

ПРОАКТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ ПРИГОДНОСТИ РАДИОКАНАЛОВ В РЕЖИМЕ ППРЧ

Дворников Сергей Викторович,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения,
г. Санкт-Петербург, Россия, practicdsv@yandex.ru

Дворников Сергей Сергеевич,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения,
г. Санкт-Петербург, Россия, dvornik92@mail.com

Жеглов Кирилл Дмитриевич,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения,
г. Санкт-Петербург, Россия,
zheglov.k@gmail.com

DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-11-15-20

Manuscript received 10 September 2022;
Accepted 14 October 2022

Ключевые слова: режим с программной перестройкой рабочей частоты, контроль пригодности радиоканала, декаметровый диапазон, повышение своевременности передачи сообщений

Представлены результаты разработки оригинального подхода к контролю пригодности радиоканалов на рабочих частотах, используемых для передачи информации в режиме с ППРЧ. Рассмотрены традиционные подходы, в которых контроль пригодности радиоканалов осуществляют непосредственно после передачи информационного блока данных. Представлены результаты анализа, характеризующего основные достоинства и недостатки, как используемого подхода, так и разработанного. Приводятся принятые ограничения и допущения, введенные в ходе исследования для получения количественных оценок. Демонстрируется иллюстрационный материал, поясняющий сущность известного и предлагаемого подхода с позиций временного бюджета, используемого для организации передачи информационных данных в режиме ППРЧ. Приведена количественная оценка эффективности разработанного способа с позиций своевременности и оперативности передачи сообщений. Введен показатель, характеризующий относительный выигрыш временных затрат, обеспечиваемый разработанным подходом. Демонстрируются результаты моделирования. Сделаны выводы и определены направления дальнейшего исследования.

Информация об авторах:

Дворников Сергей Викторович, д.т.н., профессор, профессор кафедры радиотехнических и оптоэлектронных комплексов (Кафедра 21) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения", профессор кафедры радиосвязи Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия

Дворников Сергей Сергеевич, старший преподаватель кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств (Кафедра 23) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения", научный сотрудник научно-исследовательского отдела, Военная академия связи им. С.М. Буденного, к.т.н., г. Санкт-Петербург, Россия

Жеглов Кирилл Дмитриевич, аспирант кафедры радиотехнических и оптоэлектронных комплексов (Кафедра 21) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения", г. Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования:

Дворников С.В., Дворников С.С., Жеглов К.Д. Проактивный контроль пригодности радиоканалов в режиме ППРЧ // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Том 16. №11. С. 15-20.

For citation:

Dvornikov, S.V., Dvornikov S.S., Zheglov K.D. (2022) Proactive suitability control of radio channels in IFB mode. T-Comm, vol. 16, no.11, pp. 15-20. (in Russian)

Введение

Сложность организации радиосвязи в декаметровом диапазоне радиоволн обусловлена их ионосферным распространением [1, 2], характеризующимся глубокими замираниями случайного характера. В таких условиях сложно рассчитывать на высокую устойчивость радиолиний, использующих для организации радиосвязи только одну рабочую частоту [3, 4]. Учитывая указанные обстоятельства, на практике широкое распространение получил режим частотной адаптации [5, 6], предполагающий смену рабочей частоты в случае снижения качества канала. Однако успешная организация такого режима изначально предполагает наличие так называемого обратного служебного канала с высоким качеством связи, что достаточно сложно обеспечить при ионосферном распространении радиоволн.

Другой альтернативой видится применение режима с программной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ) [7-9], широко используемого в сетях сотовой связи для борьбы с многолучевым распространением радиоволн в условиях урбанизированной местности. В стандартах GSM эта процедура получила название *Frequency Hopping Mode* [10].

Вместе с тем следует понимать, что если в ОВЧ-диапазоне положительный эффект от режима ППРЧ достигается за счет кратковременности работы радиолинии на каждой из используемых частот [11, 12], что исключает необходимости их контроля, то в декаметровом канале сложно рассчитывать на высокую скорость перестройки рабочей частоты. Поэтому использование такого режима изначально предполагает наличие режима контроля пригодности рабочего канала [14, 15].

Учитывая указанные обстоятельства, предлагаются результаты обоснования способа проактивного контроля пригодности рабочих частот непосредственно в ходе передачи блока информационных данных.

Анализ особенностей реализации режима с ППРЧ

Реализация технологии режима с ППРЧ в декаметровом диапазоне, как правило, ограничена скоростью до 50 скачков в секунду (ск/с) [16], т.е. продолжительность передачи не превышает 20 мс на каждой из рабочих частот. Эти особенности обусловлены характеристиками ионосферного канала и подтверждаются рекомендациями стандарта коротковолнового диапазона радиосвязи *MIL-STDB* [17], который является модернизацией стандарта *MIL-STDA*, более известного как стандарт *ALE* [18-20].

Анализ общедоступных подходов к организации самого режима с ППРЧ показал, что при заявляемых до 1024 частот для работы [21], на практике, при организации связи преимущественно используют порядка 32-40 рабочих каналов (например, в радиостанциях серии «Акведук» Р-168, радиостанции средней мощности Р-166, радиостанции «Аметист-М») [22]. Это обусловлено тем, что отклонение от номинала оптимальной рабочей частоты более чем ± 150 кГц приводит более чем к двукратному снижению энергетического бюджета радиолинии.

В интересах дальнейшего проведения исследования рассмотрим ситуацию в соответствии с [22], согласно которой осуществляется приема/передачи 100 символьных сообщений с использованием 32 рабочих каналов в двухстороннем

режиме с ППРЧ со скоростью 50 ск/с при 12 вызывных частотах.

Тогда общий бюджет времени составит

$$T_{\Sigma} = T_{\text{сх}} + T_{\text{ин}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{сх}}$ – время на входение в синхронизацию и установление связи. $T_{\text{ин}}$ – время на передачу символьных сообщений.

Полагая, что при установлении синхронизации время передачи на каждой из $U_0 = 12$ частот будет равно $t_0 = 1/V = 20$ мс, а объем передаваемого символьного сообщения составит $U = 300$ блоков, каждый из которых будет передаваться в режиме с ППРЧ со скоростью $V = 50$ ск/с по рабочим частотам, объем которых составит $Y = 32$, то значение T_{Σ} составит:

$$T_{\Sigma} = U_0 \times t_0 + U \times t_0 = 12 \times 20 + 300 \times 20 = 6,24 \text{ с}. \quad (2)$$

Однако полученное время соответствует условию пригодности всех 32 рабочих частот, используемых в режиме с ППРЧ. В случае если качество канала на одной из рабочих частот не соответствует требованиям, то потерянная информация, передаваемая на этой частоте, должна быть передана повторно [23]. Если даже допустить, что в качестве обратного канала используются 12 частот синхронизации, и в режиме ППРЧ обеспечивается равномерный выбор рабочих частот, то общее время, затрачиваемое на передачу, с учетом непригодности одной частоты составит:

$$T_{\Xi} = 12 \times 20 + 300 \times 20 + 12 \times 20 + 10 \times 20 = 6,24 + 440 = 6,68 \text{ с}. \quad (3)$$

То есть при рассматриваемых исходных данных, общее затрачиваемое время возрастет на 7%. Но это будет возможно только в том случае, если будет выявлен номинал непригодной частоты и она будет исключена из списка рабочих частот. В противном случае, часть информации, которая вновь будет передана на непригодной частоте, также будет неприята повторно. Для исключения такой ситуации на приемной стороне должен обязательно проводиться контроль пригодности рабочих каналов. Очевидно, что применительно к [22], он проводится по окончании сеанса передачи и информация о контроле транслируется на передающую сторону. При таком допущении время T_{Σ} составит

$$\begin{aligned} T_{\Sigma} &= U_0 \times t_0 + U \times t_0 + Y \times t_k + U_0 \times t_0 = \\ &= (2U_0 + U) \times t_0 + Y \times t_k = \\ &= (2 \times 12 + 300 + 32) \times 20 = 7,12 \text{ с} \end{aligned} \quad (4)$$

Согласно полученным результатам, T_{Σ} увеличится, как минимум, на 14% (результат получен при условии, что $t_k = t_0$). А значение T_{Ξ} , соответственно, возрастет до 7,56 с.

Но такое повышение бюджета времени оправдано, поскольку исключает повторное использование непригодных частот.

Для общего случая расчетное выражение бюджета времени будет иметь следующий вид

контроля рабочих частот $T_{ок}$.

В терминах выражения (7), потребный временной бюджет в новом варианте будет определяться следующим образом:

$$T_{\Sigma} = T_{cx} + (T_{ин} + 1/V) + T_{пп} \quad (9)$$

Это связано с тем, что в новом варианте не используются циклы $T_{кч}$ и $T_{ок}$, а цикл $T_{ин}$ увеличится на время обратной передачи последнего временного блока $1/V$. Преобразуем выражение (9) в соответствии с формулой (8) к виду:

$$T_{\Sigma} = (U_0 + (U + 1) + N)t_0 \quad (10)$$

Полученная формула (10) позволяет рассчитать потребный временной бюджет.

На рисунке 3 представлены графики, характеризующие зависимость затрачиваемого временного бюджета от количества непригодных частот $f_{нч}$, выявленных в ходе сеанса связи.

Количественные оценки, согласно выражению $O(f_{нч}) = T_{\Sigma}^{ПП}(f_{нч}) / T_{\Sigma}^{ППП}(f_{нч})$, $T_{\Sigma}^{ПП}(f_{нч})$ – для традиционного подхода, $T_{\Sigma}^{ППП}(f_{нч})$ – для предлагаемого подхода, представлены в таблице 1

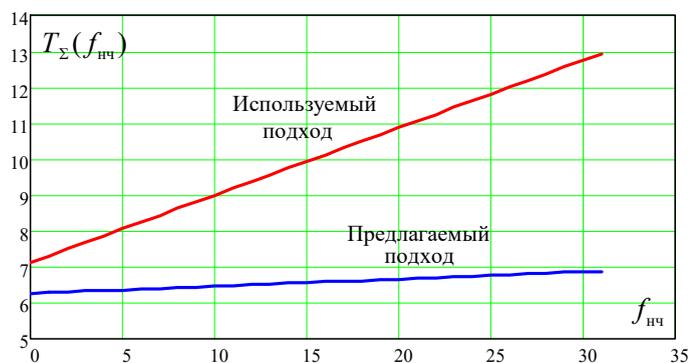


Рис. 3. Зависимость потребного бюджета от количества непригодных частот

На рисунке 3 по оси ординат величина $T_{\Sigma}(f_{нч})$ в секундах, по оси абсцисс $f_{нч}$ – в штуках. Графики получены для исходных данных, представленных в настоящей статье.

Таблица 1

Выигрыш, обеспечиваемый применением разработанного подхода в зависимости от количества непригодных частот

$(f_{нч})$	0	5	10	15	20	25	31
$O(f_{нч})$	1,14	1,27	1,4	1,51	1,63	1,75	1,9

Анализ результатов таблицы 1 позволяет сделать заключение, что в общем случае обеспечиваемый выигрыш с ростом числа непригодных частот стремиться к двум. Очевидно, что искомый результат зависит от числа потребного количества частот [24-26], необходимых для организации режима ППРЧ, количества синхронизирующих частот, объема передаваемого информационного сообщения.

Но в любом случае, даже при отсутствии непригодных частот, предлагаемый алгоритм обеспечивает временной выигрыш, который можно определить как оперативность передачи сообщений, или своевременность.

Заключение

Представленные результаты позволяют заключить, что сущность подхода, основанная на контроле пригодности рабочих частот непосредственно в ходе сеанса передачи информационных сообщений, изначально обеспечивает выигрыш в оперативности. В общем случае, в зависимости от особенностей организации традиционных алгоритмов режима с ППРЧ и количества непригодных каналов, обеспечиваемая эффективность может достигать 100%.

Направление дальнейших исследований авторы связывают с использованием совместного частотно-временного подхода [27, 28] при обработке сигналов, в интересах повышения помехозащищенности приема [29, 30].

Литература

1. Аджемов С.С., Русанов В.Э., Лобов Е.М. К вопросу об использовании широкополосных сигналов в ионосферном канале // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2010. Т. 4. № 11. С. 49-55.
2. Lipatkin V.I., Lobov E.M., Lobova E.O. The quality of estimation of parameters of a broadband signal with non-optimal reception under conditions of dispersion distortions in the earth's ionosphere // Т-Comm. 2022. Т. 16. № 8. С. 46-53.
3. Дворников С.В. Упрощенное представление модели Neta для расчета затухания сигнала на открытых трассах // Информация и космос. 2017. № 3. С. 6-10.
4. Мирошникова Н.Е. Применение адаптивной фильтрации в задаче оценки ионосферного канала // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2016. Т. 10. № 9. С. 24-29.
5. Чернышов А.Г., Оксюзян Д.С., Серёгин Д.С. Алгоритм автоматического регулирования мощности излучения передатчиков в радиолиниях по отклонениям // СБНТОРЭС: труды ежегодной НТК. 2021. № 1 (76). С. 123-124.
6. Дворников С.В., Духовницкий О.Г. Оценка помехозащищенности профессионального радионавигационного оборудования системы ГЛОНАСС // Информация и космос. 2015. № 4. С. 73-77.
7. Козинцева М.П. Синхронизация системы радиосвязи с ППРЧ // Научно-исследовательский центр "Technical Innovations". 2022. № 9-1. С. 552-557.
8. Блинов П.В., Юрченко С.П. Помехозащищенность радиолинии с межсимвольной ППРЧ в условиях помех // Охрана, безопасность, связь. 2020. № 5-3. С. 35-39.
9. Дворников С.В., Пшеничников А.В., Аванесов М.Ю. Модель деструктивного воздействия когнитивного характера // Информация и космос. 2018. № 2. С. 22-29.
10. Василий Скрынников. Журнал "Технологии и средства связи" #4, 2017 Научный обзор: проблемы обеспечения электромагнитной совместимости современных и перспективных радиосистем сотовой связи (часть 4) стр. 48-56 <http://lib.tssonline.ru/articles2/bypub/tss-4-2017>. Свободный доступ на 20.10.22.
11. Гордиенко Д.Ю., Дворников С.В. Корреляционный прием частотно-манипулированных сигналов в режиме с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 3. С. 18-22.
12. Пшеничников А.В., Гордейчук А.Ю. Управление частотно-временным ресурсом помехозащищенных линий радиосвязи с программной перестройкой рабочей частоты // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2020. № 1. С. 104-108.

13. Дворников С.В., Дворников С.С., Иванов Р.В., Гулидов А.А., Чихонадских А.П. Защита от структурных помех радиоканалов с частотной манипуляцией // Информационные технологии. 2017. Т. 23. № 3. С. 193-198.
14. Марков М.М., Климов И.З., Хворенков В.В. Контроль состояния канала связи по информационным признакам сигнала // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2003. № 3. С. 45-49.
15. Дворников С.В., Дворников С.С., Пиеничников А.В. Аппарат анализа частотного ресурса для режима псевдослучайной перестройки рабочей частоты // Информационно-управляющие системы. 2019. № 4 (101). С. 62-68.
16. Майстренко В.А., Коровин С.Д. Алгоритмы управления частотно-временным ресурсом адаптивной радиолинии декаметровой связи с ППРЧ в условиях сложной радиоэлектронной обстановки // Омский научный вестник. 2006. № 10 (48). С. 135-139
17. Семашко А.В., Ямпольский А.А. Оценка эффективности применения последовательных PSK модемов в составе системы ALE третьего поколения // В сборнике: Информационные системы и технологии - 2019. Сборник материалов XXV Международной научно-технической конференции. 2019. С. 339-341.
18. Johnson E., Kenney T., Chamberlain M., Furman W., Koski E., Leiby E., Wadsworth M. U. S. MIL-STD Appendix C - A Unified 3rd Generation HF Messaging Protocol. Harris Corporation, RF Communications Division, 1998.
19. Тимошенко А.А. Код Голея в системе радиосвязи "ALE" // Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем. 2014. Т. 2. № 12-2. С. 39-45.
20. Прасолов В.А., Бобрус С.Ю., Попов М.Ю., Токарев Д.А. Оценка скорости передачи данных по протоколу HDL стандарта ALE-3G // В сборнике: Радиотехника, электроника и связь (РЭиС-2017). Сборник докладов IV Международной научно-технической конференции. 2017. С. 156-161.
21. Дворников С.В., Овчинников Г.Р., Балыков А.А. Программный симулятор ионосферного радиоканала декаметрового диапазона // Информация и космос. 2019. № 3. С. 6-12.
22. Валеев М.М., Иванов А.А., Каретников Л.А., Хазан Г.К. Радиостанция «АМЕТИСТ-М» – современное программно-определяемое средство связи // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VI Международной научно-технической конференции (6–8 октября 2021 года, Омск Россия). Омск: ОНИИП, 2021. С. 108–110
23. Дворников С.В., Устинов А.А., Гордейчук А.Ю. Адаптивный выбор частот в многоканальных системах передачи видео // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2018. № 4. С. 68-74.
24. Генов А.А., Решетников В.Н. Адаптивное управление частотно-временным ресурсом космических аппаратов в сетях спутниковой связи // Информационные технологии и вычислительные системы. 2008. № 3. С. 55-62.
25. Панин Р.С., Путилин А.Н., Хвостунов Ю.С. Использование частотного ресурса системой декаметровой связи в режиме псевдослучайной перестройки рабочей частоты // Техника средств связи. 2020. № 3 (151). С. 2-14.
26. Пиеничников А.В., Гордейчук А.Ю. Управление частотно-временным ресурсом помехозащищенных линий радиосвязи с программной перестройкой рабочей частоты // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2020. № 1. С. 104-108.
27. Дворников С.В., Алексеева Т.Е. Распределение Алексеева и его применение в задачах частотно-временной обработки сигналов // Информация и космос. 2006. № 3. С. 9-20.
28. Алексеев А.А., Аладинский В.А., Железняк В.К., Комарович В.Ф., Дворников С.В. Применение методов частотно-временной обработки акустических сигналов для анализа параметров реверберации // Научное приборостроение. 2001. Т. 11. № 1. С. 65-76.
29. Дворников С.В., Пиеничников А.В., Манаенко С.С., Бурякин Д.А., Кузнецов Д.А. Теоретические положения повышения помехоустойчивости сигнально-кодовых конструкций квадратурных сигналов // Информация и космос. 2015. № 3. С. 13-16.
30. Макаренко С.И., Иванов М.С., Попов С.А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты: монография. СПб.: Свое издательство, 2013. 166 с.

PROACTIVE SUITABILITY CONTROL OF RADIO CHANNELS IN IFB MODE

Sergey V. Dvornikov, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia, practicdsv@yandex.ru
Sergey S. Dvornikov, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia, dvornik92@mail.com
Kirill D. Zhiglov, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia, zhiglov.k@gmail.com

Abstract

The results of the development of an original approach to monitoring the suitability of radio channels at operating frequencies used to transmit information in the frequency hopping mode are presented. Traditional approaches are considered, in which the control of the suitability of radio channels is carried out immediately after the transmission of the information block of data. The results of the analysis characterizing the main advantages and disadvantages of both the approach used and the one developed are presented. The accepted restrictions and assumptions introduced in the course of the study to obtain quantitative estimates are given. Illustrative material is shown that explains the essence of the known and proposed approach from the standpoint of the time budget used to organize the transmission of information data in the frequency hopping mode. A quantitative assessment of the effectiveness of the developed method from the standpoint of the timeliness and efficiency of message transmission is given. An indicator is introduced that characterizes the relative gain in time costs provided by the developed approach. Simulation results are shown. Conclusions are drawn and directions for further research are determined.

Keywords: software tunable operating frequency mode, radio channel suitability control, decameter range, improved message transmission timeliness.

References

1. Adzhemov S.S., Rusanov V.E., Lobov E.M. On the issue of using broadband signals in the ionospheric channel. *T-Comm*. 2010. Vol. 4. No. 11, pp. 49-55.
2. Lipatkin V.I., Lobov E.M., Lobova E.O. The quality of estimation of parameters of a broadband signal with non-optimal reception under conditions of dispersion distortions in the earth's ionosphere. *T-Comm*. 2022. Vol. 16. No. 8, pp. 46-53.
3. Dvornikov S.V. Simplified representation of the Hata model for calculating signal attenuation on open paths. *Information and space*. 2017. No. 3, pp. 6-10.
4. Miroshnikova N.E. Application of adaptive filtering in the problem of ionospheric channel estimation. *T-Comm*. 2016. Vol. 10. No. 9, pp. 24-29.
5. Chernyshov A.G., Oksuzyan D.S., Seregin D.S. Algorithm for automatic control of the radiation power of transmitters in radio links according to deviations. *SPbNTORES: proceedings of the annual scientific and technical complex*. 2021. No. 1 (76), pp. 123-124.
6. Dvornikov S.V., Dukhovnitsky O.G. Evaluation of noise immunity of professional radio navigation equipment of the GLONASS system. *Information and space*. 2015. No. 4, pp. 73-77.
7. Kozintseva M.P. Synchronization of the radio communication system with frequency hopping. *Research Center "Technical Innovations*. 2022. No. 9-1, pp. 552-557.
8. Blinov P.V., Yurchenko S.P. Interference immunity of a radio link with intersymbol hopping frequency in conditions of interference. *Security, safety, communication*. 2020. No. 5-3, pp. 35-39.
9. Dvornikov S.V., Pshenichnikov A.V., Avanesov M.Yu. Model of destructive influence of cognitive character. *Information and space*. 2018. No. 2, pp. 22-29.
10. Vasily Skrynnikov. Journal "Technologies and means of communication" #4, 2017 Scientific review: problems of ensuring electromagnetic compatibility of modern and advanced cellular radio systems (part 4) pp. 48-56 <http://lib.tssonline.ru/articles2/bypub/tss-4-2017>. Free access on 10/20/22.
11. Gordienko D.Yu., Dvornikov S.V. Correlation reception of frequency-shift keyed signals in the mode with pseudo-random tuning of the operating frequency. *T-Comm*. 2022. Vol. 16. No. 3, pp. 18-22.
12. Pshenichnikov A.V., Gordeychuk A.Yu. Management of the frequency-time resource of noise-protected radio communication lines with software restructuring of the operating frequency. *Problems of radio electronics. Series: TV Technique*. 2020. No. 1, pp. 104-108.
13. Dvornikov S.V., Dvornikov S.S., Ivanov R.V., Gulidov A.A., Chikhonadskikh A.P. Protection from structural interference of radio channels with frequency shift keying. *Information technologies*. 2017. Vol. 23. No. 3, pp. 193-198.
14. Markov M.M., Klimov I.Z., Khvorenkov V.V. Control of the state of the communication channel by the informational features of the signal. *Bulletin of the Izhevsk State Technical University*. 2003. No. 3, pp. 45-49.
15. Dvornikov S.V., Dvornikov S.S., Pshenichnikov A.V. Apparatus for analyzing the frequency resource for the mode of pseudo-random tuning of the operating frequency. *Information and control systems*. 2019. No. 4 (101), pp. 62-68.
16. Maistrenko V.A., Korovin S.D. Algorithms for controlling the frequency-time resource of an adaptive radio link of decameter communication with frequency hopping in a complex radio-electronic environment. *Omsk Scientific Bulletin*. 2006. No. 10 (48), pp. 135-139.
17. Semashko A.V., Yampolsky A.A. Evaluation of the effectiveness of the use of serial PSK modems as part of the third generation ALE system. In the collection: *Information systems and technologies - 2019. Collection of materials of the XXV International Scientific and Technical Conference*. 2019, pp. 339-341.
18. E. Johnson, T. Kenney, M. Chamberlain, W. Furman, E. Koski, E. Leiby, M. Wadsworth, "U. S. MIL-STDB Appendix C - A Unified 3rd Generation HF Messaging Protocol." Harris Corporation, RF Communications Division, 1998.
19. Timoshenko A.A. Golay code in the radio communication system "ALE". *Information technologies and problems of mathematical modeling of complex systems*. 2014. Vol. 2. No. 12-2, pp. 39-45.
20. Prasolov V.A., Bobrus S.Yu., Popov M.Yu., Tokarev D.A. Estimation of the data transfer rate according to the HDL protocol of the ALE-3G standard. In the collection: *Radio engineering, electronics and communication (REIS-2017). Collection of reports IV International scientific and technical conference*. 2017, pp. 156-161.
21. Dvornikov S.V., Ovchinnikov G.R., Balykov A.A. Software simulator of the decameter ionospheric radio channel. *Information and space*. 2019. No. 3, pp. 6-12.
22. Valeev M.M., Ivanov A.A., Karetnikov L.A., Khazan G.K. Radio station "AMETIST-M" - a modern software-defined means of communication. *Radio engineering, electronics and communication: abstracts of the VI International scientific and technical conference (October 6-8, 2021, Omsk Russia)*. Omsk: ONIIP, 2021, pp. 108-110.
23. Dvornikov S.V., Ustinov A.A., Gordeychuk A.Yu. Adaptive choice of frequencies in multichannel video transmission systems. *Voprosy radioelectronics. Series: TV Technique*. 2018. No. 4, pp. 68-74.
24. Genov A.A., Reshetnikov V.N. Adaptive control of time-frequency resource of space vehicles in satellite communication networks. *Information technologies and computing systems*. 2008. No. 3, pp. 55-62.
25. Panin R.S., Putilin A.N., Khvostunov Yu.S. Use of the frequency resource by a decameter communication system in the mode of pseudo-random restructuring of the operating frequency. 2020. No. 3 (151), pp. 2-14.
26. Pshenichnikov A.V., Gordeychuk A.Yu. Management of the frequency-time resource of noise-protected radio communication lines with software restructuring of the operating frequency. *Problems of radio electronics. Series: TV Technique*. 2020. No. 1, pp. 104-108.
27. Dvornikov S.V., Alekseeva T.E. Alekseev's distribution and its application in problems of time-frequency signal processing. *Information and space*. 2006. No. 3, pp. 9-20.
28. Alekseev A.A., Aladinsky V.A., Zheleznyak V.K., Komarov V.F., Dvornikov S.V. Application of methods of frequency-time processing of acoustic signals for the analysis of reverberation parameters. *Nauchnoe priborostroenie*. 2001. Vol. 11. No. 1, pp. 65-76.
29. Dvornikov S.V., Pshenichnikov A.V., Manaenko S.S., Burykin D.A., Kuznetsov D.A. Theoretical provisions for increasing the noise immunity of signal-code structures of quadrature signals. *Information and space*. 2015. No. 3, pp. 13-16.
30. Makarenko S.I., Ivanov M.S., Popov S.A. Noise immunity of communication systems with pseudo-random tuning of the operating frequency. St. Petersburg: Own publishing house, 2013. 166 p.

Information about authors:

Sergey V. Dvornikov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Radio Engineering and Optoelectronic Complexes (Department 21), St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Professor of the Department of Radio Communication of the Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia

Sergey S. Dvornikov, senior lecturer of the department, Military Communications Academy, Candidate of Technical Sciences, Department of Radio Engineering and Optoelectronic Complexes (Department 21), St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Researcher, Research Department, Military Telecommunications Academy, candidate of technical sciences, St. Petersburg, Russia

Kirill D. Zheglov, postgraduate student of the Department of Radio Engineering and Optoelectronic Complexes (Department 21), Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation", St. Petersburg, Russia