

УДК 621.391

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/15>**Шмігель Б.О.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Григоренко О.Г.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Стаття присвячена актуальній проблемі сучасного суспільства – задоволенню потреб у забезпеченні стійкого зв'язку в умовах низької енергетики ліній зв'язку, завод та багатопроменевого розповсюдження. Безпроводові мережі займають ключову роль у разі необхідності оперативного розгортання, мобільності, гнучкості організації мережі, у багатьох випадках будучи єдиним економічно виправданим рішенням. Однією із ключових задач забезпечення функціонування безпроводової мережі є забезпечення надійного та продуктивного передавання інформації в умовах обмежених ресурсів, зокрема, енергетичних.

В літературі широкопугові сигнали (ШСС) розглядається як один з методів підвищення заводостійкості каналу, однак властивостей таких сигналів в умовах обмеженого ресурсу та енергії сигналу не досліджено. ШСС в порівнянні зі вузькосмуговими сигналами (ВСС) мають багато цінних властивостей: високу достовірність передачі інформації в каналах з багатопроменевим поширенням і в переважаних ділянках діапазону, більшою стійкістю по відношенню до прицільних перешкод, кращою скритністю. ШСС мають потенціал для підвищення заводостійкості, проте для їх ефективного використання у системах телекомунікацій потрібно зрозуміти їх поведінку та характеристики в умовах низької енергетики. Тому тема дослідження є актуальною.

У статті розглянуто характеристики сигналів багатопозиційної маніпуляції в умовах низької енергетики, та порівняно ефективність використання сигнально-кодових конструкцій та ШСС. Для визначення доцільності використання ШСС в умовах низької енергетики, побудовано модель оцінки каналів передачі інформації та порівняно характеристики заводостійкості з ВСС та еквівалентною енергією сигналу. За отриманими показниками проведено оцінку впливу використання ШСС на показники функціонування, а також розглянуто пропозиції щодо їх впровадження та подальшого використання.

**Ключові слова:** заводостійкість, коефіцієнт бітових помилок, широкопуговий, вузькосмуговий, енергія, розширення спектру.

**Постановка проблеми.** Вирішення низки проблем розвитку радіотехнічних систем різного призначення призвело до ідеї широкопугових сигналів (ШСС). У вітчизняній та зарубіжній науці достатнього досліджені окремо умови використання ШСС, але немає досліджень властивостей цих сигналів в умовах низької енергетики. До того ж, тематика досягнення необхідної достовірності в низькоенергетичних каналах не досліджено. Тому тема дослідження є актуальною.

В багатьох випадках зручно представити ШСС як сигнальну конструкцію, що складається із певної кількості  $n$  «елементів»  $S_c(t)$ , кожен з яких може розглядатися як простий сигнал тривалістю  $T$  з власним значенням амплітуди, фази або частоти.

Широкопуговими сигналами (ШСС) називають такі сигнали, у яких добуток ширини спектра  $F$  на тривалість елемента сигналу  $T$  багато більше одиниці, тобто база сигналу  $B$ :

$$B = FT \gg 1. \quad (1)$$

Для широкопугових сигналів характерним база сигналу значно більше одиниці (частіше значення  $B$  досягає 1000 і більше).

Якщо джерело повідомлень формує символи тривалістю  $\tau_s$ , відповідно, із швидкістю  $V_s = 1/\tau_s$ , то при заданій потужності сигналу в точці прийому  $P_c$  енергетичний фактор  $h^2$  для ВСС складає:

$$h^2 = \frac{E_s}{N_0} = \frac{P_c \cdot \tau_s}{N_0}. \quad (2)$$

Відповідно, такий сигнал займає смугу частот  $\Delta F_c \approx V_s$ .

Якщо енергію ВСС поділити між  $n$  елементами ШСС з такою ж потужністю, то тривалість елемента складатиме:  $T = \tau_s / n$ , а смуга частот сигналу:

$$\Delta F \approx \frac{1}{T} = n \cdot \left( \frac{1}{\tau_s} \right) \approx n \cdot \Delta F_c. \quad (3)$$

Добуток  $\Delta FT = B$  має назву бази ШСС і чисельно співпадає з  $n = B$ . Результируюча енергія всіх  $n$  «елементів»  $S_c(t)$  дорівнює енергії ВСС  $E_s$ .

Отже, широкосмугові сигнали можна розглядати як похідні від відповідних вузькосмугових сигналів з рівною еквівалентною енергією. Відношення сигнал-шум  $h^2$  для вузькосмугового сигналу ділиться на  $B$  для кожного окремого символу ШСС  $S_c(t)$ :  $h_c^2 = h^2/B$ . Саме це є фактором скритності ШСС.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** З літератури [1–3] відомо, що одним із запропонованих методів підвищення завадостійкості є застосування систем з широкосмуговими сигналами. Пояснюється це тим, що широкосмуговий радіозв'язок в порівнянні зі вузькосмуговими сигналами (ВСС) має багато цінних (особливо для військової радіозв'язку) властивостей: високою достовірністю передачі інформації в каналах з багатоприменовим поширенням і в переважаних ділянках діапазону, більшою стійкістю по відношенню до приціпних перешкод і кращою скритністю.

Також відомо, що ШСС можуть забезпечити високу достовірність прийому з невеликими коливаннями ймовірності помилок, в той час як при ВСС іноді (при відсутності перешкоди на даній частоті) достовірність зв'язку буде дуже високою, а іноді дуже низькою. Це обумовлено тим, що в смузі частот вузькосмугового сигналу спектральна щільність перешкод може сильно флюктувати, а в смузі частот ШСС вона змінюється мало. З розширенням смуги відбувається усереднення діючих в цій смузі перешкод.

Інша проблема пов'язана з розвитком систем передачі інформації. Тут виник конфлікт між бажанням, з одного боку, передати з граничною швидкістю якнайбільше інформації, а з іншого боку забезпечити високу достовірність прийому. Принципове вирішення цієї суперечності належить К. Шеннону, який ввів поняття пропускної спроможності каналу  $C$  і показав:

$$C = F \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right), \quad (4)$$

де  $F$  – смуга частот, що відводиться передачі інформації,  $F=1/T$ ,  $S$  і  $N$  – потужності сигналу та шуму, відповідно. Слід зазначити, що з  $S/N \ll 1$  формула (4) перетворюється на (1). Дійсно, співвідношення (4) можна переписати у такому вигляді:

$$\frac{1}{\log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right)} = F \cdot T. \quad (5)$$

При  $\frac{S}{N} \ll 1$  ліва частина рівності прямує до нескінченності. Таким чином, застосування складних широкосмугових сигналів дозволяє забезпечити теоретично будь-яку достовірність передачі інформації.

Звідси випливає ще одна дуже важлива властивість систем з ШСС – здатність працювати «під

шумами» ( $S \ll N$ ). З одного боку, це скритність роботи радіотехнічної системи, з іншого – можливість ущільнення діючих каналів зв'язку і передачі інформації. Отже, найбільш серйозні проблеми радіолокації, передачі інформації та зв'язку вирішуються складних широкосмугових сигналів.

**Метою статті** є визначення властивостей ШСС на основі моделей оцінки якості каналів зв'язку, а також порівняти характеристики завадостійкості з ВСС та еквівалентною енергією сигналу.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо показники завадостійкості системи ШСС з активною паузою і протилежними сигналами, як одну із найбільш завадостійких [1]. Будемо вважати, що генератор шуму передавального пристрою генерує нормальний шум з рівномірним спектром в полосі частот  $F$ , а на вхід приймального пристрою, крім корисного сигналу, поступає адитивна завада в виді нормального білого шуму в смузі частот корисного сигналу.

Тоді вираз для залежності ймовірності помилки інформаційного біта  $p_b$  від відношення потужності сигнал/шум (параметра  $h^2$ ) у автокореляційній системі з активною паузою і протилежними сигналами має вигляд [1]:

$$P_b(h^2) = \frac{1}{2} \left[ 1 - \Phi \left( \frac{h^2}{\sqrt{\frac{5h^4}{2FT} + 4h^2 + 2FT}} \right) \right]. \quad (6)$$

Для порівняння показників ШСС з показниками достовірності ВСС при побудові графіків для сигналу з фазовою маніпуляцією, скористаємося співвідношенням [6]:

$$P_{bPSK}(h^2) = \frac{1}{2} [1 - \Phi(\sqrt{2h^2})] \quad (7)$$

Відповідно до формул, побудуємо графіки залежності ймовірності бітової помилки  $p_b$  від енергетичного потенціалу в радіолінії  $h^2$ .

Проведемо аналіз поведінки виразу (6):

$$P_b(h^2) = \frac{1}{2} \left[ 1 - \Phi \left( \frac{h^2}{\sqrt{\frac{5h^4}{2FT} + 4h^2 + 2FT}} \right) \right] = \frac{1}{2} \left[ 1 - \Phi \left( \frac{1}{\sqrt{\frac{5}{2FT} + \frac{4}{h^2} + \frac{2FT}{h^4}}} \right) \right] \quad (8)$$

З формули випливає, що при рості бази сигналу  $B$ , зростає аргумент функції Крампа і це призводить до збільшення ймовірності помилки. Аргумент функції є монотонно зростаючим і не має екстремумів для допустимих значень  $h^2 > 0$ . З ростом  $h^2$ , відбувається незначне покращення завадостійкості, що в свою чергу сповільнюється з ростом  $B$ . Тому при великих значеннях бази сигналу, приріст завадостійкості з ростом  $h^2$  є незначним.

При  $h^2 \rightarrow \infty$ , ймовірність помилки асимптотично наближається до значень:

$$P_b = \frac{1}{2} \left[ 1 - \Phi \left( \sqrt{\frac{2B}{5}} \right) \right] \quad (9)$$

Оптимальне значення бази, при якому забезпечується мінімум ймовірності помилки, дорівнює:

$$(FT)_0 = \sqrt{\frac{2B}{5}} h^2 \approx 1,12 h^2 \quad (10)$$

При цьому завадостійкість системи буде мати вигляд:

$$P_b = \frac{1}{2} \left[ 1 - \Phi \left( \frac{h}{2\sqrt{2}} \right) \right] \quad (11)$$

Порівнюючи завадостійкість ШСС та ВСС, бачимо, що при однакових значеннях  $h^2$  вузькосмугові сигнали мають кращу завадостійкість в порівнянні з широкосмуговими. Наприклад, для забезпечення достовірності  $10^{-6}$  для ФМ достатньо значення  $h^2=10.5$  дБ.

Одночасно, із графіків (рис.1) видно, що при зростанні бази  $B$ , необхідно збільшувати  $h^2$  для досягнення еквівалентної достовірності сигналу.

Для широкосмугового сигналу для забезпечення достовірності  $10^{-6}$  при  $B=100$  необхідно забезпечити  $h^2=19.8$  дБ, при  $B=1000$  –  $h^2=22.4$  дБ, а при  $B=10000$  –  $h^2=27$  дБ. Це пояснюється тим, що потужність завад в смузі частот  $F$  при використанні ШСС накопичується, в цієї смузі в  $B$  раз більше шумів в порівнянні зі смугою вузькосмугового сигналу. Поряд з цим, ця закономірність витікає також із виразу (6).

Подібну закономірність можна побачити й на прикладі іншого виду широкосмугового сигналу.

Для ймовірності помилки для сигналів з кореляційно-часовою модуляцією при автокореляційній системі обробки маємо наступний вираз [1]:

$$p = \frac{1}{2} \left[ 1 - \Phi \left( \frac{h^2 \sqrt{FT}}{\sqrt{9h^4 + 16h^2 FT + 8(FT)^2}} \right) \right] \quad (12)$$

В автокореляційній системі ймовірність помилки залежить не тільки від відношення енергії сигналу до спектральної щільності флуктуаційної завади  $h^2$ , але і від значень бази  $B = FT$  відповідних сигналів.

Залежність ймовірності помилки від  $h^2$  для різних значень бази сигналу подано на рис. 2.

Можна бачити, що й в цьому випадку зростання бази має наслідком зменшення завадостійкості системи передавання сигналів, хоча спосіб модуляції та спосіб обробки сигналу змінено.

Отже, системи з розширенням спектру не дають виграшу в завадостійкості при однакових значеннях енергії сигналу. Оскільки смуга частот є обмеженою і витратною, то розширювати її

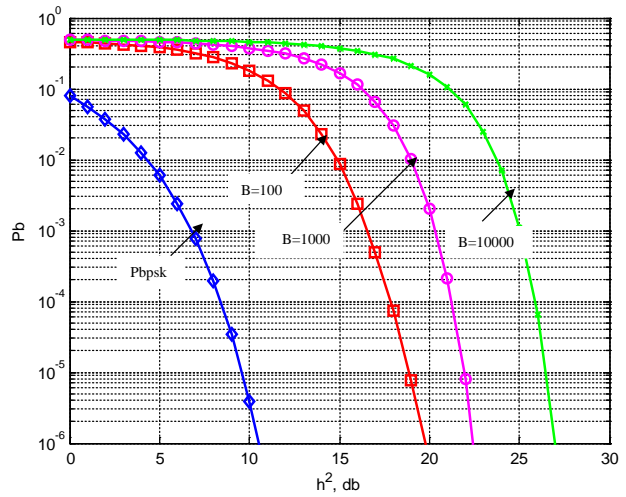


Рис. 1. Порівняння завадостійкості широкосмугового сигналу з активною паузою і протилежними сигналами та вузькосмугового сигналу ФМ з еквівалентною потужністю

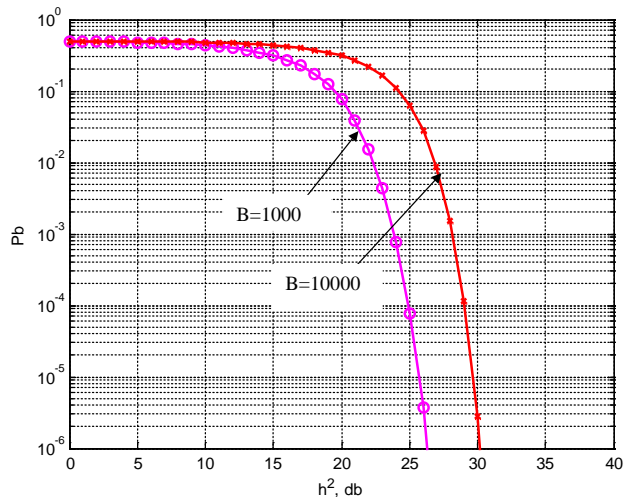


Рис. 2. Завадостійкість ШСС з АКФ з кореляційно-часовою модуляцією

недоцільно при звичайному функціонуванні телекомунікаційної системи. У випадку, коли частоти регламентовані і регулюються, то не може йти річ про взаємні перешкоди в заданій смузі частот.

Використання ШСС доцільне тільки у випадку неорганізованої чи вразливої телекомунікаційної системи (наприклад, при загрозі дії потужних вузькосмугових завад). Тому використання ШСС має сенс з точки зору або досягнення підвищеної скритності (за рахунок зниження в  $B$  раз відношення сигнал/завада), або протидії потужній вузькосмуговій заваді. Прикладом такого використання є військова сфера, щоб отримати зв'язок в умовах перешкод з боку противника, а також забезпечити скритність електромагнітних сигналів при невеликій кількості випромінювачів.



Загальна вимога скритності радіозв'язку розпадається на три самостійних вимоги: по-перше, забезпечення скритності самого факту роботи радіолінії (передавача), по-друге, забезпечення скритності факту наявності в даному сигналі інформації; по-третє, забезпечення скритності самої інформації [1].

Всім цим трьома вимогам широкопasmові системи радіозв'язку задовольняють, як правило, в дещо більшою мірою, ніж звичайні, вузькопasmові. Як вже говорилося вище, в широкопasmових системах застосовуються складні сигнали з базою  $FT \gg 1$ . Виявляється, що при використанні таких сигналів прийом дискретної інформації може здійснюватися при потужності сигналу, що припадає на одиницю смуги частот, меншою спектральної потужності флюктуаційних перешкод у використовуваній смузі частот, тобто передача під шумом. Іншими словами, виявляється можливим вести прийом, коли звичайний вузькопasmовий приймач просто не буде сприймати сигнал [1].

#### Висновки:

1. Властивість широкопasmовості сигналів не забезпечує кращої достовірності в порівнянні

з вузькопasmовими сигналами при однаковій потужності.

2. При розширенні спектру сигналу накопичується в  $B$  раз більше шумів в порівнянні з вузькопasmовими сигналами. Системи з розширенням спектру не дають виграшу в завадостійкості, а являються інструментом забезпечення функціонування системи зв'язку в особливих умовах.

3. Використання широкопasmових сигналів доцільне тільки для протидії вузькопasmовим завадам, які займають тільки частину смуги частот і для забезпечення скритності електромагнітних сигналів у спеціальних сферах використання.

4. Якщо ШСС має обмеження в ресурсі (обмежена енергія сигналу), то вони ведуть до втрати завадостійкості або розтрати ресурсу, коли є намагання відновити вихідну достовірність.

5. Засобом, що дозволяє підвищити достовірність прийому є завадостійке кодування, однак декодер не може розрізнити спосіб обробки сигналу до його входу, тому при рівній енергетиці і однаковій швидкості символів джерела, ВСС мають перевагу і на цьому етапі обробки сигналів.

#### Список літератури:

1. Uryvsky L.O., Moshynska A.V., Shmihel B.O. Analysis of properties of the wideband signals in the low energy conditions. Sciences Of Europe vol 1. Praha, 2019. № 37. p. 60-63.
2. Бондаренко І.М. Системи радіозв'язку. Кн. 2, ч. 1. Радіолінії зв'язку. Навч. посібник. Харків: ХІ ВПС, 2003. 162с.
3. Мазурков М. І. Основи теорії передавання інформації. Одеса: Наука і техніка, 2005. 168 с.
4. О.В. Корнейко, О.В. Кувшинов, О.П. Лежнюк, С.П. Лівенцев, Л.М. Сакович, Л.О. Уривський. «Основи теорії телекомунікацій»: Підручник / За ред. М. Ю. Ільченка. Київ: Видавництво Інституту спеціального зв'язку та захисту інформації НТУУ «КПІ», 2010. 786 с.
5. Gallager R.G. Information Theory and Reliable Communication. Massachusetts Institute of Technology. New York: John Wiley and Sons, 1968. 720 pp.
6. J.G.Prokis, Masoud Salehi Digital Communication, 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2007. 1170 pp.

#### Shmigel B.O., Grygorenko O.G. ANALYSIS OF THE CHARACTERISTICS OF BROADBAND SIGNALS IN CONDITIONS OF LIMITED ENERGY

*The article is devoted to the urgent problem of modern society – meeting the needs for sustainable communication in conditions of low energy of communication lines, interference, and multipath propagation. Wireless networks have a key role in the case of the need for rapid deployment, mobility, flexibility of network organization, in many cases being the only economically viable solution. One of the key tasks of wireless network operation is to ensure reliable and productive information transmission in conditions of limited resources, in particular, energy resources.*

*In the literature, wideband signals (WBS) are considered as one of the methods for increasing the channel noise immunity, but the properties of such signals under conditions of limited signal resource and energy have not been studied. Compared to narrowband signals (NBS), WBS have many valuable properties: high reliability of information transmission in multipath channels and in congested areas of the range, greater resistance to targeted interference, and better secrecy. WBS have the potential to increase interference immunity, but for their effective use in telecommunications systems, it is necessary to understand their behavior and characteristics in low energy conditions. Therefore, the research topic is relevant.*

*The paper considers the characteristics of multi-position modulation signals in low energy conditions and compares the efficiency of using signal-code constructions and WBS. To determine the feasibility of using the WBS in low-energy conditions, a model for evaluation of information transmission channels is built and the noise immunity characteristics are compared with the NBS and the equivalent signal energy. Based on the obtained indicators, the impact of WBS on the performance indicators is assessed, and proposals for their implementation and further use are considered.*

**Key words:** noise immunity, BER, broadband, narrowband, energy, Spread spectrum.