

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.2.14>

УДК: 621.396.4

**ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
РАДИОКАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ
СРЕДНЕВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА В ИНТЕРЕСАХ ОРГАНИЗАЦИИ
СООБЩЕНИЙ В СЕВЕРНЫХ ШИРОТАХ**

А.В. Сухов¹, В.И. Филатов², А.А. Генов³,

¹ Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет),
125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4,

² Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

³ НИЦ «Курчатовский институт» – НИИСИ
117218, Москва, Нахимовский просп., 36, к.1

Статья поступила в редакцию 25 декабря 2025 г.

Аннотация. Северный морской путь требует надежных систем связи для обеспечения навигации и безопасности в сложных арктических условиях. В статье приводится обоснование требований и возможностей средневолновой (СВ, 300–3000 кГц) радиосвязи, особенно в поддиапазоне 300–600 кГц, как эффективного решения для дистанций 100–600 км. Приведен анализ энергетических характеристик, включая затухание сигнала, шум, вероятность битовой ошибки, отношение сигнал/шум и энтропии покрытия, который подтверждает высокую надежность СВ в условиях высокоширотных ионосферных возмущений. На основе рекомендаций МСЭ-R и эмпирических моделей результаты демонстрируют преимущества СВ перед коротковолновыми и спутниковыми системами, предлагая экономически выгодное и устойчивое решение для операций северного морского пути, включая управление ледоколами, аварийную связь и резервирование других каналов. Для оценки

эффективности предлагаемых решений использована информационная мера энтропия покрытия.

Ключевые слова: северный морской путь, средневолновая связь, поверхностная волна, ионосферные возмущения, надежность радиоканала, энтропия покрытия.

Финансирование: Публикация выполнена в рамках НИР НИЦ «Курчатовский институт» – НИИСИ по теме № FNEF-2024-0003 «Методы разработки аппаратно-программных платформ на основе защищенных и устойчивых к сбоям систем на кристалле и сопроцессоров искусственного интеллекта и обработки сигналов».

Автор для переписки: Осипов Владислав Вадимович, kt-mati@mail.ru

Введение

Северный морской путь (СМП) – ключевой транспортный коридор в Арктике, обеспечивающий круглогодичную навигацию и поддерживающий стратегические и экономические интересы России. Однако экстремальный климат, высокие широты и частые ионосферные возмущения создают значительные трудности для надежных систем связи. Коротковолновые (КВ) системы подвержены колебаниям сигнала, спутниковые системы ограничены видимостью орбит и уязвимы, а оптоволоконная инфраструктура в Арктике практически отсутствует. В этих условиях средневолновая (СВ, 300–3000 кГц) радиосвязь, особенно в поддиапазоне 300–600 кГц, представляет собой устойчивую альтернативу благодаря стабильному распространению сигнала на расстояниях 100–600 км. Настоящая статья оценивает энергетические характеристики радиоканалов СВ-диапазона, акцентируя их надежность в высокоширотных условиях. На основе рекомендаций МСЭ-R и эмпирических моделей анализируются затухание сигнала, шум, вероятность битовой ошибки (BER), отношение сигнал/шум (SNR) и энтропия покрытия, чтобы продемонстрировать преимущества СВ перед диапазоном декаметровых волн и спутниковыми системами. Исследование обосновывает необходимость

модернизации инфраструктуры СВ-связи как ключевого элемента СМП, подчеркивая ее практическую и экономическую выгоду.

1. Информационная оценка эффективности канала передачи информации

Для оценки эффективности системы информационного обмена требуется учитывать ряд показателей эффективности системы. Но для получения информационной обобщенной (целевой) оценки целесообразно использовать энтропию покрытия [1-3]. Основными параметрами системы связи являются вероятностно-временные характеристики каналов связи.

Для перспективных цифровых каналов информационного обмена можно определить два важных параметра: время передачи сообщения T_C и вероятность ошибки сообщения P_C для цифровых систем связи. Поскольку в настоящее время существующие и перспективные системы информационного обмена являются цифровыми, то далее аналоговые системы связи рассматривать не будем.

Энтропия покрытия [1, 2, 4], учитывающую как количественную, так и качественную стороны информации, определена следующим образом

$$H = \log \frac{(R_r \setminus R_n) \cup R_n}{R_n}, \quad (1)$$

где R_n – вектор нормативных ресурсов, R_r – вектор реальных ресурсов, $\|\cdot\|$ – норма вектора, \setminus – операция разности множеств.

Энтропия покрытия оценки вероятности ошибки будет определяться следующим образом:

$$H_{ош} = \log \Pi_{ош}, \quad (2)$$

$$\Pi_{ош} = \begin{cases} \frac{P_{ош}}{P_{ошн}} = \frac{1 - P_{\delta}}{1 - P_{\deltaн}}, P_{ош} > P_{ошн} \\ 1, P_{ош} \leq P_{ошн} \end{cases},$$

где основание логарифма определяет единицы измерения энтропии, $P_{ош}$ – реальное значение вероятности ошибки, $P_{ошн}$ – нормативное значение вероятности ошибки, P_{δ} и $P_{\deltaн}$ – реальное и нормативное значения вероятности правильного приема соответственно.

Для временных характеристик следует учитывать фактор повтора передачи в случае обнаружения ошибки. Тогда энтропия покрытия временных характеристик будет определяться следующим образом:

$$H_t = \sum_{i=1}^m \log \left[\frac{T_i}{T_d} (1 + P_{ou} (g - 1)) \right], \quad (3)$$

где время прохождения сигнала на i -м этапе:

$$T_i = T_s + T_{ir} + T_{iK};$$

T_s, T_r, T_K – длительность сигнала, время распространения сигнала и аппаратная задержка соответственно; m – количество этапов (каналов) прохождения сигнала от источника до получателя; g – фактор ошибочной передачи, зависящий от системы связи. Для системы связи, работающей при обнаружении ошибки по принципу передача-квитирование-повтор, значение $g = 3$;

$$T_d = \frac{d}{c} + T_s,$$

d – дальность канала; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость распространения радиоволн.

Принцип сложности системы определяется сведением автономных дифференциальных уравнений движения всех элементов системы управления к подчинению главной задачи функционирования системы связи – достижению энтропии покрытия объекта управления минимального (нулевого) значения. Отсюда эмерджентное свойство системы связи проявляется в преобразовании значений величин, входящих в уравнения состояния, и к изменению обобщенной энтропии покрытия и обобщенных информационных потоков в системе.

Пространство, основанное на информационной мере энтропии покрытия, является метрическим, поэтому разность между соответствующими значениями энтропии покрытия элементов системы или элемента системы в разные моменты времени будет соответствовать их информационным состояниям.

С учетом свойства аддитивности энтропии покрытия по независимым параметрам [4]:

$$H(T_c, P_c) = H(T_c) + H(P_c). \quad (4)$$

2. Шум и помехи в СВ-диапазоне

Для точного моделирования радиоканалов средневолнового диапазона необходимо учитывать фоновые шумы (промышленные, галактические, грозовые) и атмосферные помехи. Согласно рекомендации МСЭ-R P.372 [5], галактические и промышленные шумы существенно влияют на частоты ниже 2 ГГц. Медианный уровень шума для вертикальной антенны рассчитывается по выражению:

$$F_{am} = c - d \lg(f), \text{ дБ} \quad (5)$$

где f – частота (МГц), c и d коэффициенты, характеризующие тип местности.

Графики зависимости галактического шума и промышленного шума в условиях сельской местности от частоты для вертикальной антенны представлены на рис. 1. Для галактического шума данные коэффициенты равны $c=52$, $d=23$, а для частот в диапазоне от 0,3 до 250 МГц медианные значения коэффициента промышленного шума AWGN в условиях сельской местности соответственно – $c=53.6$, $d=28.6$.

Для частоты 300 кГц расчетное значение галактических шумов равно $F_g = 64.026$ дБ, а уровень промышленного шума $F_p = 68.554$ дБ. Таким образом приблизительно среднее значение фонового шума для рассматриваемой частоты

можно оценить как $F_{mid} = \frac{F_p + F_g}{2} = 66.29$ дБ.

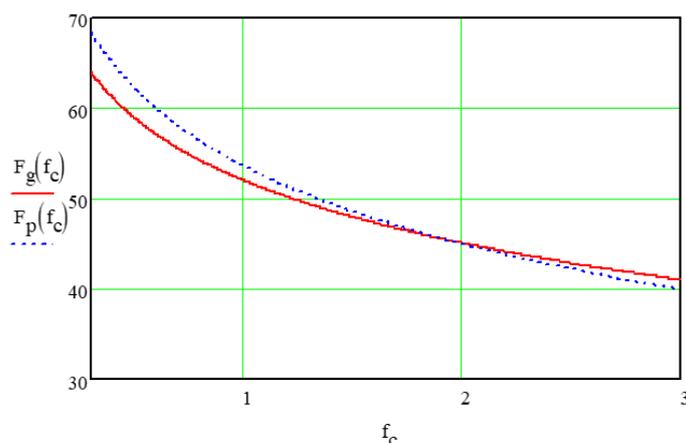


Рис. 1. Графики зависимости галактического шума (красный) и промышленного шума в условиях сельской местности (синий) от частоты для вертикальной антенны.

Аналогичные показатели уровня галактических шумов для 600 кГц составили $F_g = 57.103$ дБ, а промышленного шума соответственно $F_p = 59.945$ дБ.

Таким образом приближенно среднее значение фонового шума для рассматриваемой частоты можно оценить как $F_{mid} = \frac{F_p + F_g}{2} = 58.524$ дБ.

3. Влияние высоты ионосферных слоев

В дневное время волны распространяются по поверхности Земли с учетом ее кривизны (поверхностная волна) на дальность до 300–500 км [6-10]. При этом значительное влияние в ослабление будут вносить электродинамические характеристики подстилающей поверхности. В ночное время (особенно зимой) за счет отражения от ионосферных E и F слоев волны могут распространяться на расстоянии до 2000–3000 км (см. табл.1).

Таблица 1. Оценка влияния шума и непреднамеренных помех.

| Частота, кГц, f | Уровень галактических шумов, дБ, F_g | Уровень промышленных шумов, дБ, F_p | Результирующее значение фонового шума, дБ, F_{mid} |
|-------------------|--|---------------------------------------|--|
| 300 | 64.026 | 68.554 | 66.29 |
| 600 | 57.103 | 59.945 | 58.524 |

Основные характеристики СВ диапазона (диапазон 0,5–1,7 МГц) приведены в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики СВ диапазона (диапазон 0,5–1,7 МГц).

| Параметр | Значение |
|------------------------------|--|
| Частотный диапазон | 300 кГц – 3 МГц (в некоторых странах – до 1705 кГц) |
| Длина волны | 100–1000 метров |
| Ширина одного канала | 9 кГц (в Европе и Азии) / 10 кГц (в США и Канаде) |
| Принцип распространения волн | Поверхностной, ионосферной волной (ночью) |

Оценку эффективности связи необходимо провести в диапазонах частот СВ. Для оценки вероятностно-временных характеристик в первую очередь необходимо оценить энергетические характеристики радиоканала, которые будут определять как вероятностные, так и временные показатели радиоканала.

В диапазонах частот 150 и 1700 кГц для трасс длиной от 50 до 12 000 км прогнозирование напряженности поля пространственной волны проводится в соответствии с Рекомендацией МСЭ-R P.1147-4 [6].

Прогнозируемая величина напряженности поля в ночное время определяется выражением:

$$E = V + E_0 - L_t = V + G_s - L_p + A - 20 \lg p - L_a - L_t - L_r, \quad (6)$$

где

E – годовая медиана получасовых медианных значений напряженности поля (дБ(мкВ/м)) для данной симомотивной силы передатчика, V , в данное время t относительно захода или восхода Солнца, в зависимости от ситуации;

E_0 – годовая медиана получасовых медианных значений напряженности поля (дБ(мкВ/м)) для симомотивной силы передатчика 300 В в эталонное время;

V – симомотивная сила передатчика (в дБ относительно эталонной симомотивной силы 300 В);

G_s – поправка на усиление за счет влияния моря (дБ);

L_p – добавочные потери за счет деполяризации (дБ);

A – константа. На НЧ $A = 110,2$. На СЧ $A = 107$, за исключением трасс распространения, средние точки которых расположены в части Района 3 (Азия, за исключением стран СНГ, Австралия) южнее параллели 11° ю. ш. В этих случаях $A = 110$;

L_a – коэффициент потерь, отражающий влияние ионосферного поглощения и связанных с ним факторов;

L_t – часовой коэффициент потерь (дБ);

L_r – коэффициент потерь, учитывающий влияние солнечной активности.

Симомотивная сила передатчика V (дБ (300 В)) определяется выражением:

$$V = P + G_V + G_H, \quad (7)$$

P – излучаемая мощность (дБ (1 кВт));

G_V – коэффициент усиления передающей антенны (дБ) в вертикальной плоскости;

G_H – коэффициент усиления передающей антенны (дБ) в горизонтальной плоскости. В случае направленной антенны G_H зависит от азимута. Для изотропных антенн $G_H = 0$ дБ;

G_S – поправка на усиление за счет влияния моря (дБ). Коэффициент усиления за счет влияния моря характеризует дополнительное усиление сигнала, когда один или оба терминала располагаются вблизи моря, однако этот коэффициент не учитывается при распространении над пресной водой;

L_p – добавочные потери за счет деполяризации (дБ). характеризует добавочные потери за счет деполяризации (дБ). В диапазоне НЧ $L_p = 0$;

A – константа, которая для диапазона НЧ $A = 110.2$, а для СЧ соответственно $A = 107$ (за исключением трасс распространения, средние точки которых расположены южнее параллели 11° ю. ш. В этих случаях $A = 110$);

L_a – коэффициент потерь, отражающий влияние ионосферного поглощения и связанных с ним факторов;

L_t – часовой коэффициент потерь (дБ);

L_r – коэффициент потерь, учитывающий влияние солнечной активности.

На практике в интересах передачи информации необходимо обеспечить гарантированное доведение сообщений на дальностях до 600 км. Тогда задачу оценки надежности радиоканала СВ диапазона в первом приближении допустимо свести к получению характеристики вероятности битовой ошибки, а ее постановка, с учетом стандартных параметров приемных и передающих РЭС может быть сформулирована следующим образом: «Рассматривается использование диапазона f частот 300-600 кГц для передачи информации с требуемой скоростью $R_b = 4800$ бит/с на расстояния d от 100 до 600 км с мощностью передающего устройства $P_t = 50$ Вт (47 дБм). В качестве

подстилающей поверхности выступает «трава» с электродинамическими параметрами ($\varepsilon_r=12$, $\sigma=0.005$ См/м). Требуемая скорость передачи данных $R_b=19200$ бит/с. Антенны передатчика и приемника с одинаковыми коэффициентами усиления $G_t=G_r=0$ дБ»

Будем использовать следующие типовые параметры приемного устройства:

$T_{шх}=290$ К – шумовая температура приемника,

$k_0=1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана,

$k_{ш}=7$ дБ (5.012) – шумовой коэффициент приемника (шум-фактор),

Характеристики приемной антенны определены следующими параметрами:

$R_{ант}=50$ Ом – сопротивление антенны,

$l_0=1$ м – действующая длина приемной антенны.

Для получения оценок вероятности битовой ошибки BER при доведении сигналов управления рассмотрим две различные задачи:

- 1) Определение ослаблений в радиоканале:
- 2) Определение напряженности помехового поля и мощности помехи в точке приема

4. Задача 1. Определение ослаблений в радиоканале

В теории существует несколько теоретических методов по определению ослаблений в радиоканалах СВ диапазона. Наиболее известными при этом является метод на основе МСЭ Р.368-10 и модель Нортон.

Теоретическая модель расчета ослаблений в радиоканале СВ диапазона Нортон. В диапазоне от 10 кГц до 3 МГц применительно для поверхностной волны часто используют модель оценки ослаблений Нортон. Согласно данной модели потери складываются из составляющих прямого распространения, зависящего от дальности радиолинии, и влияния поверхности:

$$\alpha(f, d, \sigma, \varepsilon_r) = 8.686 \cdot d \cdot R\left(\sqrt{\pi f \mu \varepsilon_0 \left(\varepsilon_r + \frac{j\sigma}{2\pi f \varepsilon_0}\right)}\right), \quad (8)$$

где d – расстояние между передатчиком и приемником (в км),

A – коэффициент ослабления от влияния поверхности, которая зависит от частоты f (в МГц),

ε_r – диэлектрическая проницаемость,

σ (См/м) – электрическая проводимость подстилающей поверхности,

h_t, h_r – высоты антенн передатчика и приемника,

$\alpha(f, d, \sigma, \varepsilon_r)$ – параметр влияния подстилающей поверхности

$$\alpha(f, d, \sigma, \varepsilon_r) = 8.686 \cdot d \cdot R\left(\sqrt{\pi f \mu \varepsilon_0 \left(\varepsilon_r + \frac{j\sigma}{2\pi f \varepsilon_0}\right)}\right) \quad (9)$$

$R(\cdot)$ – действительная часть комплексного числа, полученного в выражении (9),

$\mu \approx \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость,

$\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная,

Тогда в конечном виде выражение (8) примет вид:

$$L_{surf} (dB) = 20 \lg(d) + 8.686 \cdot d \cdot R\left(\sqrt{\pi f \mu \varepsilon_0 \left(\varepsilon_r + \frac{j\sigma}{2\pi f \varepsilon_0}\right)}\right) \quad (10)$$

где $\varepsilon_r + \frac{j\sigma}{2\pi f \varepsilon_0} = \varepsilon_k$ – комплексная диэлектрическая проницаемость, j – мнимая

единица,

$$\varepsilon_r + \frac{j\sigma}{2\pi f \varepsilon_0} = 12 + j \frac{0.005}{2\pi \cdot 0.5 \cdot 10^6 \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} = 12 + j \cdot 179.8,$$

$$\alpha = R\left(\sqrt{\pi f \mu \varepsilon_0 \left(\varepsilon_r + \frac{j\sigma}{2\pi f \varepsilon_0}\right)}\right), \quad (11)$$

$$\sqrt{\pi f \mu \varepsilon_0 \varepsilon_r + j \frac{\mu \sigma}{2}} = \sqrt{(\pi f \mu \varepsilon_0 \varepsilon_r)^2 + \left(\frac{\mu \sigma}{2}\right)^2} \cdot \left(\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + j \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right),$$

$$\theta = \arctg\left(\frac{\sigma}{2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_r}\right),$$

$$\alpha = R\left(\sqrt{\pi \cdot 0.5 \cdot 10^6 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 8.854 \cdot 10^{-12} \cdot (12 + j \cdot 179.8)}\right), \alpha = 3.35 \cdot 10^{-5}.$$

Значение ослаблений L_{surf} (dB):

- для дальности 100 км:

$$L_{surf} = 20 \lg(100) + 8.69 \cdot 3.35 \cdot 10^{-5} \cdot 100 = 40.029 \text{ dB};$$

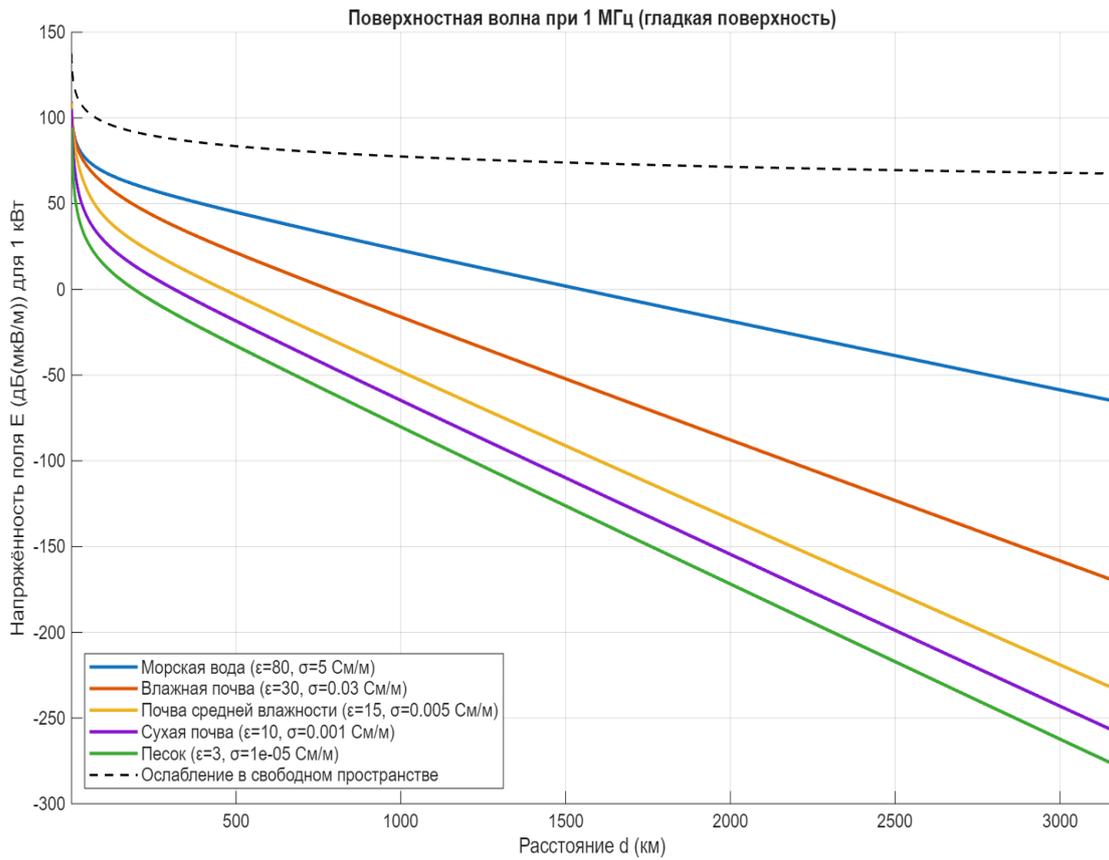
- для дальности 600 км:

$$L_{surf} = 20 \lg(600) + 8.69 \cdot 3.35 \cdot 10^{-5} \cdot 600 = 55.738 \text{ dB}.$$

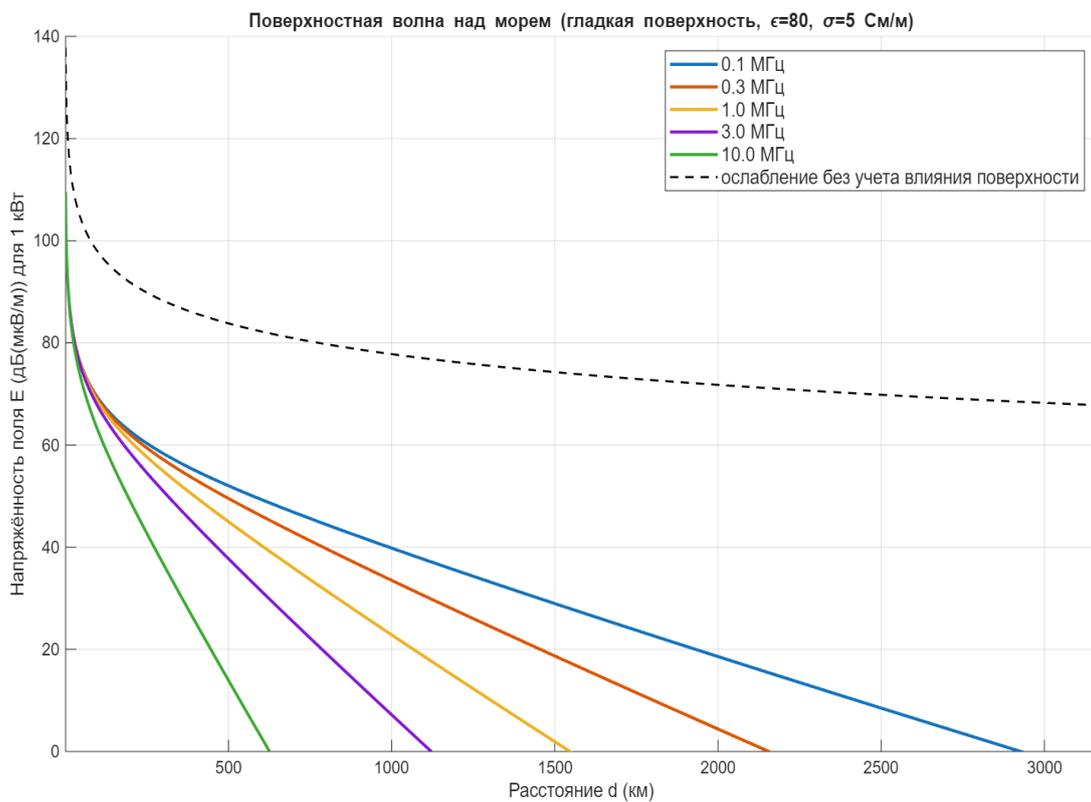
5. Расчет ослаблений на основе метода рекомендации Р.368-10

В случаях, когда $\varepsilon_r \ll 60\lambda\sigma$, использовать методику, представленную в рекомендации R.368-10 [7], возможно для высот расположения передающих и приемных средств не выше, чем $h_{kr} = 1.2\sqrt{\lambda^3\sigma}$. Применительно к условиям данной задачи, действительно, для 600 кГц $\lambda = 500$, $12 \ll 60 \cdot 500 \cdot 0.005 = 150$. Тогда ограничение по высоте составляет $h_{kr} = 948$ м.

Для определения напряженности поля, созданного передатчиком в точке приема, были использованы данные из рекомендации МСЭ-Р Р.368-10 [7]. На приведенном графике рис. 2 а) и б) показаны кривые напряженности поля при распространении поверхностной волной для частоты 60 кГц для различных значений электродинамических характеристик подстилающей поверхности излучателя мощностью 1 кВт.



а)



б)

Рис. 2. Кривые напряженности поля а) для различных типов подстилающей поверхности при частоте сигнала 1 МГц, б) для морской поверхности с учетом различных частот.

С помощью данных кривых для наиболее близких к требуемым значений ($\varepsilon_r=15$, $\sigma=0.001$ См/м) значения напряженности поля для дальности 100 км составило $E_r=69$ дБ(мкВ/м), а для дальности 600 км $E_r=37$ дБ(мкВ/м). Тогда значения ослаблений по полученным значениям E_r можно определить следующим образом:

$$L_b = 142 + 20 \lg(f [\text{МГц}]) - E, \text{ дБ.} \quad (12)$$

Рассчитанные графики зависимости ослаблений для дальности 100 км и 600 км в диапазоне частот 300-600 кГц приведены на рис. 3.

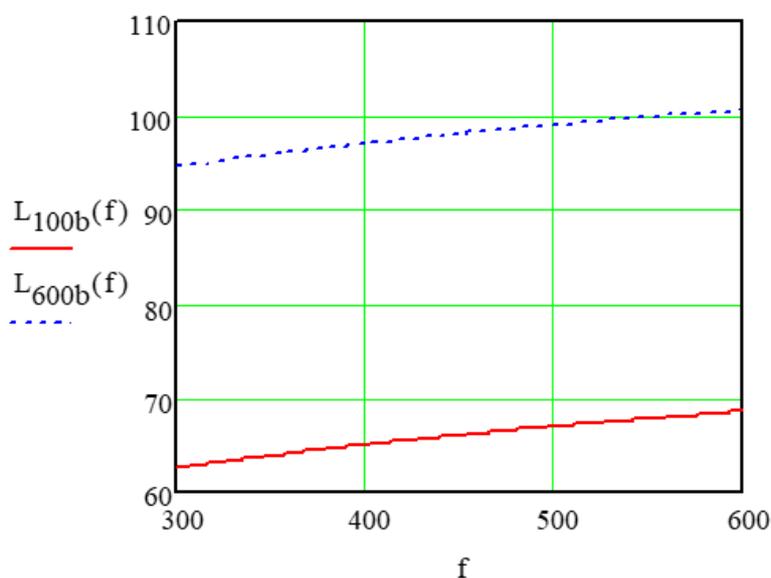


Рис. 3. График зависимости ослаблений для дальности 100 км (красный) и 600 км (синий) в диапазоне частот 300-600 кГц.

Ослабления для частоты 300 кГц:

$$L_{b100} = 62.542 \text{ дБ}, L_{b600} = 94.542 \text{ дБ.}$$

Ослабления для частоты 600 кГц:

$$L_{b100} = 68.563 \text{ дБ}, L_{b600} = 100.563 \text{ дБ.}$$

Полученные теоретические значения ослаблений согласно описанного метода и модели имеют значительные расхождения (порядка 50 дБ). Поэтому для дальнейшей оценки ослаблений в качестве основного метода была выбрана ITU R.368-10, поскольку данный метод основан на основе эмпирических измерений.

6. Задача 2. Определение напряженности помехового поля и мощности помехи в точке приема

Получить значение напряженности помехового поля E_s в точке приема можно согласно выражению:

$$E_s \left[\frac{\text{В}}{\text{М}} \right] = 10^{0.05 \cdot E_{\text{stray}} \left[\text{дБ} \left(\frac{\text{мкВ}}{\text{М}} \right) \right]} \cdot 10^{-6}, \text{ В / м.} \quad (13)$$

Напряженности помехового поля для частоты 300 кГц:

$$E_{s300} \left[\frac{\text{В}}{\text{М}} \right] = 10^{0.05 \cdot 37} \cdot 10^{-6} = 7.0795 \cdot 10^{-5},$$

для частоты 600 кГц:

$$E_{s600} \left[\frac{\text{В}}{\text{М}} \right] = 10^{0.05 \cdot 69.1} \cdot 10^{-6} = 2.851 \cdot 10^{-3}.$$

Электродвижущая сила (ЭДС), наводимая принимаемым радиосигналом на входе антенны, определяется следующим образом:

$$U_s = E_s \cdot l_o. \quad (14)$$

Тогда ЭДС для частоты 300 кГц:

$$U_{s300} [\text{В}] = 7.0795 \cdot 10^{-5} \cdot 1 = 7.0795 \cdot 10^{-5},$$

для частоты 600 кГц:

$$U_{s600} [\text{В}] = 2.818 \cdot 10^{-3} \cdot 1 = 2.851 \cdot 10^{-3}$$

Значение мощности помехи N_s с учетом параметров антенны l_o и $R_{\text{ант}}$ и ее согласованности можно получить согласно выражения

$$N_s [\text{Вт}] = \frac{U_s^2}{4 \cdot R_{\text{ант}}}, \quad (15)$$

В логарифмических единицах значение мощности помехи:

$$N_s [\text{дБм}] = 10 \lg(N_s [\text{Вт}]) - 30. \quad (16)$$

Зависимость мощности помехи от частоты представлена на рис. 4. Для частоты 300 кГц значение мощности помехи составит:

$$N_{s300} [\text{дБм}] = 10 \lg \left(\frac{(7.0795 \cdot 10^{-5})^2}{4 \cdot 50} \right) - 30 = -136.01,$$

для частоты 600 кГц:

$$N_{s600} [\text{дБм}] = 10 \lg \left(\frac{(2.851 \cdot 10^{-3})^2}{4 \cdot 50} \right) - 30 = -103.91$$

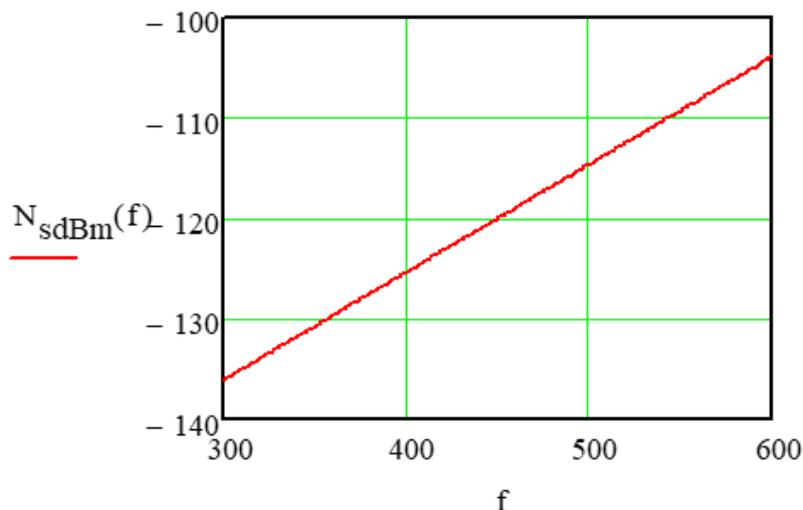


Рис. 4. Распределение мощности помехи в полосе 300–600 кГц, дБм.

7. Расчет BER

Мощность сигнала в точке приема с учетом полученных ослаблений равна:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_{surf}. \quad (17)$$

Для дальности 100 км:

$$P_{r100} [\text{дБм}] = 47 \text{ дБм} + 0 + 0 - 62.542 \text{ дБ} = -21.5 \text{ дБм},$$

$$P_{r100} = 10^{0.1(-20-30)} = 6.962 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}.$$

Для дальности 600 км:

$$P_{r600} [\text{дБм}] = 47 \text{ дБм} + 0 + 0 - 99 \text{ дБ} = -53.573 \text{ дБм},$$

$$P_{r600} = 10^{0.1(-20-30)} = 4.392 \cdot 10^{-9} \text{ Вт}.$$

Тогда, энергия на бит с учетом требуемой скорости передачи информации:

$$E_b = \frac{P_r}{R_b}, \text{ Дж}.$$

Для дальности 100 км:

$$E_{b100} = \frac{6.962 \cdot 10^{-6}}{4800} = 1.45 \cdot 10^{-9}.$$

Для дальности 600 км:

$$E_{b600} = \frac{4.392 \cdot 10^{-9}}{4800} = 9.15 \cdot 10^{-13}.$$

Спектральная плотность мощности шума N_0 определяется характеристиками приемника с учетом шумовой температуры, и равна:

$$N_0 = k_{ш} k_0 T_{ш} = 2.0058 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}.$$

Согласно табл.1 для частот 300 кГц и 600 кГц рассчитанные ранее фоновые шумы F_{mid} характеризуют превышение относительно собственных шумов. Тогда суммарные показатели плотности мощности шумов N_{Σ} для частот 300 кГц и 600 кГц равны:

$$N_{\Sigma 600} = 2.0058 \cdot 10^{-20} \cdot (1 + 10|0.1 \cdot F_{mid}|) = 1.428 \cdot 10^{-14} \text{ Вт/Гц},$$

$$N_{\Sigma 300} = 2.0058 \cdot 10^{-20} \cdot (1 + 10|0.1 \cdot F_{mid}|) = 8.537 \cdot 10^{-14} \text{ Вт/Гц}.$$

В условиях рассматриваемой задачи показатель отношения сигнал-шум определяется как $h^2 = \frac{E_b}{N_{\Sigma}}$, тогда для требуемых соответствующих дальностей

100 км и 600 км и частот 300 кГц и 600 кГц получим:

- для 100 км и 300 кГц

$$\frac{E_{b100}}{N_{\Sigma 300} + N_{s300}} = \frac{1.45 \cdot 10^{-9}}{8.537 \cdot 10^{-14} + 2.506 \cdot 10^{-11}} = 115.544 (20.627 \text{ дБ});$$

- для 100 км и 600 кГц

$$\frac{E_{b100}}{N_{\Sigma 600} + N_{s600}} = \frac{1.45 \cdot 10^{-9}}{1.428 \cdot 10^{-14} + 3.972 \cdot 10^{-8}} = 0.018 (-17.387 \text{ дБ});$$

- для 600 км и 300 кГц

$$\frac{E_{b600}}{N_{\Sigma 300} + N_{s300}} = \frac{9.15 \cdot 10^{-13}}{8.537 \cdot 10^{-14} + 2.506 \cdot 10^{-11}} = 0.073 (-11.373 \text{ дБ});$$

- для 600 км и 600 кГц

$$\frac{E_{b600}}{N_{\Sigma 600} + N_{s600}} = \frac{9.15 \cdot 10^{-13}}{1.428 \cdot 10^{-14} + 3.972 \cdot 10^{-8}} = 1.126 \cdot 10^{-5} (-49.486 \text{ дБ}).$$

Вероятность битовой ошибки для двоичных сигналов при когерентном приеме определяется согласно выражению:

$$P_{ош} = 1 - F(h), \quad (18)$$

где $F(h)$ – интеграл вероятности

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-z^2/2} dz; \quad (19)$$

$$h = \sqrt{\frac{E_s}{N} (1 - \rho)}; \quad (20)$$

ρ – коэффициент корреляции двоичных сигналов, для противоположных сигналов $\rho = -1$, для ортогональных $\rho = 0$;

$E_s = P_r T_s G_r$ – энергия принимаемого сигнала,

G_r – коэффициент усиления приемной антенны,

P_r – мощность сигнала в точке приема, Вт.

С другой стороны, для когерентного приема сигнала *BPSK* значение BER рассчитывают с использованием интеграла вероятности ошибки:

$$P_{b_{BPSK}} = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_{\Sigma}}}\right) \quad (21)$$

где $Q(x) = 1 - F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt$ – Гауссов интеграл ошибок.

Для используемой в существующих радиоканалах некогерентного двоичного сигнала *MFSK* значение BER определяется из выражения:

$$P_{b_{MFSK}} = \frac{1}{2} e^{-\frac{E_b}{N_{\Sigma}}}. \quad (22)$$

На рис. 5 а) и б) приведено сравнение полученных значений BER для *MFSK* и *BPSK* с пороговым значением вероятности битовой ошибки $P_b \leq 5 \cdot 10^{-2}$.

С учетом приведенных выше расчетов для 100 км и 300 кГц вероятности битовой ошибки равны:

$$P_{b_{MFSK100}} = \frac{1}{2} e^{-9.537 \cdot 10^3} \approx 0, P_{b_{MFSK600}} = \frac{1}{2} e^{-239.551} \approx 0, P_{b_{BPSK}} = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_\Sigma}}\right) = 0$$

Значения вероятностей ошибок для дальностей 100 км и 600 кГц составят:

$$P_{b_{MFSK}} = 0.496, P_{b_{BPSK}} = 0.425;$$

для дальностей 600 км и 300 кГц:

$$P_{b_{MFSK}} = 0.482, P_{b_{BPSK}} = 0.351;$$

для дальностей 300 км и 600 кГц:

$$P_{b_{MFSK}} = 0.5, P_{b_{BPSK}} = 0.498.$$

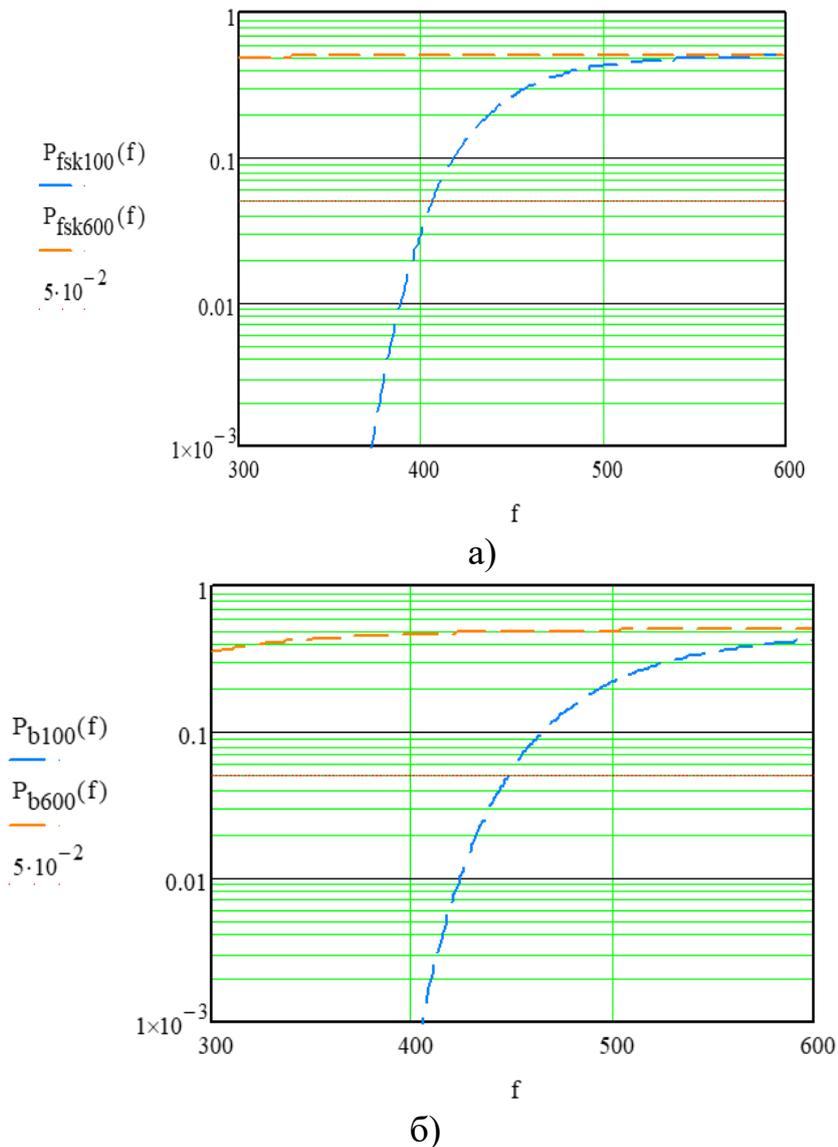


Рис. 5. График зависимости BER от частоты в диапазоне 300–600 а) для некогерентной MFSK, б) для когерентной BPSK.

8. Информационная оценка эффективности

В соответствии с (1) – (4) для энтропии покрытия оценки вероятности ошибки будет определяться следующим образом:

$$H_{ош} = \ln \Pi_{ош}, \quad (23)$$

$$\Pi_{ош} = \begin{cases} \frac{P_{ош}}{P_{ошн}} = \frac{1 - P_{д}}{1 - P_{дн}}, P_{ош} > P_{ошн}, \\ 1, P_{ош} \leq P_{ошн} \end{cases}, \quad (24)$$

где $P_{ош}$ – реальное значение вероятности ошибки, $P_{ошн}$ – нормативное значение вероятности ошибки, $P_{д}$ и $P_{дн}$ – реальное и нормативное значения вероятности правильного приема соответственно.

Для корректного расчета вероятностно-временных характеристик передачи данных следует учитывать возможность повтора в случае ошибочного приема. Тогда энтропия покрытия временных характеристик будет определяться следующим образом:

$$H_t = \sum_{i=1}^m \ln \left[\frac{T_i}{T_d} (1 + P_{ош} (g - 1)) \right], \quad (25)$$

где

$$T_i = T_s + T_{ir} + T_{iK}; \quad (26)$$

T_s, T_r, T_K – длительность сигнала, время распространения сигнала и аппаратная задержка соответственно;

m – количество каналов прохождения сигнала от источника до получателя.

g – фактор ошибочной передачи, зависящий от системы связи. Для системы связи, работающей при обнаружении ошибки по принципу передача-квитирование-повтор, значение $g = 3$;

$$T_d = \frac{d}{c} + T_s, \quad (27)$$

d – дальность канала.

$c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость распространения радиоволн.

Рассмотрим пример: канал связи Мурманска и Петропавловска-Камчатского – портов на СМП – с центром в Москве для каналов КВ.

Расчет радиолинии для КВ-канала проводился с использованием программного продукта VOACAP version 12.0326W для следующих исходных данных: активность солнца высокая, соответствующая 80 солнечных пятен, несущая частота 3 МГц, антенна Яги с коэффициентом усиления 8,1 дБи, мощность передатчика 5 кВт. Значения отношения сигнал/шум представлены в табл. 1 и 2. Значение времени соответствует стандарту UTC.

Параметры радиосигнала: когерентный шумоподобный сигнал с модуляцией ФМ₂. Длительность символа $\tau_u = 1$ мс, полоса пропускания $\Delta f = \frac{1}{\tau_u} = 1$ кГц. Коэффициент корреляции противоположных сигналов равен минус 1.

Тогда для радиолинии Мурманск – Москва вероятность ошибки будет меняться от практического нуля до $2,36 \cdot 10^{-3}$. А для радиолинии Петропавловск-Камчатский – Москва значения вероятности ошибки сильно зависят от времени суток и от сезона. Проведем расчет энтропии покрытия для этих радиолиний в соответствии с выражениями (23) – (27).

Энтропия покрытия для радиолинии Мурманск – Москва будет меняться от 0 до 17,8 децинат. Энтропия покрытия для радиолинии Петропавловск-Камчатский – Москва будет меняться от 0 до 62,1 децинат.

В качестве приемной антенны может быть использована рамочная антенна (рис. 6) малого сопротивления, которая представляет собой проводник, свернутый в один или несколько витков [11, 12].



Рис. 6. Рамочная антенна СВ диапазона.

При малом размере рамки относительно длины волны ($(P \ll \lambda)$) она работает как магнитный диполь. Для рамки площадью (S), имеющей (N) витков и средний радиус (r_{cp}), электрическая длина (l_3) определяется выражением:

$$l_3 = \frac{2\pi SN}{\lambda r_{cp}}. \quad (28)$$

Для принимаемого сигнала частотой 1 МГц, площадью рамки $S=0,03 \text{ м}^2$, $N=70$, $r_{cp}=0,1$ получим:

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{10^6} = 300 \text{ м}, \quad l_3 = \frac{2\pi \cdot 0,03 \cdot 70}{300 \cdot 0,1} \approx 0,044 \text{ м}.$$

Заключение

Поскольку максимальные значения энтропии покрытия для радиолинии Мурманск – Москва практически круглый год значительно ниже, чем для радиолинии Петропавловск-Камчатский – Москва, то информационная эффективность радиолинии Мурманск – Москва очень высокая по сравнению с радиолинией Петропавловск-Камчатский – Москва.

Подобным образом можно оценивать информационную эффективность не только одноступенчатых, но и многоступенчатых радиоканалов с различными условиями распространения радиоволн.

Результаты расчетов показали, что достоверная передача формализованных сообщений в условиях преднамеренных помех обеспечивается только для 100 км при частоте сигнала 300 кГц для рассмотренных модуляций. Средневолновый диапазон (300–600 кГц) является наиболее надежным и экономически оправданным решением для обеспечения:

- управления ледокольными операциями;
- гарантированной передачи команд и формализованных сообщений;
- аварийно-спасательной связи;
- резервирования спутниковых и КВ-каналов.

Модернизация береговой инфраструктуры СВ-связи и оснащение судов соответствующей аппаратурой должны быть признаны приоритетной задачей государственной программы развития Арктики и СМП в интересах национальной безопасности и экономики Российской Федерации.

Для покрытия всей трассы СМП (≈ 6000 км) требуется 12–15 береговых центров СВ-связи на 2–3 фиксированных частотах. Стоимость развертывания и эксплуатации на порядок ниже, чем строительство новых спутниковых группировок или подводного ВОЛС в условиях вечной мерзлоты.

Настоящее исследование подтверждает, что средневолновая (СВ) радиосвязь, особенно в поддиапазоне 300–600 кГц, является надежным и экономически эффективным решением для Северного морского пути (СМП). Основные выводы:

Стабильное распространение сигнала: СВ-сигналы обеспечивают устойчивое покрытие на расстояниях 100–600 км с минимальной зависимостью от ионосферных условий, в отличие от КВ-систем.

Низкая вероятность ошибки и высокое SNR. На частоте 300 кГц и дальности 100 км BER достигает 10^{-6} (BPSK), что гарантирует надежную передачу данных для критических операций.

Экономическая целесообразность: Развертывание 12–15 береговых станций СВ-связи вдоль СМП значительно дешевле, чем создание спутниковых

группировок или прокладка оптоволоконных линий в условиях вечной мерзлоты.

Стратегическая значимость: СВ-системы поддерживают управление ледоколами, аварийную связь и резервирование спутниковых и КВ-каналов, повышая безопасность и надежность СМП.

Эти результаты подчеркивают необходимость приоритетной модернизации инфраструктуры СВ-связи в рамках стратегии развития Арктики. Дальнейшие исследования должны быть направлены на изучение адаптивных методов модуляции и конструкций антенн для оптимизации СВ-связи в высокоширотных условиях.

При выборе диапазонов радиочастот необходимо учитывать требования, приведенные в Таблице распределения полос радиочастот между радиослужбами Российской Федерации [13]. Рассматриваемой в настоящей статье радиослужбой является морская подвижная. Для передачи может использоваться диапазон 415-526,5 кГц.

Использование полос радиочастот 415 – 495 кГц и 505 – 526,5 кГц морской подвижной службой ограничивается радиотелеграфией.

Финансирование: Публикация выполнена в рамках НИР НИЦ «Курчатовский институт» – НИИСИ по теме № FNEF-2024-0003 «Методы разработки аппаратно-программных платформ на основе защищенных и устойчивых к сбоям систем на кристалле и сопроцессоров искусственного интеллекта и обработки сигналов»

Литература

1. Сухов А.В., Федоров Р.Н. Информационный анализ эффективности связи на северном морском пути. // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2024. № 2 (77). С. 59-67.
2. Сухов А.В., Зайцев М.А. Информационная оценка влияния перспективных радиотехнологий на развитие инфраструктуры сложных технических систем // Правовая информатика. 2020. № 3. С. 40-52.

3. Сухов А.В. Оценка информационного ресурса радионавигационных станций в условиях помех от средств мобильной связи // Правовая информатика. 2019. № 1. С. 36-45.
4. Sukhov A.V. Dynamics of information flows in a control system of a complex technological system // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2000. Т. 39. № 4. С. 592-600.
5. Рекомендация МСЭ-R P.372-16. Радиошум.
6. Рекомендация МСЭ-R P.1147-4. Прогнозирование напряженности поля пространственной волны на частотах между приблизительно 150 и 1700 кГц.
7. Рекомендация МСЭ-R P.368-10. Ground-wave propagation curves for frequencies between 10 kHz and 30 MHz. – Geneva: ITU, 2022.
8. Багдасаров, Г.А. Теория радиоволн и распространение вблизи поверхности Земли. – М.: Радио и связь, 1982. – 304 с.
9. Hehenkamp N., et al. Characterization of Ground-Wave and Sky-Wave Propagation Delays for MF R-Mode Navigation. – Sensors, 2024, 24(8): 3356.
10. Michalski K.A., Mosig J.R. Overview of the Near-Ground Propagation Mechanisms in Wireless Communication: Is the Norton Surface Wave Significant? – EURAAP, 2022. – 12 p.
11. Краус Дж.Д. Антенны. – М.: Мир, 1970. – 688 с
12. Знаменский, В.В., Сеницын, С.Ю. Антенны и устройства СВ и ДВ диапазонов. – М.: Радио и связь, 1988. – 312 с.
13. Таблица распределения полос радиочастот между радиослужбами Российской Федерации (с изменениями на 30 января 2024 года). Утверждена Постановлением Правительства Российской Федерации от 18 сентября 2019 года № 1203-47.

Для цитирования:

Сухов А.В., Филатов В.И., Генов А.А. Оценка энергетических характеристик радиоканала передачи информации средневолнового диапазона в интересах организации сообщений в северных широтах // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.2.14>