



УДК 621.391.1

В. В. Егоров

ПАО "Российский институт мощного радиостроения" (Санкт-Петербург)

Адаптивное управление параметрами коротковолновых систем передачи данных

Рассмотрен выбор оптимальных параметров адаптивных систем передачи данных по коротковолновому радиоканалу по критериям максимума средней информационной скорости и максимума вероятности доставки сообщения за время, не превышающее заданного.

Системы передачи данных по коротковолновому радиоканалу, многопараметрическая адаптация, критерии эффективности

Для беспроводной передачи данных на большие расстояния могут быть использованы коротковолновые (КВ) системы передачи данных, 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 [1]. Особую актуальность такие системы приобретают в связи с освоением Крайнего Севера и необходимостью создания информационной инфраструктуры. Однако указанный диапазон характеризуется высокой загрузкой помехами от сторонних радиоэлектронных средств, замираниями сигналов, многолучевым распространением, влиянием доплеровского сдвига частот, что не позволяет традиционными способами передавать большие объемы данных с высокой скоростью и достоверностью. Для обеспечения требуемых на сегодняшний день скоростей и достоверности передачи данных необходимо использовать методы многопараметрической адаптации к динамически изменяющейся сигнально-помеховой обстановке.

Применение адаптивных систем КВ-радиосвязи позволяет организовывать оперативную передачу данных в интересах территориально распределенных автоматизированных систем управления (АСУ), 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, $10^{-9} \dots 10^{-11}$ [2].

При передаче сообщений по КВ-радиоканалам на фиксированной частоте с постоянной скоростью передачи и с неизменяющимся помехоустойчивым кодом удастся передавать файлы относительно небольших объемов (не более 10 Кбайт) со средней информационной скоростью порядка 100 бит/с и вероятностью ошибки на бит $10^{-3} \dots 10^{-4}$, что явно не удовлетворяет потребностям современных АСУ [3]. 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 сигналами OFDM, а также адаптивное перераспределение информационного потока и мощности передатчика между субчастотами сигналов OFDM [4].

Функционирование адаптивной КВ-радиолинии при передаче файловых данных в полудуплексном режиме сводится к циклическому чередованию интервалов передачи сегментов сообщения, называемых канальными блоками, и приема квитанций по каналу обратной связи. С учетом переменной скорости передачи сообщений канальный блок может содержать различное количество кодовых блоков. Квитанция на принятый канальный блок содержит информацию о номерах обна-

руженных искаженных кодовых блоков и управляющую информацию об изменении параметров системы передачи данных.

Функционирование адаптивной КВ-радиолинии при передаче файловых сообщений можно представить в виде последовательного переключения системы из одного состояния в другое после приема квантации с целью достижения максимума заданного критерия эффективности. В задачах межкомпьютерного обмена в качестве такого критерия наиболее часто выступает средняя информационная скорость.

Каждому j -му состоянию системы соответствует частота, виды сигнала и помехоустойчивого кода – сигнально-кодовая конструкция (СКК). Пусть v_{Tj} и R_j – техническая скорость передачи информации и кодовая скорость при нахождении в состоянии j , а $P_{\text{ош/бит}j}$ – вероятность ошибки на бит при нахождении системы в этом состоянии. Тогда условием обеспечения максимума средней скорости передачи информации является выбор при передаче каждого канального блока СКК, обеспечивающей в течение передачи следующего канального блока максимальную информационную скорость. Традиционно используемым критерием выбора СКК на каждом кодовом блоке для алгоритмов порогового типа является выполнение условия

$$\max_j (v_{Tj} R_j) \quad (1)$$

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

Обычно $P_{\text{ош.доп}j}$ выбирается из условия безошибочного декодирования кодового блока с заданной вероятностью, определяющей среднее количество переспросов искаженных кодовых блоков, обнаруженных с помощью циклической контрольной суммы CRC [5]. Для упрощения процесса восстановления с помощью переспроса искаженных информационных блоков все используемые помехоустойчивые коды должны иметь количество информационных символов, кратное некоторому минимальному сегменту – кванту сообщения [5]. В этом случае возникает возможность кодирования n квантов сообщения при одинаковой кодовой скорости как минимум двумя способами:

– канальный блок представляет собой n кодовых конструкций, в которых количество инфор-

мационных символов совпадает с их количеством в кванте сообщения;

– канальный блок кодируется одним кодом, у которого количество информационных символов равно n 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

$$T_{\text{пот}}^{(1)} = \sum_{k=1}^n C_n^k P_1^k (1 - P_1)^{n-k} k T_1, \quad (2)$$

где C_n^k – количество сочетаний из n по k ; P_1 – вероятность ошибочного декодирования кодового блока, переносящего один квант сообщения; T_1 – интервал времени, в течение которого передается один квант сообщения.

После алгебраических преобразований (2) получим:

$$T_{\text{пот}}^{(1)} = P_1 T_{\text{к.б}},$$

где $T_{\text{к.б}} = n T_1$ – длительность канального блока.

Для второго способа средние временные потери определяются выражением

$$T_{\text{пот}}^{(2)} = P_2 T_{\text{к.б}},$$

где P_2 – вероятность ошибочного декодирования кодового блока, переносящего n квантов сообщения.

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

Информационная скорость с учетом временных затрат на переспрос искаженных блоков при нахождении системы в j -м состоянии определяется как

$$v_{\text{и}j} = v_{Tj} R_j (1 - Q_j),$$

где Q_j – вероятность неприема одного кодового блока, используемого в j -м состоянии.

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

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

$$\max_j \left\{ v_{Tj} R_j \left[1 - Q_j \left(P_{\text{ош/бит}j} \right) \right] \right\}.$$

Аналитическое выражение для $Q_j \left(P_{\text{ош/бит}j} \right)$ является громоздким, оно приведено в [6].

Приведенный критерий можно трактовать как выбор СКК, в которой кодовый блок с информационной частью, содержащей несколько квантов, передается с максимальной информационной скоростью. Отличительной особенностью сформированного критерия является тот факт, что он не зависит от субъективно назначаемого порогового значения $P_{\text{ош,доп}j}$, которое используется в критерии (1).

Исходными данными для выбора нового состояния системы передачи данных являются вероятности ошибки на бит для всех сигналов, потенциально используемых при передаче канального блока. Эти вероятности получены на основе статистической обработки информационных сигналов не только для используемого режима, но и для всех возможных в системе режимов, а также обработки вторичных продуктов декодирования помехоустойчивых кодов, таких, как статистическое распределение появления синдромов, соответствующих различному количеству ошибок в кодовом блоке, методами, приведенными в [7], [8].

В качестве критерия эффективности систем связи также часто используется вероятность безошибочного доведения сообщения определенного объема за время не больше заданного. В нестационарных КВ-радиоканалах использование режима с неизменными параметрами передачи не позволяет достигнуть высокого значения названного критерия. Вместе с тем, при использовании методов адаптации возникает возможность максимизации этого показателя за счет выбора оптимальных параметров.

Процесс функционирования системы заключается в изменении СКК, т. е. номера состояния, на каждом временном интервале (такте) в зависимости от динамически изменяющихся характеристик канала связи. Для обеспечения безошибочного доведения сообщения по КВ-радиоканалу необходимо использовать помехоустойчивые коды с контролем достоверности и осуществлять переспрос принятых или искаженных информационных блоков. Для упрощения операции переспроса будем считать, что

кодовые блоки содержат одинаковое количество информационных бит, при этом количество проверочных бит помехоустойчивого кода может адаптивно изменяться. Также адаптивно может изменяться техническая скорость передачи за счет изменения позиционности модуляции и количества субчастот OFDM-сигнала. Будем также считать, что временные интервалы, в течение которых осуществляется передача информации с выбранными параметрами СКК, имеют одинаковую длительность. В этом случае на длительности одного такта может передаться несколько информационных блоков, количество которых зависит от технической скорости и кодовой избыточности.

Для построения алгоритма выбора оптимальной СКК на каждом шаге допустим, что сообщение разбивается на N одинаковых информационных блоков, каждый из которых на длительности одного такта передается с использованием одной из разрешенных СКК. Выделенное для передачи сообщения время разбивается на m одинаковых тактов. Непринятые или отбракованные информационные блоки передаются заново, в общем случае с другими параметрами СКК.

Тогда оптимальная стратегия передачи сообщения с целью достижения максимума вероятности безошибочного доведения сообщения не более чем за m тактов строится на методах пошагового управления по мере получения необходимой информации для выработки управляющего воздействия.

На первом шаге вычисляются вероятности доставки N информационных блоков не более чем за m тактов для всех возможных режимов при условии, что характеристики достоверности приема для каждого из информационных сигналов остаются неизменными в течение всех m тактов передачи. При использовании СКК, характеризуемой текущим номером j , в течение одного такта можно передать N_j информационных блоков. Тогда условная вероятность безошибочной доставки всего сообщения в j -м режиме на первом шаге определяется выражением

$$P_{j1} = \sum_{t=N}^{mN_j} C_{mN_j}^t W_{j1}^t (1 - W_{j1})^{mN_j - t},$$

где W_{j1} – оценка вероятности безошибочного декодирования кодового блока на первом такте при использовании для передачи сообщения СКК с номером j . Выражение для W_{j1} определяется вероятностью ошибки на бит для используемого в j -м режи-

ме сигнала и параметрами помехоустойчивого кода [6]. Тогда в качестве рабочего выбирается режим с номером, для которого выполняется условие

$$\max_j P_{j1}.$$

После приема сегмента сообщения, содержащего N_j информационных блоков, подсчитывается количество безошибочно принятых на первом такте информационных блоков s_1 . Также на длительности первого такта определяется вектор уточненных текущих значений вероятностей ошибки на бит для всех возможных сигналов, используемый для выработки решения на втором такте.

На втором шаге на основе полученных в течение первого такта сведений о достоверности приема в канале связи и количестве принятых информационных блоков вычисляются условные вероятности безошибочной доставки сообщения не более чем за $(m-1)$ тактов для всех возможных СКК в предположении, что на $(m-1)$ -м такте характеристики радиоканала остаются неизменными:

$$P_{j2} = \sum_{t=N-s_1}^{(m-1)N_j} C_{(m-1)N_j}^t W_{j2}^t (1-W_{j2})^{(m-1)N_j-t},$$

где W_{j2} – оценка вероятности безошибочного декодирования кодового блока на втором такте при использовании для передачи сообщения СКК с номером j , при расчете которой используется новое значение оценки вероятности ошибки на бит, сформированное на первом такте передачи. На этом шаге в качестве рабочего выбирается режим с номером, для которого выполняется условие

$$\max_j P_{j2}.$$

По аналогии на i -м такте передачи при выработке решения о выборе оптимальной СКК используется вектор вероятностей ошибки на бит, сформированный на $(i-1)$ -м такте, а также сведения о количестве безошибочно принятых информационных блоков за $(i-1)$ такт передачи. Выражение для условных вероятностей безошибочного доведения сообщения в j -м режиме не более чем за $(m-i+1)$ тактов имеет вид

$$P_{ji} = \sum_{t=N-s_1-s_2-\dots-s_{i-1}}^{(m-i+1)N_j} C_{(m-i+1)N_j}^t \times W_{ji}^t (1-W_{ji})^{(m-i+1)N_j-t},$$

где W_{ji} – вероятность безошибочного приема информационного блока на i -м такте при использовании СКК с номером j .

Номер оптимального режима для передачи на i -м такте определяется из условия

$$\max_j P_{ji}.$$

Рассмотренный алгоритм пошагового управления передачей сообщения на каждом шаге полностью описывается достоверностью передачи сообщения в каждом из режимов и общим количеством уже принятых кодовых блоков. Процесс оптимизации передачи сообщения сводится к задаче управления марковским случайным процессом [9].

Предложенный алгоритм является конструктивным, поскольку все необходимые исходные данные для его реализации известны к началу очередного временного такта. Вектор вероятностей ошибки на бит для всех возможных режимов может быть получен в процессе передачи сегмента сообщения в результате анализа информационных сигналов и продуктов декодирования. Исключение составляет первый шаг. Для него необходимые выборочные данные для оценки вектора вероятностей ошибки на бит формируются посредством обработки вызывного сигнала, поскольку его структура идентична информационному сигналу и его параметры заранее оговорены. Решение о рабочем режиме на каждом шаге вырабатывается на приемной стороне системы передачи данных, так как только она обладает всеми необходимыми для выработки управляющего воздействия исходными данными, и по каналу обратной связи доводится до передающей стороны методами, при которых ошибки при передаче команд управления не приводят к обрыву связи [10].

Рассмотренный метод предполагает на каждом шаге адаптацию по виду СКК. Вместе с тем сущность метода принципиально не изменится, если на каждом такте в число изменяемых параметров включить рабочую частоту. В этом случае увеличится количество возможных сочетаний параметров передачи. Один из возможных подходов к оцениванию векторов вероятностей ошибки на бит для всех возможных видов информационных сигналов на всех рабочих частотах без обрыва процесса передачи информации приведен в [11]. В этом подходе информация о качестве резервных частот формируется периодической передачей информационных блоков на запасных частотах.

Рассмотренные в статье методы адаптивного выбора параметров КВ-системы передачи данных являются конструктивными, поскольку вся необходимая информация для выбора оптимального режима формируется с необходимой точностью в процессе передачи сообщений.

Разработанные методы могут быть использованы в адаптивных системах передачи данных по нестационарным радиоканалам не только КВ, но и других диапазонов с учетом особенностей физических процессов распространения радиоволн в этих диапазонах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Березовский В. А., Дулькейт И. В., Савицкий О. К. Современная декаметровая радиосвязь: оборудование, системы и комплексы. М.: Радиотехника, 2011. 444 с.
 2. Каплин Е. А., Лебединский Е. В., Егоров В. В. Современные системы передачи данных по КВ-радиоканалам // Электросвязь. 2003. № 7. С. 47–48.
 3. Антонюк Л. Я., Семисошенко М. А. Адаптивная радиосвязь в системах связи специального назначения // Электросвязь. 2007. № 5. С. 17–20.
 4. Егоров В. В., Мингалев А. Н. Адаптивное управление мощностью и видом модуляции в субканалах OFDM сигналов // Новые технологии: материалы XIII Всерос. конф. по новым технологиям, г. Миасс, 11–13 окт. 2016 г. М.: Изд-во РАН, 2016. С. 64–70.
 5. Семисошенко М. А. Управление автоматизированными сетями декаметровой связи в условиях сложной радиоэлектронной обстановки / ВАС. СПб., 1997. 364 с.
 6. Clark G. C., Jr., Cain J. B. Error-Correction Coding for Digital Communications. New York: Plenum Press, 1982. 432 p.
 7. Егоров В. В., Смаль М. С. Оценка вероятности ошибки на бит по результатам декодирования кодовых слов // Журн. радиоэлектроники. 2014. № 4. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/apr14/4/text.pdf> (дата обращения 12.03.2017).
 8. Егоров В. В., Смаль М. С. Прогнозирование достоверности приема ОФМ сигналов для потенциально возможных режимов работы // Журн. радиоэлектроники. 2014. № 4. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/apr14/5/text.pdf> (дата обращения 12.03.2017).
 9. Дынкин Е. Б., Юшкевич А. А. Управляемые марковские процессы и их приложения. М.: Наука, 1975. 341 с.
 10. Егоров В. В., Тимофеев А. Е. Обратный канал в адаптивных коротковолновых радиосистемах передачи информации // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2013. Вып. 6. С. 3–8.
 11. Пат. RU 2477925. С2. МПК H04L1/04, H04B 7/12 (2006.01). Способ частотного зондирования, совмещенный с процессом передачи данных / Р. К. Гребнева, В. В. Егоров, А. А. Катанович, С. А. Лобов, А. Н. Мингалев, А. Е. Тимофеев; опубл. 20.03.2013. Бюл. № 8.
- Статья поступила в редакцию 11 марта 2017 г.

Для цитирования: Егоров В. В. Адаптивное управление параметрами коротковолновых систем передачи данных // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 2. С. 47–52.

Егоров Владимир Викторович – кандидат технических наук (1987), старший научный сотрудник (1992), ведущий научный сотрудник ПАО "Российский институт мощного радиостроения" (Санкт-Петербург). Автор более 120 научных работ. Сфера научных интересов – адаптивные системы передачи информации, цифровая обработка сигналов, статистическое моделирование систем и процессов.
E-mail: rimr500@mail.ru

V. V. Egorov

PJSC Russian Institute for Power Radiobuilding (Saint Petersburg)

Adaptive Control of Short-Wave Data Transmission System Parameters

Abstract. We consider a problem of adaptive parameter selection of short-wave data transmission systems such as information signal type, noise combating code type and parameters, operating frequency in case of step-by-step control of transmission process in dynamically changing conditions of radio wave propagation and interference environment. We have obtained explicit expressions of objective functions for reaching the maximum information rate of data transmission and maximum probability of exact message delivery within the time not exceeding the given time. The distinguishing feature of the objective functions is the fact that they do not depend on threshold values established subjectively. The feasibility of the suggested algorithms is guaranteed due to the fact that all the original data required for adaptive control including information on standby frequencies are formed with the given accuracy during information exchange by means of analyzing working signals and secondary decoding products.

Keywords: Data Transmission Systems over Short-Wave Radio Channel, Multiparametric Adaptation, Efficiency Criteria

REFERENCES

1. Berezovsky V. A., Dulkeit I. V., Savitsky O. K. *Sovremennaya dekametrovaya radiosvyaz': oborudovanie, sistemy i komplekсы* [Modern Decameter Radio Communication: Equipment, Systems and Complexes]. Moscow, *Radiotekhnika*, 2011, 444 p. (In Russian)
2. Kaplin E. A., Lebedinsky E. V., Egorov V. V. *Sovremennye sistemy peredachi dannykh po KV radiokanalam* [Modern Systems of Data Transmission Over HF Radio Channels]. *Elektrosvyaz'*, 2003, no. 7, pp. 47–48. (In Russian)
3. Antonyuk L. Ya., Semisoshenko M. A. *Adaptivnaya radiosvyaz' v sistemakh svyazi spetsial'nogo naznacheniya* [Semisoshenko M. A. Adaptive Radio Communication In Special-Purpose Communication Systems]. *Elektrosvyaz'*, 2007, no. 5, pp. 17–20. (In Russian)
4. Egorov V. V., Mingalev A. N. Adaptive Power Control and Type of Modulation In Sub-Channels of OFDM Signals. *Novye tekhnologii. Materialy XIII Vseros. konf. po novym tekhnologiyam, 11–13 okt. 2016 g. Miass, Moscow, RAN Publ.*, 2016, pp. 64–70. (In Russian)
5. Semisoshenko M. A. *Upravlenie avtomatizirovannymi setyami dekametrovoi svyazi v usloviyakh slozhnoi radioelektronnoi obstanovki* [Management of Automated Networks of Decameter Communication Under the Conditions of Complex Radioelectronic Situation]. St. Petersburg, *VAS*, 1997, 364 p. (In Russian)
6. Clark G. C, Jr., Cain J. B. *Error-Correction Coding for Digital Communications*. New York, Plenum Press, 1982, 432 p.
7. Egorov V. V., Smal M. S. *Otsenka veroyatnosti oshibki na bit po rezul'tatam dekodirovaniya kodovykh slov* [Estimation of Error Probability Per Bit Based on the Results of Codeword Decoding]. *Zhurnal radioelektroniki*, 2014, no. 4. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/apr14/4/text.pdf> (accessed: 12.03.2017). (In Russian)
8. Egorov V. V., Smal M. S. *Prognozirovaniye dostovernosti priema OFM signalov dlya potentsialno vozmozhnykh rezhimov raboty* [Reliability Prediction of OPM Signal Reception for Potential Operating Modes]. *Zhurnal radioelektroniki*, 2014, no. 4. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/apr14/5/text.pdf> (accessed: 12.03.2017). (In Russian)
9. Dynkin E. B., Yushkevich A. A. *Upravlyaemye markovskie protsessy i ikh prilozheniya* [Managed Markov Processes and Their Applications]. Moscow, *Nauka*, 1975, 341 p. (In Russian)
10. Egorov V. V., Timofeev A. E. *Obratnyi kanal v adaptivnykh korotkovolnovykh radiosistemakh peredachi in-formatsii* [Reverse Channel in Adaptive Short-Wave Radio Systems for Data Transmission]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika*, 2013, no. 6, pp. 3–8. (In Russian)
11. Grebneva R. K., Egorov V. V., Katanovich A. A., Lobov S. A., Mingalev A. N., Timofeev A. E. *Sposob chastotnogo zondirovaniya, sovmeshchennyi s protsessom peredachi dannykh* [The Method of Frequency Sounding Combined with Data Transmission]. Pat. RF, no. 2477925, 2013.

Received March, 11, 2017

For citation: Egorov V. V. Adaptive Control of Short-Wave Data Transmission System Parameters. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2017, no. 2, pp. 47–52. (In Russian)

Vladimir V. Egorov – Ph.D. in Engineering (1987), SRF (1992), Leading Researcher of the Russian Institute for Power Radiobuilding. The author of more than 120 scientific publications. Area of expertise: data transmission adaptive systems; digital signal processing; system and process statistical modeling.
E-mail: diofant2912@mail.ru