

МЕТОДЫ АДАПТИВНОГО ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДИРОВАНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОМПЛЕКСАХ АВИАЦИОННОЙ РАДИОСВЯЗИ

В. В. Квашенников, А. Д. Кухарев, А. К. Шабанов
ФГУП «Калужский НИИ телемеханических устройств»
e-mail: kniitmu@post.ru

Представлены пути решения важной задачи повышения достоверности и своевременности доведения цифровой информации (в том числе команд управления) передаваемой по каналам авиационной радиосвязи за счет применения адаптивного помехоустойчивого кодирования. Описаны методы оперативного контроля характеристик каналов связи на основе анализа результатов декодирования помехоустойчивого кода и алгоритмы коррекции параметров кодовой конструкции в зависимости от качества радиоканалов. Предложен метод двухконтурного адаптивного управления параметрами кода.

Необходимость эффективного управления летательными аппаратами (ЛА) (самолетами, вертолетами и др.) различного назначения требует обеспечения устойчивой радиосвязи между наземными авиационными службами и бортом ЛА. Кроме того, эффективность выполнения задач по назначению совокупностью ЛА (авиазвено, группа и др.) требует обеспечения устойчивой радиосвязи между взаимодействующими в полете ЛА.

Для решения задач связи как между наземными службами (НС) и ЛА, так и ЛА между собой создаются перспективные комплексы и системы авиационной радиосвязи (КСАР). Данные КСАР используют различные диапазоны радиоволн, при этом наиболее востребованными являются декаметровый (ДКМВ) и метровый (МВ) диапазоны волн.

Управление ЛА в полете требует постоянного информационного взаимодействия экипажа и бортовых систем с информационными системами НС. При этом основными типами циркулируемой информации являются:

речевая информация между НС и экипажем ЛА;

передача навигационных данных, данных целеуказания и метеорологическая информация;

телеметрическая информация с бортовых систем ЛА для НС и др.

Причем объемы циркулирующей информации между бортом ЛА и НС постоянно возрастают, что обуславливается ростом сложности и числа решаемых задач.

В настоящее время основным диапазоном волн, используемым в авиационной радиосвязи являются МВ. Однако, благодаря применению методов многопараметрической адаптации и в системах авиационной радиосвязи диапазона ДКМВ существенно возросли скорости передачи (9.6 кБит/с и более). Немаловажную роль при этом играют методы помехоустойчивого адаптивного кодирования. Каналы радиосвязи диапазона ДКМВ и МВ на предельной дальности являются нестационарными каналами низкого качества, что обусловлено особенностями распространения радиоволн в этом диапазоне. Явления многолучевого распространения радиоволн могут приводить к замираниям сигнала. Изменения дальности в процессе полета и положения антенных систем ЛА при разворотах при-

водят к изменениям качества радиоканала. Коэффициент ошибок канала связи может несколько раз изменять свое значение за время полета ЛА. При этом коэффициент ошибок при средней и малой мощности излучения достигает величины $5 \cdot 10^{-2}$ и более [1]. С другой стороны каналы авиационной радиосвязи диапазона ДКМВ и МВ не требуют для передачи сообщений развитой инфраструктуры и позволяют при относительно небольшой мощности излучения передавать сигналы на большие расстояния. Это объясняет заметное повышение внимания в последнее время к системам радиосвязи, особенно диапазона ДКМВ.

Важным является исследование методов адаптивного кодирования, при которых в зависимости от состояния канала связи автоматически и целенаправленно изменяются структурно-параметрические и алгоритмические характеристики помехоустойчивого кода. При адаптивном кодировании решают следующие основные задачи [2]:

определяют качество канала связи;

принимают решение – выбирают помехоустойчивый код, его параметры и алгоритмы кодирования, декодирования и цикловой синхронизации, обеспечивающие заданную вероятность доведения сообщения при минимальной избыточности кода;

и, наконец, выполняют управление, т. е. устанавливают параметры кода в кодирующем и декодирующем устройстве.

Используют параметрическую, алгоритмическую или структурную адаптацию. Обычно выбор той или иной кодовой конструкции выполняют заранее на этапе разработки системы, а в процессе эксплуатации меняют только его параметры. Однако возможно изменение алгоритмов кодирования и декодирования, а также и структуры самого кода, а не только его параметров и в процессе эксплуатации системы связи [3]. В этом случае используется алгоритмическая и структурная адаптация. Изменение кодовой конструкции на этапе эксплуатации ЛА обусловлено настолько существенным изменением состояния канала связи, что прежняя кодовая конструкция при любых ее допустимых параметрах и алгоритмах кодирования и декодирования уже не обеспечивает требуемую вероятность доведения сообщения. При незначительном изменении качества канала обычно управляют параметрами кода, поскольку это бывает существенно проще с точки зрения технической реализации. Основными параметрами помехоустойчивого кода являются блоковая длина или длина кодового ограничения и скорость кода, определяющие его избыточность и корректирующую способность. Важной характеристикой кода является его весовая структура. Чаще всего заранее выбирают код с определенными, наилучшими для данной кодовой конструкции параметрами. Однако, изменение параметров кода не всегда гарантирует необходимое минимальное кодовое расстояние и помехоустойчивость может ухудшиться. К тому же далеко не все помехоустойчивые коды могут легко изменять свои параметры. Это объясняется тем, что многие алгоритмы кодирования и декодирования кодов привязаны к структуре порождающих и проверочных полиномов кода, а при изменении параметров кода эти полиномы могут меняться. Например, мажоритарное декодирование возможно только для кодов с определенными системами проверок, т. е. порождающими и проверочными полиномами. Аналогично и для кодов с перестановочным декодированием, которое можно использовать для кодов с определенным соотношением блоковой и информационной длин кода. Лучше обстоит дело при исполь-

зовании алгебраических методов кодирования и декодирования. Эти методы разработаны для достаточно широкого класса помехоустойчивых кодов типа кодов БЧХ, Рида-Соломона и используют вычисления в полях Галуа: спектральные преобразования кодовых слов, рекуррентные вычисления по алгоритму Берликэмп-Месси или Евклида, вычисления сверток и другие. Алгебраические методы кодирования и декодирования позволяют легко изменять число проверочных и информационных символов кода, особенно при их программной реализации.

Аналогичная ситуация имеет место для вероятностных методов декодирования типа последовательного декодирования или декодирования Витерби. Эти методы обычно используются для декодирования сверточных кодов, изменение длины информационной последовательности которых не представляет труда, а сокращение избыточности достигается выкалыванием части проверочных символов.

Среди множества различных двоичных кодов особое место занимают коды Рида-Соломона, поскольку являются наилучшими двоичными МДР-кодами (кодами с максимально достижимым расстоянием). Коды Рида-Соломона используются в качестве внешних кодов во многих перспективных кодовых конструкциях: каскадных, гибридных кодах и кодах с сигнально-кодowymi конструкциями (СКК) [4]. Параметры кода Рида-Соломона легко изменяются, что позволяет также легко изменять и параметры кодовых конструкций, построенных на его основе. При этом несложно обеспечить необходимую корректирующую способность кода Рида-Соломона, которая связана с параметрами кода простым соотношением

$$D = N - K + 1, \quad (1)$$

где D – минимальное кодовое расстояние кода,

N – блоковая длина кода,

K – информационная длина.

Альтернативой кодам Рида-Соломона могут служить двоичные коды с мажоритарным многопороговым декодированием [5]. Однако, сложность реализации кодов Рида-Соломона в процессе совершенствования алгоритмов и элементной базы постоянно сокращается, что делает эти коды привлекательными для применения в адаптивном кодировании.

Выбор кода в общем случае подразумевает также и возможность изменения алгоритмов декодирования. При декодировании одного и того же кода возможно использование различных алгоритмов, отличающихся вероятностно-временными характеристиками. В зависимости от выбранного алгоритма будут различаться вероятности правильного приема и трансформации сообщений и сложность декодирования, а значит, и время декодирования. Известны алгоритмы декодирования кодов с обнаружением ошибок, с исправлением ошибок, по наиболее вероятным символам, мягкое декодирование и другие.

В общем случае при адаптивном кодировании выполняется выбор кодовой конструкции, ее параметров и алгоритмов кодирования, декодирования и цикловой синхронизации.

ции. Математически структурно-параметрическая адаптация помехоустойчивого кода формулируется следующим образом. Система адаптивного кодирования S задается:

характеристиками канала связи \bar{H} ,
 структурно-параметрическими и алгоритмическими характеристиками помехоустойчивого кода $\bar{N} = \{\bar{C}, \bar{K}, \bar{A}\}$,

характеристиками системы адаптации \bar{F} , рассматриваемой как объект автоматического управления и включающими законы формирования управляющих воздействий системы,

целевой функцией системы адаптации P , которую обычно выражают отклонением вероятности доведения сообщения от заданного значения.

Таким образом, система адаптивного кодирования представляется в виде

$$S = S(\bar{H}, \bar{N} = \{\bar{C}, \bar{K}, \bar{A}\}, \bar{F}, P). \quad (2)$$

Задачей адаптивной системы является выбор структурно-параметрических и алгоритмических характеристик помехоустойчивого кода $\bar{N} = \{\bar{C}, \bar{K}, \bar{A}\}$ и законов управления \bar{F} , обеспечивающих минимизацию целевой функции P при заданных характеристиках канала связи \bar{H} . Математически задача адаптивного кодирования формулируется и решается как задача условной многокритериальной целочисленной оптимизации целевой функции.

Эффективность адаптивного кодирования оценивается либо повышением скорости передачи информации для заданной вероятности правильного приема сообщения

$$V = \{\max V, P_{nn} = P_{nnz}\}, \quad (3)$$

либо увеличением вероятности правильного приема сообщения при заданной постоянной скорости передачи информации

$$P_{nn} = \{\max P_{nn}, V = V_3\}. \quad (4)$$

по отношению к коду с постоянными параметрами.

Для доведения сообщений с заданной вероятностью в нестационарном канале авиационной радиосвязи необходим постоянный контроль (мониторинг) его качества. Контроль качества канала должен проводиться в рабочем режиме, без снижения скорости передачи в канале связи. Такое оценивание состояния канала связи возможно по результатам декодирования кода и анализа первичных и вторичных статистических признаков посылок. Однако ни статистические признаки, ни результаты декодирования кода не дают полной информации о распределении ошибок канала связи. Точность статистических признаков задается доверительными вероятностями и интервалами, результаты декоди-

рования кода определяют статистику ошибок только в пределах корректирующей способности кода. Поэтому, для повышения надежности используются интегрированные оценки качества канала по результатам декодирования помехоустойчивого кода с учетом мягких весов посылок (массы), сформированных на основе первичных и вторичных статистических признаков. При оценивании качества канала также учитываются достоверности различных комбинаций ошибок по информационному критерию.

Методы оперативного оценивания качества канала можно разделить на две группы. Первая группа включает в себя прямые методы контроля, основанные на непосредственном подсчете числа ошибок в кодовых словах и вычислении частоты этих ошибок. В каналах низкого качества эти методы дают погрешность, поскольку трудно точно оценить число ошибок в стертых и трансформированных словах кода. Поэтому, в таких каналах применяют методы второй группы, при которых коэффициент ошибок и показатели группирования ошибок рассчитывают косвенным путем по распределению блоковой статистики ошибок в словах кода [5]. Косвенные методы оценивания качества канала основаны на сравнении теоретических и экспериментальных блоковых статистик ошибок в словах кода. Рассмотрим сначала косвенные методы контроля канала.

Качество канала связи определяется характеристиками канала \bar{H} , влияющими на вероятность доведения сообщения. Такими характеристиками являются, например, коэффициент ошибок и коэффициент группирования ошибок в канале связи и другие. Характеристики канала \bar{H} определяют при минимизации целевой функции, учитывающей квадратичное отклонение экспериментального распределения ошибок, полученного по результатам декодирования кода, от его теоретического распределения с использованием признаков достоверности

$$\bar{H} : \min \left\{ \sum_Z [q(Z)(P_T(Z, \bar{H}) - P_Э(Z))]^2 \right\}, \quad (5)$$

где $q(Z)$ – достоверность последовательности ошибок Z ,

$P_T(Z, \bar{H})$ – теоретическое распределение последовательности ошибок модели канала,

$P_Э(Z)$ – экспериментальное распределение ошибок.

Достоверность последовательности ошибок $q(Z)$ длины m , осредненная по всем последовательностям Z запишется в виде

$$q(Z) = \frac{\sum_Z \prod_{i=1}^m q_i}{N(Z)}, \quad (6)$$

$N(Z)$ – количество последовательностей ошибок Z ,

q_i – достоверность i -го символа с учетом краевых искажений и дроблений символа.

Оптимизация целевой функции (4) при большом числе слагаемых представляет собой сложную задачу. Характеристики канала чаще всего используют для выбора параметров кода, поэтому часть слагаемых в (4) можно объединить и учитывать только те слагаемые,

которые влияют на декодирование кода. С учетом этого замечания целевая функция (4) переписывается в виде

$$y = q(t \leq t_u)(P_T(t \leq t_u, \bar{H}) - P_3(t \leq t_u))^2 + q(t_u < t \leq t_c)(P_T(t_u < t \leq t_c, \bar{H}) - P_3(t_u < t \leq t_c))^2 + \\ + q(t_0 \leq t_{0u} / t_1 \leq t_{1u})(P_T(t_0 \leq t_{0u} / t_1 \leq t_{1u}, \bar{H}) - P_3(t_0 \leq t_{0u} / t_1 \leq t_{1u}))^2 + \\ + q(t_0 > t_{0u} / t_1 > t_{1u})(P_T(t_0 > t_{0u} / t_1 > t_{1u}, \bar{H}) - P_3(t_0 > t_{0u} / t_1 > t_{1u}))^2 \quad (7)$$

где $P(t \leq t_u)$ – вероятность t_u и менее ошибок в блоке символов, t_u – корректирующая способность кода,

$P(t_u < t \leq t_c)$ – вероятность более t_u , но менее или равно t_c ошибок в блоке символов, t_c – обнаруживающая способность кода,

$P(t_0 \leq t_{0u} / t_1 \leq t_{1u})$ и $P(t_0 > t_{0u} / t_1 > t_{1u})$ – условные вероятности приема смежных блоков.

Наиболее просто коэффициент ошибок можно определить, используя прямые методы контроля качества канала связи, непосредственно подсчитав количество ошибок, исправленных при декодировании кода. Прямые методы обычно используют в каналах относительно высокого качества ($p \leq 10^{-3}$). Для этого сообщение, полученное при декодировании кода, заново кодируют тем же кодом, что и на передающей стороне канала связи и при этом получают восстановленную последовательность символов кода c_1 . Последовательность c_1 полностью совпадает с последовательностью символов кода, которая передавалась по каналу связи. Далее из принятой последовательности символов кода c_2 вычитают восстановленную последовательность c_1 , и получают последовательность ошибок [7]

$$e = c_2 \oplus c_1. \quad (8)$$

Теперь подсчитывают количество ошибок t в последовательности ошибок e , т. е. в коде.

Коэффициент ошибок канала связи будет равен отношению числа ошибок t в коде к общему количеству символов n в этом коде

$$p = \frac{t}{n}. \quad (9)$$

Однако, такое оценивание качества канала возможно лишь при правильном декодировании кода. При отказе от декодирования кода (стирание кода) коэффициент ошибок канала связи вычисляют приближенно [8].

При декодировании внутреннего кода каскадного кода подсчитывают количество ошибок t_0 , которые были исправлены в словах кода. Также при декодировании слов внутреннего кода подсчитывают количество стертых S слов кода. Общее количество ошибок в стертых словах кода приближенно оценивают выражением

$$t_1 = \frac{d+1}{2} \cdot S, \quad (10)$$

где d – минимальное кодовое расстояние кода,

$\frac{d+1}{2}$ – приближенная оценка количества ошибок в стертом слове кода.

Затем оценивают количество трансформированных слов $T(i)$ кода с исправлением i ошибок по формуле

$$T(i) = \beta(i) \cdot S. \quad (11)$$

Суммарное количество t_2 ошибок в трансформированных словах кода можно оценить выражением

$$t_2 = \sum_{i=0}^t T(i) \cdot (d-i), \quad (12)$$

где $(d-i)$ – приближенная оценка количества ошибок в трансформированных словах кода ($0 \leq i \leq t$).

При увеличении количества трансформированных кодовых слов число правильно принятых кодовых слов уменьшается. Поэтому, суммарное количество ошибок r в правильно принятых, стертых и трансформированных словах внутреннего кода каскадного кода с учетом уравнений (10) и (12) запишется в виде [9]

$$t = t_0 + S \cdot \frac{d+1}{2} + S \sum_{i=0}^t \beta(i) \cdot (d-2 \cdot i). \quad (13)$$

Теперь нетрудно по формуле (9) определить коэффициент ошибок канала связи, равный отношению общего числа t ошибок к количеству $n \cdot N$ символов в каскадном коде.

При передаче сообщений, защищенных помехоустойчивым кодом, важным является выбор кодовой конструкции, ее параметров и алгоритмов кодирования, декодирования и цикловой синхронизации. При выборе кода необходимо согласовывать его параметры с источником сообщения, каналом связи и требованиями по доведению сообщения.

Параметры кода определяются:

- характеристиками используемых каналов связи;
- объемом передаваемых сообщений;
- видом модуляции;
- требованиями к помехоустойчивости и достоверности принятого сообщения;
- необходимостью минимизации избыточности кода с целью сокращения времени передачи;
- сложностью аппаратной и программной реализаций и быстродействием;
- допустимой временной задержкой в передаче и приеме сообщения;
- цикловой синхронизацией помехоустойчивого кода.

На стадии эксплуатации системы связи ЛА выполняется оперативная адаптивная коррекция параметров кода. При этом обеспечивается заданная вероятность доведения

сообщения при минимальной избыточности кода. Основные принципы адаптивной коррекции параметров кода поясняются на рис. 1. На передающей стороне исходная информация кодируется помехоустойчивым кодом с переменными параметрами. На приемной стороне оценивается качество канала связи. Характеристики канала вычисляются на основании результатов декодирования кода.

Затем выбирается код, обеспечивающий требуемую вероятность правильного приема сообщения при его минимальной избыточности. Новые параметры помехоустойчивого кода по каналу обратной связи доводят до передающей стороны и устанавливают в кодирующем устройстве кода.

Вероятность правильного приема кода P_{nn} зависит от параметров кода \bar{N} и качества канала связи \bar{H} : $P_{nn} = P_{nn}(\bar{H}, \bar{N})$. Параметры кода \bar{N} выбирают таким образом, чтобы вероятность правильного приема кода P_{nn} была не менее заданной вероятности P_{nnz} , при условии минимальной избыточности кода. Прямая задача состоит в определении вероятности правильного приема кода P_{nn} при заданных параметрах кода \bar{N} и характеристиках канала связи \bar{H} и имеет решение в виде явно заданной зависимости $P_{nn} = P_{nn}(\bar{H}, \bar{N})$. Если бы из этой формулы можно было выразить параметры кода \bar{N} , то обратная задача – определение необходимых параметров кода в зависимости от заданной вероятности правильного приема кода P_{nnz} и характеристик канала связи \bar{H} была бы решена: $\bar{N} = \bar{N}(P_{nnz}, \bar{H})$. Однако, выразить параметры кода ввиду сложности явных формул $P_{nn} = P_{nn}(\bar{H}, \bar{N})$ не представляется возможным. Поэтому, эта задача решается численно, путем построения поверхности постоянного уровня для функции заданной в неявной форме. Последняя задача может быть сведена к целочисленной многомерной оптимизации некоторой целевой функции, составленной по методу наименьших квадратов.

Задача оперативной коррекции параметров кода представляется в виде [10]:

Задано:

\bar{H} – параметры канала связи;

P_{nn} – вероятность правильного приема кода;

P_{nnz} – заданная вероятность правильного приема кода.

Найти \bar{N} – параметры кода:

$$P_{nn}[\bar{N}, \bar{H}] = P_{nnz},$$

или

$$y = \min_{\bar{N}} (P_{nn}[\bar{N}, \bar{H}] - P_{nnz})^2, \quad (14)$$

при ограничениях на вектор параметров кода $\bar{N} \in (\bar{N}_{\min}, \bar{N}_{\max})$, обусловленных выбранной кодовой конструкцией. Параметры кода \bar{N} определяют численным методом, как решение задачи оптимизации целевой функции в виде функциональной зависимости $\bar{N} = \bar{N}(P_{nnz}, \bar{H})$.

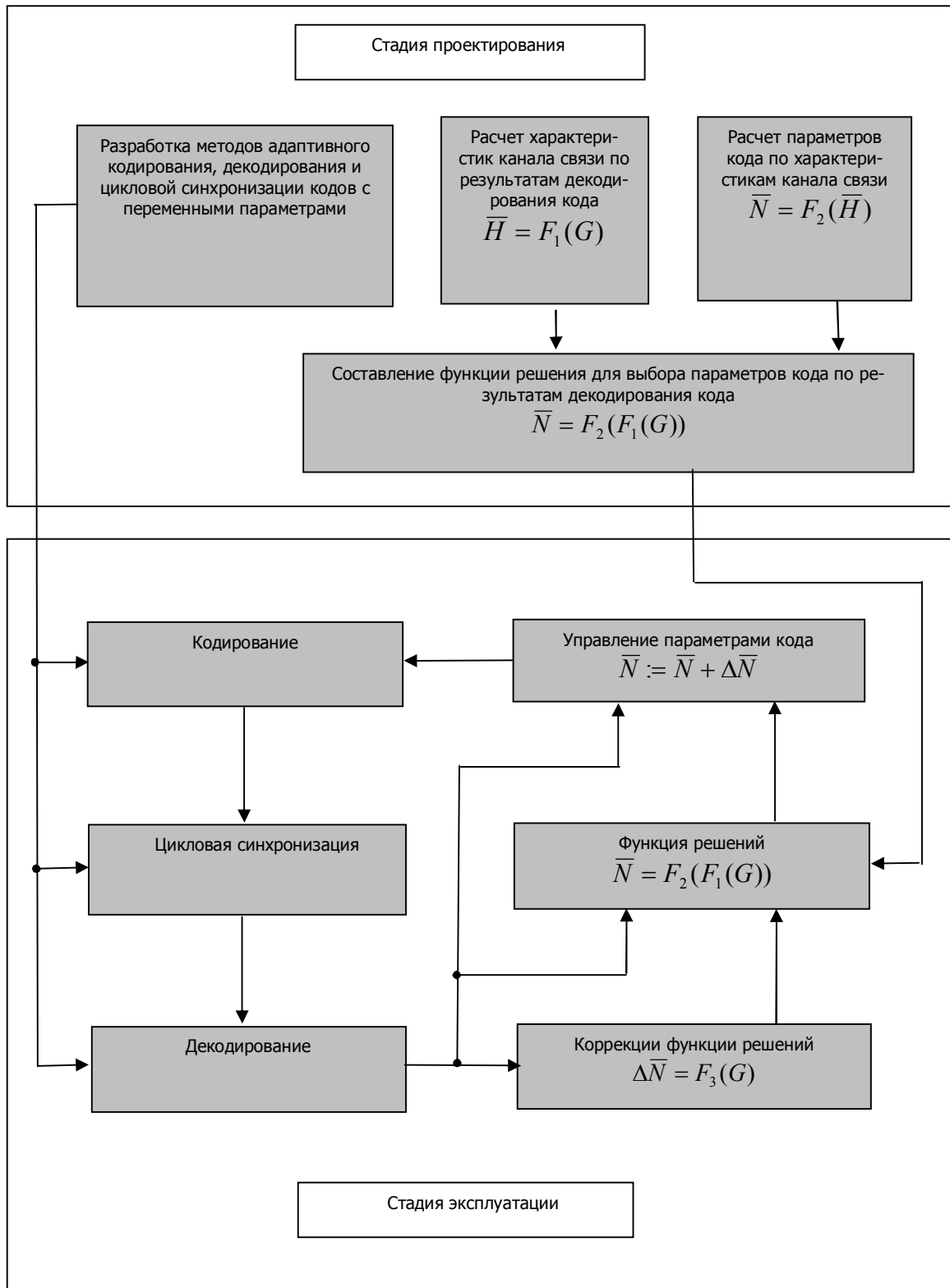


Рис. 1. Схема адаптивного кодирования на стадии проектирования и эксплуатации системы связи

Зависимость параметров кода от качества канала связи удобно рассчитывать заранее на этапе проектирования путем оптимизации целевой функции (14). Эту зависимость при численном решении задачи оптимизации можно представить в табличном виде. Поскольку множество возможных параметров кода ограничено, то для оптимизации можно использовать метод последовательного перебора, а при линейном упорядочивании кодов по качеству – метод дихотомии или золотого сечения. Таким образом, решения принимают по таблице, входом которой является качество канала связи, а выходом – параметры кода. Объем этой таблицы решений зависит от точности определения и диапазона изменения параметров кода и качества канала связи. Как показывают расчеты, для практической реализации вполне достаточно таблицы решений небольшого объема (от нескольких сотен байт до нескольких кБайт), что позволяет оперативно и с достаточной точностью выбирать параметры кода.

В качестве примера рассмотрим каскадный код БЧХ (31,16) – Рид-Соломона ($N,16$), используемый в комплексах наземной и воздушной помехозащищенной телекодвой связи Р-098-5. Таблица решений (таблица 1) этого кода задает зависимость оптимальной блоковой длины N внешнего кода каскадного кода БЧХ (31,16) – Рид-Соломона ($N,16$) от вероятности ошибки на бит в канале связи $p=0.01 \dots 0.08$ и коэффициента группирования $a = 0 \dots 0.5$ при вероятности правильного приема каскадного кода, равной 0.99.

Оптимальная блоковая длина кода при $R_{\text{пз}} = 0.99$, $K = 16$. Таблица 1.

p	a					
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0.01	18	18	20	20	20	20
0.02	18	20	20	22	22	22
0.03	20	22	22	22	22	22
0.04	22	24	24	24	24	24
0.05	24	24	26	26	26	28
0.06	26	28	28	28	28	30
0.07	28	30	30	32	34	34
0.08	32	32	32	34	36	36

Объем этой таблицы составляет 48 байт. Однако, даже небольшая по объему таблица решений позволяет выбирать блоковую длину кода Рида-Соломона в достаточно большом диапазоне изменения качества канала связи.

Построение функции или таблицы решений, определяющей зависимость параметров кода от качества канала связи, является одной из основных задач адаптивного кодирования. Априорная информация о соответствующих качеству канала связи параметрах кода учитывается в функции решений. Использование заранее подготовленной функции ре-

шений сокращает время адаптации системы к условиям эксплуатации. Это составляет первый контур адаптивного управления параметрами кода.

С учетом сказанного, алгоритм вычисления функции решения на стадии проектирования будет состоять из следующих шагов:

1. Определить модель ошибок канала и диапазон возможных изменений характеристик канала авиационной связи:

$$\bar{H} \subset \bar{H}_{\text{дон}}$$

2. Вычислить вероятности правильного приема, стирания и трансформации внутреннего кода каскадного кода в зависимости от качества канала связи в заданном диапазоне изменения характеристик канала:

$$P_n = P_n(\bar{H}), \quad P_c = P_c(\bar{H}), \quad P_m = P_m(\bar{H}), \quad \bar{H} \subset \bar{H}_{\text{дон}}$$

3. Вычислить вероятности правильного приема кода с каскадированием в заданном диапазоне изменения параметров внешнего кода и характеристик канала:

$$P_{nn} = P_{nn}(\bar{H}, \bar{N}), \quad \bar{N} \subset \bar{N}_{\text{дон}}, \quad \bar{H} \subset \bar{H}_{\text{дон}}$$

4. Выбрать значения параметров кода, обеспечивающие заданную вероятность правильного приема кода:

$$\bar{N} : P_{nn}(\bar{H}, \bar{N}) = P_{nn3}, \quad \bar{H} \subset \bar{H}_{\text{дон}}$$

5. Запомнить функциональную зависимость

$$\bar{N} = \bar{N}(\bar{H}), \quad \bar{H} \subset \bar{H}_{\text{дон}}$$

Наибольшее число операций требует вычисление функциональной зависимости $P_{nn} = P_{nn}(\bar{H}, \bar{N})$. При методе последовательного перебора необходимо вычислить примерно $L_1 = M(\bar{N}) \cdot M(\bar{H})$ значений функций $P_{nn} = P_{nn}(\bar{H}, \bar{N})$, где $M(\bar{N}), M(\bar{H})$ – число различных параметров кода и характеристик канала соответственно.

Уменьшить количество вычислений возможно при использовании метода дихотомии:

1. $\bar{H} := \bar{H}_{\text{мин}}$

2. $\bar{L}_{\text{мин}} := \bar{N}_{\text{мин}}; \quad \bar{L}_{\text{макс}} := \bar{N}_{\text{макс}}$

3. $\bar{N} := \frac{\bar{L}_{\text{макс}} + \bar{L}_{\text{мин}}}{2}$

4. Если $P_{nn}(\bar{H}, \bar{N}) > P_{nn3}$, то идти к 8

5. Если $|\bar{L}_{\min} - \bar{N}| < 1$, то идти к 11
6. $\bar{L}_{\min} := \bar{N}$
7. Идти к 3
8. Если $|\bar{L}_{\max} - \bar{N}| < 1$, то идти к 11
9. $\bar{L}_{\max} := \bar{N}$
10. Идти к 3
11. $\bar{N} = \bar{N}(\bar{H})$
12. $\bar{H} := \bar{H} + \Delta\bar{H}$
13. Если $\bar{H} > \bar{H}_{\max}$, то идти к 15
14. Идти к 2
15. Конец

Для метода дихотомии количество вычислений значений функции $P_m = P_m(\bar{H}, \bar{N})$ оценивается величиной $L_2 = \log_2(M(\bar{N}) \cdot M(\bar{H}))$, что существенно меньше, чем при последовательном переборе $L_2 \ll L_1$.

Зависимость параметров кода от качества канала связи, полученная на стадии разработки системы, определяется исходя из некоторых априорных сведений о характеристиках канала связи (исходя из модели канала связи), которые могут не вполне соответствовать реальному каналу связи. Это приводит к необходимости дополнительной коррекции параметров кода, которая учитывает отличия модели от условий эксплуатации. Дополнительная коррекция параметров кода по отклонению вероятности доведения сообщения от заданного значения составляет второй контур адаптивного управления.

Количественной оценкой эффективности адаптивного кодирования является коэффициент σ повышения скорости передачи информации в системе связи с адаптивным кодированием, по сравнению с системой с постоянными параметрами. Этот коэффициент определяется по формуле

$$\sigma = \frac{v}{v_1}, \quad (15)$$

где v – средняя скорость передачи при использовании адаптивного кодирования, v_1 – средняя скорость передачи в системе с постоянными параметрами.

Для оценивания повышения скорости передачи информации проводился вычислительный эксперимент на модели составного нестационарного канала низкого качества. Для испытаний был выбран помехоустойчивый каскадный код, аналогичный коду используемому в комплексах воздушной связи Р-098-5. Внешним кодом этого каскадного кода был код Рида-Соломона($N, 16$) над полем Галуа $GF(2^m)$, а внутренним – двоичный код БЧХ (31,16). В зависимости от качества канала связи изменялась блоковая длина внешнего кода Рида-Соломона N , т.е. изменялась блоковая длина каскадного кода, а ин-

формационная длина кода оставалась постоянной. За счет этого изменялась корректирующая способность всего каскадного кода. Декодирование внутреннего кода БЧХ (31,16) выполнялось с исправлением 3-х ошибок, а внешнего кода Рида-Соломона – с исправлением ошибок и стираний в пределах его минимального кодового расстояния.

Результаты проведенного вычислительного эксперимента позволяют сделать следующие выводы:

1. Коэффициент повышения скорости передачи информации может существенным образом изменяться в зависимости от характеристик нестационарного канала воздушной связи. Коэффициент σ повышения скорости передачи информации в адаптивной системе может достигать значений 1.2, ..., 1.5 при высоких вероятностях ошибки на бит в «плохом» состоянии канала, равных 0.05...0.08, и коэффициенте загрузки канала помехами (безусловной вероятности нахождения канала в «плохом» состоянии), находящемся в диапазоне величин 0.1...0.3.

2. Реализация адаптивного кодирования возможна при наличии канала обратной связи, который также необходим и для обеспечения полетов ЛА. Высокую надежность канала обратной связи можно обеспечить за счет низкоскоростного помехоустойчивого кодирования небольшого объема передаваемой по этому каналу информации о новых параметрах кода (5-10 бит), а также счет принятия решения о новых параметрах кода на основе осредненной их оценки в скользящем окне приема и робастной обработки данных.

3. Адаптивное кодирование целесообразно применять при информационном обмене в нестационарном канале связи, либо в стационарном канале связи, качество которого заранее не определено. Время нахождения канала в каждом состоянии должно быть достаточным для надежного определения качества канала связи и обеспечивать некоторое время работы системы с новыми параметрами кода (20-30 сеансов передачи каскадного кода). При небольшой длительности состояний канала бывает целесообразно незначительно отличающиеся состояния канала объединять в одно состояние. Состояния канала связи должны соответствовать изменению дальности полета ЛА. Быстрые изменения состояния при выполнении виражей ЛА за счет усреднения в скользящем окне приема объединяются вместе.

4. Состояния нестационарного канала должны существенно отличаться по своему качеству, т. е. в канале должны быть состояния «плохого» качества, требующие большой избыточности кода (>2) и состояния «хорошего» качества для которых достаточно небольшой избыточности кода.

5. В канале желательно наличие интенсивного информационного обмена. Это условие обеспечивает возможность быстрого определения качества канала по результатам декодирования кода и оперативную коррекцию кода по результатам доведения сообщения.

Перечисленным выше условиям удовлетворяют каналы многих систем авиационной связи, в частности большое число систем, использующих каналы радиосвязи диапазона ДКМВ малой и средней мощности, каналы диапазона МВ на предельной дальности. Поэтому, адаптивное кодирование находит применение и имеет хорошие перспективы своего практического применения в авиационной радиосвязи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шеховцов. О. И., Горохов С. Г. Передача информации по нестационарным каналам связи. Учебн. пособие. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1985, – 172 с.
2. Советов Б. Я., Стах В. М. Построение адаптивных систем передачи информации для автоматизированного управления. – Л.: «Энергоиздат» Ленингр. отделение, 1982, – 120 с.
3. Квашенников В. В., Кухарев А. Д. «Адаптивное помехоустойчивое кодирование в технике связи», Монография, Изд-во научной литературы Н. Ф. Бочкаревой, Калуга: 2007 – 148с.
4. Зимихин Д. А., Квашенников В. В., Кухарев А. Д., Манкевич Д. М., Турилов В. А. Перспективная телекодированная аппаратура с адаптивной коррекцией параметров помехоустойчивого кода. /Труды VI Российской научно – технической конференции, Калуга, изд – во ЦНТИ, 2007, с. 51-54.
5. Патент РФ №2236090 МПК7 Н 04 В 17/00 Квашенников В. В., Солдатенко Э. Н. Способ контроля качества канала связи. Приор. 27.01.2003, опубл. 10.09.2004.
6. Элементы теории передачи информации, под ред. Л. П. Пуртова, – М.: «Связь», 1972, – 232 с.
7. Юрьев А. Н., Хазан В. Л., Мереминский И.А., Зенков А. Н. Идентификация параметров модели дискретного связи декаметрового диапазона. //Техника средств связи, сер. ТРС, 1991, вып.9, стр. 27 – 32.
8. Патент РФ на полезную модель №46399 МПК7 Н 04 В 17/00 Карпиков А. А., Квашенников В. В., Рынденков М. В. Устройство для контроля качества канала связи, Приор. 09.03.2005, опубл. 27.06.2005.
9. Патент РФ №2285345 МПК7 Н 04 В 17/00 Квашенников В. В., Рынденков М. В. Способ контроля качества канала связи. Приор. 28.12.2004, опубл. 10.08.2006.
10. Квашенников В. В. Система связи с адаптивным помехоустойчивым кодированием. //Телекоммуникации, 2005, №6, с. 43-47.