

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИСТЕМ РАДИОСВЯЗИ С КОДОВЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ КАНАЛОВ

Брежнев Д.В.¹, Вдовченко Е.С.², Савельева М.В.³, Абилов В.Н.⁴

DOI:10.21681/3034-4050-2025-1-68-73

Ключевые слова: квадратурные каналы, когерентная сетка частот, квадратурная амплитудная модуляция, квадратурная многоуровневая амплитудно-инверсная модуляция.

Цель исследования: заключается в изучении возможностей и перспектив применения новых способов кодового разделения каналов в широкополосных системах радиосвязи, позволяющих повысить спектрально-энергетические характеристики данных систем.

Метод исследования: в исследовании использован метод анализа и синтеза, позволяющий комплексно оценить перспективы внедрения новых способов кодового разделения каналов и модуляции сигналов в широкополосные системы радиосвязи.

Результат: в ходе исследования были предложены и рассмотрены новые способы модуляции сигналов и кодового разделения каналов, проведена их сравнительная оценка по эффективности использования выделенного спектра частот с применяемыми в настоящее время в широкополосных системах радиосвязи способами передачи информации. В статье проведена оценка пропускной способности широкополосных систем радиосвязи с когерентным частотно-кодовым разделением каналов с квадратурной двоичной инверсной модуляцией сигналов на каждой когерентной частоте, а также пропускной способности систем радиосвязи с когерентным частотно-кодовым разделением каналов с многоуровневой квадратурной амплитудно-инверсной модуляцией широкополосных сигналов на каждой когерентной частоте в ограниченной выделенной полосе радиочастот.

Научная новизна: предложенные способы кодового разделения каналов и модуляции сигналов по сравнению с известными позволяют существенно повысить пропускную способность перспективных систем связи в выделенной полосе частот при сохранении их энергоэффективности и высокой помехозащищенности, свойственной широкополосным системам радиосвязи.

Вклад авторов: Брежнев Д.В. — 25%; Вдовченко Е.С. — 25%; Савельева М.В. — 25%; Абилов В.Н. — 25%.

Введение

В настоящее время в связи с бурным развитием информационных технологий и значительным увеличением числа средств связи, использующих радиочастотный ресурс, возникла острая необходимость его рационального использования. Системы радиосвязи вынуждены работать в условиях ограниченного (выделенного) радиочастотного ресурса и при этом обеспечивать требуемое качество предоставляемых услуг для всех пользователей.

Вопросы обеспечения совместной работы различных радиоэлектронных средств в насто-

ящее время решаются в основном проведением организационных мероприятий и жестким соблюдением частотного регламента. Поскольку весь имеющийся частотный ресурс уже поделен, а требования по расширению предоставляемых телекоммуникационных услуг и их качеству постоянно возрастают, то одними организационными мерами эту проблему не решить.

Одним из перспективных направлений по повышению эффективности работы систем радиосвязи в условиях острого дефицита частотного ресурса является направление, связанное с повышением эффективности его использования.

¹Брежнев Дмитрий Викторович, начальник управления ФГБУ "16 Центральный научно-исследовательский испытательный институт" Минобороны России, Московская область, г. Мытищи. E-mail: kbs79@bk.ru

²Вдовченко Евгений Станиславович, начальник службы-помощника начальника института по защите государственной тайны ФГБУ "16 Центральный научно-исследовательский испытательный институт" Минобороны России, Московская область, г. Мытищи. E-mail: natashok12039@mail.ru

³Савельева Марина Викторовна, кандидат технических наук, научный сотрудник ФГБУ "16 Центральный научно-исследовательский испытательный институт" Минобороны России, Московская область, г. Мытищи. E-mail: marina-savelieva-62@mail.ru

⁴Абилов Владимир Нурбулатович, старший научный сотрудник ФГБУ "16 Центральный научно-исследовательский испытательный институт" Минобороны России, Московская область, г. Мытищи. E-mail: avnurb@mail.ru

Одним из основных требований, предъявляемым как к существующим, так и к перспективным системам связи в условиях возросшего спроса на выделение полос частот, является требование по обеспечению высокой спектральной эффективности. Под спектральной эффективностью системы связи понимается максимально высокий трафик радиointерфейса в заданной полосе частот. Она оценивается коэффициентом спектральной эффективности, который представляет собой отношение скорости передачи информации в системе (пропускной способности системы) к полосе частот спектра сигнала.

В настоящее время в системах широкополосного доступа в основном используется кодовое разделение каналов, которое имеет ряд преимуществ перед частотным и временным способами разделения. Это устойчивость к узкополосным помехам, частотно-селективным замираниям, конфиденциальность и защищенность передаваемых данных, большая емкость системы [1].

В статье рассмотрены новые способы кодового разделения каналов и модуляции сигналов, позволяющие повысить коэффициент спектральной эффективности систем передачи информации и, как следствие, существенно расширить перечень предоставляемых телекоммуникационных услуг, требующих высокой скорости передачи информации, проведена оценка пропускной способности систем радиосвязи, реализующих эти способы в ограниченной выделенной полосе частот.

Известны следующие способы повышения эффективности использования выделенного спектра частот:

- ❖ применение ортогональных кодов (двоичных псевдослучайных последовательностей из ансамбля полных кодовых колец) [2, 3, 4];
- ❖ использование когерентных частот для разделения каналов (число когерентных частот L — нечетно) [5, 6, 7];
- ❖ применение эффективных видов модуляции сигналов: квадратурных многоуровневой амплитудной или фазовой модуляции [5];
- ❖ комбинированное применение указанных способов.

Квадратурный амплитудно-инверсный способ модуляции сигналов

Пропускная способность многоканальных систем радиосвязи с кодовым разделением квадратурных каналов при инверсной (двоичной) модуляции сигналов численно равна полосе спектра сигнала, выраженной в Гц. Известно, что исполь-

зование М-ичной модуляции сигналов позволяет получить требуемую пропускную способность в выделенной полосе спектра частот, но для этого потребуются дополнительные затраты энергии на передачу информации⁵. Задача состоит в том, чтобы из множества возможных способов М-ичной модуляции сигналов найти такой, который требует меньших затрат энергии на передачу требуемого количества информации.

В [8] предложен новый способ многоуровневой квадратурной амплитудно-инверсной модуляции сигналов (m -КАИМ), улучшающий спектрально-энергетические характеристики систем радиосвязи. Суть данного способа модуляции состоит в следующем. Каждой информационной группе, состоящей из m двоичных символов, один из них (например, первый) используется для определения знака информационной кодовой последовательности (прямая или инверсная), а остальные $(m - 1)$ символов определяют амплитуду этой последовательности.

Когерентный частотно-кодовый способ разделения каналов

Пусть имеется когерентная сетка частот с фиксированным разносом соседних частот на

$$\Delta f = 1/T = F/N,$$

где T — длительность двоичных псевдослучайных последовательностей из ансамбля полных кодовых колец (период кодовой последовательности), применяемых для ортогонального кодового разделения информационных каналов на каждой когерентной частоте;

N — длина кодовой последовательности, выраженная в чипах (элементарных прямоугольных импульсах), $N = 2n, n > 1$;

$2F$ — ширина полосы частот, выделенной системе радиосвязи.

Для любой пары когерентной сетки частот разность фаз чётной тригонометрической функции должна удовлетворять равенству:

$$\Delta\varphi = \varphi_i - \varphi_j = \frac{\pi}{2} (2k + 1); i - j = k; k = 0, 1, 2, \dots,$$

при этом $\cos \Delta\varphi = \pi r^2 = 0$,
а нечётной —

$$\Delta\varphi = \varphi_i - \varphi_j = \varphi_i - \varphi_j' = \pi k,$$

при этом $\sin \Delta\varphi = 0$.

⁵Скляр Б. Цифровая связь: теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр; пер. с англ. Е.Е. Грозы и др. – 2-е изд. М.: Вильямс, 2016. 1099 с.

В этом случае квадратурные каналы можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} y_i(t) &= A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i), \\ x_i(t) &= A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i), \\ y_j'(t) &= A_j \cos(\omega_j t + \varphi_j'), \\ x_j'(t) &= A_j \sin(\omega_j t + \varphi_j'), \end{aligned}$$

где ω — угловая частота, $\omega = 2\pi/\tau$, $\tau = T/N$, то есть $\omega = 2\pi N/T$;

τ — длительность символа кодовой последовательности.

Примем скорость передачи информации $R = 1/T$ в синфазном и квадратурном каналах одинаковой. Тогда ширина спектра сигнала на когерентной частоте $2F = 2/\tau = 2N/T = 2N \cdot R$.

Покажем, что квадратурные каналы радиосвязи на когерентных частотах ортогональны.

$$\begin{aligned} z(t) &= \int_0^T A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \cdot A_j \sin(\omega_j t + \varphi_j') dt = \\ &= A_i \cdot A_j \cdot \int_0^T \{ \cos[(\omega_i - \omega_j)t + \varphi_i - \varphi_j'] - \\ &\quad - \cos[(\omega_i + \omega_j)t + \varphi_i + \varphi_j'] \} dt / 2. \end{aligned}$$

Составляющая суммарной частоты (выделена жирным шрифтом) находится за пределами полосы частот, пропускаемых низкочастотным фильтром. Следовательно:

$$z(t) \approx A_i \cdot A_j \cdot \int_0^T \cos[(\omega_i - \omega_j)t + \varphi_i - \varphi_j'] dt / 2 = 0,$$

как интеграл от целого числа периодов.

Аналогично:

$$\begin{aligned} z'(t) &= \int_0^T A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) \cdot A_j \cos(\omega_j t + \varphi_j') dt = \\ &= A_i \cdot A_j \cdot \int_0^T \{ \cos[(\omega_i - \omega_j)t + \varphi_i - \varphi_j'] + \\ &\quad + \cos[(\omega_i + \omega_j)t + \varphi_i + \varphi_j'] \} dt / 2 \approx \\ &\approx A_i \cdot A_j \cdot \int_0^T \cos[(\omega_i - \omega_j)t + \varphi_i - \varphi_j'] dt / 2 = 0. \end{aligned}$$

Из приведённых выше выражений следует, что:

- ❖ любая пара квадратурных каналов на соседних когерентных частотах на выходе фильтра, настроенного на разностную частоту $(\omega_i - \omega_j)$, ортогональна;
- ❖ в системах радиосвязи с когерентным частотно-кодовым разделением каналов все квадратурные каналы ортогональны между собой.

Будем считать, что ширина спектра частот, выделенная регламентирующими органами широкополосной системе радиосвязи, равна $2F$. В этом случае при наличии $L > 1$ когерентных частот (L — нечётное число) ширина частотного спектра, требуемая системе радиосвязи, превысит выделенную полосу частот на величину $R \cdot (L - 1)^6$.

Для того чтобы избежать превышения выделенной полосы частот, необходимо ограничить ширину спектра радиосигнала каждого широкополосного канала с обеих сторон (слева и справа) на величину $\Delta f = R \cdot (L - 1) / 2 = (L - 1) \cdot F / 2N$ [5]. Ограничение спектра в разумных пределах не нарушит ортогональности радиосигналов, только незначительно изменится форма чипов, затягиваются фронты и спады исходных «прямоугольных» импульсов. Например, при $N = 64$ и $L = 5$ с каждой стороны спектра прямоугольного импульса, ограниченного по первым нулям и имеющего ширину главного лепестка «неискаженного» спектра 128R [Гц], будет срезано по $\Delta f = R \cdot (L - 1) / 2 = 2R$ [Гц] (рис. 1).

⁶Сивов В.А., Васильев В.А., Моисеев В.Ф. и др. Оценка пропускной способности систем радиосвязи с когерентным частотно-кодовым разделением каналов // Электросвязь. 2018. № 6. С. 53 – 55.

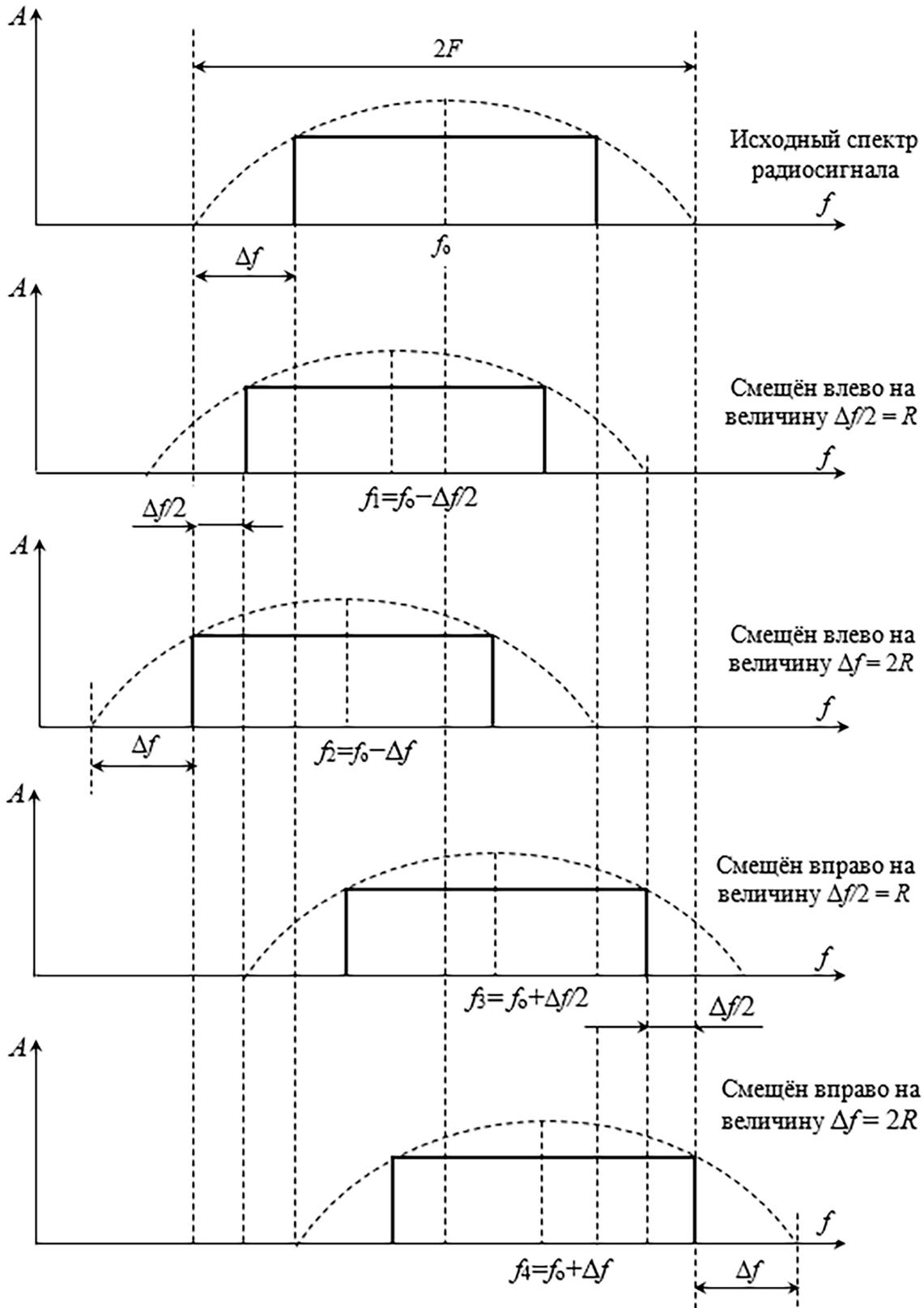


Рис. 1. Когерентно-частотный способ разделения каналов

Тогда ширина спектра сигнала на конкретной частоте составит $124R$, а ширина спектра на L когерентных частотах

$$2F = 124 \cdot R + (L - 1) \cdot R = 128 \cdot F/N, \text{ Гц}$$

т.е. равна выделенной полосе частот. При этом пропускная способность системы радиосвязи возрастет в L раз, в данном случае — в 5 раз.

Таким образом, рассматриваемый когерентный частотно-кодированный способ разделения каналов с двоичным инверсным методом модуляции N широкополосных сигналов на L когерентных частотах в пределах выделенной полосы частот $2F$ состоит в усечении главного лепестка спектра прямоугольного радиоимпульса с любой стороны на величину $F \cdot (L - 1) / 2N$ [Гц] на каждой из когерентных частот.

Оценим пропускную способность рассмотренных способов передачи информации.

Пропускная способность одноканальной широкополосной системы связи с квадратурными каналами, длиной кода равной N чипов и инверсной двоичной модуляцией

$$C = 2R.$$

Пропускная способность N -канальной системы связи с ортогональным кодовым разделением каналов и инверсной двоичной модуляцией в каждом квадратурном канале

$$C = 2R \cdot N.$$

Пропускная способность N -канальной системы связи на L когерентных частотах в сочетании с ортогональным кодовым разделением каналов и инверсной двоичной модуляцией в каждом квадратурном канале

$$C = 2R \cdot N \cdot L.$$

Ещё большую пропускную способность можно обеспечить при совместном применении изложенного выше способа m -КАИМ и способа разделения каналов на L когерентных частотах

$$C = 2m \cdot L \cdot R \cdot N.$$

Например, при $m = 4$ и $L = 5$ пропускная способность системы радиосвязи возрастет в $m \cdot L = 4 \cdot 5 = 20$ раз.

Выводы

Таким образом, в системах радиосвязи в условиях острого дефицита частотного ресурса целесообразно использовать способ кодового разделения каналов на базе нелинейных кодовых последовательностей, полученных на основе полных кодовых колец.

Использование широкополосных систем радиосвязи с многоуровневой квадратурной амплитудно-инверсной модуляцией сигналов и с когерентным частотно-кодированным разделением каналов позволяет повысить пропускную способность в выделенной полосе частот в mL раз, где m — число кодируемых двоичных информационных символов, а L — число когерентных частот.

Рассмотренные способы кодового разделения каналов и модуляции сигналов позволяют существенно повысить пропускную способность широкополосных систем радиосвязи в ограниченной выделенной полосе частот при сохранении их энергоэффективности и помехозащищенности, и могут быть использованы при модернизации существующих и разработке перспективных систем радиосвязи.

Литература

1. Чистяков Е.А., Мартынов И.А., Самохина Е.В. Кодовое разделение сигналов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2023. Т. 192, № 1. – С. 27 – 31.
2. Зайцев М.А., Савилкин С.Б., Сухов А.В., Филатов В.И. Выбор ансамбля широкополосных сигналов для систем спутниковой связи с многостанционным доступом // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2023. № 5.
3. Филатов В.И., Жулего В.А., Балакирев В.Ю., Ушаков С.С. Разработка предложений по выбору ансамбля широкополосных сигналов для систем спутниковой связи с многостанционным доступом с кодовым разделением каналов // Т-Comm. Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т.15, № 4. С. 13 – 20.
4. Савчук Д.О. Методы разделения каналов // Актуальные исследования. Международный научный журнал. 2024. №44 (226). [Apni.ru:journal/226](https://apni.ru/journal/226).
5. Сивов В.А., Васильев В.А., Филатов В.И. и др. Выбор ансамбля широкополосных сигналов для систем спутниковой связи с многостанционным доступом // Стратегическая стабильность. 2020. №3(92). С.61 – 63.
6. Аверина Л.И., Каменцев О.К. Повышение спектральной эффективности сигналов с частотным мультиплексированием в системах высокоскоростной связи // Радиотехника. 2023. Т. 87, №5. – С. 115 – 122.
7. Liu X, Darwazeh I., Zein N., Sasaki E. Spectrally efficient FDM system with probabilistic shaping // IEEE 94th Vehicular Technology Conference. 2021. P. 1 – 6.
8. Патент на изобретение RU № 2770857C1, приоритет изобретения от 29.04.2021 г., опубликовано 22.04.2022 г., бюл. № 12.

WAYS TO INCREASE THE BANDWIDTH OF BROADBAND RADIO COMMUNICATION SYSTEMS WITH CODE DIVISION OF CHANNELS

Brezhnev D.V.¹, Vdovchenko E.S.², Savelieva M.V.³, Abilov V.N.⁴

Keywords: quadrature channels, coherent frequency grid, quadrature amplitude modulation, quadrature multilevel amplitude-inverse modulation.

The purpose of the study is to study the possibilities and prospects of using new methods division of channels in broadband radio communication systems, which allow improving the spectral and energy characteristics of these systems.

Research method. The study used the method of analysis and synthesis, which allows for a comprehensive assessment of the prospects for the introduction of new methods of code division of channels and signal modulation in broadband radio communication systems.

The results of the research were proposed and considered new methods of signal modulation and channel code division of channels, and their comparative assessment was carried out in terms of the efficiency of using the allocated frequency spectrum with methods of transmitting information currently used in broadband radio communication systems. The article provides an assessment of the bandwidth of broadband radio communication systems with coherent frequency-code division of channels with quadrature binary inverse modulation of signals at each coherent frequency, as well as the bandwidth of radio communication systems with coherent frequency-code division of channels with multilevel quadrature amplitude-inverse modulation of broadband signals at each coherent frequency in a limited dedicated radio frequency band.

Scientific novelty. The proposed methods of code division of channels and modulation of signals, in comparison with known ones, make it possible to significantly increase the bandwidth of promising communication systems in a dedicated frequency band while maintaining their energy efficiency and high noise immunity, inherent in broadband radio communication systems.

References

1. Chistjakov E.A., Martynov I.A., Samohina E.V. Kodovoe razdelenie signalov // Voprosy jelektromehaniki. Trudy VNIIJeM. 2023. T. 192, № 1. – S. 27 – 31.
2. Zajcev M.A., Savilkin S.B., Suhov A.V., Filatov V.I. Vybor ansamblja širokopolosnyh signalov dlja sistem sputnikovoj svjazi s mnogostancionnym dostupom // Zhurnal radiojelektroniki [jelektronnyj zhurnal]. 2023. № 5.
3. Filatov V.I., Zhulego V.A., Balakirev V.Ju., Ushakov S.S. Razrabotka predlozhenij po vyboru ansamblja širokopolosnyh signalov dlja sistem sputnikovoj svjazi s mnogostancionnym dostupom s kodovym razdeleniem kanalov // T-Comm. Telekommunikacii i transport. 2021. T.15, № 4. S. 13 – 20.
4. Savchuk D.O. Metody razdelenija kanalov // Aktual'nye issledovanija. Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal. 2024. №44 (226). Apni.ru:journal/226.
5. Sivov V.A., Vasil'ev V.A., Filatov V.I. i dr. Vybor ansamblja širokopolosnyh signalov dlja sistem sputnikovoj svjazi s mnogostancionnym dostupom // Strategicheskaja stabil'nost'. 2020. №3(92). S.61 – 63.
6. Averina L.I., Kamencev O.K. Povyshenie spektral'noj jeffektivnosti signalov s chastotnym mul'tipleksirovaniem v sistemah vysokoskorostnoj svjazi // Radiotekhnika. 2023. T. 87, №5. – S. 115 – 122.
7. Liu X, Darwazeh I., Zein N.,Sasaki E. Spectrally efficient FDM system with probabilistic shaping // IEEE 94th Vehicular Technology Conference. 2021. P. 1 – 6.
8. Patent na izobrenenie RU № 2770857S1, prioritet izobrenenija ot 29.04.2021 g., opublikovano 22.04. 2022 g., bjul. № 12.

¹Dmitry V. Brezhnev, Head of the Department of the 16th Central Research and Testing Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow Region, Mytishchi. E mail: kbs79@bk.ru

²Evgeny S. Vdovchenko, Head of the Assistant Service to the Head of the Institute for the Protection of State Secrets of the 16th Central Research and Testing Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow Region, Mytishchi. E-mail: natashok12039@mail.ru

³Marina V. Savelieva, Ph.D. of Technical Sciences, Researcher of the Federal State Budgetary Institution "16th Central Research and Testing Institute" of the Ministry of Defense of Russia, Moscow Region, Mytishchi. E mail: marina-savelieva-62@mail.ru

⁴Vladimir N. Abilov, Senior Researcher of the Federal State Budgetary Institution "16 Central Scientific Research Testing Institute" of the Russian Ministry of Defense, Moscow region, Mytishchi. E-mail: avnurb@mail.ru