

УДК 004: 621. 396 (045)
DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-63-71

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВАРИАНТОВ СИГНАЛЬНО-КODOVЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ НАСТРОЙКИ КОГНИТИВНОЙ РАДИОСИСТЕМЫ

Т. А. Шарипов, магистрант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия
К. В. Шишаков, кандидат физико-математических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Рассматриваются результаты моделирования эффективности сигнально-кодowych конструкций (СКК) для настройки когнитивной радиосистемы. При этом СКК формируются разными комбинациями цифровых модуляторов и помехоустойчивых кодеров. Среди модуляторов для исследования выбраны PAM, ASK, PSK, QAM, FSK, MSK с разной степенью многопозиционности. Среди помехоустойчивых кодов выбраны коды БЧХ, Рида – Соломона, Голя, сверточные, Хэмминга. Исследование СКК проведено на стенде National Instruments на основе технологии SDR с использованием готовых подпрограмм для модуляторов и помехоустойчивых кодеров, реализованных в среде LabView. Приведены результаты моделирования влияния шума в канале связи на эффективность работы разных цифровых модемов, характеризующихся различными скоростями передачи информации. Исследована задача, как с помощью введения помехоустойчивых кодеров повысить стойкость СКК к шуму с одновременным сохранением повышенных скоростей передачи информации. Показано, как результаты проведенных исследований могут быть использованы для создания когнитивной радиосистемы. Описан алгоритм адаптивной настройки СКК когнитивной радиосистемы на изменяющийся уровень шума в канале радиосвязи. Процесс его работы продемонстрирован на примере группы СКК, состоящей из разных комбинаций модуляторов QAM с повышающейся многопозиционностью и помехоустойчивых кодеров Рида – Соломона разной силы. Показано, что выполненное моделирование эффективности СКК для настройки когнитивной радиосистемы является первым шагом практического создания конкретной когнитивной радиосистемы, выполненной на основе технологии SDR.

Ключевые слова: когнитивная радиосистема, моделирование, сигнально-кодowych конструкции, модуляция, помехоустойчивое кодирование.

Введение

Развитие технологий цифровой обработки данных в современных радиосистемах идет в направлении программно-определяемого радио (SDR) [1], в котором вид модуляции передатчика управляется встраиваемым микроконтроллером. Такие системы характеризуются высокой степенью программируемости устройств радиотракта – модуляторов, кодеров, аналого-цифрового/цифроаналогового преобразователей и др. В результате SDR позволяет легко программно перестраиваться на новые стандарты беспроводного обмена данными; объединить в одном устройстве работу нескольких радиостанций различных типов и стандартов; обеспечить совместимость радиостанций различных стандартов вне зависимости от применяемой ими модуляции, частотного диапазона, метода доступа к каналам, а также создавать радиостанции третьего поколения с мультистандартным режимом, обеспечивающим абоненту доступ ко всем информационным ресурсам и базам данных единого информационного

пространства независимо от географического расположения, сетевого и аппаратного обеспечения.

На основе технологии SDR стали развиваться новые направления цифровых радиосистем, включая адаптивное, когнитивное и интеллектуальное радио. Так, в адаптивном радио облегчилась реализация средств саморегулирования, за счет которых можно настраивать параметры или элементы структуры радиостанций по выбранным критериям для улучшения их работы [2].

Когнитивная радиосистема в процессе своей работы выполняет функции обнаружения, определения и изучения сигналов, присутствующих в радиоэфире, а также принимает решения о настройке конфигурации внутреннего оборудования [3, 4]. Она характеризуется способностью к самоанализу и самоконфигурации, сетевой адаптацией (на основе определенных критериев и знаний о предыдущих состояниях), возможностью динамического изменения своей топологии и эксплуатационных параметров в соответ-

ствии с требованиями пользователя, способностью к саморегулированию с распределенным управлением, способностью самостоятельного определения своего текущего состояния и планирования работы [5, 6].

В отношении радиoliniи когнитивная радиосистема анализирует состояние канала радиосвязи, время суток, время года, занятость радиочастотного спектра помехами (станционными, преднамеренными и непреднамеренными), мощность передачи информации, чувствительность радиоприемного тракта и возможность их изменения, ресурс энергоснабжения (для мобильных радиосистем) и другие факторы, влияющие на эффективность передачи информации.

В отношении управления своей внутренней структурой когнитивная радиосистема в первую очередь проводит настройку сигнально-кодовой конструкции (СКК) [7], формируя наиболее эффективную комбинацию цифровых устройств модуляции/демодуляции и помехоустойчивого кодирования/декодирования.

С учетом того, что в цифровой радиосвязи могут применяться множество разных вариантов модуляторов и помехоустойчивых кодеров, количество потенциальных для работы вариантов их комбинаций становится достаточно большим, и поэтому желательно предварительно оценивать их потенциальную значимость. Выбор среди них наиболее эффективных вариантов СКК будет зависеть от зашумленности и других характеристик канала радиосвязи и заранее не очевиден. Кроме того, результаты сравнения вариантов СКК по эффективности будут зависеть и от программно-аппаратной реализации применяемых модуляторов и кодеров.

Целью настоящей статьи является практическое исследование влияния различных вариантов СКК на качество функционирования SDR с точки зрения эффективности их использования для настройки когнитивных радиосистем. Исследование имеет прикладную направленность и проводится на сертифицированном программно-аппаратном оборудовании *National Instruments*, наиболее приближенном к практическим реализациям современных цифровых радиосистем.

Для этого в качестве аппаратной реализации построен специальный стенд на платформе *National Instruments – NIPXIe -7966R* с модулем *NI 5791R* [8]. Формирование передаваемого сигнала, его модуляция, кодирование, а также настройка приемопередающего оборудования осуществляется в среде разработки *LabVIEW*

с использованием стандартных программных модулей модемов и кодеров. При этом стенд имеет два комплекта данного оборудования: один из них используется в качестве передатчика, а другой задействован в виде приемника. Для точного контроля уровня сигнал/шум приемник и передатчик соединяются через коаксиальный кабель. Такое исключение части радиоканала связи «антенна – радиоэфир – антенна» сделано с целью уменьшения числа факторов, влияющих на проводимое исследование, в том числе исключены характеристики радиотрассы и антенно-фидерных устройств.

В качестве основных критериев эффективности систем радиосвязи выбраны наиболее важные для практики вероятность битовой ошибки (BER) в принятом сигнале и скорость передачи информации.

В статье для решения поставленной задачи сначала проводится моделирование влияния шума в канале связи на эффективность работы разных вариантов модемов цифровой радиосвязи, далее – исследование улучшения характеристик радиосвязи путем введения дополнительных помехоустойчивых кодеров. После этого рассматривается процесс адаптивной настройки СКК когнитивной радиосистемы на изменяющийся уровень шума в канале радиосвязи с сохранением повышенных скоростей передачи информации.

Исследование влияния шума в канале связи на эффективность работы цифровых модемов

Схемы моделирования исследуемых цифровых систем радиосвязи построены с использованием типовых процедур в среде *LabVIEW*.

Так как эффективность СКК одновременно зависит от эффективности цифровых модемов и помехоустойчивых кодеров, сначала исследуем ухудшение качества радиоприема в зависимости от уровня шума в каналах радиосвязи без использования помехоустойчивых кодеров. Для моделирования выберем следующие варианты цифровых модуляторов/демодуляторов [9]: *PAM* (*Pulse Amplitude Modulation*) – импульсная амплитудная модуляция; *ASK* (*Amplitude Shift Keying*) – амплитудная манипуляция; *PSK* (*Phase Shift Keying*) – фазовая модуляция; *QAM* (*Quadrature Amplitude Modulation*) – квадратурная амплитудно-фазовая модуляция; *FSK* (*Frequency Minimum Shift Keying*) – частотная манипуляция (модуляция с разрывной фазой); *MSK* (*Minimum Shift Keying*) – частотная модуляция минимального фазового сдвига.

Таблица 1. Зависимости BER от отношения E_b/N_0 для разных вариантов цифровой модуляции PSK и QAM без помехоустойчивого кодирования

Table 1. Dependence of BER on the E_b/N_0 ratio for different variants of digital modulation without error-correcting coding

2PSK							
E_b/N_0 , дБ	5	6,6	8,2	9	9,8	10,6	11,4
BER	$1,23 \cdot 10^{-2}$	$3,57 \cdot 10^{-3}$	$7,86 \cdot 10^{-4}$	$2,37 \cdot 10^{-4}$	$6,88 \cdot 10^{-5}$	$1,13 \cdot 10^{-5}$	0
4PSK							
E_b/N_0 , дБ	0	2,5	5	7,5	10	11	12,5
BER	$9,83 \cdot 10^{-2}$	$4,34 \cdot 10^{-2}$	$1,19 \cdot 10^{-2}$	$1,56 \cdot 10^{-3}$	$6,36 \cdot 10^{-5}$	$8,93 \cdot 10^{-5}$	$1,06 \cdot 10^{-7}$
8PSK							
E_b/N_0 , дБ	5	9	11	12	13	14	15
BER	$3,43 \cdot 10^{-2}$	$3,38 \cdot 10^{-3}$	$4,08 \cdot 10^{-4}$	$1,14 \cdot 10^{-4}$	$2,03 \cdot 10^{-5}$	$1,64 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$
16PSK							
E_b/N_0 , дБ	5	10	15	18,75	20	21	21,5
BER	$9,06 \cdot 10^{-2}$	$2,77 \cdot 10^{-2}$	$2,19 \cdot 10^{-3}$	$2,19 \cdot 10^{-3}$	$4,78 \cdot 10^{-6}$	$6,9 \cdot 10^{-7}$	0
32PSK							
E_b/N_0 , дБ	5	11	14	17	20	23	25
BER	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$5,49 \cdot 10^{-5}$	$2,47 \cdot 10^{-2}$	$6,01 \cdot 10^{-3}$	$4,41 \cdot 10^{-4}$	$9,63 \cdot 10^{-6}$	0
4QAM							
E_b/N_0 , дБ	5	7	9	10	11	12	12,5
BER	$8,31 \cdot 10^{-3}$	$1,32 \cdot 10^{-3}$	$7,92 \cdot 10^{-5}$	$1,63 \cdot 10^{-5}$	$4,83 \cdot 10^{-6}$	$3,36 \cdot 10^{-7}$	0
8QAM							
E_b/N_0 , дБ	5	6,5	8	9,5	11	12,5	14
BER	$3,73 \cdot 10^{-2}$	$1,74 \cdot 10^{-2}$	$6,25 \cdot 10^{-3}$	$1,56 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$1,37 \cdot 10^{-5}$	$1,09 \cdot 10^{-7}$
16QAM							
E_b/N_0 , дБ	5	10	13	14	15	16	17
BER	$5,02 \cdot 10^{-2}$	$4,04 \cdot 10^{-3}$	$2,21 \cdot 10^{-4}$	$6,27 \cdot 10^{-5}$	$1,44 \cdot 10^{-5}$	$2,23 \cdot 10^{-6}$	0

Полученные результаты моделирования эффективности работы разных вариантов модемов в составе радиосистем с различным уровнем помех в каналах радиопередачи приведены в табл. 1 (соответствующие графики для экономии места опущены; в таблице вероятность битовой ошибки BER вычислялась как среднее значение для 100 попыток при передаче по 10000 бит). При этом уровень помех характеризовался отношением сигнал/шум, которое задавалось в виде отношения энергии E_b , затрачиваемой на передачу одного бита, к спектральной плотности средней мощности белого гауссового шума N_0 . Тип канала связи описывался моделью канала АБГШ (аддитивный белый гауссов шум).

Приведенные результаты показывают, как увеличение количества уровней модулированного сигнала (многопозиционности сигнала) уменьшает его стойкость к шуму в канале, но в то же время повышает скорость передачи информации. При этом модуляторы 4PSK, 8PSK, 16PSK, 32PSK по отношению к бинарной фазовой модуляции 2PSK могут давать увеличение скорости передачи в 2, 3, 4 и 5 раз, а модулято-

ры 4QAM, 8QAM, 16QAM – соответственно, в 2, 3, 4 раза.

Для улучшения условий компромисса между скоростью передачи и стойкостью шум на практике в схему радиопередачи вводят дополнительные помехоустойчивые кодеры. Поэтому в следующем пункте покажем, насколько можно с помощью введения таких кодеров повысить стойкость СКК к шуму с одновременным сохранением повышенных скоростей передачи информации.

Исследование влияния шума в канале связи на работу СКК с помехоустойчивым кодированием

В схемы моделирования предыдущего пункта были добавлены помехоустойчивые кодеры разных типов со стандартными программными кодами, написанными в среде LabVIEW для платформы National Instruments – NIPXIe-7966R с модулем NI 5791R. Полученные результаты сведены в табл. 2 (соответствующие графики для экономии места опущены). В ней вероятность битовой ошибки BER вычислялась как среднее значение для 100 попыток при передаче по

10000 бит. Для разных типов модемов (4РАМ, 16QAM, MSK, 4FSK, 8ASK и др.) была исследована эффективность введения следующих помехоустойчивых кодеров [10]: БЧХ, Рида – Соло-

мона, Голея, сверточного, Хэмминга. Как и ожидалось, с увеличением количества исправляемых ошибок энергетическая эффективность кода увеличивалась.

Таблица 2. Зависимости BER от отношения E_b/N_0 для разных вариантов сигнально-кодовых конструкций (модем + помехоустойчивый кодер)

Table 2. Dependence of BER on the E_b/N_0 ratio for different variants of signal code construction (modem + error-correcting coder)

2РАМ							
E_b/N_0 , дБ	5	6,6	8,2	9	9,8	10,6	11
BER	$1,23 \cdot 10^{-2}$	$3,57 \cdot 10^{-3}$	$7,86 \cdot 10^{-4}$	$2,38 \cdot 10^{-4}$	$6,88 \cdot 10^{-5}$	$1,13 \cdot 10^{-5}$	0
4РАМ, без кодирования							
E_b/N_0 , дБ	5	8	9,5	11	12,5	14	15
BER	$4,61 \cdot 10^{-2}$	$1,12 \cdot 10^{-2}$	$3,69 \cdot 10^{-3}$	$7,96 \cdot 10^{-4}$	$1,28 \cdot 10^{-4}$	$1,38 \cdot 10^{-5}$	0
4РАМ, код БЧХ (31, 16, 3)							
E_b/N_0 , дБ	5	7	8	9	10	11	12
BER	$6,85 \cdot 10^{-2}$	$1,79 \cdot 10^{-2}$	$6,79 \cdot 10^{-3}$	$1,74 \cdot 10^{-3}$	$3,05 \cdot 10^{-4}$	$3,53 \cdot 10^{-5}$	0
4РАМ, код БЧХ (31, 11, 5)							
E_b/N_0 , дБ	5	6,6	7,4	8,2	9,8	10,6	11,4
BER	$5,12 \cdot 10^{-2}$	$1,72 \cdot 10^{-2}$	$7,81 \cdot 10^{-3}$	$3,09 \cdot 10^{-3}$	$2,85 \cdot 10^{-4}$	$5,1 \cdot 10^{-5}$	0
4РАМ, код БЧХ (31, 26, 1)							
E_b/N_0 , дБ	5	7	8	9	11	12	13
BER	$6,47 \cdot 10^{-2}$	$2,34 \cdot 10^{-2}$	$1,03 \cdot 10^{-2}$	$3,52 \cdot 10^{-3}$	$2,25 \cdot 10^{-4}$	$2,48 \cdot 10^{-5}$	0
8РАМ							
E_b/N_0 , дБ	5	11	12,5	14	17	18,5	19
BER	$1,03 \cdot 10^{-1}$	$1,84 \cdot 10^{-2}$	$8,07 \cdot 10^{-3}$	$2,69 \cdot 10^{-3}$	$1,15 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$	0
16QAM, без кодирования							
E_b/N_0 , дБ	8	10	11	13	14	15,5	16
BER	$1,42 \cdot 10^{-2}$	$4,05 \cdot 10^{-3}$	$1,79 \cdot 10^{-3}$	$2,25 \cdot 10^{-4}$	$5,84 \cdot 10^{-5}$	$4,43 \cdot 10^{-6}$	$1,22 \cdot 10^{-6}$
16QAM, код Рида – Соломона (255, 249, 3)							
E_b/N_0 , дБ	10	10,5	11	11,5	12	12,5	12,7
BER	$3,94 \cdot 10^{-3}$	$1,87 \cdot 10^{-3}$	$5,56 \cdot 10^{-4}$	$1,39 \cdot 10^{-4}$	$6,71 \cdot 10^{-6}$	$1,26 \cdot 10^{-6}$	0
16QAM, код Рида – Соломона (255, 245, 5)							
E_b/N_0 , дБ	8	9,6	10,4	10,8	11,2	11,6	12
BER	$2,22 \cdot 10^{-2}$	$5,01 \cdot 10^{-3}$	$1,19 \cdot 10^{-3}$	$1,99 \cdot 10^{-4}$	$3,45 \cdot 10^{-5}$	$4,91 \cdot 10^{-6}$	0
16QAM, код Рида – Соломона (255, 233, 11)							
E_b/N_0 , дБ	8	9,2	9,6	10	10,4	10,8	11
BER	$2 \cdot 10^{-2}$	$5,87 \cdot 10^{-3}$	$2,45 \cdot 10^{-3}$	$3,68 \cdot 10^{-4}$	$3,22 \cdot 10^{-5}$	$1,66 \cdot 10^{-6}$	0
MSK, без кодирования							
E_b/N_0 , дБ	8	11	13	14	15	16	17
BER	$3,01 \cdot 10^{-2}$	$3,45 \cdot 10^{-3}$	$3,93 \cdot 10^{-4}$	$8,04 \cdot 10^{-5}$	$1,53 \cdot 10^{-5}$	$9,39 \cdot 10^{-7}$	0
MSK, код Голея (23, 12, 3)							
E_b/N_0 , дБ	8	10	11	12	13	14	15
BER	$7,55 \cdot 10^{-2}$	$1,12 \cdot 10^{-2}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$4,81 \cdot 10^{-4}$	$7,39 \cdot 10^{-5}$	$1,76 \cdot 10^{-6}$	0
MSK, код Голея (24, 12, 3)							
E_b/N_0 , дБ	8	10	11	12	13	14	15
BER	$6,99 \cdot 10^{-2}$	$1,04 \cdot 10^{-2}$	$2,47 \cdot 10^{-3}$	$4,04 \cdot 10^{-4}$	$5,21 \cdot 10^{-5}$	$3,93 \cdot 10^{-6}$	0
2FSK							
E_b/N_0 , дБ	8	11	12,5	14	15,5	17	18,5
BER	$8,59 \cdot 10^{-2}$	$1,62 \cdot 10^{-2}$	$4,33 \cdot 10^{-3}$	$8,3 \cdot 10^{-4}$	$9,57 \cdot 10^{-5}$	$5,03 \cdot 10^{-6}$	0

Окончание табл. 2

4FSK, без кодирования							
E_b/N_0 , дБ	8	10	13	14	15	16	17
BER	$2,71 \cdot 10^{-2}$	$5,96 \cdot 10^{-3}$	$3,52 \cdot 10^{-4}$	$9,36 \cdot 10^{-5}$	$1,81 \cdot 10^{-5}$	$3,34 \cdot 10^{-6}$	0
4FSK, со сверточным кодом ($R = 1/2, K = 6$)							
E_b/N_0 , дБ	8	9,8	10,6	11	11,4	11,8	12,2
BER	$1,42 \cdot 10^{-1}$	$6,24 \cdot 10^{-3}$	$1,07 \cdot 10^{-3}$	$2,68 \cdot 10^{-4}$	$7,21 \cdot 10^{-5}$	$4,79 \cdot 10^{-6}$	0
4FSK, со сверточным кодом ($R = 1/4, K = 6$)							
E_b/N_0 , дБ	8	9,8	11,4	11,8	12,2	12,6	13
BER	$2,04 \cdot 10^{-1}$	$1,27 \cdot 10^{-2}$	$2,13 \cdot 10^{-4}$	$6,75 \cdot 10^{-5}$	$1,06 \cdot 10^{-5}$	$6,25 \cdot 10^{-7}$	0
4FSK, со сверточным кодом ($R = 1/3, K = 6$)							
E_b/N_0 , дБ	8	9,8	10,6	11,4	11,8	12,2	12,6
BER	$1,82 \cdot 10^{-1}$	$9,11 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,01 \cdot 10^{-4}$	$2,84 \cdot 10^{-5}$	$1,46 \cdot 10^{-6}$	0
8ASK, без кодирования							
E_b/N_0 , дБ	12	15	17	19	21	23	25
BER	$8,17 \cdot 10^{-2}$	$3,35 \cdot 10^{-2}$	$1,49 \cdot 10^{-2}$	$4,67 \cdot 10^{-3}$	$9,93 \cdot 10^{-4}$	$1,08 \cdot 10^{-4}$	$5,12 \cdot 10^{-6}$
8ASK, код Хэмминга ($m = 4$)							
E_b/N_0 , дБ	12	14	17	20	21,7	23,3	24
BER	$1,26 \cdot 10^{-1}$	$5,31 \cdot 10^{-2}$	$1,11 \cdot 10^{-2}$	$6,46 \cdot 10^{-4}$	$5,12 \cdot 10^{-5}$	$3,36 \cdot 10^{-6}$	0
8ASK, код Хэмминга ($m = 7$)							
E_b/N_0 , дБ	12	14	17	18,5	20	22,5	25
BER	$1,59 \cdot 10^{-1}$	$8,67 \cdot 10^{-2}$	$1,98 \cdot 10^{-2}$	$6,59 \cdot 10^{-3}$	$1,28 \cdot 10^{-3}$	$3,89 \cdot 10^{-5}$	0

Моделирование эффективности кода БЧХ проводилось с модуляцией *РАМ* с одинаковой длиной кодового слова, но с разным числом исправляемых ошибок. Эффективность выбранного варианта кода БЧХ обеспечивалась при $\frac{E_b}{N_0} \geq$

≥ 6 Дб. При $\frac{E_b}{N_0} < 6$ Дб вероятность ошибки

4РАМ с кодом БЧХ получилась хуже, чем модуляции *4РАМ* без кодирования, что можно объяснить присутствием большого количества ошибок в кодовом слове, превышающем исправляющую способность кода.

Моделирование эффективности кода Рида – Соломона выполнялось с модуляцией *16QAM*. При использовании СКК *16QAM* с кодом Рида – Соломона на уровне вероятности битовой ошибки 10^{-5} получился энергетический выигрыш около 5 дБ по сравнению с передачей данных без помехоустойчивого кодирования.

Моделирование эффективности помехоустойчивого кода Голея выполнялось с модуляцией *MSK*. Эффективность кода Голея обеспечивалась при $\frac{E_b}{N_0} \geq 11$ Дб. При $\frac{E_b}{N_0} < 11$ Дб

вероятность ошибки СКК с кодом Голея была хуже, чем для СКК без кодирования, что можно объяснить неспособностью помехоустойчи-

вого кода справиться с большим количеством ошибок (как следствие, неправильно восстанавливается исходное сообщение). Разница между двоичным кодом Голея (23, 12, 3) и расширенным кодом Голея (24, 12, 3) получилась незначительной, поскольку каждый из них обладают одинаковым количеством информационных символов и оба исправляют по три ошибки.

Моделирование эффективности сверточного кода выполнялось с модуляцией *FSK*. Применение данных кодов для рассматриваемой модуляции целесообразно при $\frac{E_b}{N_0} > 10$ Дб, иначе

вероятность появления ошибочно принятых бит СКК со сверточным кодом становилась больше, чем СКК без кодирования. При этом использование сверточного кода с заданными параметрами может обеспечить энергетический выигрыш до 5 дБ.

Моделирование эффективности кода Хэмминга проводилось с модуляцией *8ASK*. Его применение дает энергетический выигрыш по отношению к сигналу без кодирования порядка 2 дБ. При одинаковой способности исправления ошибок увеличение избыточности кода до $m = 7$ уменьшает энергетическую эффективность кода в сравнении с более коротким кодом ($m = 4$).

Адаптивная настройка СКК когнитивной радиосистемы на изменяющийся уровень шума в канале радиосвязи

При работе когнитивных радиосистем в условиях изменяющейся зашумленности канала радиосвязи обычно ставится задача обеспечить наиболее высокие скорости передачи информации при конкретном ограничении на BER (вероятность битовой ошибки в принятых информационных сообщениях). При этом предполагается, что возможности когнитивной радиосистемы позволяют ей периодически (или непрерывно) диагностировать канал радиосвязи, оценивая величину BER для работающей в данный момент времени СКК (выбранной комбинации модела и помехоустойчивого кодера).

Тогда по величине измеренной BER на основе результатов табл. 2 можно оценить величину $\frac{E_b}{N_0}$ для текущего состояния канала радиосвязи.

При этом удобнее представлять результаты табл. 2 в виде соответствующих кусочно-линейных кривых на одном графике. Из него сразу будет видно, какая СКК более предпочтительна с точки зрения наибольшей скорости передачи данных для требуемого значения BER

и уровня шума $\frac{E_b}{N_0}$ (косвенно оцененного когнитивной радиосистемой).

Так как множество приведенных в табл. 1, 2 результатов затрудняет их наглядность в виде обобщающих графиков, в качестве примера рассмотрим процесс перестройки СКК когнитивной радиосистемы на изменяющийся уровень шума в канале радиосвязи только для усеченного класса СКК с QAM -модуляторами и помехоустойчивыми кодерами Рида – Соломона.

Суть испытаний заключалась в получении статистических значений BER для различных кодов Рида – Соломона и сравнении полученных результатов. Данный эксперимент позволил выбрать пороговые значения шумов в канале, при которых необходимо проводить смену режима кодирования [11]. Для конкретности был выбран код Рида – Соломона над полем $GF(2^8)$ с длиной блока $n = 32$ и переменным значением количества информационных символов в блоке $k = 16, \dots, 30$. Многопозиционность модуляторов QAM также принималась переменной: $4QAM, 8QAM, 16QAM$. Полученные результаты изображены на обобщающем рис. 1.

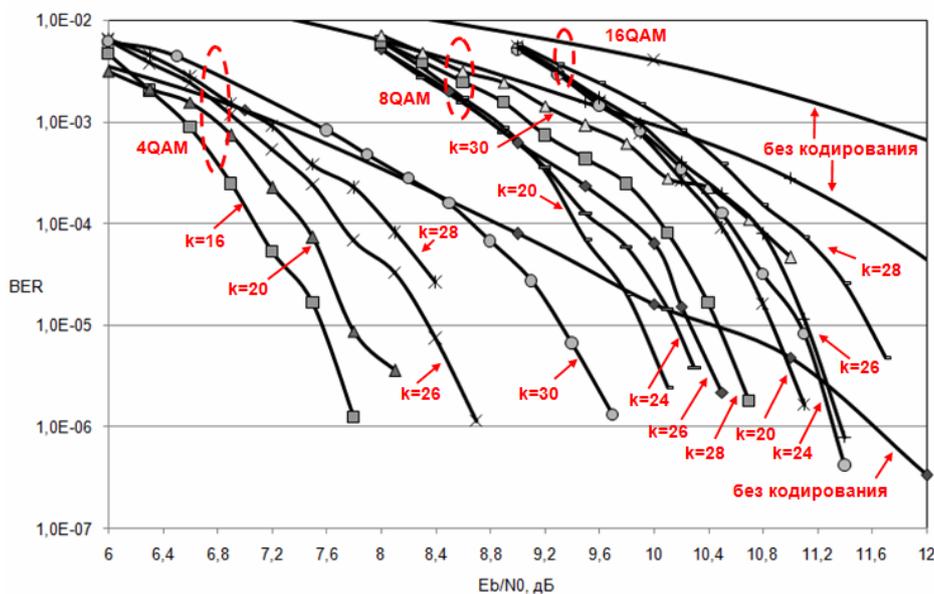


Рис. 1. Вероятность битовой ошибки для СКК с QAM -модуляторами и помехоустойчивыми кодерами Рида – Соломона

Fig. 1. Bit error probability for SCC with QAM -modulators and Reed - Solomon error-correcting coders

Расчет информационной скорости для каждой рассматриваемой СКК может быть выполнен по формуле [12]

$$C = R \cdot \log_2 M \cdot \left(\frac{k}{n} \right),$$

где C – информационная скорость, бит/с; R – техническая скорость, бод; M – размерность сигнала; k – количество информационных бит в кодовом слове; n – количество бит кодового слова.

Например, для СКК 8QAM без кодирования имеем информационную скорость

$$C = \log_2 8 = 3R, \text{ бит/с,}$$

а для СКК 8QAM с кодом Рида – Соломона (32, 24)

$$C = R \frac{\log_2 8 \cdot 24}{32} = 2,25R, \text{ бит/с.}$$

Получили, что информационная скорость у СКК 8QAM без кодирования выше, чем у СКК 8QAM с кодом Рида – Соломона (32, 24). Однако из графиков на рис. 1 видно, что СКК с кодированием обеспечивает больший энергетический выигрыш.

По результатам расчетов некоторые варианты СКК были исключены из списка эффективных, так как они при близкой скорости передачи информации имели меньшую помехоустойчивость, чем режимы с другим сочетанием модуляции и кодов Рида – Соломона. Так, например, информационная скорость для СКК 8QAM ($k = 20$)

$$C = R \frac{\log_2 8 \cdot 20}{32} = 1,875R, \text{ бит/с}$$

оказалась равна скорости для СКК 4QAM ($k = 30$)

$$C = R \frac{\log_2 4 \cdot 30}{32} = 1,875R, \text{ бит/с.}$$

Однако из рис. 1 видно, что СКК 8QAM ($k=20$) существенно проигрывает СКК 4QAM ($k=30$) по помехоустойчивости.

В результате осталось 12 вариантов СКК, потенциально применимых в работе перестраиваемой когнитивной радиосистемы. Их важнейшие характеристики (скорость передачи информации, вероятность битовой ошибки в принятых информационных сообщениях и отношение сигнал/шум) показаны на рис. 2 (номера графиков соответствуют строкам табл. 3). При этом выбор соответствующего варианта СКК позволяет варьировать информационную скорость в диапазоне от 1 до 3,5 R при изменении E_b/N_0 от 7 до 12 дБ.

На рис. 2 также приведена демонстрация процесса настройки варианта СКК, не изменяющего уровень шума в канале радиосвязи для выбранного ограничения. Получившиеся режимы предпочтительной работы сведены в табл. 3.

Алгоритм работы решающего устройства по выбору наиболее эффективной в данных условиях СКК может быть, например, следующим: производится передача контрольного пакета данных и оценивается вероятность битовой ошибки (BER) \Rightarrow по измеренной величине BER оценивается текущее значение сигнал/шум (E_b/N_0) \Rightarrow задается допустимая величина BER для работы системы в этих условиях \Rightarrow выбираются потенциально эффективные СКК, удовлетворяющие заданному диапазону E_b/N_0 и вероятности битовой ошибки \Rightarrow при наличии нескольких СКК в указанном диапазоне E_b/N_0 выбор делается в пользу СКК, обеспечивающей наибольшую скорость передачи информации.

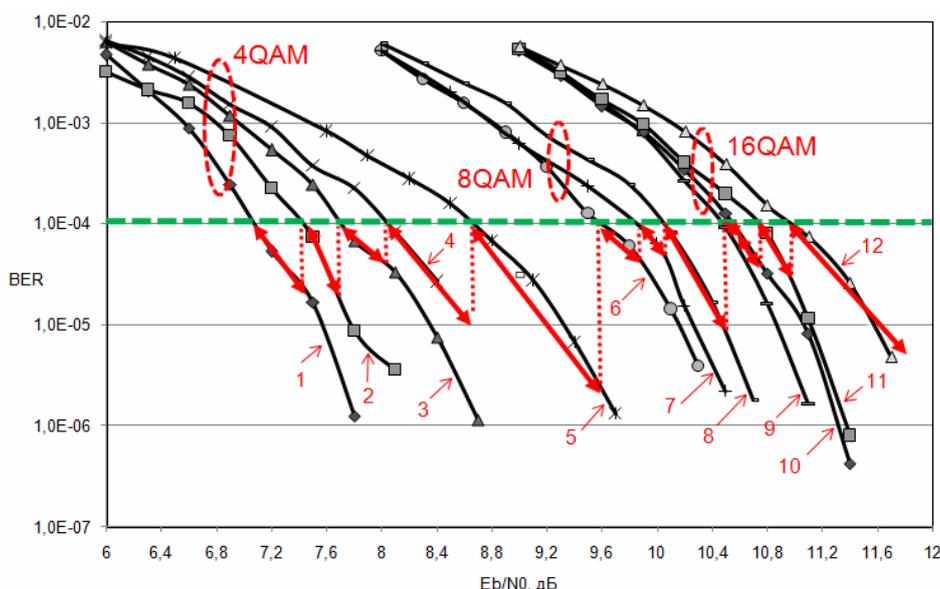


Рис. 2. Демонстрация процесса перестройки СКК когнитивной радиосистемы на изменяющийся уровень шума в канале радиосвязи

Fig. 2. Demonstration of the process of tuning the SCC of a cognitive radio system to a changing noise level in a communication channel

Таблица 3. Режимы предпочтительной работы различных СКК

Table 3. Modes of preferred operation of various SCC

№	Режим		Относительная скорость передачи, бит/с	Диапазон E_b/N_0 , дБ
	Модуляция	Код		
1	4QAM	PC ($k = 16$)	1 R	7...7,4
2		PC ($k = 20$)	1,25 R	7,4...7,7
3		PC ($k = 26$)	1,625 R	7,7...8,1
4		PC ($k = 28$)	1,75 R	8,1...8,7
5		PC ($k = 30$)	1,875 R	8,7...9,6
6	8QAM	PC ($k = 24$)	2,25 R	9,6...9,9
7		PC ($k = 26$)	2,4375 R	9,9...10,1
8		PC ($k = 28$)	2,625 R	10,1...10,5
9	16QAM	PC ($k = 22$)	2,75 R	10,5...10,6
10		PC ($k = 24$)	3 R	10,6...10,8
11		PC ($k = 26$)	3,25 R	10,8...11
12		PC ($k = 28$)	3,5 R	11...12

Заключение

Выполненное натурное исследование эффективности сигнально-кодовых конструкций на программно-аппаратном оборудовании SDR платформы *National Instruments* может рассматриваться в качестве первого этапа к практическому созданию рабочего образца когнитивной радиосистемы для конкретных условий радиотрассы. Во-первых, оно поможет при выборе небольшого числа настраиваемых СКК, наиболее предпочтительных с точки зрения их эффективности. Во-вторых, на этой основе могут выбираться алгоритмы и строиться контура обратной связи создаваемых когнитивных радиосистем на начальных этапах их создания и отладки.

Также отметим основные направления дальнейшего развития рассмотренных в статье моделей SDR. Это, во-первых, введение в радиотракт конкретных антенно-фидерных устройств приемника и передатчика с соответствующими техническими характеристиками. Во-вторых, для более тонкой настройки когнитивной радиосистемы потребуется также усложнение моделей радиотрасс.

Библиографические ссылки

1. Сорохтин Е. М., Минеев С. А. Распределенные программно-определяемые радиосистемы // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2010. № 5 (2). С. 383–385.
2. Галкин В. А. Основы программно-конфигурируемого радио. М. : Горячая линия – Телеком, 2015. 372 с. ISBN 978-5-9912-0305-0.
3. Гурьянов И. О. Когнитивное радио : Новые подходы к обеспечению радиочастотным ресурсом перспективных радиотехнологий // Электросвязь. 2012. № 8. С. 5–8.

4. Мирошникова Н. Е. Обзор систем когнитивного радио // T-Comm – Телекоммуникации и транспорт. 2013. № 9. С. 108–111.

5. Kwang-Cheng Chen, Prasad R. Cognitive radio networks. Wiley Publ., 2009. 359 p.

6. Foundation of Cognitive Radio Systems. Ed. Samuel Cheng. Tech Janeza Trdine Publ. 9, 51000 Rijeka, Croatia, 2012. 298 p.

7. Банкет В. Л. Сигнально-кодовые конструкции в телекоммуникационных системах. Одесса : Феникс, 2009. 180 с.

8. Шарипов Т. А., Шишаков К. В. Разработка стенда для имитационного моделирования радиопередающих устройств на приборе SDR // Научные технологии и интеллектуальные системы. 2019. С. 58.

9. Галкин В. А. Цифровая мобильная радиосвязь. М. : МИЭТ, 2007. 432 с.

10. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. М. : Техносфера, 2005. 320 с.

11. Тамразян Г. М. Программно-аппаратная реализация оптимального алгоритма декодирования каскадных кодов на базе кодов Рида – Соломона в адаптивных системах обмена данными : дис. ... канд. техн. наук. Ульяновский гос. тех. ун-т, 2017. 142 с.

12. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение : пер. с англ. М. : Вильямс, 2003. 1104 с.

References

1. Sorokhtin E.M. Mineev S.A. [Distributed Software Defined Radio Systems]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo*, 2010, no. 5, pp. 383-385 (in Russ.).
2. Galkin V.A. *Osnovy programmnno-konfiguriruemo-go radio* [Software Configurable Radio Basics]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2015, 372 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9912-0305-0.
3. Gur'yanov I.O. [Cognitive radio: New approaches to providing radio-frequency resources for promising

radio technologies]. *Elektrosvyaz'*, 2012, no. 8, pp. 5-8 (in Russ.).

4. Miroschnikova N.E. [Cognitive Radio Systems Overview]. *T-Comm - Telekommunikatsii i transport*, 2013, no. 9, pp. 108-111 (in Russ.).

5. Kwang-Cheng Chen, Prasad R. Cognitive radio networks. Wiley Publ., 2009. 359 p.

6. Foundation of Cognitive Radio Systems. *Ed. Samuel Cheng*. Tech Janeza Trdine Publ. 9, 51000 Rijeka, Croatia, 2012. 298 p.

7. Banket V.L. *Signal'no-kodovye konstruksii v telekommunikatsionnykh sistemakh* [Signal-code constructions in telecommunication systems]. Odessa, Feniks Publ., 2009, 180 p.

8. Sharipov T. A., Shishakov K. V. [Development of a stand for simulation of radio transmitting devices on an SDR device]. *Naukoemkie tekhnologii i intellektual'nye systemy*, 2019, p. 58 (in Russ.).

9. Galkin V.A. *Tsifrovaya mobil'naya radiosvyaz'* [Digital mobile radio]. Moscow, MIET Publ., 2007, 432 p. (in Russ.).

10. Morelos-Saragosa R. *Iskusstvo pomekhoustoichivogo kodirovaniya. Metody, algoritmy, primeneniye* [The art of noiseless coding. Methods, Algorithms, Application]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2005, 320 p. (in Russ.).

11. Tamrazyan G.M. Programmno-apparatnaya realizatsiya optimal'nogo algoritma dekodirovaniya kaskadnykh kodov na baze kodov Rida – Solomona v adaptivnykh sistemakh obmena dannymi [Software and hardware implementation of the optimal algorithm for decoding cascading codes based on Reed - Solomon codes in adaptive data exchange systems]: PhD thesis. Ulyanovsk State Technical University, 2017, 142 p.

12. Sklyar B. *Tsifrovaya svyaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye* [Digital communication. Theoretical foundations and practical application]. Moscow, Vil'yams Publ., 2003, 1104 p. (in Russ.).

Study of the Effectiveness of Signal-Code Options Designs for Tuning a Cognitive Radio System

T.A. Sharipov, Master's Degree Student, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

K.V. Shishakov, PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

The results of modeling the effectiveness of signal-code structures (SCC) for tuning a cognitive radio system are considered. In this case, SCC are formed by different combinations of digital modulators and error-correcting encoders. Among the modulators for the research, PAM, ASK, PSK, QAM, FSK, MSK with varying degrees of multi-positioning were selected. Among the error-correcting codes, the BCH, Reed - Solomon, Golay, convolutional, and Hamming codes were selected. The SCC research was conducted at the National Instruments stand based on SDR technology using ready-made routines for modulators and error-correcting encoders implemented in the LabView environment. The results of modeling the effect of noise in the communication channel on the performance of various digital modems, characterized by different information transfer rates are presented. The problem has been investigated how to increase the SCC resistance to noise by introducing error-correcting encoders while maintaining the increased information transfer rates. It is shown how the results of the research can be used to create a cognitive radio system. An algorithm for adaptive tuning of the SCC of a cognitive radio system to a changing noise level in a radio channel is described. The process of its work is demonstrated on the example of the SCC group, consisting of different combinations of QAM modulators with increasing multi-positioning and error-correcting Reed-Solomon encoders of different strengths. It is shown that the performed simulation of the effectiveness of SCCs for tuning a cognitive radio system is the first step in the practical creation of a specific cognitive radio system made using SDR technology.

Keywords: cognitive radio system, modeling, signal code construction, modulation, error-correcting coding.

Получено 05.09.2019

Образец цитирования

Шарипов Т. А., Шишаков К. В. Исследование эффективности вариантов сигнально-кодовых конструкций для настройки когнитивной радиосистемы // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 3. С. 63–71 DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-63-71.

For Citation

Sharipov T.A., Shishakov K.V. [Study of the effectiveness of signal-code constructions variants for tuning a cognitive radio system]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 63-71 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-63-71.