

УДК 621.396

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ МОДЕЛИ ПРИЁМНОГО УСТРОЙСТВА
ЦИФРОВОГО КАНАЛА СВЯЗИ****Андреев Владимир Викторович**

Доктор технических наук, профессор Калужского филиала Московского
технического университета имени Н.Э. Баумана, Россия, г. Калуга
vladimir_andreev@bmstu.ru

Гурин Виталий Михайлович

Магистрант Калужского филиала Московского технического
университета имени Н.Э. Баумана, Россия, г. Калуга
vitally.gurin918@yandex.ru

Шмелькова Анастасия Альбертовна

Магистрант Калужского филиала Московского технического
университета имени Н.Э. Баумана, Россия, г. Калуга

Голубов Кирилл Максимович

Магистрант Калужского филиала Московского технического
университета имени Н.Э. Баумана, Россия, г. Калуга

Аннотация

В статье описаны исследования модели кодовой конструкции каскадного кода, предлагаемой для применения в аппаратуре по УКВ каналу связи. Определена задача построения аппаратуры, обеспечивающей возможность достоверной передачи информации по цифровому каналу связи. Рассмотрены вопросы демодуляции амплитудно-манипулированных сигналов.

Ключевые слова: цифровой канал связи, демодуляция амплитудно-манипулированных сигналов, тактовая синхронизация, УКВ диапазон.

**INVESTIGATION OF THE OPERATION OF THE DIGITAL
COMMUNICATION CHANNEL RECEIVER MODEL****Vladimir V. Andreev**

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Kaluga Branch of the Moscow Technical University
named after N.E. Bauman, Russia, Kaluga
vladimir_andreev@bmstu.ru

Vitaly M. Gurin

Master student of the Kaluga branch of the Moscow Technical University named after N.E. Bauman, Russia, Kaluga
vitaly.gurin918@yandex.ru

Anastasia A. Shmelkova

Master student of the Kaluga branch of the Moscow Technical University named after N.E. Bauman, Russia, Kaluga

Kirill M. Golubov

Master student of the Kaluga branch of the Moscow Technical University named after N.E. Bauman, Russia, Kaluga

ABSTRACT

The article describes the research of the cascade code construction model proposed for use in VHF communication channel equipment. The task of constructing equipment that provides the possibility of reliable transmission of information via a digital communication channel is determined. The issues of demodulation of amplitude-manipulated signals are considered.

Keywords: digital communication channel, demodulation of amplitude-manipulated signals, clock synchronization, VHF range

Задача построения аппаратуры, обеспечивающей возможность достоверной передачи информации по цифровому каналу связи с вероятностью ошибки около 0,05 впервые стала актуальной во время проведения экспериментов с каналом УКВ и достижению граничных пределов.

Для экспериментов в качестве первого каскада помехоустойчивого кодирования – внутреннего кода канала – был выбран избыточный код, в котором информационная часть составляет 5 бит, а проверочная часть – 26 бит, и включает в себя все 26 возможных комбинаций проверок на чётность, составленных из пяти информационных бит, что в сумме дало код (31,5). Такой избыточный код возможно неоптимален с точки зрения теоремы Шеннона. Однако скорость передачи информации некоторым образом ограничена снизу предполагаемой областью возможного применения – передача изображений (желательно – подвижных). А, поскольку эксперименты с названным диапазоном длин волн только начались, – большинство способов повышения скорости передачи информации за счёт увеличения удельного количества передаваемой информации на один канальный символ – остались пока за рамками проводимых исследований. Это относится в том числе и к выбору правильной канальной скорости передачи информации (выбор длительной посылки в противовес многократному повторению). Затраты на связь будут тем больше, чем быстрее мы хотим передать информацию, чем больше этой информации и чем дальше расстояние связи. В любом случае – надо пробовать различные сигнально-кодовые конструкции, и это позволит подобрать оптимальную [1, 2].

Выбранный код образует алфавит из 32 слов (от 0 до 31) может быть использован следующим образом:

- одно слово (30дес = 11110дв) применить для передачи преамбулы – вместо массива «точек» в начале сообщения, служащих для выведения в рабочий режим системы АРУ приёмника, а также автоматического выставления уровня срабатывания детектора нулей и единиц приёмника, т.е. для предотвращения преобладаний; большая часть длины преамбулы обычно поглощается в приёмном тракте;

- одно слово (31дес = 11111дв) применить для нужд синхронизации – в качестве маркера конца блока;

- одно слово (00дес = 00000дв) зарезервировать и не передавать – из-за того, что оно представляет из себя «длинный ноль» – непрерывный массив бестоковых посылок;

- остальные двадцать девять слов с 01дес по 29дес использовать в качестве представлений для информационных слов второй ступени помехоустойчивого каскадного кодирования – внешнего кода Рида-Соломона над GF(291) – недвоичного кода с арифметикой в системе остаточных классов [3].

Для первоочередного исследования были выбраны следующие вопросы:

- проявление свойств самосинхронизации циклического кода без воздействия потока ошибок в канале – с целью определить способ построения системы пословной синхронизации (устройства циклового фазирования);

- необходимость улучшения самосинхронизирующих свойств кода путём добавления в передаваемый сигнал:

- а) специальной синхронизирующей последовательности длиной 31 бит;

- б) двух различных последовательностей длиной 31 бит с поочерёдным их наложением на нечётные и чётные по счёту слова передаваемого блока;

- в) специальной синхронизирующей последовательности длиной 62 бит, накрывающей сразу два последовательно передаваемых слова блока и составленной из усечённой последовательности длиной 63 бит [4];

- последующее измерение соотношения сигнал/шум в работе предложенного способа реализации системы пословной синхронизации – как в целом, так и в детализации измерения соотношения сигнал/шум в отдельности для каждой из 31 возможной фазы;

- предварительное определение вероятности и характера потока ошибок (трансформаций) от внутреннего кода канала к внешнему коду с целью оценки необходимой величины избыточности внешнего кода РС.

Краткое описание модели:

Модель выполнена в виде трёх листов таблиц Микрософт Эксель.

На Листе1 представлена кодирующая часть модели:

- показано, по каким формулам построены 26 проверочных разрядов кодового слова;

- приведены все 32 слова алфавита кода, возможные на передающем конце;

- в качестве проверки правильности вычислительных формул посчитано кодовое расстояние между всеми этими словами алфавита.

На Листе2 – располагается декодирующая часть модели и, собственно, исследования поведения кода:

- сначала без наложения ошибок;

- исследованы возможности самосинхронизации кода при наличии «точек» в качестве преамбулы; результаты вычисления кодовых расстояний между отрезками «точек» и расположенными следом легальными словами алфавита в разных фазах в скользящем 31-разрядном окне приёма заставили искать более подходящую для этих целей последовательность;

- для улучшения результатов предложена преамбула в виде двойного повтора легального слова из алфавита внутреннего кода (30дес = 11110дв), которое не используется во внешнем коде, и предлагается зарезервировать для целей синхронизации (и пословной, и, по возможности, в качестве фазового пуска – маркера начала блока);

- затем с наложением ошибок:

- результаты работы модели находятся в столбцах EU и EV; в столбце EU результат декодирования в лоб (отождествлением со всеми легальными символами алфавита, подсчётом кодового расстояния до каждого из них и последующим отождествлением по минимуму ошибок) скользящего окна из 31 бита (в положении от текущей строки и вверх); в столбце EV голубая цветовая метка, если кодовое расстояние между содержимым скользящего окна и каким-либо из легальных кодовых слов не более 5, в следующем столбце EW – для справки – настоящие границы переданных кодовых слов.

На Листе3 расположены две вспомогательные конструкции, генерирующие случайные числа:

- для заполнения тела сообщения генерируется набор случайных чисел в диапазоне от 0 до 29; числа набора преобразуются в 5-разрядные двоичные числа и помещаются в кодирующую матрицу, на выходе которой преобразуются в 31-разрядные кодовые слова, которые затем разворачиваются в передаваемую последовательность [5];

- для создания потока ошибок в столбце K генерируется случайный набор вероятностей в диапазоне от 0 до 1, каждое число сравнивается с заданным пороговым значением (ячейка L2 – заполняется вручную и содержит вероятность ошибки в канале), в результате чего в столбце L, начиная с ячейки L3, образуется последовательность нулей и единиц, в которой единица встречается с вероятностью, близкой к 0,05 – для проверки этого факта в столбце M, начиная с ячейки 102 приводится число единиц в скользящем окне от ячейки в текущей строке до ячейки на 100 строк выше; указанная последовательность в столбце L используется для сложения по модулю 2 (инвертирования) битов информационной последовательности (табл. 1 – 3).

Таблица1. Результаты при вероятности ошибки в канале, считающиеся наилучшей для УКВ диапазона.

Вероятность ошибки в канале	0,01									
Номер эксперимента в серии	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Количество принятых слов с кодовым расстоянием от 0 до 5	181	179	164	172	193	173	179	184	176	168
Из них ложно принятые слова	50	49	34	42	63	43	49	54	46	38
Из них в правильных границах (правильной фазе пословной синхронизации)	131	130	130	130	130	130	130	130	130	130
Наихудшее (среди всех фаз) соотношение сигнал/шум	26,2 дБ	16,25 дБ	16,25 дБ	18,57 дБ	13 дБ	26 дБ	10 дБ	13 дБ	26 дБ	21,6 дБ
	28,4 дБ	24,2 дБ	24,2 дБ	25,4 дБ	22,3 дБ	28,3 дБ	20,0 дБ	22,3 дБ	28,3 дБ	26,7 дБ

Количество пиков в распределении фаз	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2
Количество правильно декодированных слов, синхронизированных по найденному пику синхронизации (границ слов)	131	130	130	130	130	130	131	130	130	130
Количество трансформаций на входе декодера внешнего канала	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3

Таблица 2. Результаты при вероятности ошибки в канале, с которой справляется модифицированный алгоритм, внедрённый в изделия с УКВ диапазоном.

Вероятность ошибки в канале	0,03									
Номер эксперимента в серии	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Количество принятых слов с кодовым расстоянием от 0 до 5	176	172	174	175	170	176	171	164	179	167
Из них ложно принятые слова	46	44	44	48	45	46	41	36	49	42
Из них в правильных границах (правильной фазе пословной синхронизации)	130	128	130	127	125	130	130	128	130	125
Наихудшее (среди всех фаз) соотношение сигнал/шум	21,6 26,7 дБ	32,5 30,2 дБ	32,5 30,2 дБ	21,6 26,7 дБ	21,8 26,8 дБ	21,6 26,7 дБ	16,25 24,2 дБ	43 32,7 дБ	13 22,3 дБ	32,5 30,2 дБ
Количество пиков в распределении фаз	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2
Количество правильно декодированных слов, синхронизированных по найденному пику синхронизации (границ слов)	130	129	130	127	125	129	130	128	131	125

Количество трансформаций на входе декодера внешнего канала	3	2	3	3	3	3	3	3	2	3
--	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Таблица 3. Получены обнадеживающие результаты при целевой вероятности ошибки в канале.

Вероятность ошибки в канале	0,05									
Номер эксперимента в серии	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Количество принятых слов с кодовым расстоянием от 0 до 5	150	146	150	161	161	156	150	167	156	152
Из них ложно принятые слова	20	18	27	32	33	32	20	39	27	27
Из них в правильных границах (правильной фазе пословной синхронизации)	130	128	123	129	128	123	130	128	129	125
Наихудшее (среди всех фаз) соотношение сигнал/шум	42,3 32,5 дБ	42,67 32,6 дБ	24,6 27,8 дБ	25,8 28,2 дБ	32 30,1 дБ	30,75 29,8 дБ	42 32,5 дБ	32 30,1 дБ	43 32,7 дБ	20,83 26,4 дБ
Количество пиков в распределении фаз	2	3	2	2	3	3	2	2	2	3
Количество правильно декодированных слов, синхронизированных по найденному пику синхронизации (границ слов)	130	129	130	129	129	129	131	129	129	129
Количество трансформаций на входе декодера внешнего канала	3	2	2	3	2	3	2	3	3	3

Как видно из таблиц 1–3: при вероятности ошибки 1% число трансформаций лишь единожды за 10 экспериментов изменилось от ожидаемого (в седьмом эксперименте), а число слов, принятых в правильных границах, составляет 9/10. При вероятности 3% число трансформаций составило 2, а слов 5/10. При 5% число трансформаций составило 4, а слов 2/10.

При разработке и проверки новых кодовых конструкций более правильно будет исследовать кода при вероятности ошибки 5%, так как лишь на граничном результате можно увидеть наихудший результат при приеме сообщений и, следовательно, сравнивать разные кодовые конструкции.

С учётом преобразования трансимпедансным усилителем входного тока (заряда) в выходное напряжение, можно выработать критерии выбора параметров, учитывая отличие величин токов полезного сигнала и шума, задающих работу амплитудного детектора, который селективирует импульсы выходного напряжения усилителя на полезные и шумовые – по критерию превышения определённой амплитуды, и может быть реализован на компараторе (с регулируемым напряжением отсечения), либо на триггере Шмитта (с раз и навсегда заранее настроенным напряжением отсечения), либо на АЦП (тогда порог селективирования по напряжению может быть задан программно).

Вопрос с демодуляцией АТ сигнала распределяется на два последовательно расположенных устройства и частично решается на аппаратуре детектора, где «аналоговый» сигнал преобразуется в импульсный, а затем вторая часть решения делается в коррекционном устройстве (КУ) или, что то же самое, – устройстве тактовой синхронизации, которое обнаружит в сигнале манипуляцию с ожидаемой скоростью, разделит поток на отдельные единичные посылки, чётко установив их границы по времени, определит значение посылок в установленных временных границах и снабдит принимаемый поток тактами синхронизации, чем завершит преобразование сигнала из импульсной формы в цифровую.

Список литературы:

1. Бек Г. В. Ускоренный алгоритм декодирования кода Рида-Соломона с исправлением стираний. // Вопросы радиоэлектроники. сер. ТПС 1975. - с.56-62.
2. Акушский И. Я., Юдицкий Д. И. Машинная арифметика в остаточных классах – М.: Советское Радио, 1968. 440 стр.
3. Скляр Бернард. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр. // Перевод с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2016. 1104 с.
4. Прокис Джон Цифровая связь. Пер. с англ. // Под ред. Д. Д. Кловского. – М.: Радио и связь. 2000. 800 с.
5. Акиншин Р. Н. Методы повышения эффективности цифровых систем передачи информации: учебное пособие / Р. Н. Акиншин, Ю. А. Сидоркина, А. Д. Цисарский, А. А. Никифоров // М.: Изд-во ФГУП ЦНИИмаш, 2014. 214 с.

References:

1. Beck G. V. Accelerated algorithm for decoding the Reed-Solomon code with erasure correction. // Questions of radio electronics. ser. TPS 1975. - p.56-62.
2. Akushsky I. Ya., Yuditsky D. I. Machine arithmetic in residual classes – M.: Soviet Radio, 1968. 440 p.
3. Bernard Sklar. Digital communication. Theoretical foundations and practical application. 2nd edition, ispr. // Translated from English. M.: Publishing House "Williams", 2016. 1104 p.
4. Prokis John Digital communication. Translated from English. // Edited by D. D. Klovsky. – M.: Radio and communications. 2000. 800 p.

5. Akinshin R. N. Methods of increasing the efficiency of digital information transmission systems: a textbook / R. N. Akinshin, Yu. A. Sidorkina, A.D. Tsisarsky, A. A. Nikiforov // Moscow: Publishing House of FSUE TsNIIMash, 2014. 214 p.