

# ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ ПЕРЕДАЧ ДЕКАМЕТРОВЫХ РАДИОКАНАЛОВ В УСЛОВИЯХ НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ

DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-6-4-9

**Дворников Сергей Викторович,**  
Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия,  
[practicdsv@yandex.ru](mailto:practicdsv@yandex.ru)

**Марков Евгений Вячеславович,**  
Военная академия связи имени Маршала Советского Союза  
С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия,  
[markov1981@mail.ru](mailto:markov1981@mail.ru)

**Маноши Эли Аджа,**  
Военная академия связи имени Маршала Советского Союза  
С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия

**Manuscript received** 28 January 2021;  
**Accepted** 25 February 2021

**Ключевые слова:** двойная частотная манипуляция, вероятность битовой ошибки, ионосферный радиоканал, релейские замирания, энергетическая эффективность, помехоустойчивость, пик-фактор

Передача сообщений представляет собой сложный процесс, который во многом определяется свойствами используемого радиоканала. Наиболее сложными для организации связи являются декаметровые радиоканалы, поскольку ионосферное распространение радиоволн связано с их существенным затуханием, ввиду значительной протяженности трасс, а также наличием релейских замираний в канале. Однако возможность передачи информации на большие расстояния без серьезных ресурсных затрат, стимулирует проведение дальнейших исследований по повышению надежности декаметровой радиосвязи. В настоящей работе исследуется возможность повышения помехозащищенности передач частотной манипуляции декаметровых радиоканалов в условиях непреднамеренных помех за счет использования широкополосных сигналов. Рассмотрено аналитическое выражение зависимости вероятности битовой ошибки от уровня отношения пиковой мощности сигнала к пиковой мощности помехи, представлен график этой зависимости. Показано, что график согласуется с общей оценкой помехоустойчивости для каналов с релейскими замираниями, использующих сигналы двойной частотной манипуляции. Анализируется рациональность способов получения необходимого качества приема в декаметровых радиоканалах. Показано, что наиболее рациональным направлением повышения помехозащищенности передач ЧМ-2 в декаметровых радиоканалах с релейскими замираниями в условиях помех непреднамеренного характера является использование широкополосных сигналов. При этом для расширения целесообразен выбор значения  $k_f = 7$ , что позволяет повысить помехоустойчивость на 9 дБ. Выводы пояснены графиками.

## Информация об авторах:

**Дворников Сергей Викторович**, д.т.н., профессор. Профессор кафедры радиотехнических и оптоэлектронных комплексов, Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения", Заслуженный изобретатель Российской Федерации, г. Санкт-Петербург, Россия

**Марков Евгений Вячеславович**, соискатель ученой степени кандидата технических наук. Адъюнкт кафедры радиосвязи. Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия

**Маноши Эли Аджан**, соискатель ученой степени кандидата технических наук. Адъюнкт кафедры радиосвязи. Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия

## Для цитирования:

Дворников С.В., Марков Е.В., Маноши Э.А. Повышение помехозащищенности передач декаметровых радиоканалов в условиях непреднамеренных помех // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №6. С. 4-9.

## For citation:

Dvornikov S.V., Markov E.V., Manoshi A.A. (2021) Increasing immunity of decameter radio channel transmissions under unintended interference. T-Comm, vol. 15, no.6, pp. 4-9. (in Russian)

### Введение

Передача сообщений представляет собой достаточно сложный для формализации процесс, который во многом определяется свойствами используемого радиоканала [1-3]. Наиболее сложными для организации связи являются декаметровые радиоканалы [4, 5], поскольку ионосферное распространение радиоволн связано с их существенным затуханием, ввиду значительной протяженности трасс, а также наличием релеевских замираний в канале [6].

Однако возможность передачи информации на большие расстояния без специальной подготовки местности, стимулирует проведение дальнейших теоретических исследований в данной предметной области, для разработки обоснованных рекомендаций по повышению надежности декаметровой радиосвязи.

В частности, целью настоящей работы является исследование возможности повышения помехозащищенности передач частотной манипуляции декаметровых радиоканалов в условиях непреднамеренных помех за счет использования широкополосных сигналов.

### Помехозащищенность каналов декаметровой радиосвязи

Вопросам исследования физических свойств каналов декаметровой радиосвязи посвящено большое количество работ [7-9], в которых отмечается, что ограниченность частотного ресурса достаточно часто приводит к ситуациям, когда на выделенной для организации связи частоте наблюдается работа сторонних радиоэлектронных средств. Очевидно, что в таких условиях достаточно сложно обеспечить надежность передачи сообщений. Поскольку достоверность принимаемой информации в этом случае будет определяться суммарным эффектом от воздействия сигнала стороннего радиоэлектронного средства (в дальнейшем его определим как помеха) и непосредственно канальных шумов.

В интересах дальнейшего исследования будем полагать, что на фиксированной частоте в декаметровом канале с релеевскими замираниями передается сигнал двойной частотной манипуляции (ЧМ-2), достаточно широко используемого в декаметровых радиоканалах [10, 11], а в качестве помехи – шумоподобное излучение стороннего радиоэлектронного средства аддитивного характера.

В общем случае, вероятность ошибки в приеме элемента сигнала ЧМ-2 при некогерентной обработке по огибающей определяется следующим выражением [12, 13]

$$P_{\text{ош}} = \frac{1}{h_{\Sigma}^2 + 2}, \quad (1)$$

где  $h_{\Sigma}^2 = \frac{P_c T}{v_{\Sigma}^2}$  – отношение средней энергии элемента сигнала  $P_c T$  в точке приема, к суммарной спектральной мощности шумов и помех в канале  $v_{\Sigma}^2$ ;  $P_c$  – мощность сигнала на длительности его элемента  $T$ .

С учетом аддитивного характера помехи и ее независимости с полезным сигналом, значение  $h_{\Sigma}^2$  можно представить как

$$h_{\Sigma}^2 = \frac{P_c T}{v_n^2 + v_c^2} = \frac{1}{\frac{v_n^2}{P_c T} + \frac{v_c^2}{P_c T}} = \frac{1}{\frac{P_c}{\Delta F_n P_c T} + \frac{1}{h_0^2}} = \frac{1}{\frac{P_{\text{шн}} \Pi_c \Delta F_c}{P_{\text{сн}} \Pi_n \Delta F_n} + \frac{1}{h_0^2}} = \frac{1}{\frac{h_n^2}{k_n k_f} + \frac{1}{h_0^2}} = \frac{h_0^2 k_n k_f}{h_0^2 h_n^2 + k_n k_f}. \quad (2)$$

В формуле (2)  $h_0^2 = \frac{P_c T}{v_{\text{шн}}^2}$  – отношение средней энергии

элемента сигнала к спектральной плотности канальных шумов (ОСШ);  $h_n^2 = \frac{P_{\text{шн}}}{P_{\text{сн}}}$  – отношение пиковой (максимальной)

мощности сигнала к пиковой (максимальной) мощности помехи в точке приема;  $k_n = \frac{\Pi_n}{\Pi_c}$  – коэффициент пик-фактора,

как отношение пик-фактора помехи  $\Pi_n$  к пик-фактору полезного сигнала  $\Pi_c$  [14, 15];  $k_f = \frac{\Delta F_n}{\Delta F_c}$  – коэффициент по-

лосы пропускания, как отношение полосы спектра занимаемой помехой  $\Delta F_n$ , к полосе спектра занимаемой полезным сигналом  $\Delta F_c$ .

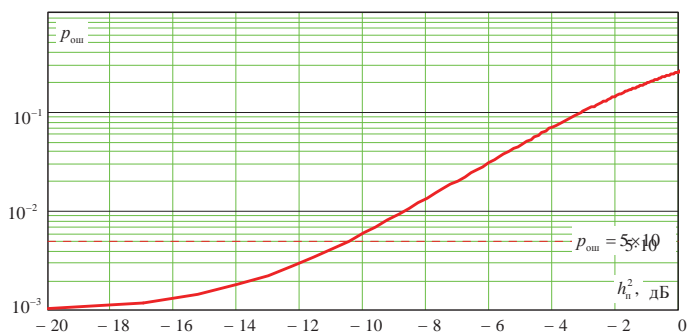
Далее, подставляя полученное значение  $h_{\Sigma}^2$  в выражение (1), окончательно получим:

$$P_{\text{ош}} = \frac{1}{\frac{h_0^2 k_n k_f}{h_0^2 h_n^2 + k_n k_f} + 2} = \frac{h_0^2 h_n^2 + k_n k_f}{h_0^2 k_n k_f + 2(h_0^2 h_n^2 + k_n k_f)}. \quad (3)$$

Анализ выражения (3) показывает, что доминирующим фактором, определяющим помехоустойчивость линий декаметровой связи в условиях помех является текущее значение ОСШ в канале  $h_0^2$ , а также энергетическое превосходство источника помех над источником полезного сигнала  $h_n^2$  [16].

На рисунке 1 показана зависимость вероятности битовой ошибки приема элемента сигнала ЧМ-2 от уровня отношения пиковой мощности сигнала к пиковой мощности помехи  $h_n^2$  в условиях его некогерентной обработки при допущении, что  $h_0^2 = 30$  дБ, а значение  $k_n = 1$ , то есть в ситуации, когда пик-фактор сигнала и помехи совпадает.

Кроме того, в расчетах учитывалось, что  $k_f = 2$ , то есть рассматривались условия, когда частотный диапазон занимаемый помехой совпадает с полосой пропускания проходного фильтра. Заметим, что значение равно двум обусловлено формой спектра сигнала ЧМ-2, который в каждый момент времени проявляется только в полосе, соответствующей информационной «1» или информационному «0».

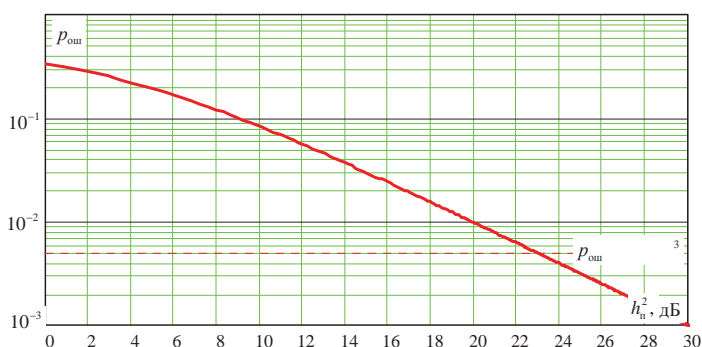


**Рис. 1.** Зависимость битовой ошибки от отношения пиковой мощности сигнала к пиковой мощности помехи в условиях канала с релейскими замираниями

В соответствии с полученными результатами, в канале с релейскими замираниями при  $h_0^2 = 30$  дБ сигнал с уровнем мощности  $h_{п}^2 \approx -10,5$  дБ приведет к ошибке  $p_{ош} = 5 \times 10^{-3}$ , что, в общем, согласуется с общей оценкой помехоустойчивости для каналов с релейскими замираниями [6], использующих сигналы ЧМ-2, которые описываются выражением (1), см. рис. 2.

В соответствии с рисунком 2, указанное значение вероятности  $p_{ош} = 5 \times 10^{-3}$  обеспечивается при  $h_0^2 \approx 23$  дБ. Тогда дельта относительно рассматриваемого уровня  $h_0^2 = 30$  дБ составляет около  $\Delta h_0^2 \approx 7$  дБ.

Различия в 3 дБ по отношению к результату, представленному на рисунке 1, связаны с допущением, согласно которому энергия полезного сигнала для передачи ЧМ-2 всегда будет в два раза больше, так как излучение происходит только в пределах лишь одной субполосы [16].



**Рис. 2.** Зависимость битовой ошибки сигнала ЧМ-2 в канале с релейскими замираниями

Таким образом, анализ представленных результатов позволяет сделать следующий вывод. В канале с релейскими замираниями при некогерентной обработке сигналов ЧМ-2 по огибающей наличие непреднамеренной помехи от сторонних радиоэлектронных средств, даже по мощности порядка  $h_{п}^2 \approx -10,5$  дБ приведет к ошибке  $p_{ош} = 5 \times 10^{-3}$ , т.е. нарушение связи наступит в случае, когда уровень излучений сторонних радиоэлектронных средств будет более чем в три раза ниже уровня полезного сигнала в точке приема.

Следовательно, необходим поиск конструктивных мер, направленных на повышение помехоустойчивости рассматриваемых передач.

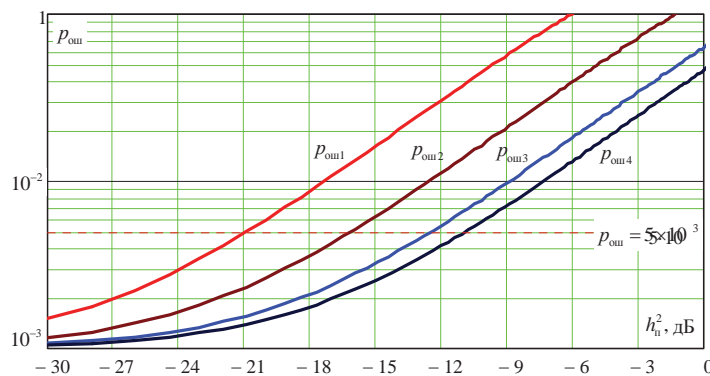
### Предложения по применению широкополосных сигналов

Вопросы повышения качества приема в декаметровых радиоканалах достаточно полно освещены в [9, 13, 17]. Среди которых наиболее эффективными признаны различного вида разнесения [13, 18], но такие способы повышения эффективности связи достаточно ресурсозатратны. Вместе с тем, анализ выражения (3) показывает, что в рамках не разнесённого приема, повышение качества возможно за счет увеличения мощности излучения полезного сигнала, т.е. за счет снижения коэффициента  $h_{п}^2$ . А также в результате увеличения коэффициентов  $k_{п}$  и  $k_{ф}$ , т.е. снижая пик-фактора излучений полезного сигнала и уменьшая полосу частот, занимаемой полезным сигналом  $\Delta F_c$ , по отношению к полосе спектра помехи.

Согласно [13], пик-фактор излучения шумового характера примерно равен  $\Pi_{п} = 3$ , в то же время даже у гармонического колебания пик-фактор составляет  $\Pi_c = 1,41$ , поэтому сложно рассчитывать на существенное повышение в качестве связи только лишь за счет уменьшения  $k_{п}$ .

Гораздо интересней видятся результаты, получаемые от регулирования коэффициента  $k_{ф}$ , уменьшение которого может быть обеспечено за счет применения широкополосных сигналов на длительности каждой символьной посылки.

Для обеспечения надежной связи, символьная скорость в декаметровом радиоканале не должна превышать в лучшем случае 200 Бод [е]. Следовательно, осуществлять допустимое расширение спектра свыше 10 не целесообразно. Однако, даже при меньших значениях увеличения  $k_{ф}$  можно обеспечить приемлемое повышение качества связи. В качестве примера, на рис. 3 показаны графики помехоустойчивости передач ЧМ-2 в канале с релейскими замираниями при некогерентной обработке при значениях  $k_{п} = 2$  и, соответственно,  $k_{ф} = 3, 7$  и 10.



**Рис. 3.** Зависимость битовой ошибки сигналов ЧМ-2 в канале с релейскими замираниями в условиях расширения спектра



На рисунке 3 график  $p_{\text{ош}1}$  определяет помехоустойчивость сигнала ЧМ-2 без дополнительных мер помехозащиты. Графики  $p_{\text{ош}2}$ ,  $p_{\text{ош}3}$ ,  $p_{\text{ош}4}$ , характеризуют помехоустойчивость передач ЧМ-2 с параметрами канала  $h_0^2 = 30$  дБ и значениями  $k_{\text{п}} = 2$  и, соответственно  $k_f = 3, 7$  и  $10$ .

Согласно представленным результатам на рис. 3, значение  $k_f = 3$  обеспечивает повышение помехозащищенности на 5 дБ. При  $k_f = 7$  помехозащищенность повышается почти на 9 дБ, а при  $k_f = 10$ , указанный показатель достигает значение около 11 дБ. А поскольку повышение  $k_f$  приводит к снижению символьной скорости, то судя по результатам, для декаметровых радиоканалов выбор  $k_f < 7$  нецелесообразен. Так как дальнейший рост  $k_f$  обеспечивает незначительное повышение помехоустойчивости при существенном снижении символьной скорости передачи.

### Заключение

Проведенные теоретические исследования показали, что повышение помехозащищенности передач ЧМ-2 в декаметровых радиоканалах с релейскими замираниями в условиях помех непреднамеренного характера возможно за счет повышения излучаемой энергии полезного сигнала, снижения пик-фактора или расширения спектра. При этом наиболее рациональным направлением является использование широкополосных сигналов для передачи информации в декаметровых радиоканалах с релейскими замираниями. При этом для расширения целесообразен выбор значения  $k_f = 7$ , что позволяет повысить помехоустойчивость на 9 дБ, при условии, что коэффициент по пик-фактору будет равен 2.

Дальнейшее исследование авторы связывают с выбором расширяющих последовательностей [н], а также поиска способов повышения помехоустойчивости для передач сигналов относительной фазовой модуляции в декаметровых радиоканалах в условиях преднамеренных помех [г].

### Литература

1. Самойленко Д.В., Финько О.А. Помехоустойчивая передача данных в радиоканалах робототехнических комплексов на основе полиномиальных классов вычетов // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2016. Т. 8. № 3. С. 49-55.
2. Орошук И.М., Соловьев М.В., Сучков А.Н., Гаврилов А.А. Применение способа компенсации станционных радиопомех для повышения скорости передачи информации в декаметровом радиоканале // В сборнике: Радиотехника, электроника и связь. Сборник докладов V Международной научно-технической конференции. 2019. С. 83-88.
3. Агиевич С.Н., Дворников С.В., Гусельников А.С. Описание сигналов в базисах функций сплайн-вилленкина-крстенсона // Контроль. Диагностика. 2009. № 3. С. 52-57.
4. Смирнов А.А., Солцатов М.Э., Бондарь В.В., Роженко О.Д., Даржания А.Д., Белоконь Л.В. Помехоустойчивость строенного приема сигналов в каналах связи с релейскими замираниями // Антенны. 2020. № 1 (263). С. 49-54.
5. Дворников С.В., Пишеничников А.В., Русин А.А. Обобщенная функциональная модель радиолинии с управлением её частотным ресурсом // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2016. № 3. С. 49-56.
6. Лапинова Н.А. Описание радиоканалов с быстрыми релейскими замираниями // Аллея науки. 2017. Т. 2. № 10. С. 381-384.
7. Ревин В.С., Коренной А.В., Межуев А.М. Модель импульсной характеристики декаметрового канала связи и квазиоптимальный алгоритм ее оценивания // Радиотехника. 2016. № 10. С. 171-177.
8. Дворников С.В., Овчинников Г.Р., Бальков А.А. Программный симулятор ионосферного радиоканала декаметрового диапазона // Информация и космос. 2019. № 3. С. 6-12.
9. Орошук И.М., Соловьев М.В., Гаврилов А.А. Способ повышения помехоустойчивости декаметрового канала связи за счет расширения спектра сигнала // Проблемы транспорта Дальнего Востока. Доклады научно-практической конференции. 2019. Т. 1. С. 183-187.
10. Оболонская А.В. Анализ демодуляторов частотно-манипулированных сигналов // Вестник Воронежского института МВД России. 2017. № 4. С. 182-189.
11. Дворников С.В., Погорелов А.А., Вознюк М.А., Иванов Р.В. Оценка имитостойкости каналов управления с частотной модуляцией // Информация и космос. 2016. № 1. С. 32-35.
12. Климов И.З. Сравнительная оценка методов реализации широкополосной системы связи в декаметровом диапазоне радиоволн // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2017. Т. 20. № 3. С. 118-124.
13. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений Изд. 2-е, переработанное, дополненное. Изд-во «Советское радио», 1970. 728 с.
14. Гордейчук А.Ю., Дворников С.В., Иванов В.А., Русинов М.А., Семисошенко М.А. Оценка помехозащищенности линий радиосвязи в режиме с медленной программной перестройкой рабочей частоты // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 4. С. 36-42.
15. Прокис Дж. Цифровая связь. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.
16. Дворников С.В., Дворников С.С., Манаенко С.С., Пишеничников А.В. Спектрально-эффективные сигналы с непрерывной фазой // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 2. С. 87-93.
17. 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.
18. Селиванова С.П., Сомов В.Г. Повышение качества радиосвязи в КВ-диапазоне // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2015. Т. 1. № 11. С. 250-252.
19. Кирьянов И.А., Терешин М.А., Тюркин И.А. Исследование методов разнесенного приема сигнала в многолучевом канале // Аллея науки. 2020. Т. 1. № 6 (45). С. 968-970.
20. Дворников С.В., Пишеничников А.В., Русин А.А., Дворников А.С. Повышение помехоустойчивости сигналов кам-16 с трансформированными созвездиями // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2014. № 2. С. 51-56.
21. Дворников С.В., Пишеничников А.В., Манаенко С.С. Помехоустойчивая модель сигнала кам-16 с трансформированным созвездием // Информационные технологии. 2015. Т. 21. № 9. С. 685-689.
22. Дворников С.В. Цифровой синтез спектрально-эффективных сигналов телевидения // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2015. № 6. С. 168-173.

## INCREASING IMMUNITY OF DECAMETER RADIO CHANNEL TRANSMISSIONS UNDER UNINTENDED INTERFERENCE

**Sergey V. Dvornikov**, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St-Peterburg, Russia, [practicdsv@yandex.ru](mailto:practicdsv@yandex.ru)

**Evgeniy V. Markov**, Military academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, St-Peterburg, Russia, [markov1981@mail.ru](mailto:markov1981@mail.ru)

**Adjan A. Manoshi**, Military academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, St-Peterburg, Russia, [markov1981@mail.ru](mailto:markov1981@mail.ru)

### Abstract

The transmission of messages is a complex process, which is largely determined by the properties of the radio channel used. Decameter radio channels are the most difficult for organizing communication, since the ionospheric propagation of radio waves is associated with their significant attenuation, due to the significant length of the paths, as well as the presence of Rayleigh fading in the channel. However, the possibility of transmitting information over long distances without serious resource costs stimulates further research to improve the reliability of decameter radio communication. In this paper, we investigate the possibility of increasing the noise immunity of frequency-shift keying transmissions of decameter radio channels in conditions of unintentional interference due to the use of broadband signals. An analytical expression of the dependence of the probability of a bit error on the level of the ratio of the peak signal power to the peak interference power is considered; a graph of this dependence is presented. It is shown that the plot is consistent with the overall noise immunity estimate for Rayleigh fading channels using double FSK signals. The rationality of methods for obtaining the required reception quality in decameter radio channels is analyzed. It is shown that the most rational direction for increasing the noise immunity of FM-2 transmissions in decameter radio channels with Rayleigh fading in conditions of unintended interference is the use of broadband signals. In this case, for expansion, it is advisable to choose a value  $k_f = 7$ , which makes it possible to increase the noise immunity by 9 dB. The conclusions are illustrated by graphs.

**Keywords:** double frequency shift keying, bit error probability, ionospheric radio channel, Rayleigh fading, energy efficiency, noise immunity, crest factor.

### References

1. Samoilenko D.V., Finko O.A. (2016). Interference data transmission in radio channels of robotic complexes based on polynomial distribution classes. *Science-intensive technologies in space exploration of the Earth*. Vol. 8.No. 3. P. 49-55.
2. Oroshchuk I.M., Soloviev M.V., Suchkov A.N., Gavrilov A.A. (2019). Application of the method of compensation of station radio interference to increase the speed of information transmission in a decameter radio channel. In the collection: Radio engineering, electronics and communications. *Collection of reports of the V International scientific and technical conference*. P. 83-88.
3. Agievich S.N., Dvornikov S.V., Gusel'nikov A.S. (2009). Description of signals in the basis of spline-vilenkin-christenson functions. *The control. Diagnostics*. No. 3. P. 52-57.
4. Smirnov A.A., Solchatov M.E., Bondar V.V., Rozhenko O.D., Darzhaniya A.D., Belokon L.V. (2020). Immunity of structural reception of signals in communication channels with relay fades. *Antennas*. No. 1 (263). P. 49-54.
5. Dvornikov S.V., Pshenichnikov A.V., Rusin A.A. (2016). Generalized functional model of a radio line with the control of its frequency resource. *Radio electronics issues. Series: Television technology*. No. 3. P. 49-56.
6. Lapshova N.A. (2017). Description of radio channels with fast relay fading. *Alley of Science*. Vol. 2.No. 10. P. 381-384.
7. Revin V.S., Korenoy A.V., Mezhuiev A.M. (2016). Model of pulse characteristics of a decameter communication channel and quasi-optimal algorithm for its estimation. *Radio engineering*. No. 10. P. 171-177.
8. Dvornikov S.V., Ovchinnikov G.R., Balykov A.A. (2019). Software simulator of ionospheric radio channel of decameter range. *Information and space*. No. 3. P. 6-12.
9. Oroshchuk I.M., Soloviev M.V., Gavrilov A.A. (2019). Method for increasing the immunity of a decameter communication channel by expanding the signal spectrum. *Transport problems in the Far East. Reports of the scientific and practical conference*. Vol. 1. P. 183-187.
10. Obolonskaya A.V. (2017). Analysis of demodulators of frequency-manipulated signals. *Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. No. 4. P. 182-189.
11. Dvornikov S.V., Pogorelov A.A., Voznyuk M.A., Ivanov R.V. (2016). Estimation of imital resistance of control channels with frequency modulation. *Information and space*. No. 1. P. 32-35.

12. Klimov I.Z. (2017). Comparative evaluation of methods for implementing a broadband communication system in the decimeter range of radio waves. *Bulletin of ISTU named after M.T. Kalashnikov*. Vol. 20.No. 3. P. 118-124.
13. Fink L.M. (1970). The theory of transmission of discrete messages Ed. 2nd, revised, enlarged. Publishing house "Soviet radio". 728 p.
14. Gordeychuk A.Yu., Dvornikov S.V., Ivanov V.A., Rusinov M.A., Semisoshenko M.A. Assessment of interference of radio links in the mode with slow software reading of the operating frequency.
15. Prokis J. (2000). Digital communication. Per. from English. Moscow: Radio and communication. 800 p.
16. Dvornikov S.V., Dvornikov S.S., Manaenko S.S., Pshenichnikov A.V. (2016). Spectral efficient signals with a continuous phase. *Voronezh State Technical University Bulletin*. Vol. 12. No. 2. P. 87-93.
17. Dvornikov S.V., Alekseeva T.E. (2006). Alexeev distribution and its application in the problems of time-frequency signal processing. *Information and space*. No. 3. P. 9-20.
18. Selivanova S.P., Somov V.G. (2015). Improving the quality of radio communications in the HF band. *Actual problems of aviation and astronautics*. Vol. 1. No. 11. P. 250-252.
19. Kiryanov I.A., Tereshin M.A., Tyurkin I.A. (2020). Study of diversity reception methods in a multi-beam channel. *Alley of Science*. Vol. 1.No. 6 (45). P. 968-970.
20. Dvornikov S.V., Pshenichnikov A.V., Rusin A.A., Dvornikov A.S. (2014). Increasing the immunity of kam-16 signals with transformed constellations. *Radio electronics issues. Series: Television technology*. No. 2. P. 51-56.
21. Dvornikov S.V., Pshenichnikov A.V., Manaenko S.S. (2015). Immunity model of signal kam-16 with transformed constellation. *Information Technology*. Vol. 21. No. 9. P. 685-689.
22. Dvornikov S.V. (2015). Digital synthesis of spectral efficient television signals. *Radio electronics issues. Series: Television technology*. No. 6. P. 168-173.

#### Information about authors:

**Sergey V. Dvornikov**, Dr. habil. Of Engineering Sciences, Full Professor. Professor of the Department of Radio Engineering and Optoelectronic Complexes, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St-Peterburg, Russia

**Evgeniy V. Markov**, the postgraduate student of the Department of radio communication. Military academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, St-Peterburg, Russia

**Adjan A. Manoshi**, the postgraduate student of the Department of radio communication. Military academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, St-Peterburg, Russia