

# ИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЯЗИ НА СЕВЕРНОМ МОРСКОМ ПУТИ

**Сухов А.В.**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры Московского авиационного института, главный специалист Российского института стандартизации

**Федоров Р.Н.**, соискатель Российского института стандартизации

*Рассматривается информационный подход к анализу эффективности систем передачи информации в Арктической зоне и, в том числе, обеспечивающих связь на Северном морском пути. Развитие инфраструктуры в Арктической зоне непосредственно зависит от гидрометеорологических условий в регионе, что обуславливает необходимость постоянного мониторинга данных условий и выработки необходимых прогнозов. Решение данной задачи может быть решено за счет создания гидрометеорологического комплекса наблюдений за состоянием окружающей среды в Арктической зоне Российской Федерации. В этих целях рассматривается организация каналов передачи информации, их технические показатели эффективности. Затем рассматривается отображение предметной области технических показателей в информационную с применением энтропии покрытия. Информационная область позволяет с единых целевых позиций оценивать эффективность системы передачи информации в целом, а также решать задачи мониторинга и оптимизации таких систем. Обратное отображение информационного пространства в предметную область позволяет оптимизировать технические показатели и характеристики систем.*

**Ключевые слова:** Северный морской путь, система связи, канал передачи информации, энтропия покрытия.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ввиду сложной политической обстановки в мире большое внимание уделяется освоению Арктики, в том числе развитию Северного морского пути. Развитие инфраструктуры в Арктической зоне непосредственно зависит от гидрометеорологических условий в регионе, что обуславливает необходимость постоянного мониторинга данных условий и выработки необходимых прогнозов.

Решение данной задачи может быть решено за счет создания гидрометеорологического комплекса наблюдений (ГМКН) за состоянием окружающей среды в Арктической зоне Российской Федерации. А для обеспечения целеуказаний по управлению комплексом наблюдений и для передачи необходимой измерительной информации в центры сбора необходима организация каналов информационного обмена – каналов передачи информации (КПИ), каналов связи.

В состав ГМКН могут входить: автономные гидрометеорологические буи; корабельные гидрометеорологические станции; комплексы радиоэлектронного оборудования для мониторинга геофизической обстановки в Арктической зоне.

Оценить качество функционирования позволяет отображение функционирования системы управления ГМКН

из предметной области отношений в информационное пространство, основанное на энтропии покрытия.

Вопросам оценки эффективности радиотехнических комплексов с использованием информационного подхода, основанного на энтропии покрытия, посвящен ряд работ [1– 4]. В этих работах показано, как с единых целевых позиций решать различные оптимизационные задачи для радиотехнических комплексов.

Информационная область позволяет с единых целевых позиций оценивать эффективность системы управления ГМКН в целом, а также решать задачи мониторинга и оптимизации. Обратное отображение информационного пространства в предметную область позволяет оптимизировать технические показатели и характеристики систем. Методические основы использования энтропии покрытия при информационном отображении предметной области в информационное пространство представлены в работе [5, 6].

## ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПО РАЗМЕЩЕНИЮ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА СЕВЕРНОМ МОРСКОМ ПУТИ

В Морской доктрине Российской Федерации [7] одной из центральных задач морской политики на Арктическом

направлении является обеспечение национальных интересов России в отношении Северного морского пути (СМП), представленного на рис. 1 [8]. В тексте Морской доктрины Российской Федерации указывается: «Национальными интересами Российской Федерации в Мировом океане являются: ...развитие Северного морского пути в качестве национальной транспортной коммуникации, конкурентоспособной на мировом рынке».

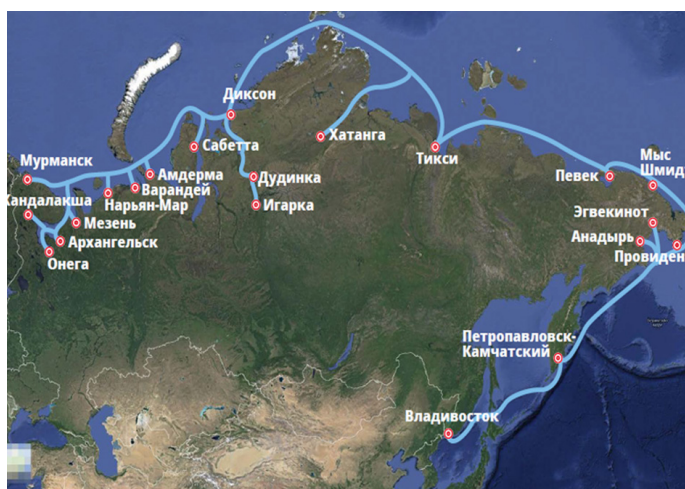


Рис. 1. Северный морской путь

Но обеспечение эффективного функционирования системы морского транспорта в Арктике невозможно без организации надежной радиосвязи в Арктической зоне Российской Федерации [8].

В систему морской радиосвязи наряду с каналами информационного обмена входит также Глобальная морская система связи при бедствии для обеспечения безопасности (ГМССБ), которая обеспечивает информационное взаимодействие судов между собой и с береговыми спасательно-координационными центрами в случае бедствия, для организации поиска и спасания судов и людей на море, а также для обеспечения судов информацией по безопасности мореплавания и служебной связи.

Важными элементами системы связи являются система спутниковой связи INMARSAT (спутниковая группировка на геостационарных орбитах, диапазон 6425–6443 МГц для передачи сигналов на спутник и диапазон 3600–3623 МГц для приема сигналов от спутника), система наземной радиосвязи Морской подвижной службы в диапазонах, средних (СВ), коротких (КВ) и ультракоротких (УКВ) волн, к которой относится в первую очередь система передачи навигационных и метеорологических извещений, предупреждений и другой срочной информации в режиме узкополосной буквопечатающей связи NAVTEX диапазон СВ 518 кГц (на английском языке), в дополнение к этой частоте может использоваться частота 490 кГц для передачи сообщений на национальных языках.

УКВ приемопередатчики, предназначенные для морского использования, работают в диапазоне между 156 МГц и 174 МГц в зоне прямой радиовидимости. В этом диапазоне находится 57 частот, назначение и цель использования каждой из них определено Международными правилами.

Спутниковые системы связи обеспечивают покрытие всей территории земного шара. В морской подвижной службе система спутниковой связи ИНМАРСАТ имеет зону охвата между 70 градусом северной широты и 70 градусом южной широты.

Влияние аврорального поглощения на условия распространения радиоволн диапазона КВ зависит от географического района радиотрассы. Возможны три сценария прохождения радиоволн:

- для трасс, которые целиком проходят внутри полярной шапки и не пересекают авроральный овал, авроральное поглощение практически отсутствует и надежность связи определяется поглощением полярной шапки;
- для трасс, у которых хотя бы один из конечных пунктов расположен в зоне аврорального овала, наиболее вероятно нарушение прохождения радиоволн, ослабление сигналов может достигать 30–60 дБ в зависимости от частоты излучения;
- для трасс, пересекающих авроральный овал, когда передающий и приемные пункты расположены относительно далеко от него, условия радиосвязи более благоприятные, чем во втором случае.

Необходимо отметить, что полярные явления наряду с нерегулярным авроральным поглощением создают и спорадические слои Es, так же носящие случайный характер и наблюдающиеся на высотах (80–110 км) для E-области и связанные с высыпанием электронов с энергией 1–10 кэВ, максимальная концентрация электронов в нем сравнима с электронной концентрацией в слое F2 (высоты 220–280 км, летом – до 320 км)<sup>1</sup>. Такая ситуация способствует образованию волноводных каналов между слоями Es и F, попадая в который радиоволна перескакивает зону аврорального поглощения.

Арктическая Зона Российской Федерации по классификации ГМССБ относится к морскому району A4, организация устойчивой радиосвязи в котором наиболее сложна. Поэтому, типовые решения, применяемые в ГМССБ, не обеспечивают гарантированную доставку информации по всей акватории Северного морского пути. Экономически наиболее оправданным и практически наиболее просто реализуемым решением является использование радиосвязи морской подвижной службы в полосе частот 415–535 кГц (СВ-диапазон) и 1605–4000 кГц (КВ диапазон), на новом

<sup>1</sup> Принято различать четыре области ионизации: D, E, F1, F2 // Ионосфера. – URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/> (дата обращения 25.02.2024).

техническом уровне с использованием укороченных резонансных антенно-фидерных устройств и принципов цифровой радиосвязи.

## ОТОБРАЖЕНИЕ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ СИСТЕМЫ СВЯЗИ В ИНФОРМАЦИОННОЕ ПРОСТРАНСТВО

Основными параметрами системы связи являются параметры каналов информационного обмена, их вероятностно-временные характеристики. Эти характеристики в первую очередь определяются физическими особенностями КПИ – диапазоном частот, дальностью организации связи, особенностями сигнально-кодовых конструкций.

Поэтому 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.

При решении задачи информационного анализа эффективности связи в качестве информационной меры удобно использовать энтропию покрытия [5], учитывающую как количественную, так и качественную стороны информации:

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

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

Принципы цели и оптимальности находят свое отражение в целевом функционале, для которого предложено универсальное применение энтропии покрытия [5]:

$$F = T(H_n(R, t_n), H_n(R, t_k)) + \int_{t_n}^{t_k} J(u, R, t), h_n(R, t) dt \rightarrow \min_u \quad (2)$$

где  $T(\cdot)$  – терминант функционала;  $H_n(\cdot)$  – начальная энтропия покрытия;  $H_k(\cdot)$  – конечная энтропия покрытия;  $R$  – вектор обобщенных технических показателей системы связи;  $t_n, t_k$  – начальное и конечное время информационного обмена;  $J(\cdot)$  – интегрант функционала;  $u(\cdot)$  – функция управления ресурсами;  $h_n(\cdot)$  – текущая энтропия покрытия, которую доопределим как энтропию покрытия на бесконечно малом приращении [10]:

$$h_n(t) = \frac{dH_n(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{H_n(t + \Delta t) - H_n(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left[ \log \left( \frac{\|(R_p(t + \Delta t) \setminus R_n(t + \Delta t)) \cup R_n(t + \Delta t)\|}{\|R_n(t + \Delta t)\|} \right) - \log \left( \frac{\|(R_p(t) \setminus R_n(t)) \cup R_n(t)\|}{\|R_n(t)\|} \right) \right] / \Delta t. \quad (3)$$

Терминант зависит от энтропии покрытия в начале и на завершающей временной части процесса, поэтому он имеет вид:

$$T(H_n(R, t_n), H_n(R, t_k)) = H_n(R, t_n) - H_n(R, t_k) = -I_{пф}, \quad (4)$$

где  $I_{пф}$  – финальная информация покрытия за сеанс информационного обмена.

Принцип сложности 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 [5]:

$$H(T_C, P_C) = H(T_C) + H(P_C). \quad (5)$$

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЯЗИ НА СЕВЕРНОМ МОРСКОГО ПУТИ

Оценку эффективности связи на СМП необходимо провести в диапазонах частот СВ, КВ, УКВ. 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 [11].

Прогнозируемая величина напряженности поля в ночное время определяется выражением:

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

где  $E$  – годовая медиана получасовых медианных значений напряженности поля (дБ(мкВ/м)) для данной симомотивной<sup>2</sup> 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. Эталонным считается время через шесть часов после захода Солнца в точке  $S$  на земной поверхности. Если длина трассы не превышает 2000 км, то точка  $S$  находится в ее середине. На более протяженных трассах  $S$  располагается на расстоянии 750 км по дуге большого круга от терминала с более поздним заходом Солнца;

$V$  – симомотивная сила передатчика (в дБ относительно эталонной симомотивной силы 300 В). Симомотивная сила передатчика  $V$  (дБ(300 В)) определяется выражением:

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

где  $P$  – 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 всенаправленных антенн  $G_H = 0$ ;  $G_S$  – поправка на усиление за счет влияния моря (дБ), который 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, характеризует добавочные потери за счет деполяризации (дБ), (в диапазоне НЧ  $L_p = 0$ );  $A$  – константа, (для диапазона НЧ  $A = 110,2$ , для диапазона СЧ  $A = 107$ , за исключением трасс распространения, средние точки которых расположены в части Района 3 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.

В диапазоне КВ для расчета энергетики КПИ следует использовать Рекомендацию МСЭ-R P.368–10 [13]. Метод прогнозирования, приведенный в Рекомендации, можно применять при следующих условиях:

- гладкая однородная сферическая Земля;
- частоты между 10 кГц и 30 МГц;
- в тропосфере, предполагая, что индекс рефракции уменьшается с высотой линейно;

- передающая и приемная антенны расположены на поверхности и около поверхности Земли;
- излучающим элементом является короткий вертикальный несимметричный вибратор, который находится на поверхности Земли, уподобляемой идеально проводящей плоскости, и который излучает мощность 1 кВт, и напряженность поля на расстоянии 1 км составляет 300 мВ/м, что соответствует величине симомотивной силы 300 В (см. Рекомендацию МСЭ R P.525), (см. табл. 1 в Рекомендации МСЭ-R P.341, чтобы определить напряженность поля для других эталонных антенн);
- расстояние между передатчиком и приемником равно расстоянию по большому кругу;
- методы прогнозирования обеспечивают вертикальную составляющую напряженности излучаемого поля, которую будет измеряться в дальней зоне антенны.

Основные потери передачи, соответствующие тем же условиям, для которых были рассчитаны кривые в Рекомендации МСЭ-R P.368–10, возможно получить из значений напряженности поля  $E$  (дБ(мкВ/м)) с помощью следующего уравнения:

$$L_b = A_i = 142,0 + 20 \log_{10} f_{\text{МГц}} - E, \text{ дБ.} \quad (8)$$

Влияние окружающей среды как на передающую, так и на приемную антенны рассматривается в Рекомендации МСЭ-R P.341.

В тех случаях, когда расстояние между местоположениями намного меньше расстояния до передатчика, реальные электрические характеристики почвы и условия приема не будут одинаковыми. Во многих случаях разница уровней сигнала в расположенных поблизости местоположениях соответствует логарифмически нормальному распределению со стандартным отклонением в пределах 3–4 дБ; усредненное значение составляет приблизительно 3,5 дБ.

Напряженность поля земной волны может меняться в зависимости от сезонных температур. Среднегодовая разность между зимними и летними месячными медианными уровнями напряженности поля на частотах 500–1000 кГц меняется в пределах от 5 дБ (когда средняя температура января для северного полушария составляет +4°) до 15 дБ (когда средняя температура января для северного полушария составляет –16°). Сезонные изменения также наблюдались на частотах между 150 и 280 кГц в континентальной Европе. Такие изменения на частотах между 150 и 280 кГц однообразно увеличиваются в зависимости от частоты и расстояния; они могут достигать 10–20 дБ на расстояниях 1000–2000 км (см. также Рекомендацию МСЭ-R P.1321).

Этот метод обеспечивает значение общей напряженности поля на расстоянии  $r$  с погрешностью менее 1 дБ, когда  $kr$  превышает величину, примерно равную 10, где  $k = 2\pi/\lambda$ .

<sup>2</sup> Симомотивная сила в литературе еще трактуется, как магнитодвижущая сила, определяемая, как произведение напряженности поля на расстояние от передающей антенны [12].



Влияние ближнего поля (то есть поля индукции и статического поля) можно учесть, если увеличить напряженность поля (в децибелах) на величину:

$$10 \log_{10} \left\{ 1 - \frac{1}{(kr)^2} + \frac{1}{(kr)^4} \right\}$$

При этом можно получить общее поле с точностью  $\pm 0,1$  дБ для моря и влажной почвы и с точностью  $\pm 1$  дБ для почвы с любой проводимостью, превышающей  $10^{-3}$  См/м.

Для любой антенны, если место ее расположения превышает по высоте среднее возвышение местности на трассе между антеннами, эффективной высотой антенны является высота антенны относительно среднего возвышения местности на трассе.

В диапазонах УКВ прогнозирование напряженности поля пространственной волны проводится в соответствии с Рекомендацией МСЭ-R P.525-4 Расчет ослабления в свободном пространстве [14]. В этом диапазоне организуется связь со спутниками.

Для линии связи пункта с пунктом ослабление в свободном пространстве между изотропными антеннами, называемое также основными потерями передачи в свободном пространстве (обозначения  $L_{bf}$  или  $A_{bf}$ ), целесообразно рассчитывать следующим образом:

$$L_{bf} = 32,4 + 20 \log f + 20 \log d, \quad \text{дБ}, \quad (9)$$

где  $f$  – частота (МГц);  $d$  – расстояние (км).

На основе распространения радиоволн в свободном пространстве можно использовать следующие формулы перевода:

- напряженность поля при заданной изотропно излучаемой мощности передатчика:

$$E = P_t - 20 \log d + 74,8; \quad (10)$$

- имеющаяся мощность, подводимая посредством сопряженно-согласованной изотропной антенны приемника при заданной напряженности поля:

$$P_r = E - 20 \log f - 167,2; \quad (11)$$

- основные потери передачи в свободном пространстве при заданной изотропно излучаемой мощности передатчика и напряженности поля:

$$L_{bf} = P_t - E + 20 \log f + 167,2; \quad (12)$$

- плотность потока мощности при заданной напряженности поля:

$$S = E - 145,8, \quad (13)$$

где

$P_t$  – изотропно излучаемая мощность передатчика (дБ(Вт));

$P_r$  – имеющаяся мощность, подводимая посредством сопряженно-согласованной изотропной антенны приемника (дБ(Вт));

$E$  – напряженность электрического поля (дБ(мкВ/м));

$f$  – частота (Гц);

$d$  – протяженность радиотрассы (км);

$L_{bf}$  – основные потери передачи в свободном пространстве (дБ);

$S$  – плотность потока мощности (дБ(Вт/м<sup>2</sup>)).

## ИНФОРМАЦИОННАЯ ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ СВЯЗИ

Расчеты энергетики радиоканалов позволяют получить вероятностные, временные характеристики каналов передачи информации в различных диапазонах частот, а на основании вероятностно-временных характеристик по выражениям (1) – (5) уже можно получить информационных характеристики, позволяющие сформулировать заключение об эффективности системы связи.

В предыдущем пункте показано, как получить значение напряженности электромагнитного поля в точке приема сигналов. Перевод значения напряженности поля в мощность сигнала для изотропной антенны приемника можно по выражению (11). Спектральная плотность мощности шума  $N$  задается в характеристиках приемника. Может задаваться шумовая температура, тогда мощность помехи равна:

$$P_n = kT\Delta f, \quad (14)$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;  $T$  – шумовая температура;  $\Delta f$  – полосу пропускания приемника.

Тогда вероятность ошибки для двоичных сигналов при когерентном приеме равна [15]:

$$P_{\text{ош}} = 1 - F(h), \quad (15)$$

где интеграл вероятности

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-z^2/2} dz; \tag{16}$$

$$h = \sqrt{\frac{E_s}{N} (1 - \rho)}; \tag{17}$$

$\rho$  – 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 Вт) в точке приема в соответствии с (11).

Энтропия покрытия оценки вероятности ошибки будет определяться следующим образом:

$$H_{\text{ош}} = \log \Pi_{\text{ош}}, \tag{18}$$

$$\Pi_{\text{ош}} = \begin{cases} \frac{P_{\text{ош}}}{P_{\text{ошн}}} = \frac{1-P_{\text{дн}}}{1-P_{\text{дн}}}, P_{\text{ош}} > P_{\text{ошн}}, \\ 1, P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ошн}} \end{cases}, \tag{19}$$

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

Для временных характеристик следует учитывать фактор повтора передачи в случае обнаружения ошибки. Тогда эн-

тропия покрытия временных характеристик будет определяться следующим образом:

$$H_t = \sum_{i=1}^m \log \left[ \frac{T_i}{T_d} (1 + P_{\text{ош}} \cdot (g - 1)) \right], \tag{20}$$

где

$$T_i = T_s + T_{ir} + T_{ik}; \tag{21}$$

$T_s, T_r, T_k$  – 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  $g=3$ ;

$$T_d = \frac{d}{c} + T_s, \tag{22}$$

где  $d$  – 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 (рис. 2).

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.

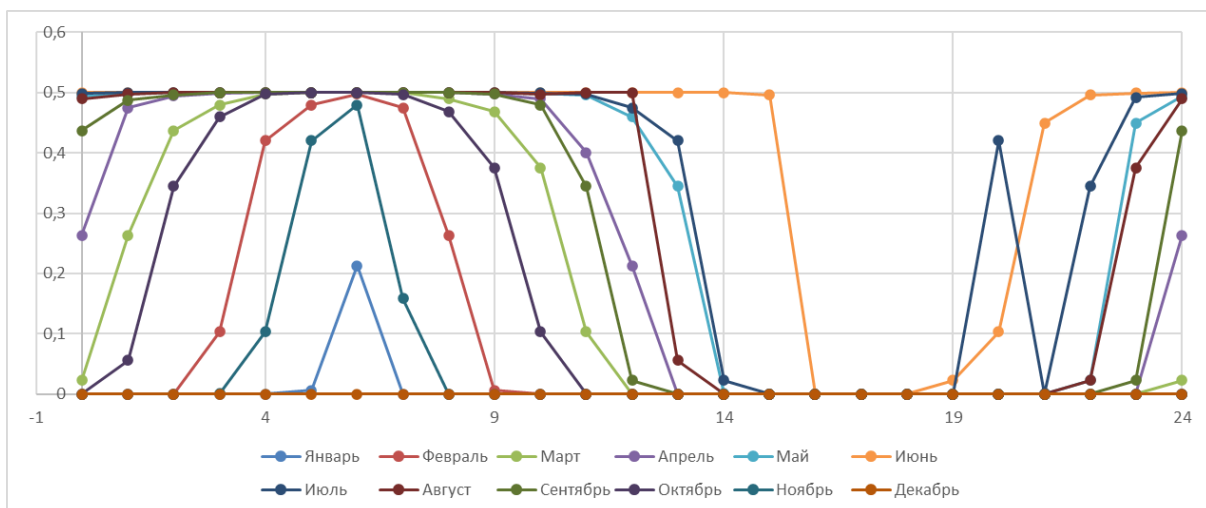


Рис. 2. Вероятность ошибки приема сигнала радиолинии Петропавловск-Камчатский – Москва в зависимости от времени суток

Табл. 1

## Отношение сигнал-шум для радиолинии Мурманск – Москва, КВ-диапазон 3МГц

ВРЕМЯ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Январь	73	73	66	70	68	62	55	50	48	47	50	58	60	61	65	69	71	71	71	71	73	73	73	73	73	73
Февраль	73	73	70	70	66	56	44	44	41	41	44	48	57	58	61	64	66	71	72	73	73	73	73	73	73	73
Март	73	73	71	69	57	51	38	34	30	31	35	40	44	52	56	59	60	62	65	66	68	69	73	73	73	73
Апрель	73	73	71	68	60	52	38	30	16	13	13	18	33	37	42	53	57	59	60	61	62	64	65	70	73	
Май	69	69	64	60	55	37	30	13	10	8	8	12	15	20	34	40	54	56	59	60	61	61	62	67	69	
Июнь	63	63	60	46	39	31	13	8	6	4	3	4	7	11	14	33	37	50	54	56	59	60	61	63	63	
Июль	65	66	65	61	46	38	20	14	10	9	9	11	14	18	31	38	50	53	56	57	60	60	61	64	65	
Август	71	72	71	67	60	45	36	18	13	12	13	16	31	34	37	51	53	55	57	58	60	61	64	68	71	
Сентябрь	73	73	70	69	63	52	39	33	31	11	28	35	39	42	44	55	59	60	61	62	62	65	67	72	73	
Октябрь	73	73	71	70	68	56	51	40	38	36	37	42	45	54	55	58	60	60	61	63	63	65	66	72	73	
Ноябрь	72	72	70	70	62	56	52	45	42	42	42	47	56	58	58	61	62	65	68	68	68	68	68	72	72	
Декабрь	73	73	70	70	68	63	57	59	57	57	58	61	63	63	64	64	68	71	71	72	73	73	73	73	73	

Табл. 2

## Отношение сигнал-шум для радиолинии Петропавловск-Камчатский – Москва, КВ-диапазон 3МГц

ВРЕМЯ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Январь	17	13	10	11	7	1	-4	3	8	9	13	20	26	28	29	31	31	31	31	32	33	29	26	23	17
Февраль	10	5	4	-2	-10	-16	-26	-15	-5	1	4	10	17	23	26	29	30	29	30	32	32	27	23	17	10
Март	0	-5	-11	-16	-26	-38	-50	-43	-19	-14	-8	-2	5	13	20	25	29	29	31	31	29	25	20	11	0
Апрель	-5	-15	-22	-34	-49	-59	-55	-50	-38	-26	-19	-9	-4	4	12	20	25	29	30	26	21	18	13	4	-5
Май	-21	-28	-45	-130	-142	-149	-148	-140	-62	-44	-30	-23	-13	-7	2	12	20	22	22	15	16	9	0	-12	-21
Июнь	-48	-142	-162	-180	-196	-204	-206	-197	-179	-71	-134	-110	-88	-65	-43	-23	6	8	5	0	-2	-12	-23	-32	-48
Июль	-28	-42	-131	-147	-160	-167	-167	-156	-106	-48	-32	-25	-15	-10	0	10	15	17	16	10	-10	2	-7	-20	-28
Август	-19	-25	-37	-52	-61	-135	-132	-60	-44	-37	-24	-55	-39	-1	7	16	21	24	24	19	11	9	0	-8	-19
Сентябрь	-11	-18	-23	-36	-50	-64	-54	-50	-37	-25	-16	-7	0	9	16	23	27	30	30	29	23	19	11	0	-11
Октябрь	3	-1	-7	-13	-25	-36	-46	-24	-14	-8	-2	5	11	18	22	26	29	30	32	31	29	21	18	11	3
Ноябрь	13	8	7	2	-2	-10	-16	-3	3	5	9	15	21	24	27	29	28	28	31	32	31	27	23	19	13
Декабрь	22	19	16	14	16	14	9	15	16	16	20	25	30	32	30	29	30	30	31	33	33	33	26	25	22

Параметры радиосигнала: когерентный шумоподобный сигнал с модуляцией ФМ<sub>2</sub>. Длительность символа 1 мс, полоса пропускания. 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 и представлены на рис. 2.

Проведем расчет энтропии покрытия для этих радиолиний в соответствии с выражениями (18) – (22).

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.

## ВЫВОДЫ

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.

## Список использованных источников и литературы

1. Филатов В.И., Сухов А.В., Зайцев М.А., Генов А.А. Комплексная оценка показателей помехоустойчивости современных и перспективных систем передачи информации и связи // Журнал радиоэлектроники. 2020. № 9. С. 3.
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. Решетников В.Н., Сухов А.В., Вавулов О.Ю. Алгоритмы информационной оценки совместимости средств мобильной связи и станций воздушной радионавигационной службы // Программные продукты и системы. 2017. № 3. С. 529–536.
5. 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.
6. Бурый А.С., Сухов А.В. Оптимальное управление сложными техническими комплексами в автоматизированном информационном пространстве // Автоматика и телемеханика. 2003. № 8. С. 145–162.
7. Морская доктрина Российской Федерации, утверждена Указом Президента Российской Федерации от 31 июля 2022 года № 512. – URL: <https://www.zakonrf.info/ukaz-prezident-rf-512-31072022/> (дата обращения 25.02.2024).
8. Дулькейт И.В., Завьялов С.А., Землянов И.С. Особенности организации радиосвязи в Арктической зоне Российской Федерации // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. 2015. № 2. С. 25–31.
9. Северный морской путь как национальная и международная транспортная коммуникация. – URL: <https://territoryengineering.ru/infrastrukturnaya-revolyutsiya/severnyj-morskoj-put-kak-natsionalnaya-i-mezhdunarodnaya-transportnaya-kommunikatsiya/> (дата обращения 25.02.2024).
10. Сухов А.В. Оценка информационного ресурса радионавигационных станций в условиях помех от средств мобильной связи // Правовая информатика. 2019. № 1. С. 36–45.
11. Рекомендация МСЭ-R P.1147–4 Прогнозирование напряженности поля пространственной волны на частотах между приблизительно 150 и 1700 кГц. 2015.
12. Stokke K.N. Ground conductivity measurements // Telecommunication Journal. 1984. Vol. 51, no. 11. Pp. 611–613.
13. Рекомендация МСЭ-R P.368–10. Метод прогнозирования распространения земной волны для частот между 10 кГц и 30 МГц. 2022.
14. Рекомендация МСЭ-R P.525–4. Расчет ослабления в свободном пространстве. 2019.
15. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.



# INFORMATION ANALYSIS OF COMMUNICATION EFFICIENCY ON THE NORTHERN SEA ROUTE

**Sukhov A.V.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of the MAI, Chief Specialist of the Russian Standardization Institute

**Fedorov R.N.**, applicant, Russian Standardization Institute

*An information approach to the analysis of the effectiveness of information transmission systems in the Arctic zone and, in particular, providing communication on the Northern Sea Route is considered. The development of infrastructure in the Arctic zone directly depends on the hydrometeorological conditions in the region, which necessitates the constant monitoring of these conditions and the development of necessary forecasts. The solution to this problem can be solved by creating a hydrometeorological complex for monitoring the state of the environment in the Arctic zone of the Russian Federation. For these purposes, the organization of information transmission channels and their technical performance indicators are being considered. Then, the mapping of the subject area of technical indicators into an information one using the coverage entropy is considered. The information field allows us to evaluate the effectiveness of the information transmission system as a whole from a single target position, as well as solve the tasks of monitoring and optimizing such systems. The reverse mapping of the information space into the subject area makes it possible to optimize the technical indicators and characteristics of the systems.*

**Keywords:** Northern Sea Route, communication system, information transmission channel, entropy of coverage.

## References

1. Filatov V.I., Sukhov A.V., Zajcev M.A., Genov A.A. Kompleksnaya ocenka pokazatelej pomekhoustojchivosti sovremennyh i perspektivnyh sistem peredachi informacii i svyazi. ZHurnal radioelektroniki. 2020. № 9. P. 3.
2. Sukhov A.V., Zajcev M.A. Informacionnaya ocenka vliyaniya perspektivnyh radiotekhnologij na razvitie infrastruktury slozhnyh tekhnicheskikh sistem. Pravovaya informatika. 2020, no. 3, pp. 40–52.
3. Sukhov A.V. Ocenka informacionnogo resursa radionavigacionnyh stancij v usloviyah pomekh ot sredstv mobil'noj svyazi. Pravovaya informatika. 2019, no. 1, pp. 36–45.
4. Reshetnikov V.N., Sukhov A.V., Vavulov O.YU. Algoritmy informacionnoj ocenki sovместimosti sredstv mobil'noj svyazi i stancij vozdušnoy radionavigacionnoj sluzhby. Programmnye produkty i sistemy. 2017, no. 3, pp. 529–536.
5. Sukhov A.V. Dynamics of information flows in a control system of a complex technological system. Journal of Computer and Systems Sciences International. 2000, vol. 39, no. 4, pp. 592–600.
6. Buryi A.S., Sukhov A.V. Optimal'noe upravlenie slozhnymi tekhnicheskimi kom-pleksami v avtomatizirovannom informacionnom prostranstve. Avtomatika i telemekhanika. 2003, no. 8, pp. 145–162.
7. Morskaya doktrina Rossijskoj Federacii, utverzhdena Ukazom Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 31.07.2022 goda No 512. – URL: <https://www.zakonrf.info/ukaz-prezident-rf-512-31072022/> (Accessed 25 february 2024).
8. Dul'kejt I.V., Zav'yalov S.A., Zemlyanov I.S. Osobennosti organizacii radiosvyazi v Arkticheskoj zone Rossijskoj Federacii. Rossiya molodaya: peredovye tekhnologii – v promyshlennost'. 2015, no. 2, pp. 25–31.
9. Severnyj morskoy put' kak nacional'naya i mezhdunarodnaya transportnaya kommu-nikaciya. URL: <https://territoryengineering.ru/infrastrukturnaya-revoljutsiya/severnyj-morskoy-put-kak-natsionalnaya-i-mezhdunarodnaya-transportnaya-kommunikatsiya/> (Accessed 25 february 2024).
10. Sukhov A.V. Ocenka informacionnogo resursa radionavigacionnyh stancij v usloviyah pomekh ot sredstv mobil'noj svyazi. Pravovaya informatika. 2019, no. 1, pp. 36–45.
11. Recommendations ITU-R P.1147-4 Prediction of sky-wave field strength at frequencies between about 150 and 1 700 kHz. 2015.
12. Stokke K.N. Ground conductivity measurements. Telecommunication Journal. 1984, vol. 51, no. 11, pp. 611–613.
13. Recommendations ITU-R P.368–10. Ground-wave propagation prediction method for frequencies between 10 kHz and 30 MHz. 2022.
14. Recommendations ITU-R P.525–4. Calculation of free-space attenuation. 2019.
15. Varakin L.E. Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami. Moscow, Radio i svyaz', Publ., 1985, 384 p.