МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДА ЦИФРОВОЙ ГОЛОСОВОЙ РАДИОЛИНИИ ДКМВ ДИАПАЗОНА

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-2-23-30

Manuscript received 11 January 2025; Accepted 30 January 2025

Варламов Владимир Олегович, Московский Технический Университет Связи и Информатики, Москва, Россия, f.vvo@bk.ru

Ключевые слова: ДКМВ диапазон, ионосферный канал, голосовые радиолинии, широкополосный сигнал, NB-LDPC код

Разработка цифровых голосовых радиолиний для диапазона декаметровых длин волн, способных работать как с сигналами, распространяющимися вдоль поверхности Земли, так и с отраженными от ионосферы, является актуальной задачей. Однако, предъявляемые к таким системам требования по энергопотреблению и габаритам приводят к жестким ограничениям на энергетический бюджет. Этот факт обуславливает необходимость разработки методик определения параметров радиограммы, учитывающей требования к полезной нагрузке линии связи и результаты прогнозирования состояния канала с целью повышения помехоустойчивости радиолинии. В данной работе представлена методика, позволяющая определить соотношение между длительностью синхропоследовательности и кодового блока по критерию наибольшей совместной вероятности обнаружения последовательности синхронизации и декодирования блока данных. При этом учитывается ограничение на максимальную длительность радиограммы, что позволяет выразить искомое соотношение через скорость помехоустойчивого кода цифровой голосовой радиолинии. Предлагаемая методика учитывает результаты прогнозирования при распространении сигнала от передающей к приемной станции вдоль поверхности Земли, и при отражении от ионосферы в зависимости от частоты, что позволяет определить кодовую скорость, максимизирующую указанную вероятность в течение наибольшего времени.

Информация об авторе:

Варламов Владимир Олегович, ассистент кафедры "Радиотехнические системы", Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, https://orcid.org/ 0000-0003-1607-9166

Для цитирования:

Варламов В.О. Методика определения скорости помехоустойчивого кода цифровой голосовой радиолинии ДКМВ диапазона // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №2. С. 23-30.

For citation:

V. O. Varlamov, "Methodology for determining the error correction code rate of the HF range digital voice radio link," *T-Comm*, 2025, vol. 19, no.2, pp. 23-30. (*in Russian*)

Введение

Диапазон декаметровых длин волн (ДКМВ) отличается возможностью создания систем связи, работающих на расстоянии, превышающем дистанцию прямой видимости, за счет эффекта отражения радиоволны от ионосферных слоев Е, F1 и F2. Этот факт активно используется как при построении систем радиовещания для регионов с малой плотностью населения, что делает экономически нецелесообразным размещение большого количества маломощных вещательных станций [1-3], так и при разработке систем связи с удаленными регионами либо экспедициями.

Поскольку частотный ресурс ДКМВ диапазона строго ограничен и составляет от 3 до 30 МГц, а диапазон, пригодный для использования в системах связи, работающих в условиях отражения радиоволны под острым углом, что наблюдается при дальностях порядка 100 км, составляет только нижнюю часть всего ДКМВ диапазона от 3 МГц до 10 МГц. По этой причине задача повторного использования частотного ресурса при построении подобных систем связи является одной из приоритетных. Большинство помех в диапазоне ДКМВ представляют собой узкополосные сигналы с пользуемых в исследуемом виде радиолиний [4], за счет чего влияние таких помех может быть снижено при помощи использования устройств частотно селективной режекции помех, например, таких, как описаны в [1, 5, 6].

Использование низкоскоростных речевых кодеков, требующих пропускной способности линии связи порядка 1000 бит в секунду, позволяет реализовывать линии связи, способные работать при близких к нулю децибел отношениях сигнал шум в полосе частот сигнала. В подобных условиях построение голосовой радиолинии с использованием широкополосных шумоподобных сигналов с прямым расширением спектра требует определения параметров радиограммы, содержащей кодовый блок с полезной информацией и синхропоследовательность, необходимую для работы алгоритмов обнаружения [7,8] и оценки параметров канала [9-16] с учетом ограничений на длину кадра, накладываемых требованиями к максимально допустимой задержке в голосовых системах связи [17].

Описание модели радиолинии

Голосовая радиолиния на основе модуляции с прямым расширением спектра требует использования устройства преобразования низкочастотного речевого сигнала в битовый поток. Причем по причине малого запаса по мощности сигнала над шумом и помехами требуется выполнение данного преобразования с наименьшей требуемой скоростью передачи данных. Одними из таких устройств являются реализации алгоритма низкоскоростного речевого кодека codec2 [18].

Принцип сжатия речевого сигнала в данном семействе алгоритмов основан на определении косвенных параметров, позволяющих на приемной стороне синтезировать сигнал, обеспечивающий наибольшую разборчивость речи, которые передаются по линии связи. В набор передаваемых параметров входит частота основного тона кодируемого сигнала на заданном интервале времени, а также квантованный набор амплитуд и фаз гармоник этого тона. Количество гармоник, о которых передается информация, а также степень сжатия определяют требуемую скорость передачи для данного режима работы и качество восстановления.

Таким образом, исходя из требований к разборчивости и качеству восстановления речевого сигнала и основываясь на наборе режимов работы данного алгоритма, требуемая информационная скорость цифрового модема радиолинии может быть определена заранее и использоваться при выборе параметров радиограммы. Для помехоустойчивого кодирования предлагается использовать недвоичный LDPC код (NB-LDPC), как было показано в [19, 20] этот помехоустойчивый кодек обеспечивает хорошие показатели помехоустойчивости при использовании с ансамблями шумоподобных сигналов. Для передачи недвоичных *m*-разрядных символов NB-LDPC кодера может использоваться алфавит из 2^{*m*} фазоманипулированных сигналов, сформированных на основе квазиортогональных двоичных псевдослучайных последовательностей.

На приемной стороне такое представление символов кодового блока позволяет, рассчитав корреляционные суммы для каждого из 2^m сигналов ансамбля, которые после оценки дисперсии шума на приемной стороне пересчитываются в набор апостериорных вероятностей, являющихся входными данными для NB-LDPC декодера, повысить отношение сигнал шум в 2^m раз. Но при неточной синхронизации по времени и частоте величина этого выигрыша снижается. Структурная схема описанной модели представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Структурная схема модели исследуемой радиолинии

Однако при приеме широкополосных сигналов, проходящих через ионосферный канал, серьезное влияние на уровень корреляционных сумм, рассчитываемых на приемной стороне, оказывает частотная дисперсия этого канала, а при приеме символов с большой длительностью – неточность истинных значений частот синтезаторов несущего колебания, используемых в приемном и передающем трактах. Как было показано в [6, 7], влияние этих эффектов может быть оценено совместно с обнаружением синхропоследовательности и затем, по полученным оценкам наклона дисперсионной характеристики и величины допплеровского сдвига, эти эффекты могут быть компенсированы. По этой причине в данной работе влияние дисперсионных искажений и смещения несущей частоты относительно ожидаемой рассматриваться не будет.

Описание методики определения параметров кадра радиолинии

Для определения параметров кадра, обеспечивающих наибольшую помехоустойчивость, в качестве критерия предла-

гается использовать совместную вероятность обнаружения синхропоследовательности кадра и декодирования кодового блока этого кадра. Таким образом, принимая данные события независимыми, вероятность обнаружения и принятия информационного кадра может быть рассчитана как:

$$P_{np} = P_{obH} P_{de\kappa} \tag{1}$$

где P_{np} – вероятность обнаружения и корректного декодирования кодового блока, $P_{o\delta n}$ – вероятность обнаружения синхропоследовательности, $P_{de\kappa}$ – вероятность декодирования кодового блока.

Для канала с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ), который соответствует распространению радиоволны вдоль поверхности Земли, вероятность обнаружения *Р*_{обн з} для известного сигнала синхропоследовательности с неизвестной начальной фазой может быть рассчитана согласно [21] как:

$$P_{o\delta\mu 3}\left(E_{np}/N_{0}\right) = 1 - \int_{0}^{\sqrt{\frac{-\ln(P_{am})}{E_{np}/N_{0}}}} \frac{2\nu E_{np}}{N_{0}} e^{\frac{E_{np}}{N_{0}}\left(\nu^{2}+1\right)} I_{0}\left(\frac{E_{np}}{N_{0}}2\nu\right) d\nu \quad (2)$$

где E_{np} – энергия сигнала синхропоследовательности, P_{nm} – задаваемая вероятность ложной тревоги, N_0 – спектральная плотность мощности шума, I_0 – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Для канала с Рэлеевскими замираниями (соответствующего распространению радиоволны с отражением от ионосферы) вероятность обнаружения $P_{oбнu}$ при аналогичном случае с АБГШ алгоритме обнаружения может быть рассчитана как:

$$P_{o \delta H u} \left(E_{np} / N_0 \right) = e^{\frac{\log(P_{am}) \frac{E_{np}}{N_0}}{e^{\frac{E_{np}}{N_0} + 2E_{np}^2 \sigma_{y_{aM}}^2}}}$$
(3)

где σ_{3am}^2 – параметр распределения Рэлея. Средняя энергия сигнала с учетом замираний равна $2E_{np}\sigma_{3am}^2$.

Аналогично вероятностям обнаружения необходимо определить вероятности декодирования кодовых блоков $P_{\partial e \kappa u}$ для каналов с АБГШ с замираниями соответственно. Данную задачу предлагается решать при помощи имитационного моделирования работы помехоустойчивого кодека для требуемой модели канала.

Декодирование NB-LDPC кода реализовано по алгоритму распространения доверия. Поэтому, для реализации упомянутой модели, требуется определить апостериорные вероятности приема символов кодового слова. Для помехоустойчивых кодов, работающих с символами разрядности m, вероятность приема k-го символа кодового слова c_k определяется как:

$$P(c_{k}/\overline{y}) = \frac{W(\overline{y}, c_{k})}{W(\overline{y})} = \frac{\left(\prod_{\substack{u=1\\u\neq k}}^{2^{m}} W(\overline{y}_{u}, c_{k})\right) W(\overline{y}_{k}, c_{k})}{\sum_{e=1}^{2^{m}} \left[\left(\prod_{\substack{u=1\\u\neq e}}^{2^{m}} W(\overline{y}_{u}/c_{e})\right) W(\overline{y}_{e}, c_{e})\right]}$$
(4)

где $\overline{y} = \{y_1, y_2, y_{2^m}\}$ – решающая статистика, получаемая с выхода коррелятора, а $W(\overline{y}_i/c_i)$ и $W_{uu}(\overline{y}_i)$ – условная функция плотности вероятности для статистики \overline{y}_i при условии передачи символа c_i и плотность вероятности шумового воздействия для статистики \overline{y}_i . Выражение (4) может быть упрощено как:

$$P(c_{k}/\overline{y}) = \frac{1}{\sum_{e=1}^{2^{m}} \left[\frac{W(\overline{y}_{e}/c_{e})}{W_{u}(\overline{y}_{e})} \frac{W_{u}(\overline{y}_{k})}{W(\overline{y}_{k}/c_{k})} \right]}$$
(5)

В таком случае для расчета апостериорных вероятностей приема *k*-го символа для заданного набора решающих статистик $\overline{y} = \{y_1, y_2, y_{2^m}\}$ необходимо рассчитать только плотности вероятности шумового воздействия. Подставляя в (5) аналитические выражения для плотностей вероятностей случайных процессов, используемых в моделях каналов с АБГШ и замираниями, в соответствии с [15] получаем выражение (6), описывающее вероятности приема символов кодового блока при распространении сигнала вдоль поверхности для случая приема сигнала, отраженного от ионосферы:

$$P(c_{k}/\overline{y}) = \frac{1}{\sum_{e=1}^{2^{m}} e^{\frac{2E_{c}(y_{e}-y_{k})^{2}}{2\sigma_{u}^{2}}}}$$

$$P(c_{k}/\overline{y}) = \frac{1}{1}$$
(6)
(7)

 $F(C_k/y) = \frac{1}{\sum_{l=1}^{2^m} e^{-\frac{1}{2}(|\dot{y}_k|^2 - |\dot{y}_l|^2)} \frac{\sigma_{uu}^2 E_c^2}{\sigma_{uu}^2 (\sigma_{uu}^2 + \sigma_{uu}^2 E_c)}}$ В выражениях (6) и (7) σ_{uu}^2 означает дисперсию шума,

В выражениях (о) и (г) \mathcal{O}_{u} означает дисперсию шума, E_c – энергию сигнала, представляющего кодовый символ, σ_{3aM}^2 – параметр распределения Рэлея.

Таким образом, получив решающие статистики при помощи моделей каналов, описанных в [22,23], и рассчитав апостериорные вероятности для декодера NB-LDPC кода в результате имитационного моделирования, можно получить зависимости вероятности декодирования кодового блока $P_{\partial e\kappa}$ от отношения E_c к N_0 для любого возможного значения кодовой скорости NB-LDPC кода *r*. Подставляя в выражение (1) выражения (2), (3) и (6), (7) получаем вероятности корректного приема для земной и ионосферной волны:

$$P_{np_{3}}(E_{np}/N_{0},E_{c}/N_{0},r) = P_{o\delta\mu_{3}}(E_{np}/N_{0})P_{de\kappa_{3}}(E_{c}/N_{0},r)$$
$$P_{np_{u}}(E_{np}/N_{0},E_{c}/N_{0},r) = P_{o\delta\mu_{u}}(E_{np}/N_{0})P_{de\kappa_{u}}(E_{c}/N_{0},r)$$

В данных выражениях параметр E_{np} может быть выражен с помощью значений длительности информационного символа T_c , числа информационных бит в кодовом блоке K, длительности кадра $T_{кадра}$ и энергии информационного символа E_c . Так, в предположении передачи одного кодового блока в кадре E_{np} рассчитывается как произведение E_c и разности числа символов, укладывающихся на длительности кадра с числом символов кодового блока.

$$E_{np} = E_c \left(\frac{T_{\kappa a \partial p a}}{T_c} - \frac{K}{r} \right) = E_c N_{np} \left(r \right)$$

Временная структура используемого кадра с описанными выше соотношениями приведена на рисунке 2.



Рис. 2. Временная структура кадра радиолинии

Поскольку T_{kadpa} , $T_c N_{np}$ и число информационных символов в кодовом блоке *K* определяются требованиями к радиолинии, эти параметры могут быть приняты константными, и E_{np} определяется как функция от E_c и *r*. В таком случае можно найти такое *r*, для которого вероятность P_{np3} и P_{npu} будет максимальна. Поскольку в реальной системе чаще всего обрабатываться будет тот кадр, для которого вероятность обнаружения синхропоследовательности была выше, то выражения для определения *r* с учетом двух возможных путей распространения радиоволны будет описываться следующим образом:

$$P_{np}(E_{c}/N_{0}) = = \begin{cases} \arg\max_{r} (P_{np_{3}}(E_{c}/N_{0},r)), P_{o\delta n_{3}}(E_{c}/N_{0},r) > P_{o\delta n_{4}}(E_{c}/N_{0},r) & (8) \\ \arg\max_{r} (P_{np_{4}}(E_{c}/N_{0},r)), P_{o\delta n_{4}}(E_{c}/N_{0},r) > P_{o\delta n_{3}}(E_{c}/N_{0},r) \end{cases}$$

Как было показано в [24], значение r, для которого P_{np} максимальна, зависит от соотношений E_c/N_0 как при расчете вероятности приема сигнала распространяющегося вдоль поверхности Земли, так и для сигнала отраженного от ионосферы.

Таким образом, для полного определения исходных параметров оптимизируемой функции требуется провести расчет отношений сигнал/шум на входе приемного устройства.

Определение параметров кадра радиолинии с учетом распространения радиосигнала

При распространении вдоль поверхности Земли для расчета уровня сигнала на входе приемника необходимо определить: мощность передатчика, коэффициенты усиления приемной и передающей антенн, несущую частоту. В то время как для расчета при отражении от ионосферы, помимо вышеперечисленных параметров, необходимо задать координаты точек приема и передачи, дату и время суток и индекс солнечной активности.

Зададимся следующими требованиями к радиолинии: информационная скорость голосового кодека – 2400 бит/с, длительность кадра – 100 мс (в соответствии с требованиями на максимальную задержку для голосовых линий связи [17]), скорость манипуляции псевдослучайной последовательности – 100 кбод, разрядность символов – 6, излучаемая мощность передающей станции – 50 Вт, координаты приемной и передающей станций – Московская область, приемная и передающая антенны – диполь длиной 4 метра, диапазон рабочих частот – 5-9 МГц.

Для расчета значений $P_{\partial e \kappa s}(E_c/N_0, r)$ и $P_{\partial e \kappa u}(E_c/N_0, r)$ был выбран диапазон кодовых скоростей от 20/21 до 1/4 (минимальная кодовая скорость, при которой длительность кодового блока не превышает $T_{\kappa a \partial p a}$), далее были получены

наборы кривых помехоустойчивости для двух рассматриваемых каналов представленных на рисунках 3 и 4.



Рис. 3. Зависимость FER от ОСШ и кодовой скорости для канала АБГШ

Расчет отношения мощности сигнала к мощности шума при распространении по Земной волне производился на основе мощности полезного сигнала на входе приемного устройства, рассчитываемого в соответствии с рекомендацией МСЭ-Р Р.368-10 [25] и чувствительности приемного устройства -100 дБм. Расчет отношения мощностей сигнала и шума при отражении от ионосферы производился с помощью свободно распространяемого программного пакета, реализующего расчет в соответствии с рекомендацией МСЭ-R P.372-14 [26, 27].



Рис. 4. Зависимость FER от ОСШ и кодовой скорости для канала Рэлея

Поскольку уровень отраженного сигнала сильно зависит от концентрации электронов, которая варьируется от времени года, времени суток и солнечной активности, при расчете отношений сигнал шум для выбора параметров радиолинии требуется учитывать изменения условий распространения от этих параметров. В предлагаемой методике число Вольфа предлагается считать константным, и для дальнейшего расчета оно было выбрано равным 60, как средняя величина за последние два цикла солнечной активности. Так для заданных параметров передающей станции был рассчитан набор значений ОСШ в полосе 100 кГц (эффективная полоса сигнала по уровню 3 дБ численно равна скорости манипуляции псевдослучайной последовательности) для несущих частот из указанного диапазона с шагом 0.5 МГц, времени суток с шагом в один час, 12 месяцев.

Поскольку обе используемые методики прогнозирования распространения сигнала позволяют определить изменение напряженности электромагнитного поля в зависимости от расстояния между приемной и передающей станцией, то с использованием данных моделей можно получить значения ОСШ для перечисленных выше комбинаций условий распространения при изменении дальности, на которой работает радиолиния от 10 до 150 км с шагом 10 км.

Таким образом, было получено два набора отношений мощностей сигнала P_c к мощности шума для случая распространения: вдоль поверхности Земли и при отражении от ионосферы (P_{uu} и P_{uuu} соответственно). P_c/P_{uu} и P_c/P_{uuu} далее будут рассматриваться в зависимости от расстояния между приемной и передающей станцией d, несущей частоты f_0 , времени суток H, месяца M и обозначаться как $P_c/P_{uus}(d, f_0, H, M)$ и $P_c/P_{uuu}(d, f_0, H, M)$ соответственно. Далее, подставляя эти значения в выражение (8), рассчитывается вероятность обнаружения и правильного декодирования данных информационного кадра $P_{np}(r, d, f_0, H, M)$. Срез для $f_0 = 7$ МГц, местного времени 10 часов утра и января месяца, представлен на рисунке 5.



Рис. 5. Зависимость вероятности приема кодового блока от расстояния для несущей частоты 7 МГц, января месяца и 10 часов утра по местному времени

На данной зависимости можно заметить провал характерный для всех значений r, который тем сильнее проявляется, чем больше величина r (следовательно, при большей длительности синхропоследовательности), это объясняется тем фактом, что синхропоследовательность с большей длительностью обнаруживается в канале с АБГШ с более высокой вероятностью, нежели в канале с Замираниями, но при таком ОСШ блок помехоустойчивого кода уже не может быть корректно декодирован. В связи с этим предлагается определять кодовую скорость, для которой величина P_{np} максимальна в худшем случае. Таким образом, r, обеспечивающее наибольшую вероятность приема из наименьших вероятностей для всего набора дальностей d для фиксированных f_{0} , H u M, рассчитывается как:

$$r_{max}(f_0,H,M) = \max_{r} \left(\min_{d} \left(P_{np}(r,d,f_0,H,M) \right) \right)$$

Набор значений $r_{max}(f_0, H, M)$ при f_0 равном 7 МГц представлен на рисунке 6.



Рис. 6. Величины кодовых скоростей, обеспечивающие наибольшую вероятность приема в зависимости от месяца и времени суток для частоты 7 МГц

По значениями $r_{max}(f_0, H, M)$ может быть рассчитана доля времени P_{rmax} в течение которого каждое из рассматриваемых значений кодовой скорости r обеспечивает наибольшую величину P_{np} , зависимость величин P_{rmax} от частоты для каждого значения кодовой скорости представлена на рисунке 7.



Рис. 7. Зависимость доли времени, для которого кодовая скорость *r* обеспечивает наибольшую вероятность приема от частоты

По данной зависимости можно наблюдать, что для рассмотренного набора параметров в течение большей доли времени максимальную величину P_{np} обеспечивают два значения $r_{max} - 1/2$ и 20/21. Этот факт объясняется тем, что при низких частотах, заданной мощности передающей станции, коэффициентах усиления приемной и передающей антенн и базе расширяющей последовательности, отношение энергии, которое приходится на один информационный бит к мощности шума на входе декодера, достаточно для декодирования блоков без ошибок, и больший вклад в значение *P*_{*пр} вносит вероятность обнаружения.* Таким образом, *P*_{*пр}</sub></sub>* растет с увеличением длины синхропоследовательности, а следовательно и с увеличением кодовой скорости, в то время как с увеличением частоты, в течение все большей доли времени, уровень сигнала, прошедшего через ионосферный канал, оказывается низким, что приводит к низкому ОСШ, которое требует большей избыточности на этапе декодирования для корректного приема кодовых блоков. Это приводит к тому, что при малых значениях г энергии синхропоследовательности недостаточно для стабильного обнаружения радиограммы, а при больших – избыточности, вносимой на этапе кодирования информационного блока, становится недостаточно для верного декодирования. Это приводит к тому, что наибольший P_{np} достигается при промежуточном

значении *r*, равном в представленном примере 0,5. Таким образом, представленная методика позволяет осуществить выбор параметров кадра голосовой радиолинии ДКМВ диапазона ближнего радиуса действия, с учетом результатов прогнозирования качества прохождения сигнала вдоль поверхности Земли и через ионосферный канал в зависимости от используемой несущей частоты передачи, учитывая влияние этих факторов на численные значения параметров радиограммы, при которых достигается наибольшая вероятность приема.

Выводы

В данной работе была представлена методика определения кодовой скорости, обеспечивающей максимальную вероятность обнаружения и декодирования информационного блока цифровой голосовой радиолинии ДКМВ диапазона. Представленная методика использует результаты предсказания параметров распространения радиоволны вдоль земной поверхности и при ее отражении от ионосферы Земли. Таким образом, было учтено влияние отношения мощности сигнала к мощности шума на соотношение энергии последовательности синхронизации и блока помехоустойчивого кода, при котором максимизируется вероятность обнаружения и декодирования упомянутого блока кода. В результате, предлагаемая методика дает возможность рассчитать зависимость доли времени от рабочей частоты, в течение которой конкретная величина кодовой скорости является наилучшей с точки зрения максимизации указанных вероятностей. Полученные зависимости позволяют выбрать кодовую скорость для проведения сеанса связи, обеспечивающую максимальный уровень вероятности обнаружения и декодирования блока помехоустойчивого кода в течение наибольшего времени для заданной рабочей частоты.

Литература

1. Лобов Е.М., Кандауров Н.А., Лобова Е.О. и др. Современные методы обработки широкополосных сигналов в условиях дисперсионных искажений в ионосфере Земли // Радиотехника. 2023. Т. 87, № 12. С. 17-31. DOI 10.18127/j00338486-202312-03. EDN KBOHLS

2. Варламов О.В. Технология создания сети цифрового радиовещания стандарта DRM для Российской Федерации: специальность 05.12.04 "Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Варламов Олег Витальевич. Москва, 2017. 350 с. EDN ZQMQAF

3. Варламов О.В., Варламов В.О., Долгопятова А.В. Международная сеть DRM вещания для создания информационного поля в Арктике // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Т. 13. № 9. С. 9-16. EDN: CHEXOK

4. *Kandaurov N.A., Lobova E.O., Varlamov V.O.* Analysis of Interference HF Range // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russian Federation, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744307.

5. Лобов Е.М. Применение банка цифровых фильтров в задачах обработки широкополосных сигналов декаметрового диапазона // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – 2024. Т. 15, № 1. С. 50-55. EDN HFKPAD

6. Лобов Е.М., Кандауров Н.А., Лобова Е.О. и др. Современные методы обработки широкополосных сигналов радиолиний связи в условиях дисперсионных искажений в ионосфере Земли // Распространение радиоволн : Сборник докладов XXVIII Всероссийской открытой научной конференции, Йошкар-Ола, 16-19 мая 2023 года. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2023. С. 43-50. EDN XBZDWE

7. Лобов Е.М., Липаткин В.И., Лобова Е.О., Чиров Д.С. Результаты разработки вычислительно эффективного алгоритма совместного обнаружения сигналов и оценивания их параметров в условиях широкополосного ионосферного канала // Цифровая обработка сигналов. 2024. № 2. С. 11-18. EDN LWJDYS

8. Lobov E.M., Lobova E.O., Lipatkin V.I., Poborchaya N.E. Optimal detection of HF radiolinks broadband signal with joint amplitude, phase, and dispersion distortion value estimation // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. – 2023. Vol. 6, No. 1. pp. 230-234. DOI 10.1109/SYNCHROINF057872.2023.10178573. EDN HPDAZO

9. Лобов Е.М. Регулярные аналитические выражения для вычисления качества оценивания параметров широкополосного сигнала в условиях дисперсионных искажений в ионосфере Земли // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – 2024. Т. 15, № 2. С. 46-51. EDN DQBRZJ

10. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Растягаев Д.В., Скворцова Ю.И. Численное моделирование распространения пространственно-временных частотно-модулированных радиоволн в анизотропной среде // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. – 2015. – Том 9. – №9. – С. 40-47. EDN: UMMUVT.

11. Аджемов С.С., Лобов Е.М., Кандауров Н.А., Лобова Е.О., Липаткин В.И. Алгоритмы оценки и компенсации дисперсионных искажений широкополосных сигналов ионосферных радиолиний связи // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 5. С. 57-74. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-5-57-74. EDN: UWFNTB.

12. Varlamov V.O., Lobov E.M., Lobova E.O., Liberman E.A. Research of the hybrid filter bank frequency equalizer transfer function coefficients estimation quality // В сборнике: 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Conference Proceedings. 2021. pp. 9416060. DOI: 10.1109/IEEECONF51389.2021.9416060. EDN: ATNBDI.

13. Варламов В.О., Кандауров Н.А., Лобова Е.О., Лобов Е.М. Сравнение качества оптимальной фильтрации наклона дисперсионной характеристики фильтром стратоновича и сигма-точечным фильтром Калмана // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17, № 1. С. 12-19. DOI 10.36724/2072-8735-2023-17-1-12-19. EDN ROHOSI

14. Lobova E.O., Varlamov V.O., Lobov E.M. Comparison of optimal filtering algorithms of the channel dispersion slope and the signal phase shift // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. 2023. Vol. 6, No. 1, pp. 235-239. DOI 10.1109/SYNCHROINF057872.2023.10178533. EDN LFVYBB

15. Lobov E.M., Lobova, E.O. Varlamov V.O. Synthesis of the Optimal Dispersion Slope and Phase Joint Filtering Algorithm for the Broadband Signal in the Ionospheric Radio Channel // Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. 2023. Vol. 6, No. 1, pp. 283-287. DOI 10.1109/IEEECONF56737.2023.10092032. – EDN YRJGTN.

16. Lobov E.M., Lobova, E.O. Varlamov V.O. Synthesis of the Optimal Dispersion Slope and Phase Joint Filtering Algorithm for the Broadband Signal in the Ionospheric Radio Channel // 2023 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russian Federation, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/IEEECONF56737.2023.10092032.

17. ITU-T Recommendation G-107: The E-model: a computational model for use in transmission planning, 2015.

18. http://www.rowetel.com/?page_id=452

19. Kandaurov N.A., Lobova E.O., Varlamov V.O., Telengator K.E. Signal-Code Constructions for Wideband Signals Based on M-Cpfsk and Non-Binary Error-Correcting Codes // Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. 2023. Vol. 6, No. 1, pp. 201-204. DOI 10.1109/IEEECONF56737.2023.10091988. EDN IRQGTJ

20. Lobov E.M., Grigorieva A.D., Varlamov V.O. On Progressive Edge Growth Parity Check Matrix Generation for NB-LDPC Codes in HF Communications // 2024 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Vyborg, Russian Federation, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617767.

21. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с. EDN UKUQVR

22. Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова М.И., Овчинников В.В. Эффекты дисперсии в ионосферных радиоканалах. Ч. 1. Модели распространения волновых пакетов в диспергирующих ионосферных каналах // Радиотехника. 2024. Т. 88, № 8. С. 111-126. DOI 10.18127/j00338486-202408-11. EDN JFLEVN

23. Ryabova M.I., Ivanov D.V., Chernov A.A., Ovchinnikov V.V. Experimental Study of Phase-Frequency Responses of HF Radio Channels with the Use of SDR Ionosonde // 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYN-CHROINFO 2020, Svetlogorsk, 01-03 июля 2020 г. Svetlogorsk, 2020. P. 9166094. DOI 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166094. EDN FDJBGT.

24. Varlamov V.O., Lobov E.M. Error Correction Codes Parameters Optimization in Wideband HF Range Digital Voice Radio Links // 2024 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russian Federation, 2024, pp. 1-4, doi: 10.1109/IEEECONF60226.2024.10496777.

25. ITU-R Recommendation P.368-10: Ground-Wave Propagation Prediction Method for Frequencies between 10 kHz and 30 MHz, 2022.

26. ITU-R Recommendation P.372-14 Radio noise, 2019.

27. Варламов О.В., Варламов В.О. Распределение максимальных уровней атмосферных радиошумов в диапазонах низких частот и средних частот по территории Земли // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 5. С. 42-51. EDN: ZWLTYD.

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE ERROR CORRECTION CODE RATE OF THE HF RANGE DIGITAL VOICE RADIO LINK

Vladimir O. Varlamov, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, f.vvo@bk.ru

Abstract

The development of digital voice radio links for the decameter wavelength range, capable for operating both with signals propagating along the Earth's surface and with those reflected from the ionosphere, is an urgent task. However, the requirements for power consumption and dimensions imposed on such systems lead to strict restrictions on the energy budget. This fact determines the necessity to develop methods for determining the parameters of a radiogram, taking into account the requirements for the payload of the communication line and the results of predicting the channel state in order to improve the noise immunity of the radio link. This paper presents a method for determining the relationship between the duration of the synchronization sequence and the code block using the criterion of the highest joint probability of detecting the synchronization sequence and decoding the data block. In this case, the limitation on the maximum duration of the radiogram is taken into account, which allows expressing the desired relationship through the rate of the noise-resistant code of the digital voice radio line. The proposed method takes into account the results of forecasting during the propagation of a signal from a transmitting to a receiving station along the Earth's surface, and during reflection from the ionosphere depending on the frequency, which makes it possible to determine the code rate that maximizes the specified probability over the longest period of time.

Keywords: UHF range, ionospheric channel, voice radio links, wideband signal, NB-LDPC code.

References

[1] E.M. Lobov, N.A. Kandaurov, E.O. Lobova, V.I. Lipatkin, D.N. Shubin and V.O. Varlamov, "Modern methods of processing broadband signals under conditions of dispersion distortions in the Earth's ionosphere," *Radiotechnika*, 2023, no. 12, pp. 17-31

[2] O.V. Varlamov, "The Technology of Creating a Digital Broadcasting Network of the DRM Standard for the Russian Federation," D.Sc. Thesis, MTUCI, Moscow, Russia, 2017.

[3] O.V. Varlamov, V.O. Varlamov, A.V. Dolgopyatova, "DRM broadcasting international network to create an information field in the Arctic region," *T-Comm*, 2019. vol. 13, no.9, pp. 9-16.

[4] N.A. Kandaurov, E.O. Lobova, V.O. Varlamov, "Analysis of Interference HF Range," 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russian Federation, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744307.

[5] E.M. Lobov, Application of a digital filter bank in the tasks of processing broadband signals of the decameter range," Systems of synchronization, signal generation and processing, 2024, vol. 15, no. 1, pp. 50-55.

[6] E.M. Lobov, N.A. Kandaurov, E.O. Lobova, V.I. Lipatkin, D.N. Shubin and V.O. Varlamov, "Modern methods of processing broadband signals of radio communication lines under conditions of dispersion distortions in the Earth's ionosphere," *Thesis of the XXVIII All-Russian Open Scientific Conference*, Yoshkar-Ola, May 16-19, 2023, pp. 43-50, 2023.

[7] E.M. Lobov, V.I. Lipatkin, E.O. Lobova, and D.S. Chirov, "Results of the development of a computationally efficient algorithm for joint detection of signals and estimation of their parameters in conditions of a wideband ionospheric channel," *Digital signal processing*, 2024, no. 2, pp. 11-18.

[8] E.M. Lobov, E.O. Lobova, V.I. Lipatkin, N.E. Poborchaya, "Optimal detection of HF radiolinks broadband signal with joint amplitude, phase, and dispersion distortion value estimation," *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications.* 2023. Vol. 6, No. 1, pp. 230-234. DOI 10.1109/SYNCHROINF057872.2023.10178573.

[9] E.M. Lobov, "Regular analytical expressions for calculating the quality of estimation of broadband signal parameters under conditions of dispersion distortions in the Earth's ionosphere," Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, 2024, vol 15, no. 2, pp. 46-51. [10] A.S. Kryukovsky, D.S. Lukin, D.V. Rastyagaev, Yu. I. Skvortsova, "The numerical modeling of propagation of space-time frequency-modulated radiowaves in ionospheric to medium," *T-Comm.* 2015. Vol 9. No. 9, pp. 40-47.

[11] S.S. Adjemov, E.M. Lobov, N.A. Kandaurov, E.O. Lobova, V.I. Lipatkin, "Algorithms of estimating and compensating the dispersion distortions of wideband signals in the HF channel," *H&ES Reserch*. 2021. Vol. 13. No. 5, pp. 57 74. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-5-57-74.

[12] V.O. Varlamov, E.M. Lobov, E.O. Lobova, E.A. Liberman, "Research of the hybrid filter bank frequency equalizer transfer function coefficients estimation quality," 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Conference Proceedings. 2021, pp. 9416060. DOI: 10.1109/IEEECONF51389.2021.9416060.

[13] V.O. Varlamov, N.A. Kandaurov, E.O. Lobova and E.M. Lobov, "Comparison of the quality of optimal filtering of the dispersion characteristic slope by the Stratonovich filter and the Kalman sigma-point filter," *T-Comm*, 2023, vol 17, no. 1, pp. 12-19.

[14] E.O. Lobova, V.O. Varlamov, E.M. Lobov, "Comparison of optimal filtering algorithms of the channel dispersion slope and the signal phase shift," Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. 2023. Vol. 6, no. 1, pp. 235-239. DOI 10.1109/SYNCHROIN-FO57872.2023.10178533.

[15] E.M. Lobov, E.O. Lobova, V.O. Varlamov, "Synthesis of the Optimal Dispersion Slope and Phase Joint Filtering Algorithm for the Broadband Signal in the Ionospheric Radio Channel," Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. 2023. Vol. 6, No. 1, pp. 283-287. DOI 10.1109/IEEECONF56737.2023.10092032.

[16] E.M. Lobov, E.O. Lobova, V.O. Varlamov, "Synthesis of the Optimal Dispersion Slope and Phase Joint Filtering Algorithm for the Broadband Signal in the Ionospheric Radio Channel," 2023 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russian Federation, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/IEEECONF56737.2023.10092032.

[17] ITU-T Recommendation G-107: The E-model: a computational model for use in transmission planning, 2015.

[18] http://www.rowetel.com/?page_id=452

[19] N.A. Kandaurov, E.O. Lobova, V.O. Varlamov, K.E. Telengator, "Signal-Code Constructions for Wideband Signals Based on M-Cpfsk and Non-Binary Error-Correcting Codes," Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. 2023. Vol. 6, No. 1, pp. 201-204. DOI 10.1109/IEEECONF56737.2023.10091988.

[20] E.M. Lobov, A.D. Grigorieva and V.O. Varlamov, "On Progressive Edge Growth Parity Check Matrix Generation for NB-LDPC Codes in HF Communications," 2024 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Vyborg, Russian Federation, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617767.

[21] L.E. Varakin, "Communication systems with noise-like signals," Moscow: Radio and Communications, 1985. 384 p.

[22] D.V. Ivanov, V.A. Ivanov, M.I. Ryabova and V.V. Ovchinnikov, "Dispersion effects in ionospheric radio channels. Part I. Models of wave packet propagation in dispersive ionospheric channels," *Radiotechnika*, 2024, vol. 88, no. 8, pp. 111-126.

[23] M.I. Ryabova, D.V. Ivanov, A.A. Chernov, V.V. Ovchinnikov, "Experimental Study of Phase-Frequency Responses of HF Radio Channels with the Use of SDR Ionosonde," 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2020, Svetlogorsk, P. 9166094. DOI 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166094.

[24] V.O. Varlamov, E.M. Lobov, "Error Correction Codes Parameters Optimization in Wideband HF Range Digital Voice Radio Links," 2024 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russian Federation, 2024, pp. 1-4, doi: 10.1109/IEEECONF60226.2024.10496777.
[25] ITU-R Recommendation P.368-10: Ground-Wave Propagation Prediction Method for Frequencies between 10 kHz and 30 MHz, 2022.

[26] ITU-R Recommendation P.372-14 Radio noise, 2019.

[27] O.V. Varlamov, V.O. Varlamov, "Distribution of maximum levels of atmospheric radio noise in LF and MF ranges in the territory of the Earth," H&ES Research. 2017. Vol. 9. No. 5, pp. 42-51.

Information about author:

Vladimir O. Varlamov, Assiatant of the Department of Radio Engineering Systems, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, https://orcid.org/ 0000-0003-1607-9166