

Научная статья

УДК 621.391.832, 621.396.932

DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-1-58-64



Повышение вероятности доведения широковещательных сообщений ГМССБ при передаче в канале КВ-диапазона в условиях замираний

✉ Владимир Викторович Егоров, egorovrimr@mail.ru

✉ Михаил Леонидович Маслаков, maslakovml@gmail.com

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация

Аннотация: Повышение качества связи в Глобальной Морской Системе Связи при Бедствии и для обеспечения безопасности мореплавания является одной из составляющей развития Арктической зоны РФ в части информационного обеспечения. При этом наиболее сложной является обеспечение связи в районах АЗ и А4, где немалую роль играет коротковолновый диапазон. В работе рассматривается передача сообщений в коротковолновом диапазоне в широкополосном режиме SITOR-B. Для улучшения вероятностных характеристик в работе осуществляется статистический анализ принимаемых решений демодулятора. Показано, что плотности распределения вероятностей являются «зашумленными», что связано с ненулевой вероятностью ошибки на бит. Для статистического анализа использованы модели плотностей распределения вероятностей Релея, Райса и Накагами. Показано, что в условиях низких значений отношения сигнал/шум, что характерно для высокоширотных трасс, предпочтительней оказывается модель по закону Накагами. В работе приведены вероятности символьной ошибки и ошибки сообщения в замирающем канале связи, а также вероятность получения ошибочного сообщения. Результаты, представленные в настоящей работе, позволяют значительно улучшить вероятностные характеристики КВ-радиолинии при передаче сообщений в режиме SITOR-B.

Ключевые слова: вероятность ошибки на символ, вероятность ошибки сообщения, SITOR-B, ГМССБ, замираний, отношение сигнал/шум, плотности распределения вероятностей Релея, Райса, Накагами

Ссылка для цитирования: Егоров В.В., Маслаков М.Л. Повышение вероятности доведения широкополосных сообщений ГМССБ при передаче в канале КВ-диапазона в условиях замираний // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 1. С. 58–64. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-1-58-64. EDN:PPLZCM

Increasing the Probability of Transfer GMDSS Broadcast Messages when Transmitted Over HF Channel in Case Fading

✉ Vladimir Egorov, egorovrimr@mail.ru

✉ Mikhail Maslakov, maslakovml@gmail.com

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
Saint-Petersburg, 190000, Russian Federation

Abstract: Improving the quality of communication in the Global Maritime Distress and Safety System of navigation is one of the components of the development of the Arctic zone of the Russian Federation in terms of information support.

At the same time, the most difficult is to ensure communication in the A3 and A4 areas, where a communication HF channel plays a not small role. The transfer of messages over HF channel in the broadcasting mode of SITOR-B is considered. To improve probabilistic characteristics in the work, a statistical analysis of the decisions of the demodulator is carried out. It is shown that the probability density functions are "noisy", which is associated with the non-zero probability of a bit error. Models of Rayleigh, Rice and Nakagami distributions were used for statistical analysis. It is shown that in the case of low values of the signal-to-noise ratio, which is characteristic of high latitude tracks, a Nakagami model is preferable. The symbol error rate and message error rate in a fading communication channel, as well as the probability of receiving an erroneous message are shown. The results presented in this work can significantly improve the probabilistic characteristics of the HF radiolines when transmitting messages in SITOR-B mode.

Keywords: symbol error rate, message error rate, SITOR-B, GMDSS, fading, signal-to-noise ratio, Rayleigh distribution, Rice distribution, Nakagami distribution

For citation: Egorov V., Maslakov M. Increasing the probability of transfer GMDSS broadcast messages when transmitted over HF channel in case fading. *Proceedings of Telecommun. Univ.* 2024;10(1):58–64. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-1-58-64. EDN:PPLZCM

Введение

Приоритеты и цели государственной политики в сфере реализации Государственной программы связаны с развитием социально-экономического и транзитного потенциала арктических регионов. Цели и стратегические задачи развития Северного морского пути (СМП) на ближайшую перспективу определены рядом документов (Государственная программа Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации», утверждена постановлением Правительства Российской Федерации от 30 марта 2021 г. № 484; План развития инфраструктуры Северного морского пути на период до 2035 года, утвержден Распоряжением Правительства Российской Федерации от 21 декабря 2019 г. № 3120-р.; Распоряжение Правительства РФ от 01.08.2022 № 2115-р (ред. от 28.04.2023) «Об утверждении Плана развития Северного морского пути на период до 2035 года»). Среди ряда направлений предусмотрены мероприятия по строительству аварийно-спасательного флота из 46 судов и по оснащению арктических комплексных аварийно-спасательных центров МЧС вертолетами.

Предполагается создание цифровой экосистемы СМП [2], состоящей из единой платформы цифровых сервисов для повышения информационного обеспечения безопасности судоходства в акватории СМП, бортовых автоматизированных информационно-измерительных комплексов, установленных на судах, осуществляющих плавание в акватории СМП, комплексов оперативного мониторинга ледовой обстановки и др.

Одной из важнейших составляющих является организация и функционирование системы обеспечения безопасности мореплавания в рамках глобальной морской системы связи при бедствии (ГМССБ) [1, 2]. ГМССБ представляет собой международную комплексную систему радиосвязи, использующую современные системы цифровой передачи данных различных диапазонов длин волн – УКВ,

ПВ, КВ и спутниковые системы связи на базе спутников ИНМАРСАТ [3, 4].

Системы связи указанных диапазонов, входящие в состав ГМССБ, имеют свой ограниченный радиус действия, что аргументирует требования к составу судового радиооборудования в зависимости от районов хождения судна. Поэтому выделяют 4 морских района: A1, A2, A3 и A4, соответствующие различной удаленности от берега [4].

Наибольшую сложность для обеспечений надежной радиосвязи представляет район A4, для связи в котором существенная роль отведена использованию КВ-диапазона. Как известно, КВ-связь в районах Крайнего Севера и Арктической зоны ограничена сложными условиями распространения радиоволн, обусловленными нестационарностью и возмущенностью ионосферы [5, 6].

Таким образом, актуальной задачей является совершенствование систем связи для КВ-диапазона. Целью данной работы является разработка способа повышения вероятностных характеристик системы передачи сообщений ГМССБ, работающей в широкополосном режиме SITOR-B (аббр. от англ. Simplex Teletype Over Radio, перев. на русс. Симплексный телетайп через переключатель).

Декодирование сообщений в режиме SITOR-B

Каждое судно, находящееся в районе A4, а также, желательно, и A3, должно быть оборудовано радиосредством ПВ- и КВ-диапазонов, для обеспечения приема и передачи в режимах: цифрового избирательного вызова, радиотелефона и телекса (или «узкополосного буквопечатания») [4, 7]. При этом требуется нести «вахту» на выделенных в соответствии с международными требованиями частотах, а также передавать и принимать общую корреспонденцию.

Для передачи текстовых сообщений используется FSK-модем (аббр. от англ. Frequency Shift Keying,

перев. на русс. Частотная манипуляция), работающий по стандарту SITOR [8]. Текстовые символы представляют собой 7-битный код в соответствии с кодировкой CCIR 476 [10], передаваемый со скоростью 100 бит/с. Каждый 7-битный символ в соответствии с CCIR 476 содержит 4 единицы и 3 нулевых бита. В результате объем алфавита составляет:

$$N_a = C_7^4 = \frac{7!}{4! \cdot (7-4)!} = 35 \quad (1)$$

символов, в том числе включая служебные символы.

Такой код позволяет обнаруживать все нечетные ошибки в принятом символе. Для повышения надежности в модеме предусмотрено два режима: SITOR-A и SITOR-B.

Режим SITOR-A используется для связи точка-точка с возможностью автоматического запроса повторной передачи (ARQ, аббр. от англ. Automatic Repetition Request, перев. на русс. Автоматический запрос повторной передачи) при обнаружении ошибок.

SITOR-B используется для широкоэвещательной передачи сообщений без «переспроса». Для повышения надежности при этом осуществляются повторную передачу каждого символа сообщения. Приемник анализирует принятые символы на наличие ошибок и выбирает тот вариант, в котором не было обнаружено ошибки. Фактически можно гарантировано обнаружить все нечетные ошибки.

Очевидно, что при таком приеме возникают следующие ситуации. Во-первых, в обеих копиях символов могут быть обнаружены ошибки – в этом случае символ не будет принят, а значит и все сообщение, вообще говоря, будет принято с ошибкой. Для текстовых сообщений ошибки в отдельных символах равносильны «опечатке» и могут не носить «катастрофического» характера. Однако, если такая опечатка возникнет при передаче координат судна, терпящего бедствие, «цена» такой ошибки весьма высока. Вторая возможная ситуация: в очередном принятом символе произошло четное число ошибок, таких, что ошибочный символ является одним из N_a допустимых. При этом в случае, если обе копии символа отличны друг от друга, но являются допустимыми символами алфавита – невозможно осуществить выбор в пользу одного из них. Такая ситуация в SITOR-B может быть равносильна лишь обнаружению ошибки. Однако в модемах SITOR в этом случае выносят в качестве решения первый принятый символ.

Статистический анализ принятых сообщений

Рассмотрим процедуру приема двоичных FSK-символов. Обозначим $s_{k,n,l}$ сегмент, соответствующий принятой k -й копии l -го бита n -го символа сообщения. Тогда k принимает значения 1 или 2,

$l = 1 \dots 7$, а $n = 1 \dots n_{mes}$, где n_{mes} – количество символов сообщения. Таким образом, каждый n -й символ сообщения есть сигнал вида:

$$s_{k,n} = \begin{bmatrix} s_{k,n,1} \\ s_{k,n,2} \\ s_{k,n,3} \\ s_{k,n,4} \\ s_{k,n,5} \\ s_{k,n,6} \\ s_{k,n,7} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Принятие решения в пользу конкретного бита осуществляется на основе формирования двух гипотез:

$$\begin{cases} h_{k,n,l}^0 = \frac{\sqrt{(s_{k,n,l} \cdot c_0)^2 + (s_{k,n,l} \cdot s_0)^2}}{2\|c_0\|}, \\ h_{k,n,l}^1 = \frac{\sqrt{(s_{k,n,l} \cdot c_1)^2 + (s_{k,n,l} \cdot s_1)^2}}{2\|c_1\|}, \end{cases} \quad (3)$$

где c_0, s_0, c_1, s_1 – соответственно, косинусы и синусы «образцов» 0 и 1, а (x, y) – есть скалярное произведение.

В результате на основе пар $h_{k,n,l}^0$ и $h_{k,n,l}^1$ для каждого символа сообщения получим вектора:

$$\begin{aligned} H_{1,n}^{\max} &= [\max\{h_{1,n,l}^0, h_{1,n,l}^1\}, l = 1 \dots 7]^T, \\ H_{1,n}^{\min} &= [\min\{h_{1,n,l}^0, h_{1,n,l}^1\}, l = 1 \dots 7]^T, \\ H_{2,n}^{\max} &= [\max\{h_{2,n,l}^0, h_{2,n,l}^1\}, l = 1 \dots 7]^T, \\ H_{2,n}^{\min} &= [\min\{h_{2,n,l}^0, h_{2,n,l}^1\}, l = 1 \dots 7]^T. \end{aligned} \quad (4)$$

Рассмотрим следующие плотности распределения вероятностей: $W_{\max}(h)$ и $W_{\min}(h)$. В идеализированном случае, очевидно, что $W_{\min}(h)$ – есть плотность распределения вероятностей Релея (см. подробнее в [9]). Вместе с тем модель для плотности вероятностей $W_{\max}(h)$ менее однозначна. В [9, 10] показано, что плотность распределения вероятностей модуля огибающей сигнала подчиняется закону Райса. Однако, в условиях низких значений ОСШ, m -распределение Накагами позволяет более детально описать энергетические параметры радиолинии [11]. Параметр m при этом характеризует «глубину замираний» радиоканала, учет которого и позволяет провести более «тонкий» анализ. Отметим, что распределения Релея является частным случаем распределений Накагами (при $m = 1$) и Райса (при равенстве нулю постоянной составляющей) [9, 12].

Однако в реальности выражения для плотностей имеют вид [13]:

$$\begin{aligned} W_{\max}(h) &= (1 - P_{\text{error}})W_{sn}(h) + P_{\text{error}}W_n(h), \\ W_{\min}(h) &= (1 - P_{\text{error}})W_n(h) + P_{\text{error}}W_{sn}(h), \end{aligned} \quad (5)$$

где P_{error} – вероятность ошибки; $W_{sn}(h)$ – плотность значений гипотез (3) для случая смеси сигнала и помехи; $W_n(h)$ – плотность значений гипотез (3) при наличии только на помеховой составляющей.

В соответствии с [9] $W_n(h)$ представляет собой плотность распределения вероятностей Релея, а $W_{sn}(h)$ – плотность распределения вероятностей Райса, что и приводит к сказанному выше для плотностей $W_{max}(h)$ и $W_{min}(h)$ при $P_{error} \rightarrow 0$. Однако для канала с замираниями данные плотности будут «зашумлены», что демонстрируется выражениями (5), поэтому при низких значениях ОСШ имеет смысл рассматривать распределение Накагами в качестве модели $W_{max}(h)$ и $W_{min}(h)$.

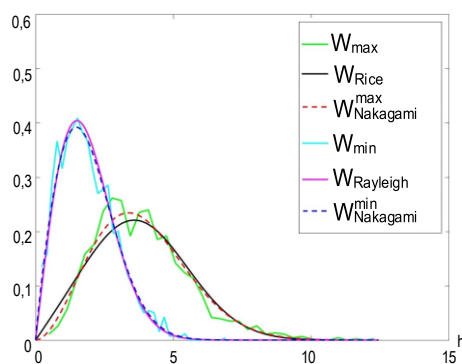
Для иллюстрации на рисунке 1 (слева – при ОСШ 2.5 дБ, справа – при ОСШ 15 дБ) приведены соответствующие оценки плотностей, полученные при экспериментальной выборке, соответствующей 100 передаваемым символам методом гистограмм и методом максимального правдоподобия для соответствующих моделей распределений.

На рисунках плотности $W_{max}(h)$ и $W_{min}(h)$ получены гистограммным методом. Плотности $W_{Rice}(h)$, $W_{Nakagami}^{max}(h)$, $W_{Rayleigh}(h)$, $W_{Nakagami}^{min}(h)$ – методом максимального правдоподобия.

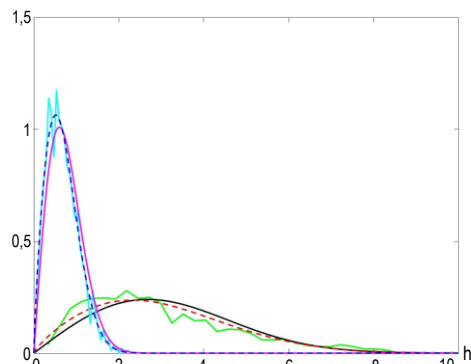
Из приведенных оценок плотностей видно отличие между $W_{Rice}(h)$ и $W_{Nakagami}^{max}(h)$ для максимумов, а также между $W_{Rayleigh}(h)$ и $W_{Nakagami}^{min}(h)$ для минимумов. Наблюдаемый эффект можно показать и численно, например, на основе проверки критерия Хи-квадрат Пирсона [14], результаты которого приведены в таблице 1, указанные значения усреднены по 100 независимым экспериментам. При этом отметим, что при получении, например, эмпирической плотности минимумов $W_{Nakagami}^{min}(h)$ оценка значения параметра m в каждом из экспериментов составляла $m \approx 1.1 \div 1.3$, хотя теоретически в этом случае должна была быть получена плотность распределения вероятностей Релея, т. е. ожидалось $m = 1$. Данный результат подтверждает выражения (5) при $P_{error} > 0$.

ТАБЛИЦА 1. Значения Хи-квадрат при проверке на соответствие гипотезе о модельном распределении
TABLE 1. Chi-Square Test Values when Testing for Compliance with the Model Distribution

Параметры канала		$W_{max}(h)$		$W_{min}(h)$	
ОСШ, дБ	m	Райс	Накагами	Релей	Накагами
2.5	1	14.207	6.309	6.007	4.270
15	1	14.118	7.936	30.097	11.717
2.5	10	6.865	4.194	6.913	6.218
15	10	20.475	11.172	29.288	21.853



a)



b)

Рис. 1. Оценки плотностей вероятностей $W_{max}(h)$ и $W_{min}(h)$ для релейевского канала (а) и канала с замираниями по Накагами (б)

Fig. 1. Estimation of Probability Density Function $W_{max}(h)$ and $W_{min}(h)$ for Rayleigh Channel (a) and for Nakagami Channel (b)

Результаты численного моделирования

На основе статистического анализа эмпирических плотностей, полученных на основе решений (4), может быть получена оценка вероятности ошибки P_{error} в выражении (5) – см. подробнее [13]. Далее можно получить оценки отношения правдоподобия [15, 16] для разрешения «спорных» бит, т. е. бит, отличающихся в двух копиях одного символа.

С учетом сказанного был проведен численный эксперимент и получены зависимости вероятности ошибки на символ, а также вероятности потери сообщения в замирающем нестационарном канале.

На рисунке 2а представлены зависимости вероятности символьной ошибки P_{sym} от ОСШ для замирающего канала при различных значениях глубины замираний m . Здесь и далее используется модель канала с замираниями по закону Накагами [20, 21], в частном случае, при $m = 1$, сводящаяся к релейскому каналу.

Далее, на рисунке 2б приведены вероятности ошибки сообщения P_{mess} от ОСШ для замирающего канала при различных значениях глубины замираний m . При этом отметим, что сообщение полагаем ошибочным, если в нем есть хотя бы один ошибочный символ. С практической точки зрения такие символьные ошибки также равносильны появлению «опечатки» в тексте и небольшое количество ошибочных символов не носит «катастрофического» характера.

Как видно, представленный подход позволяет уменьшить вероятность символьной ошибки и, как следствие, вероятность потери сообщения.

Дополнительно можно отметить, что стандарт SITOR-B позволяет обнаруживать отдельные нечетные ошибки символов и, соответственно, улавливать факт ошибки сообщения.

Вероятность обнаружения ошибки сообщения можно оценить, как отношение числа обнаруженных ошибочных сообщений n_{check} к общему числу сообщений в эксперименте N :

$$P_c = \frac{n_{check}}{N}. \quad (6)$$

При этом число ошибочных сообщений n_{mess} , т. е. сообщений, в которых искажен хотя бы один символ:

$$n_{mess} \geq n_{check}, \quad (7)$$

а вероятность ошибки сообщения определяется как:

$$P_{mess} = \frac{n_{mess}}{N}. \quad (8)$$

Соответственно, ненулевая вероятность получения ошибочного (ложного) сообщения, определяемая как разность вероятностей (8) и (6), рассчитывается выражением:

$$P_n = P_{mess} - P_c. \quad (9)$$

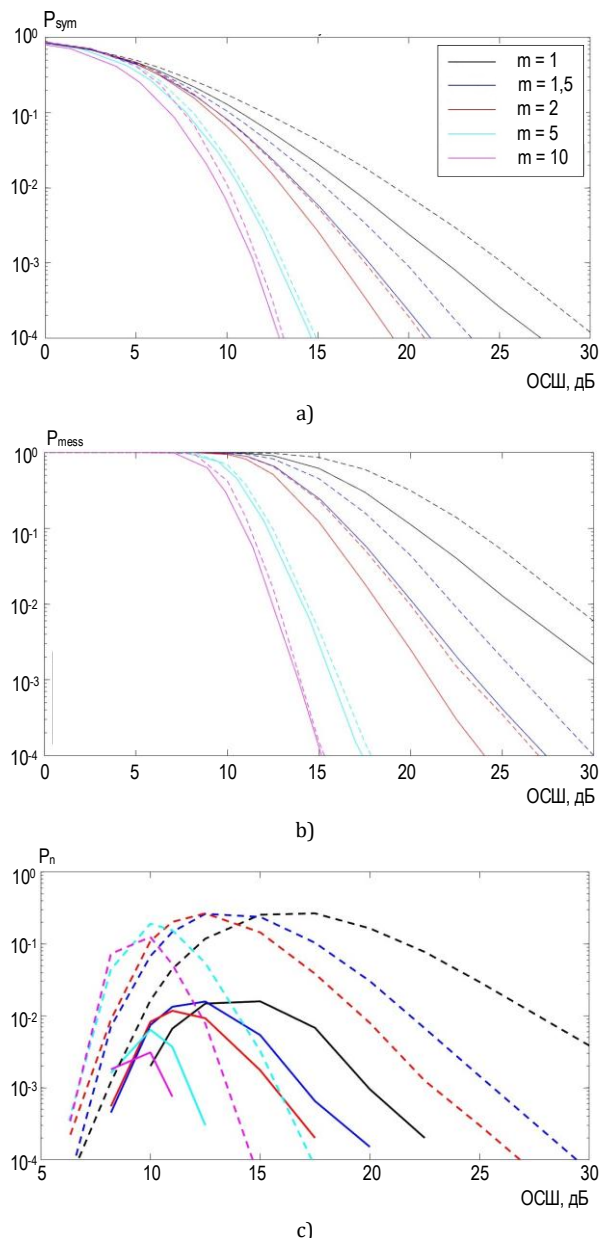


Рис. 2. Зависимости P_{sym} (а), P_{mess} (б) и P_n (с) от ОСШ в канале глубиной замираний $m = 1$ (релейский канал) и $m = 1.5, 2, 5, 10$ для случаев жестких решений SITOR-B (пунктирные линии) и на основе статистического анализа (сплошные линии)

Fig. 2. Dependence of P_{sym} (a), P_{mess} (b) and P_n (c) on SNR in a Channel with Fading Depth $m = 1$ (Rayleigh Channel) and $m = 1.5, 2, 5, 10$ for Cases of Hard Solutions SITOR-B (dashed curves) based on statistical analysis (solid curves)

Вероятности получения ошибочного сообщения P_n , определяемые из выражения (9), представлены на рисунке 2с.

Характер данных зависимостей объясняется следующим. При больших значениях ОСШ вероятность ошибки на бит и, соответственно, символьной ошибки мала, а значит, число случаев четных битовых ошибок в одном, или реже двух копиях символов невелико. Другими словами, вероятность ошибочного выбора из двух вариантов символов невелика. Напротив, при малых значениях ОСШ ве-

роятность символьной ошибки существенна. Поэтому даже в случае появления четных битовых ошибок в одном символе, велика вероятность появления битовых ошибок в других символах, которые, в свою очередь, будут обнаружены. Однако в условиях «средних» значений ОСШ частота битовых ошибок, в том числе четных битовых ошибок в пределах символов, несколько возрастает, что и приводит к необнаруживаемым символьным ошибкам, и, как следствие, необнаруживаемым ошибкам сообщений.

При этом отметим, что применение статистического анализа для принятия решения в случаях «спорных» бит позволяет на порядок снизить вероятность приема ошибочного сообщения.

Заключение

В работе была рассмотрена КВ-радиолиния при передаче сообщений в широкополосном режиме. Обнаружение и исправление ошибок в передаваемых сообщениях достигается за счет ограни-

ченного алфавита передаваемых символов и наличия копии. При этом в существующей системе отсутствует механизм разрешения «спорных» бит, т. е. бит, отличающихся в двух копиях одного символа.

Для принятия решения о передаваемых символах в работе предложено провести статистический анализ оценок демодулятора (согласованного фильтра) и получения соответствующих эмпирических плотностей. При этом в работе показано, что рассматриваемые плотности будут «зашумлены», что связано с ненулевой вероятностью ошибки на бит.

Результаты, представленные в настоящей работе, позволяют значительно улучшить вероятностные характеристики КВ-радиолинии при передаче сообщений ГМССБ в режиме SITOR-B, уменьшив вероятность символьной ошибки и ошибки сообщения. В статье приведены результаты численного моделирования помехоустойчивости рассматриваемой радиолинии в канале с замираниями. Кроме того, показано, что можно на порядок уменьшить вероятность получения ошибочного сообщения.

Список источников

1. Ханывев В.В., Свирский В.М., Борисовский Д.В. Информационное обеспечение безопасности мореплавания на трассах северного морского пути // Морские информационно-управляющие системы. 2014. № 2(5). С. 64–69.
2. Бажуков И.Ф., Дулькейт И.В., Завьялов С.А., Косых А.В., Ляшук А.Н., Чашин Е.А. Организация информационного обеспечения мобильных групп спасателей в арктической зоне Российской Федерации // Динамика систем, механизмов и машин. 2018. Т. 6. № 4. С. 3–9. DOI:10.25206/2310-9793-2018-6-4-3-9. EDN:VMCSTU
3. Дулькейт И.В., Патронов К.С., Прохоров П.В., Свирский В.М. Современные тенденции развития оборудования глобальной морской системы связи при бедствии (ГМССБ) ПВ/КВ диапазонов // Морской вестник. 2011. № 3(39). С. 73–76. EDN:OCPHIN
4. Шишкин А.В., Купровский В.И., Кошевой В.М. Глобальная морская система связи при бедствии и для обеспечения безопасности мореплавания (ГМССБ). М.: ТрансЛит, 2007. 544 с.
5. Ильмер Д.В., Помазунов С.А., Исламов А.И. Оценка зоны обслуживания системы NAVTEX в Восточно-Сибирском море // Техника средств связи. 2023. № 1. С. 29–47. DOI:10.24412/2782-2141-2023-1-29-47. EDN:FTCKIO
6. Коваль С.А. Ионосферный мониторинг в интересах перспективных адаптивных систем дециметрового радиосвязи: современное состояние и перспективы развития // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 4. С. 73–100. DOI:10.24411/2410-9916-2020-10403. EDN:FCNETL
7. Дулькейт И.В., Зачатейский Д.Е., Землянов И.С., Максимов А.А., Юрьев А.Н. Адаптивные системы ПВ/КВ радиосвязи, как способ повышения безопасности мореплавания // Проблемы развития корабельного вооружения и судового радиоэлектронного оборудования. 2013. № 2. С. 80–87.
8. Manual of Transmission Methods. Reference Document. 4070.0711.02 – 03. Munich: Rohde & Schwarz, 2014.
9. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. М.: Советское радио, 1966. 680 с.
10. Parsons J.D. The Mobile Radio Propagation Channel. John Wiley & Sons, 2000.
11. Popovic H., Stefanovic D., Mitic A., Stefanovic I., Stefanovic D. Some Statistical Characteristics of Nakagami-m Distribution // Proceedings of the 8th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services (TELSIKS, Nis, Serbia and Montenegro, October 2007). IEEE, 2007. PP. 509–512. DOI:10.1109/TELSIKS.2007.4376057
12. Forbes C., Evans M., Hastings N., Peacock B. Statistical Distributions. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011. 230 p.
13. Егоров В.В., Лобов С.А. Оценка достоверности приема информационных сигналов в процессе демодуляции // 21 конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение» (DSPA, Москва, Россия, 27–29 марта 2019). М.: Московское НТО радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2019. С. 208–210. EDN:XCCAFT
14. Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б., Постовалов С.Н., Чимитова Е.В. Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход. Новосибирск: НГТУ, 2011. EDN:TZNHMX
15. Гладких А.А. Основы теории мягкого декодирования избыточных кодов в стирающем канале связи. Ульяновск: УлГТУ, 2010. 379 с. EDN:QMVTNX
16. Золотарев В.В., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы. М.: Горячая линия – Телеком, 2004. 126 с. EDN:TPMDGJ
17. Karagiannidis G.K., Sagias N.C., Mathiopoulos P.T. N* Nakagami: A Novel Stochastic Model for Cascaded Fading Channels // IEEE Transactions on Communications. 2007. Vol. 55. Iss. 8. PP. 1453–1458. DOI:10.1109/TCOMM.2007.902497
18. Karagiannidis G.K., Sagias N.C., Mathiopoulos P.T. The N* Nakagami fading channel model // Proceeding of the 2nd International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS, Siena, Italy, 5–7 September 2005). IEEE, 2005. PP. 185–189. DOI:10.1109/ISWCS.2005.1547683

References

1. Hanychev V.V., Svirskij V.M., Borisovskij D.V. Information support for navigation safety along the Northern Sea Route. *Morskije informacionno-upravlyayushchie sistemy*. 2014;2(5):64–69.
2. Bazhukov I., Dulkejt I., Zavyalov S., Kosykh A., Lyashuk A., Chaschin E. Organization of Information Support for Mobile Groups of Savors in the Arctic Zone of the Russian Federation. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2018;6(4):3–9. DOI:10.25206/2310-9793-2018-6-4-3-9. EDN:VMCSTU
3. Dulkejt I., Patronov K., Prokhorov P., Svirsky V. Modern trends in development of equipment of the Global Maritime Distress System of (GMDSS) MF/HF bands. *Morskoy Vestnik*. 2011;3(39):73–76. EDN:OCPHIN
4. Shishkin A., Kuprovskii V., Koshevoi V. Global Maritime Distress and Safety System (GMDSS). Moscow: TransLit Publ.; 2007. 544 p.
5. Ilmer D., Pomazunov S., Islamov A. Assessment of the service area of the NAVTEX system in the East-Siberian Sea. *Means of communication equipment*. 2023;1(161):29–47. DOI:10.24412/2782-2141-2023-1-29-47. EDN:FTCKIO
6. Koval S. Ionospheric monitoring for the benefit of perspective adaptive systems of a decameter radio: current state and prospects of development. *Systems of Control, Communication and Security*. 2020;4:73–100. DOI:10.24411/2410-9916-2020-10403. EDN:FCNETL
7. Dul'kejt I.V., Zachatejskij D.E., Zemlyanov I.S., Maksimov A.A., YU'r'ev A.N. Adaptive MF/HF radio communication systems as a way to improve navigation safety. *Problemy razvitiya korabel'nogo vooruzheniya i sudovogo radioelektronnogo oborudovaniya*. 2013;2:80–87.
8. *Manual of Transmission Methods*. Reference Document. 4070.0711.02 – 03. Munich: Rohde & Schwarz; 2014.
9. Tikhonov V.I. *Statistical radio engineering*. Moscow: Sovetskoe radio Publ.; 1966. 680 p.
10. Parsons J.D. *The Mobile Radio Propagation Channel*. John Wiley & Sons; 2000.
11. Popovic H., Stefanovic D., Mitic A., Stefanovic I. Some Statistical Characteristics of Nakagami-m Distribution. *Proceedings of the 8th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services, October 2007, Nis, Serbia and Montenegro*. IEEE; 2007. p.509–512. DOI:10.1109/TELSKS.2007.4376057
12. Forbes C., Evans M., Hastings N., Peacock B. *Statistical Distributions*. New Jersey: John Wiley & Sons; 2011. 230 p.
13. Egorov V.V., Lobov S.A. The reliability of receiving information signals estimation in the demodulation process. *Proceeding of the 21st Digital signal processing and its application, DSPA, 27–29 March 2019, Moscow, Russia, vol.XXI(2)*. Moscow: Scientific and Technical Organization of Radio Engineering, Electronics and Communications named after A.S. Popova Publ.; 2019. p.208–210. EDN:XCCAVT
14. Lemeshko B., Lemeshko S., Postovalov S., Chimitova E. *Statistical data analysis, simulation and study of probability regularities. Computer approach*. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University Publ.; 2011. EDN:TZNHMX
15. Gladkih A.A. *Fundamentals of the theory of soft decoding of redundancy codes in an erasing communication channel*. Ulyanovsk: Ulyanovsk State Technical University Publ.; 2010. 379 p. EDN:QMVTNX
16. Zolotarev V.V., Ovechkin G.V. *Noiseproof Coding. Methods And Algorithms*. Moscow: Publishing House Hot line–Telecom Publ.; 2004. 126 p. EDN:TPMDGJ
17. Karagiannidis G.K., Sagias N.C., Mathiopoulos P.T. N* Nakagami: A Novel Stochastic Model for Cascaded Fading Channels. *IEEE Transactions on Communications*. 2007;55(8):1453–1458. DOI:10.1109/TCOMM.2007.902497
18. Karagiannidis G.K., Sagias N.C., Mathiopoulos P.T. The N* Nakagami fading channel model. *Proceeding of the 2nd International Symposium on Wireless Communication Systems, 5–7 September 2005, Siena, Italy*. IEEE; 2005. p.185–189. DOI:10.1109/ISWCS.2005.1547683

Статья поступила в редакцию 14.01.2024; одобрена после рецензирования 18.01.2024; принята к публикации 02.02.2024.

The article was submitted 14.01.2024; approved after reviewing 18.01.2024; accepted for publication 02.02.2024.

Информация об авторах:

ЕГОРОВ
Владимир Викторович

доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий базовой кафедрой радиостроения и средств связи для телемедицины и МЧС Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения
 <https://orcid.org/0000-0002-7117-904X>

МАСЛАКОВ
Михаил Леонидович

кандидат технических наук, доцент, кафедры инфокоммуникационных технологий и систем связи Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения
 <https://orcid.org/0000-0002-8989-8122>