_C}.$$

Потенційна завадостійкість оцінюється мінімально можливим значенням ймовірності помилки $p_{\text{біт}}$ у каналі передачі зі сталими параметрами при впливі флуктуаційної завади типу білого гауссового шуму.

При прийманні багатопозиційних сигналів розрізняють помилку приймання символу на виході демодулятора (який містить M символів джерела у M -позиційному сигналі) та помилку приймання символу на виході декодера (власне поодинокого символу джерела). При прийомі бінарних сигналів ці помилки збігаються.

Імовірність помилки символу багатопозиційного сигналу на виході демодулятора при QPSK визначається за формулою [3]

$$P_{\text{сим QPSK}} = \frac{3}{4} - \frac{1}{2} \Phi(\sqrt{h^2}) - \frac{1}{4} \Phi^2(\sqrt{h^2}), \quad (2)$$

а ймовірність помилки символу джерела (біта) для цього випадку становить [3]

$$P_{\text{біт QPSK}} = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\sqrt{2h^2} \cos \frac{\pi}{4} \right) \right]. \quad (3)$$

Імовірність символної помилки при QAM- M має такий вигляд [3]:

$$P_{\text{сим QAM-}M} = 1 - \left[1 - \frac{2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right)}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{M-1}} \cdot h^2}^{\infty} \exp \left(-\frac{u^2}{2} \right) du \right], \quad (4)$$

де M – позиційність модуляції.

Імовірність бітової помилки при QAM- M визначається [3]

$$P_{\text{біт QAM-}M} = \frac{4 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right)}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{M-1}} \cdot h^2}^{\infty} \exp \left(-\frac{u^2}{2} \right) du. \quad (5)$$

Для досліджуваних видів маніпуляції M набуває таких значень:

$$\begin{cases} \text{для QPSK} & M = 4; \\ \text{для QAM-16} & M = 16; \\ \text{для QAM-64} & M = 64. \end{cases} \quad (6)$$

Зобразимо залежність пропускної здатності від швидкості передачі символів згідно з (1) (рис. 1, *a*) та відповідні значення символної ймовірності помилки, залежної від параметра h^2 , згідно з (2), (4) (рис. 1, *б*).

Можна бачити, що пропускна здатність як функція параметра V_C містить точку екстремуму, що означає перевищення темпу зменшення нелінійного множника (вираз у дужках) над лінійним ростом V_C у формулі (1).

При початковому значенні швидкості передачі $V_C = 1$ Мбіт/с пропорція в значеннях пропускної здатності відповідає початковій кратності маніпуляції згідно з (6).

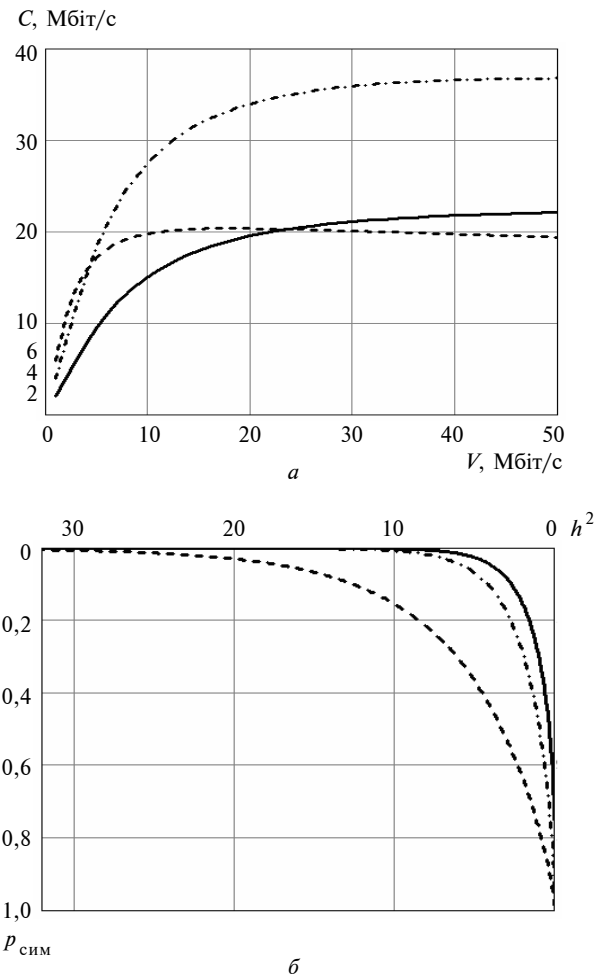


Рис. 1. Пропускна здатність (*a*) та ймовірність символної помилки (*б*): — QPSK, - - - QAM-16, - · - · - QAM-64

При зміні (зростанні) швидкості передачі символів у каналі зв'язку V_C найбільший інформаційний ресурс зберігають сигнали QAM-16. Сигнали QAM-64 досягають екстремуму по пропускній здатності раніше, ніж QAM-16, але з більш низькими значеннями. Інформаційне насичення сигналів QPSK є повільнішим, але вони мають перевагу із погляду на завадостійкість [8].

Пошук екстремальних значень продуктивності дискретного каналу зв'язку

Продуктивність джерела дискретних сигналів у випадку, коли ступінь завадостійкого кодування не задіяний, визначається так [6]:

$$R = V_C \cdot \log_2 M \cdot [1 + p_{\text{біт}} \cdot \log_2 p_{\text{біт}} + (1 - p_{\text{біт}}) \cdot \log_2 (1 - p_{\text{біт}})]. \quad (7)$$

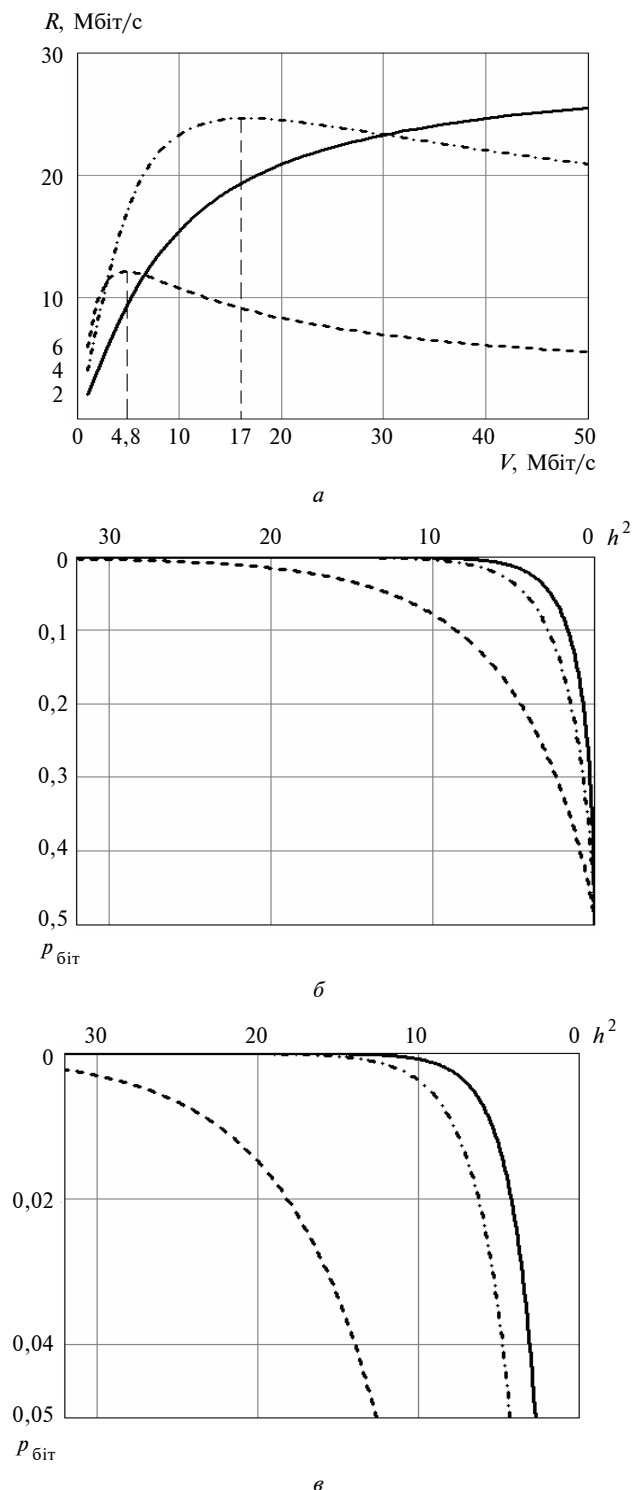


Рис. 2. Продуктивність (а) та ймовірність бітової помилки (б, в): — — QPSK, - - - QAM-16, - · - QAM-64

Зобразимо залежність продуктивності від швидкості передачі символів згідно з (7) (рис. 2, а) та відповідні значення бітової ймовірності по-

милки, залежної від параметра h^2 , згідно з (3), (5) (рис. 2, б, в).

Можна бачити, що продуктивність як функція V_C аналогічно пропускній здатності містить точку екстремуму, що означає перевищення темпу зменшення нелінійного множника над лінійним ростом V_C у формулі (7).

При значенні параметра h^2 , коли швидкість передачі символів у каналі зв'язку V_C становить до 3 Мбіт/с, перевагу в інформаційному насиченні сигналів має QAM-64, але такі сигнали швидко досягають свого максимального значення. Потім найбільшу продуктивність мають сигнали QAM-16. Сигнали QPSK переважають на швидкостях більше 30 Мбіт/с, коли завадостійкість інших сигналів значно послаблюється.

Екстремум продуктивності для сигналів QAM-64 (11,5 Мбіт/с) настає за швидкості $V_C = 4,8$ Мбіт/с, тобто коли $h^2 = 6,7$. У цьому випадку ймовірність бітової помилки рівна $p_{\text{бит}} = 0,137$. Максимум продуктивності сигналів QAM-16 (23,5 Мбіт/с) має місце при $V_C = 17$ Мбіт/с, тобто коли $h^2 = 1,9$, а ймовірність бітової помилки рівна $p_{\text{бит}} = 0,16$. Тобто при максимальному значенні продуктивності достовірність прийнятої інформації не відповідає вимогам сучасних систем передачі. Параметр $\alpha = 32 [\mu\text{с}]^{-1}$ при цьому зберігає своє стале значення.

Пошук екстремальних значень продуктивності завадозахищених систем

Оскільки ймовірність бітової помилки збільшується зі збільшенням швидкості передачі символів, необхідно використовувати методи підтримання достовірності [9]. У такому випадку, наприклад за відомих енергетичних ресурсів каналу, необхідно застосовувати завадостійке кодування. Параметри блокового коду — довжина блоку n , кількість інформаційних символів k — впливають на значення продуктивності таким чином [7]:

$$R = V_C \cdot \log_2 M \cdot r_k \cdot [1 + p_{\text{бит}} \cdot \log_2 p_{\text{бит}} + (1 - p_{\text{бит}}) \cdot \log_2 (1 - p_{\text{бит}})],$$

де r_k — швидкість кодування, чисельно рівна відношенню k/n , яке гарантує необхідну достовірність.

Якщо задати вимоги щодо підтримання достовірності передавання біт на виході декодера надлишкового кодування на рівні $p_{\text{біт}} = 10^{-6}$, то, у випадку, коли довжина блоку рівна $n = 200$ символів, а енергетичний параметр $\alpha = 32 \text{ [}\mu\text{s]}^{-1}$, отримуємо залежності продуктивності від швидкості передачі символів, показані на рис. 3.

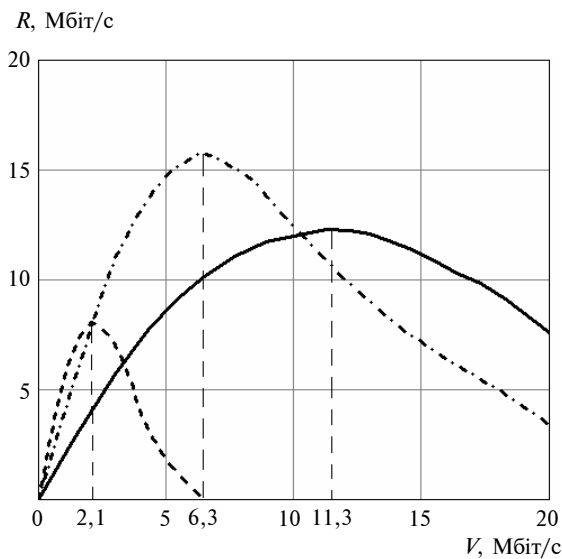


Рис. 3. Продуктивність при використанні завадостійкого кодування: — QPSK, - - - QAM-16, - · - · - QAM-64

Можна бачити, що характер зміни продуктивності при введенні завадостійкого кодування не змінюється відносно продуктивності без кодування. Але характерною особливістю є те, що максимального значення продуктивності можна досягти з використанням QAM-16.

Таблиця. Дослідження екстремумів продуктивності за різних значень α , $n = 200$ символів

Вид модуляції	$\alpha, [\mu\text{s}]^{-1}$	$R_{\text{max}}, \text{Мбіт/с}$	$V_C, \text{Мбіт/с}$	h^2	$p_{\text{біт}}$
QPSK	20	7,684	6,8	2,94	0,043
	32	12,32	11,3	2,83	0,046
	40	15,369	14,1	2,84	0,046
QAM-16	20	9,922	4,1	4,88	0,038
	32	15,75	6,3	5,10	0,034
	40	19,843	8,2	4,88	0,038
QAM-64	20	5,082	1,4	14,25	0,038
	32	8,127	2,1	15,24	0,032
	40	10,164	2,8	14,28	0,038

Якщо вибрати фіксоване значення енергетичного параметра (наприклад, $\alpha = 32 \text{ [}\mu\text{s]}^{-1}$), то при збільшенні швидкості передачі символів у каналі зв'язку до 2,3 Мбіт/с найбільша продуктивність спостерігається при використанні QAM-64. При подальшому збільшенні швидкості перевагу має QAM-16, за якої максимальне значення продуктивності рівне 15,75 Мбіт/с, коли $V_C = 6,3 \text{ Мбіт/с}$. При досягненні швидкості більше 10 Мбіт/с абсолютну перевагу має QPSK, сигнали якої більш завадостійкі, ніж сигнали з більшою кратністю маніпуляції.

Отримані значення продуктивності зведено в таблицю.

Порівняно з випадком без кодування екстремуми продуктивності досягають менших значень (8,1 замість 11,5 Мбіт/с при QAM-64 та 15,75 замість 23,5 Мбіт/с при QAM-16 (див. таблицю)) та спостерігаються за менших значень швидкості передачі символів (відповідно при 2,1 замість 4,8 Мбіт/с для QAM-64 та при 6,3 замість 17 Мбіт/с для QAM-16 (див. таблицю)). Це зумовлено тим, що частина ресурсу витрачається на завадостійке кодування, і чим вища швидкість передачі, тим більше символів йде на підтримання достовірності.

Висновки

Аналіз залежностей пропускної здатності (див. рис. 1) та продуктивності без кодування (див. рис. 2) сигналів різної кратності маніпуляції показав наявність екстремуму за відповідних енергетичних обставин у каналі. Варто відзначити, що сигнали QAM-16 у точці екстремуму є продуктивнішими, ніж сигнали QAM-64. Це свідчить про раціональність використання сигналів QAM-64 у малозональних безпроводових системах (наприклад, LTE), на відміну від сигналів QAM-16, які доцільно застосовувати в крупнозональних безпроводових системах (наприклад, UMTS).

Наявність екстремумів пропускної здатності та продуктивності зумовлена перевищенням темпу зменшення нелінійного множника над лінійним ростом швидкості передачі символів V_C .

Аналіз залежності продуктивності сигналів багатопозиційної маніпуляції при використанні завадостійкого кодування показує, що за невеликої швидкості передачі символів найбільшу продуктивність мають сигнали QAM-64, поки не досягають свого максимального значення. При подальшому збільшенні швидкості ефек-

тивнішим стає використання QAM-16, за якого продуктивність може досягти максимального значення. Найбільшу завадостійкість серед досліджуваних видів маніпуляції має QPSK, яку доцільно використовувати, коли продуктивність сигналів QAM-16 стає меншою за продуктивність сигналів QPSK.

Найефективнішим використання енергетичних і частотних ресурсів каналів зв'язку є в точці екстремуму продуктивності, тому у випадку знаходження зліва від максимуму доцільно збільшувати швидкість передачі символів, а у

випадку знаходження справа від максимуму – можна зменшити енергію сигналу. В обох випадках продуктивність, тобто фактична швидкість передачі корисної інформації, буде збільшуватись. При цьому потрібно враховувати, що змінюються параметри завадостійкого кодування, що дає змогу забезпечити необхідну достовірність.

Наступним етапом дослідження продуктивності завадозахищених систем буде пошук оптимального набору кодів для підтримки необхідної достовірності.

Список літератури

1. Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks / C.-X. Wang, F. Haider, X. Gao et al. // *IEEE Commun. Mag.* – 2014. – 52, № 2. – P. 122–130.
2. Худяков Г. Развитие теории оценивания пропускной способности систем электро- и радиосвязи // *Компоненты и технологии.* – 2011. – № 7. – С. 147–154.
3. Ong L., Johnson S.J., Kelleth C.M. An optimal coding strategy for the binary multi-way relay channel // *IEEE Commun. Lett.* – 2010. – 14, № 4. – P. 330–332.
4. *Исследование LDPC кодов (сборник статей). Часть 2 /* Под ред. Е.А. Крука. – СПб: СПбГУАП, 2006. – 49 с.
5. Gallager R.G. *Information Theory and Reliable Communication.* – J. Wiley&Sons, Inc., 1968. – 250 p.
6. Uryvsky L., Moshynska A. The analysis of the transmission system productivity to discrete information near-by the border Shannon in the conditions of the real anti-interference coding // *X Int. PhD Workshop OWD'2008, Oct. 18–21 2008, Poland, Gliwice.* – Gliwice, 2008. – P. 573–579.
7. Прокус Дж. Цифровая связь / Пер. с англ.; под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
8. Moshynska A. The productivity analysis of discrete information transfer system near the Shannon border // *Inform. Telecommun. Sci.* – 2015. – № 2. – P. 5–12.
9. Урывский Л.А., Прокопенко Е.А., Вергун С. Исследование экстремумов производительности в дискретных каналах связи с кодированием // *Наукові записки Укр. НДІ зв'язку.* – 2014. – № 5 (33). – С. 20–26.

References

1. C.-X. Wang *et al.*, “Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks”, *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 122–130, 2014.
2. G. Hudiakov, “Development of the evaluation capacity theory of electricity and radio systems”, *Komponenti i Teknologii*, no. 7, pp. 147–154, 2011 (in Russian).
3. L. Ong *et al.*, “An optimal coding strategy for the binary multi-way relay channel”, *IEEE Commun. Lett.*, vol. 14, no. 4, pp. 330–332, 2010.
4. *Research of LDPC Codes (Miscellanea of Articles). Part 2*, E.A. Kruk, Ed. St. Petersburg, Russia: StPbGUAP, 2006 (in Russian).
5. R.G. Gallager, *Information Theory and Reliable Communication.* J. Wiley&Sons, Inc., 1968.
6. L. Uryvsky and A. Moshynska, “The analysis of the transmission system productivity to discrete information near-by the border Shannon in the conditions of the real anti-interference coding”, in *Proc. X Int. PhD Workshop OWD'2008*, Gliwice, Poland, Oct. 18–21, 2008, pp. 573–579.
7. J.G. Proakis, *Digital Communications*, D.D. Klovskii, Ed. Moscow, Russia: *Radio i Svyaz*, 2000 (in Russian).
8. A. Moshynska, “The productivity analysis of discrete information transfer system near the Shannon border”, *Inform. Telecommun. Sci.*, no. 2, pp. 5–12, 2015.
9. L. Uryvsky *et al.*, “Research extrema performance in discrete communication channels with coding”, *Naukovi Zapiski Ukrainskogo Naukovo-Doslidnogo Institutu Zv'yazku*, no. 5 (33), pp. 20–26, 2014 (in Ukrainian).

Л.О. Уривський, А.В. Мошинська, С.М. Вергун

АНАЛІЗ ПРОДУКТИВНОСТІ ЗАВАДОЗАХИЩЕНИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАВАННЯ ДИСКРЕТНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Проблематика. Необхідність ефективного використання енергетичного та частотного ресурсів каналів телекомунікацій.

Мета дослідження. Головним завданням роботи є аналіз продуктивності дискретного каналу зв'язку через виявлення закономірностей поведінки достовірності демодульованих сигналів багатопозиційної маніпуляції при використанні надлишкових завадостійких кодів.

Методика реалізації. Оцінка пропускної здатності та пошук екстремуму продуктивності ведуться в умовах поступового збільшення швидкості передачі символів. Потенційна завадостійкість оцінюється заданим значенням імовірності помилки $p_{\text{бит}}$ у каналі передачі зі сталими параметрами при впливі флуктуаційної завади типу білого гауссового шуму, яка досягається за рахунок корегування достовірності на виході демодулятора за допомогою завадостійкого коду.

Результати дослідження. Аналіз залежностей пропускної здатності та продуктивності без кодування та з кодуванням сигналів різної кратності маніпуляції показав наявність екстремуму за відповідних енергетичних умов у каналі. При цьому в точці екстремуму сигнали QAM-16 є продуктивнішими, ніж сигнали QAM-64. Це свідчить про раціональність використання сигналів QAM-64 у малозональних безпроводових системах (наприклад, LTE), на відміну від сигналів QAM-16, які доцільно застосовувати в крупнозональних безпроводових системах (наприклад, UMTS).

Висновки. Найефективніше використання енергетичних і частотних ресурсів каналів зв'язку спостерігається в точці екстремуму продуктивності за точно визначених значень швидкості передавання, тому у випадку знаходження зліва від максимуму доцільно збільшувати швидкість передачі символів, а у випадку знаходження справа від максимуму можна зменшити енергію сигналу.

Ключові слова: пропускна здатність; продуктивність каналу; ймовірність помилки; багатопозиційні сигнали; екстремуми продуктивності.

Л.А. Урывский, А.В. Мошинская, С.Н. Вергун

АНАЛИЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ДИСКРЕТНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Проблематика. Необходимость эффективного использования энергетического и частотного ресурсов каналов телекоммуникаций.

Цель исследования. Главной задачей в работе выступает анализ производительности дискретного канала связи путем выявления закономерностей поведения достоверности демодулированных сигналов многопозиционной манипуляции при использовании избыточных помехоустойчивых кодов.

Методика реализации. Оценка пропускной способности и поиск экстремума производительности ведутся в условиях постепенного увеличения скорости передачи символов. Потенциальная помехоустойчивость оценивается заданным значением вероятности ошибки $p_{\text{бит}}$ в канале передачи с постоянными параметрами при влиянии флуктуационной помехи типа белого гауссового шума, которая достигается за счет коррекции достоверности на выходе демодулятора с помощью помехоустойчивого кода.

Результаты исследования. Анализ зависимостей пропускной способности и производительности без кодирования и с кодированием сигналов различной кратности манипуляции показал наличие экстремума при соответствующих энергетических обстоятельствах в канале. При этом в точке экстремума сигналы QAM-16 являются более продуктивными, чем сигналы QAM-64. Это свидетельствует о рациональности использования сигналов QAM-64 в малозональных беспроводных системах (например, LTE), в отличие от сигналов QAM-16, которые целесообразно применять в крупнозональных беспроводных системах (например, UMTS).

Выводы. Эффективное использование энергетических и частотных ресурсов каналов связи наблюдается в точке экстремума производительности при точно определенных значениях скорости передачи, поэтому в случае нахождения слева от максимума целесообразно увеличивать скорость передачи символов, а в случае нахождения справа от максимума можно уменьшить энергию сигнала.

Ключевые слова: пропускная способность; производительность канала; вероятность ошибки; многопозиционные сигналы; экстремумы производительности.

Рекомендована Радою
Інституту телекомунікаційних систем
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
22 січня 2016 року