

# ПОДХОД В АДАПТАЦИИ СИСТЕМ УЗКОПОЛОСНОЙ ВЧ СВЯЗИ ПО МОЩНОСТИ СИГНАЛА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МОДЕМА

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-7-4-10

**Иванов Владимир Алексеевич,**  
Поволжский государственный технологический университет,  
Йошкар-Ола, Россия, [IvanovVA@volgatech.net](mailto:IvanovVA@volgatech.net)

**Рябова Мария Игоревна,**  
Поволжский государственный технологический университет,  
Йошкар-Ола, Россия, [RyabovaMI@volgatech.net](mailto:RyabovaMI@volgatech.net)

**Ведерникова Юлия Александровна,**  
Поволжский государственный технологический университет,  
Йошкар-Ола, Россия, [VedernikovaYA@volgatech.net](mailto:VedernikovaYA@volgatech.net)

**Manuscript received** 28 May 2025;  
**Accepted** 20 June 2025

*Работа выполнена при поддержке гранта  
Российского научного фонда: проект № 24-29-00442*

**Ключевые слова:** ВЧ связь, антропогенные помехи, межмодовая дисперсия, адаптация, мощность передатчика, производительность модема, доступность канала

Одной из важных проблем ВЧ радиосвязи является изменчивость параметров межмодовой частотно-временной дисперсии и сосредоточенных антропогенных помех. Обеспечение эффективной работы систем связи требует совершенствования используемых методов, алгоритмов и программно-аппаратных комплексов сенсорной диагностики. В работе представлено решение задачи обеспечения эффективной продолжительной работы узкополосной ВЧ связи за счет адаптации по мощности ее сигнала и за счет производительности модема. В этой связи рассмотрены подходы в описании состояния ионосферных радиоканалов, а также в характеристике модемов. Представлены соответствующие проблеме методики оценки в реальном времени спектральной плотности мощности (СПМ) фонового шума и антропогенных сосредоточенных помех, а также метод их сенсорной диагностики. Приведен алгоритм и реализованный на его основе сенсор помех в ВЧ диапазоне. Рассмотрена методика адаптации системы связи по производительности модема и мощности сигнала при обеспечении доступности канала. Для условий приема в городских условиях экспериментально установлены значения выигрыша в доступности канала при изменении порога обнаружения сосредоточенных помех. Показано, что увеличение порога обнаружения на 5 дБ дает выигрыш в доступности примерно 1,3-1,4 раза, а на 10 дБ примерно в 2,5 раза как для дневного, так и ночного времени. Методику оценки выигрыша рекомендуется применить на практике: при неизменной мощности связного сигнала для адаптации модема по производительности, а при неизменной производительности модема - для адаптации системы по излучаемой мощности связного сигнала.

#### **Информация об авторах:**

**Иванов Владимир Алексеевич,** доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой высшей математики, Поволжский государственный технологический университет; SPIN code: 2464-8187, Йошкар-Ола, Россия

**Рябова Мария Игоревна,** кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела научной и международной деятельности, Поволжский государственный технологический университет; ORCID 0000-0003-1239-7407; SPIN code: 6138-3713, Йошкар-Ола, Россия

**Ведерникова Юлия Александровна,** старший преподаватель кафедры высшей математики, Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Россия

#### **Для цитирования:**

Иванов В.А., Рябова М.И., Ведерникова Ю.А. Подход в адаптации систем узкополосной ВЧ связи по мощности сигнала и производительности модема // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №7. С. 4-10.

#### **For citation:**

V.A. Ivanov, M.I. Ryabova, J.A. Vedernikova, "Adaptive strategies for narrowband HF communication systems based on signal power and modem performance", T-Comm, 2025, vol. 19, no. 7, pp. 4-10. (in Russian)

**Введение**

Узкополосная (3 кГц) цифровая ВЧ радиосвязь условно делится на два вида. Первый с дальностью действия до 500 км. При этом используются частоты 3-8 МГц. Второй тип с дальностью 500-3000 км и рабочими частотами 9-30 МГц. Такое соответствие дальности действия и рабочих частот связано с использованием для связи отраженных от ионосферы сигналов, распространяющихся от передатчика к приемнику лучами, которые из-за возможных последовательных отражений от ионосферы и земли называют скачковыми модами.

Основными характеристиками технических систем является их производительность (скорость передачи) и излучаемая мощность. Поэтому при совершенствовании систем связи главной решаемой проблемой является повышение производительности и уменьшение мощности. Производительность удастся повысить путем создания соответствующих модемов, а также за счет увеличения широкополосности передачи и одновременном задействовании примыкающих или ортогональных каналов с общей полосой до 24 кГц. Излучаемую мощность связанного сигнала удастся понизить либо за счет использования модемов с меньшей производительностью, либо использованием каналов с большей пропускной способностью.

Как видим, данные требования являются противоречивыми. В этом случае задачу повышения эффективности систем ВЧ связи решают с использованием оптимальных подходов при корректном учете ограничивающих факторов, к которым относится межмодовая частотно-временная дисперсия и каналные помехи [1]. Для преодоления ограничений стали активно разрабатываться методы адаптации на основе результатов сенсорной диагностики канала, позволяющие оценивать текущие значения межмодовой дисперсии и спектральную плотность мощности смеси канального шума и помех для всего используемого диапазона рабочих частот.

В терминологии задачи введено понятие доступности канала для используемого модема [2]. В общем случае считается, что канал является доступным для системы с заданным модемом, если параметры межмодовой частотно-временной дисперсии и уровень шума в канале удовлетворяют информационно-техническим характеристикам (ИТХ) модема. К ИТХ относится величина рассеяния из-за многомодового распространения импульсных сигналов по задержке и по доплеровскому смещению частоты, а также отношение сигнал-шум. Характеристики рассеяния заданного канала обычно испытывают более медленные изменения, чем уровень помех, поэтому в последнее время для решения задачи адаптации именно этой величине уделяется пристальное внимание [3]. Задача такой адаптации на практике обладает существенной сложностью и в силу важности ее решение работы в этом направлении являются актуальными.

**Цель работы:** разработка подхода к адаптации систем узкополосной ВЧ связи по мощности сигнала и производительности модема с учетом доступности каналов и использованием экспериментальных данных сенсорной диагностики помех на примере городских условий.

В качестве геофизических факторов задачи рассмотрены суточные вариации величины доступности, характеристик фонового шума и антропогенных помех.

**1 Характеристика состояния ВЧ радиоканалов**

Цифровые радиосигналы в среде распространения (ионосфере) представляют собой волновые пакеты, а сама среда является линейной системой с частотной (ЧХ)

$$H(j\omega, t) = \sum_{k=1}^K H_k(j\omega, t) \quad \text{и} \quad \text{импульсной (ИХ)}$$

$$h(\tau, t) = \sum_{k=1}^K h_k(\tau, t) \quad \text{характеристиками. В формулах } t - \text{медлен-$$

ное (геофизическое время), а  $\tau$  – быстрое (задержка) время,  $\omega = 2\pi f$  – частота. Медленное время характеризует изменчивость радиоканалов. Слагаемые в правых частях формул относятся к подканалам, образованным скачковыми модами распространения. Интерференция мод при приеме приводит к явлению частотно-временной дисперсии, т.е. к рассеянию ИХ подканалов по доплеровской частоте и задержке. Дисперсия является причиной случайных замираний сигнала на входе приемника. Поэтому ЧХ и ИХ являются случайными функциями.

Радиоканал характеризуется статистически устойчивой интегральной функцией рассеяния (ФПК или CSF-Channel Spreading Function):

$$CSF(\bar{\omega}, \tau, \Omega_d) \approx \frac{1}{T_a} \left| \int_{t_0}^{t_0+T_a} h(\bar{\omega}, \tau, t) \exp(-j\Omega_d t) dt \right|^2, \quad (1)$$

где  $\bar{\omega}$  – средняя частота рабочего канала,  $\tau$  – задержка,  $\Omega_d = 2\pi F_d$  – доплеровское смещение частоты,  $t_0$  – время начала анализа,  $T_a$  – время анализа.

Для оценок канальных частотно-временной дисперсии и помех можно использовать гауссову модель ФПК, формула для которой имеет вид [4]:

$$CSF(\bar{\omega}, \tau, F_d) = \sum_{k=1}^K SNR_k \exp \left[ -\frac{(\tau - \bar{\tau}_{gk})^2}{2\sigma_{\tau k}^2} - \frac{(F_d - \bar{F}_{dk})^2}{2\sigma_{Fdk}^2} \right], \quad (2)$$

где  $\bar{\tau}_{gk}$  – средняя задержка ИХ произвольной моды в канале,  $\bar{F}_{dk}$  – средний сдвиг ее несущей в канале,  $2\sigma_{\tau k}$  – рассеяние ФПК моды по задержке,  $2\sigma_{Fdk}$  – ее рассеяние по доплеровскому смещению,  $SNR_k$  – отношение сигнал/шум.



Рис. 1. Примеры гауссовой модели ФПК отдельной моды

Видно, что состояние канальной моды определяется тремя ключевыми параметрами  $(2\sigma_{\tau k}, 2\sigma_{dk}, SNR_k)$ . При этом из-за суммы принимаемых мод состояние канала будет оцениваться комбинацией модовых канальных параметров, которая приведет к возможности оценки состояния лишь тройкой чисел  $(2\sigma_{\tau}, 2\sigma_d, SNR)$ . При таком подходе, например на средних широтах, типичные значения рассеяние по задержке  $2\sigma_{\tau}$  оставляют 2 мс, а по частоте 1 Гц. При ионосферных возмущениях эти значения увеличиваются более чем до 6 мс и 5 Гц соответственно. Очевидно, что состояние канала меняется в медленном времени. При этом параметры имеют различную скорость вариаций. Экспериментально показано, что быстрее всех меняется параметр  $SNR$ . В этом случае на некоторых интервалах времени состояние канала можно оценивать только по отношению сигнал-шум, а при неизменной мощности сигнала можно и только по мощности шума.

### 2 Характеристики модемов ВЧ связи

Для решения проблемы доступности канала модему с заданной производительностью  $V$  вводится характеристика, называемая характеристической функцией модема (ХФМ), которая является поверхностью уровня двоичной ошибки  $10^{-3}$  для функции  $BER(2\sigma_{\tau}, 2\sigma_d, SNR)$  для стандартов, приведенных в [5,6]. Моделью ХФМ является поверхность прямоугольного параллелепипеда. Для модема производительностью  $V$  стороны такого параллелепипеда задаются предельными значениями параметров межмодовой частотно-временной дисперсии, т.е. числами  $\lim 2\sigma_{\tau}, \lim 2\sigma_d, \lim SNR$ . При выполнении условий  $(2\sigma_{\tau} < \lim 2\sigma_{\tau}; 2\sigma_d < \lim 2\sigma_d; SNR > \lim SNR)$  канал для модема с производительностью  $V$  считается доступным по рассеянию и отношению сигнал-шум. В компьютерных экспериментах установлено, что с уменьшением производительности модема требования к параметрам канала понижаются.

С геометрической точки зрения канал является доступным для модема, если точка его состояния принадлежит заданному ХФМ прямоугольному параллелепипеду. Доступность нарушается, если точка состояния выходит за пределы параллелепипеда. Пример доступного канала представлен на рисунке 2.

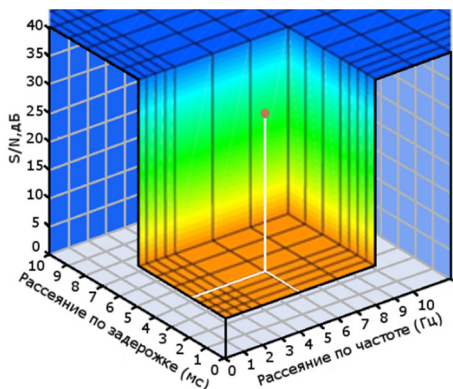


Рис. 2. Модель ХФМ и точка, отображающая состояние доступного канала

На практике при нарушении доступности канала, либо меняется сам канал, либо модем (с переходом на модем с более низкой производительностью). Отметим, что, если доступность нарушена из-за отношения  $SNR$ , она может быть восстановлена за счет выбора иного канала с меньшим уровнем шума (т.е. за счет уменьшения знаменателя  $SNR$ ), или путем увеличения мощности передачи (т.е. за счет изменения числителя  $SNR$ ). Параметры состояния канала меняются в геофизическом времени, поэтому меняется и его доступность.

### 3 Методика адаптации системы связи по производительности модема и мощности сигнала при поддержании доступности

Рассмотрим случай, когда доступность канала для модема производительностью  $V$  меняется из-за изменчивости во времени отношения  $SNR$ . Для этого конкретизируем информацию о модемах. Используем данные, помещенные в таблицах 1 и 2, где представлены зависимости производительности  $V$  модемов с  $BER=10^{-3}$  и полосой 3 кГц от предельных значений  $\lim SNR$ . Табличные значения соответствуют двум основным принятым на практике стандартам. Для первого – они помещены в таблице 1, для второго – в таблице 2.

Таблица 1

$\lim SNR$ , дБ	-7	-3	0	3	7	14
$V$ , бит/с	75	150	300	600	1200	2400

Таблица 2

$\lim SNR$ , дБ	10	10,5	13,5	15	18
$V$ , бит/с	3200	4800	6400	8000	9600

На рисунке 3 приведены отсчеты производительности модемов, соответствующие первому и второму стандарту соответственно. Горизонтальные линии обозначают производительность между значениями аргумента  $\lim SNR$ . Графики получены на основе табличного задания функции  $V(SNR)$ .

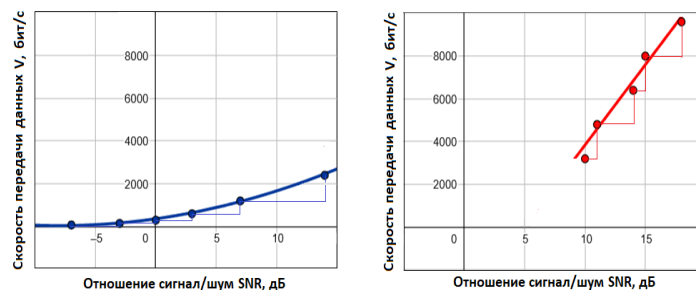


Рис. 3. Функциональная зависимость производительности модема от отношения  $SNR$  в канале

Видно, что для первого стандарта зависимость близка к параболической и имеет вид:

$$V = 5 \cdot (SNR + 7,7)^2 + 45,5 \tag{3}$$

Для второго стандарта она практически линейна:

$$V = 750 \cdot SNR - 3660 \tag{4}$$

Согласно формулам при изменении  $SNR$  на величину  $\Delta SNR$  производительность модемов первого стандарта меняется примерно на  $\Delta V = 10 \cdot (SNR + 7,7) \cdot \Delta SNR$ , а второго – на  $\Delta V = 750 \cdot \Delta SNR$ . Полученные зависимости показывают, что при изменении мощности сигнала на 5 дБ или 10 дБ производительность модемов увеличивается примерно в 2 или 4 раза соответственно. Полученные формулы задают методику адаптации представленной системы связи по производительности модема и мощности связанного сигнала.

#### 4 Методика оценки спектральной плотности мощности фонового шума и антропогенных сосредоточенных помех

Напомним, что  $SNR = P_s / N = E_s / n_0$ , где  $P_s$  – мощность сигнала (или ИХ канала),  $N$  – мощность смеси помехи и шума,  $E_s$  – энергия сигнала (или ИХ),  $n_0$  – спектральная плотность мощности (СПМ) смеси помехи и шума. Видно, что при неизменной энергии ИХ канала данное отношение меняется из-за вариаций  $n_0(t)$ . При узкой полосе канала считается, что помеха представляет собой смесь фонового шума и антропогенных сосредоточенных помех. Фоновый шум испытывает медленные вариации СПМ. Поэтому на доступность канала принципиальное значение оказывают вариации уровня сосредоточенных помех. В этой связи в начале рассмотрим методику автоматического выделения из СПМ каналов, загруженных сосредоточенной помехой.

В начале рассмотрим методику оценки частотной зависимости спектральной плотности мощности шума. Известно (см. например [7]), что для мешающего сигнала  $U_N(t)$ , рассматриваемого во временной области на интервале времени  $T_a = (t_0 + T_a) - t_0 = t_1 - t_0$ , и имеющего частотный спектр  $U_N(jf)$ , занимающий полосу частот  $B_N = f_1 - f_0$ , энергию можно оценить по формуле:

$$E_N = \int_{t_0}^{t_1} |U_N(t)|^2 dt = \int_{f_0}^{f_1} |U_N(jf)|^2 df, \quad (5)$$

где  $|U_N(jf)|^2$  – спектральная плотность энергии (СПЭ) мешающего сигнала.

Разобьем полосу частот на равные отрезки величиной  $B_0$ , тогда формула (5) с учётом теоремы о среднем преобразуется к виду:

$$E_N = \int_{f_0}^{f_1} |U_N(jf)|^2 df \approx B_0 \sum_{r=1}^{N_0} |U_N(jf_r)|^2 = B_0 N_0 \left( \sum_{r=1}^{N_0} |U_N(jf_r)|^2 / N_0 \right) \quad (6)$$

Увеличим полосу элемента разбиения по частоте в  $k$  раз  $B_1 = kB_0$ , тогда число разбиений уменьшится до  $N_1 = N_0/k$ . Сгруппируем в формуле (2) слагаемые по  $k$ . Тогда под знаком суммы получим  $N_1$  слагаемых вида:

$$\overline{|U_N(jf_r)|^2}_k = \frac{|U_N(jf_1)|^2 + \dots + |U_N(jf_k)|^2}{k} + \dots, \quad (7)$$

где  $|U_N(jf_r)|^2_k$  – сумма из  $N_1$  усредненных по частоте  $k$  слагаемых.

Отсюда:

$$E_N = B_0 N_0 \left( \sum_{r=1}^{N_0} |U_N(jf_r)|^2 / N_0 \right) = B_1 N_1 \left( \sum_{r=1}^{N_1} \overline{|U_N(jf_r)|^2}_k / N_1 \right), \quad (8)$$

Итак, при увеличении полосы разбиения в  $k$  раз получаем последовательность СПЭ, состоящую из усредненных по частоте значений СПЭ из  $k$  соседних отсчетов.

Для средней на интервале  $T_a = t_1 - t_0$  мощности имеет место формула:

$$\overline{N} = \int_{f_0}^{f_1} \frac{|U_N(jf)|^2}{T_a} df = \int_{f_0}^{f_1} p_N(f) df, \quad (9)$$

где  $p_N(f) = \frac{|U_N(jf)|^2}{T_a}$  – спектральная плотность мощности сигнала (СПМ).

Отсюда для СПЭ и СПМ справедливо соотношение:

$$|U_N(jf)|^2 = p_N(f) \cdot T_a, \quad (10)$$

Это означает, что при  $T_a = const$  для оценки СПМ при увеличении полосы элементов разбиения в частотной области необходимо усреднять отсчеты, группируя их по  $k$  слагаемым.

#### 5 Лабораторный образец SDR сенсора и алгоритм сенсорной диагностики спектральной плотности мощности (СПМ) помех в КВ диапазоне

Лабораторный образец сенсора реализован на базе универсального SDR устройства типа USRPN210. Данная платформа с помощью 14 битного АЦП осуществляет преобразование сигнала в цифровую форму прямо с выхода антенны. В ПЛИС USRP сигнал смешивается с цифровым синтезированным сигналом опорного генератора. Получившиеся синфазная (I) и квадратурная (Q) компоненты передаются по интерфейсу Gigabit LAN в персональный компьютер для дальнейшей спектральной обработки методами квадратурной цифровой обработки комплексных сигналов.

Программная часть реализована с использованием пакетов прикладных программ GNURadio и PTCMathcad15. Исследованиям подвергаются спектры сигналов помех во всем КВ диапазоне, полученные с разрешением, равным расширенной полосе канала. При этом полоса 24 кГц позволяла для системы связи достигать максимальной скорости передачи данных посредством одновременно работающих 8 примыкающих подканалов.

Быстрое преобразование Фурье, позволяло получать спектральную плотность мощности (СПМ) с разрешением 381 Гц [3]. Для оценки СПМ в каналах с полосой 3,051 кГц проводилось усреднение по 8 соседним отсчетам. Полученные данные пересчитывались на СПМ каналов с полосой 24 кГц. Для получения статистически устойчивой во времени оценки использовалась операция усреднения полученных последовательно спектров за 1с [3]. С применением порогового метода обнаружения в спектре сосредоточенных антропогенных помех определялось начало для его отсчета. Для этого усредненный спектр помех КВ диапазона (3-28 МГц) относили к

соответствующим примыкающим отрезкам, величиной 1 МГц. Для каждого из них бралось 3% отсчетов с наименьшим СПМ и вычислялось их среднее. Его значение принималось в качестве начала отсчета порога.

Канал считался загруженным (недоступным), если спектральная плотность мощности помех в нем превышала порог в 10 дБ, который принимался за уровень фонового шума. В экспериментах исследовалось изменение доступности с увеличением порога еще на 5 дБ и 10 дБ.

Для применения метода наивного прогноза доступности использовалась метрика, называемая минутной доступностью радиоканалов, обозначенная нами - СМА [3]. Она подразумевает, что радиоканал доступный в течение двух минут, является также доступным и на третьей минуте.

### 6 Экспериментальные данные изменения доступности ионосферных ВЧ каналов при изменении порога обнаружения сосредоточенных помех в городских условиях

Эксперименты по приему сигналов фонового шума и антропогенных помех проводились круглосуточно в течении нескольких дней в г. Йошкар-Ола в летнее время (июнь). Приемный терминал располагался в непосредственной близости от промышленной зоны. Установлено, что в течении всего суточного хода при критериальном пороге 10 дБ в диапазоне тактической радиосвязи (3-8 МГц) наблюдается высокая загруженность радиоканалов. Показатель доступности составлял всего 7-10% днем и 4-5% ночью. При этом в диапазоне частот стратегической связи наблюдалось повышение по отношению к тактической связи их доступности. Так доступность на частотах 16 и 17 МГц составляла 31% ночью и 44% днем. Она также была выше, чем на соседних с ними частотах 15 и 18 МГц (19% ночью и 35% днем). Это явление наглядно иллюстрирует рисунок 4.

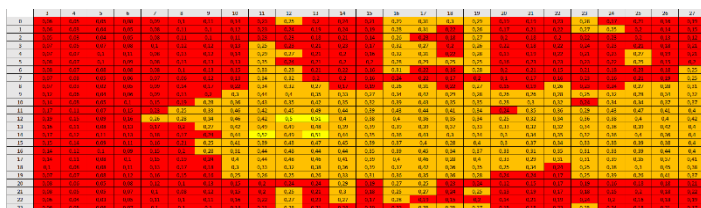


Рис. 4. Суточный ход доступности радиоканалов КВ диапазона при использовании критериального порога в 10 дБ

Видно, что в городских условиях из-за особенностей спектра антропогенных помех, каналы на частотах 15, 18 и 19 МГц обладают большей доступностью в ночное время по сравнению с соседними диапазонами частот. Диапазон стратегической радиосвязи (9-27 МГц) при пороге 10 дБ обладает низкой доступностью в ночные часы (примерно, 15-20%), за исключением частот 16-18 МГц, а в дневные часы доступность в диапазоне достигает 35-45%.

Для критериального порога 15 дБ (10+5 дБ) суточный ход доступности радиоканалов приведен на рисунке 5.

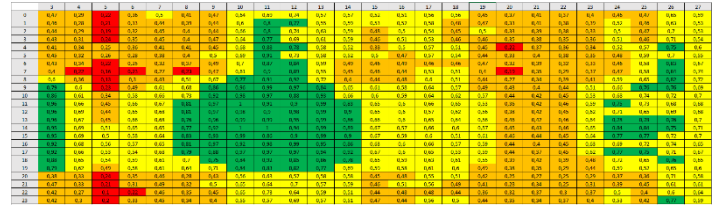


Рис. 5. Суточный ход доступности радиоканалов КВ диапазона при использовании критериального порога 15 дБ

Как и следовало ожидать, доступность с повышением порога увеличивается. Так в дневное время свободным от существенных помех является мегагерцовый диапазон около рабочей частоты в 3 МГц и 8-14 МГц, где доступность достигает 96-100%. При аналогичном сравнении отметим, что практически свободные радиоканалы с доступностью 75-84% присутствуют также на частотах стратегической связи 24-26 МГц в ночное и дневное время.

Таким образом, при увеличении порога с 10 дБ до 15 дБ происходит выигрыш в доступности радиоканалов, который составляет примерно 30-40%, т.е. примерно 1,3-1,4 раза как для дневного, так и ночного времени суток.

Для критериального порога в 20 дБ (10+10) дБ суточный ход доступности радиоканалов приведен на рисунке 6.

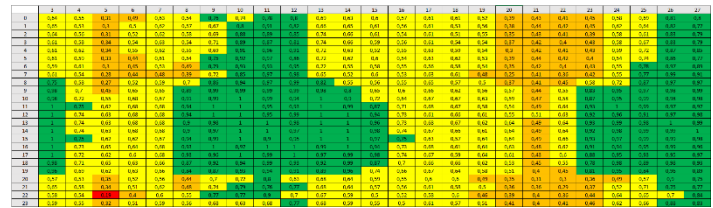


Рис. 6. Суточный ход доступности радиоканалов КВ диапазона при использовании критериального порога 20 дБ

Видно, что при таком параметре днем имели место доступные радиоканалы из диапазонов как первого, так и второго вида ВЧ связи. Оценки показывают, что увеличение порога от исходного на 10 дБ дает выигрыш в доступности радиоканалов в ~ 2,5 раза как в дневное, так и ночное время. Формулы (3) и (4) показывают способ использования оценки выигрыша в доступности при изменении порога. Действительно увеличение порога обнаружения сосредоточенных помех соответствует увеличению мощности сигнала. В этой связи полученные результаты показывают, что при росте мощности связанного сигнала на 5-10 дБ производительность модемов может быть увеличена в 2-4 раза.

С ростом мощности связанного сигнала также увеличивается количество доступных радиоканалов как в дневное, так и ночное время. Преимущественно это имеет место в диапазонах частот 3-9 МГц и 25-27 МГц в дневное время, а также в диапазоне 10-12 МГц круглосуточно. Следовательно, при вариациях уровня шума для поддержания производительности модема требуется подстройка излучаемой мощности. Если мощность сигнала не изменять, то для сохранения эффективности в системе связи требуется адаптировать производительность модема.

## 7 Выводы

Экспериментально подтверждена эффективность развитого в работе подхода в адаптации систем узкополосной ВЧ связи по мощности сигнала и производительности модема с учетом доступности каналов даже в случае сложной помеховой обстановки, характерной для городских условий.

Представлены методики и алгоритмы оценки в реальном времени спектральной плотности мощности фонового шума и антропогенных сосредоточенных помех, а также доступности каналов по данным сенсорной диагностики спектральной плотности мощности (СПМ) помех. Представлены алгоритмы и характеристики сенсора помех. С помощью экспериментов по диагностике помех, проведенных в г. Йошкар-Оле в различных геофизических условиях показано, что увеличение порога обнаружения сосредоточенных помех на 5 дБ дает выигрыш в доступности каналов примерно в 1,3-1,4 раза, а при увеличении на 10 дБ – примерно в 2,5 раза как для дневного, так и ночного времени суток. Увеличение данного порога соответствует аналогичному увеличению мощности связного сигнала. Поэтому полученные результаты показали, что с ростом мощности связного сигнала увеличивается количество доступных радиоканалов как в дневное, так и ночное время. Преимущественно это имеет место в диапазонах 3-9 МГц и 25-27 МГц в дневное время, а также в диапазоне 10-12 МГц круглосуточно. Кроме того, при росте мощности связного сигнала на 5-10 дБ производительность модемов увеличивается в 2-4 раза. Этот эффект можно использовать в методе адаптации модема по производительности.

Представленный в работе подход можно применить в практике ВЧ связи. Так при неизменной мощности связного сигнала предложенные алгоритмы можно использовать для реализации способа адаптации модема по производительности, а при неизменной производительности модема – для способа адаптации системы по излучаемой мощности связного сигнала.

## Литература

1. Иванов, В. А.; Иванов, Д. В.; Рябова, Н. В.; Царев И. Е.. Численные и полунатурные исследования функции рассеяния узкополосных декаметровых радиоканалов // Электромагнитные волны и электронные системы, Т. 14, № 8, 2009. С. 46-54.
2. Иванов, В. А.; Рябова, Н. В.; Царев, И. Е.. Диагностика функции рассеяния декаметровых узкополосных стохастических радиоканалов // Радиотехника и электроника, Т. 55, № 3, 2009. С. 285-292.
3. William N. Furman, John W. Nieto, Erik N. Koski. Initial Wideband HF ALE: Approach and On-Air Test Results, The Nordic Shortwave Conference HF13, Faro, Sweden, 2013.
4. Иванов, В. А.; Катков, Е. В.; Рябова, М. И.; Чернов, А. А.. Канальные параметры рассеяния для среднеширотной ионосферы // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2011. № 3. С. 93-101.
5. Arthur P. C. Maundrell M. J. Multi. Dimensional HF Modem Performance Characterisation // 7th International Conference on HF Radio Systems and Techniques. 1997. № 411. P. 154-158.
6. Иванов Д. В., Иванов В. А., Рябова Н. В., Бельгибаев Р. Р. Оценка доступности частотных каналов для различных модемов КВ-связи на основе пассивного зондирования многомерного ионосферного радиоканала // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2017. № 2 (34). С. 39-53.
7. Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова М.И., Бельгибаев Р.Р., Овчинников В.В., Чернядьев А.В. Развитие методов спектрального мониторинга помех КВ диапазона для определения доступности парциальных ионосферных радиоканалов с учетом особенностей изменчивого спектра // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 12. С. 64-77. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202312-08>.

## ADAPTIVE STRATEGIES FOR NARROWBAND HF COMMUNICATION SYSTEMS BASED ON SIGNAL POWER AND MODEM PERFORMANCE

**Vladimir A. Ivanov**, Volga state university of technology, Yoshkar-Ola, Russia, [IvanovVA@volgatech.net](mailto:IvanovVA@volgatech.net)

**Maria I. Ryabova**, Volga state university of technology, Yoshkar-Ola, Russia, [RyabovaMI@volgatech.net](mailto:RyabovaMI@volgatech.net)

**Juliya A. Vedernikova**, Volga state university of technology, Yoshkar-Ola, Russia, [VedernikovaYA@volgatech.net](mailto:VedernikovaYA@volgatech.net)

### Abstract

High-frequency (HF) radio communication systems face challenges due to variable ionospheric frequency-time dispersion and concentrated anthropogenic interference. To ensure efficient long-term operation, advanced methods, algorithms, and hardware-software solutions for sensor diagnostics are essential. This paper proposes an adaptive approach to optimize narrowband HF communication by adjusting signal power and modem performance. We explore methods for characterizing ionospheric radio channels and modem performance, alongside real-time estimation of background noise and anthropogenic interference spectral power density (SPD). A novel algorithm and corresponding HF interference sensor are introduced to support these diagnostics. The proposed adaptation technique adjusts modem performance and signal power to maximize channel availability. Experimental results in urban environments demonstrate that increasing the interference detection threshold by 5 dB improves channel availability by approximately 1.3-1.4 times, while a 10 dB increase yields a 2.5-fold gain, consistent across day and night conditions. We recommend implementing this gain estimation technique in practice: maintaining constant signal power for modem performance adaptation or adjusting radiated signal power for fixed modem performance.

**Keywords:** HF communication, anthropogenic interference, intermode dispersion, adaptation, signal power, modem performance, channel availability

### References

- [1] V.A. Ivanov, D.V. Ivanov, N.V. Ryabova, I.E. Tsarev, "Numerical and semi-natural studies of scattering function of narrowband decameter radio channels", *Electromagnetic waves and electronic systems*, 2009, vol. 14, no. 8, pp. 46-54.
- [2] V.A. Ivanov, N.V. Ryabova, I.E. Tsarev, "Diagnostics of the scattering function of decametre narrowband stochastic radio channels", *Radio and electronics*, 2009, vol. 55, no. 3, pp. 285-292.
- [3] William N. Furman, John W. Nieto, Erik N. Koski, "Initial Wideband HF ALE: Approach and On-Air Test Results", *The Nordic Shortwave Conference HF13*, Faro, Sweden, 2013.
- [4] V.A. Ivanov, E.V. Katkov, M.I. Ryabova, A.A. Chernov, "Channel parameters of dispersion for the medium-width ionosphere", *Vestnik of Volga state university of technology. Series: Radio Engineering and Infocommunication System*, 2011, no. 3, pp. 93-101.
- [5] Arthur P. C. Maundrell M. J. Multi, "Dimensional HF Modem Performance Characterisation", *7th International Conference on HF Radio Systems and Techniques*, 1997, no. 411, pp. 154-158.
- [6] D.V. Ivanov, V.A. Ivanov, N.V. Ryabova, R.R. Belgibaev, "Assessment of the availability of frequency for various modes of KV-communication on the basis of passive sensing of a multi-dimensional ionospheric radio channel", *Vestnik of Volga state university of technology. Series: Radio Engineering and Infocommunication Systems*, 2017, no. 2 (34), pp. 39-53.
- [7] D.V. Ivanov, V.A. Ivanov, M.I. Ryabova, R.R. Belgibaev, V. V. Ovchinnikov, A.V. Chernyadyev, "Development of methods of spectral monitoring of interference KV range for determining the availability of partial ionospheric radio channel taking into account the characteristics of the variable spectrum", *Radiotechnics*, 2023, vol. 87, no. 12, pp. 64-77. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202312-08>.

### Information about authors:

**Vladimir A. Ivanov**, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of the Department of Higher mathematics, Yoshkar-Ola, Russia

**Maria I. Ryabova**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher at the Department of Scientific and International Activities of Volga state university of technology, Yoshkar-Ola, Russia, Yoshkar-Ola, Russia

**Juliya A. Vedernikova**, senior lecturer at the Department of Higher Mathematics of Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia