

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО УПРАВЛЕНИЮ СКОРОСТЬЮ ПЕРЕДАЧИ И ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬЮ СИГНАЛОВ С ПЕРЕСТАНОВОЧНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-6-20-26

Дворников Сергей Викторович,
Военная академия связи имени Маршала Советского
Союза С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия,
practicdsv@yandex.ru

Балыков Антон Александрович,
Военная академия связи имени Маршала Советского
Союза С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия,
etomoiadres@mail.ru

Ключевые слова: перестановочная частотная модуляция, код с постоянным весом, ионосферный радиоканал, цифровая обработка сигналов, энергетическая эффективность, спектральная эффективность, помехоустойчивость, сигнально-кодовая конструкция

Статья посвящена исследованию сигналов с перестановочной частотной модуляцией ПЧМ-т/к, с кодированием опорных колебаний на физическом уровне кодом с постоянным весом для низкоскоростных помехоустойчивых передач декаметрового диапазона по ионосферному радиоканалу. Показана актуальность данного направления исследования. Цель работы заключается в разработке предложений по управлению параметрами сигнально-кодовых конструкций на основе перестановочной частотной модуляции, обеспечивающего компромиссный выбор между скоростью и помехоустойчивостью при передаче информации по ионосферному радиоканалу в сложной сигнально-помеховой обстановке. Представлен подход по выбору одновременно используемых тоновых опорных колебаний k для кодирования сигнальных символов ПЧМ в зависимости от сигнально-помеховой обстановки, по критерию максимальной скорости передачи при сохранении требований по достоверности. Обоснован рациональный выбор числа тоновых опорных колебаний и символьной скорости с позиций эффективного использования энергетических и частотных ресурсов радиопередачи. Приведено обоснование предложенных основных этапов управления, представлены результаты аналитического исследования и имитационного моделирования, подтверждающие правомерность сделанных теоретических выводов.

Информация об авторах:

Дворников Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры радиосвязи. Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия

Балыков Антон Александрович, соискатель ученой степени кандидата технических наук. Адъюнкт кафедры радиосвязи. Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования:

Дворников С.В., Балыков А.А. Предложения по управлению скоростью передачи и помехоустойчивостью сигналов с перестановочной частотной модуляцией // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №6. С. 20-26.

For citation:

Dvornikov S.V., Balykov A.A. (2020) Proposals for management of the transmission speed and noise immunity of signals with permutation frequency modulation. T-Comm, vol. 14, no.6, pp. 20-26. (in Russian)

1. Принцип формирования сигналов с перестановочной частотной модуляцией ПЧМ- m/k с кодированием опорных колебаний на физическом уровне кодом с постоянным весом

Активное применение программно-ориентированных радиосистем (SDR) [1] открывает новые возможности передачи дискретных сообщений в ионосферных радиоканалах систем декаметрового диапазона. Несомненным достоинством указанных систем является возможность передачи информации на большие расстояния с относительно низкими материально-экономическими затратами [2].

Вместе с тем ионосферный канал характеризуется сложной помеховой обстановкой, что является следствием, как многолучевого распространения радиоволн [3], [4], так и магнито-ионного расщепления электромагнитных волн при отражении их от различных ионизирующих слоев [5]. Именно поэтому в интересах снижения негативных последствий от селективных замираний в системах декаметрового диапазона применяются узкополосные сигналы [6].

Типичным явлением для декаметрового диапазона является наличие взаимных помех, возникающих в виду применения антенн с достаточно низкими пространственно-избирательными свойствами [7]. Еще более сложная ситуация складывается для систем декаметрового диапазона военного назначения, для которых характерна работа в условиях преднамеренных помех [8].

Указанные обстоятельства определяют актуальность решения достаточно нетривиальной задачи, связанной с поиском компромисса между обеспечением высокой скорости передачи при сохранении требуемого уровня достоверности передаваемой информации.

Одним из решений такой задачи видится в применении помехоустойчивых сигнально-кодовых конструкций, позволяющих без существенного снижения скорости передачи обеспечивать требуемый уровень достоверности. В качестве таковых предлагается использовать сигналы с перестановочной частотной модуляцией (ПЧМ- m/k), в которых порядок выбора опорных колебаний на длительности символа осуществляется в соответствии с алфавитом кода с постоянным весом [9].

Теоретическими и практическими исследованиями сигналов перестановочной модуляции занимались как зарубежные [10], так и отечественные [11]-[13] ученые.

Одним из достоинств перестановочной частотной модуляции является возможность применения достаточно простых систем передачи и обработки сигналов, не требующих сложной синхронизации [14]. А преимуществом сигналов ПЧМ- m/k манипулированных кодом с постоянным весом на физическом уровне, является возможность обнаружения символьных ошибок еще до их демодуляции на стадии приема [9].

В качестве примера, на рис. 1-4 представлен принцип формирования и детектирования частного случая сигнала ПЧМ- m/k с тремя активными тоновыми опорными колебаниями из семи возможных, в полосе канала тональной частоты [13], характерного для систем декаметрового диапазона [15].

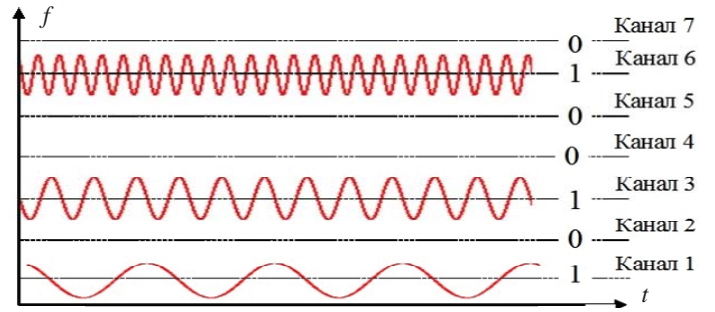


Рис. 1. Тоновые колебания сигнала ПЧМ-7/3 во временной области



Рис. 2. Результирующий сигнал ПЧМ-7/3 во временной области

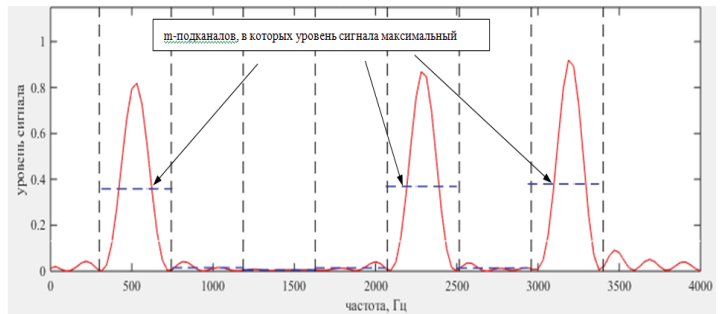


Рис. 3. Принцип принятия решения о переданном сообщении сигнала ПЧМ-7/3 по спектру

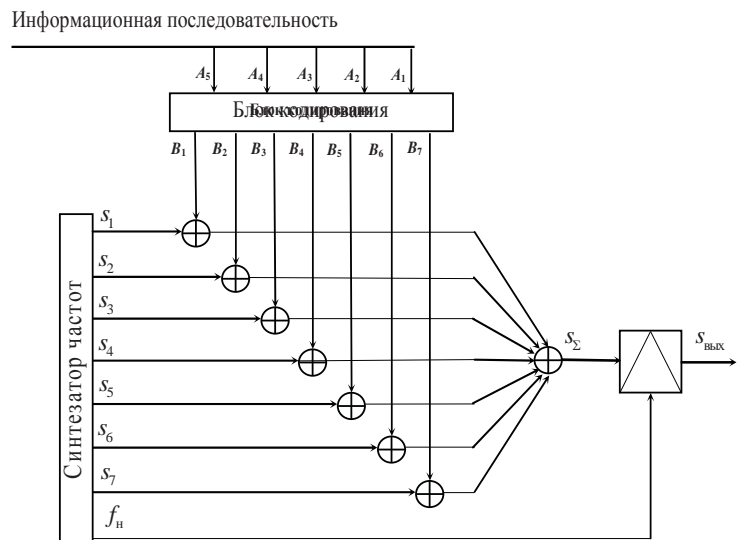


Рис. 4. Принцип формирования сигнала ПЧМ-7/3

В общем случае, в сигналах ПЧМ- m/k сочетания активных опорных тоновых колебаний k на длительности символа могут быть различными из числа разрешенных комбинаций t , определяемых алфавитом кода [8, 9].

Но особенность кода с постоянным весом в том, что все его символы имеют одинаковое число единиц, следовательно, в сигналах ПЧМ, формируемых на его основе, значение $k = \text{const}$, при этом разрядность символа, определяющая его информационное наполнение, остается неизменной от одного значения к другому [13].

Заметим, что от выбора комбинаций k и m зависят такие характеристики формируемой сигнально-кодовой конструкции, как: количество битов в одном символе, количество активных опорных тоновых колебаний, значение энергии каждого тонового колебания, ширина полосы пропускания каждого подканала, сложность вычислений при цифровой обработке и т.д. В тоже время, указанные факторы определяют как скорость передачи информации, так и помехоустойчивость сигнально-кодовой конструкции.

С учетом рассмотренных особенностей проведем обоснование выбора параметров k и m для сигналов ПЧМ- m/k в полосе канала тональной частоты 0,3 ... 3,4 кГц (стандартный телефонный канал – СТК), используемого в каналообразующей аппаратуре систем декаметрового связи [16].

2. Оценка энергетической и спектральной эффективности сигналов ПЧМ- m/k в зависимости от выбранных параметров k и m

Рассмотрение энергетической эффективности сигналов ПЧМ- m/k проведем исходя из того, что перестановочная модуляция является разновидностью многочастотной манипуляции [1, 12]. Поэтому, при оценке помехоустойчивости по отношению к биту, необходимо энергию символа уменьшить в k раз (по количеству активных тоновых опорных колебаний). При этом значение параметра k не имеет смысла принимать более чем $m/2$, т.к. дальнейшее увеличение числа активных тоновых колебаний ведет к снижению энергии, приходящейся на бит [14].

Вероятность ошибки на бит для сигналов ПЧМ- m/k манипулированных кодом с постоянным весом на физическом уровне для канала с переменными параметрами при некогерентной обработке определяется как [8]:

$$p_b = \frac{L/2}{L-1} \left(1 - \prod_{s=1}^k \left[1 - \sum_{n=1}^{m-s} (-1)^{n+1} C_{m-s}^n \frac{1}{\frac{nh^2}{k} + n + 1} \right] \right), \quad (1)$$

где L – количество используемых слов алфавита кода с постоянным весом (число дискретных значений модуляции); h^2 – отношение энергии бита к спектральной плотности шума.

$$L = 2^{\lfloor \log_2(C_m^k) \rfloor}, \quad (2)$$

где $\lfloor * \rfloor$ – оператор целочисленного вычисления.

$$h^2 = \frac{E_b}{N_0}. \quad (3)$$

Забегая вперед отметим, что при $k = m/2$ достигается наибольшее значение спектральной эффективности сигналов ПЧМ- m/k .

Поскольку мощность символа равномерно распределяется между активными тоновыми колебаниями, то вероятность битовой ошибки будет определяться именно той мощностью, которая приходится на полосу пропускания субканала тонового колебания. Следовательно, именно его она определяет энергетическую эффективность передачи. Так, при возрастании k от 1 до $m/2$, мощность каждого тонового колебания будет обратно пропорциональна k . Если мощность сигнала при $k = 1$ принять также за единицу, то мощность тонового колебания при любом k :

$$E_b = \frac{1}{k} \quad (4)$$

На рис. 5 показана диаграмма распределения зависимости нормированной мощности, приходящейся на субканал от числа активных тоновых опорных колебаний.

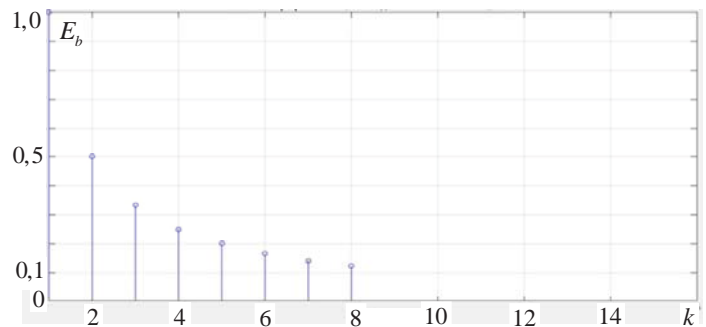


Рис. 5. Распределение нормированной мощности субканала от числа активных тоновых опорных колебаний на длительности символа

Поскольку при $k = m/2$ мощность каждого активного тонового колебания сигнала ПЧМ уменьшается по отношению к однотоновой передаче с $k = 1$, то и его помехоустойчивость упадет.

Параметр m определяет не только разрядность сформированного символа, но и число субканалов в полосе СТК, т.е. ширину полосы пропускания Δf_m субканала.

Для СТК выделяется полоса $\Delta W = 3,1$ кГц [17]

$$\Delta f_m = \frac{\Delta W}{m} = \frac{3100}{m}. \quad (5)$$

На рисунке 6 представлена зависимость ширины полосы пропускания субканала от параметра m .

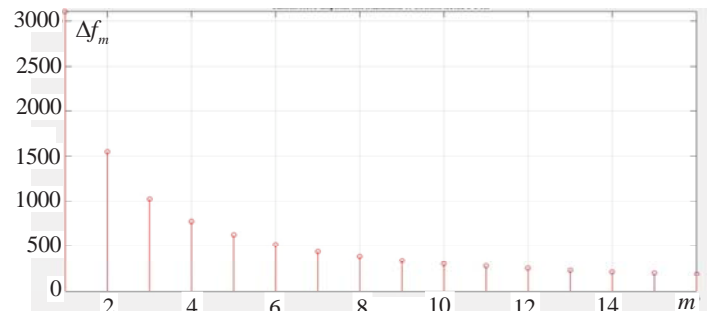


Рис. 6. Распределение ширины полосы пропускания субканала от числа тоновых колебаний в СТК

В свою очередь, от ширины полосы пропускания зависит символьная (бодовая) скорость передачи.

Практика показывает, что при благоприятных условиях в ионосферном канале символьная скорость составляет 200-250 бод [2]. Указанные ограничения обусловлены межсимвольной интерференцией, вызванной многолучевым распространением радиоволн. Именно для снижения негативных последствий межсимвольной интерференцией приходится увеличивать длительности символа, тем самым снижая символьную скорость.

Ширина полосы пропускания и символьная скорость для сигналов ПЧМ- m/k напрямую зависит от количества субканалов m ,

$$R_s = \frac{1}{T_s} = \frac{1}{2 / (\Delta f_m)} = \frac{\Delta f_m}{2} \quad (6)$$

что демонстрируется на рис. 7.

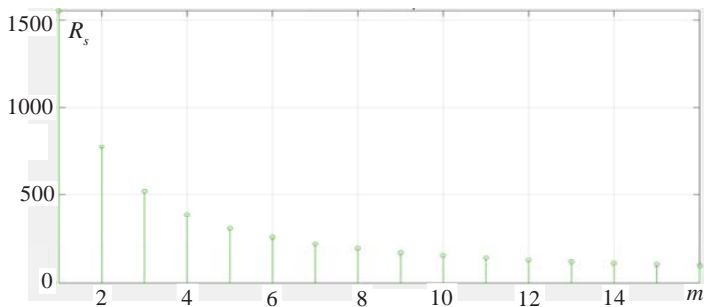


Рис. 7. Распределение значений символьной скорости от количества полос пропускания

Зависимость, определяемая формулой (6) обеспечивает сохранение ортогональности между опорными тоновыми колебаниями.

Согласно [1], процесс модуляции сигналов ПЧМ- m/k заключается в установлении строгого соответствия для N информационных битов H битов кодовой комбинации, причем $H > N$. Количество информационных битов, которые можно закодировать конкретной комбинацией m и k определяется выражением (7) [8].

$$B = \lfloor \log_2(C_m^k) \rfloor \quad (7)$$

На рисунке 8 показана зависимость распределения количества битов, закодированных в одном кодовом слове при различных комбинациях k и m .

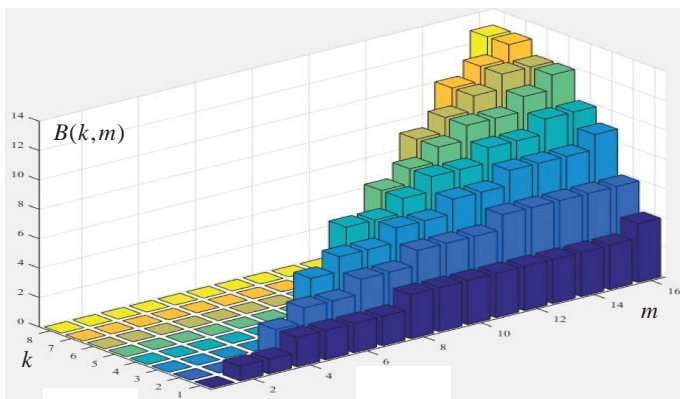


Рис. 8. Распределение зависимости битов, приходящихся на символ от комбинаций параметров k и m

Используя полученные результаты, пересчитаем значение символьной скорости передачи в битовую.

$$R_b = BR_s = \frac{B \Delta f_m}{2} \quad (8)$$

Графическое представление результатов пересчета отображено на рис. 9 и 10.

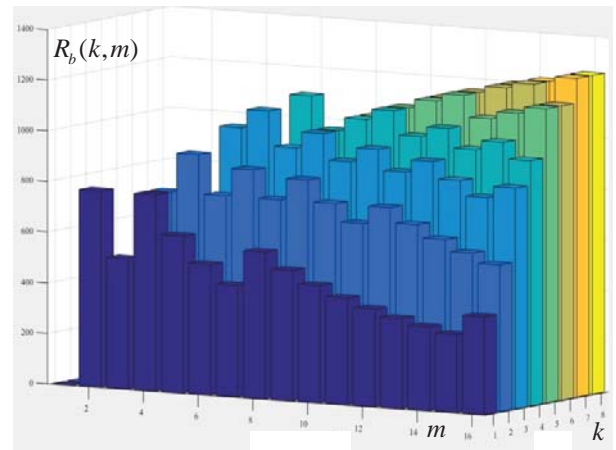
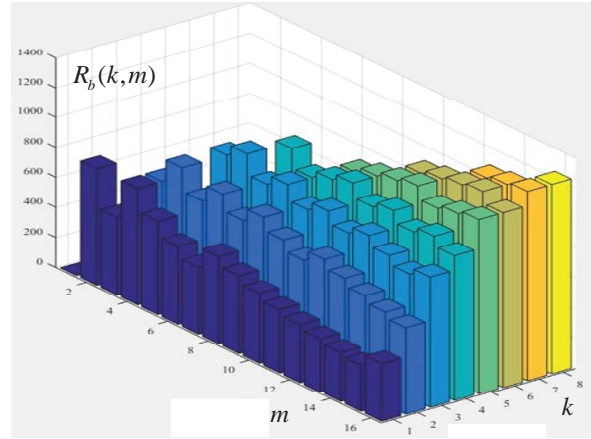


Рис. 9. Распределение битовой скорости от комбинации параметров k и m

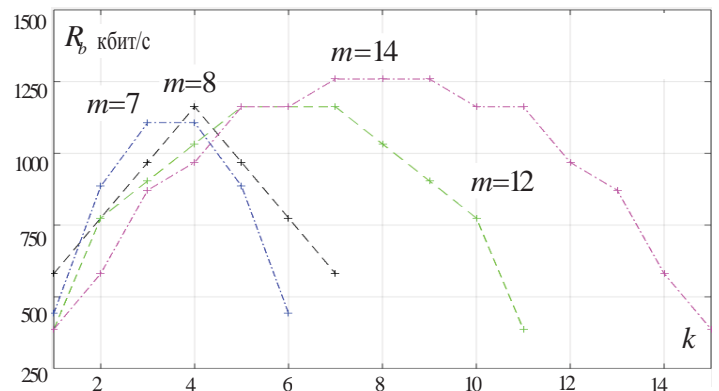


Рис. 10. Зависимость скорости передачи для сигналов ПЧМ- m/k с различными значениями k и m в полосе 3100 Гц

Анализ графиков, представленных на рис. 5-10 показывает, что при выборе значений k и m для сигналов с частотной перестановочной модуляцией возникает проблема компромиссного выбора. С одной стороны необходимо обеспечить максимальную скорость передачи, с другой стороны – минимизировать вероятность битовой ошибки за счет сохранения энергетических характеристик сигнала. И при этом минимизировать техническую сложность устройств формирования и обработки.

В интересах поиска компромиссного решения, проведем сравнение сигналов ПЧМ- m/k с восьмипозиционным частотно-манипулированным сигналом (ЧМ-8), активно используемого в стандарте *ALE*, рекомендуемого для систем декаметровой связи [18]. Отметим, что сигнал ЧМ-8 является частным случаем простой перестановочной модуляции, поэтому в терминах перестановочной модуляции, обозначим его как ПЧМ-8/1.

В интересах обобщения показателей энергетической и спектральной эффективности сигналов ПЧМ- m/k воспользуемся выражениями (3), (5), (6) и (8), в результате получим:

$$\frac{\bar{P}_c}{\bar{P}_{ш}} = \frac{E_b}{N_0} \frac{R_b}{\Delta W} = \gamma(k, m) \cdot \quad (9)$$

Здесь \bar{P}_c – средняя мощность сигнала; $\bar{P}_{ш}$ – средняя мощность шума.

На рисунке 11 представлены распределения, полученные в соответствии с выражением (9) для сигналов ПЧМ- m/k . Нулевой уровень соответствует спектрально-энергетической эффективности сигнала ПЧМ-8/1.

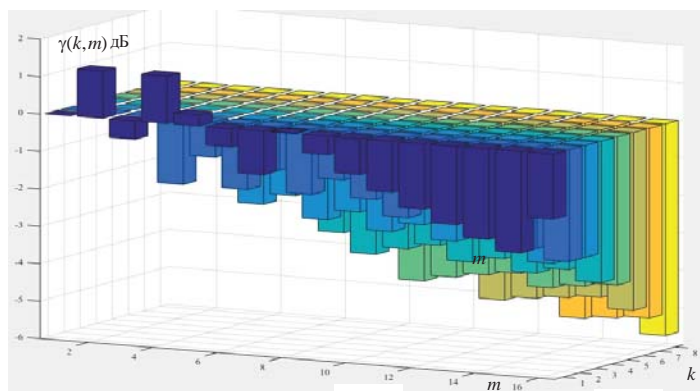


Рис. 11. Распределение спектральной плотности мощности сигналов ПЧМ- m/k

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что сигналы ПЧМ- m/k по показателю по энергетическим и спектральным эффективности уступают сигналу ЧМ-8. Но представленные результаты получены без ограничений на длительность символьной скорости, определяемой длительностью сигнальной посылки. Но в каналах с замираниями, характерных для ионосферного распространения радиоволн, сигнал ЧМ-8 будет иметь низкую помехоустойчивость. Именно поэтому в стандарте *ALE* скорость передач, использующих сигнал ЧМ-8, ограничена 125 бодами.

В тоже время сигналы ПЧМ- m/k позволяют снизить символьную скорость при сохранении информационной, за счет увеличения числа одновременно используемых тоновых

колебаний, определяющих информационную нагрузку сигнального символа. Получаемый эффект аналогичен технологии с ортогональным частотным мультиплексированием каналов.

В частности, у сигналов ПЧМ-7/3, кодированных кодом с постоянным весом МТК-3 [9], один символ передает 5 бит, а ЧМ-8 только 3 бита. Следовательно, при символьной скорости равной 125 бод, сигналы ЧМ-8 способны обеспечить информационную скорость 375 бит/с. А сигналы ПЧМ-7/3, при тех же условиях, обеспечат скорость в 625 бит/с [19]. Или, при равных битовых скоростях, обеспечить дополнительное увеличение длительности символа, за счет снижения бодовой скорости на 67%. Указанные обстоятельства определяют целесообразность выбора сигналов ПЧМ- m/k для систем декаметровой связи, при передаче информации посредством ионосферных радиоканалов.

3. Предложения по управлению скоростью передачи и помехоустойчивостью сигналов ПЧМ- m/k при изменении параметров k и m

Одним из наиболее рациональных способов использования возможностей радиолинии, видится в адаптивном управлении ее частотными и энергетическими ресурсами [20]. Очевидно, что для передач на основе сигналов ПЧМ- m/k такое управление будет заключаться в соответствующем выборе количества активных тоновых колебаний k , в зависимости от качества канала. Адаптивное управление битовой скоростью в полосе СТК $\Delta W = 3100$ Гц, при условии ограничения на допустимую вероятность ошибки не хуже допустимой $p_{ош\text{ треб}}$, можно описать в виде следующих этапов.

На первом этапе по исходным данным ΔW , $p_{ош\text{ треб}}$, m производится расчет наибольшей символьной скорости с соблюдением условия ортогональности между активными тоновыми колебаниями k в соответствии с выражением (6). Изначально количество активных тоновых колебаний принимают равным половине числа доступных субканалов m . Такой выбор при кодировке обеспечивает наибольшее количество бит, приходящееся на один символ (см. рис. 8) при наихудшем показателе помехоустойчивости.

Далее производится расчет числа бит, приходящихся на символ (7), значения битовой скорости (8) и количество допустимых слов алфавита, образуемого используемым кодом (2).

На втором этапе рассчитывается значение отношения энергии бита к спектральной плотности шума в зависимости от заданного требования по достоверности и выбранного варианта сигнала ПЧМ- m/k , манипулированного кодом с постоянным весом в канале с переменными параметрами при некогерентной обработке (см. формулу (1)).

Для пересчета E_b/N_0 к величине $P_c/P_{ш}$ используется выражение (9). Реальное значение отношения «сигнал/шум» в канале может быть получено при обработке некоторой тестовой последовательности. Полученное значение сравнивается с рассчитанным для конкретного сигнала ПЧМ- m/k . Если рассчитанное значение отношения «сигнал/шум» окажется меньше реального, то происходит уменьшение параметра k на единицу и все расчеты повторяются.

При положительном результате указанного сравнения, на приемную сторону передается тестовая посылка уже с выбранным вариантом сигнала ПЧМ- m/k . После чего осуществ-

вляется сеанс связи, в ходе которого контролируется вероятность битовой ошибки. Если ее значение окажется меньше требуемой, то принимается решение о работе с выбранными параметрами сигнала ПЧМ- m/k . При несоблюдении данного условия, символьная скорость уменьшается в два раза, и все вышеописанные действия повторяются до тех пор, пока условие по достоверности не будет выполнено.

Заключительным этапом является вывод подобранных значений k и R_s и переход в режим работы. Во время непосредственной работы с некоторой периодичностью весь алгоритм повторяется снова для адаптации нашей передачи под изменяющиеся параметры ионосферного канала.

При использовании такого алгоритма адаптивного выбора параметров k и R_s для сигналов ПЧМ- m/k предоставляется возможным рациональное использование ресурсов ионосферной радиолонии.

Заключение

Полученные результаты подтверждают перспективность применения сигналов ПЧМ в системах декаметрового диапазона. Адаптивное управление параметрами, открывает возможность их применения в каналах с переменными параметрами. Так, за счет регулирования символьной скорости в каждом подканале в результате кодирования, предоставляется возможность снижения негативных последствий, вызванных межсимвольной интерференцией.

Результаты эксперимента показали при работе в декаметровых каналах на скоростях от 50 до 250 бод, целесообразность выбора от 2 до 4 активных тоновых колебаний при кодировании символов сигналов ПЧМ- m/k . При этом наиболее частотно-энергетически эффективным является сигнал ПЧМ-7/3.

Кроме того, выбор кода с постоянным весом в качестве манипулирующего, обеспечивает возможность обнаружения ошибок еще на стадии приема сигнала, что открывает дополнительные возможности по повышению помехоустойчивости.

Литература

1. Шпаков П.А. Тенденции развития способов передачи и средств регистрации телеметрической информации ракетно-космической техники США // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Т. 12. № 7. С. 33-36.
2. Шестаков Ю.И., Каплин Е.А., Утенков В.Г., Парфененков О.М. Создание и развитие мобильных средств связи декаметрового диапазона волн // Электросвязь. 2011. № 8. С. 6-8.
3. Коренной А.В., Межуев А.М., Ревин В.С. Адаптивный алгоритм приема многолучевых сигналов в декаметровом канале связи на основе оценки его импульсной характеристики // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 10. № 2. С. 200-210.

4. Дворников С.В., Домбровский Я.А., Семисошенко М.А., Гулидов А.А., Иванов Р.В. Оценка помехозащищенности линий радиосвязи с медленной псевдослучайной перестройкой рабочей частоты // Информация и космос. 2016. № 4. С. 11-14.

5. Kandaurov N.A. Signal-code constructs and processing algorithm with automatic dispersion distortion compensation for wideband HF communication // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Т. 13. № 2. С. 76-79.

6. Катков К.А., Катков Е.К. Определение вероятности возникновения частотно-селективных замираний радиосигналов при ионосферных возмущениях // Информационные системы и технологии. 2018. № 2 (106). С. 85-94.

7. Альтер Л.Ш., Подманков И.И., Свириденко М.В. Расчет взаимных помех между проектируемыми и действующими радиосредствами на локальном объекте // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2009. Т. 3. № 1. С. 23-25.

8. Бальков А.А. Модель канала декаметрового радиосвязи, учитывающая влияние скользящей по спектру помехи // Информация и космос. 2020. № 1. С. 34-41.

9. Дворников С.В., Бальков А.А., Дворников С.С., Попов Е.А. Помехоустойчивость сигналов с перестановочной частотной модуляцией в каналах с постоянными параметрами при некогерентном приеме // Радиотехника. 2019. № 12 (20). С. 24-31.

10. Slepian D. Permutation modulation // Proceedings of the IEEE. Vol. 53. Issue : 3. March 1965.

11. Дворников С. В., Пшеничников А. В., Бальков А. А. Овчинников Г. Р., Присяжнюк А. С. Способ передачи информации по коротковолновому каналу связи с использованием частотно-манипулированных сигналов. Патент РФ № 2 705 357, от 11.04.2019, опубликован: 07.11.2019 Бюл. № 31.

12. Быховский М.А. Помехоустойчивости приема сигналов при перестановочной модуляции // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Том 9. №4. С. 12-16.

13. Дворников С.В., Овчинников Г.Р., Бальков А.А. Программный симулятор ионосферного радиоканала декаметрового диапазона // Информация и космос. 2019. № 3. С. 6-12.

14. Бальков А.А., Дворников С.В., Овчинников Г.Р., Дворников С.С. Программная реализация сигнала с перестановочной частотной модуляцией FSK-7/3 на основе кода с постоянным весом МТК-3. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019617875, 24.06.2019. Заявка № 2019616860 от 05.06.2019.

15. Дворников С. В., Бальков А. А. Овчинников Г. Р., Присяжнюк А. С. Модель ионосферного КВ радиоканала для узкополосного сигнала. Свидетельство на программу для ЭВМ № 2 019 617 874 от 24.06.2019.

16. Комарович В.Ф., Кузнецов С.И., Жилин А.В. Критерии выбора вероятностно-оптимальных частот в адаптивных системах декаметрового диапазона // Информация и космос. 2007. № 3. С. 57-66.

17. Каналы и тракты магистральной первичной сети единой автоматизированной системы связи. ГОСТ 21655-87, УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 29.09.87 № 3822.

18. Bertolini M., Campos V.L., Ferretti G., Salomonson P., Fré P., Trigiante M. // SUPERSYMMETRIC 3-BRANES ON SMOOTH ALE MANIFOLDS WITH FLUX. Nuclear Physics B. 2001. Т. 617. № 1-3. С. 3-42.

19. Department of defense interface standard. interoperability and performance standards for medium and high frequency radio systems. MIL-STD-188-141B, 1 march 1999 P. 584.

PROPOSALS FOR MANAGEMENT OF THE TRANSMISSION SPEED AND NOISE IMMUNITY OF SIGNALS WITH PERMUTATION FREQUENCY MODULATION

Sergey V. Dvornikov, *Military academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, St-Peterburg, Russia,*
practicdsv@yandex.ru

Anton A. Balykov, *Military academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, St-Peterburg, Russia,*
etomoiadres@mail.ru

Abstract

The article is dedicated to the study of signals with permuted frequency modulation of PFM-m/k with encoding at the physical level with a constant weight code for low-speed noise-resistant transmission of digital information over the ionospheric radio channel. The relevance of this research direction is shown.

The purpose of the work is to develop proposals for controlling the parameters of signal-code structures based on permutation frequency modulation, which provides a compromise choice between speed and noise immunity when transmitting information over an ionospheric radio channel in a complex signal-noise environment.

An approach is presented to select the number of simultaneously used tonal reference vibrations k for encoding messages depending on the interference situation in order to achieve the maximum possible transmission speed while meeting the reliability requirement. The rational choice of the number of tonal reference vibrations and symbolic speed for effective use of energy and frequency resources of the radio line is justified. The justification of the proposed main stages of management is given, the results of analytical research and simulation modeling are presented, confirming the validity of the theoretical conclusions made.

Keywords: *permutation frequency modulation, code with constant weight, ionosphere radio channel, digital signal processing, energy efficiency, spectral efficiency, noise immunity, signal-code construction.*

References

1. Slepian D. (1965). Permutation modulation. *Proceedings of the IEEE*. Vol. 53. Issue : 3 -March 1965.
2. Makovy V.A. Chupeyev S.A. (2010). Perestanochnaya modulyaciya I ee parametru [Permutation modulation signals and their properties]. *Teoriya i tehnika radiosvyazi*, no. 1, pp. 13-24. (in Russian)
3. Byhovskii M.A. (2015). Pomehoustoichivost' priema signalov perestanochnoi modylyaci [Noise immunity of permutation modulation signal reception]. *T-Comm*, vol. 9, no. 4, pp. 12-16. (in Russian)
4. Dvornikov S.V., Balykov A.A., Dvornikov S.S., Popov E.A. (2019). Pomehoustoichivost' signalov s perestanochnoi chastotnoi modylyaciei v kanalakh s postoyannymi parametrami pri nekogerentnom prieme [The noise immunity of the signals with permutation frequency modulation in channels with constant parameters if the non-coherent reception]. *Radiotekhnika*, no. 12 (20), pp. 24-31. (in Russian)
5. Dvornikov S.V., Balykov A.A., Pshenichnikov A.V., Ovchinnikov G.R., Prisyazhnyuk A.S. (2019). Method for transmitting information over a short-wave communication channel using frequency-manipulated signals. Patent Russia no. 2 705 357, 07.11.2019. (in Russian)
6. Dvornikov S.V., Balykov A.A., Ovchinnikov G.R. (2019). Programnyi simulyator ionosfernogo radiokanala dekametrovogo diapazona [Software simulator of ionospheric HF radio channel]. *Informatsiya I kosmos*, no. 3, pp. 6-12. (in Russian)
7. Dvornikov S.V., Balykov A.A., Ovchinnikov G.R., Prisyazhnyuk A.S. (2019). The model of an ionospheric high-frequency radio channel for a narrow-band signal. Computer program registration certificate Russia no. 2 019 617 874, 24.06.2019. (in Russian)

Information about authors:

Sergey V. Dvornikov, *Dr. habil. Of Engineering Sciences, Full Professor. Professor of the Department of radiocommunication. Military academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, St-Peterburg, Russia*

Anton A. Balykov, *the postgraduate student of the Department of radio communication. Military academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, St-Peterburg, Russia*