

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ РАДІОЛІНІЙ З ПСЕВДОВИПАДКОВОЮ ПЕРЕБУДОВОЮ РОБОЧОЇ ЧАСТОТИ

Необхідність постійного вдосконалення засобів радіозв'язку впливає зі зростаючої потреби передачі голосу і даних з високою живучістю і пропускнуою спроможністю каналів в радіолініях, що забезпечують обмін інформацією між органами військового управління, підрозділами, системами озброєнь і окремими військовослужбовцями.

Радіостанції можуть працювати як на фіксованій частоті, так і у режимі псевдовипадкової перебудови робочої частоти (ППРЧ). За відсутності організованих радіозавод встановлюється режим роботи радіолінії на фіксованій частоті. При використанні противником радіоелектронного придушення (РЕП), а також у разі складної заводової обстановки основним засобом захисту від придушення каналу зв'язку є ППРЧ.

Технічна реалізація режиму ППРЧ є досить складним і затратним процесом, тому його вибір може бути обумовлений лише підвищеними вимогами до заводозахисту. Крім того, системи з ППРЧ не дозволяють досягати високої швидкості передачі даних через ряд труднощів, пов'язаних із синтезаторами когерентних частот.

Ефективність систем радіозв'язку (СРЗ) визначається безліччю різних за своєю природою факторів, які умовно можна розділити на три групи: якість СРЗ, умови функціонування СРЗ, способи використання (застосування) СРЗ.

Характерними особливостями створення, розгортання та експлуатації систем радіозв'язку тактичної ланки управління є високий ступінь невизначеності характеристик їх функціонування в динаміці збройного конфлікту, що викликає необхідність постійного вдосконалення підходів до обґрунтування вибору напрямків розвитку СРЗ.

Аналіз заходів захисту від завод за допомогою введення в радіостанцію режиму ППРЧ диктує необхідність раціонального вибору часових характеристик процесу аналого-цифрового перетворення сигналів (мови і даних) і процесу пакування перетвореної інформації в пакети з паузами, необхідними для перебудови робочої частоти каналу.

В статті відображені погляди авторів та запропоновані пропозиції до підходу обґрунтування ефективності СРЗ з ППРЧ за узагальненим показником ймовірності своєчасної та достовірної доставки повідомлень (надання послуг), який дасть можливість встановлювати вимоги до критеріїв технічних характеристик СРЗ.

Ключові слова: ефективність, узагальнений показник, групи критеріїв, заводозахищеність СРЗ.

L. Bondarenko, V. Rudenko, V. Chenchenko, O. Pluhova. Estimation of efficiency of functioning of radio lines with frequency-hopping spread spectrum.

The need for constant improvement of radio communications arises from the growing need for voice and data transmission with high survivability and bandwidth of channels in radio links, providing information exchange between military command and control bodies, units, weapons systems and individual military personnel.

The radio stations can operate both at a fixed frequency and in the frequency-hopping spread spectrum (FHSS). In the absence of organized radio interference, the mode of operation of the radio link at a fixed frequency is established. When using electronic suppression (ES) by the enemy, as well as in a complex jamming environment, the main means of protection against suppression of the communication FHSS.

The technical implementation of the FHSS mode is a rather complex and costly process, so its choice can be due only to the increased requirements for noise protection. In addition, FHSS systems do not allow high data rates to be achieved due to a number of difficulties associated with coherent frequency synthesizers.

The effectiveness of radio communication systems (RCS) is determined by many factors of different nature, it can be conditionally divided into three groups: the quality of the RCS, the conditions for the operation of the SRZ, the ways of using (using) the RCS.

The characteristic features of the creation, deployment and operation of radio communication systems at the tactical level of control are a high degree of uncertainty in the characteristics of their functioning in the dynamics of an armed conflict, which necessitates constant improvement of approaches to justifying the choice of directions for the development of RCS.

Analysis of noise protection measures by introducing FHSS mode into the radio station dictates the need for rational choice of time characteristics of the process of analog-to-digital conversion of signals (speech and data) and the process of packing the converted information into packets with pauses needed to adjust the operating frequency.

The article reflects the views of the authors and proposes proposals for the approach to justify the effectiveness of RCS with FHSS on a generalized indicator of the probability of timely and reliable delivery of messages (services), which will set requirements for the criteria of technical characteristics of RCS.

Keywords: efficiency, generalized indicator, groups of criteria, noise protection of RCS.

Постановка завдання в загальному вигляді

При створенні СРЗ для організації інформаційного обміну між територіально рознесеними об'єктами важливе місце займають питання, які визначаються характеристиками військового зв'язку – своєчасністю, достовірністю та безпечністю інформаційного обміну.

Для визначення критеріїв оцінки ефективності СРЗ необхідно встановити залежність між характеристиками СРЗ і ступенем їх впливу на бойову ефективність.

Показники оцінки ефективності СРЗ можливо розділити на дві групи: технічні та оперативно-тактичні [2].

Технічні показники дозволяють оцінювати якість характеристик інтерфейсів (радіо і каналних) за здатністю досягнення граничних якісних показників функціонування СРЗ.

Оперативно-тактичні показники є вихідними при розробці принципів функціонування СРЗ. Вони дозволяють оцінювати якість СРЗ в бою (операції).

Виходячи з цього, впливає, що рішення вище зазначених питань пов'язано зі створенням методології оцінки ефективності СРЗ, яка містить:

єдину систему показників ефективності систем і засобів військового зв'язку;

уніфіковані принципи розробки та подання нормативних моделей протидієвства СРЗ і систем РЕП;

сукупність методів оцінки показників ефективності систем і засобів військового зв'язку; способи і алгоритми розрахунку показників ефективності різних СРЗ.

Актуальність викладеного матеріалу полягає в тому, що застарілі галузеві стандарти і загальні тактико-технічні вимоги до систем і засобів військового зв'язку, де містяться основні методичні положення, терміни, поняття та визначення в галузі оцінки ефективності СРЗ, не відображають сучасну систему показників і методи їх оцінки. Це не дозволяє порівнювати між собою не тільки різні сучасні СРЗ, але і проводити їх об'єктивну оцінку на всіх етапах життєвого циклу (дослідження, розробка, виробництво, експлуатація). Крім того, немає єдиного підходу до оцінки ефективності СРЗ користувачами і розробниками.

Аналіз останніх публікацій

Метод розширення спектру радіосигналів на основі ППРЧ є достатньо вивченим і відображеним у науковій літературі. Аналіз опублікованих робіт показує, що більша частина досліджень присвячена вирішенню окремих завдань щодо вдосконалення технічних характеристик СРЗ, в яких викладаються:

основні принципи і характеристики методу розширення спектра сигналів за рахунок псевдовипадкової перебудови робочої частоти, наприклад [3–5];

аналіз можливих способів підвищення заводозахищеності типових СРЗ з ППРЧ в умовах організованих завод і власних шумів СРЗ, наприклад [6–9];

вирішуються завдання синтезу та аналізу заводостійкості адаптивних алгоритмів демодуляції сигналів з ППРЧ і частотним рознесенням інформаційних символів в умовах апріорної невизначеності щодо параметрів завади [10–14].

У роботах [15–21] запропоновані напрямки підвищення заводозахищеності СРЗ з ППРЧ та запропонована методика вибору робочих частот з урахуванням стратегій застосування засобів РЕБ та електромагнітної сумісності засобів радіозв'язку, що розгортаються в локальних угрупованнях радіозасобів.

У роботі [22] запропоновано методику вибору необхідної ширини хопсету, при якій забезпечується задана якість передачі інформації.

В монографіях [23–25] розглянуто використання ППРЧ для підвищення заводозахищеності систем радіозв'язку в умовах радіоелектронного протидієвства, наведена загальна характеристика СРЗ з ППРЧ, окремо описані питання заводозахищеності сигналів з ППРЧ.

В останніх публікаціях пропонуються нові та покращені методики оптимізації (ускладнення алгоритму) формування сигналу ППРЧ, виходячи з аналізу можливої заводової обстановки в радіоканалі та характеристик методів ППРЧ.

Так, у роботі [26] запропоновано метод автоматичного визначення тривалості частотних елементів радіосигналу з ППРЧ за умов наявності вузькосмугових завад у частотному діапазоні роботи радіозасобів.

У роботах [26–28] розроблені методології формування сигналу ППРЧ при передачі голосу (мови). Сутність методології [28] полягає у розосередженні у часі сусідніх символів інформаційного сигналу, що потрапляють під вплив завади. У такому розташуванні символів мовних кадрів на інтервалі частотних елементів сигналу з ППРЧ завада вражає найменш важливі, для відтворення мови, символи.

Наукові розробки щодо підвищення завадозахищеності СРЗ з ППРЧ можуть бути використаними при розробці вітчизняних радіозасобів з ППРЧ.

Разом з тим, викладені в зазначених роботах теоретичні основи прогнозування завадової обстановки в радіоканалі, пропозиції щодо покращення алгоритмів формування сигналів з ППРЧ в умовах радіопротидії противника не враховують специфічні вимоги до систем військового радіозв'язку – оперативно-тактичні вимоги.

Мета статті. Метою даної статті є розробка пропозицій до підходу обґрунтування ефективності СРЗ з ППРЧ за узагальненим показником ймовірності своєчасної та достовірної доставки повідомлень (надання послуг), який дасть можливість встановлювати вимоги до критеріїв технічних характеристик СРЗ, які, в свою чергу, дозволять оцінювати якість характеристик інтерфейсів (радіо і каналних) по здатності досягнення граничних якісних показників функціонування систем радіозв'язку з ППРЧ.

Виклад основного матеріалу

СРЗ створюється для передачі інформації між органами військового управління, пунктами управління, системами озброєнь, окремими військовослужбовцями і служить активним засобом в їх цілеспрямованій діяльності.

В процесі застосування СРЗ постійно виникають проблеми різної складності. Причиною виникнення проблем є розбіжність між бажаним і дійсним результатом функціонування СРЗ в реальних умовах при невідомих шляхах подолання цієї розбіжності (невідповідності). Для вирішення проблеми необхідно виділити і досить чітко сформулювати цілі діяльності, здійснення яких істотно знижує або усуває відмінність між бажаним і дійсним результатом, тобто вирішити проблему.

Глобальна мета, за яку приймемо якість функціонування СРЗ, допускає декомпозицію, в результаті якої формуються взаємопов'язані цілі, які в загальному випадку можуть бути піддані подальшому поділу на більш прості складові (підцілі, завдання).

Під ефективністю функціонування радіоліній з ППРЧ будемо розуміти властивість системи досягати поставленої мети в заданих умовах з певною якістю [1; 2].

Показник ефективності повинен бути узагальнюючим показником оптимальності функціонування системи і повинен задовольняти наступним вимогам:

відображати цільове призначення системи, що досліджується;

бути пов'язаним із показниками системи вищого рівня;

мати чіткий фізичний сенс;

бути критичним до змін параметрів системи, що досліджується, і параметрів обстановки.

Основною вимогою при виборі показника ефективності є відповідність показника мети операції, яка відображається необхідним результатом. Для опису відповідності реального результату операції необхідному формально введемо числову функцію на безліч результатів операції – функцію відповідності [2].

За узагальнений показник ефективності функціонування радіолінії з ППРЧ приймемо спільну ймовірність своєчасної та достовірної доставки повідомлень (надання послуг) [1].

Найбільш повною характеристикою своєчасності доставки повідомлень по лініях радіозв'язку з ППРЧ, що характеризує їх оперативну ефективність, є інтегральна функція розподілу часу передачі повідомлень з достовірністю, не гірше заданої:

$$F(t) = P \left\{ \begin{array}{l} T_{\text{пер}} \leq t \\ D \leq D_{\text{доп}} \end{array} \right\} \quad (1)$$

Під характеристикою своєчасності передачі повідомлень по воєнним лініям зв'язку розуміється ймовірність того, що час передачі повідомлення заданого обсягу $T_{\text{пер}}$ не перевищить деякого значення t при забезпеченні допустимих втрат за достовірністю. При передачі дискретних повідомлень показником достовірності зазвичай служить допустима ймовірність помилки на біт інформації.

Для побудови інтегральної функції розподілу часу передачі повідомлення в радіолінії з ППРЧ введемо такі припущення:

1. Всі частоти m , що виділені для зв'язку, є статистично однорідними, тобто ймовірності зв'язку на кожній з них з достовірністю гірше заданої рівні між собою:

$$P_{\text{зв1}}(D \leq D_{\text{доп}}) = P_{\text{зв2}}(D \leq D_{\text{доп}}) = \dots = P_{\text{звм}}(D \leq D_{\text{доп}}). \quad (2)$$

При цьому значення $P_{\text{зв1}}(D \leq D_{\text{доп}})$, виходячи з (2), визначаються наступним чином:

$$P_{\text{зв1}}(D \leq D_{\text{доп}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\xi} \left\{ -\frac{t^2}{2} \right\} dt, \quad (3)$$

де D – показник достовірності;

$P_{\text{зв}}$ – ймовірності зв'язку на кожній з частот з достовірністю не гірше заданої;

$\xi = \frac{\bar{z} - z_{\text{доп}}}{\sigma_z}$ – розрахунковий параметр;

$z_{\text{доп}}$ – допустиме перевищення сигналу над рівнем завад.

2. Будемо вважати, що під час впливу організованих завад в смузі робочих частот радіолінії m^* частот з m будуть непридатні для зв'язку, тобто для них умова $z \geq z_{\text{доп}}$ не виконується. Дана умова може мати місце при постановці широкосмугових загороджувальних завад.

Очевидно, що час достовірної передачі повідомлення ($T_{\text{пер}}$) визначається сумарним часом передачі повідомлення T_c , часом повторної передачі команд запитів ($T_{\text{кз}}$) та часом повторної передачі повідомлення ($T_{\text{пп}}$) і визначається математичним виразом:

$$T_{\text{пер}} = T_c + T_{\text{кз}} + T_{\text{пп}} = \sum_{k=0}^K (T_{\text{кз}_k} + T_{c_k}), \quad (4)$$

де K – кількість переданих повідомлень.

Якщо $T_{\text{кз}} \ll T_c$, то вираз (4) можна представити у вигляді:

$$T_{\text{пер}} = \sum_{k=0}^K T_{c_k}. \quad (5)$$

У загальному випадку величина K є випадковою, тому час передачі повідомлення $T_{\text{пер}}$ також є випадковою величиною. При цьому функція розподілу випадкових величин залежить не тільки від умов роботи радіолінії, а й від алгоритму її функціонування.

Так, наприклад, у відомих алгоритмах роботи радіоліній з ППРЧ не проводиться аналіз робочих частот на придатність. У цьому випадку інтегральну функцію розподілу часу передачі повідомлення для таких радіоліній можна записати в наступному вигляді [2]:

$$F(t) = \sum_{\kappa=0}^{\kappa-1} P_c(\kappa) U(t - \kappa T_c) = \sum_{\kappa=0}^{\kappa-1} \left\{ 1 - \left[\left(1 - \frac{m^*}{m} \right) P_{зв} \right]^N \right\}^{\kappa} \times \left[\left(1 - \frac{m^*}{m} \right) P_{зв} U(t - \kappa T_c) \right]^N, \quad (6)$$

де $P_c(\kappa)$ – ймовірність передачі повідомлення після κ повторень;

$\left(1 - \frac{m^*}{m} \right)$ – ймовірність того, що чергова частота не буде схильна до впливу організованої

завади;

$P_{зв}$ – ймовірність зв'язку на частоті;

$U(t - \kappa T_c) = \begin{cases} 1, & \text{при } t \geq \kappa T_c \\ 0, & \text{при } t < \kappa T_c \end{cases}$ – функція ймовірності випадкової події.

За допомогою виразу (6) можна оцінювати оперативну ефективність радіолінії з ППРЧ без використання додаткових заходів підвищення достовірності прийому сигналів, які здійснюють передачу цифрових повідомлень, залежно від умов поширення радіохвиль ($P_{зв}$) і заводої обстановки (m^*) на виділеній групі частот, а також з урахуванням найважливіших характеристик режиму ППРЧ – швидкості ППРЧ ($V_{ППРЧ}$) і кількості виділених частот (m).

Результати розрахунків за формулою (6) у вигляді графіків представлені на рис. 1.

Аналіз розрахунків дозволяє зробити наступні висновки:

радіолінії з ППРЧ без додаткових заходів підвищення достовірності мають низьку ефективність. Так, наприклад, ймовірність одноразової передачі повідомлення тривалістю $T_c = 0,1$ с (повідомлення в режимі передачі даних зі швидкістю 16 кбіт/с по радіолінії з ППРЧ зі швидкістю 100 стрибків за секунду) при найбільш сприятливих умовах ведення радіозв'язку ($P_{зв} = 0,9$, $\frac{m^*}{m} = 0,1$) є низькою і становить 0,12;

оцінка ефективності функціонування СРЗ з ППРЧ за узагальненим показником ймовірності своєчасної та достовірної доставки повідомлень (надання послуг) дає можливість визначати ключові показники та критерії технічних характеристик СРЗ (за окремими методиками) та встановлювати вимоги до них, а саме:

обґрунтувати вибір виду ППРЧ (міжбітова, побітова і внутрібітова);

визначати швидкість ППРЧ;

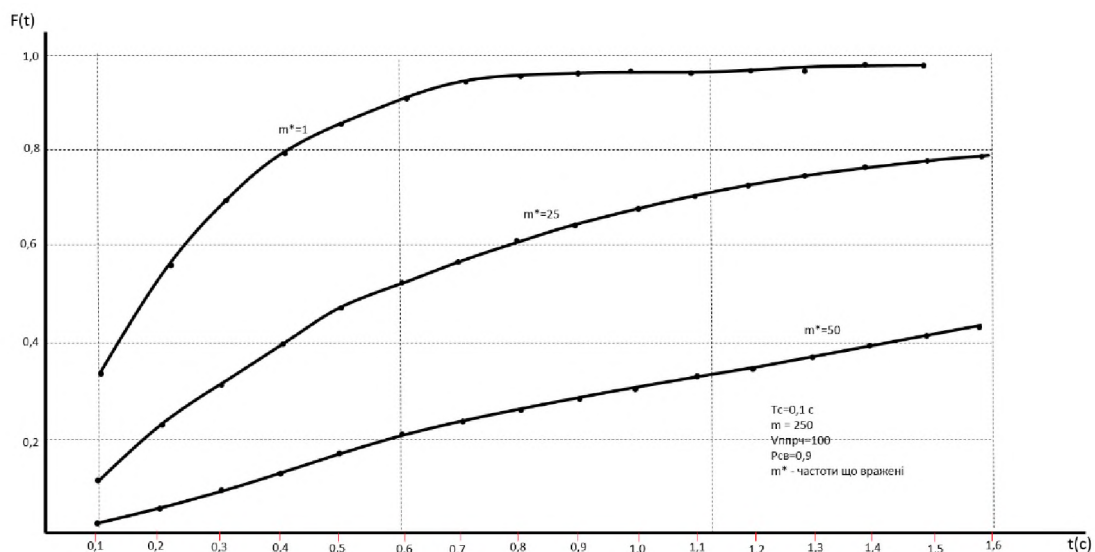


Рис. 1. Оперативна ефективність радіоліній з ППРЧ без використання додаткових заходів підвищення достовірності прийому сигналів

визначати коефіцієнт розширення спектра сигналу ППРЧ, а отже обґрунтовувати вибір оптимальної адресної групи;
 визначати варіанти формування адресної групи частот (в широкому діапазоні частот, у вузькому діапазоні частот, за списком);
 обґрунтовувати вибір виду оптимальних сигнальних конструкцій;
 визначати методи синхронізації в СРЗ з ППРЧ;
 обґрунтовувати вибір виду завадостійкого кодування сигналів (наприклад, коди Ріда – Соломона, Вітербі й ін.);
 визначати спосіб генерування оптимальних псевдовипадкових послідовностей частот сигналу з ППРЧ та ін.;
 значне підвищення ефективності функціонування радіоліній з ППРЧ може бути досягнуто за рахунок виключення з радіообміну частот, уражених завадами (m^*).

Висновки

Запропонований метод оцінки ефективності функціонування СРЗ з ППРЧ за узагальненим показником ймовірності своєчасної та достовірної доставки повідомлень (надання послуг) дає можливість визначати ключові показники та критерії технічних характеристик СРЗ на підставі оперативного-тактичних вимог до систем управління (озброєння) та встановлювати вимоги до них.

Напрямом подальших досліджень є наукове обґрунтування вибору напрямів розвитку СРЗ спеціального призначення з урахуванням існуючих та перспективних підходів до побудови автоматизованих радіозасобів і комплексів, що реконфігуруються.

ЛІТЕРАТУРА

1. Боковик А. В., Игнатов В. В. Эффективность систем военной связи и методы ее оценки. Санкт-Петербург: ВАС. 2006. 182 с.
2. Надежность и эффективность в технике: справочник. Н17. В 10 т. / Ред. совет: В. С. Авдеевский (пред.) и др.; Т. 3: Эффективность технических систем. Под общ. ред. В. Ф. Уткина, Ю. В. Крючкова. Москва: Машиностроение, 1988. 328 с.
3. Борисов В. И., Зинчук В. М. Помехозащищенность систем радиосвязи. Вероятностно-временной подход. Москва: Радио и связь, 1999. 252 с.
4. Torrieri DJ. Principles of secure communication systems. Dedham. MA.: Artech House Inc., 1985. 286 p.
5. Борисов В. И., Зинчук В. М., Лимарев А. Е. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / Под ред. В. И. Борисова. Изд. 2-е, перераб. и доп. Москва: Радио Софт, 2008. 512 с.
6. Чуднов А. М. Об адаптивных алгоритмах псевдослучайного переключения рабочих частот радиоліній в условиях случайных и преднамеренных помех. *Журнал радиоэлектроники*. 2015. № 4.
7. Беккиев А. Ю., Борисов В. И. Оценка помехозащищенности каналов радиосвязи в условиях действия помех от средств радиоэлектронной борьбы. *Радиотехника и электроника*. 2019. Том 64, № 9. С. 891–901.
8. Стогов Г. В., Елишев В. В. Помехоустойчивость систем связи с быстрой ППРЧ и кодированием в условиях шумовых помех в части полосы. *Техника средств связи*. Сер. «Техника радиосвязи». 1991. Вып. 1. С. 57–63.
9. Н.И. Козленко, А.Н. Мокроусов. Адаптивная радиолінія с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Теория и техника радиосвязи. Воронеж : 2008. – 5-12 с. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.sozvezdie.su/science/nauchnotekhnicheskij_zhurnal/. (дата звернення 17.05.2021 р.).
10. Елишев В. В., Почивалов С. Г. Метод повышения помехоустойчивости космических систем связи с быстрой псевдослучайной перестройкой рабочей частоты в условиях радиоэлектронного подавления. *Сборник трудов Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского*. Санкт-Петербург: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2016. С. 297–301.
11. Зинчук В. М., Щукин Н. И. Синтез подобного алгоритма многоальтернативного обнаружения при наличии мешающих параметров и неизвестных вероятностях появления обнаруживаемых сигналов. *Техника средств связи*. Серия ТРС. 1981. Вып. 7. С. 54–71.

12. Зинчук В. М., Сосулин Ю. Г., Матвеева Е. А. Синтез и анализ оптимальных алгоритмов многоальтернативного совместного обнаружения и оценивания параметров сигналов в условиях априорной неопределенности. *Техника средств связи*. Серия ТРС. 1992. Вып. 5. С. 3–30.
13. Зинчук В. М. Синтез и анализ оптимальных алгоритмов многоальтернативного совместного обнаружения и оценивания параметров сигналов при неизвестных вероятностях их появления. *Труды Международной научно-технической конференции “Авиация XXI века”*, г. Воронеж, Россия, октябрь 1999 г. С. 341–361.
14. Зинчук В. М., Лимарев А. Е. Синтез и анализ инвариантных алгоритмов многоальтернативного обнаружения и различения сигналов в условиях априорной неопределенности. *Теория и техника радиосвязи*. 1996. Вып. 2. С. 32–47.
15. Гурський Т. Г. Підвищення заводо захищеності радіоліній з ППРЧ в умовах завод у відповідь. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. 2014. Вип. 3 (40). С. 58–63.
16. Чаркин Д. Ю. Сравнительный анализ помехоустойчивости и скрытности различных методов расширения спектра сигналов. Ч. 1: Помехоустойчивость / Д. Ю. Чаркин, С. Ю. Алехин, Е. В. Григорьев, А. Е. Лимарев, В. Е. Прохоров. *Теория и техника радиосвязи*. Воронеж: АО “Концерн “Созвездие”, 2017. № 4. 106 с.
17. Чаркин Д. Ю. Сравнительный анализ помехоустойчивости и скрытности различных методов расширения спектра сигналов. Ч. 2. Скрытность / Чаркин Д. Ю., Алехин С. Ю., Григорьев Е. В., Лимарев А. Е., Прохоров В. Е. *Теория и техника радиосвязи*. Воронеж: АО “Концерн “Созвездие”, 2017. № 4. 106 с.
18. Чаркин Д. Ю. Гибридные ППРЧ/ШПС системы связи. Ч. 1. Основы теории / Чаркин Д. Ю., Алехин С. Ю., Григорьев Е. В., Лимарев А. Е., Прохоров В. Е. *Теория и техника радиосвязи*. Воронеж: АО “Концерн “Созвездие”, 2017. № 3. 104 с.
19. Чаркин Д. Ю. Гибридные ППРЧ/ШПС системы связи. Ч. 2. Основы теории / Чаркин Д. Ю., Алехин С. Ю., Григорьев Е. В., Лимарев А. Е., Прохоров В. Е. *Теория и техника радиосвязи*. Воронеж: АО “Концерн “Созвездие”, 2017. № 3. 104 с.
20. Николаев В. И. Функционирование цифровых систем связи в условиях радиоэлектронного конфликта с минимаксных позиций теории игр (часть 1) / Николаев В. И., Федоров А. Е. *Теория и техника радиосвязи*. Воронеж: АО “Концерн “Созвездие”, 2010. № 2. 127 с.
21. Николаев В. И. Функционирование цифровых систем связи в условиях радиоэлектронного конфликта с минимаксных позиций теории игр (часть 2) / Николаев В. И., Федоров А. Е. *Теория и техника радиосвязи*. Воронеж: АО “Концерн “Созвездие”, 2010. № 2. 127 с.
22. Прохоров В. Е. Обоснование требований к числу частотных каналов систем радиосвязи с ППРЧ. *Теория и техника радиосвязи*. Воронеж: АО “Концерн “Созвездие”, 2018. № 3. 126 с.
23. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью / В. И. Борисов, В. М. Зинчук, А. Е. Лимарев, Н. П. Мухин, Г. С. Нахмансон; под ред. В. И. Борисова. Москва: Радио и связь, 2003. 640 с.
24. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами / Г. И. Тузов и др.; под ред. Г. И. Тузова. Москва: Радио и связь, 1985. 264 с.
25. Волков Л. Н., Немировский М. С., Шинаков Ю. С. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики: учеб. пособие. Москва: Эко-Трендз. 2005. 392 с.
26. Николаев В. И., Фёдоров А. Е. Функционирование цифровых систем связи в условиях радиоэлектронного конфликта с минимаксных позиций теории игр. *Теория и техника радиосвязи*. Воронеж, 2010. С. 37–45. URL: http://www.sozvezdie.ru/science/nauchnotekhnicheskij_zhurnal/ (дата звернення 17.05.2022).
27. Чуднов А. М. О минимаксных алгоритмах формирования и приема сигналов. *Проблемы передачи информации*. 1986. Т. 22. № 4. С. 49–54. URL: <http://www.mathnet.ru/links/ea34d75f88c1b1281819151b04a3825e/ppi958.pdf> (дата звернення 18.05.2022).
28. Гремяченский С. С., Николаев В. И. Введение в теоретико-игровой анализ радиоэлектронного конфликта систем радиосвязи со средствами радиоэлектронного подавления. *ВНИИС*. Воронеж, 1998. С. 38–49.