

УДК 621.391.1

ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ АДАПТИВНЫЕ КВ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

В.В. Егоров, ведущий научный сотрудник ОАО «Российский институт мощного радиостроения», к.т.н.; rimr500@mail.ru

Рассматриваются основные проблемы, возникающие при построении высокоскоростных систем, предназначенных для использования в системах управления. Показано, что необходимая достоверность связи и скорость доставки информации (передачи данных по КВ радиоканалу) могут быть обеспечены с помощью методов адаптации системы к условиям распространения радиоволн и к помеховой обстановке. Анализируются задачи выбора сигнально-кодированной конструкции, позволяющей оперативно изменять параметры сигналов, помехоустойчивого кода и алгоритмов обработки для достижения максимально возможной в текущих условиях скорости при обеспечении заданной достоверности.

Ключевые слова: системы передачи данных по КВ радиоканалу, многопараметрическая адаптация, оценка параметров канала.

Введение. Для беспроводной передачи данных (ПД) на большие расстояния могут быть использованы КВ системы ПД, преимуществом которых является возможность передачи информации на большие расстояния без промежуточных ретрансляционных станций при относительно небольшой мощности передатчиков, а также автономность, самодостаточность, быстрая развертываемость и высокая живучесть. Особую актуальность такие системы приобретают в связи с освоением Крайнего Севера и необходимостью создания информационной инфраструктуры.

Однако данный диапазон характеризуется высокой нагрузкой помехами от сторонних радиозлектронных средств, замираниями сигналов, многолучевым распространением, наличием доплеровского сдвига частот, что не позволяет традиционными способами передавать большие объемы данных с высокой скоростью и достоверностью. Для обеспечения требуемых сегодня скоростей и достоверности ПД необходимо использовать методы многопараметрической адаптации к динамически изменяющейся сигнально-помеховой обстановке.

Использование адаптивных систем КВ передачи данных в системах управления. Применение адаптивных систем КВ радиосвязи позволяет организовать оперативную ПД в интересах территориально распределенных автоматизированных систем управления, в которых требования по достоверности определяются возможностями современных методов сжатия и криптографической защиты информации. Так, допустимое значение вероятности необнаруженной ошибки на бит сообщения составляет, как правило, 10^{-9} – 10^{-11} .

При передаче сообщений по КВ радиоканалам на фиксированной частоте с постоянной скоростью передачи и не изменяющимся помехоустойчивым кодом удается передавать файлы относительно небольших объемов (не более 10 Кбайт) со средней информационной скоростью порядка 100 бит/с и с вероятностью ошибки на бит 10^{-3} – 10^{-4} , что явно не удовлетворяет потребностям современных АСУ. Поэтому при передаче файловых данных достаточно большого

объема по КВ радиоканалам необходимо в полной мере использовать возможности адаптивного управления.

В частности, в зависимости от сигнально-помеховой обстановки следует изменять рабочую частоту, техническую скорость передачи за счет изменения кратности модуляции, избыточность и параметры помехоустойчивого кода, длительности защитного интервала и элементарного сигнала, количество и расстановку используемых субчастот при работе с сигналами OFDM, а также адаптивное перераспределение информационного потока и мощности передатчика между субчастотами сигналов OFDM [1].

Основные элементы адаптивных систем КВ передачи данных. Несмотря на значительное количество работ, задача построения сигнально-кодированной конструкции, органично вписывающейся в адаптивную систему, недостаточно изучена. Помимо традиционных функций, связанных с демодуляцией сигналов и декодированием информации, в процессе работы адаптивной системы возникает необходимость решения задач, связанных с оперативной и точной оценкой параметров канала радиосвязи. Поскольку адаптивная система связи является системой дискретного управления с конечным числом состояний, сигнально-кодированная конструкция должна быть такой, чтобы при любом изменении параметров системы не требовалось послышки дополнительных пилотных, синхронизирующих и настроечных сигналов, а необходимая частотная и тактовая синхронизация осуществлялись по рабочим сигналам [2].

Сегодня существует значительное число промышленно выпускаемых КВ модемов, поэтому возникает желание построить адаптивную систему на их основе. Однако при таком подходе нельзя провести полноценный анализ сигнала на выходе канала связи, необходимый для функционирования контуров адаптации. В этом случае возникает проблема создания анализатора состояния канала, сложность решения которой в объеме необходимом для полного использования частотно-временного и энергетического ресурсов КВ диапазона не уступает сложности создания самого модема, в котором фактически воспроизводятся все элементы модема и решаемые им задачи, включая частотно-временную синхронизацию.

Кроме того, сигнальная конструкция всех промышленно выпускаемых модемов включает значительное количество пилот-сигналов, приводя к неэффективному использованию частотно-временного ресурса, а для нормальной работы этих модемов при любом изменении состояния системы необходимо посылать синхронизирующие последовательности.

Существуют два основных подхода к построению систем КВ радиосвязи — последовательная и параллельная ПД. Параллельная ПД характеризуется высокой спектральной эффективностью и, как следствие, более высокой скоростью передачи, но такие сигналы имеют значительный пик-фактор. Последовательная ПД позволяет в полной мере использовать мощность передатчика. Тем не менее,

особенности последовательных систем, связанные с необходимостью адаптивной коррекции сигналов на приемной стороне, возникающей из-за влияния многолучевого распространения сигналов, существенно ограничивают реальную скорость ПД.

В настоящее время более широкое распространение для высокоскоростной ПД по радиоканалам получили методы, основанные на использовании множества субканалов с ортогональным частотным разделением (OFDM). При этом длительность сигналов и частотное разнесение выбирается исходя из условия ортогональности, что обеспечивает отсутствие межканальных помех, несмотря на частичное перекрытие спектров сигналов на отдельных поднесущих. Использование защитного интервала позволяет устранить влияние межсимвольных искажений при демодуляции. Сигналы такого вида являются спектрально более эффективными, чем сигналы, используемые в последовательной передаче.

Следует отметить, что, несмотря на перечисленные достоинства, сигналы OFDM требуют высокого качества синхронизации по частоте и времени. Кроме того, как было отмечено выше, энергетическая эффективность таких сигналов ниже одночастотных из-за наличия пик-фактора сигнала. Необходимость использования защитного интервала как средства борьбы с многолучевостью приводит к снижению скорости ПД. Вместе с тем параллельные OFDM-сигналы в максимальной степени приспособлены для использования в адаптивных системах, поскольку позволяют варьировать значительным количеством параметров, а алгоритмы модуляции/демодуляции, частотной и тактовой подстройки (синхронизации) остаются неизменными при любых изменениях параметров сигнала.

При передаче сообщений по КВ радиоканалам, в которых присутствуют быстрые и медленные замирания сигнала, возможность эффективного использования сигналов с квадратурно-амплитудной модуляцией с большой размерностью сигнального созвездия представляется весьма проблематичной. Наиболее целесообразно использовать сигналы с относительной фазовой модуляцией: они не требуют послышки дополнительных обучающих или пилотных сигналов. При использовании OFDM-сигналов высокой кратности (до 16 позиций фазы, расположенных в соответствии с кодом Грея) к передающему устройству предъявляются требования по линейности порядка 30 дБ, что вполне реализуемо на серийно выпускаемой и относительно недорогой аппаратуре.

Сигналы с OFM хорошо вписываются в адаптивную систему, поскольку позволяют достаточно легко менять скорость передачи сообщений за счет изменения кратности модуляции, длительности сигналов и защитного интервала. При этом структура и алгоритмы работы модулятора и демодулятора изменяются незначительно. Кроме того, сигналы с OFM позволяют оценивать достоверность передачи на рабочей частоте как в текущем режиме, так и во всех потенциально возможных режимах за счет применения метода виртуальной демодуляции, сущность которого сводится к определению частоты попадания фазы в разрешенные сектора для OFM более высокой кратности и решению соответствующих алгебраических уравнений [3].

Так, вероятность ошибки на бит для сигналов с OFM-4 при использовании сигналов OFM-2 определяется в результате решения уравнения:

$$p_4^2 + (1 - p_4)^2 = P_4,$$

где P_4 — вероятность события, состоящего в том, что фаза принятого сигнала находится в секторах, соответствующих символам 00 или 11, независимо от того, какой символ передавался; p_4 — вероятность ошибки на бит для сигналов с OFM-4.

В качестве оценки P_4 можно использовать соответствующую частоту, доступную для измерения:

$$\hat{P}_4 = \frac{k_4}{N},$$

где k_4 — количество попаданий фазы принятого сигнала в сектора, соответствующие символам 00 и 11; N — объем выборки. Аналогичные выражения получены для определения вероятности ошибок при использовании сигналов OFM-8 и OFM-16[3].

Метод виртуальной демодуляции позволяет быстро и эффективно производить адаптацию системы ПД к изменяющимся сигнально-помеховым условиям. Для каждой из возможных в системе кратностей OFM определяются вид и параметры помехоустойчивого кода, которые гарантированно позволяют исправлять ошибки, возникающие в процессе ПД по каналу связи, с учетом полученной оценки вероятности ошибки на бит для данной кратности OFM. Из всех полученных комбинаций кратностей OFM и видов помехоустойчивого кода выбирается пара, которая позволяет обеспечить максимальную информационную скорость ПД. Таким образом, адаптивная система ПД, основанная на использовании виртуального демодулятора и способная наиболее полно использовать частотно-временные и энергетические ресурсы канала связи, быстро реагирует на изменения сигнально-помеховой обстановки и обеспечивает максимально возможную в текущий момент времени информационную скорость.

Для обеспечения высокой достоверности ПД необходимо использовать помехоустойчивые коды. Несмотря на широкое распространение турбокодов, их применение в системах КВ диапазона весьма проблематично из-за невозможности точного и оперативного вычисления отношения правдоподобия для каждого символа (бита). Поэтому более перспективными для адаптивных КВ систем ПД представляются каскадные кодовые конструкции. В качестве внешнего каскада в такой конструкции можно использовать код Рида-Соломона, позволяющий гибко изменять как длину кодового блока, так и его избыточность. В качестве критерия оптимальности на каждом блоке выбираются параметры кода, обеспечивающие максимально достижимую информационную скорость ПД при заданной достоверности. В качестве внутреннего кода может быть применен любой блочный код с количеством информационных символов, согласованным с разрядностью символов внешнего кода. Например, перспективна кодовая конструкция, состоящая из внешнего кода Рида-Соломона над полем $GF(2^{12})$ и внутреннего квазиидеального кода Голя (24, 12, 8).

При использовании каскадных кодов для определения вероятности ошибки на бит в текущем режиме могут быть взяты продукты декодирования внутреннего кода в виде частоты появления синдромов, соответствующих заданному количеству ошибок [4]. Как правило, в качестве внутреннего кода применяется линейный блочный код с параметрами (n, k, d) и для его декодирования используется алгоритм вычисления синдрома, указывающего позиции и количество обнаруженных кодом ошибок. Тогда вероятность события, состоящего в том, что при декодировании принятого кодового слова длиной n , синдром обнаружит l ошибок, определяется выражением:

$$P_l = \sum_{m=0}^n \rho_m \sum_{r=0}^l \left(C_m^r C_{n-m}^{l-r} p^{m-2r+l} (1-p)^{n-m+2r-l} \right) \approx \frac{k_l}{N},$$

где ρ_m — количество кодовых слов веса m ; p — вероятность ошибки на бит; k_l — подсчитанное количество произошедших указанных событий.

Численное решение этого уравнения позволяет определить вероятность ошибки на бит. Например, для кодовой конструкции суммарной длиной в несколько тысяч бит необходимо использовать несколько сотен кодовых слов Голя, что позволяет с высокой степенью точности определить вероятность ошибки на бит в текущем режиме. На основании полученной оценки изменяются параметры как сигнальной, так и кодовой конструкции. Анализ эффективности такого алгоритма показывает, что он практически не уступает по точности оценке вероятности ошибки на бит, получаемой в процессе обработки заранее известного на приемной стороне теста [4].

Каскадная кодовая структура позволяет также повысить помехоустойчивость приема информации за счет структурной избыточности. При декодировании внешнего кода может быть использована информация о достоверности принятых кодовых слов внутреннего кода (о наличии стертых кодовых слов), что позволяет повысить вероятность безошибочного приема кодового блока. Кроме того, восстановление стертых кодовых слов внутреннего кода возможно с помощью переборных методов [5], что позволяет получить характеристики помехоустойчивости, близкие к турбокодам.

Основные задачи, решаемые в процессе многопараметрической адаптации. Для выбора оптимального защитного интервала необходимы сведения о структуре многолучевости, которые полностью содержатся в импульсной характеристике канала. Вместе с тем при использовании параллельных ОФМ-сигналов получить сведения об импульсной характеристике без помощи тестовых посылок весьма проблематично. Многолучевость приводит к изменению амплитудно-частотной характеристики канала связи (модуляция амплитудного спектра сигнала), поэтому путем вычисления спектра мощности сигнала в частотной области, выполняемого в процессе демодуляции, и последующего перехода во временную область, можно определить автокорреляционную функцию принимаемого информационного сигнала, также содержащую сведения о многолучевости, и объективно выбрать длительность защитного интервала. Неоправданное увеличение защитного интервала, назначаемого, как правило, из расчета на худший случай, ведет к снижению информационной скорости ПД. Снижение длительности защитного интервала позволяет повысить техническую скорость передачи и тем самым увеличить избыточность помехоустойчивого кода.

Для получения необходимой информации о качестве резервных частот вместо операций прямого зондирования канала предлагается перемежать процесс ПД на выбранной частоте с передачей отдельных информационных блоков на других выделенных частотах [6]. При этом на зондируемых частотах передаются не заранее известные на приемной стороне тестовые блоки, не несущие информационной нагрузки, а обычные информационные блоки, закрытые помехоустойчивым кодом и циклической контрольной суммой CRC.

Таким образом, одновременно решаются две задачи — зондирования резервных частот и передачи данных. При этом качество канала оценивается не только на текущей информационной скорости, но и на всех потенциально

возможных в системе скоростях с помощью приведенного выше алгоритма виртуальной демодуляции. При ухудшении сигнально-помеховых условий на текущей рабочей частоте, система ПД переходит на резервную частоту, наилучшую по результатам описанного алгоритма зондирования, совмещенного с процессом ПД.

Периодичность частотного зондирования определяется исходя из скорости замираний радиоканала и количества выделенных частот. Зондирование всех выделенных частот происходит в процессе ПД без существенного снижения информационной скорости. При использовании предложенного алгоритма частотного зондирования, совмещенного с процессом ПД, в системе ПД в любой текущий момент времени имеется актуальный ранжированный по качеству канала связи список резервных частот, для каждой из которых в любой момент времени известна максимально допустимая скорость ПД.

Команда об изменении параметров системы передается по каналу обратной связи, защищенному помехоустойчивым кодом. Для снижения вероятности обрыва связи, в случае ошибочного приема или неприема командной информации об изменении параметров системы, осуществляется прием блока информационных данных с помощью как запрошенных параметров, так и параметров, действовавших до запрошенного изменения. Это не требует использования в канале обратной связи кодов с большой избыточностью и больших временных затрат на передачу команды [7]. Особенностью предложенного подхода к передаче команд является то, что каждый раз передаются только изменяемые параметры системы. При этом по обратному каналу передается незначительный объем данных, а информационная часть команды имеет переменную длину при постоянной длине кодовой конструкции. Для декодирования такой команды применяется подход, состоящий в распознавании структуры информационной части команды путем многократного декодирования для различных информационных длин и проверки результата декодирования по CRC.

Процесс функционирования адаптивной КВ радиолинии при передаче файловых данных в полудуплексном режиме сводится к циклическому чередованию интервалов передачи сегментов сообщения, называемых канальным блоком, и квитанций по каналу обратной связи. С учетом переменной скорости передачи сообщений канальный блок содержит несколько кодовых блоков. Квитанция на принятый канальный блок содержит информацию о номерах обнаруженных искаженных кодовых блоков и управляющую информацию об изменении параметров системы ПД.

Функционирование адаптивной КВ радиолинии при передаче файловых сообщений можно представить в виде последовательного переключения системы из одного состояния в другое в момент приема квитанции [8]. Состояние системы с номером j соответствует передаче сообщений на i частоте с l видом сигнала и m видом помехоустойчивого кода [9].

Пусть V_{Tj} — техническая скорость при нахождении системы в состоянии j , а R_j — кодовая скорость в состоянии j . Тогда условием обеспечения максимума средней скорости передачи информации является выбор на каждом канальном блоке таких параметров, при которых на длительности следующего канального блока обеспечивается максимальная информационная скорость. Критерием выбора новых параметров системы на каждом кодовом блоке для алгоритмов порогового типа является выполнение условия:

$$\max_j V_{Tj} R_j$$

при выполнении ограничения $P_{\text{ош } j} < P_{\text{ош. доп. } j}$, где $P_{\text{ош. } j}$ — вероятность ошибки на бит в j состоянии, а $P_{\text{ош. доп. } j}$ — пороговое значение, зависящее от вида помехоустойчивого кода, используемого в состоянии j .

Обычно пороговое значение вероятности ошибки на бит выбирается из условия безошибочного декодирования кодового блока с заданной вероятностью, определяющей среднее количество переспросов искаженных кодовых блоков, обнаруженных с помощью циклической контрольной суммы CRC. Для восстановления с помощью переспроса искаженных информационных блоков все помехоустойчивые коды должны иметь количество информационных символов кратное некоторому минимальному сегменту — кванту сообщения. В этом случае возникает возможность кодирования n_k квантов сообщения при одинаковой кодовой скорости как минимум двумя способами:

- каналный блок представляет собой n_k кодовых конструкций, в которых количество информационных символов совпадает с квантом сообщения;
- каналный блок кодируется одним кодом, у которого количество информационных символов равно n_k квантов.

Обе приведенные кодовые конструкции обладают одинаковой кодовой скоростью. Проведем оценку сравнительной эффективности кодовых конструкций по критерию временных потерь, связанных с необходимостью передачи ошибочно принятых квантов сообщения.

Средние временные потери для первого способа определяются выражением:

$$T_{\text{пот}}^{(1)} = \sum_{k=1}^{n_k} C_{n_k}^k P_1^k (1 - P_1)^{n_k - k} k T_1,$$

где P_1 — вероятность ошибочного декодирования кодового блока, переносящего один сегмент сообщения; T_1 — интервал времени, в течение которого передается один сегмент сообщения.

После алгебраических преобразований выражения для $T_{\text{пот}}^{(1)}$ получим:

$$T_{\text{пот}}^{(1)} = P_1 T_{\text{кб}},$$

где $T_{\text{кб}} = n_k T_1$ — длительность каналного блока.

Для второго способа средние временные потери определяются выражением:

$$T_{\text{пот}}^{(2)} = P_2 T_{\text{кб}}.$$

Очевидным критерием выбора вида помехоустойчивого кода при одинаковых значениях кодовой скорости и виде сигналов является минимизация временных потерь, связанных с повторной передачей неприятых квантов сообщения, что эквивалентно выполнению условия: $\min \{P_1, P_2\}$.

Выражение для информационной скорости с учетом временных затрат на переспрос искаженных блоков при нахождении системы в состоянии j может быть записано в виде:

$$V_{\text{И}j} = V_{Tj} R_j \frac{T_{\text{кб}}}{T_{\text{кб}} + T_{\text{ок}}} \cdot \frac{1}{1 + P_j},$$

где P_j — вероятность неприема одного кодового блока, используемого в состоянии j ; $T_{\text{ок}}$ — длительность квитанции, передаваемой по обратному каналу.

На основе проведенного анализа выбора кодовой конструкции из нескольких возможных альтернатив, обладающих одинаковой кодовой скоростью, можно сформулировать условие выбора кодовой конструкции как условие обеспечения максимума информационной скорости.

Поскольку значение P_j является функцией $P_{\text{ош/бит}j}$, обобщенным критерием вида нового рабочего состояния будет выполнение условия:

$$\max_j V_{Tj} R_j \frac{T_{\text{кб}}}{T_{\text{кб}} + T_{\text{ок}}} \cdot \frac{1}{1 + P_j(P_{\text{ош/бит}j})}.$$

Вероятность безошибочного декодирования каскадного кода вычисляется на основе известных аналитических выражений.

Приведенный критерий можно трактовать как выбор состояния, в котором кодовый блок, информационная часть которого может содержать несколько квантов, передается с максимальной информационной скоростью. Исходными данными для выбора нового состояния для передачи канального блока являются вероятности ошибки на бит для сигналов, потенциально используемых для передачи канального блока и полученных на основе виртуальной демодуляции информационных сигналов [3].

Заключение. В последние годы благодаря достижениям радиопизики, теории управления, цифровой обработки сигналов стало возможным создание систем, реализующих изложенные подходы. Трассовые испытания и опыт эксплуатации адаптивного комплекса передачи данных «Пирс», разработанного в ОАО «РИМР», показали, что в полосе 3,1 кГц удается достигнуть информационной скорости 5–6 кБит/с при вероятности ошибки на бит не более 10^{-11} . Полученные результаты позволяют передавать данные АСУ с необходимой скоростью и достоверностью на расстояния нескольких тысяч километров. Это дает возможность в определенных ситуациях рассматривать КВ радиосвязь в качестве основного вида связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Егоров В.В., Мингалев А.Н.** Адаптивное управление видом модуляции в субканалах OFDM сигналов / Доклады VIII Всероссийской науч.-техн. конф. «Радиолокация и радиосвязь». — Москва, 24–26 ноября 2014 г., С. 218–222.
2. **Егоров В.В., Тимофеев А.Е.** Установление частотно-временной синхронизации в многочастотных КВ-системах передачи данных // Электросвязь. — 2013. — № 7. — С. 41–44.
3. **Егоров В.В., Смаль М.С.** Прогнозирование достоверности приема ОФМ сигналов для потенциально возможных режимов работы // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. — 2014. — № 4. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/apr14/5/text.pdf>
4. **Егоров В.В., Смаль М.С.** Оценка вероятности ошибки на бит по результатам декодирования кодовых слов // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. — 2014. — № 4. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/apr14/4/text.pdf>
5. **Мингалев А.Н.** Повышение исправляющей способности каскадного кода методом перебора / Итоги диссертационных исследований. Том 2 — Материалы III Всероссийского конкурса молодых ученых. — М.: РАН, 2011, с. 61–70.
6. Патент РФ № 2447579. Способ активного контроля рабочих частот / **Егоров В.В., Катанович А.А., Лобов С.А., Мингалев А.Н., Тимофеев А.Е., Чемиринко В.П.**, 2012.
7. **Егоров В.В., Тимофеев А.Е.** Обратный канал в адаптивных коротковолновых радиосистемах передачи информации // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. — 2013. — Вып. 6. — С. 3–8.
8. **Егоров В.В.** Эффективность адаптивных систем экстремально порогового типа // Техника средств связи. — Сер. ТРС, Вып. 8. — 1983, С. 78–87.
9. **Егоров В.В.** Аналитико-статистический метод расчета характеристик систем управления с переключающим устройством // Кибернетика. — № 1. — 1989. — С. 115–116.

Получено 15.04.15