

УДК 681.883.45
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-31-40>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Пропускная способность гидроакустического канала связи

В.Е. Денисов[@]

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
[@] Автор для переписки, e-mail: denisov@mirea.ru

Резюме

Цели. Пропускная способность является важной характеристикой любого канала связи, так как определяет предельную скорость передачи информации в нем. Основная цель работы – определение пропускной способности гидроакустического канала связи при ограничении на среднюю интенсивность передаваемого сигнала. Дополнительной задачей являлось определение оптимального спектра передаваемого сигнала и расчет граничных частот этого спектра. Была рассмотрена модель однолучевого канала, характерная для глубокого моря, когда приемник или передатчик расположены на достаточной глубине.

Методы. Использованы положения прикладной гидроакустики, теории случайных процессов и теории информации.

Результаты. Получено выражение для коэффициента передачи гидроакустического канала связи и новое выражение для спектрального уровня шумов моря, обусловленных волнением поверхности моря. На основе кусочно-линейной аппроксимации кривых спектральных уровней шумов турбулентности, судоходства, волнения моря и теплового шума моря определена спектральная плотность интенсивности шума моря. Получены зависимости пропускной способности гидроакустического канала от дальности связи, интенсивности передаваемого сигнала и состояния поверхности моря. Определены нижняя и верхняя частоты оптимального спектра передаваемого сигнала и оптимальный спектр. Исследована зависимость коэффициента использования полосы частот от интенсивности входного сигнала для разных значений дальности связи.

Выводы. Использование коэффициента затухания Франсуа – Гаррисона позволило связать пропускную способность канала с параметрами морской среды: температурой, соленостью, значением водородного показателя в исследуемом районе. При заданной интенсивности входного сигнала пропускная способность существенно уменьшается с ростом дальности и усилением волнения моря. Показано, что с ростом расстояния ширина оптимального спектра уменьшается. Отмечается значительное влияние шума от волнения моря на форму оптимального спектра и значения его граничных частот. Было установлено, что возможны случаи увеличения коэффициента использования полосы частот ростом дальности при заданной интенсивности входного сигнала.

Ключевые слова: гидроакустический канал связи, шумы моря, спектральная интенсивность шумов моря, интенсивность сигнала, пропускная способность, оптимальный спектр, коэффициент использования полосы частот канала

• Поступила: 28.04.2022 • Доработана: 21.06.2022 • Принята к опубликованию: 10.11.2022

Для цитирования: Денисов В.Е. Пропускная способность гидроакустического канала связи. *Russ. Technol. J.* 2023;11(1):31–40. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-31-40>

Прозрачность финансовой деятельности: Автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Hydroacoustic communication channel capacity

Valery E. Denisov [@]*MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia*[@] *Corresponding author, e-mail: denisov@mirea.ru***Abstract**

Objectives. Capacity, describing the maximum rate of information transmission, is an important characteristic of any communication channel. The main purpose of this work is to determine the capacity of a hydroacoustic communication channel with constrained average intensity of the transmitted signal. An additional aim consists in finding the optimal spectrum of a transmitted signal and calculate its boundary frequencies. A model of a single-path channel was considered, which is characteristic of the deep sea with the receiver or transmitter placed at a sufficient depth.

Methods. Concepts of applied hydroacoustics, the theory of random processes, and information theory were used.

Results. An expression for gain in a hydroacoustic communication channel has been obtained. A novel expression derived for the spectral level of sea noise caused by sea surface waves is based on piecewise linear approximation of the curves of the spectral levels of noise obtained from four sources: turbulence, shipping, sea waves, and the thermal noise of the sea. Dependencies of the hydroacoustic channel capacity on communication distance, intensity of the transmitted signal, and sea state, are characterized. The definition of the optimal spectrum itself is determined along with the lower and upper boundary frequencies of the optimal spectrum of the transmitted signal. The dependence of the bandwidth usage on the intensity of the input signal at various communication distances has been investigated.

Conclusions. On the basis of the Francois–Garrison attenuation coefficient, channel capacity was correlated with the parameters of the marine environment: temperature, salinity, and pH in the study area. At a given intensity of the input signal, channel capacity was shown to decrease significantly with increasing distance and sea wave intensity. It is also shown that the width of the optimal spectrum decreases with increasing distance. Sea wave noise was noted to affect significantly the shape of the optimal spectrum and its boundary frequencies. The possibility of cases where bandwidth usage increases with increasing distance at a given input signal intensity cannot be ruled out.

Keywords: hydroacoustic communication channel, sea noise, spectral intensity of sea noise, signal intensity, bandwidth, optimal spectrum, channel bandwidth utilization

• Submitted: 28.04.2022 • Revised: 21.06.2022 • Accepted: 10.11.2022

For citation: Denisov V.E. Hydroacoustic communication channel capacity. *Russ. Technol. J.* 2023;11(1):31–40. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-31-40>

Financial disclosure: The author has no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The author declares no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

При разработке цифровых гидроакустических систем связи особый интерес представляет пропускная способность гидроакустического канала связи (ГАКС), которая определяет максимальную скорость передачи информации при заданных шумах моря и ограничениях на передаваемый сигнал. Зная пропускную способность ГАКС, всегда можно оценить, насколько эффективна разрабатываемая система связи. Оценке пропускной способности ГАКС для различных условий посвящены труды как отечественных, так и зарубежных авторов.

Следует отметить работы [1–4], в которых среди прочих рассматриваются и вопросы определения пропускной способности. Наиболее близка к настоящей статье работа [1]. В ней определена пропускная способность однолучевого ГАКС с учетом частотной зависимости коэффициента затухания и шумов моря, использован коэффициент затухания Урика [5], который не зависит от параметров морской среды, и применен не сферический закон расширения фронта волны, как должно быть в случае точечного источника. Использован так называемый закон практического распространения, когда интенсивность звука обратно пропорциональна

расстоянию в степени 1.5. Однако, как отмечается в [5], при малой осведомленности о свойствах морской среды рекомендуется применять сферический закон. При расчете пропускной способности ГАКС в [1] использовалась специальная аппроксимирующая формула для спектральной плотности шумов из работы [6], которая дает несколько завышенные значения по сравнению с кривыми Урика [5]. В [1] рассматривался только случай спокойного моря. В настоящей статье пропускная способность рассчитывается для однолучевого ГАКС с учетом частотной зависимости коэффициента затухания, который описывается формулой Франсуа – Гаррисона. Данная формула считается наиболее точной на настоящее время и содержит параметры морской среды. Кроме того, используется простая и наглядная кусочно-линейная аппроксимация спектральных уровней шумов моря. Дополнительно исследуется зависимость пропускной способности от степени волнения поверхности моря. Из работ последних лет следует отметить работы [7–9], посвященные анализу различных гидроакустических систем связи и оценке скорости передачи информации.

1. КОЭФФИЦИЕНТ ПЕРЕДАЧИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО КАНАЛА

Согласно работам [10–12], при излучении гармонического сигнала мгновенное значение давления $p(t, R)$ в безграничной однородной морской среде с поглощением на расстоянии R от точечного источника может быть представлено в виде:

$$p(t, R) = \sqrt{2}P(R) \cos \left[\omega \left(t - \frac{R}{c} \right) \right], \quad (1)$$

где

$$P(R) = P_0 \frac{R_0}{R} \exp \left[-\alpha_e (R - R_0) \right] \quad (2)$$

– среднеквадратическое значение давления, Па; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота колебаний источника, рад/с; $c = 1500$ м/с – скорость звука в морской воде; R – расстояние, м; α_e – коэффициент затухания морской среды, Нп/м; P_0 – среднеквадратическое значение давления на опорном расстоянии R_0 (обычно $R_0 = 1$ м).

Из (1), (2) можно найти комплексный коэффициент передачи ГАКС:

$$\begin{aligned} H(j\omega) &= \frac{R_0}{R} \exp \left[-\alpha_e (R - R_0) - j\omega \frac{R}{c} \right] = \\ &= H(\omega) \exp[j\vartheta(\omega)], \end{aligned}$$

где $H(\omega)$ – амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) и $\vartheta(\omega)$ – фазо-частотная характеристика (ФЧХ), которые определяются по формулам:

$$H(\omega) = |H(j\omega)| = \frac{R_0}{R} \exp \left[-\alpha_e (R - R_0) \right],$$

$$\vartheta(\omega) = -\omega R/c.$$

На практике обычно коэффициент затухания α выражают в дБ/км, а расстояние R – в километрах. В этом случае и при $R_0 = 1$ м АЧХ примет вид:

$$H(f) = \frac{1}{R_{\text{км}} \cdot 10^3} \exp(-0.115 \alpha R). \quad (3)$$

Как следует из выражения (3), при заданной дальности связи R свойства АЧХ полностью определяются частотной характеристикой коэффициента затухания. Поэтому остановимся подробнее на коэффициенте затухания морской воды. Для расчета величины α приходится использовать различные полуэмпирические формулы, полученные на основе теоретических и экспериментальных данных. Одной из таких формул для расчета величины α является формула Франсуа – Гаррисона [13, 14], полученная на основе анализа и обобщения известных измерений в океане, включая и измерения в Арктике. Согласно работам [13, 14], коэффициент затухания звука α в диапазоне частот от 200 Гц до 1 МГц и до глубины 5 км можно представить в виде:

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3, \text{ дБ/км},$$

где α_1 – коэффициент поглощения, обусловленный ионной релаксацией соединений бора (боратов); α_2 – коэффициент поглощения, обусловленный ионной релаксацией сульфата магния (MgSO_4); α_3 – коэффициент поглощения, обусловленный сдвиговой вязкостью пресной воды и структурной релаксацией молекул пресной воды. Эти величины определяются по формулам:

$$\alpha_1 = \frac{A_1 P_1 f_1^2}{f_1^2 + f^2}, \quad \alpha_2 = \frac{A_2 P_2 f_2^2}{f_2^2 + f^2}, \quad \alpha_3 = A_3 P_3 f^2.$$

В приведенных выше выражениях частота f берется в кГц; а величины $A_i, P_i; i = 1, 2, 3; f_1, f_2$ имеют вид

$$A_1 = \frac{8.86}{c} \cdot 10^{0.78 \text{pH} - 5}, \text{ (дБ/км)} \cdot \text{кГц}^{-1};$$

$$P_1 = 1, f_1 = 2.8(S/35)^{0.5} \cdot 10^4 - 1245/\Theta, \text{ кГц};$$

$$A_2 = 21.44 \frac{S}{c} (1 + 0.025 T), \text{ (дБ/км)} \cdot \text{кГц}^{-1};$$

$$P_2 = 1 - 1.37 \cdot 10^{-4} z + 6.2 \cdot 10^{-9} z^2;$$

$$f_2 = \frac{8.17 \cdot 10^8 - 1990/\Theta}{1 + 0.0018(S - 35)}, \text{ кГц};$$

$$P_3 = 1 - 3.83 \cdot 10^{-5}z + 4.9 \cdot 10^{-10}z^2;$$

$$A_3 = \begin{cases} 4.937 \cdot 10^{-4} - 2.59 \cdot 10^{-5}T + \\ + 9.11 \cdot 10^{-7}T^2 - 1.50 \cdot 10^{-8}T^3, \\ T \leq 20 \text{ }^\circ\text{C}, \\ 3.964 \cdot 10^{-4} - 1.146 \cdot 10^{-5}T + \\ + 1.45 \cdot 10^{-7}T^2 - 6.50 \cdot 10^{-10}T^3, \\ T > 20 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \quad (\text{дБ/км}) \cdot \text{кГц}^{-2},$$

где c – скорость звука в морской воде (м/с), примерно равная

$$c \approx 1412 + 3.21T + 1.19S + 0.0167z,$$

T – температура воды, $^\circ\text{C}$; $\Theta = 273 + T$ – температура воды в градусах Кельвина, К; S – соленость, ‰; z – глубина, м; рН – значение водородного показателя в районе измерения α . Диапазон изменений рН в Мировом океане (7.5–8.4) и для заданных районов указывается в работе¹.

На частотах ниже 200 Гц уравнение Франсуа – Гаррисона может оказаться несправедливым. Результаты измерений затухания на частотах ниже 200 Гц были проанализированы в работе [15]. В данной работе утверждается, что причиной затухания звука на этих частотах является рассеяние звука на неоднородностях морской среды. Коэффициент затухания α_4 в этом диапазоне частот не зависит от частоты, но изменяется в зависимости от широты от 0.004 дБ/км в полярных водах до 0.0002 дБ/км в тропиках. В работе [1] использовалась величина $\alpha_4 = 0.003$ дБ/км. Уравнение Франсуа – Гаррисона применимо ко всем условиям океана в диапазоне частот от 200 Гц до 1 МГц. Это уравнение позволяет рассчитать коэффициент затухания с точностью до 10%. Для получения выражения коэффициента затухания звука в диапазоне частот от 10 Гц до 1 МГц необходимо к коэффициенту затухания Франсуа – Гаррисона прибавить коэффициент затухания α_4 . Далее будем полагать, что $\alpha_4 = 0.003$ дБ/км. Следовательно, коэффициент затухания звука на частоте f будет иметь вид: $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4$.

Для расчета коэффициента затухания по формуле Франсуа – Гаррисона необходимо знать температуру

воды T , соленость S , величину рН, глубину z вдоль всей траектории распространения звука.

В работе Р.Дж. Урика [5] приведена более простая формула для коэффициента затухания звука при температуре воды $T = 4 \text{ }^\circ\text{C}$, которая характерна для больших глубин в глубоком море:

$$\alpha_y = \frac{0.11f^2}{1+f^2} + \frac{44f^2}{4100+f^2} + 3 \cdot 10^{-4}f^2,$$

где α_y – коэффициент затухания, дБ/км; f – частота, кГц.

Формула Урика также основана на результатах экспериментальных исследований и ее составляющие подобны составляющим формулы Франсуа – Гаррисона. Однако в работе [5] не представлены сведения о точности аппроксимации этой формулой известных выражений для коэффициента затухания. И, кроме того, не указан частотный диапазон, для которого эта формула справедлива. Интересно сравнить значения коэффициентов затухания Франсуа – Гаррисона и Урика. На рис. 1а приведена зависимость коэффициента затухания от частоты, рассчитанная по формуле Франсуа – Гаррисона. Так как в логарифмическом масштабе кривая Урика мало отличается от кривой Франсуа – Гаррисона, то были построены графики коэффициентов затухания Франсуа – Гаррисона и Урика и их разности в линейном масштабе, приведенные на рис. 1б.

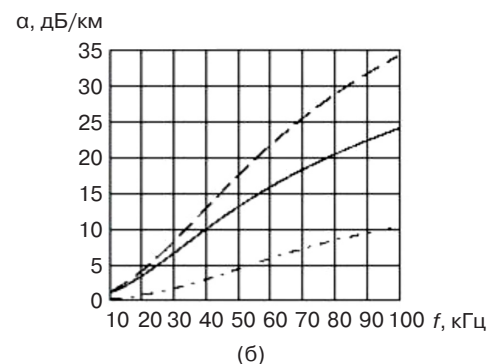
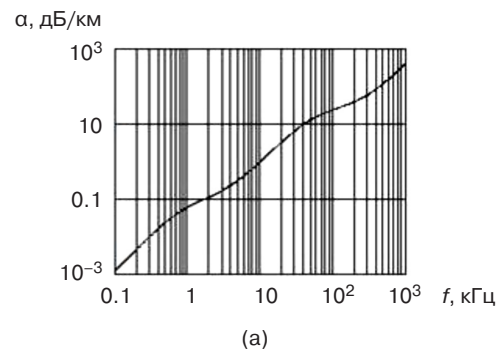


Рис. 1. Зависимость коэффициента затухания от частоты $\alpha(f)$: (а) для диапазона частот 0.1–10³ кГц (формула Франсуа – Гаррисона); (б) для диапазона частот 10–100 кГц: сплошная кривая – формула Франсуа – Гаррисона, штриховая кривая – формула Урика, штрих-пунктирная кривая – разность $\alpha_y(f) - \alpha(f)$

¹ Атлас океанов: в 3 т. Т. 1. Тихий океан. 323 с. Т. 2. Атлантический и Индийский океаны. 334 с. Т. 3. Северный Ледовитый океан. 188 с. Л.: Гл. упр. МО СССР; 1974–1980. [Atlas okeanov (Atlas of the Oceans): in 3 v. V. 1. Tikhii okean (Pacific Ocean). 323 p. V. 2. Atlanticheskii i Indiiiskii okeany (Atlantic and Indian Oceans). 334 p. V. 3. Severnyi Ledovityi okean (Arctic Ocean). Leningrad: MO USSR; 1974–1980. 188 p. (in Russ.).]

Как видно из рис. 1б, расхождения коэффициентов затухания на высоких частотах могут быть существенными. Относительная погрешность аппроксимации $\delta_\alpha = (\alpha - \alpha_y)/\alpha$ формулы Франсуа – Гаррисона формулой Урика в диапазоне частот от 0.1 кГц до 1 МГц для температуры $T = 4^\circ\text{C}$ и солености морской воды $S = 35\text{‰}$ равна $\delta_\alpha = -0.26$ при $z = 100$ м и $\delta_\alpha = -0.42$ при $z = 1000$ м. При $S = 30\text{‰}$ величина $|\delta_\alpha|$ увеличивается в 1.5 раза. Такие значения погрешности вряд ли можно считать допустимыми для данных условий. Поэтому для расчета пропускной способности ГАКС необходимо использовать формулу Франсуа – Гаррисона.

Далее будем измерять частоту f в герцах. Для этого следует в формулы для коэффициентов A_1 и A_2 добавить множитель 10^{-3} , для A_3 – множитель 10^{-6} , а в формулы для частот f_1 и f_2 – множитель 10^3 .

2. ШУМЫ МОРСКОЙ СРЕДЫ

В работе в качестве помех рассматриваются шумы, характерные для глубокого моря. Основными их источниками в данном случае являются океаническая турбулентность, дальнейшее судоходство, волнение поверхности моря и тепловой шум, генерируемый при тепловом движении молекул воды [5]. На коротких интервалах времени и умеренных глубинах окружающий шум моря можно описать стационарным гауссовским процессом и характеризовать спектральной плотностью интенсивности. Вследствие изменчивости источников окружающий шум характеризуют усредненной спектральной плотностью интенсивности. Графики усредненных спектральных уровней интенсивности шума турбулентности, шума судоходства, шума от волнения поверхности моря и теплового шума приведены в [5] на рис. 7.5 для диапазона частот от 1 до 10^5 Гц. С помощью кусочно-линейной аппроксимации этих кривых были получены следующие аналитические выражения для спектральных уровней шумов.

Спектральный уровень шума турбулентности $N_{\text{TU}}(f)$, дБ относительно 1 мкПа:

$$N_{\text{TU}}(f) = (107 - 30\lg f)[1(f-1) - 1(f-50)].$$

Спектральный уровень шума судоходства $N_{\text{C}}(f)$, дБ относительно 1 мкПа:

$$\begin{aligned} N_{\text{C}}(f, k) = & (44 + 9k + 20\lg f)[1(f-1) - 1(f-10)] + \\ & + (64 + 9k)[1(f-10) - 1(f-100)] + \\ & + (144 + 9k - 40\lg f)1(f-100), \end{aligned}$$

где f – частота, Гц; $1(f)$ – единичная ступенчатая функция; $k = 0, 1, 2$ соответственно для случаев редкого, умеренного и интенсивного судоходства.

Спектральный уровень шума от волнения моря $N_{\text{B}}(f)$, дБ относительно 1 мкПа:

$$\begin{aligned} N_{\text{B}}(f, b) = & (N_1 + 20\lg f - 46)[1(f-1) - 1(f-200)] + \\ & + N_1[1(f-200) - 1(f-1000)] + \\ & + (N_1 + 60 - 20\lg f)1(f-1000), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} N_1 = N_1(b) = N_{\text{B}}(f, b)|_{f=1000 \text{ Гц}} = \\ = 44.9 + 13.4\ln(1+b). \end{aligned}$$

В последних формулах b – это величина, характеризующая состояние поверхности моря, измеряемая в баллах. Значения b заключены в интервале $[0; 6]$. Формула (4) получена нами с помощью аппроксимации по методу наименьших квадратов последовательности значений $N_{\text{B}}(1000, b)$, $b = 0, 0.5, 1, 2, 3, 4, 6$ семейства кривых $N_{\text{B}}(f, b)$, представленных в крупном масштабе в работе [16]. Относительная ошибка аппроксимации не превосходит 4%.

Спектральный уровень теплового шума $N_{\text{TE}}(f)$, дБ относительно 1 мкПа:

$$N_{\text{TE}}(f) = (-75 + 20\lg f)1(f-10000). \quad (5)$$

После определения спектральных уровней шумов можно определить их спектральные плотности интенсивности.

Шум турбулентности:

$$\begin{aligned} J_{\text{TU}}(f) = J_0 10^{0.1 N_{\text{TU}}(f)} = \\ = J_0 10^{10.7} f^{-3} [1(f-1) - 1(f-50)], \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{Гц}), \end{aligned}$$

где $J_0 = 0.667 \cdot 10^{-22} \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{Гц})$ – опорное значение спектральной интенсивности, соответствующее среднеквадратическому значению давления 1 мкПа.

Шум судоходства:

$$\begin{aligned} J_{\text{C}}(f, k) = J_0 10^{0.1 N_{\text{C}}(f)} = \\ = J_0 10^{4.4 + 0.9k} f^2 [1(f-1) - 1(f-10)] + \\ + J_0 10^{6.4 + 0.9k} [1(f-10) - 1(f-100)] + \\ + J_0 10^{14.4 + 0.9k} f^{-4} 1(f-100), \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{Гц}). \end{aligned}$$

Шум от волнения поверхности моря:

$$\begin{aligned} J_{\text{B}}(f, b) = J_0 10^{0.1 N_{\text{B}}(f, b)} = \\ = J_0 10^{0.1 N_1 - 4.6} f^2 [1(f-1) - 1(f-200)] + \\ + J_0 10^{0.1 N_1} [1(f-200) - 1(f-1000)] + \\ + J_0 10^{0.1 N_1 + 6} f^{-2} 1(f-1000), \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{Гц}). \end{aligned}$$

Тепловой шум:

$$J_{TE}(f) = J_0 10^{0.1 N_{TE}(f)} =$$

$$= J_0 10^{-7.5} f^2 1(f - 10000), \text{ Вт/(см}^2 \cdot \text{Гц)}. \quad (6)$$

Выражения (5), (6) справедливы для температуры воды $T = 4^\circ \text{C}$. Для других температур воды спектральная плотность теплового шума рассчитывается по формуле

$$J_{TE}(f) = 4\pi k_B \Theta c^{-2} f^2 1(f - 10000), \text{ Вт/(см}^2 \cdot \text{Гц)},$$

где $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; $c = 1.5 \cdot 10^{-5}$ см/с – средняя скорость звука в морской воде.

Графики спектральной плотности интенсивности суммарного шума морской среды

$$J_{\Sigma}(f) = J_{TU}(f) + J_C(f) + J_B(f) + J_{TE}(f)$$

представлены на рис. 2 для случая умеренного судорохода при разных состояниях поверхности моря. Сплошная линия соответствует случаю спокойного моря, когда $b = 0$ баллов; пунктирная линия: $b = 1$; штриховая линия: $b = 3$; штрих-пунктирная линия: $b = 6$.

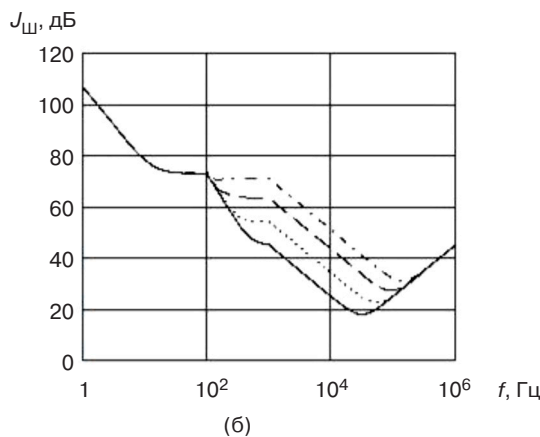
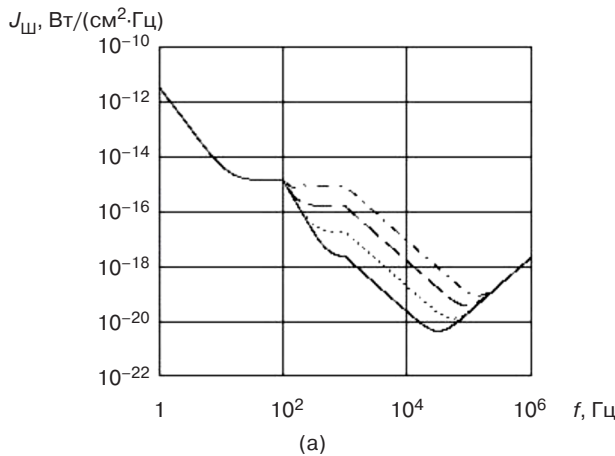


Рис. 2. Спектральная плотность интенсивности суммарного шума морской среды: (а) в физических единицах; (б) в децибелах относительно $J_0 = 0.667 \cdot 10^{-22}$ Вт/(см²·Гц)

3. ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ

Анализируемый ГАКС можно представить в виде фильтра нижних частот с комплексной частотной характеристикой $H(j\omega)$, на входе которого действует сигнал (давление) $p_1(t)$. Под его воздействием на выходе появляется сигнал $p_2(t)$, который суммируется с небелым гауссовским шумом моря $p_{\Sigma}(t)$. Таким образом, процесс на выходе ГАКС будет иметь вид: $p(t) = p_2(t) + p_{\Sigma}(t)$. Будем считать сигнал $p_1(t)$ реализацией некоторого стационарного эргодического случайного процесса с ограниченной интенсивностью. Пусть интенсивность входного сигнала на расстоянии 1 м от источника равна I_S . Определим пропускную способность ГАКС при ограничении на полосу частот (за счет фильтра) и на интенсивность сигнала. Для канала, подобного ГАКС, при ограничениях по частоте и средней мощности в теории информации определена его пропускная способность [17]. В этой работе показано, что пропускная способность достигается при входном сигнале в виде стационарного гауссовского процесса. В наших терминах формула для пропускной способности ГАКС примет вид:

$$C = \int_{f_H(B)}^{f_B(B)} \log \left[\frac{H^2(f) B}{J_{\Sigma}(f)} \right] df, \quad (7)$$

где $f_H(B)$, $f_B(B)$ – нижняя и верхняя частоты полосы частот, для которой

$$\frac{J_{\Sigma}(f)}{H^2(f)} \leq B \quad (8)$$

и B является решением уравнения:

$$\int_{f_H(B)}^{f_B(B)} \left[B - \frac{J_{\Sigma}(f)}{H^2(f)} \right] df = I_S, \quad (9)$$

$H(f) = |H(j2\pi f)|$ – АЧХ ГАКС.

Спектральная плотность интенсивности $J_S(f)$ случайного входного сигнала, при которой достигается пропускная способность канала, определяется по формуле

$$J_S(f) = \begin{cases} B - J_{\Sigma}(f)/H^2(f), & f \in [f_H(B), f_B(B)], \\ 0, & f \notin [f_H(B), f_B(B)]. \end{cases} \quad (10)$$

Таким образом, пропускная способность ГАКС определяется двумя параметрическими равенствами (7) и (9). Параметром является величина B , которая должна удовлетворять неравенству (8). В результате

совместного решения уравнений (7) и (9) при ограничении (8) можно определить величины C и B , а затем по формуле (10) найти спектр оптимального входного сигнала. Решение данной задачи возможно только численными методами с использованием компьютера.

Результаты расчета зависимости пропускной способности $C(R)$ от дальности связи при трех значениях интенсивности входного сигнала приведены на рис. 3а для случая спокойного моря ($b = 0$) и умеренного судорождства ($k = 1$).

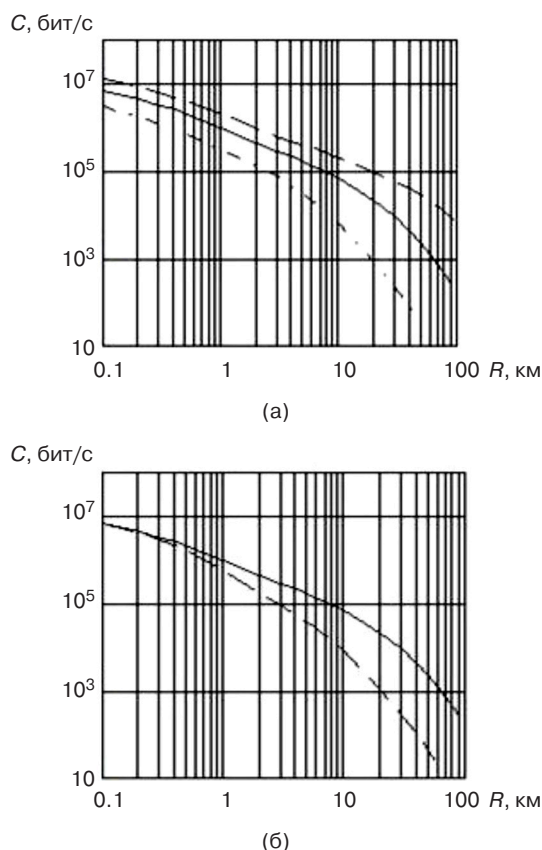


Рис. 3. Зависимость пропускной способности ГАКС от дальности связи ($k = 1$):

- (а) $b = 0$ (штрих-пунктирная линия: $I_S = 10^{-7}$ Вт/см², сплошная линия: $I_S = 10^{-5}$ Вт/см², штриховая линия: $I_S = 10^{-3}$ Вт/см²);
(б) $I_S = 10^{-5}$ Вт/см² (штриховая линия: $b = 3$, сплошная линия: $b = 0$)

Как видно из рисунка, пропускная способность уменьшается с ростом дальности связи и тем быстрее, чем меньше интенсивность входного сигнала. По рис. 3а можно оценить порядок величины пропускной способности для указанных условий связи.

На рис. 3б представлены зависимости $C(R)$ для $I_S = 10^{-5}$ Вт/см² при разных b . Видно, что шум, вызванный волнением поверхности моря, может существенно уменьшить пропускную способность. Например, при спокойном море ($b = 0$)

и $R = 10$ км величина $C = 7 \cdot 10^4$ бит/с, а если $b = 3$, то $C = 8 \cdot 10^3$ бит/с.

Как показывают расчеты, при фиксированной интенсивности входного сигнала с ростом дальности R ширина спектра оптимального сигнала уменьшается за счет увеличения нижней граничной частоты спектра f_H и уменьшения верхней f_B . Зависимости этих частот от дальности при $k = 1$, $b = 0$ приведены на рис. 4.

На рис. 5 для примера приведены два спектра оптимального сигнала при фиксированной интенсивности входного сигнала, $k = 1$, $b = 0$, $I_S = 10^{-5}$ Вт/см² и двух значениях дальности R .

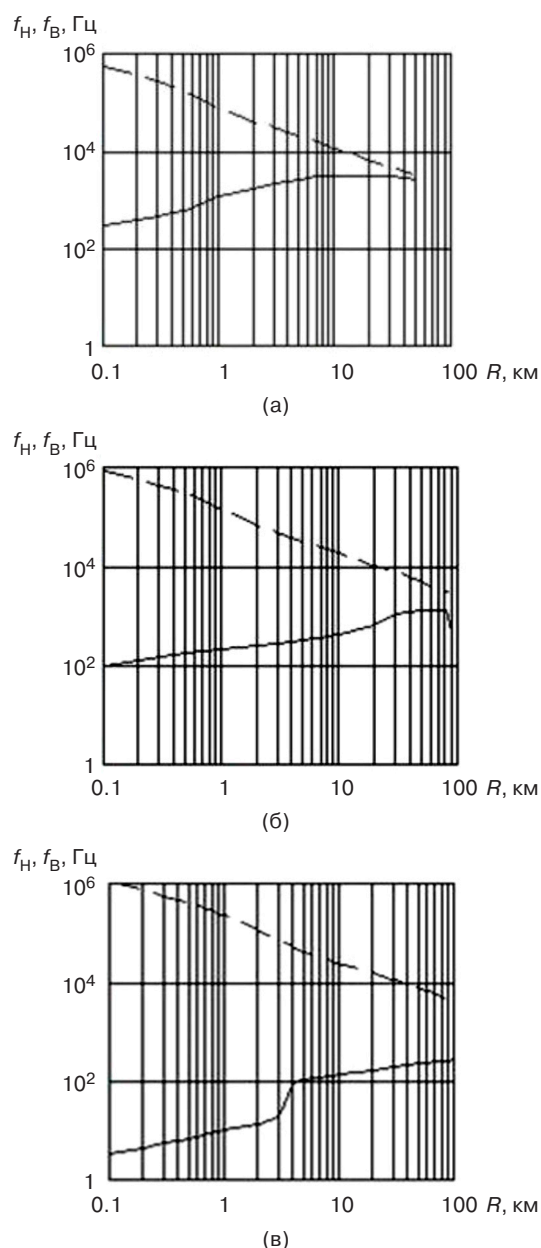


Рис. 4. Зависимость граничных частот оптимального спектра излучаемого сигнала от дальности связи: (а) $I_S = 10^{-7}$ Вт/см²; (б) $I_S = 10^{-5}$ Вт/см²; (в) $I_S = 10^{-3}$. Сплошная линия – f_H , штриховая линия – f_B

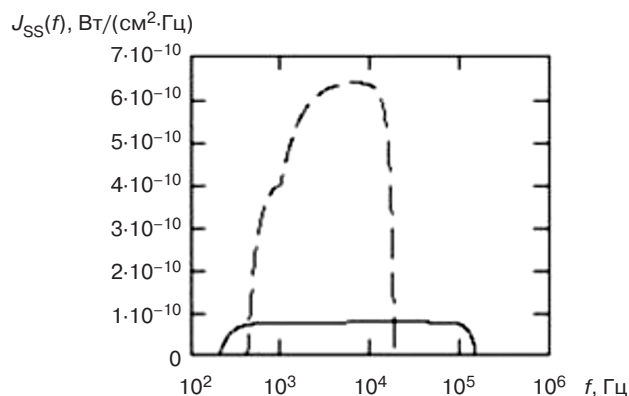


Рис. 5. Оптимальные спектры излучаемого сигнала для разной дальности связи.
Сплошная линия: $R = 1$ км, штриховая линия: $R = 10$ км

Как видно из рис. 5, при увеличении дальности связи и постоянной интенсивности входного сигнала оптимальный спектр сужается, но его значения увеличиваются. Спектр оптимального входного сигнала всегда ограничен по частоте.

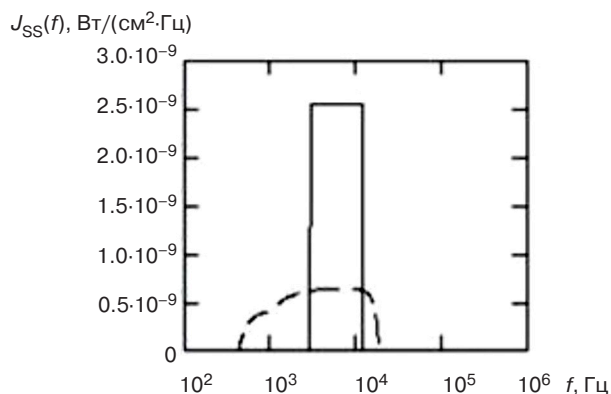


Рис. 6. Оптимальные спектры излучаемого сигнала при разном волнении моря.
Сплошная линия: $b = 3$, штриховая линия: $b = 0$

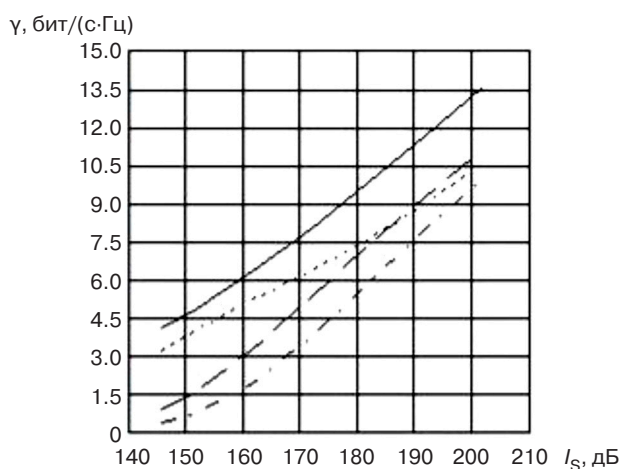


Рис. 7. Зависимость коэффициента использования полосы частот от интенсивности передаваемого сигнала при разных значениях дальности.
Сплошная линия: $R = 0.2$ км; пунктирная линия: $R = 1$ км; штриховая линия: $R = 5$ км; штрих-пунктирная линия: $R = 10$ км

На рис. 6 представлены оптимальные спектры для $k = 1$, $I_S = 10^{-5}$ Вт/см², $R = 10$ км при отсутствии волнения моря ($b = 0$) и при волнении моря $b = 3$. Как следует из рисунка, шум от волнения моря приводит к уменьшению ширины оптимального спектра, изменению формы и росту его интенсивности.

Как следует из анализа, ГАКС представляет собой канал с ограниченной полосой частот. Поэтому с практической точки зрения большой интерес представляет собой оценка эффективности использования полосы частот ГАКС. На рис. 7 приведены результаты расчетов коэффициента использования полосы частот $\gamma = C/(f_B - f_H)$ в зависимости от интенсивности входного сигнала (в децибелах относительно значения 1 мкПа) для четырех значений дальности связи. Из рисунка видно, что независимо от дальности величина γ растет с увеличением интенсивности входного сигнала. Интересной особенностью этих зависимостей является то, что в данном случае кривые, соответствующие $R = 1$ км и $R = 5$ км, пересекаются при некотором значении интенсивности (в окрестности 190 дБ). Следовательно, возможны случаи, когда при большей дальности коэффициент использования полосы частот будет больше, чем при меньшей дальности при одинаковой интенсивности входного сигнала. По данным рис. 7 можно оценить порядок величины коэффициента γ для указанных условий связи. Например, максимальное значение γ равно приблизительно 13 бит/(с·Гц) и имеет место при $I_S = 200$ дБ и $R = 0.2$ км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной целью работы являлось определение пропускной способности гидроакустического канала связи при ограничении на среднюю интенсивность передаваемого сигнала. Рассматривалась модель одностороннего канала, характерная для глубокого моря, когда приемник или передатчик расположены на достаточной глубине. В этом случае распространение звука на средние дальности происходит по «устойчивым» траекториям, которые не подвержены влиянию поверхности моря и влиянию дна. Такие траектории имеют место для вертикальных и мало отличающихся (10° – 15°) от них каналов.

Сравнение численных значений коэффициентов затухания Франсуа – Гаррисона и Урика показало, что коэффициент затухания Урика может заметно отличаться от коэффициента затухания Франсуа – Гаррисона. Кроме того, коэффициент затухания Франсуа – Гаррисона учитывает зависимость затухания звука от параметров морской воды. Поэтому в работе был использован коэффициент затухания Франсуа – Гаррисона. На этой основе был получен комплексный коэффициент передачи ГАКС, АЧХ и ФЧХ.

Получено новое выражение для спектрального уровня шумов моря, обусловленных волнением поверхности моря. Осуществлена кусочно-линейная аппроксимация кривых спектральных уровней шумов турбулентности, судоходства и теплового шума моря, приведенных в работе Р.Дж. Урика. На этой основе получено выражение для спектральной плотности интенсивности шума моря, которое было использовано при вычислении пропускной способности канала. Использование коэффициента затухания Франсуа – Гаррисона позволило связать пропускную способность ГАКС с параметрами морской среды: температурой, соленостью, значением водородного показателя в исследуемом районе.

Расчеты пропускной способности были проведены для случаев умеренного судоходства, спокойного моря и моря с волнением 3 балла. Было установлено, что шумы моря от волнения поверхности моря существенно уменьшают пропускную способность ГАКС.

Рассчитаны зависимости пропускной способности от дальности связи и интенсивности передаваемого сигнала. Показано, что при заданной интенсивности входного сигнала с ростом дальности существенно уменьшается пропускная способность.

Определены нижняя и верхняя частоты оптимального спектра входного сигнала и сам оптимальный спектр. Показано, что с ростом дальности связи ширина оптимального спектра уменьшается. Отмечается значительное влияние шума от волнения моря на форму оптимального спектра и значения его граничных частот.

Определена зависимость коэффициента использования полосы частот от интенсивности входного сигнала для разных значений дальности связи. Установлено, что возможны случаи, когда коэффициент использования полосы частот увеличивается с ростом дальности при заданной интенсивности входного сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stojanovic M. On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic communication channel. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*. 2007;11(4):34–43. <https://doi.org/10.1145/1347364.1347373>
2. Lucani D.E., Stojanovic M., Medard M. On the relationship between transmission power and capacity of an underwater acoustic communication channel. In: *Proceedings of OCEANS Conference*. 2008. 6 p. <https://doi.org/10.1109/OCEANSKOB.2008.4531073>
3. Stojanovic M., Preisig J. Underwater acoustic communication channels: propagation models and statistical characterization. *IEEE Communications Magazine*. 2009;47(1):84–89.
4. Matarneh A.M. Thorough investigation of BER simulation of DPSK in underwater acoustic channel. *JJEE*. 2016;2(2):160–171.
5. Урик Р.Дж. *Основы гидроакустики*: пер. с англ. Л.: Судостроение; 1978. 445 с.
6. Coates R. *Underwater Acoustic Systems*. New York: Wiley; 1990. 188 p.
7. Сиверс М.А., Басов В.В. Использование технологии MIMO-OFDM в системах гидролокации, гидроакустической связи, навигации и управления. В сб.: *Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: Материалы XXIII международной научной конференции*: в 2 ч. Часть 2. Санкт-Петербург; 2020. С. 177–183.
8. Ерошенко С.В., Кранц В.З., Сечин В.В. Об использовании параллельных каналов для повышения скорости передачи информации в системе гидроакустической связи со сложными сигналами. *Гидроакустика*. 2020;42(2):23–28.

REFERENCES

1. Stojanovic M. On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic communication channel. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*. 2007;11(4):34–43. <https://doi.org/10.1145/1347364.1347373>
2. Lucani D.E., Stojanovic M., Medard M. On the relationship between transmission power and capacity of an underwater acoustic communication channel. In: *Proceedings of OCEANS Conference*. 2008. 6 p. <https://doi.org/10.1109/OCEANSKOB.2008.4531073>
3. Stojanovic M., Preisig J. Underwater acoustic communication channels: propagation models and statistical characterization. *IEEE Communications Magazine*. 2009;47(1):84–89.
4. Matarneh A.M. Thorough investigation of BER simulation of DPSK in underwater acoustic channel. *JJEE*. 2016;2(2):160–171.
5. Urik R.J. *Osnovy gidroakustiki (Principles of Underwater Sound)*. Leningrad: Sudostroenie; 1978. 445 p. (in Russ.). [Urik R.J. *Principles of Underwater Sound*. NY: McGraw-Hill, Book Company; 1975. 445 p.]
6. Coates R. *Underwater Acoustic Systems*. New York: Wiley; 1990. 188 p.
7. Sivers M.A., Basov V.V. The use of MIMO-OFDM technology in systems of the hydrolocation, hydroacoustic communication, navigation and management. In: *Wave Electronics and Infocommunication Systems: Proceedings of the 23rd International Scientific Conference*. In 2 v. V. 2. St. Petersburg; 2020. P. 177–183 (in Russ.).
8. Eroshenko S.V., Krants V.Z., Sechin V.V. On the use of parallel channels to increase information rate in hydroacoustic communication system with compound signals. *Gidroakustika = Hydroacoustics*. 2020;42(2): 21–28 (in Russ.).

9. Родионов А.Ю., Унру П.П., Кулик С.Ю., Голов А.А. Оценки применения многочастотных сигналов с постоянной огибающей в гидроакустических системах связи. *Подводные исследования и робототехника*. 2019;3(29):30–38. <https://doi.org/10.25808/24094609.2019.29.3.004>
10. Клей К., Медвин Г. *Акустическая океанография*: пер. с англ. М.: Мир; 1980. 580 с.
11. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. *Теоретические основы акустики океана*. Л.: Гидрометеиздат; 1982. 264 с.
12. Андреева И.Б. *Физические основы распространения звука в океане*. Л.: Гидрометеиздат; 1975. 190 с.
13. Francois R.E., Garrison G.R. Sound absorption based on ocean measurements: Part I: Pure water and magnesium sulfate contributions. *J. Acoust. Soc. Am.* 1982;72(3): 896–907. <https://doi.org/10.1121/1.388170>
14. Francois R.E., Garrison G.R. Sound absorption based on ocean measurements: Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption. *J. Acoust. Soc. Am.* 1982;72(6):1879–1890. <https://doi.org/10.1121/1.388673>
15. Kibblewhite A.C., Hampton L.D. A review of deep ocean sound attenuation data at very low frequencies. *J. Acoust. Soc. Am.* 1980;67(1):147–157. <https://doi.org/10.1121/1.384473>
16. Гийес Л., Сабате П. *Основы акустики моря*: пер. с фр. Л.: Гидрометеиздат; 1967. 212 с.
17. Галагер Р. *Теория информации и надежная связь*: пер. с англ. М.: Сов. Радио; 1974. 720 с.
9. Rodionov A.Yu., Unru P.P., Kulik S.Yu., Golov A.A. Application of multi-frequency signals with constant envelope in underwater communication systems. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika = Underwater Investigations and Robotics*. 2019;3(29):30–38 (in Russ.). <https://doi.org/10.25808/24094609.2019.29.3.004>
10. Klei K., Medvin G. *Akusticheskaya okeanografiya (Acoustical Oceanography)*: trans. from Eng. Moscow: Mir; 1980. 580 p. (in Russ.). [Clay C.S., Medwin H. *Acoustical Oceanography*. New York: Wiley; 1977. 544 p.]
11. Brekhovskikh L.M., Lysanov Yu.P. *Teoreticheskie osnovy akustiki okeana (Theoretical Foundations of Ocean Acoustics)*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1982. 264 p. (in Russ.).
12. Andreeva I.B. *Fizicheskie osnovy rasprostraneniya zvuka v okeane (Physical Foundations of Sound Propagation in the Ocean)*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1975. 190 p. (in Russ.).
13. Francois R.E., Garrison G.R. Sound absorption based on ocean measurements: Part I: Pure water and magnesium sulfate contributions. *J. Acoust. Soc. Am.* 1982;72(3): 896–907. <https://doi.org/10.1121/1.388170>
14. Francois R.E., Garrison G.R. Sound absorption based on ocean measurements: Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption. *J. Acoust. Soc. Am.* 1982;72(6):1879–1890. <https://doi.org/10.1121/1.388673>
15. Kibblewhite A.C., Hampton L.D. A review of deep ocean sound attenuation data at very low frequencies. *J. Acoust. Soc. Am.* 1980;67(1):147–157. <https://doi.org/10.1121/1.384473>
16. Guies L., Sabate P. *Osnovy akustiki morya (Fundamentals of acoustics of the sea)*: trans. from Franc. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1967. 212 p. (in Russ.).
17. Galager R. *Teoriya informatsii i nadezhnaya svyaz' (Information Theory and Reliable Communication)*: trans. from Eng. Moscow: Sovetskoe Radio; 1974. 720 p. (in Russ.). [Gallager R.G. *Information Theory and Reliable Communication*. NY: J. Wiley; 1968. 603 p.]

Об авторе

Денисов Валерий Евгеньевич, старший преподаватель кафедры радиоволновых процессов и технологий Института радиоэлектроники и информатики ФБГОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: denisov@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 1190-9380, <https://orcid.org/0000-0002-5824-8741>

About the author

Valery E. Denisov, Senior Lecturer, Department of Radio Wave Processes and Technologies, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78 Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: denisov@mirea.ru. RCSI SPIN-code 1190-9380, <https://orcid.org/0000-0002-5824-8741>