

УДК 621.39

Повышение скорости обмена данными в направлениях «берег-море-берег» по радиотрактам декаметрового диапазона волн

Жуков Г. А., Будко П. А., Дяченко А. Н.

Постановка задачи: проведение многочисленных трассовых испытаний показывают результаты по средней скорости доведения информации до удалённых объектов в случае ионосферного распространения радиоволн существенно ниже теоретических. При этом одним из решающих факторов, ограничивающих увеличение скорости в радиотракте диапазона коротких волн, является нестационарность характеристик среды передачи. В статье ставится задача обосновать возможность высокоскоростной передачи данных в условиях наличия дискретной и диффузной многолучёвости в ионосферном радиоканале. **Целью работы** является рассмотрение методов обеспечения устойчивого высокоскоростного доведения команд и донесений между пунктами управления и глобально-перемещающимися объектами с учетом характеристик радиоканалов с переменными параметрами. **Используемые методы:** теория распространения радиоволн; методы теории потенциальной помехоустойчивости; методы повышения вероятности приёма в условиях дискретной многолучёвости, а также прихода мод с «канальным» и «хордовым» режимами распространения волн; методы борьбы с многолучёвостью и межсимвольной интерференцией; методы частотной, пространственной и территориально-разнесённой передачи (приёма) сообщений и др. **Новизной** предложенного подхода по повышению скорости обмена данными в радиотрактах декаметрового диапазона волн является комплексное использование методов организации частотно-, пространственно- или территориально-разнесённой передачи (приёма) информации в совокупности с применением многоканальных приёмных и возбуждающих устройств, построенных по технологии программируемого радио, перехода от «простых» к недвоичным видам модуляции а также к широкополосным сигналам с малой базой и приёму сообщений на мультидиаграммную цифровую фазированную антенную решётку со статическим «веером» диаграмм направленности. **К результатам** работы следует отнести теоретическое и экспериментальное обоснование достижимости информационных скоростей передачи при переходе на недвоичные виды модуляции в коротковолновых радиотрактах – до 10 кБит/с. При этом «платой» за обеспечение высокоскоростной передачи без использования эквалайзера, зондирующего сигнала или канала обратной связи, является необходимость наличия значительного частотного ресурса, что, впрочем, характерно как для адаптивных радиолиний, так и для активно применяемого на сегодня режима передачи сообщения на большом количестве рабочих частот, устанавливаемых по псевдослучайному закону. **Практическая значимость:** повышение вероятности приёма в условиях межсимвольной интерференции, обусловленной дискретной многолучёвостью, возможно обеспечить либо путём выделения луча с максимальным уровнем сигнала и подавлением (компенсацией) остальных лучей, либо методом оптимального сложения сигналов от всех лучей. При этом наиболее эффективно задача решается при использовании для передачи информации широкополосных сигналов, а на приёме – согласованной фильтрации и мультидиаграммных цифровых фазированных антенных решёток.

Ключевые слова: декаметровый диапазон волн, дискретная многолучёвость, диффузная многолучёвость, информационная скорость передачи, ионосферный радиоканал, мультидиаграммная цифровая фазированная антенная решётка, радиотракт.

Библиографическая ссылка на статью:

Жуков Г. А., Будко П. А., Дяченко А. Н. Повышение скорости обмена данными в направлениях «берег-море-берег» по радиотрактам декаметрового диапазона волн // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 2. С. 147-174. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-2-147-174

Reference for citation:

Zhukov G. A., Budko P. A., Dyachenko A. N. Increasing the speed of data exchange in the "coast-sea-coast" directions by radio paths of the decameter wave range. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 2, pp. 147-174 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2023-2-147-174

Введение

При обмене данными береговых пунктов управления с морскими глобально перемещающимися объектами (надводными кораблями (НК), подводными лодками (ПЛ), робототехническими комплексами морского базирования и т. д.) используются в качестве дублирующих или резервных, а иногда и основных – декаметровые (коротковолновые) тракты [1, 2].

Унаследованный режим сигналов частотной телеграфии (ЧТ-модуляции), применяемых в модемах, входящих в радиотракты, в настоящее время не в полной мере может обеспечить возрастающие требования по своевременности доведения команд управления до исполнительных звеньев на морских объектах, что делает необходимым внедрение не только методов сокращения кодограмм за счёт оптимизации семантики и способов помехоустойчивого кодирования сообщений, но и увеличения скорости их передачи.

Вместе с тем, учитывая достаточно высокий потенциал береговых передающих коротковолновых (КВ) радиоцентров ($P_{\text{рпду}} = 5 \dots 20$ кВт), а также оснащённость приёмных центров эффективными антенными системами и чувствительными радиоприёмными устройствами, представляется доступным без принятия специальных мер обеспечить повышение скорости V доведения команд только за счёт увеличения частотной полосы сигнала Δf_c , поскольку, как следует из формулы Шеннона-Хартли:

$$V = \log_2 \left(1 + \frac{P_c}{\Delta f_c v^2} \right)^{\Delta f_c} . \quad (1)$$

где P_c – мощность принимаемого сигнала; v^2 – спектральная плотность «белого» шума.

Так, для радиотрассы Омск – Москва для одного из дней весеннего периода проведения испытаний высокоскоростного модема разработки Омского научно-исследовательского института приборостроения (АО «ОНИИП») [3] на рис. 1 приведён почасовой (UT – всемирное время, англ. Universal Time) график изменения отношения $\frac{P_c}{v^2}$, вычисленного по методике [4, 5].

Для $P_{\text{изл}} \approx 1$ кВт (кривая синего цвета) и $P_{\text{изл}} \approx 0,1$ кВт (кривая зелёного цвета) с использованием КВ приёмной и передающей антенн с суммарным коэффициентом усиления ~ 15 дБ, а на рис. 2 – соответствующие графики для потенциально достижимой скорости передачи, рассчитанные по формуле (1) в предположении действия белого шума со спектральной плотностью v^2 .

Однако, как следует из результатов многочисленных трассовых испытаний, средние скорости при доведении информации до удалённых объектов, в случае ионосферного распространения радиоволн, оказываются существенно ниже теоретических.

Одним из основных факторов, приводящих к ограничению повышения скорости доведения данных по КВ-радиотракту, является сложность и нестационарность характеристик среды передачи.

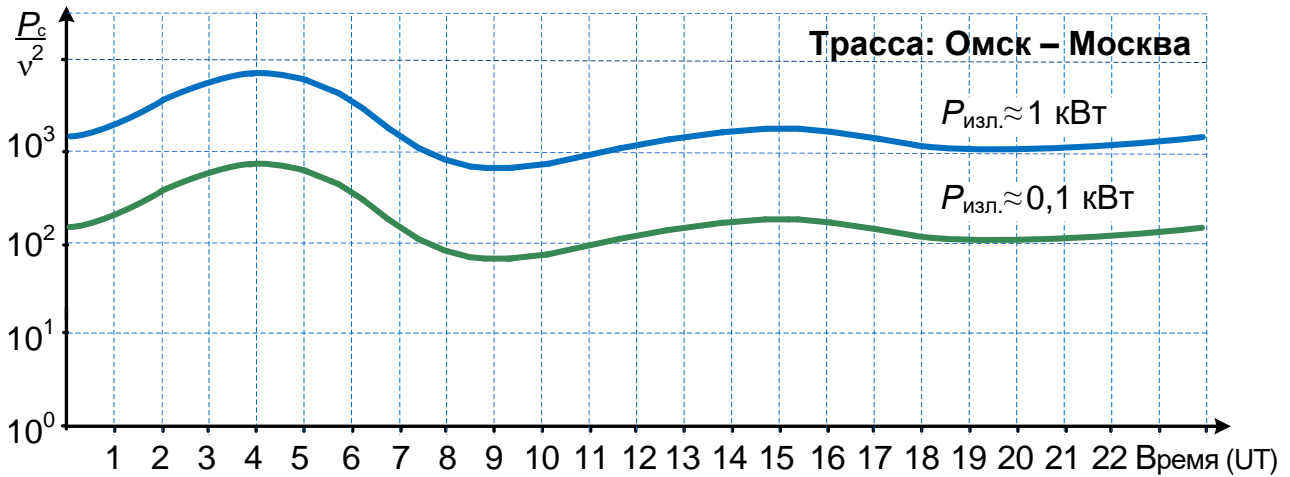


Рис. 1. Суточный ход соотношения мощности сигнала к спектральной плотности шума на трассе Омск – Москва (результат испытаний высокоскоростного модема произв. АО «ОНИИП»)

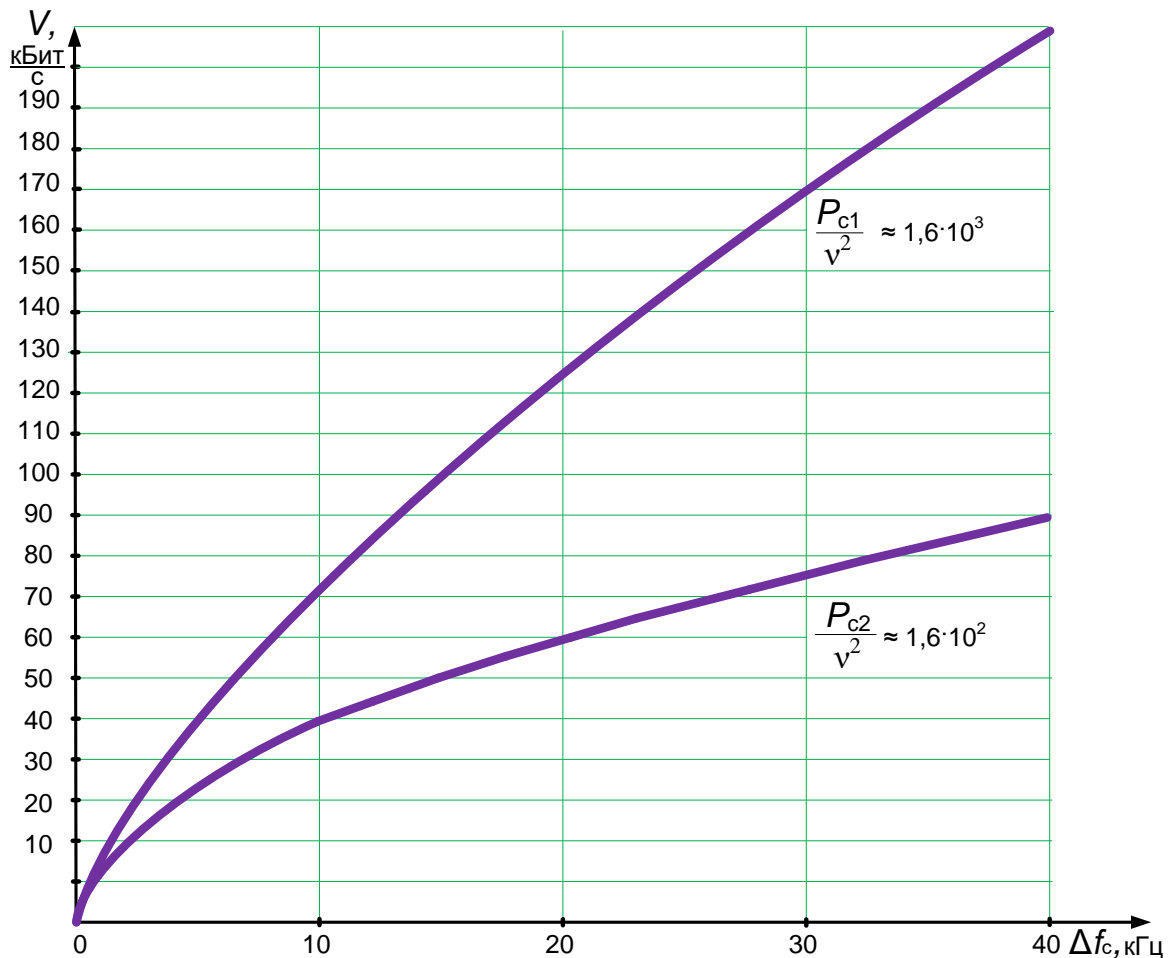


Рис. 2. Графики потенциально достижимой скорости передачи V в зависимости от частотной полосы сигнала Δf_c (по формуле Шеннона-Хартли)

Цель статьи: рассмотрение методов обеспечения устойчивого высокоскоростного доведения команд и донесений с учетом характеристик КВ каналов связи.

1. Методы повышения вероятности приема в условиях дискретной многолучёвости

При организации дальней КВ связи, реализуемой за счёт отражения радиоволн от ионосферы, в точку приёма может прийти от одного до нескольких лучей (мод) под разными углами.

Помимо дискретной многолучёвости, обусловленной приходом в точку приёма лучей, отражённых от слоя F на разных высотах, а также от слоя E или спорадического слоя E_s и от Земли (рис. 3 *а, б*), возможен приход мод с «канальным» и «хордовым» режимами распространения волн (рис. 3 *в*), связанным с наличием «плавающих» ионосферных неоднородностей, имеющих случайный наклон отражающей поверхности и оказывающих влияние на амплитуду, задержку, поляризацию, угол и азимут прихода сигнала.

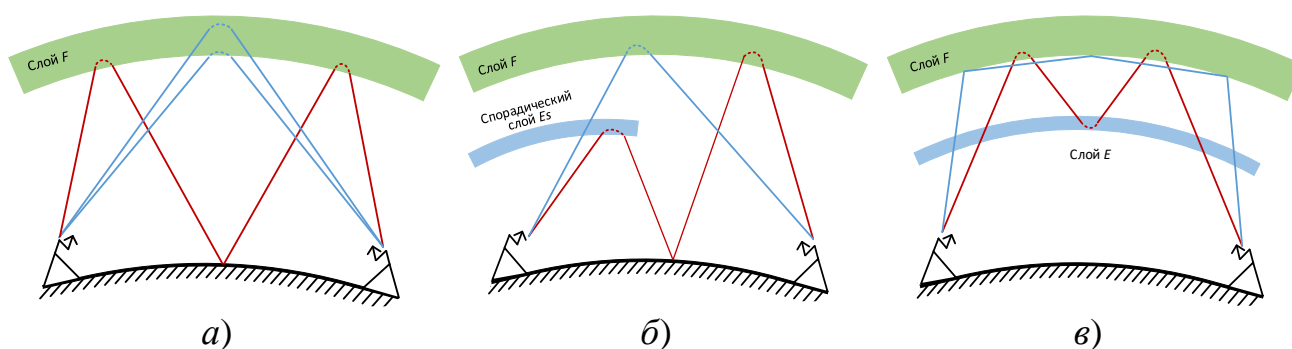


Рис. 3. Варианты прохождения радиоволн, порождающие многолучёвость в КВ радиосвязи

В ряде случаев, особенно для многоскачковых радиотрасс ($D > 4000$ км) возможны смешанные варианты многолучёвости, при этом число лучей с мощностями, отличающимися не более чем на 6...10 дБ, может достигать до 5 – 8-ми. Задержки по времени между первым и последним лучом для однокачковых радиотрасс при отсутствии аномальных возмущений в ионосфере в среднем составляют 0,6...1,2 мс. В графическом виде аппроксимированные результаты экспериментальных исследований характеристик многолучёвости для однокачковых среднеширотных радиотрасс [6] приведены на рис. 4 и 5, где N – число лучей, $f_{\text{раб}}$ – рабочая частота, $f_{\text{МПЧ}}$ – максимально применимая частота (МПЧ).

Наличие многолучёвости приводит к частотно-селективным замираниям принимаемого сигнала и межсимвольной интерференции, вследствие действия которой, без применения специальных мер, ухудшаются вероятностно-временные характеристики приёма сообщений по сравнению с потенциально возможными ВВХ.

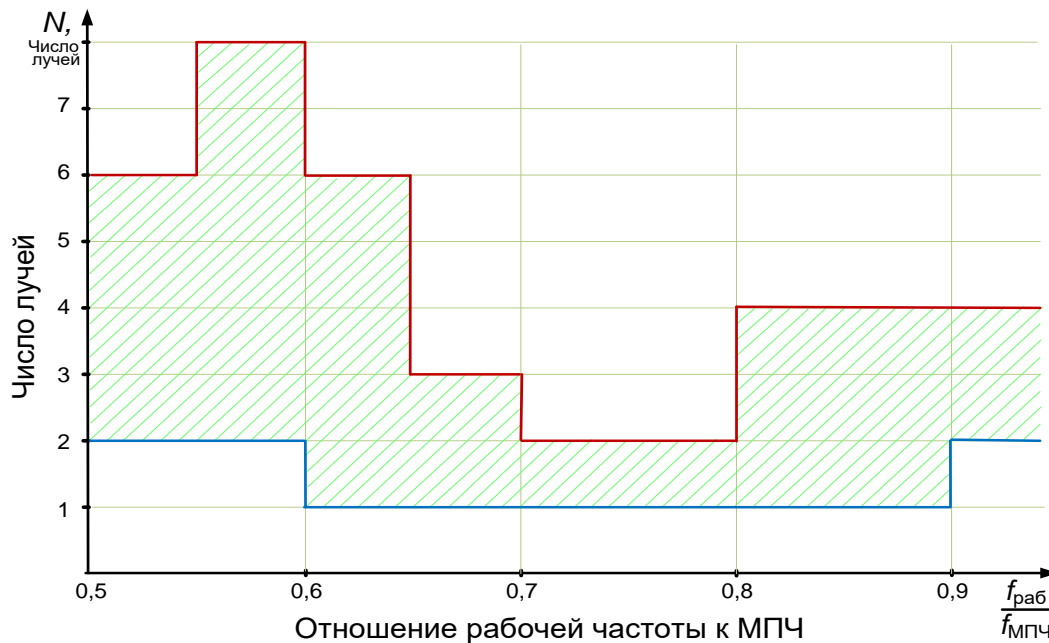


Рис. 4. Аппроксимация результатов экспериментальных исследований характеристик многолучёвости

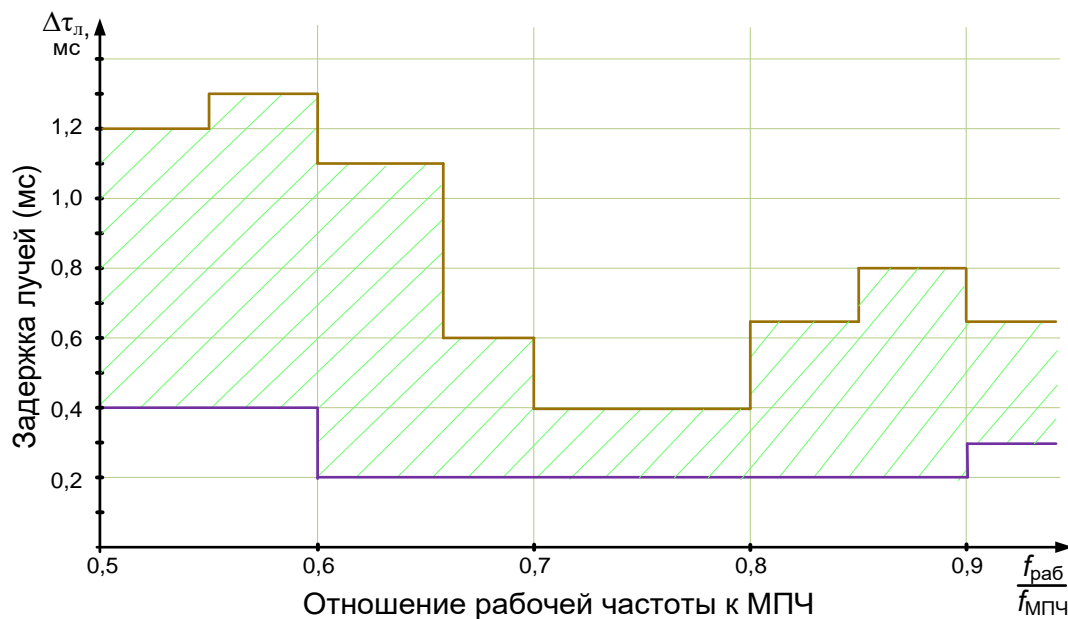
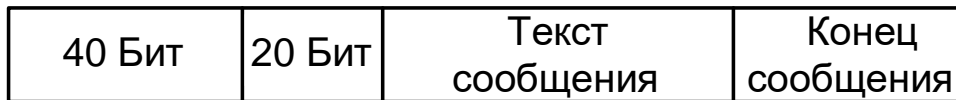


Рис. 5. Аппроксимация результатов экспериментальных исследований задержек лучей $\Delta\tau_l$ в многолучёвом КВ-радиоканале

Экспериментально полученная зависимость вероятности безошибочного приёма 20-элементной опознавательной-синхронизирующей последовательности (ОСП) в структуре сообщения (рис. 6) от скорости передачи при использовании сигналов с ЧТ-модуляцией приведена на графике рис. 7 (кривая синего цвета). Отметим, что вероятность безошибочного приёма этой последовательности является верхней границей вероятности безошибочного приёма сообщения в целом. Испытания проводились на одноканальных среднеширотных радиотрассах с задействованием штатных радиопередатчиков (РПДУ), радиоприёмных (РПУ) и антенно-фидерных (АФУ) устройств.



Последовательность Последовательность
для поэлементной для поэлементной
синхронизации синхронизации

Рис. 6. Структура передаваемого сообщения

На этом же рисунке приведены графики аналогичной зависимости, рассчитанные с применением в промежуточных вычислениях формул вероятности ошибки p_o в приеме одного бита сообщения для канала с рэлеевскими замираниями (кривая красного цвета) и для канала без замираний в условиях «белого шума» (кривая зелёного цвета) [7].

$$p_o = \frac{1}{2 + h^2}, \tag{2}$$

$$p_o = \frac{1}{2} e^{-\frac{h^2}{2}}, \tag{3}$$

где $h^2 = \frac{P_c t_6}{v^2} = \frac{P_c}{P_n}$; P_c и P_n – мощности принимаемого сигнала и помехи (Вт); v^2 – спектральная плотность «белого» шума (Вт/кГц); t_6 – длительность одного бита (мс). Используемое при вычислениях значение $\frac{P_c}{v^2}$ соответствует среднему значению, полученному при проведении трассовых испытаний.

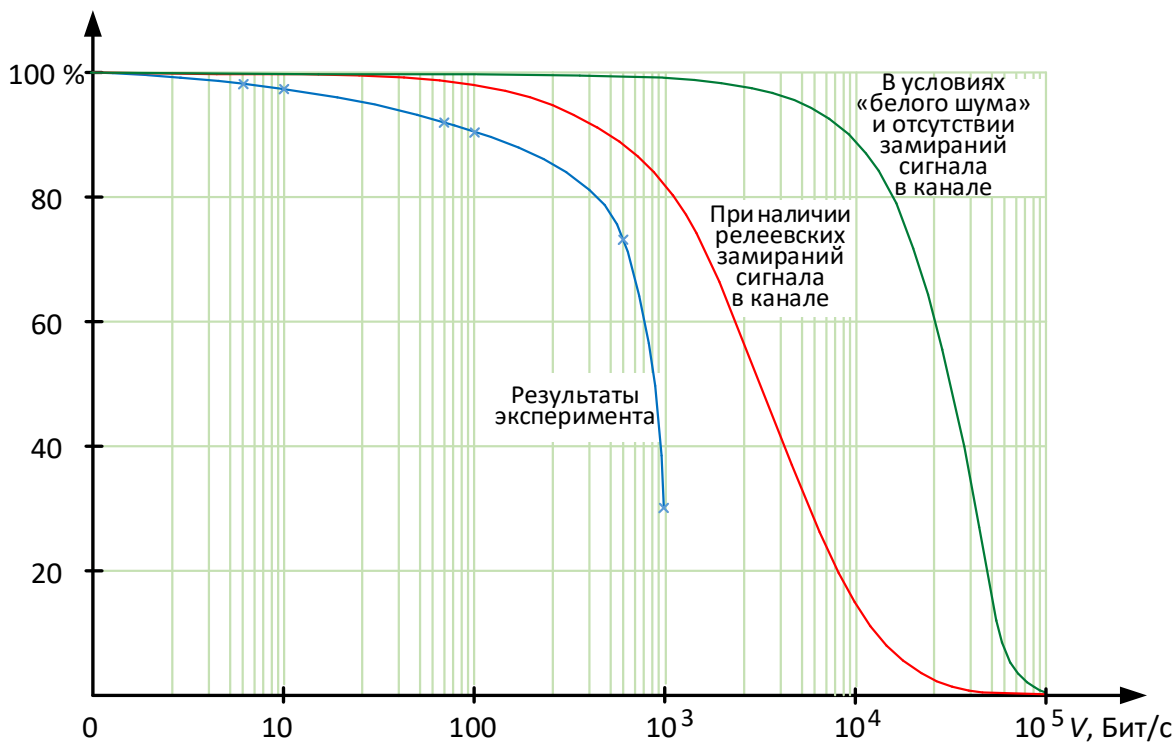


Рис. 7. Зависимость вероятности безошибочного приёма 20-элементной ОСП сообщения от скорости передачи сигналов с ЧТ-модуляцией

Существенное отличие теоретических и экспериментальных результатов можно объяснить значительным увеличением влияния межсимвольной интерференции на вероятность приёма при повышении скорости передачи путём сокращения длительности элемента (бита) информации без использования методов борьбы с многолучёвостью и межсимвольной интерференцией.

На рис. 8 схематично представлен характер изменения структуры синхронизирующей последовательности, передаваемой в режиме ЧТ, на входе демодулятора при наличии второго луча, задержанного на время $\Delta\tau_{л}$ относительно первого (основного).

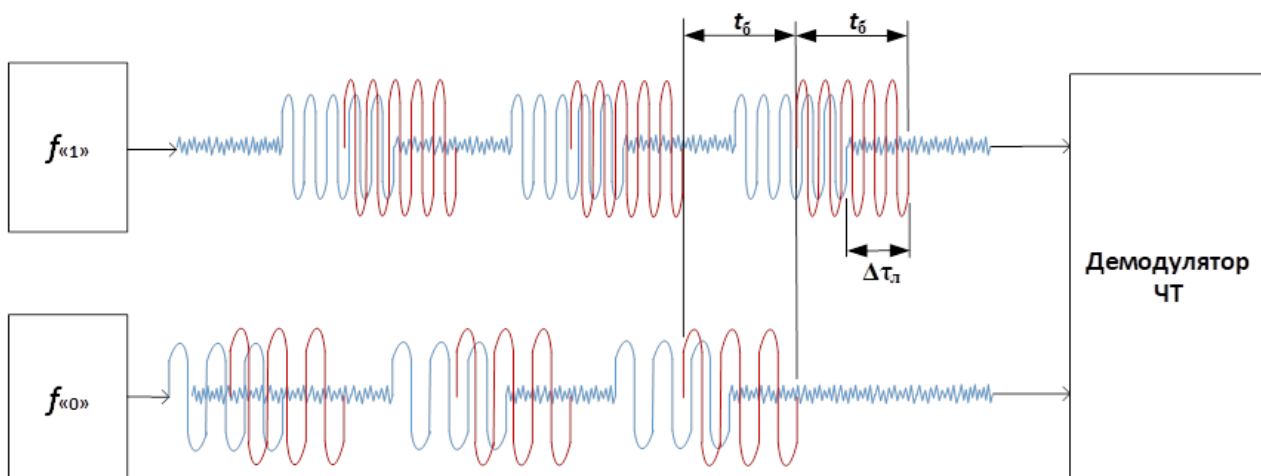


Рис. 8. Характер изменения структуры ОСП на входе демодулятора при наличии задержки второго луча на время $\Delta\tau_{л}$ относительно основного (режим ЧТ)

Вероятность ошибки в этом случае можно оценить по формуле (2) с учётом того, что результирующее отношение сигнал/помеха будет равно:

$$p_{\Sigma}^2 = h^2 \left[1 - \left| \frac{\Delta\tau_{л}}{t_{б}} \right| \left(1 - \frac{1}{1 + \gamma h^2} \right) \right], \quad (4)$$

где $\left| \frac{\Delta\tau_{л}}{t_{б}} \right| = \begin{cases} \frac{\Delta\tau_{л}}{t_{б}} & \text{при } \Delta\tau_{л} \leq t_{б}, \\ 1 & \text{при } \Delta\tau_{л} > t_{б}, \end{cases}$ γ – коэффициент, учитывающий значение мощно-

сти сигнала (кривая синего цвета на рис. 8) во втором луче, относительно основного (кривая красного цвета на рис. 8).

На рис. 9 приведены результаты расчётов по формуле (4) для $\Delta\tau_{л}$ равной 0; 0,2; 0,9; 1 мс и двух скоростей передачи $V = 100$ Бит/с и $V = 1000$ Бит/с, в предположении, что исходно $\frac{P_{c1} \cdot t_{100}}{v^2} = \frac{P_{c2} \cdot t_{1000}}{v^2}$ (за счёт использования радиопередающих устройств (РПДУ) с разными мощностями излучения).

Как следует из анализа графиков, на относительно малых скоростях передачи ($V \leq 100$ Бит/с), когда длительность одного бита информации значительно больше времени задержки между лучами, вероятность ошибки p_o увеличивается несущественно (кривые красного и синего цвета). Однако если $\Delta\tau_{л}$ сравнимо с

длительностью элемента сигнала или превосходит её, то, в зависимости от значения γ , p_o может увеличиться до неприемлемо низкой величины (кривые зелёного и фиолетового цвета на рис. 9). Причем при $\Delta\tau_{л} \geq t_6$ вероятность ошибки будет слабо зависеть от мощности излучения сигнала (кривая зеленого цвета).

Повышение вероятности приёма в условиях межсимвольной интерференции, обусловленной дискретной многолучёвостью, можно обеспечить либо путём выделения луча с максимальным уровнем сигнала и подавлением (компенсацией) остальных лучей, либо методом оптимального сложения сигналов от всех лучей.

Реализация 2-го метода может быть наиболее эффективно решена при использовании для передачи информации широкополосных сигналов (ШПС), а на приёме – согласованных фильтров [7].

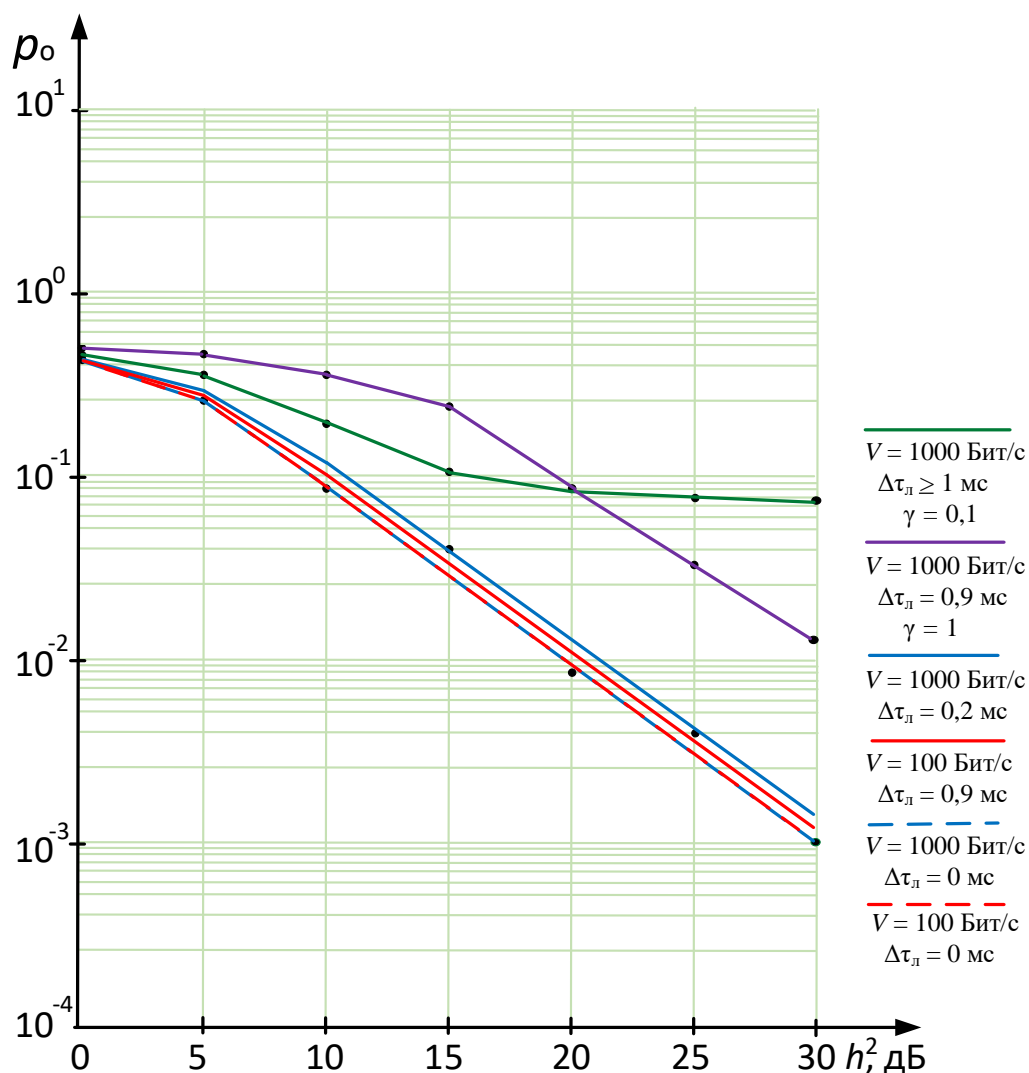


Рис. 9. Зависимость вероятности ошибки в приеме бита сообщения от отношения сигнал/помеха в рэлеевском канале при различных задержках лучей $\Delta\tau_{л}$ и скоростях передачи V

Предполагая, что требуется разделять лучи с $\Delta\tau_{л} > 50$ мкс, необходимо обеспечить ширину свёртки сигнала на выходе согласованного фильтра

$\Delta t_c \approx 20 \dots 30$ мкс, следовательно, при длительности $\Delta t_{\text{ШПС}} \approx 2-3$ мс база сигнала должна составлять не менее $B > 100$, а сигнал будет занимать полосу частот $\Delta f_{\text{ШПС}} \approx 35 \dots 50$ кГц. Однако, в КВ канале из-за высокой вероятности наличия в такой полосе нескольких сосредоточенных помех и низкого коэффициента амплитудно-частотной корреляции получить свёртку сигнала с необходимой Δt_c проблематично [8].

Исходя из этого, целесообразно экспериментально оценить эффективность использования ШПС с полосой сигнала $\Delta f_{\text{ШПС}} \approx 3$ кГц и $\Delta t_{\text{ШПС}} \approx 7$ мс ($B \approx 21$), позволяющего теоретически разделить и обеспечить эффективное сложение сигналов в модах с временной задержкой $\Delta t_{\text{л}} \geq 0,35$ мс, сохраняя при этом относительную скрытность передачи. Повышение скорости V обеспечивается за счёт увеличения объёма алфавита (числа разных ШПС сигналов).

Безусловно, из наиболее известных и широко внедряемых в современных модах методов повышения вероятности приёма в условиях нестационарности канала связи является применение различных модификаций испытательного (зондирующего) сигнала и эквалайзеров [3, 9-12], реализуемых в модах параллельного и последовательного типов, эффективность которых будет рассмотрена далее.

Разделение лучей с последующим сложением, возможно также реализовать путем задействования адаптивных «цифровых» фазированных антенных решёток (ЦФАР). При этом помимо формирования максимумов диаграмм направленности (ДН) в направлении сигналов (лучей), такая антенная система теоретически может обеспечить подавление сосредоточенных помех, попавших в его частотную полосу. Однако практическая реализация этого метода затруднена из-за априорно неизвестных углов прихода многолучевого сигнала, кроме того, адаптивная компенсация помех в КВ канале в «плохих» условиях оказывается недостаточно эффективной [13].

Одним из решений этих проблем является использование мультидиаграммной ЦФАР со статическим «веером» диаграмм направленности [14], структурная схема которой приведена на рис. 10.

На базе 32-элементной двухкольцевой антенной системы (2КФАР) с использованием многоканальных SDR-радиоприёмных устройств (МРПУ) формируется 360 парциальных диаграмм направленности в азимутальной плоскости для каждого из 10 углов по вертикали.

Таким образом, «веер» состоит из $M_n = 3600$ парциальных диаграмм. Как показало компьютерное моделирование, такая система всегда обеспечивает, независимо от фединга сигнала (помехи) по амплитуде, углу места и азимуту (что характерно для КВ канала [15]) «нахождение» парциальных диаграмм для любого короткого блока информации с лучшими характеристиками по конечному качеству приёма, чем адаптивная ЦФАР. При этом за счёт использования SDR многоканальных радиоприёмных устройств одновременно может обеспечиваться заданное число направлений связи с различными рабочими частотами ($F_1 \dots F_k$) на рис. 10.

Практическая проверка устройства с $M_n = 100$ показала положительные результаты.

Следует отметить, что, мультидиаграммная антенная решётка малочувствительна к точности устанавливаемых значений фазовых (φ_i) и амплитудных (A_i) коэффициентов при формировании парциальных диаграмм направленности.

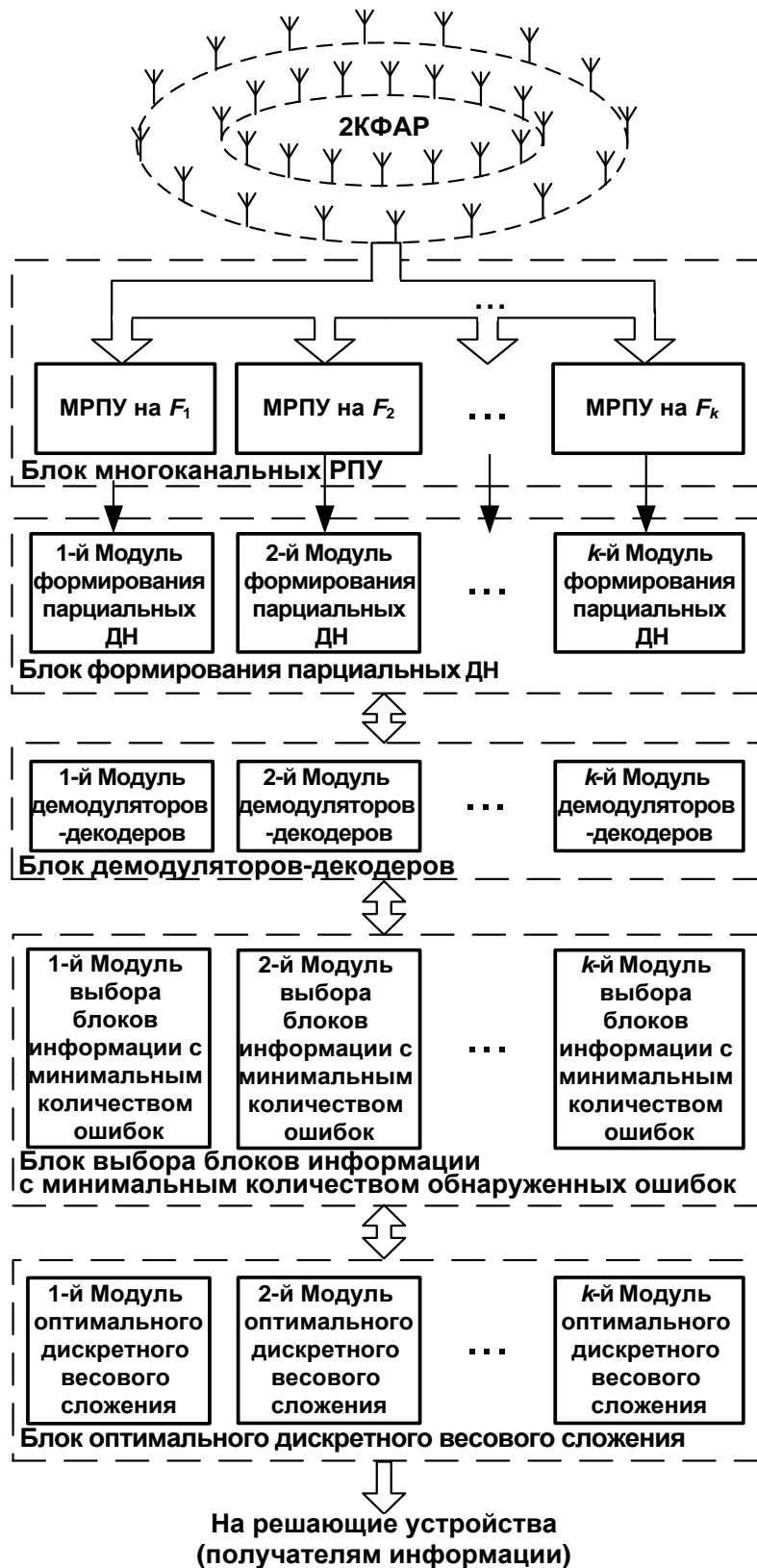


Рис. 10. Структурная схема мультидиаграммной ЦФАР со статическим «веером» диаграмм направленности

Этот факт можно объяснить тем, что при $M \rightarrow \infty$ даже в случае установки φ_i и A_i по случайному закону, с вероятностью $P \rightarrow 1$ (в соответствии с теоремой «больших чисел») найдётся такая ДН, в которой основной «лепесток» будет по азимуту и углу места направлен на полезный сигнал, а зона ослабленного («нулевого») приёма – на помехи.

2. Влияние диффузной многолучёвости на скорость передачи информации

В ходе проведения ряда экспериментальных работ и трассовых испытаний КВ радиолиний было обнаружено, что вследствие неоднородности слоёв ионосферы даже при условии наличия однолучевого дискретного канала в точке приёма наблюдается группа неразделимых лучей с общей длительностью $\Delta\tau \approx 50 \dots 300$ мс [3, 6, 16].

Наличие такой диффузной многолучёвости является ещё одним из ограничений для увеличения скорости обмена данными по КВ-радиотрактам. В настоящее время не разработаны «механизмы», позволяющие исключить в заданной области отражения радиоволны неоднородности и так называемые «плавающие» ионосферные возмущения, являющиеся причиной диффузной многолучёвости, хотя эксперименты по локальному изменению характеристик ионосферы ведутся в России и за рубежом [17].

В работе [18] показано, что при диффузной многолучёвости (ДМ) добиться заметного повышения интервала частотной корреляции F_k (значит и потенциальной возможности увеличения скорости передачи), связанной с величиной относительного времени запаздывания $\Delta\tau_{\text{л}}$ соотношением $F_k = 1/\Delta\tau_{\text{л}}$, можно путем снижения рабочей частоты. Для возможности использования такой рекомендации в реальных условиях связи в направлениях «берег-море-берег» необходимо учесть ряд факторов. Для организации сеансов связи НК (ПЛ) с береговым пунктом управления (ПУ) используется почасовой список рабочих частот, заранее назначаемых в соответствии с прогнозом распространения радиоволн и рекомендациями по выбору оптимальных рабочих частот $F_{\text{орч}}$ (как правило $F_{\text{орч}} \approx 0,15 \dots 0,2 F_{\text{МПЧ}}$, рис. 11).

Для примера на рис. 11 а приведён почасовой (UT) график изменения максимально применимых частот $F_{\text{МПЧ}}$ и соотношения P_s/P_n для одного из дней осеннего сезона, рассчитанные в соответствии с [4, 5] (трасса протяжённостью $R \approx 3000$ км район Земли Франца Иосифа – Калининград). Как следует из рис. 11 б, переход в промежутке времени 9...11 часов с $F_{\text{орч}} \approx 9,5$ МГц на пониженную рабочую частоту $F_p \approx 5$ МГц, как рекомендовано в [18], приведет к снижению уровня отношения P_s/P_n на величину 14...21 дБ (для различных радиотрасс эта величина может изменяться от 3 до 22 дБ). При этом следует учитывать, что для повышения скорости передачи необходимо соответствующее увеличение этого соотношения.

Для примера на рис. 12 приведены графики, отражающие зависимость вероятности ошибки на бит BER (Bit Error Rate) от отношения сигнал/шум SNR (Signal-To-Noise Ratio) P_s/P_n для различных скоростей передачи, реализуемых

путём изменения вида модуляции сигнала [19]. Как следует из анализа графиков, при сохранении вероятности ошибки на уровне $p_o = 10^{-2} \dots 10^{-3}$, для заметного увеличения скорости передачи потребуется приращение мощности передатчика $P_{РПДУ}$ на 5...10 дБ. Таким образом, для достижения цели, поставленной в работе [18] для конкретной рассматриваемой радиотрассы будет необходимо обеспечить замену штатного РПДУ с $P \approx 1$ кВт на РПДУ $P_{max} > 40$ кВт, что для целесообразности практического применения метода не требует комментариев.

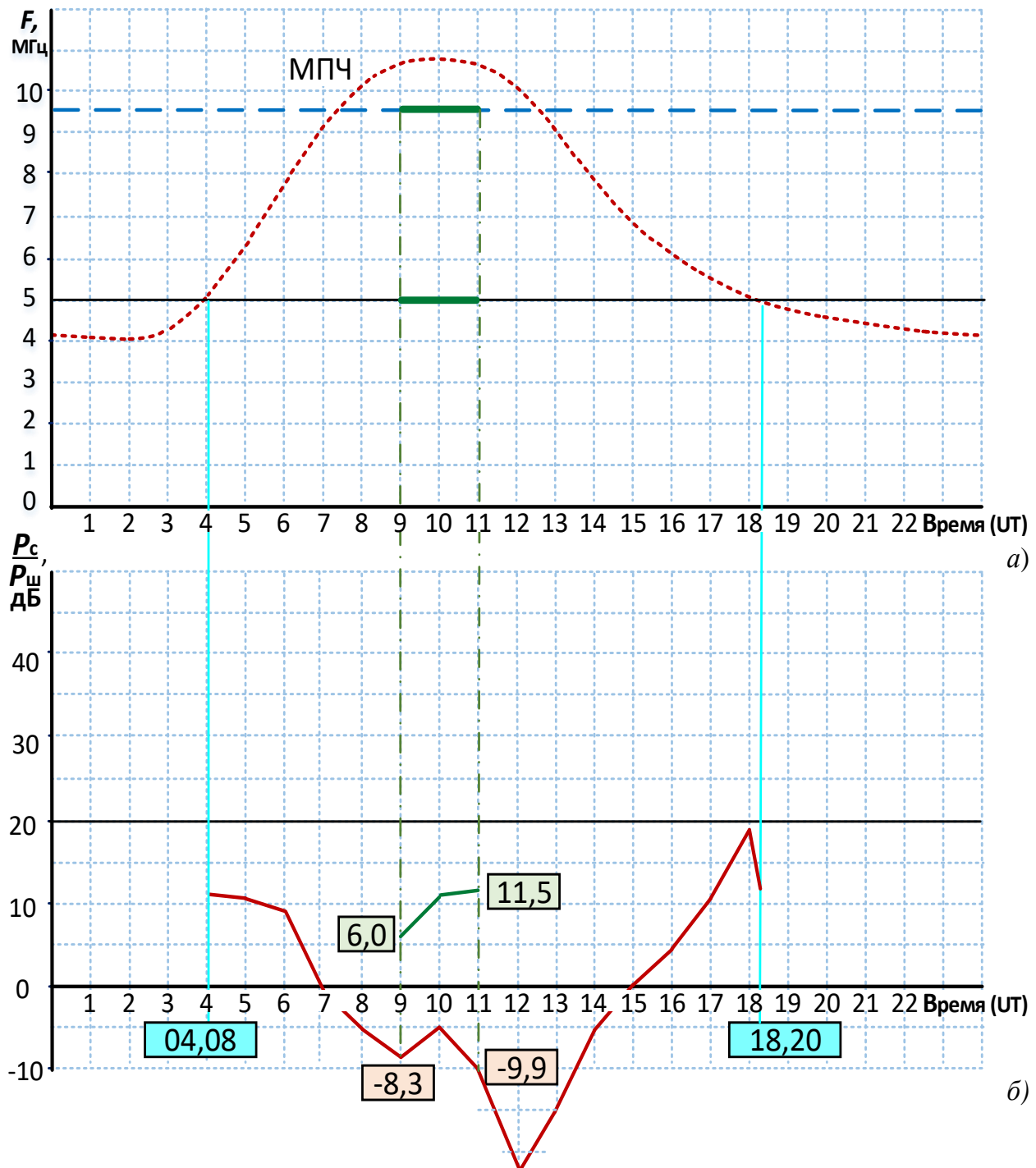


Рис. 11. Почасовой график изменения МПЧ и соотношения $P_c/P_{ш}$ (вариант для осеннего сезона)

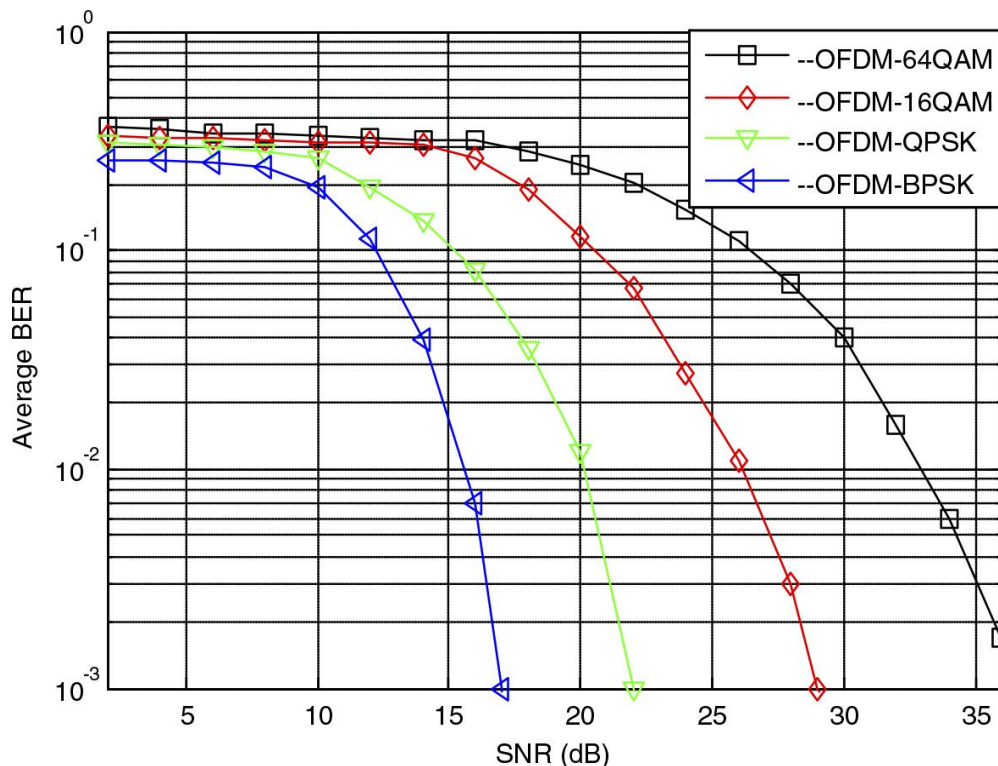


Рис. 12. Зависимость вероятности ошибки BER от отношения сигнал/шум SNR для разных скоростей передачи, реализуемых путём изменения вида модуляции сигнала

Кроме того, снижение рабочей частоты ниже $F_p \approx 0,7 F_{МПЧ}$ приведёт к повышению вероятности появления многолучёвости с двумя и более дискретными лучами (см. рис. 4 и рис. 13 [20]), что также может снизить возможный положительный эффект от изменения F_p .

Дополнительно следует обратить внимание, что при организации на береговом приёмном центре пространственно-разнесённого приёма, его эффективность при уменьшении рабочей частоты снизится, поскольку, как утверждают авторы [21], с понижением диффузной многолучёвости увеличивается коэффициент пространственной корреляции R , т. е. в этом случае при использовании даже двух разнесённых антенн изменение значения R от 0,6 до $R \approx 0,8$ приведёт к энергетическим потерям до нескольких децибел, см. рис. 14 [7]. Кроме того, поскольку в настоящее время на приёмных радиоцентрах используются ЦФАР на базе активных антенн, то с понижением рабочей частоты будет уменьшаться их чувствительность и, соответственно, помехоустойчивость приёма из-за возрастания собственных шумов, рис. 15 [2].

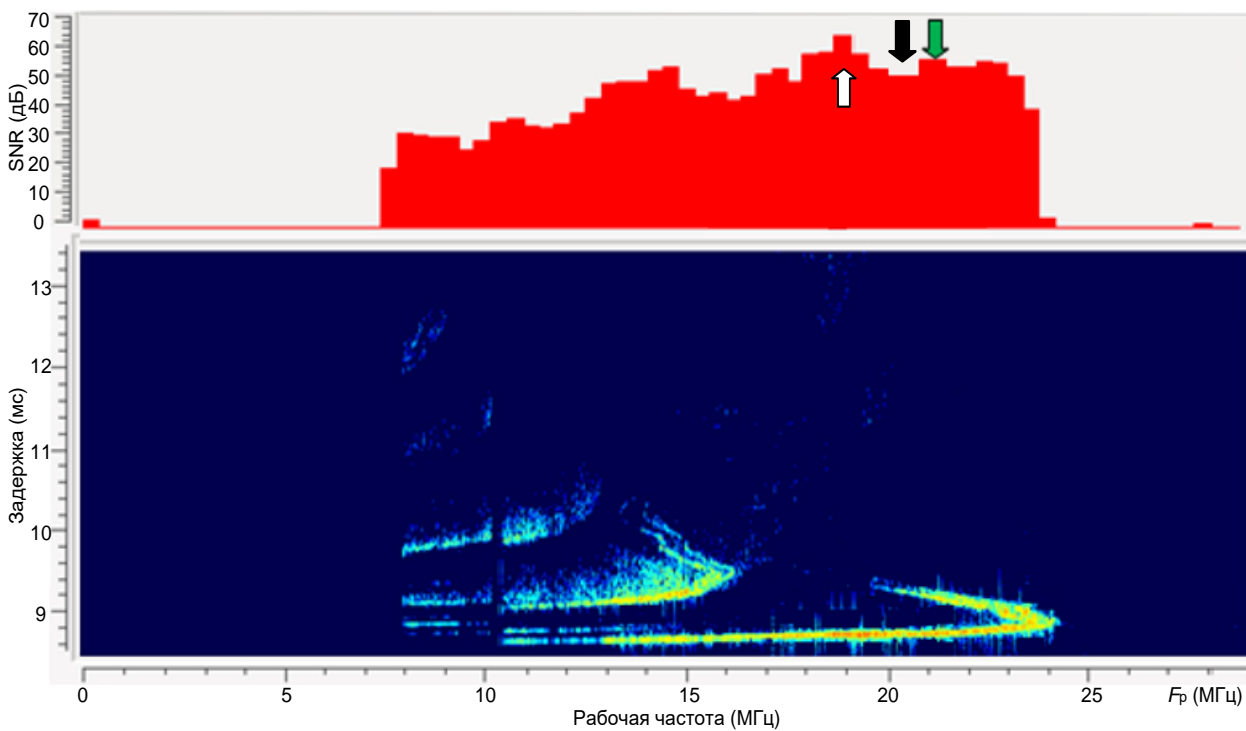


Рис. 13. Ионограмма, полученная путём наклонного зондирования на трассе Кипр – Йошкор-Ола*

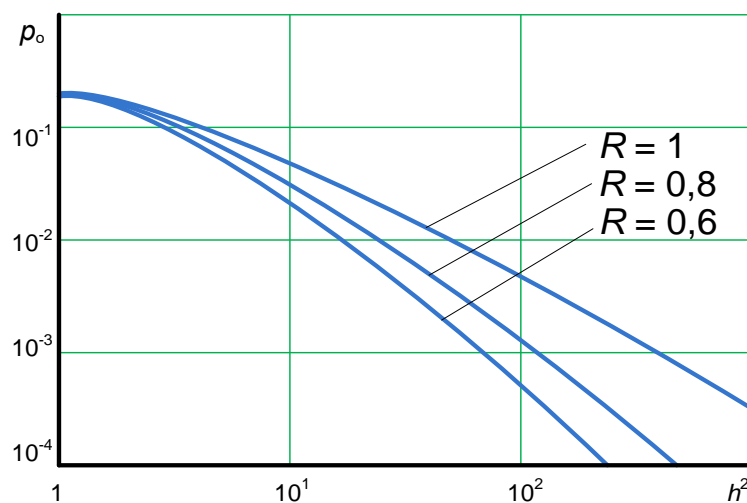


Рис. 14. Зависимость вероятности ошибки от отношения P_c/P_n при различном коэффициенте пространственной корреляции R приемных антенн

* **Примечание к рис. 13.** Приведённая на рис. 13 ионограмма, полученная путём наклонного зондирования на трассе Кипр – Йошкор-Ола ($D \approx 2650$ км) [20] даёт наглядное представление о влиянии выбора рабочих частот F_p , а также методов обработки и вида сигнала на потенциальное качество приёма. Так, например, в случае предварительного назначения рабочих частот (для симплексных радиолиний) в соответствии с типовыми рекомендациями $F_p \approx 0,85 \cdot F_{МПЧ}$ (в районе зелёной стрелки на рис. 13) для «высокоскоростных» радиолиний ($V > 1000$ Бит/с) с видами модуляции N-FSK, N-PSK будет наблюдаться значительная межсимвольная интерференция, что без принятия специальных мер может существенно снизить вероятность правильного приёма, однако в случае использования ШПС сигнала с малой базой имеется возможность разделения лучей с их последующим сложением ($\Delta\tau_{л} \approx 0,6...0,7$ мс). При использовании адаптивных радиолиний, особенно АРЛ, имеющих режим зондирования ионосферы в реальном масштабе времени, автоматически будут выбраны разрешённые частоты в районе, обозначенном на рис. 13 белой стрелкой с установкой максимальной скорости передачи.

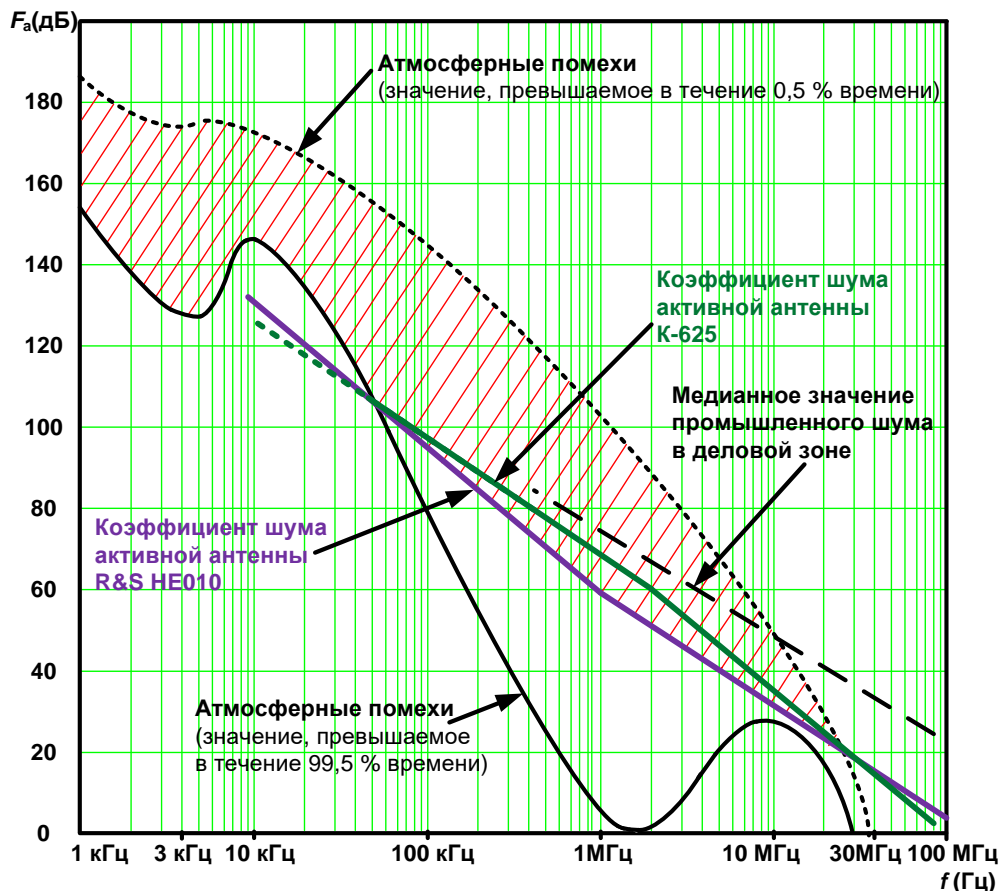


Рис. 15. Значения коэффициентов внешних шумов различных антенн F_a с учетом влияния времени суток, времени года и земной поверхности в целом

Отмеченные возможные недостатки от снижения F_p характерны при работе радиолиний в симплексном режиме (без обратной связи). В случае применения адаптивных радиолиний, оптимальная (по конечному критерию минимального количества ошибок в тексте сообщения) рабочая частота, скорость передачи и мощность излучения будут выбраны автоматически, без необходимости знания параметров диффузной многолучёвости.

Исходя из изложенного, можно сделать вывод, что одним из основных ограничений для повышения скорости передачи при ионосферном распространении радиоволн декаметрового диапазона является наличие неустраняемой диффузной многолучёвости.

В случае ограничения максимального времени относительного запаздывания лучей при ДМ значением $\Delta t_{л\max} \approx 300$ мкс, что соответствует многочисленным трассовым испытаниям, для того чтобы увеличение мощности излучения сигнала обеспечивало уменьшение вероятности ошибки в приёме бита сообщения, необходимо, чтобы $\Delta t_{б} > \Delta t_{л\max}$ (см. рис. 9, кривая зеленого цвета), а в предположении исправляющей способности демодулятора-регенератора, реализующего правильный прием бита сообщения при наличии до 50 % искажений, вызванных действием ДМ, это значение увеличится до $\Delta t_{б\min} > 600$ мкс.

Следовательно, для простых (двоичных) видов модуляции (ЧТ, ОФТ) в однолучевом канале с максимальной неустранимой ДМ при симплексной передаче команд управления повышение скорости более чем до $V \approx 1600$ Бит/с может привести к неудовлетворительному приёму даже при значительном повышении мощности радиопередающих устройств (см. рис. 9, кривая зеленого цвета).

В случае наличия энергетического запаса при приёме сообщения за счёт возможного увеличения мощности РПДУ и использования эффективных приёмных и передающих антенных систем, путем перехода на недвоичные виды модуляции (QPSK, 16-QAM, 64-QAM и т. д.) информационная скорость передачи сообщения (без учёта кодирования) в «хороших» условиях связи может быть повышена, например, при использовании 64-QAM, до 9,6 кБит/с. Поиск и «работа» на «хороших» рабочих частотах может быть обеспечена адаптивными радиолиниями (АРЛ).

Однако, для симплексных радиотрактов, когда, например, с ПУ доводится команда управления до НК (ПЛ), находящихся в режиме «радиомолчания» воспользоваться АРЛ не представляется возможным. Кроме того, когда обмен данными в направлениях «берег-море-берег» осуществляется либо в режиме немедленной выдачи, либо в достаточно редких относительно коротких сеансах связи, в случае задействования АРЛ потребуются обеспечивать первоначальную процедуру «вхождения в радиосвязь», которая может занять до нескольких минут, а в соответствие с ГОСТ 55711-2013 [22] – до 8 минут, что не обеспечивает требований по своевременности доведения сообщений.

Таким образом, исходя из основных особенностей КВ канала связи, рассмотренных выше, в приёмной части однонаправленного модема, входящего в радиотракт при обеспечении решения задачи компенсации помех в однолучевом канале, скорость передачи при QPSK (4-FSK) модуляции может быть увеличена до $V \approx 3200$ Бит/с (с учетом неблагоприятных условий по неустранимой диффузной многолучёвости) с вероятностью доведения коротких сообщений не хуже 0,95 на однокачковых радиотрассах при использовании штатных РПДУ и АФУ.

При использовании РПДУ нового поколения с повышенной мощностью и эффективных логопериодических антенн кратность модуляции (а, значит, и скорости передачи) могут быть повышены. При этом следует иметь в виду, что, как показали трассовые испытания адаптивной радиолинии «Пирс» с РПДУ мощностью $P \approx 1$ кВт [23], среднесуточная скорость передачи составляла $V \approx 1000 \dots 1400$ Бит/с, а максимальная скорость передачи (на однокачковой радиотрассе) $V \approx 9600$ Бит/с автоматически устанавливалась менее чем в 10 % времени, поэтому при высоких требованиях по вероятности доведения команды с первой передачи в режиме немедленной выдачи ориентироваться на максимально допустимые скорости, получаемые путём моделирования или показываемые в отдельных кратковременных сеансах связи, является нецелесообразным.

При выборе модема, обеспечивающего необходимую помехоустойчивость в условиях дискретной многолучёвости с обеспечением максимальной скорости передачи, можно ориентироваться на два основных направления их реализации: модемы «последовательного» и «параллельного» типа. История их

создания, недостатки и преимущества достаточно хорошо освещены в литературе [11, 12, 24].

В настоящее время нет убедительных экспериментально доказанных результатов, полученных в ходе совместных трассовых испытаний, с существенными отличиями по помехоустойчивости и скорости передачи у модемов обоих типов. Хотя, например, для северных (высокоширотных) радиотрасс, для которых характерна многолучёвость с $\Delta\tau_{\text{д}}$ до 7 мс и более, использование модемов «параллельного» типа представляется более обоснованным. Учитывая это, в современных модемах предусматривается как «последовательный», так и «параллельный» вариант работы (КВ-модем Codan-3212).

Дополнительно следует отметить, что несмотря на высокую эффективность современных модемов и технических средств приёмопередающих трактов, для гарантированного доведения команд до НК (ПЛ) в симплексном режиме с учётом наличия глубоких замираний сигнала необходимо обеспечить параллельную передачу на разных частотах с нескольких территориально-разнесённых передающих радиоцентров (ПДРЦ). В этом случае, учитывая возможность использования многоканальных SDR-РПУ [25, 26], даже при наличии 3...5 принятых сообщений после оптимального некогерентного сложения получим [7]

$$p_o = \sum_{i=0}^{Q-1} \frac{(2Q-i-2)!}{(Q-1)!(Q-i-1)!} \frac{(h_0^2 + 1)^{Q-i-1}}{(h_0^2 + 2)2^{Q-i-1}}. \quad (5)$$

где Q – количество каналов приёма.

На рис. 16 приведен график зависимости вероятности ошибки для канала с релейскими замираниями. Из анализа графиков следует, что если при одноканальном приёме p_o имеет достаточно низкие значения ($p_o \approx 10^{-1}$), то после сложения сигналов от $Q = 5$ каналов вероятность ошибки снизится до $p_o \approx 10^{-4}$ при том же отношении h^2_0 (в предположение однородных каналов приёма).

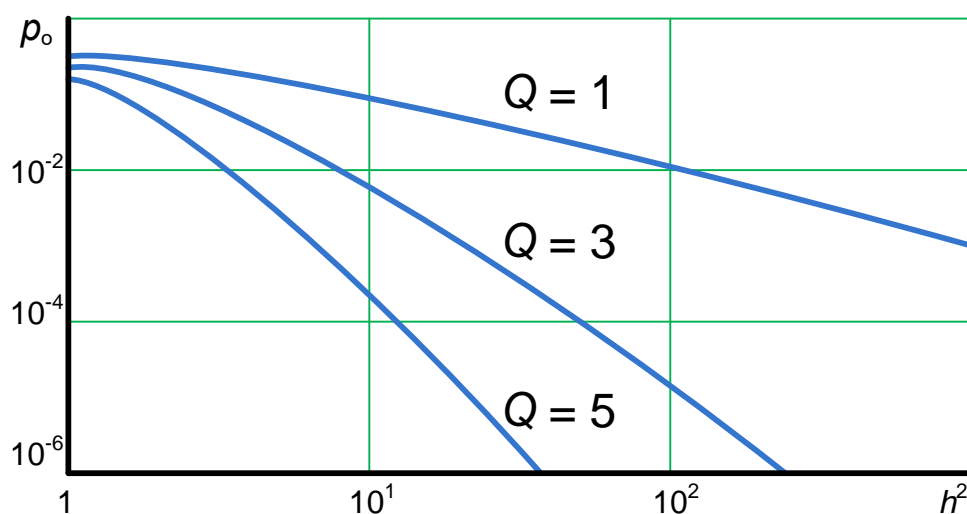


Рис. 16. Зависимости вероятности ошибки для канала с релейскими замираниями при различном числе каналов приёма

Реализация территориально-пространственного разнесённого приёма на береговых приёмных центрах также позволит обеспечить гарантированную доставку донесений от абонентов в море [27]. Использование при этом каскадного помехоустойчивого кодирования даёт возможность получить высокую вероятность правильного приёма с вероятностью трансформации знака сообщения $P_{тр} < 10^{-10}$ [28, 29, 30].

Кроме того, использование методов частотной, пространственной и территориально-разнесённой передачи (приёма) сообщений повышает устойчивость к случайным и преднамеренным помехам [27].

3. Метод передачи команд управления, инвариантный к многолучёвости

При приёме одного бита информации, передаваемого с использованием FSK модуляции с интервалом до следующего бита не менее максимальной задержки между модами $\Delta\tau_{л\ max}$ при ионосферном распространении радиоволн (в отличие от PSK), межсимвольная интерференция будет отсутствовать, хотя частотно-селективные замирания не изменятся. В этом случае диффузная и дискретная многолучёвость с $\Delta\tau_{л\ max} > \Delta t_б$, как минимум, не повлияют на вероятность приёма бита информации, а если мощности второго и т. д. лучей будут превосходить мощность шума, вероятность приёма бита информации после интегрирования увеличится, см. рис. 17.

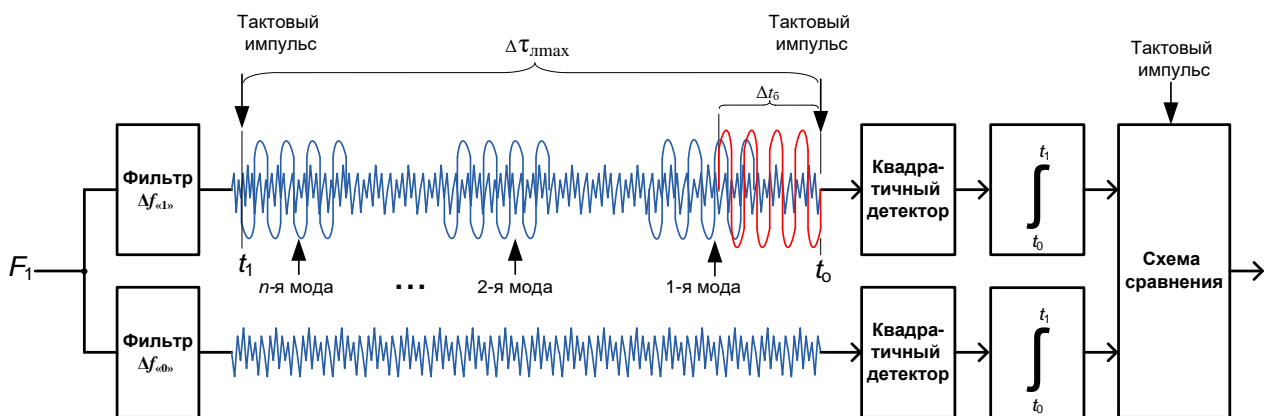


Рис. 17. Характер изменения структуры принимаемого сигнала при наличии многолучёвости

Исходя из этого, рассмотрим метод передачи сообщения со структурой, представленной на рис. 18.

Опознавательльно-синхронизирующая последовательность должна быть принята, как отмечалось ранее, с вероятностью $P_{сп}$ большей, чем требуется для вероятности приёма сообщения. Для $P_{осп} > 0,995$ и $N_{осп} = 20$ (исходя из оценок возможности ложной синхронизации при малом числе элементов $N_{осп}$ в ОСП) после несложных вычислений можно получить вероятности ошибки при приёме одного бита в ОСП: $p_{б1} \approx 10^{-4}$, тогда, предполагая, что работа ведётся в условиях релейских замираний сигнала из формулы (2) получим

$$h^2 \approx \frac{(1-2p_6)}{p_6} \approx 10^4. \quad (6)$$

Ориентируясь на значения $\frac{P_c}{v^2}$, характерные для односкачковых радиотрасс с применением штатного приёмо-передающего оборудования получим оценку

$$\Delta t_{\text{ОСП}} = \frac{h^2 v^2}{p_0} \approx 4,2 \dots 6,7 \text{ мс.}$$

Таким образом, при $\Delta t_{\text{ОСП}} \approx 6 \text{ мс}$ общая длительность ОСП составит $T_{\text{ОСП}} \approx 1,2 \text{ с}$.

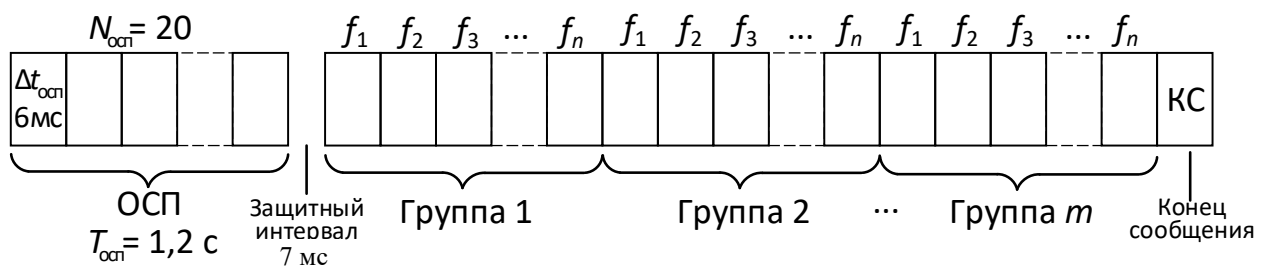


Рис. 18. Структура передаваемого сообщения

Приём синхронизирующей последовательности обеспечивает запуск таймера, выдающего сигналы на начало работы «схем сравнения» соответствующих демодуляторов в каждом канале приёма. При этом для обеспечения условия отсутствия межсимвольной интерференции вся информационная часть сообщения делится на группы, в которых каждый первый бит передаётся на частоте f_1 , второй – f_2 и n -й – на f_n . Количество n рабочих частот определяется исходя из соотношения

$$n > \left\lceil \frac{\Delta \tau_{\text{л max}}}{\Delta t_6} \right\rceil + 1.$$

Значение Δt_6 можно оценить аналогично $T_{\text{ОСП}}$, учитывая при этом, что при использовании каскадного помехоустойчивого кодирования со скоростью $W \approx 1/2$ для получения итогового значения $p_0 < 10^{-5} \dots 10^{-6}$ достаточно обеспечить вероятность ошибки в канале связи $p_0 > 5 \cdot 10^{-2}$ (а за счет повышения кодовой избыточности и при меньших величинах p_0 [28]). Тогда при «нижнем» значении

$\frac{P_c}{v^2}$ длительность одного бита сообщения должна составлять $\Delta t_6 > 0,13 \text{ мс}$.

Ограничиваясь значением $\Delta t_6 \approx 0,2 \text{ мс}$ получим потенциальную скорость передачи информации при FSK: $V \approx 5 \text{ кБит/с}$, а при переходе на 4-FSK до $V \approx 10 \text{ кБит/с}$. На рис. 19 показан порядок передачи информационных бит для случая $n = 36$ ($\Delta \tau_{\text{л max}} \approx 7 \text{ мс}$ [31], $\Delta t_6 = 0,2 \text{ мс}$). «Платой» за увеличение скорости передачи без использования эквалайзера, испытательного (зондирующего) сигнала или канала обратной связи, является необходимость наличия значительного списка рабочих частот, что, впрочем, характерно и для АРЛ, а также для ак-

тивно используемого в настоящее время режима передачи сообщения на большом количестве рабочих частот, устанавливаемых по псевдослучайному закону (ППРЧ) [32].

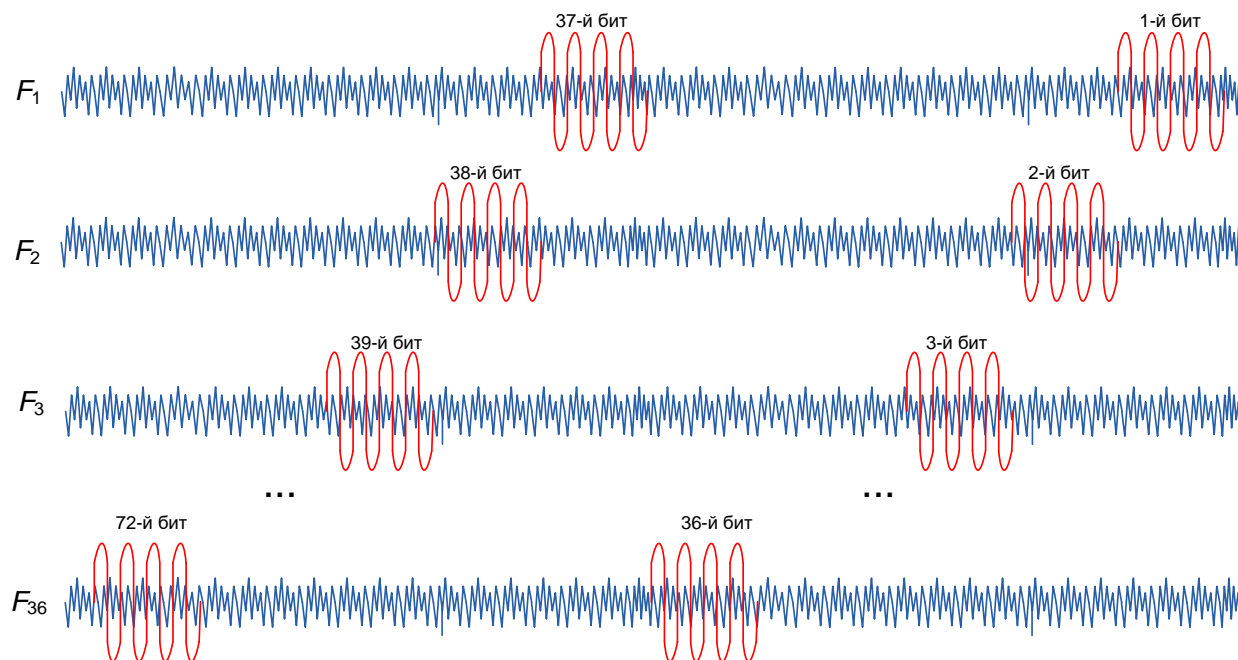


Рис. 19. Порядок передачи информационных бит для случая $n = 36$ в каждой группе сообщения

Реализация метода должна осуществляться с использованием многоканальных SDR радиоприемных и возбуждательных устройств [33], что позволит минимизировать время на смену рабочих частот при передаче команды и исключить процедуру переключения частот в процессе её приёма.

Заключение

1. При высоких требованиях к вероятности доведения команд управления (донесений) до(от) удалённых морских объектов максимальные скорости передачи в случае использования «простых» видов модуляции не должны превышать $V = 1200 \div 1600$ Бит/с с обязательной организацией частотно-, пространственно- или территориально-разнесённой передачи (приёма) информации.

2. Эффективным методом обеспечения приёма в условиях нестационарного канала связи при действии случайных и преднамеренных помех является применение мультидиаграммной цифровой фазированной антенной решётки со статическим «веером» диаграмм направленности.

3. Учитывая минимальные значения интервала частотной корреляции сигналов при ионосферном распространении радиоволн целесообразно проведение экспериментальных работ по оценке эффективности применения в КВ радиоприемах широкополосных сигналов с малой базой ($B = 20 \dots 30$).

4. Применение многоканальных SDR приёмных и возбуждательных устройств позволяет реализовать метод высокоскоростной передачи данных в условиях наличия дискретной и диффузной многолучёвости.

Литература

1. Николашин Ю. Л., Будко П. А., Жуков Г. А. Общие принципы построения радиотракта устойчивого доведения информации до исполнительных звеньев глобально перемещающихся объектов. Часть 1 // Морская радиоэлектроника. 2022. № 2. С. 30–35.
2. Николашин Ю. Л., Будко П. А., Жуков Г. А. Общие принципы построения радиотракта устойчивого доведения информации до исполнительных звеньев глобально перемещающихся объектов. Часть 2 // Морская радиоэлектроника. 2022. № 3. С. 34–38.
3. Пукса Д. О., Романов Ю. В. Результаты трассовых испытаний адаптивной пакетной КВ-радиолинии высокоскоростной передачи данных файлового типа разработки ОАО «ОНИИП» // Сборник докладов III Международной научно-технической конференции (Омск, 6-8 октября 2015 г.). – Омск: Издательский дом «Наука», 2015. – С. 186–192.
4. Ладанов М. В., Ведищев А. М., Кизима С. В., Лавров Г. В. Планирование радиосвязи на коротких волнах для магистральных радиотрасс // Электросвязь. 2012. № 9. С. 3–8.
5. Описание программы «Прогноз прохождения радиоволн и доступности связи на заданных частотах» [Электронный ресурс]. 25.05.2011. URL: <http://www.radian-m.ru/prognoz.php> (дата обращения: 23.02.2023).
6. Мартынов Е. М., Малыгин В. Б., Сергеев О. И. Оценка многолучёвости КВ-сигнала по результатам импульсного наклонного зондирования // Радиотехника. 1982. № 5. С. 75–77.
7. Финк Л. М. Теория передачи дискретных сообщений. М.: Советское радио, 1970. 728 с.
8. Жуков Г. А., Будко П. А. Широкополосные и узкополосные сигналы в радиолиниях декаметрового диапазона волн // Морская радиоэлектроника. 2020. № 2. С. 32–37.
9. Кловский Д. Д., Николаев Б. И. Инженерная реализация радиотехнических схем (в системах передачи дискретных сообщений в условиях межсимвольной интерференции). М.: Связь, 1975. 200 с.
10. Будвис Н. С., Хмырова Н. П. Высокоскоростной модем последовательного типа с интерактивной обработкой сигнала // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 11. С. 7–18.
11. Землянов И. С. Модемы с ортогональными поднесущими мобильных систем коротковолновой связи с адаптацией к условиям распространения радиоволн: дисс. ... канд. техн. наук. Омск, 2016. 183 с.
12. Маслаков М. Л. Высокоскоростной последовательный КВ радиомодем передачи данных // Электросвязь. 2014. № 7. С. 1–4.
13. Метелев С.А. Модификация модели Ватерсона ионосферного канала коротковолновой радиосвязи для адаптивного пространственного разнесенного приема // Известия вузов. Радиофизика. 2012. Т. LV. № 4. С. 266–279.

14. Николашин Ю. Л., Будко П. А., Жуков Г. А. Нейробионический подход к решению задачи оптимизации приёма информации в канале с переменными параметрами // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2016. № 1. С. 49–57.

15. Кукес И. С., Старик М. Е. Основы радиопеленгации. М.: Советское радио. 1964. 640 с.

16. Бельгибаев Р. Р. Комплекс для оценки состояния ионосферных линий и показателей качества модемов узкополосной КВ связи на основе пассивного зондирования: дисс. ... канд. техн. наук. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технический университет, 2017. 124 с.

17. Дмитриев В. Г., Куприянов А. И., Перунов Ю. М. Техногенные воздействия на среду распространения радиосигнала // Техника средств связи. 2023. № 1 (161). С. 2–12. DOI: 10.24412/2782-2141-2023-1-2-12.

18. Пашинцев В. П., Скорик А. Д., Коваль С. А., Алексеев Д. В., Сенокосов М. А. Алгоритм расчета интервала частотной корреляции коротковолновой радиоперелинии с учетом сферичности и мелкомасштабных неоднородностей ионосферы // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 2. С. 49–72. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10203.

19. Zeeshan Sabir. Performance enhancement of wireless mobile adhoc networks through improved error correction and ICI cancellation. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing a Springer Open Journal 2012, 2012:216 [Электронный ресурс] 2012. – URL: <http://asp.eurasipjournals.com/content/2012/1/216> (дата обращения: 25.02.2023).

20. Иванов Д. В., Иванов В. А., Рябова Н. В., Елсуков А. А., Рябова М. И., Чернов А. А. Система частотного обеспечения каналов ВЧ связи на базе нового цифрового ионозонда на платформе usgr // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2014. Т. 5. № 4. С. 133–136.

21. Пашинцев В. П., Коваль С. А., Цимбал В. А., Тоискин В. Е., Сенокосов М. А., Скорик А. Д. Структурно-многолучевой подход к разработке пространственно-временной модели одномодового декаметрового канала связи с диффузной многолучевостью // Журнал радиоэлектроники. 2022. № 6. DOI: 10.30898/1684-1719.2022.6.3.

22. ГОСТ 55711-2013 Комплекс технических средств автоматизированной адаптивной ВЧ (КВ) дуплексной радиосвязи. Алгоритмы работы. М.: Стандартинформ, 2018. [Электронный ресурс]. <https://docs.cntd.ru/document/1200105902>. – URL: <http://asp.eurasipjournals.com/content/2012/1/216> (дата обращения: 25.02.2023).

23 Каталог РЖД / Комплекс технических средств «Редан-Пирс» [электронный ресурс] – URL: <https://www.rimr.ru/catalog/rzhd/avtomatizirovannyy-adaptivnyy-kompleks-tekhnicheskikh-sredstv-redan-pirs> (дата обращения: 25.02.2023).

24. Романов Ю. В. Эволюция высокоскоростных КВ-радиомодемов в XX веке // Техника радиосвязи. 2016. Вып. 1 (28). С. 72–88.

25. АО «ОНИИП»: официальный сайт предприятия [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.oniip.ru/produkciz> (дата обращения 05.05.2023).

26. Николашин Ю. Л., Кулешов И. А., Будко П. А., Жолдасов Е. С., Жуков Г. А. SDR радиоустройства и когнитивная радиосвязь в декаметровом диапазоне частот // Научно-технические технологии в космических исследованиях Земли. 2015. Т. 7. № 1. С. 20–31.

27. Николашин Ю. Л., Мирошников В. И., Будко П. А., Жуков Г. А. Территориально-разнесенный приём информации от глобально-перемещающихся объектов морского базирования // Морская радиоэлектроника. 2017. № 4. С. 18–23.

28. Николашин Ю. Л., Будко П. А., Жуков Г. А., Угрик Л. Н. Новое направление создания помехоустойчивых радиолиний декаметрового диапазона волн // Техника средств связи. 2021. № 1 (153). С. 2–26.

29. Тамразян Г. М. Программно-аппаратная реализация оптимального алгоритма декодирования каскадных кодов на базе кода Рида-Соломона в адаптивных системах обмена данными: дисс. ... канд. техн. наук. Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2017. 139 с.

30. Золотарев В. В., Овечкин Г. В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы. М.: Горячая линия – Телеком, 2004. 126 с.

31. Recommendation ITU-R F.1487. Testing of HF Modems with Bandwidths of up to about 12 kHz using ionospheric Channel Simulators, 2000.

32. Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. СПб.: 2013. 166 с.

33. Николашин Ю. Л., Мирошников В. И., Будко П. А., Жуков Г. А. Когнитивная система связи и влияние использования данных мониторинга на помехоустойчивость сверхузкополосных декаметровых радиолиний // Морская радиоэлектроника. 2015. № 2 (52). С. 16–22.

References

1. Nikolashin Yu. L., Budko P. A., Zhukov G. A. General principles for constructing a radio path for sustainable communication of information to the executive units of globally moving objects. Part 1. *Marine radio electronics*, 2022, No. 2, pp. 30–35 (in Russian).

2. Nikolashin Yu. L., Budko P. A., Zhukov G. A. General principles for constructing a radio path for sustainable communication of information to the executive units of globally moving objects. Part 2. *Marine radio electronics*, 2022, No. 3, pp. 34–38 (in Russian).

3. Puksa D. O., Romanov Yu. V. Rezul'taty trassovykh ispytaniy adaptivnoj paketnoj KV-radiolinii vysokoskorostnoj peredachi dannykh fajlovogo tipa razrabotki OAO «ONIIP» [Results of track tests of adaptive packet HF radio line of high-speed data transmission of file type developed by JSC "ONIIP"]. *Sbornik dokladov III Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii*. [Collection of reports of the III International Scientific and Technical Conference]. (Omsk, October 6-8, 2015). Omsk, Publishing House "Nauka", 2015, pp. 186–192 (in Russian).

4. Ladanov M. V., Vedishchev A. M., Kizima S. V., Lavrov G. V. Planirovanie radiosvyazi na korotkih volnah dlya magistral'nyh radiotrass [Planning of radio communication on short waves for trunk radio routes]. *Electrosvyaz*, 2012, no. 9, pp. 3–8 (in Russian).

5. Opisaniye programmy «Prognoz prokhozhdeniya radiovoln i dostupnosti svyazi na zadannykh chastotakh» [Description of the program "Forecast of the passage of radio waves and availability of communication at given frequencies"]. May 25, 2011. Available at: <http://www.radian-m.ru/prognoz.php> (accessed 23 February 2023) (in Russian).

6. Martynov E. M., Malygin V. B., Sergeev O. I. Ocenka mnogoluchyovosti KV-signala po rezul'tatam impul'snogo naklonnogo zondirovaniya [Evaluation of the multipath of the HF signal based on the results of pulsed inclined sensing]. *Radiotekhnika*, 1982, no. 5, pp. 75–77 (in Russian).

7. Fink L. M. *Teoriya peredachi diskretnyh soobshchenij* [Theory of transmission of discrete messages]. Moscow, Soviet Radio Publ., 1970. 728 p. (in Russian).

8. Zhukov G. A., Budko P. A. Broadband and narrowband signals in the lines of waves of decameter range. *Marine radio electronics*, 2020, no. 2, pp. 32–37 (in Russian).

9. Klovsky D. D., Nikolaev B. I. *Inzhenernaya realizaciya radiotekhnicheskikh skhem (v sistemah peredachi diskretnyh soobshchenij v usloviyah mezhsimvol'noj interferencii)* [Engineering implementation of radio engineering schemes (in discrete message transmission systems under conditions of intersymbol interference)]. Moscow, Svyaz Publ., 1975. 200 p. (in Russian).

10. Budvis N. S., Khmyrova N. P. Vysokoskorostnoj modem posledovatel'nogo tipa s interaktivnoj obrabotkoj signala [High-speed serial modem with interactive signal processing]. *Uspekhi sovremennoj radioelektroniki* [Telecommunications and Radio Engineering]. 2012, no. 11, pp. 7–18 (in Russian).

11. Zemlyanov I. S. *Modemy s ortogonal'nymi podnesushchimi mobil'nyh sistem korotkovolnovoj svyazi s adaptaciej k usloviyam rasprostraneniya radiovoln*. Diss. ... kand. tekhn. nauk. [Modems with orthogonal subcarriers of mobile shortwave communication systems with adaptation to radio wave propagation conditions. Ph.D. Tesis]. Omsk, 2016. 183 p. (in Russian).

12. Maslakov M. L. Vysokoskorostnoj posledovatel'nyj KV radiomodem peredachi dannyh [High-speed serial HF radio modem for data transmission]. *Electrosvyaz*, 2014, no. 7, pp. 1–4 (in Russian).

13. Metelev S. A. Modifikaciya modeli Vatersona ionosfernogo kanala korotkovolnovoj radiosvyazi dlya adaptivnogo prostranstvennogo raznesennogo priema [Modification of the Waterson model of the ionospheric channel of short-wave radio communication for adaptive spatial spaced reception]. *Radiophysics and quantum electronics*, 2012, v. LV, no. 4, pp. 266–279 (in Russian).

14. Nikolashin Yu. L., Budko P. A., Zhukov G. A. Nejobionicheskiy podhod k resheniyu zadachi optimizacii priyoma informacii v kanale s peremennymi parametrami [A neurobionic approach to solving the problem of optimizing

information reception in a channel with variable parameters]. *Neurocomputers*, 2016, no. 1, pp. 49–57 (in Russian).

15. Kukes I. S., Starik M. E. *Osnovy radiopelengacii* [Fundamentals of radio direction finding]. Moscow, Soviet radio Publ., 1964. 640 p. (in Russian).

16. Belgibaev R. R. *Kompleks dlya ocenki sostoyaniya ionosfernyh linij i pokazatelej kachestva modemov uzkopolosnoj KV svyazi na osnove passivnogo zondirovaniya*. Diss. ... kand. tekhn. nauk. [A complex for assessing the state of ionospheric lines and quality indicators of narrow-band HF modems based on passive sensing. Ph.D. Tesis]. Yoshkor-Ola, Volga State Technical University, 2017. 124 p. (in Russian).

17. Dmitriev V. G., Kupriyanov A. I., Perunov Yu. M. Technogenic impacts on the medium of propagation of the radio signal. Means of Communication Equipment. 2023. No. 1 (161). Pp. 2–12. DOI: 10.24412/2782-2141-2023-1-2-12. (in Russian).

18. Pashintsev V. P., Skorik A. D., Koval S. A., Alekseev D. V., Senokosov M. A. Algorithm of calculation of an interval of frequency correlation of the short-wave radio line taking into account sphericity and small-scale non-uniformity of an ionosphere. Systems of Control, Communication and Security, 2020, no. 2, pp. 49–72. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10203 (in Russian).

19. Zeeshan Sabir. Performance enhancement of wireless mobile adhoc networks through improved error correction and ICI cancellation. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing a SpringerOpen Journal 2012, 2012:216. Available at: <http://asp.eurasipjournals.com/content/2012/1/216> (accessed 25 February 2023).

20. Ivanov D. V., Ivanov V. A., Ryabova N. V., Elsukov A. A., Ryabova M. I., Chernov A. A. Sistema chastotnogo obespecheniya kanalov VCH svyazi na baze novogo cifrovogo ionozonda na platforme usrp [Frequency support system of RF communication channels based on a new digital ionosonde on the USRP platform]. *Sistemy sinhronizacii, formirovaniya i obrabotki signalov*, 2014, vol. 5, no. 4, pp. 133–136 (in Russian).

21. Pashintsev V. P., Koval S. A., Tsimbal V. A., Toiskin V. E., Senokosov M. A., Skorik A. D. Structural-multipath approach to the development of a space-time model of a single-mode decameter communication channel with diffuse multipath. *Zhurnal Radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics]. 2022. № 6. DOI: 10.30898/1684-1719.2022.6.3 (in Russian).

22. GOST 55711-2013. The complex of technical means of automated adaptive HF (HF) duplex radio communication. Algorithms of work. Moscow, Standartinform Publ., 2018. Available at: <http://asp.eurasipjournals.com/content/2012/1/216> (accessed 25 February 2023) (in Russian).

23 Katalog RZHD / Kompleks tekhnicheskikh sredstv «Redan-Pirs» [Catalog of Russian Railways / Complex of technical means "Redan-Pier"]. Available at: <https://www.rimr.ru/catalog/rzhd/avtomatizirovanny-adaptivnyy-kompleks-tekhnicheskikh-sredstv-redan-pirs> (accessed 25 February 2023) (in Russian).

24. Romanov Yu. V. Evolyuciya vysokoskorostnyh KV-radiomodemov v XX veke [Evolution of high-speed HF radio modems in the twentieth century]. *Tekhnika*

radiosvyazi [Radio communication technology], 2016, no. 1 (28), pp. 72–88 (in Russian).

25. Oficial'nyj sayt AO «ONIIP» [Official website of JSC "ONIIP"]. Available at: <http://www.oniip.ru/produkciz> (accessed 05 May 2023) (in Russian).

26. Nikolashin Y. L., Kuleshov I. A., Budko P. A., Zholdasov E. S., Zhukov G. A. SDR radioustroystva i kognitivnaya radiosvyaz' v dekametrovom diapazone chastot [SDR radio devices and cognitive radio communication in the decameter frequency range]. *H&ES Research*, 2015, vol. 7, no. 1, pp. 20–31 (in Russian).

27. Nikolashin Yu. L., Miroshnikov V. I., Budko P. A., Zhukov G. A. Territorial'no-raznesennyj priyom informacii ot global'no-peremeshchayushchih ob'ektov morskogo bazirovaniya [Geographically dispersed reception of information from globally moving sea-based facilities]. *Marine radio electronics*, 2017, no. 4, pp. 18–23. (in Russian).

28. Nikolashin Yu.L., Budko P.A., Zhukov G.A., Ugrik L.N. A new direction for creating noise-resistant radio lines in the decameter wave range. *Means of communication equipment*, 2021, No. 1 (153), pp. 2–26 (in Russian).

29. Tamrazyan G. M. *Programmno-apparatnaya realizaciya optimal'nogo algoritma dekodirovaniya kaskadnyh kodov na baze koda Rida-Solomona v adaptivnyh sistemah obmena dannymi*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Hardware and software implementation of the optimal decoding algorithm of cascade codes based on the code Reed-Solomon in adaptive data exchange systems. Ph.D. Tesis]. Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University, 2017. 139 p. (in Russian).

30. Zolotarev V. V., Ovechkin G. V. *Pomekhoustojchivoe kodirovanie. Metody i algoritmy* [Noise-resistant coding. Methods and algorithms]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2004. 126 p. (in Russian).

31. Recommendation ITU-R F.1487. Testing of HF Modems with Bandwidths of up to about 12 kHz using ionospheric Channel Simulators, 2000.

32. Makarenko S. I., Ivanov M. S., Popov S. A. *Pomekhozashchishchennost' sistem svyazi s psevdosluchajnoj perestrojkoj rabochej chastoty* [Noise immunity of communication systems with pseudorandom tuning of the operating frequency]. St. Petersburg, 2013. 166 p. (in Russian).

33. Nikolashin Yu. L., Miroshnikov V. I., Budko P. A., Zhukov G. A. Cognitive connection system and influence of monitoring data usage on noise immunity of ultra-narrow decameter. *Marine radio electronics*, 2015, no. 2 (52), pp. 16–22 (in Russian).

Статья поступила 30 мая 2023 г.

Информация об авторах

Жуков Геннадий Анатольевич – кандидат технических наук, доцент заслуженный конструктор Российской Федерации. Советник генерального конструктора. Публичное акционерное общество «Информационные телекоммуникационные технологии» (ПАО «Интелтех»). Область научных

интересов: повышение эффективности функционирования декаметровых радиолиний и синтез радиотехнических устройств. E-mail: zhukovGA@inteltech.ru

Будко Павел Александрович – доктор технических наук, профессор. Ученый секретарь ПАО «Интелтех». Публичное акционерное общество «Информационные телекоммуникационные технологии». Область научных интересов: Синтез информационно-телекоммуникационных систем. E-mail: budko62@mail.ru

Дяченко Антон Николаевич – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Начальник отдела. Публичное акционерное общество «Информационные телекоммуникационные технологии». Область научных интересов: технологии программно-определяемых радиосистем. E-mail: dyachenkoAN@inteltech.ru.

Адрес: 197342, Россия, Санкт-Петербург, Кантемировская ул., д. 8.

Increasing the speed of data exchange in the "coast-sea-coast" directions by radio paths of the decameter wave range

G. A. Zhukov, P. A. Budko, A. N. Dyachenko

Problem statement: conducting numerous route tests shows the results of the average speed of bringing information to remote objects in the case of ionospheric propagation of radio waves is significantly lower than theoretical. At the same time, one of the decisive factors limiting the increase in speed in the radio path of the short wave range is the unsteadiness of the characteristics of the transmission medium. The article aims to substantiate the possibility of high-speed data transmission in the presence of discrete and diffuse multipath in the ionospheric radio channel. **The purpose** of the work is to consider methods for ensuring stable high-speed delivery of commands and reports between control points and globally moving objects, taking into account the characteristics of radio channels with variable parameters. **Methods used:** theory of radio wave propagation; methods of the theory of potential noise immunity; methods of increasing the probability of reception in conditions of discrete multipath, as well as the arrival of modes with "channel" and "chord" modes of wave propagation; methods of combating multipath and intersymbol interference; methods of frequency, spatial and geographically-spaced transmission (reception) of messages, etc. **The novelty** of the proposed approach to increase the speed of data exchange in the radio paths of the decameter wave range is the complex use of methods of organizing frequency, spatial- or geographically-spaced transmission (reception) of information in combination with the use of multi-channel receiving and excitatory devices built using programmable radio technology, the transition from "simple" to non-binary types of modulation, as well as to broadband signals with a small base and receiving messages on a multi-program digital phased array antenna with a static "fan" of directional patterns. **The results** of the work include theoretical and experimental substantiation of the achievability of information transmission rates when switching to non-binary types of modulation in short-wave radio paths – up to 10 kBit/s. At the same time, the "payment" for providing high-speed transmission without using an equalizer, a probing signal or a feedback channel is the need for a significant frequency resource, which, however, is typical both for adaptive radio lines and for the message transmission mode actively used today at a large number of operating frequencies set according to a pseudo-random law. **Practical significance:** it is possible to increase the probability of reception in the conditions of intersymbol interference caused by discrete multipath, either by isolating the beam with the maximum signal level and suppressing (compensating) the remaining rays, or by the method of optimal addition of signals from all rays. At the same time, the problem is solved most effectively when broadband signals are used for transmitting information, and coordinated filtering and multidirectional digital phased antenna arrays are used for reception.

Keywords: discrete multipath, diffuse multipath, information transmission rate, decameter wave range, ionospheric radio channel, radio path, multidiagram digital phased array.

Information about Authors

Gennady Anatolyevich Zhukov – Ph.D. of Engineering Sciences, Docent, Honored Designer of the Russian Federation. Advisor to the General Designer. Public Joint Stock Company “Information Telecommunication Technologies” (PJSC “Inteltech”). Field of research: improving the efficiency of decameter radio lines and synthesis of radio engineering devices. E-mail: zhukovGA@inteltech.ru.

Pavel Aleksandrovich Budko – D.Sc. of Physics Sciences, Full Professor. Scientific Secretary of PLSC “Inteltech”. Public Joint Stock Company “Information Telecommunication Technologies” Research interests: Synthesis of information and telecommunication systems. E-mail: budko62@mail.ru.

Anton Nikolaevich Dyachenko – Postgraduate. Head of the department. Public Joint Stock Company “Information Telecommunication Technologies”. Research interests: technologies of software-defined radio. E-mail: DyachenkoAN@inteltech.ru.

Address: 197342, Russia, Saint Petersburg, Kantemirovskaya str., 8.