

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С ГИБРИДНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ И РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ КОРРЕКТИРУЮЩЕГО КОДИРОВАНИЯ

А. Г. Шапин, аспирант СибГУТИ, IEEE Student Member; alexsh@pisem.net

Ключевые слова: гибридная решающая обратная связь (ГРОС), системы передачи данных, сверточный код, блочный код, моделирование, дискретный канал.

Введение. Системы передачи данных (ПД) с гибридной решающей обратной связью (ГРОС) занимают промежуточное положение между системами с переспросом и системами с прямым исправлением ошибок.

Сегодня системы ПД с ГРОС используются в стандарте UMTS и активно внедряются в другие стандарты мобильной связи, такие как 3GPP Long Term Evolution (LTE) и IEEE 802.16 (WiMAX). Кроме того, в последние годы они широко обсуждаются в научной литературе [1—3]. Однако до сих пор отсутствуют практические рекомендации по использованию различных вариантов систем с ГРОС.

В данной статье предлагается ряд систем ПД с ГРОС, приводится их описание и результаты имитационного моделирования. Системы ПД классифицируются по типу используемого корректирующего кода. Ниже рассматриваются системы с блочным, сверточным и комбинированным корректирующим кодированием, причем системы с комбинированным кодированием используют сверточный и блочный коды.

Системы с ГРОС-БКК. На рис. 1, а и 2, а представлены структурные схемы систем ПД с ГРОС и блочным корректирующим кодированием (ГРОС-БКК) [4].

Источник сообщений (ИС) передает сообщение длиной k в CRC-кодер, где k сообщению добавляется r_1 проверочных разрядов кода с высокой обнаруживающей способностью. Далее n элементов, где $(n = k + r_1)$, поступают в буфер, в то время как блочный кодер (БК) вычисляет корректирующую группу — r_2 проверочных элементов кода с высокой исправляющей способностью, которые также записываются в буфер. В качестве блочного кода могут использоваться коды БЧХ или Рида-Соломона.

Первоначально в прямой канал (ПК) связи передается блок n . Если на приемной стороне CRC-декодер обнаруживает ошибку в блоке, то устройство управления (УУ) через обратный канал (ОК) связи запрашивает передачу корректирующей группы r_2 . Далее после исправления ошибок в блочном декодере (БД) информационный блок повторно проверяется на наличие ошибок.

Если ошибки остаются, то в следующей попытке повторяется информационный блок n , т. е. при обнаружении ошибки CRC-декодером передача информационного блока n и корректирующей группы r_2 чередуются. Если ошибки не обнаружены, то информационный кадр длиной k элементов выдается получателю сообщений, а по каналу обратной связи передается сообщение об успешном приеме блока и запрос на передачу следующего информационного кадра.

При приеме любого блока на приемной стороне происходит его запись в буфер, имеющий различную память, т. е. способный хранить разное количество блоков n и r_2 . В зависимости от этого, можно усложнить или, наоборот, упро-

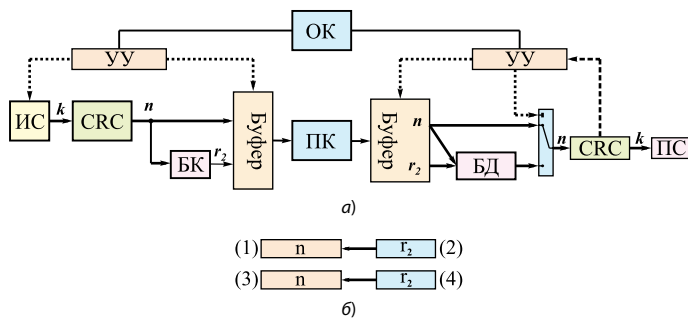


Рис. 1

стить систему, организовывая разные стратегии декодирования. Рассмотрим три основные стратегии.

В стратегии ГРОС-БКК-1 (рис. 1, а) при приеме информационного блока n результаты прежних попыток для декодирования не используются, т. е. информационный блок, принятый с ошибкой в нечетной попытке, всегда исправляется корректирующей группой из следующей попытки. На рис. 1, б приведен пример исправления информационных блоков n принятыми корректирующими группами r_2 (в скобках обозначены номера попыток передачи).

В стратегии ГРОС-БКК-2 (рис. 2, а) при обнаружении ошибок в случае повторного приема информационного блока делается попытка исправления с помощью корректирующей группы, полученной ранее, а в случае неудачи — попытка исправить этот информационный блок корректирующей группой из следующей передачи. На рис. 2, б приведен пример для стратегии ГРОС-БКК-2 (аналогично рис. 1, б).

В стратегии ГРОС-БКК-3 (схема идентична рис. 2, а) при получении информационного блока с ошибками для исправления используются все полученные ранее корректирующие группы. Аналогично, при получении корректирующей группы, делается попытка исправить с ее помощью все получен-

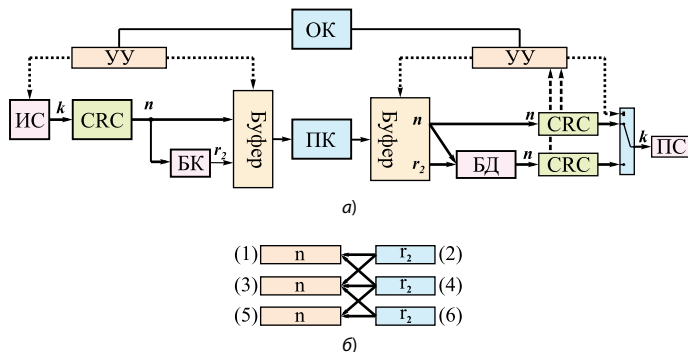


Рис. 2

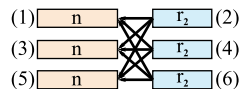


Рис. 3

ные ранее информационные блоки. На рис. 3 также показан принцип исправления принятых блоков.

Системы с ГРОС-СКК. Структура одной из систем ПД с ГРОС и сверточным корректирующим кодированием (ГРОС-СКК) [4, 5] показана на рис. 4. После кодирования в CRC-коде информационный кадр вместе с r_1 проверочными разрядами кода, обнаруживающего ошибки, образуют блок длиной n элементов. Перед сверточным кодированием к блоку добавляется z нулевых элементов, где z — длина кодового ограничения. Затем блок поступает в сверточный кодер (СК) со скоростью $1/3$. Выходные элементы СК записываются в три регистра буфера (для каждого сумматора кодера отдельный регистр) и образуют последовательности (блоки) C_1, C_2 и C_3 . Длина каждого блока — $n + z$ элементов.

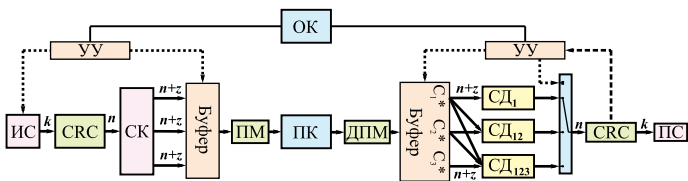


Рис. 4

В соответствии с номером попытки передачи ($i = 1, 2, 3$), в перемежитель (ПМ) из буфера поступает блок C_i . После перемежения блок длиной $n + z$ элементов передается по ПК.

На приемной стороне блок поступает в деперемежитель (ДПМ), где восстанавливается исходный порядок следования элементов. Далее принятая последовательность C_i^* записывается в буфер. В зависимости от номера попытки передачи буфер выдает один блок в первый сверточный декодер ($СД_1$) при $i = 1$ либо сразу два или три блока ($i = 2, 3$) в декодеры $СД_{12}$ или $СД_{123}$. Все $СД$ удаляют z элементов, добавленных при кодировании. CRC-декодер проверяет блок на наличие ошибок и принимает решение о качестве декодирования.

Для описанной выше системы передачи ГРОС—СКК можно предложить три основных способа декодирования. Все они будут различаться количеством $СД$.

Первый способ — самый простой в реализации. Он основан на трех $СД$. В первой попытке приема блок декодируется $СД$ со скоростью 1 ($СД_1$), используя принятую последовательность C_1^* , во второй попытке — со скоростью $1/2$ (последовательности C_1^* и C_2^*), в третьей попытке — со скоростью $1/3$ (последовательности C_1^*, C_2^* и C_3^*). Схема такой СП приведена на рис. 4. Назовем такую систему ГРОС—СКК-1.

Для реализации второго способа требуется пять $СД$ (рис. 5). Декодеры $СД_1, СД_{12}$ и $СД_{123}$ работают так же, как в ГРОС—СКК-1. $СД_2$ включается в работу только во второй попытке, декодируя принятую последовательность C_2^* со скоростью 1, $СД_{23}$ — только в третьей попытке, обрабатывая принятые C_2^* и C_3^* последовательности, декодируя их со скоростью $1/2$. Такой подход позволит повысить вероятность успешного приема блока для случая, когда в принятой C_1^* последовательности содержится большое количество ошибок. Назовем такую стратегию ГРОС—СКК-2. Схема системы передачи, при использовании такого способа, не имеет качественных отличий от схемы, представленной на рис. 4. Стоит также отметить, что, начиная со второй попытки, в стратегии ГРОС-СКК-2 необходимо параллельно проверять на ошибки результаты декодирования двух $СД$. Это требует наличия в системе двух CRC-декодеров.

Третий способ — самый сложный в построении. В схеме используется семь $СД$ (рис. 6). $СД_1, СД_2, СД_{12}, СД_{23}$ и $СД_{123}$ работают идентично пяти декодерам предыдущей схемы.

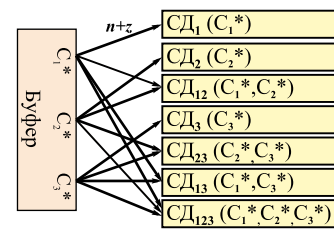


Рис. 5

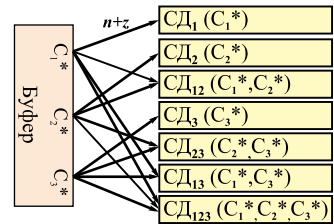


Рис. 6

$СД_3$ и $СД_{13}$ включаются в работу только при третьей попытке переспроса. $СД_3$ декодирует принятую C_3^* последовательность со скоростью 1, $СД_{13}$ — со скоростью $1/2$ (последовательности C_1^* и C_3^*). Таким образом, в предложенной схеме осуществляются все варианты декодирования принятых последовательностей. Назовем такую стратегию ГРОС-СКК-3. Схема системы для такой стратегии не имеет качественных отличий от схемы, представленной на рис. 4. В третьей попытке в стратегии ГРОС-СКК-3 необходимо параллельно проверять на ошибки результаты декодирования четырех $СД$, что требует наличия в системе четырех CRC-декодеров.

Системы с ГРОС-ККК. На рис. 7 представлена структурная схема одной из систем ПД с ГРОС и комбинированным корректирующим кодированием (ГРОС-ККК) [4]. Название системы обусловлено совмещением сверточного и блочного кодирования. Опишем подробнее работу системы.

Из ИС информационная последовательность (ИП) поступает в CRC-кодер, где кодируется кодом с высокой обнаруживающей способностью. Далее ИП вместе с проверочными элементами поступает одновременно в сверточный (СК) и блочный (БК) кодеры. В СК последовательность n кодируется со скоростью $1/2$, а последовательности с каждого сумматора $n + z$ поступают в ПМ и записываются в буфер. В БК последовательность n кодируется блочным кодом с высокой исправляющей способностью, а получившиеся проверочные элементы r_2 записываются в буфер.

Сначала в ПК передается последовательность C_1 с первого сумматора СК. На приемной стороне последовательность деперемежается и записывается в буфер. В $СД_1$ последовательность декодируется со скоростью 1 и поступает в CRC-декодер, где проверяется на ошибки.

Если в декодированной ИП были обнаружены ошибки, то УУ приема запрашивает последовательность C_2 . Последовательность также деперемежается на приеме. Принятые последовательности C_1^* и C_2^* декодируются в $СД_{12}$ со скоростью $1/2$, декодированная последовательность проверяется на ошибки в CRC. Кроме того, последователь-

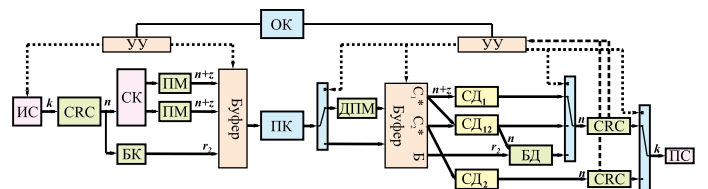


Рис. 7

ность C_2^* декодируется отдельно в $СД_2$ со скоростью 1 и после этого также проверяется на ошибки в CRC. Основываясь на правильности декодирования, УУ приема во второй попытке выбирает правильно декодированное сообщение. В случае успешного декодирования одним из декодеров система переходит к обработке следующей ИП. При неудаче во второй попытке инициируется третья, в которой передается корректирующая группа, содержащая проверочные элементы блочного кода. Стоит заметить, что эта последовательность не перемежается. На приемной стороне последовательность, декодированная $СД$ в предыдущей попытке, исправляется с помощью БД и проверяется на ошибки в CRC. После этой попытки система переходит к обработке следующей ИП независимо от результата. Назовем такую систему ГРОС-ККК-1.

Необходимо отметить, что передача корректирующей группы r_2 в третьей попытке обусловлена особенностью сверточного декодирования со скоростью 1. Если принятая последовательность C_1^* будет содержать хотя бы одну ошибку, сверточное декодирование со скоростью 1 приведет к возникновению большого числа ошибок на всей длине декодированной последовательности. В такой ситуации, если исправляющая способность блочного кода t_i намного меньше, чем длина закодированной сверточным кодом последовательности $t_i \ll n$, вероятность исправления ошибок блочным кодом стремится к нулю. Исходя из этого, для предложенной системы нецелесообразно передавать корректирующую группу r_2 во второй попытке.

На примере ГРОС-ККК-1 в зависимости от взаиморасположения сверточных и блочных кодеров/декодеров и от возможного количества переспоров системы, а также принимаемая во внимание случай, описанный выше, можно предложить целый ряд систем ГРОС-ККК. Однако многие из них будут иметь лишь небольшие структурные различия в части кодирования/декодирования. Учитывая, что в ГРОС-ККК-1 блочное и сверточное кодирование проводилось параллельно, целесообразно рассмотреть систему ПД, в которой кодирование проводилось бы последовательно.

На рис. 8 показана структурная схема системы ПД с ГРОС-ККК-2, отличающаяся от предыдущей тем, что после кодирования сверточным кодом со скоростью 1/2 последовательность с первого сумматора C_1 кодируется в БК, перемежается и записывается в буфер. Последовательность со второго сумматора СК (C_2) перемежается и поступает напрямую в буфер. В первой попытке передается перемеженная последовательность C_1 , во второй попытке — корректирующая группа r_2 , в третьей — перемеженная последовательность C_2 . На приемной стороне в первой попытке принятая и перемеженная последовательность C_1^* декодируется со скоростью 1 в $СД_1$. Во второй попытке последовательность C_1^*

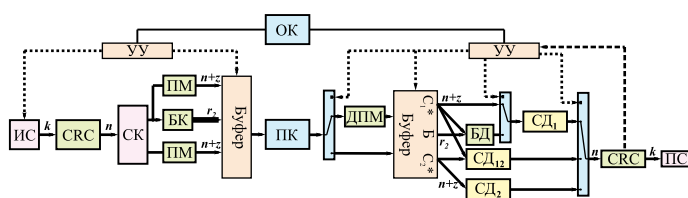


Рис. 8

исправляется принятой корректирующей группой r_2 и снова декодируется со скоростью 1 в $СД_1$. В третьей попытке последовательности C_1^* и C_2^* декодируются со скоростью 1/2 в $СД_{12}$, а C_2^* — со скоростью 1 в $СД_2$.

Модель радиоканала. В качестве модели канала выбран дискретный канал с группирующимися ошибками, описываемый моделью Гилберта. Данный дискретный канал соответствует каналу с релеевским замиранием [4], что типично для радиоканалов.

Сравнение систем. Для сравнения рассмотренных гибридных систем передачи были разработаны имитационные модели в среде MATLAB&Simulink [5]. Кроме того, для систем ГРОС-БКК были разработаны математические модели [6].

В среде Simulink из Communication Toolbox были выбраны готовые блоки кодера/декодера CRC для проверки информационной комбинации на ошибки, перемежителя/деперемежителя и кодера/декодера БЧХ в качестве блочного кода. Так как в среде Simulink не поддерживается сверточное кодирование и декодирование со скоростью 1, был разработан сверточный кодек [7]. Вспомогательные блоки в Simulink были созданы специально для разрабатываемых систем и написаны на языке MATLAB как S-функции 2-го уровня.

Параметры моделируемых систем подобраны таким образом, что $r_2 \approx n$, и сведены в таблицу.

Параметры канала Гилберта для всех систем: $P_{gg} = 0,995$, $P_{bb} = 0,93$ и $p = 0,5$ [4], что соответствует средней вероятности ошибки 0,0333.

На рис. 9 показаны результаты моделирования описанных в статье систем передачи данных с ГРОС, а также ре-

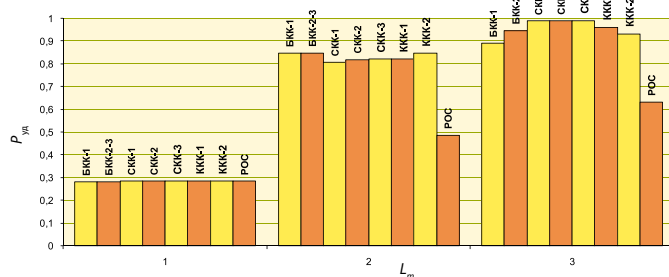


Рис. 9

Таблица

Система передачи	Длина ИП k , элементов	Параметры кодов		
		Сверточного	Блочного	CRC
ГРОС-БКК	243	—	БЧХ [259, 511], $t = 30$	CRC-16
ГРОС-СКК	243	Полиномы (35 23 27), $z = 4$, глубина декодирования — 15 кодовых слов	—	CRC-16
ГРОС-ККК-1	243	Полиномы (35 23), $z = 4$, глубина декодирования — 15 кодовых слов	БЧХ [259, 511]	CRC-16
ГРОС-ККК-2	239	Полиномы (35 23), $z = 4$, глубина декодирования — 15 кодовых слов	БЧХ [259, 511]	CRC-16
РОС	243	—	—	CRC-16

зультаты теоретического расчета для классической системы с решающей обратной связью (РОС). Гистограмма отображает зависимость вероятности успешной доставки ИП ($P_{уд}$) от количества попыток передачи (Lm). Анализ гистограммы (рис. 9) позволяет сделать определенные выводы.

Выводы. Так как длина ИП, передававшихся в первой попытке ($Lm = 1$) примерно одинакова для всех систем ПД, соответственно равна и вероятность успеха в этой попытке. При переспросах (вторая и третья попытка) длины передаваемых последовательностей также практически равны для всех систем, что позволяет более точно их сравнить. Различия в вероятностях успешной доставки начинаются со второй попытки ($Lm = 2$), в которой показатели для БКК-1, БКК-2-3 и ККК-2 примерно равны, в то время как для остальных систем показатели ниже на 3—5%. После третьей попытки ($Lm = 3$) очевидно преимущество систем ГРОС-СКК (другие гибридные системы проигрывают 4—11%). Известным является и тот факт, что математическая сложность и вносимая кодированием/декодированием задержка у сверточных кодов меньше, чем у блочных. Средние показатели всех гибридных систем выше показателей системы с РОС во второй и третьей попытке на 41% и 34% соответственно.

На основании перечисленных преимуществ и результатов моделирования рекомендуется использовать ГРОС-СКК в системах с тремя и более попытками передачи. При этом если количество передач на одну ИП ограничено двумя попытками, то системы ГРОС-БКК имеют лучшие показатели вероятности успешной доставки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Steiner A., Shamai S.** Multi-layer broadcasting hybrid-ARQ strategies for block fading channels // IEEE Transactions on Wireless Communications. — 2008. — Vol. 7, № 7. — P. 2640—2650.
2. **Sesia S., Caire G., Vivier G.** Incremental Redundancy Hybrid ARQ Schemes Based on Low-Density Parity-Check Codes // IEEE Transactions on Communications. — 2004. — Vol. 52, № 8. — P. 1311—1321.
3. **Мелентьев О.Г.** Оценка эффективности систем передачи данных с гибридной обратной связью // Электросвязь. — 2005. — № 7. — С. 29—31.
4. **Мелентьев О.Г.** Теоретические аспекты передачи данных по каналам с группирующимися ошибками / Под ред. проф. Шувалова В.П. — М.: Горячая линия-Телеком, 2007. — 232 с.
5. **Shapin A.** Model building data transmission system HARQ-CCC in environment Simulink // International Workshop and Tutorial on Electron Device and Materials (Erlagol, 1—5 July 2008). — Novosibirsk, 2008. — P. 170—172.
6. **Мелентьев О.Г., Шапин А.Г.** Оценка эффективности модифицированных алгоритмов декодирования в системах передачи данных с гибридной обратной связью // Электросвязь. — 2008. — № 8. — С. 51—53.
7. **Шапин А.Г.** Разработка универсального сверточного кодера для скорости 1/n в среде моделирования Simulink // Информатика и проблемы телекоммуникаций: Материалы конференции РНТК. — Новосибирск, 2008. — С. 271—274.

Получено 25.11.09