

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2022-48-20>

УДК 621.391.8

Залужний Олексій Вікторович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-8722-4087>

Радзівілов Григорій Данилович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-6047-1897>

Козубцова Леся Михайлівна, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-7866-8575>

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, м. Київ, Україна

АНАЛІЗ ЦИФРОВИХ МЕТОДІВ МОДУЛЯЦІЇ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАВАДОСТІЙКИХ КОДІВ У СИСТЕМАХ ОДНОСТОРОННЬОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ

Залужний О.В., Радзівілов Г.Д., Козубцова Л.М. Аналіз цифрових методів модуляції та особливостей застосування завадостійких кодів у системах одностороннього радіозв'язку. Проведено аналіз цифрових методів модуляції та особливостей використання завадостійких кодів у системах радіозв'язку з односторонньою передачею дискретних повідомлень. Визначено напрямки досліджень, що направлені на підвищення достовірності передачі інформації при обмеженому частотному, часовому, енергетичним ресурсі та в умовах відсутності інформації про факт посилки корисного сигналу і можливості адаптації до сигнально-завадової обстановки.

Ключові слова: системи одностороннього радіозв'язку, цифрові методи модуляції, завадостійке кодування, завадостійкість.

Zaluzhnyi O., Radzivilov H., Kozubtsova L. Analysis of digital modulation methods and features of the use of error-correcting codes in one-way radio communication systems. The analysis of digital modulation methods and features of the use of error-correcting codes in radio communication systems with one-way transmission of discrete messages is carried out. The directions of researches are determined, which are aimed at increasing the reliability of information transmission with a limited frequency, time and energy resource, in the absence of information about the fact of sending a useful signal and the possibility of adapting to a signal-interference environment.

Keywords: one-way radio communication systems, digital modulation methods, noise immunity coding, noise immunity.

Постановка завдання і зв'язок її з важливими науковими завданнями. Сучасні тенденції розвитку телекомунікаційних систем, в основному, спрямовані на підвищення швидкості передачі даних та ефективності використання частотного ресурсу. Проте для систем телеметрії, моніторингу віддалених об'єктів та оповіщення основним завданням є максимізація надійності та достовірності доведення інформації. Останнє є важливим при використанні їх в умовах проведення спеціальних операцій, для охорони підприємств, установ, організацій, що можуть стати об'єктом терористичних атак та ін. Для покращення електромагнітної сумісності різних засобів, зменшення енергоспоживання, масо габаритних показників, затрат на розгортання та експлуатацію обладнання, а також, що особливо важливо, з метою приховати місце знаходження кореспондента, окреме місце у вказаних системах, як вітчизняного так і зарубіжного виробництва знаходить одностороння радіопередача [1 – 6]. Основними недоліками якої є відсутність інформації про факт посилки корисного сигналу і можливості адаптації до сигнально-завадової обстановки. Часто в таких системах обмеженим є вибір оптимальних методів модуляції і способів прийому та обробки сигналів, завадостійкого кодування, що зумовлено обмеженим частотним, часовим, енергетичним ресурсом і необхідністю функціонуванням в умовах високого насичення радіоефіру та впливу засобів радіоелектронної боротьби противника. У зв'язку з цим, важливим завданням є здійснення аналізу цифрових методів модуляції (далі – методів маніпуляції) та завадостійкого кодування, за критерієм мінімуму середнього значення ймовірності помилки на біт, з метою визначення перспектив їх використання в системах одностороннього радіозв'язку (СОР).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З аналізу результатів досліджень за обраним напрямком можна зробити висновок, що вони, переважно, спрямовані на підвищення ефективності використання частотного, енергетичного ресурсу при забезпеченні необхідної швидкості та завадостійкості передачі інформації [7 – 13]. Проте відсутній узагальнений аналіз методів маніпуляції та особливостей використання завадостійких кодів в сучасних СОР. Основним завданням яких є доведення інформації з високою достовірністю в довільно складній завадовій обстановці.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.

Одностороння радіопередача застосовується в розвідувально-сигналізаційних системах [1, 2]. В технологіях Internet of Things (IoT) з односторонніми протоколами взаємодії (напр.: технологія Sigfox та Weightless-N) [3, 4], у системах радіозв'язку короткохвильового діапазону при передачі тактичних повідомлень ("Military Messaging", протокол ACP 142 (A)) [5, 6] та ін. Визначаючими факторами, що впливають на завадостійкість прийому повідомлень в цих системах є обрані методи маніпуляції, завадостійкого кодування, способи прийому та обробки сигналів.

Технологія Sigfox [4] підтримує як односторонній так і двосторонній режим роботи. В односторонньому режимі передача інформації здійснюється тільки висхідною лінією. Для досягнення великої дальності зв'язку при обмеженій потужності передачі (максимальна потужність передачі становить 25 мВт) використовується ультра-вузькосмуговий діапазон частот. Бітова швидкість на фізичному рівні – 100 біт/с (в Європі). Використовується differential binary phase-shift keying (DBPSK) маніпуляція. Завадостійкі коди з виправленням помилок не застосовуються [14].

Технологія Weightless-N [3, 15] повністю базується на односторонній радіопередачі висхідною лінією. Всі пристрої відправляють повідомлення на центральну базову станцію без синхронізації та підтвердження. В системі використовується DBPSK маніпуляція в поєднанні з згортковим кодом, що дозволяє виправляти помилки [16].

В стандартизованих цифрових модемах засобів радіозв'язку КХ діапазону в складній завадовій обстановці використовується BPSK маніпуляція в поєднанні зі згортковим кодом, швидкість якого обмежується необхідною пропускну здатністю каналу [17].

Таким чином, в розглянутих системах з односторонньою радіопередачею здебільшого використовується DBPSK та BPSK маніпуляція. Доцільність використання таких методів маніпуляції пояснюється результатами розрахунків, що здійснені за аналітичними виразами, які наведено в [10, 11]. При цьому кількісною мірою завадостійкості COP, що визначає достовірність прийнятого сигналу при впливові завад є ймовірність помилки на біт [10].

При когерентній (КГ) обробці сигналів з BPSK, binary frequency shift keying (BFSK) та binary amplitude shift keying (BASK) маніпуляцією достовірність прийому повідомлення в каналі з білим гаусовим шумом визначається за узагальненою формулою [10]:

$$p_{\text{біт}} = Q(\sqrt{\alpha\gamma_{\text{біт}}}), \quad (1)$$

де коефіцієнт $\alpha = 2$ для сигналів з BPSK, $\alpha = 1$ для – BFSK, $\alpha = 0,5$ для – BASK; $\gamma_{\text{біт}} = E_{\text{біт}}/N_0$ – відношення енергії біта $E_{\text{біт}}$ до спектральної щільності потужності шуму N_0 (ВЦШ); $p_{\text{біт}}$ – ймовірність помилки на біт; $Q(x)$ – функція, яка використовується для визначення площі під частиною гаусівської функції щільності розподілу ймовірностей.

Ймовірності помилки на біт для КГ приймання сигналів з DBPSK розраховується за наступним аналітичним виразом [10, 11]:

$$p_{\text{біт}} = 2Q(\sqrt{2\gamma_{\text{біт}}}) \cdot (1 - Q(\sqrt{2\gamma_{\text{біт}}})) \quad (2)$$

Значення $p_{\text{біт}}$ при некогерентній (НКГ) DBPSK визначається за формулою [10, 11]:

$$p_{\text{біт}} = 0,5 \cdot e^{-\gamma_{\text{біт}}} \quad (3)$$

Результати розрахунків, що зроблені за формулами (1), (2), (3) наведено на рисунку 1. Вони свідчать про те, що найбільшу потенційну завадостійкість мають сигнали з фазовою та відносно фазовою (при КГ чи НКГ прийомі) видами маніпуляції. Перехід від BPSK до DBPSK призводить до погіршення завадостійкості, яке стає все суттєвішим з зменшенням ВЦШ (при $p_{\text{біт}} = 10^{-1}$ енергетичний вигравш від використання сигналів з BPSK в порівнянні з DBPSK становить 2 дБ). Використання когерентного DBPSK у порівнянні з некогерентним дає незначний енергетичний вигравш.

З метою здійснення аналізу завадостійкості сигналів з різними видами фазової маніпуляції в реальному, наприклад – релейському каналі було проведено розрахунки за аналітичними виразами, які наведено в [11, 12].

Ймовірність помилки на біт в релейському каналі для сигналів з BPSK визначається як:

$$p_{\text{біт}} = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\gamma_b}{\gamma_b + 1}} \right) \quad (4)$$

Ймовірність помилки на біт в релеевському каналі для сигналів з КГ DBPSK обчислюється за наступним аналітичним виразом:

$$P_{\text{біт}} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{4}{\pi} \sqrt{\frac{\gamma_b}{\gamma_b + 1}} \cdot \arctan \sqrt{\frac{\gamma_b}{\gamma_b + 1}} \right). \quad (5)$$

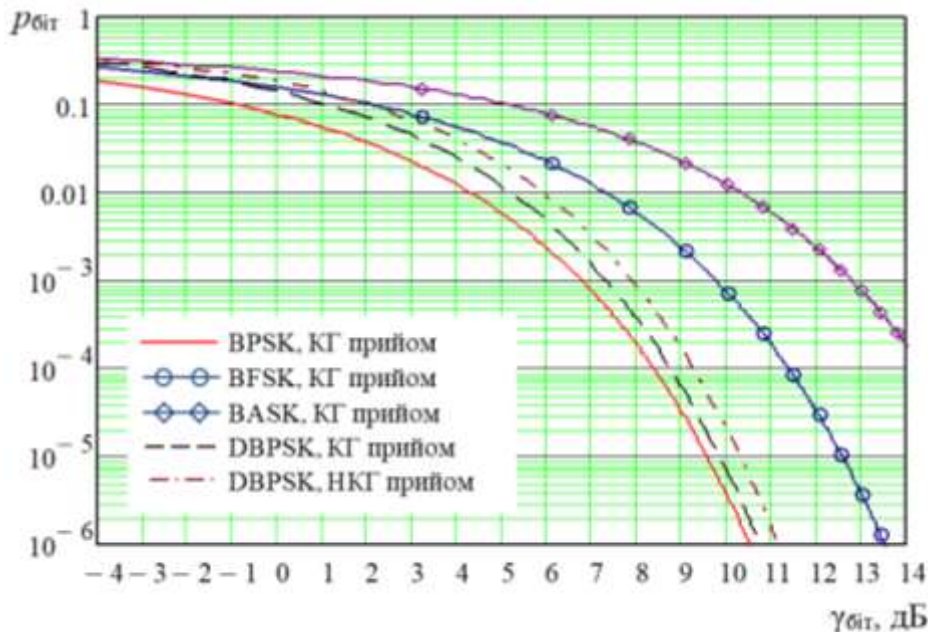


Рис. 1. Ймовірність помилки на біт для сигналів з BPSK, BFSK, BASK, DBPSK

Ймовірність помилки на біт в релеевському каналі для сигналів з НКГ DBPSK розраховується за формулою:

$$P_{\text{біт}} = \frac{1}{2\gamma_b + 2}. \quad (6)$$

Результати розрахунків, які зроблені за формулами (4), (5), (6) наведено на рисунку 2, з яких видно, що перехід від DBPSK до BPSK в релеевському каналі дозволить підвищити завадостійкість прийому повідомлень (енергетичний виграв становить 2 – 2,5 дБ). Втрати при переході від КГ DBPSK до НКГ DBPSK є незначними.

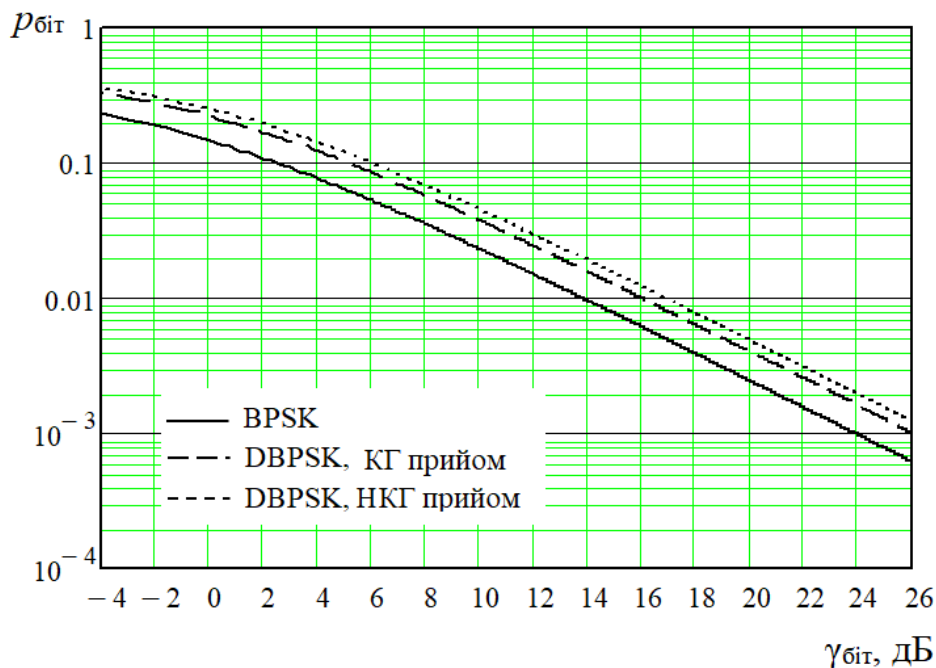


Рис. 2. Ймовірність помилки на біт для сигналів з BPSK, DBPSK при КГ та НКГ прийомі в релеєвському каналі

Загалом варто зазначити, що при односторонній передачі, в основному, використовується DBPSK маніпуляція. Такий вибір є цілком обґрунтованим, адже відомо, що сигнали з BPSK, хоч і є більш завадостійкими, проте потребують складних схем оцінки фази, які б забезпечили когерентний прийом та мінімізували можливість виникнення явища зворотної роботи. Якщо початкова фаза елементів сигналу, що приймається – невідома і не може бути оцінена за передісторією то когерентний демодулятор просто непрацездатний. [11]. Тому для досягнення найкращих результаті по достовірності передачі повідомлень в СОР необхідно вирішувати завдання з побудови ефективних схем оцінки фази прийнятого сигналу з BPSK.

Крім вибору методів маніпуляції з потенційно високою завадостійкістю, зменшення ймовірності помилкового прийому символу повідомлення при передачі його по радіоканалу може бути досягнуто шляхом застосування коректуючих кодів. Однак в складній заводовій обстановці та умовах активного впливу засобів радіоелектронної боротьби противника, обмеженому часовому, частотному ресурсі їх використання ускладнюється і може призвести до розмноження помилок [18 – 20]. У цьому випадку, одним з шляхів підвищення достовірності є використання мажоритарного принцип кодування, який по своїй суті не призводить до виникнення вказаного явища. Така його особливість є основною підставою для використання при постановці різних видів навмисних завод. Воно полягає в тому, що в канал посиляється непарне число разів одне і те ж повідомлення, а на приймальній стороні відбувається порівняння між собою однойменних кодових комбінацій (або однойменних двійкових розрядів). На прийомі обирається та кодова комбінація (або біт), яка була прийнята більше число разів [21].

Ймовірність помилкового прийому двійкового символу повідомлення при використанні мажоритарного кодування визначається за виразом [21]:

$$p_{\text{бітмаж}} = \sum_{i=\frac{c+1}{2}}^c C_c^i \cdot p_{\text{біт0}}^i \cdot (1 - p_{\text{біт0}})^{c-i}, \quad (7)$$

де c – кількість повторів передачі повідомлення або біта;

$p_{\text{біт0}}$ – бітова помилка без використання надлишкового кодування.

Результати розрахунків, що отримані за формулою (7) для різної міри надлишковості та в умовах складної заводовій обстановки наведено в таблиці 1. Вони свідчать про те, що використання такого способу завадостійкого кодування дозволяє підвищити достовірність прийому навіть в критичній заводовій обстановці ($p_{\text{біт0}} = [0,3; 0,2; 0,1; 10^{-1}; 10^{-2}]$), проте з зменшенням $p_{\text{біт0}}$ вигравш зменшується.

Таблиця 1. Залежність $p_{\text{біт}}$ від кратності мажоритарного кодування

Надлишковість кодування c	Ймовірність помилки на біт			
	0.3	0.2	10^{-1}	10^{-2}
без кодування	0.3	0.2	10^{-1}	10^{-2}
3	0.22	$1.04 \cdot 10^{-1}$	$2.8 \cdot 10^{-2}$	$2.98 \cdot 10^{-4}$
5	0.16	$5.79 \cdot 10^{-2}$	$8.56 \cdot 10^{-3}$	$9.85 \cdot 10^{-6}$
7	0.12	$3.33 \cdot 10^{-2}$	$2.73 \cdot 10^{-3}$	$3.4 \cdot 10^{-7}$
9	$9.98 \cdot 10^{-2}$	$1.96 \cdot 10^{-2}$	$8.91 \cdot 10^{-4}$	$1.22 \cdot 10^{-8}$
11	$7.82 \cdot 10^{-2}$	$1.17 \cdot 10^{-2}$	$2.96 \cdot 10^{-4}$	$4.43 \cdot 10^{-11}$
13	$6.24 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$9.93 \cdot 10^{-5}$	$1.63 \cdot 10^{-11}$
15	$5 \cdot 10^{-2}$	$4.24 \cdot 10^{-3}$	$3.36 \cdot 10^{-5}$	$6.05 \cdot 10^{-13}$

Недоліком мажоритарного кодування є те, що надлишковість інформації зростає пропорційно кількості повторень одного і того ж повідомлення (біта), аналогічно зростають і витрати часу на передачу усього блоку. З урахуванням цього, актуальним є вирішення завдань щодо зменшення надлишковості мажоритарного кодування при необхідному рівні достовірності передачі даних.

Необхідно зазначити, що застосування методів завадостійкого кодування в розглянутих системах можливе тільки за рахунок зменшення швидкості передачі повідомлень і ні в якому разі шляхом збільшення ансамблю сигналів. Це пов'язано з тим, що в розглянутих СОР використовуються бінарні методи маніпуляції. Тому потрібно враховувати максимально допустимий час для передачі повідомлень.

Висновки та перспективи подальшого дослідження.

Отже варто підкреслити, що для забезпечення максимально-можливої завадостійкості односторонньої передачі дискретних повідомлень у розглянутих системах доцільно використовувати сигнали з BPSK маніпуляцією в поєднанні з мажоритарним кодуванням. При цьому необхідно вирішити завдання щодо оцінки фази прийнятого сигналу та оптимального вибору надлишковості мажоритарного кодування.

Можливими напрямками подальших досліджень є здійснення аналізу ефективності існуючих методів оцінки фази прийнятого сигналу з BPSK маніпуляцією та їх вдосконалення. Вирішення завдань щодо оптимального вибору надлишковості мажоритарного кодування для підвищення достовірності прийому повідомлень в СОР.

Список бібліографічного опису

1. Військова розвідка: навч. посібник. Київ: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2016. 335 с.
2. Нікіфоров М. М., Жиров Г. Б., Пампуха І. В. Можливості інтегрованої системи пасивного моніторингу простору в умовах застосування високоточної зброї. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. 2016. Вип. 54. С. 55-62. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpviku_2016_54_9.
3. MAC Layer Protocols for Internet of Things. Luiz Oliveira, Joel J. P. C. Rodrigues, Sergei A. Kozlov, Ricardo A. L. Rabêlo, Victor Hugo C. de Albuquerque. *Journal Future Internet*. 2019. Vol. 11(1). P. 16. URL: https://www.researchgate.net/publication/330381472_MAC_Layer_Protocols_for_Internet_of_Things_A_Survey/fulltext/5c3d680992851c22a375d03d/MAC-Layer-Protocols-for-Internet-of-Things-A-Survey.pdf.
4. A Sigfox Energy Consumption Model. Carles Gomez, Juan Carlos Veras, Rafael Vidal, Lluís Casals. *Journal Sensors*. 2019. Vol. 19. P. 681. URL: https://www.researchgate.net/publication/330947889_A_Sigfox_Energy_Consumption_Model/fulltext/5c5ced9d45851582c3d5a09e/A-Sigfox-Energy-Consumption-Model.pdf.
5. Steve Kille. Nato military messaging. *MilsatMagazine*. 2008. November. P. 71. URL: http://www.milsatmagazine.com/2008/Nov08_MSM.pdf.
6. ACP 142(A). P_MUL – a protocol for reliable multicast in bandwidth constrained and delayed acknowledgement (EMCON) environments. *Unclassified CCEB publication*. 2008. 58 p. URL: <http://www.cfars.ca/ACPs/acp142/ACP142A.pdf>.
7. Мальцев Г.Н. Чернявский Е.В. Кодирование сообщений в системах радиуправления без обратного информационного канала. *Информационно-управляющие системы*. 2011. № 4. С. 60.
8. Васильківський М.В., Мельничук О.І., Реаскос С. Підвищення завадостійкості систем телеметрії на основі IoT технології. *Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи: всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція*. (Вінниця, 11–30 трав. 2019 р.). ВНТУ, 2019. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2019/paper/viewFile/6391/5260>.
9. Зайцев С.В. Методи та моделі забезпечення сталої достовірності інформації у безпроводових системах передачі даних: дис. д-ра техн. наук: 05.13.06. Чернігів, 2016. 397 с.
10. Корнейко О.В., Кувшинов О.В., Лежнюк О.П., Лівенцев С.П. Теорія електров'язку: підручник. Київ: НВП Славутин-Дельфін, 2006. Т.2. 292 с.
11. Окунев Ю.Б. Цифровая передача информации фазоманипулированными сигналами. Москва: Радио и связь, 1991. 296 с.
12. Вовченко В.С., Нух Таха Насиф., Видничук А.Г., Лихоман А.А. Анализ вероятности битовой ошибки в релейских каналах связи SISO. *Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій "PT – 2013"*: матеріали 9-ої міжнародної молодіжної науково-технічної конференції (м. Севастополь, 2013 р.). Севастополь: Севастопольський національний технічний університет, 2013. С. 149.
13. Прокис Дж. Цифровая связь. Пер. с англ. под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.
14. Vuurman B., Kamruzzaman J., Karmakar G. and S. Islam. Low-Power Wide-Area Networks: Design Goals, Architecture, Suitability to Use Cases and Research Challenges. *in IEEE Access*, vol. 8, pp. 17179-17220, 2020, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2968057.
15. Abbas R., Al-Sherbaz A., Bennecer A., Picton P. A new channel selection algorithm for the Weightless-N Frequency Hopping with lower collision probability. 8th International Network of the Future (NoF) Conference Proceedings. London: IEEE (In Press). 2017. URL: <http://nectar.northampton.ac.uk/id/eprint/9777>.
16. Bembe, M., Abu-Mahfouz, A., Masonta, M. A survey on low-power wide area networks for IoT applications. *Telecommun Syst* 71, 249–274 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11235-019-00557-9>.
17. MIL-STD-188-110D. Interoperability and performance standards for data modems. 2017. 270 p. URL: <http://tracebase.nmsu.edu/hf/MIL-STD-188-110D.pdf>.

18. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. Москва: Техносфера, 2005. 320 с.
19. Самойленко С.И., Давыдов А.А., Золотарев В.В., Третьякова Е.И. Вычислительные сети: адаптивность, помехоустойчивость, надежность. Москва: Наука, 1981. 277 с.
20. Золотарев В.В. Теория и алгоритмы многопорогового декодирования // Под научной редакцией члена-корреспондента РАН Ю.Б.Зубарева. М.: «Радио и связь», «Горячая линия – Телеком», 2006. 276 с.
21. Спилкер Дж. Цифровая спутниковая связь. Пер. с англ.; под ред. В.В. Маркова. Москва: Связь, 1979. 592 с.

References

1. Zaitsev D.V., Nakonechnyi A.P., Pakhariev S.O., Lutsenko I.O. Military intelligence: textbook. Kyiv: Kyiv University Publishing and Printing Center Kyivskiy universytet, 2016. 335 p. (in Ukrainian).
2. Nikiforov N.N., Zhyrov G.B., Pampuha I.V. Possibilities of the integrated system of passive monitoring of space in the conditions of application of the high-precision weapon. *Scientific works collection of the Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv*. 2016. Vip. 54. pp. 55-62. (in Ukrainian).
3. MAC Layer Protocols for Internet of Things. Luiz Oliveira, Joel J. P. C. Rodrigues, Sergei A. Kozlov, Ricardo A. L. Rabêlo, Victor Hugo C. de Albuquerque. *Journal Future Internet*. 2019. Vol. 11(1). P. 16. URL: https://www.researchgate.net/publication/330381472_MAC_Layer_Protocols_for_Internet_of_Things_A_Survey/fulltext/5c3d680992851c22a375d03d/MAC-Layer-Protocols-for-Internet-of-Things-A-Survey.pdf.
4. A Sigfox Energy Consumption Model. Carles Gomez, Juan Carlos Veras, Rafael Vidal, Lluís Casals. *Journal Sensors*. 2019. Vol. 19. P. 681. URL: https://www.researchgate.net/publication/330947889_A_Sigfox_Energy_Consumption_Model/fulltext/5c5ced9d45851582c3d5a09e/A-Sigfox-Energy-Consumption-Model.pdf.
5. Steve Kille. Nato military messaging. *MilsatMagazine*. 2008. November. Pp. 71. URL: http://www.milsatmagazine.com/2008/Nov08_MSM.pdf.
6. ACP 142(A). P_MUL – a protocol for reliable multicast in bandwidth constrained and delayed acknowledgement (EMCON) environments. *Unclassified CCEB publication*. 2008. 58 p. URL: <http://www.cfars.ca/ACPs/acp142/ACP142A.pdf>
7. Maltsev G.N., Cherniavskiy E.V., Coding of messages in radio control systems without reverse information channel. *Information and management systems*. 2011. № 4. Pp. 60. (in Russian).
8. Vasylykivskiy M.V., Melnychuk O.I., Reaskos S. Increasing noise immunity of telemetry systems based on IoT technology. Youth in science: research, problems, prospects: All-Ukrainian scientific-practical Internet conference. 2019 Vinnytsia: VNTU, 2019. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2019/paper/viewFile/6391/5260>. (in Ukrainian).
9. Zaitsev S.V. Methods and models for ensuring the constant reliability of information in wireless data transmission systems: dis. dr. tech. science: 05.13.06. Chernihiv, 2016. 397 p. (in Ukrainian).
10. Kornieiko O.V., Kuvshynov O.V., Lezhniuk O.P., Liventsev S.P. Theory of telecommunication: textbook. Kyiv: Slavutych-Delfin, 2006. Vol.2. 292 p. (in Ukrainian).
11. Okunev Yu.B. Digital transmission of information by phase-manipulated signals. Moscow: Radio and Communication, 1991. 296 p. (in Russian).
12. Vovchenko V.S., Nuh Taha Nasif., Vidnichuk A.G., Likhoman A.A. Bit error probability analysis in SISO relay communication channels. *Modern problems of radio engineering and telecommunications "RT - 2013"*: materials of the 9th International Youth Scientific and Technical Conference (Sevastopol, 2013). Sevastopol: Sevastopol National Technical University, 2013. P. 149. (in Russian, in Ukrainian).
13. Prokis J. Digital communication. Translation from English. Under the editorship of D.D. Kloviskiy. - M.: Radio and communication, 2000. 800 p. (in Russian).
14. Buurman B., Kamruzzaman J., Karmakar G. and S. Islam. Low-Power Wide-Area Networks: Design Goals, Architecture, Suitability to Use Cases and Research Challenges. in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 17179-17220, 2020, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2968057.
15. Abbas R., Al-Sherbaz A., Bennecer A., Picton P. A new channel selection algorithm for the Weightless-N Frequency Hopping with lower collision probability. 8th International Network of the Future (NoF) Conference Proceedings. London: IEEE (In Press). 2017. URL: <http://nectar.northampton.ac.uk/id/eprint/9777>.
16. Bembe, M., Abu-Mahfouz, A., Masonta, M. A survey on low-power wide area networks for IoT applications. *Telecommun Syst* 71, 249–274 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11235-019-00557-9>.
17. MIL-STD-188-110D. Interoperability and performance standards for data modems. 2017. 270 P. URL: <http://tracebase.nmsu.edu/hf/MIL-STD-188-110D.pdf>.
18. Morelos-Zaragosa R. The art of error-correcting coding. Methods, algorithms, application. Moscow: Technosphere, 2005. 320 p. (in Russian).
19. Samoilenko S.I., Davydov A.A., Zolotarev V.V., Tretyakova E.I. Computing networks: adaptability, noise immunity, reliability. Moscow: Nauka, 1981. 277 p. (in Russian).
20. Zolotarev V.V. Theory and algorithms of multithreshold decoding. M.: "Radio and Communication", "Hotline – Telecom", 2006. 276 p. (in Russian).
21. Spilker J. Digital satellite communication. Translation from English; under the editorship of V.V. Markov. Moscow: Communications, 1979. 592 p. (in Russian).