

СЕРКОВ О. А., д.т.н., професор (Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»),
ТРУБЧАНИНОВА К. А., д.т.н., професор (Український державний університет залізничного транспорту),
КАСІЛОВ О. В., к.т.н., доцент (Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»),
ЛИСЕЧКО В. П., к.т.н., доцент (Український державний університет залізничного транспорту)

Теорія інформації та системи безпроводного зв'язку

Проведено аналіз властивостей інформації та визначено основні етапи її життєвого циклу. Рекомендовано підвищувати ефективність цифрових систем безпроводного зв'язку шляхом збільшення інформаційної ємності сигналу, використовуючи технологію надширокопasmового зв'язку. Розширення бази інформаційного сигналу слід здійснювати за рахунок одночасного кодування, модуляції та синхронізації інформаційного біта. Рекомендовано порівняльний аналіз інформаційних систем здійснювати з використанням інтегрального показника інформаційної ефективності, складовими якого є показники енергетичної та частотної ефективності.

Ключові слова: властивості інформації, ентропія, ефективність інформаційної системи, критерій ефективності.

Вступ

З переходом до постіндустріальної інформаційної фази інформація та інформаційна інфраструктура суспільства займають одне з центральних місць. При цьому питання оцінювання якості і ефективності систем передачі інформації стають все більш актуальними. Це обумовлює необхідність оцінювання ризиків спотворення і втрати інформації в системах передачі, особливо в системах безпроводного зв'язку.

Постановка проблеми, аналіз досліджень і публікацій

Розробляються рекомендації щодо підвищення ефективності інформаційних цифрових систем безпроводного зв'язку. При цьому центральним питанням дослідження є подальший розвиток теорії інформації з урахуванням особливостей технічних характеристик каналів зв'язку.

Задачі теорії інформації. При становленні та розвитку теорії інформації як математичної теорії зв'язку [1] у природознавчих науках склалося декілька точок зору. У вузькому класичному розумінні теорія інформації призначена для вирішення завдань підвищення ефективності функціонування систем зв'язку. Це задачі формалізації опису джерел інформації, їхнього оптимального кодування, а також визначення гранично припустимих якостей каналів зв'язку. У той же час теорія інформації призначена

оптимізувати системи зв'язку взагалі шляхом розв'язання багатокритеріальних задач із урахуванням математичних моделей різних елементів. Такий підхід є результатом розвитку класичної теорії та її додатків у галузі зв'язку.

Один із підходів до визначення кола завдань у рамках теорії інформації – це вирішення всіх проблем і завдань, до формулювання яких входить поняття інформації [2].

У класичній шеннонівській теорії інформації термін «інформація» використовують як синонім терміна «кількість інформації», що має строге математичне визначення. Це поняття пов'язане з іншим центральним поняттям цієї теорії – «ентропія». Кількість інформації H (у бітах), необхідної та достатньої для повного зняття невизначеності про стан об'єкта, що має N рівноймовірних станів, вимірюється як логарифм з основою 2 з кількості можливих станів.

$$H = \log_2 N.$$

Ентропія є кількісною мірою статистичної невизначеності, а інформація – різницею ентропії до отримання інформації та ентропії, що залишилася після зняття частини невизначеності.

$$I = \log_2 \frac{p_1}{p_2} = \log_2 p_1 - \log_2 p_2,$$

де p_1 – апіорна імовірність стану об'єкта;

p_2 – апостеріорна імовірність стану об'єкта.

У загальному випадку ступінь невизначеності стану об'єкта залежить від кількості його можливих станів та імовірності цих станів. Джерело інформації може однозначно і повно характеризувати ансамбль станів $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ відповідно з імовірностями $\{p(u_1), p(u_2), \dots, p(u_n)\}$ кожного стану за умов, що сума всіх станів складає 1. У цьому випадку як кількісна міра інформації, як невизначеність обрання дискретним джерелом станів ансамбля U може бути використана запропонована К. Шенноном у 1946 р. величина, що отримала назву ентропії дискретного джерела інформації або ентропії кінцевого ансамблю [3]. Вона характеризує невизначеність, яка в середньому припадає на один стан ансамблю.

$$H(U) = -\sum_{n=1}^N p_n \log_2 p_n.$$

Коли невизначеність знята повністю, то ентропія чисельно дорівнює інформації. Однак такий підхід має обмеження у випадку нестатистичного характеру невизначеності. До недоліків чисельного значення ентропії, як виміру невизначеності, відносять і той факт, що вона може набувати безкінечно великих значень. Причому класичну (шеннонівську) теорію інформації, за Хеммінгом, наводять у вигляді математичної теорії про подання символів довільної природи в деякому фіксованому алфавіті.

Із розвитком додатків на термін «інформація» накладається все більше навантаження, доки це поняття не стало в один ряд з такими поняттями, як матерія та енергія. Із філософської точки зору, інформація – це властивість матеріальних об'єктів відбиватися. У широкому сенсі поняття інформації завжди пов'язане з її фіксацією на деякому матеріальному носії. Причому інформація наводиться в деякій системі символів, яку вивчає семіотика на трьох рівнях:

- синтаксичний рівень, що досліджує внутрішні властивості текстів;
- семантичний рівень, що формує та вивчає відношення між текстом і тим, що він означає в навколишньому світі;
- прагматичний рівень, що вивчає відношення між текстом і тим, хто його використовує.

Інтуїтивним поданням поняття «інформація» є деякі дані чи повідомлення. Причому у класичній

теорії інформації підкреслено, що під інформацією розуміють ті повідомлення, які знімають невизначеність, вимірювану чисельно ентропією.

У той же час усіма прийнято, що інформація подається в деякій знаковій системі (кодування) і має бути зафіксованою на деякому матеріальному носії. Поза фіксацією інформації не існує. У зв'язку з цим загальновизначеними властивостями інформації є:

1. *Фіксованість* інформації. Інформація може існувати тільки на деякому матеріальному носії.

2. *Інваріантність* інформації відносно природи носіїв. Одна й та сама інформація може бути записаною будь-якою мовою, за допомогою будь-якого алфавіту (системи знаків) на різних носіях.

3. *Кінцевий об'єм* інформації. Інформація надається визначеною кінцевою кількістю елементарних символів деякого алфавіту.

4. *Бренність* інформації. Властивість інформації знищуватися і старіти як у випадку руйнування носія інформації, так і в результаті процесів її використання.

5. *Транслявання, розмноження та мультиплікативність* інформації. Властивість інформації бути перезаписаною на інший носій або інший екземпляр, а також можливість існування однієї і тієї самої інформації у вигляді декількох копій.

6. *Дієвість* інформації як первинна властивість для побудови деякого оператора цілеспрямованої діяльності.

7. *Семантика*. Інформація повинна мати деякий сенс, щоб її можна було використати з тією чи іншою метою.

8. *Поліпотентність* інформації – можливість її використання для різних цілей.

9. *Цінність* інформації – властивість проявлятися в матеріалізованому вигляді при побудові різних операторів.

10. *Повнота* інформації про деякий об'єкт характеризує здатність повного відновлення на гранті цього об'єкта.

При цьому визначають основні етапи життєвого циклу інформації:

1. *Народження інформації* – створення змісту інформації та її носіїв.

2. *Розвиток (накопичення) інформації* – збільшення об'єму інформації та організація інформаційних зв'язків, запис її на інформаційні носії.

3. *Старіння інформації* – зменшення об'єму, втрата зв'язків всередині інформаційного простору.

4. *Загибель інформації* – зменшення інформаційного об'єму до нуля бітів, втрата семантичних зв'язків та інформації, руйнування носіїв інформації.

При аналізі інформації існує два підходи.

Перший ґрунтується на тому, що система символів (понятійний апарат) створюється людиною під час її

пізнавальної діяльності. При цьому система поглядів на суть інформації включає наявність інформації тільки там, де є свідомість, визнає вторинність символу в пізнавальній діяльності людини, а також обмеженість об'єму інформації про об'єкт.

Інший підхід ґрунтується на тому, що символи започатковано надсистемою, а людина наповнює їх змістом у процесі життєдіяльності. З цих позицій виникають альтернативні погляди на суть інформації. Це присутність інформації повсюди як у матеріальному світі, так і світі духовному, визнання первинності символу і того факту, що повна інформація про об'єкт може бути нескінченною.

У той же час топологічні форми конкретних фізичних об'єктів створюють інформаційні структури, які називають формовими статичними торсійними полями. Таке поле визначають як інформаційне поле, що переносить інформацію про процеси, що проходять у фізичних об'єктах. Причому навколо цих топологічних форм існують зони, де можливий інформаційний контакт, що ґрунтується не просто на впливі подразника на органи чутливості людини, а на безпосередній взаємодії з інформаційними структурами людини, її мозком. При цьому слід зазначити, що ці поля мають високу проникну здатність [4]. Тому вони проходять через природні середовища без ослаблення. Їх неможливо екранувати натурними матеріалами.

Такий підхід, що розглядає інформаційні поля як матеріальні, згладжує відмінності між існуючими двома підходами, об'єднуючи їх, і дозволяє розглядати поняття «інформація» з єдиних матеріалістичних позицій.

Отже, інформація є універсальною властивістю матерії, що являє собою розповсюдження у просторі та часі змісту об'єктів або дійсності за допомогою існуючих носіїв різної природи. При цьому основним завданням теорії інформації є забезпечення надійної неспотвореної передачі інформації з метою створення ефективних інформаційних систем з максимальною точністю при мінімальних затратах.

Викладення основного матеріалу

Інформація та сигнали. Для передачі інформації на відстань використовують сигнали, що несуть інформацію. При цьому виникає питання щодо інформаційної ємності сигналу, що суттєво залежить від типу сигналу та визначає вимоги до каналів передачі даних каналами зв'язку. Одночасно з цим технічні характеристики каналів зв'язку визначають вимоги до інформаційної ємності сигналів, що передаються цим каналом.

Передача каналами зв'язку безперервних сигналів можлива за умов, коли максимальна частота інформаційного сигналу F_{max} не перевищує граничної

частоти F_{np} пропускної спроможності каналу зв'язку.

Для оцінювання граничної інформаційної ємності безперервного сигналу слід виконати його дискретизацію з граничним інтервалом $\tau = 1/2F_{max}$,

що дозволяє відновити сигнал без втрати інформації.

Прийнявши повну тривалість сигналу за t_s , кількість відділків складе

$$N = \frac{t_s}{\tau} = 2F_{max}t_s.$$

У випадку використання несинусоїдальних сигналів вони випромінюються до вільного простору без несучої частоти. Розширення смуги основного інформаційного сигналу здійснюють шляхом множення його з послідовністю двійкових сигналів. Причому важливим параметром, що впливає на розширення смуги сигналу, є мінімальна тривалість імпульсів у двійковій послідовності. У випадку використання імпульсів тривалістю $1 \dots 0,1$ нс отримуємо ширину смуги сигналу, що практично дорівнює 10 ГГц. Розподіл енергії в цій смузі частот зменшує спектральну щільність потужності до таких малих рівнів, що випромінювання неможливо зафіксувати за допомогою звичайного контрольного обладнання, яке використовує відносно малу смугу частот. Вказаний діапазон частот обумовлено тим, що загасання радіосигналу в цьому діапазоні практично відсутнє.

Надширокосмугові сигнали є найбільш придатними для вирішення практичних завдань при організації безпроводного зв'язку. Розширення інформаційної бази сигналу найбільш ефективно реалізують під час створення ансамблю складного сигналу шляхом його одночасного кодування та модуляції, що дозволяє найповніше використовувати шеннонівську пропускну здатність каналу з високою достовірністю передачі інформації без суттєвого підвищення співвідношення сигнал/шум на вході приймача. При використанні складного сигналу, коли біт інформації передається за період T_C двійковою числовою послідовністю, його базу визначає таке співвідношення [5, 6]:

$$B_C = \frac{T_C}{\tau_C},$$

де τ_C – тривалість елементарного символу (чипа) числової послідовності.

Отже, збільшення бази сигналу при збереженні швидкості передачі інформації можливе шляхом

зменшення тривалості чипа τ_C . У той же час широка смуга частот і надкоротка тривалість чипа потребують підвищення вимоги до точності синхронізації. Інформаційні сигнали та сигнали синхронізації знаходяться на одному енергетичному рівні, а спектральна щільність усіх каналів – на рівні шумів. Тому при передачі інформації каналом зв'язку значно зростає імовірність бітових похибок, зменшення яких можливе через створення складної сигнально-кодової конструкції за рахунок одночасного завадостійкого кодування, синхронізації та модуляції інформаційного біта. У результаті інформаційний сигнал відокремлений від опорного на одному бітовому інтервалі T_C , займає велику смугу частот і має значно меншу його інтенсивність. Розширення спектра призводить до того, що сигнал більш рівномірно розподілений у визначеній області спектра, що підвищує завадостійкість інформації та знижує імовірність його перехоплення за рахунок відсутності синхронізованої копії розширювального сигналу. Однак оцінювання ефективності інформаційних систем потребує застосування відповідних критеріїв.

Критерій ефективності інформаційних систем

Технічний ефект інформаційної системи визначає кількість і якість переданої інформації [7] за деякий проміжок часу або одиницю часу. Це швидкість передачі R (біт/с) та імовірність похибки P при передачі дискретних повідомлень.

Показники енергетичної $\beta = \frac{R_i N_0}{P_C}$ і частотної

ефективності $\gamma = \frac{R_i}{F_C}$ визначають витрати цих ресурсів. У цих співвідношеннях P_C – потужність сигналу, F_C – смуга частот сигналу, R_i – швидкість передачі.

Об'єднуючи ці показники, отримуємо інтегральний показник інформаційної ефективності

$$\eta = \frac{R_i}{C},$$

де C – пропускна здатність каналу зв'язку.

Він є найбільш загальним показником, що визначає технічний ефект інформаційної системи. Коефіцієнти β і γ можливо розрахувати для більшості реальних систем з метою їх порівняння. Змінюючи ці взаємопов'язані характеристики, виникає можливість оцінити ступінь впливу реальних каналів зв'язку та неідеальності параметрів пристроїв

приймання/передачі інформаційних сигналів для визначення їхнього оптимального співвідношення

$$\beta = \frac{\gamma}{2^\gamma - 1}. \text{ При } \eta = 1 \text{ отримуємо граничну}$$

залежність між β та γ (межа Шеннона), при якій будь-який радіоканал буде мати гірші характеристики за енергетичною та частотною ефективністю.

Пропускна здатність каналу з адитивним гаусовим шумом складає

$$C = \log \left(\frac{P_C}{P_{ш}} + 1 \right), \text{ біт/с,} \tag{1}$$

чи при розрахунках на один символ

$$C_n = 0.5 \log \left(\frac{P_C}{P_{ш}} + 1 \right). \text{ біт/відлік.}$$

Отже, як узагальнюючий показник технічного ефекту інформаційної системи введено коефіцієнт використання пропускної здатності каналу зв'язку (інформаційна ефективність).

$$\eta = \frac{R_i}{C} = 1 - \chi, \tag{2}$$

де $\chi = \frac{(C - R_i)}{C} = 1 - \eta$ – надлишковість каналу зв'язку.

З урахуванням співвідношень (1) і (2) маємо

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

При цьому β/γ -діаграми дають змогу достатньо швидко обирати параметри інформаційної системи, що задовольняють задані вимоги, або здійснити її оптимізацію за коефіцієнтами β/γ [8].

Висновки

Показано, що використання технології надширокопasmових сигналів дає змогу здійснити безпроводну приховану передачу інформації з малою потужністю випромінювання. Тому ефективність цифрових систем зв'язку суттєво збільшується за рахунок створення ансамблю складного сигналу шляхом одночасного кодування, модуляції та синхронізації інформаційного біта, що розширює його інформаційну базу, забезпечуючи при цьому прихованість та енергетичну ефективність у

двійковому симетричному каналі. Розподіл у часі синхроімпульсу та інформаційного сигналу в межах тривалості інформаційного біта дає змогу гарантовано забезпечити вимоги завадостійкості, прихованості та безпеки каналів безпроводного зв'язку за рахунок передачі інформації сигналами з невеликою потужністю випромінювання. Велика база сигналу забезпечує усталену беззавадову роботу цифрової інформаційної системи зв'язку також у випадку знаходження рівня інформаційного сигналу нижче рівня шуму.

Список використаних джерел

1. Shannon C. E. Collected Papers / Edited by N.J.A Sloane and Aaron D. Wyner. IEEE press, 1993. 923 p.
2. Кожевников В. Л., Кожевников А. В. Теорія інформації та кодування: навч. посіб. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2011. 108 с.
3. Курко А. М., Решетник В. Я. Введення в теорію інформації: навч. посіб. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017. 108 с.
4. Іващенко П. В. Основи теорії інформації: навч. посіб. Одеса: ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2015. 53 с.
5. Serkov A., Trubchaninova K., Mezitis M. Method of wireless transmission of digital information on the basis of ultra-wide signals. *Advanced Information Systems*. 2019. Vol.3, No. 4. P. 33-38.
6. Lazurenko B. A., Serkov A. A., Trubchaninova K. A., Horiushkina A. E. Security Improvement Techniques for mobile applications of Industrial Internet of Things. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*. 2020. Vol. 20, No. 5. P. 145-149.
7. Спосіб передачі інформації надширокопasmовими імпульсними сигналами: пат. на винахід UA 123519 Україна МПК Н04В 1/02 / Б. О. Лазуренко, В. Я. Певнєв, О. А. Серков, В. А. Ткаченко, В. С. Харченко; заявка № а 2019 05980; подана 30.05.2019; опубл. 14.04.2021, Бюл. № 15.
8. Надширокопasmова антена з мерехтливою поляризацією та спосіб її збудження: пат. на винахід UA 126475 Україна МПК Н01Q 21/06, Н01Q 13/08 / С. В. Панченко, О. А. Серков, К. А. Трубочанинова, М. С. Курцев, Б. О. Лазуренко; заявка № а 2019 08720; подана 19.07.2019; опубл. 13.10.22, Бюл. № 41.

Serkov O., Trubchaninova K., Kasilov O., Lysechko V. Information theory and wireless communication systems.

Abstract. An analysis of information properties was carried out and the main stages of its life cycle were determined. It is recommended to increase the efficiency

of digital wireless communication systems by increasing the information capacity of the signal using ultra-broadband communication technology. Ultra-broadband signals are the most suitable for solving practical problems in the organization of wireless communication. It is shown that the use of technology of ultra-broadband signals allows wireless hidden transmission of information with low radiation power. Therefore, the efficiency of digital communication systems is significantly increased due to the creation of a complex signal ensemble by simultaneous coding, modulation and synchronization of an information bit, which expands its information base, while ensuring stealth and energy efficiency in a binary symmetric channel. The time distribution of the sync pulse and the information signal within the duration of the information bit makes it possible to guarantee the requirements of immunity, stealth and security of wireless communication channels due to the transmission of information by signals with low radiation power. A large signal base ensures stable, trouble-free operation of the digital information communication system even when the level of the information signal is below the noise level. However, the evaluation of the effectiveness of information systems requires the application of appropriate criteria. It is recommended to carry out a comparative analysis of information systems using an integral indicator of information efficiency, the components of which are indicators of energy and frequency efficiency.

Keywords: information properties, entropy, information system efficiency, efficiency criteria

Надійшла 17.01.2023 р.

Серков Олександр Анатолійович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри систем інформації, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна.

E-mail: aleksandr.serkov@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-6446-5523>.

Трубочанинова Карина Артурівна, доктор технічних наук, професор, професор кафедри транспортного зв'язку, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна.

E-mail: tka2@ukr.net <https://orcid.org/0000-0003-2078-2647>.

Касілов Олег Вікторович, кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри систем інформації, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна.

E-mail: o.kasilov@hotmail.com <https://orcid.org/0000-0002-8524-2345>.

Лисечко Володимир Петрович, кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри транспортного зв'язку, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна.

E-mail: lysechkov@ukr.net <https://orcid.org/0000-0002-1520-9515>.

Serkov Oleksandr, Doctor of sciences (engineering), Full Professor, Professor of Information Systems Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine.

E-mail: aleksandr.serkov@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-6446-5523>.

Karyna Trubchaninova, Doctor of sciences (engineering), Full Professor, Professor of Transport Communication Department, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: tka2@ukr.net <https://orcid.org/0000-0003-2078-2647>.

Kasilov Oleg, PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Professor of Information Systems Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine.

E-mail: o.kasilov@hotmail.com <https://orcid.org/0000-0002-8524-2345>.

Lysechko Volodymyr, PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Professor of Transport Communication Department, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: lysechkov@ukr.net <https://orcid.org/0000-0002-1520-9515>.