

Микола Якович Павлушко (кандидат військових наук, доцент)¹

Олег Ігорович Богатов (кандидат технічних наук, доцент)²

Вікторія Петрівна Марко¹

¹ Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ, Україна

² Харківський Національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна

ОЦІНЮВАННЯ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ В СПОЛУЧЕНИХ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ В УМОВАХ ВПЛИВУ НЕУЗГОДЖЕНОСТЕЙ ЗА ЧАСОМ

У статті, на основі масового застосування шумоподібних сигналів для передачі інформації з синхронним забезпеченням в системах засобів зв'язку під час їх руху, а також радіолокації, радіонавігації та управління космічними апаратами, проаналізовано вимоги до методів передачі інформації та до характеристик пристроїв її обробки. Визначено особливості використання цифрових технологій під час передачі та обробки інформації в радіотехнічних, телеметричних системах і системах зв'язку, що є причиною широкого впровадження складних сигналів для забезпечення адресної передачі в умовах довільного доступу, а також скритності систем передачі даних. Виявлено потреби в підвищенні ступеня захисту інформації, що найгостріше проявилися з розвитком мікроелектроніки, створенням елементної бази з надвеликим ступенем інтеграції. Проведено оцінювання залежності ймовірності достовірного виявлення сигналів (помилкової тривоги), що визначатимуть якість функціонування і роботу різних систем від забезпечення інформаційної безпеки каналів збору інформації, їх завадостійкості. Враховано функціональні зв'язки між вимірювальними каналами радіотехнічних суміщених систем і проведено оцінювання показників якості їх функціонування в умовах впливу загальних неузгодженостей шкали часу та частоти засобів єдиного часу. Визначені межі неузгодженостей за часом, при яких забезпечується заданий рівень точності вимірів радіальної швидкості з урахуванням впливу зсуву за часом. Здійснено кількісне оцінювання впливу похибок схеми спостереження за затримкою каналу вимірювання дальності на похибки каналу вимірювання радіальної швидкості та показників якості функціонування каналу вимірювання швидкості суміщених систем з урахуванням впливу загальних неузгодженостей.

Ключові слова: показники якості функціонування; сумісна радіотехнічна система; широкопasmовий шумоподібний сигнал.

Вступ

Шумоподібні сигнали (далі – ШПС) – це сигнали в яких база сигналу B є результатом перемноження ширини спектра F на тривалість T ($B = F \times T$) і є більше одиниці. Ці сигнали досить часто використовуються для передачі інформації і забезпечення синхронізації у системах зв'язку з рухомими об'єктами, управління космічними апаратами, радіолокації та радіонавігації.

Сьогодні спостерігається швидке зростання кількості комплексів і систем управління та зв'язку, збільшення обсягу переданої ними інформації, що накладає жорсткі вимоги до методів передачі інформації і до характеристик пристроїв її обробки. Розвиток мікроелектроніки, створення елементної бази з надвеликим ступенем інтеграції призвели до широкого використання цифрових технологій під час передачі й обробки інформації в радіотехнічних, телеметричних системах і системах зв'язку. Особливістю цифрових систем передачі інформації (далі – СПІ) є широке використання складних сигналів, що забезпечують можливість адресної передачі та вибору абонентом

потрібного сигналу в умовах доступу багатьма станціями (довільного доступу), скритності роботи СПІ, підвищеної стійкості до навислих завад і ефективного використання каналів зв'язку.

Іншим актуальним завданням є підвищення рівня конфіденційності інформації, що передається радіоканалом. В умовах мирного часу, посилення конкурентної боротьби зростає роль захисту інформації в радіоканалах, що використовуються комерційними структурами. Забезпечення інформаційної безпеки каналів збору інформації стає ще більш актуальним в межах декларованої програми посилення антитерористичної діяльності та під час бойових дій.

Дослідження і підвищення завадостійкості систем, що використовують ШПС, є важливим завданням, тому що від цього залежить якість роботи багатьох систем: GPS, ГЛОНАСС, Galileo, закритих каналів передачі інформації, радіолокації, управління космічними і літальними апаратами та ін. Від завадостійкості таких каналів залежить ймовірність правильного виявлення сигналів

(помилкової тривоги), які й визначають якість роботи і безпеку різних систем.

Постановка проблеми. Аналіз існуючих методів оцінювання похибок вимірювальних каналів суміщених радіотехнічних систем (далі – СРС) з широкосмуговим шумоподібним сигналом (далі – ШПС) внаслідок загальних неузгодженостей [16–17] свідчить, що вони мають суттєві недоліки, наприклад:

зазначені методи не дають чіткого уявлення про фізику процесів, що відбуваються в СРС;

деякі розрахунки згідно формул, що застосовують ці методи, можуть призвести до прямо протилежних висновків стосовно функціонування реальних СС;

квадратична залежність зниження відношення сигнал/шум від неузгодженостей призводить до можливості збільшення цього відношення при $\Delta f^2 T^2 > 2$.

Зазначимо, що ці неузгодженості виникають внаслідок впливу похибок засобів єдиного часу і (або) через взаємний вплив у каналах систем. Тому доцільно здійснити кількісне оцінювання впливу похибок схеми спостереження за затримкою (далі – ССЗ) каналу вимірювання дальності на похибки каналу вимірювання радіальної (променевої) швидкості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теорія ШПС, а саме побудова сигналів, синтез методів, алгоритмів і пристроїв обробки досить широкого поширення набули з середини ХХ-го століття. Загальна теорія досить детально викладена в роботах В. Б. Пестрякова, В. П. Афанасьєва, В. Л. Гурвіча, А. Л. Алексєєва, Н. І. Смирнова, Уйдрю Б., Стирнз С. [1–6]. Добре відомі й широко використовуються ШПС – лінійні рекурентні послідовності максимального періоду, окремим випадком яких є послідовності Хаффмена або М-послідовності.

Простота їх формування і прийнятні кореляційні властивості зумовили впровадження сигналів у системи і комплекси управління, зв'язку, радіолокації і радіонавігації [16–17]. Використання ШПС з великою базою дає змогу підвищити надійність систем управління і зв'язку та збільшити роздільну здатність по відстані в системах виміру дальності [1; 2; 5–6]. Однак під час пошуку ШПС з великою базою виникає низка проблем, пов'язаних з мінімізацією часу входження в кодовий синхронізм. Серед методів пошуку і синхронізації ШПС, що не потребують окремого еталону часу (це дає змогу безпосередньо визначити затримку сигналу за часом) мінімальний час синхронізації, при невеликих значеннях сигнал/шум, мають методи паралельного аналізу сигналу з використанням багатоканальних кореляторів або узгоджених фільтрів, що розроблені в [1; 2; 5–7].

Наведені у згаданих вище джерелах методи розроблялися стосовно задачі обробки сигналу на тлі ідеалізованої завади – білого шуму і не враховують взаємовпливу використовуваних в СПІ сигналів. Так, рівень стійкості багатоканальних

пристроїв на основі кореляторів знижується при одночасній наявності на вході декількох сигналів [1; 2; 5; 6]. Відомі оптимальні методи обробки сигналів, за наявності завад від декількох абонентів, складні в реалізації і описанні [8; 9].

Однак, у деяких випадках, на вході приймального пристрою діють негауссівські завади різного виду і потужності. Крім завад природного походження (атмосферних і космічних шумів), в СПІ присутні взаємні (системні) завади, поява яких обумовлена квазіортогональністю прийнятих сигналів. Можуть спостерігатися також вузькосмугові завади від різних радіопристроїв, що працюють з системою зв'язку в загальному частотному діапазоні і штучні завади (постановочні), що створюють для придушення джерела інформації і мають значну потужність [1; 5; 6]. Оцінювання надійності роботи СПІ в умовах дії внутрішніх (системних) або зовнішніх (природних чи навмисних) завад можлива на основі загальносистемного підходу [1; 2; 5; 6; 10–12]. У [5; 6] наведено, що для СПІ з ШПС найбільш небезпечними є потужні гармонійні завади та завади, що за структурою подібні до корисного сигналу (подібні завади).

Розроблення оптимальних пристроїв в системах передачі інформації і управління, що працюють в умовах дії негауссівських, вузькосмугових і структурних завад, призводить до створення складних за побудовою нелінійних пристроїв [11; 12]. Простішим рішенням є введення до складу СПІ пристроїв додаткової обробки сигналу з придушенням завад конкретного виду [13–15].

Метою статті є оцінювання показників якості функціонування каналу вимірювання швидкості суміщених систем з урахуванням впливу загальних неузгодженостей.

Виклад основного матеріалу дослідження

Як наведено в [18], поява похибок синхронізації в одному каналі СРС призводить до додаткових похибок в іншому каналі цієї системи (рис. 1).

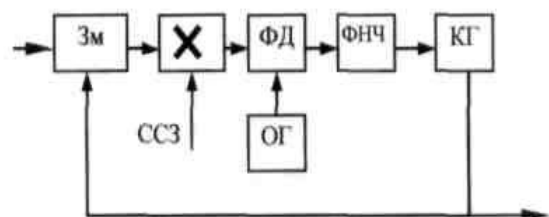


Рис 1. Вимірювальний канал СРС

На рис. 1 позначені: Зм – змішувач; ФД – фазовий детектор; ФНЧ – фільтр нижніх частот; КГ – керований генератор; ОГ – опорний генератор. Пропонуємо визначити взаємний вплив каналів таким чином: зміна за часом в схемі спостереження за затримкою призводить до зсуву прийнятого ШПС і опорного сигналу з виходу цієї схеми. Водночас не здійснюється повне згортання сигналу, і не отримується «чиста» несуча частота сигналу (рис. 2).

Як видно з рис. 2 з появою часового зсуву ΔT сигнал, який надходить до входу фазового детектора схеми фазового автопідлаштування частоти (ФАПЧ) буде зрізаним на межах переходів від однієї серії символів до другої. Ці зрізи вносять похибки до вимірювань частоти ФАПЧ.

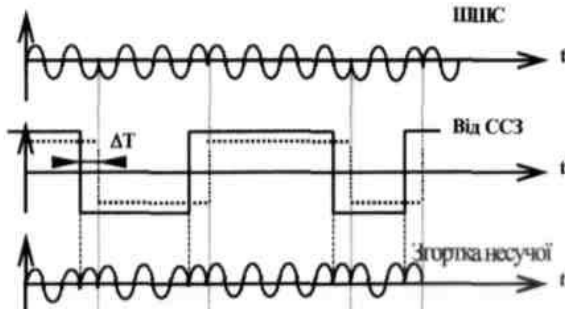


Рис 2. Епюри сигналів

Як видно з рис. 2 з появою часового зсуву ΔT сигнал, що надходить до входу фазового детектора схеми фазового автопідлаштування частоти (далі – ФАПЧ) буде зрізаним на межах переходів від однієї серії символів до другої. Ці зрізи вносять похибки до вимірювань частоти ФАПЧ.

Таким чином, за інтервали ΔT буде накопичуватись похибка вимірювання, яка зменшує співвідношення сигнал/шум (тобто збільшує шумові складові вхідної суміші), пропорційно тривалості інтервалу ΔT . Водночас нове значення похибки буде пропорційним величині:

$$\delta^2 \sim \frac{(1+\Delta T/T_{ПВП})}{\mu_0} \quad (1)$$

де μ_0 – співвідношення сигнал/шум для ідеального випадку;

$T_{ПВП}$ – тривалість псевдовипадкової послідовності (далі – ПВП).

У подальшому потрібно відзначити, що кількість таких інтервалів (ΔT) протягом довжини ПВП, що модулює, буде дорівнювати кількості переходів від однієї серії символів до другої, тобто кількості так званих «серій» одиниць і нулів у періоді ШПС. Ця кількість визначається за виразом [2]:

$$L_1 = 2^{n-1}, \quad (2)$$

де n – кількість розрядів групи ПВП, що формує послідовність.

Припускаючи рівномірність розподілення серій за термін спостереження сигналу $T_{інт}$, можна знайти кількість переходів із співвідношення:

$$L = \frac{2^{n-1}}{T_{ПВП}} \cdot T_{інт}. \quad (3)$$

Оскільки в СРС під час вимірювань використовуються послідовності, що моделюються, достатньо великої довжини ($n \geq 10$), то вираз (3) можна подати у вигляді:

$$L = \frac{2^{n-1}}{T_{ПВП}} \cdot T_{інт} = \frac{2^{n-1}}{r_0(2^n-1)} \cdot T_{інт} \approx \frac{T_{інт}}{2\tau_0} \quad (4)$$

При цьому зменшення співвідношення сигнал/шум буде характеризуватись виразом:

$$\frac{L \cdot \Delta T}{T_{ПВП}} = \frac{\Delta T}{\tau_0^2} \frac{T_{інт}}{2^{n+1}}. \quad (5)$$

Таким чином, можна записати загальний вираз для флуктуаційної похибки вимірювання радіальної швидкості з урахуванням впливу зсуву за часом.

$$\sigma_{\PhiЛ}^2 = \frac{c^2 \left(1 + \frac{\Delta T \cdot T_{інт}}{r_0^2 \cdot 2^{n+1}}\right)}{32\pi^2 f_0^2 T_{інт}^2 \mu_0} \quad (6)$$

Величину часового зсуву ΔT визначимо так. Припустимо, що нестабільність частоти генератора становить величину $\Delta f/f_0 = 10^{-8}$ за 10 годин. Тоді за термін сеансу зв'язку $t=10$ хв стабільність приблизно можна вважати:

$$\Delta f/f_0 \cdot t/T \approx 10^{-8} \cdot 1/60 = 0,16 \cdot 10^{-9}. \quad (7)$$

У цьому випадку ΔT знаходиться за виразом:

$$\Delta T = T_{ПВП} \cdot 0,16 \cdot 10^{-9} = 0,16 \cdot 10^{-9} N/f_T. \quad (8)$$

Зокрема, для $N=1023$, $f_T=10^6$ отримаємо $\Delta T = 0,164 \cdot 10^{-12}$ с для систем із запитом, але для систем без запиту розходження шкал може бути порядку 10^{-8} с. Тоді похибка вимірювання зростає у:

$$1 + \frac{\Delta T}{\tau_0^2} \frac{T_{інт}}{2^{n+1}} \approx 1 + \frac{30 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-8}}{10^{-12} \cdot 2048} = 1,3 \text{ рази.}$$

З виразу (6) можна зробити висновок, що для зменшення вищенаведеного впливу слід використовувати сигнали з великою базою $B > 1000$. Оскільки СРС під час вимірювання параметрів руху також приймає інформацію, то слід урахувати також похибки пов'язані з впливом інформаційної модуляції на точність вимірювань.

Відомо, що флуктуаційна похибка вимірювання радіальної швидкості під час впливу інформаційної модуляції зростає пропорційно величині $1 + 0,5 N_0 P_{\Phi} / P_c$ (N_0 – спектральна щільність потужності шумів; P_{Φ} – смуга пропускання фільтрів, що фактично дорівнює швидкості передавання інформації, тобто $R_{інф} = P_{\Phi}$; P_c – потужність сигналу на вході вимірювального каналу). Фізично це відбувається за рахунок впливу неповного згортання «несучої» частоти вхідного сигналу, обумовленого інформаційними послілками (інверсною модуляцією).

Водночас дисперсія загальної похибки слідування (флуктуаційна та динамічна) буде:

$$\sigma_{\Sigma}^2 = \frac{\tau_0^2 N_0 \left(1 + \frac{N_0 R_{інф}}{2P_c}\right) \left(1 + \frac{\Delta T T_{інт}}{\tau_0^2 2^{n+1}}\right)}{P_c \pi^2 T_{інт}^3} + 0,25 \ddot{D}^2 T_{інт}^2 \quad (9)$$

де \ddot{D} – третя похідна від функції дальності.

Відзначимо, що без урахування похибок за рахунок впливу неузгодженостей вираз (9) не має множника в других дужках чисельника. В цьому випадку оптимальне значення $T_{інт}$ (з погляду мінімуму дисперсії) визначається за виразом:

$$T_{інт} = \sqrt[7]{\frac{3\lambda_0^2 N_0 \left(1 + \frac{N_0 R_{інф}}{2P_c}\right)}{P_c \pi^2 \ddot{D}^2}} \quad (10)$$

Для знаходження оптимального значення $T_{інт}$ у випадку впливу неузгодженостей використаємо такий вираз:

$$\frac{d\sigma_{\Sigma}^2}{dT_{інт}} = 0.$$

При цьому отримаємо:

$$-\frac{3A(1+BT_{інт}')}{T_{інт}^4} + \frac{AB}{T_{інт}^3} + \ddot{D}^2 T_{інт}^2 = 0' \quad (11)$$

$$\text{де } A = \frac{\lambda_0^2 N_0 \left(1 + \frac{N_0 R_{\text{инф}}}{2P_c}\right)}{P_c \pi^2}; \quad B = \frac{\Delta T}{\tau_0^2 2^{n+1}}.$$

Оптимальне значення $T_{\text{инт}}$ доцільно визначати методом ітераційних обчислень:

$$T_{\text{инт}} = \sqrt[7]{\frac{\lambda_0^2 N_0 \left(1 + \frac{N_0 R_{\text{инф}}}{2P_c}\right) \left(3 + 2 \frac{\Delta T T_{\text{инт}}}{\tau_0^2 2^{n+1}}\right)}{P_c \pi^2 D^2}}. \quad (11)$$

З виразу (11) можна зробити висновок, що неузгодженість з ΔT призводить до суттєвого збільшення похибок вимірювання радіальної швидкості. Для забезпечення припустимого рівня похибок слід обмежувати величину $\Delta T \leq 0,05-0,1 \tau_0$. У протилежному випадку слід зменшувати швидкість передачі інформації.

Висновки й перспективи подальших досліджень

Таким чином, в статті була розглянута залежність похибок вимірювання при співвідношенні сигнал/шум, що збільшується в умовах змішування сигналів у вимірювальних каналах СРС з появою часового зсуву ΔT .

Під час моделювання псевдовипадкової послідовності з достатньо великою її довжиною ($n \geq 10$) визначено загальний вираз (6) для флуктуаційної похибки вимірювання радіальної (променевої) швидкості з урахуванням впливу

зсуву за часом.

У статті розраховано збільшення похибки вимірювання для цифрових систем без запиту, яку можна зменшити, використовуючи сигнал з великою базою ($B > 1000$).

На основі наведених виразів можна визначити оптимальні терміни спостереження сигналів у випадку впливу неузгодженостей за часом у вимірювальних каналах СРС.

Також враховано функціональні зв'язки між вимірювальними каналами СРС та проведено оцінювання показників якості їх функціонування в умовах впливу загальних неузгодженостей шкал за часом та частоти засобів єдиного часу. Визначено межі неузгодженостей за часом, при яких забезпечується потрібний рівень точності вимірювання радіальної швидкості.

Напрямами подальших досліджень слід вважати визначення сигналів у складних системах, за використання псевдовипадкової перебудови робочої частоти, а також удосконалення методів вимірювання ширини займаної смуги частот за критерієм співвідношення потужностей широкопосмугових та над широкопосмугових систем з метою створення загороджувальної завади радіоелектронним засобом, що використовують сигнали з великою кількістю стрибків під час перебудови робочої частоти.

Література

1. Пестряков В. Б., Афанасьев В. П., Гурвич В. Л. и др. Шумоподобные сигналы в системах передачи информации / под ред. В. Б. Пестрякова. Москва : Сов. радио, 1973. 424 с.
2. Алексеев А. И., Шереметьев А. Г., Тузов Г. И., Глазов Б. И. Теория и применение псевдослучайных сигналов. Москва : Наука, 1969. 368 с.
3. Смирнов Н. И., Горгадзе С. Ф. Фазоманипулированные сложные сигналы с прямоугольными спектрами мощности. *Радиотехника и электроника*. Т. 39. 1994. №12. С. 2028–2036.
4. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов : пер с англ. / под ред. В.В. Шахгильдяна. Москва : Радио и связь, 1988. 440 с.
5. Диксон Р. К. Широкополосные системы : пер. с англ. Москва : Связь, 1979. 502 с.
6. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. Москва : Радио и связь, 1985. 384 с.
7. Журавлев В. И. Поиск и синхронизация в широкополосных системах связи. Москва : Радио и связь, 1986. 40 с.
8. Малыгин И. Н. Коды, коды, коды. *Технологии и средства связи*. 1999. № 3. С. 68.
9. Fakatselis J., Belkerdid M. A. Processing Gain for Direct Sequence Spread Spectrum Communication Systems and PRISM™. Application Note 9633, Harris Semiconductor, August 1996. URL: <https://fcc.report/FCC-ID/NM5WL2400-PCM/85424.pdf> (дата звернення: 20.12.2022).
10. Цифровые методы в космической связи / под ред. С. Голомба. Пер. с англ./ под ред. В. И. Шляпоберского. Москва : Связь, 1969. 272 с.
11. Treichler J. Transient and convergent behavior of the adaptive line enhancer, *IEEE Trans. Ac-coust, Speech & Signal Process (ASSP-27)*. №1. Feb. 1979. P. 53–62.
12. Тузов Г.И., Урядников Ю.Ф., Прытков В.И. и др. Адресные системы управления и связи. Вопросы оптимизации / под ред. Г. И. Тузова. Москва : Радио и связь, 1993. 384 с.
13. Li L. and Milstein L.B.. Rejection of narrow-band interference in PN spread spectrum systems using decision-feedback filters, «*IEEE Trans. Commun.*». Vol. COM-31. Apr., 1983. P. 473–483.
14. Омура Т., Татибана Я. Адаптивный цифровой фильтр для подавления гармонического шума. *Дэнси цусин гаккай ромбунси*. 1981. V. 64. № 9. P. 767–774.
15. Петров Е. П., Частиков А. В. Адаптивный подавитель помех. *Адаптивные устройства обработки информации в радиолокационных и радионавигационных системах*: сб. научн. тр. МАИ. Москва : МАИ, 1984. С. 26–30.
16. Варакин Л. Е. Системы связи с ШПС. Москва : Радио и связь, 1985. С. 384.
17. Чердынцев В. А. Радиотехнические системы. Минск : Высшая школа, 1988. С. 370.
18. Чумак Б. О., Роянов О. М., Лисаченко І. Г. Оцінка якості роботи радіотехнічних станцій при виявленні та супроводі космічних об'єктів. *Системи обробки інформації*. Харків : ХУПС. 2005. Вип. 4 (44). С. 96–103.

ERRORSESTIMATION OF SPEED MEASUREMENTS IN THE COMBINED RADIO ENGINEERING SYSTEMS IN THE CONDITIONS OF INFLUENCE OF INCONSISTENCIES IN TIME

Mykola Pavlunko (Candidate of Military Sciences, associate professor)¹

Oleg Bogatov (Candidate of Technical Sciences, associate professor)²

Victoria Marco¹

¹*National Defence University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovskiy, Kyiv, Ukraine*

²*Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine*

Based on the mass application of noise-like signals for the transmission of useful information with synchronous provision in many systems of means of communication during their movement, as well as radiolocation, radio navigation and control of spacecrafts, the requirements for both information transmission methods and characteristics of processing devices were analyzed. The peculiarities of the use of digital technologies in the transmission and processing of information in radio engineering, telemetry systems and communication systems are determined, which is the reason for the widespread implementation of complex signals to ensure address transmission in conditions of arbitrary access, as well as secrecy of data transmission systems. The identified need to increase the degree of information protection was most acutely manifested with the development of microelectronics, the creation of an elemental base with an extremely high degree of integration. The dependence of the probability of reliable detection of signals (false alarms) that will determine the quality of work and the operation of various systems on the provision of information security of information collection channels and their immunity to interference is estimated. The functional connections between the measuring channels of radio-technical connected systems are taken into account, and the quality indicators of their functioning under the influence of general inconsistencies of the time scales and the frequency of the unified time means are evaluated. Limits of inconsistencies in time, at which a given level of accuracy of speed measurements is ensured, are determined. A quantitative evaluation of the effect of the errors of the range measurement channel delay monitoring scheme on the errors of the radial velocity measurement channel was carried out, and the indicators of the quality of the functioning of the velocity measurement channel of the combined systems were estimated, taking into account the influence of general inconsistencies.

Keywords: indicators of the quality of functioning, combined radio engineering system, broadband noise-like signal.

References

1. Pestrjakov, V. B., Afanas'ev, V. P., Gurvich, V. L. i dr. (1973) Noise-like signals in information transmission systems / pod red. V. B. Pestrjakova. Moskva : Sov. radio, 424.
2. Alekseev, A. I., Shereme'ev, A. G., Tuzov, G. I., Glazov, B. I. (1969) Theory and application of pseudorandom signals. Moskva : Nauka, 368.
3. Smirnov, N. I., Gorgadze, S. F. (1994) Phazomani-polished complex signals with rectangular power spectra. *Radiotekhnika i jelektronika*, 39 ,12, 2028–2036.
4. Uidrou, B., Stürnz, S. (1988) Adaptive signal processing: per s angl. / pod red. V. V. Shahgil'djana. Moskva : Radio i svjaz', 440.
5. Dikson, R. K. (1979) Broadband systems: per. s angl. Moskva : Svjaz', 502.
6. Varakin, L. E. (1985) Communication systems with noise-like signals. Moskva : Radio i svjaz', 384.
7. Zhuravlev, V. I. (1986) Search and Timing in Broadband Communications Systems. Moskva : Radio i svjaz', 40.
8. Malygin, I. N. (1999) Codes, codes, codes. *Tehnologii i sredstva svjazi*, 3, 68.
9. Fakatselis, J., Belkerdid, M. A. (August 1996) Processing Gain for Direct Sequence Spread Spectrum Communication Systems and PRISM™. Application Note 9633, Hamis Semiconductor. URL: <https://fcc.report/FCC-ID/NM5WL2400-PCM/85424.pdf> (data zvernennja: 20.12.2022).
10. Digital methods in space communication. (1969) / pod red. S. Golomba. Per. s angl. / pod red. V. Shljapoberskogo. Moskva : Svjaz', 272.
11. Treichler, J. (Feb. 1979) Transient and convergent behavior of the adaptive line enhancer, *IEEE Trans. Ac-coust, Speech & Signal Process (ASSP-27)*, 1, 53–62.
12. Tuzov, G. I., Urjadnikov, Ju. F., Prytkov, V. I. i dr. Address management and communication systems. Questions of optimization / pod red. G. I. Tuzova. Moskva : Radio i svjaz', 1993. 384.
13. Li, L. and Milstein L., B. (Apr. 1983) Rejection of narrow-band interference in PN spread spectrum systems using decision-feedback filters, «IEEE Trans. Commun», COM-31, 473–483.
14. Omura, T., Tatibana, Ja. (1981) Adaptive digital filter for suppression of harmonic noise. *Djensi cusin gakkaj rombunsi*, 64, 9, 767–774.
15. Petrov, E. P., Chastikov, A. V. (1984) Adaptive interference suppressor. Adaptive information processing devices in radar and radio navigation systems: sb. nauchn. tr. MAI. Moskva : MAI, 26–30.
16. Varakin, L. E. (1985) Communication systems with ShPS. Moskva : Radio i svjaz', 384.
17. Cherdynceev, V. A. (1988) Radio engineering systems. Minsk : Vysshaja shkola, 370.
18. Chumak, B. O., Roianov, O. M., Lysachenko, I. H. (2005) Assessment of the quality of work of radio technical stations in the detection and tracking of space objects. *Systemy obrobky informatsii*. Xarkiv : KhUPS, 4 (44), 96–103.