

УДК 621.397.7

НОВЫЙ КОДЕК НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТОЧНОГО ИТЕРАТИВНОГО АЛГОРИТМА

Атаджанов Ш.Ш.¹, Турсунова А.А.²

¹ Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хорезми, Ташкент, Узбекистан

² Нурафшанский филиал Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хорезми, Нурафшан, Узбекистан
sherka4282@gmail.com, tatuumb@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены основные принципы построения системы помехоустойчивого кодирования и декодирования высокоточных итеративных кодов. Для практической реализации методов и алгоритмов высокоточного итеративного разработан кодек на базе программируемой логической интегральной схемы, который можно применить при кодировании и декодировании по высокоточному итеративному алгоритму блоковых, свёрточных и композиционных кодов в системах цифрового телевидения, цифровой передачи данных и спутниковой связи. Модель позволяет построить вероятностно-энергетические характеристики высокоточных итеративных кодов при различных их кодовых конструкциях, проводит исследование и анализ по определению эффективности и основных свойств данных кодов. Разработан новый метод по композиционному кодированию высокоточных итеративных кодов (композиционный код).

Ключевые слова: код, итерация, цифровой сигнал, последовательность, ошибка, композиционный код, высокоточный код, кодер, декодер.

I. ВВЕДЕНИЕ

Развитие научно-технического прогресса в мире позволило создать совершенно новые комплексные цифровые технологии (КЦТ) в средствах передачи и приема сигналов цифрового телевидения (ЦТВ), включающий в себя системы сжатия и архивирования информации, помехоустойчивого (канального) кодирования и декодирования (ПКД), которые на аппаратно-программном уровне являются базой, создаваемой цифровой телевизионной системы с точки зрения эффективной передачи и приема широкоэмительных сигналов большого объема. Такие системы называются комплексными цифровыми телевизионными системами (КЦТВС). Помехоустойчивость,

надежность и эффективность, в целом, определяется средним уровнем показателей помехоустойчивости, надежности и эффективности отдельных систем, входящих в состав КЦТВС [3].

В настоящее время в области цифрового телевизионного вещания с быстрым темпом развиваются и проникаются во все сферы человеческой деятельности услуги ЦТВ [3]. Оценивая тенденции развития цифровых телевизионных технологий, в которых используются эти системы, можно выделить три существенных обстоятельства. Во-первых, развитие осуществляется за счет быстрого изменения элементной базы (от микроэлектроники к наноэлектронике) путем уменьшения размеров и совершенствования техни-

ческих характеристик. Во-вторых, появляются революционные системные решения, приводящие к появлению новых видов услуг, систем, функциональных решений в ЦТВ. В-третьих, основные математические методы и алгоритмы обработки информации остаются, как правило, неизменными много лет. К таким методам и алгоритмам можно отнести помехоустойчивое (канальное) кодирование (ПКД). На сегодняшний день в ЦТВ одной из проблем является разработка эффективных методов и алгоритмов, рассматривающих задачи ПКД. С помощью таких систем в рамках оптимального алгоритма обработки можно достичь к качественному новому свойству относительно с другими методами кодирования.

II. ВЫСОКОТОЧНЫЕ ИТЕРАТИВНЫЕ ДЕКОДЕРЫ - НОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ БОРЬБЫ С ШУМАМИ

В системах передачи информации на основе цифровых методах наиболее актуальной задачей является предотвращение искажений сигналов, т.е. обеспечение высокой помехоустойчивости. При широкомасштабном переходе к ЦТВ (DVB-T/T2/T4 (DVB-S/S2)) это задача становится ещё более важным [1, 3, 5, 6]. На сегодняшний день на практике применяется относительно большая группа помехоустойчивых кодов: коды Хемминга, коды Боуза-Чоудхури-Хоквингема (БЧХ), коды Рида-Соломона (РС), сверточные коды, каскадные и турбокоды. Коды Хемминга, БЧХ и РС с исправлением ошибок находят применение в каналах ЦТВ. Применяемые в настоящее время системы помехоустойчивого кодирования и декодирования (СПКД), особенно для высокоскоростных каналов и каналов с большим количеством шумов, всё очень сложны на аппаратном

уровне и малоэффективны. В большинстве случаев применяемые методы и алгоритмы помехоустойчивого декодирования цифровых сигналов при группировании или размножении ошибок в каналах дают малую эффективность.

Поэтому, с проведением работ над многопороговым декодером с точки зрения оптимизации обработки информационных и проверочных символов (битов), также расширяя пространство элементной базы и методов синдромного определения ошибок, разработан алгоритм **высокоточного итеративного декодирования (ВИДк)** [6] и действующее на основе этого алгоритма **высокоточный итеративный декодер (ВИД)**. На сегодняшний день с отличительными параметрами от других алгоритмов можно выделить ВИД [1, 3, 6, 7], которые надёжно рекомендуют себя при работе в каналах с большими шумами.

ВИД самоортогональных, сверточных и блочных кодов [1, 4, 5] является развитием простейшего многопорогового декодера (порогового декодера) Мессе и позволяет декодировать очень длинные коды с линейной от длины кода сложностью исполнения. В основе работы ВИД лежит итеративное декодирование, что позволяет вплотную приблизиться к решению оптимального декодера в достаточно широком диапазоне кодовых скоростей и уровней шума в канале.

На рис. 1 показан структура ВИД, учитывающий информационных символов, хранящийся в разностном регистре. При этом ВИД сохраняет простоту и быстродействие обычного многопорогового (порогового) декодера, что делает его очень эффективным и востребованным для применения в существующих и вновь создаваемых высокоскоростных системах цифрового ТВ вещания.

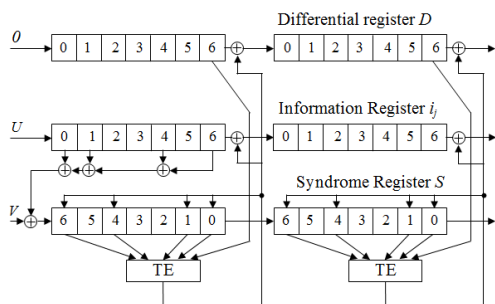


Рис 1. Высокоточный итеративный декодер сверточного СОК с $r=1/2, d_{min}=5$ и $n_a=13$ для двух итераций декодирования.

ВИД может применяться для декодирования высокоточных итеративных сверточных и блочных кодов (ВИСК и ВИБК), также сверточных СОК. При этом, как и в структуре МПД, ВИД будет состоять из нескольких последовательно связанных блоков декодирования. Представленный на рис.1 ВИД ВИСК содержит всего две итерации декодирования. Но он легко может быть преобразован в ВИД с большим количеством итераций простым добавлением еще нескольких блоков декодирования, структурная схема которых полностью совпадает со вторым блоком декодирования [3].

ВИД обладает следующими характеристиками:

- сохраняет простоту и быстрдействие повторного и многопорогового (порогового) декодера;
- сложность реализации линейно зависит от длины кода;
- решение стремится к решению оптимального декодера.

Несмотря на то, что не все устройства смогут декодировать очень длинных кодов с линейной сложностью, высокоточные итеративные декодеры позволяют почти оптимально декодировать таких кодов даже практической реализации от длины кода.

III. РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ВИКД НА БАЗЕ ПЛИС КФ1174ПП1

На основе данных алгоритмов, представленных в блок-схемах отдельных модулей построена система помехоустойчивого кодирования и декодирования высокоточных итеративных кодов (СПКДВИК).

На рис. 2 представлена функциональная схема взаимодействия отдельных модулей построенной системы ПКДВИК.

Основными являются модули композиционного кодера и декодера ВИК, осуществляющие непосредственное преобразование сигнала и состоящие из кодеров и декодеров высокоточных итеративных кодов ВИБК и ВИСК. На основе алгоритма согласования скорости кодирования построены модули перфорации и деперфорации кода. Модель позволяет формировать входную информационную последовательность, ошибки в имитированном канале связи, а также проводить сравнение исходной и полученной на выходе декодера последовательности.

На элементной базе микроконтроллера КФ1174ПП1 построен вариант кодирующей и декодирующей части СПКДВИК, в котором обрабатываются ВИК. На рис.3 а и б приведена структурная схема кодера и декодера ВИК. ПЛИС высокоточный итеративный кодек на элементной базе КФ1174ПП1 предназначена для высокоточного итеративного кодирования передаваемых данных и итеративного декодирования ВИК по усовершенствованному алгоритму Чейза и Витерби в системах цифрового наземного (DVB-T/T2/T4), спутникового (DVB-S/S2, -SH), кабельного (DVB-C/C2, -IPDC) и мобильного (DVB-H) ТВ вещания. В системах циф-

ровой спутниковой связи можно принимать сигналы от таких спутниковых систем, как Inmarsat, Intelsat, Eutelsat, Hot Bird, Turksat, Astra, Ямал, Экспресс и др.

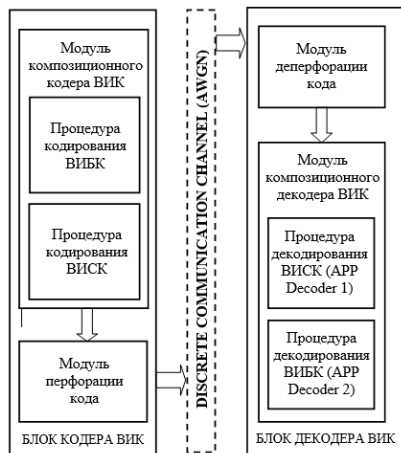


Рис 2. Модель системы СПКДВИК

3.1. Функциональная схема кодека

В системе кодер (рис. 3, а) состоит из мультиплексора 1, который преобразует параллельные потоки видео, аудио и дополнительных данных в цифровую последовательность с длиной 188 байт (дополнительно 16 байт для проверочных символов 188 байт + 16 байт = 204 байт), скремблера и относительного кодера ИБК 2, которое придают неразборчивость цифровому потоку и осуществляется первая ступень высокоточного итеративного кодирования (ВИКд) ВИБК, итеративного кодера 3, в который производится второй ступень ВИКд композиционного кода ВИСК перед ее поступлением в перемежитель и формирователь выхода 5.

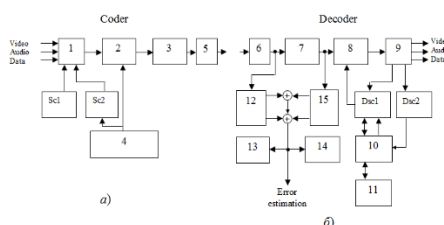


Рис 3. Структурная схема кодера (а) и декодера (б) ВИК на базе ПЛИС

Управление скремблером осуществляется с помощью специальных кодовых комбинаций, называемых управляющими словами (УС), вырабатываемых специальным контроллером управляющего слова 4. Управляющие слова участвуют также в формировании сообщений, управляющих правом доступа (УПД). Шифраторы Ш1 и Ш2 служат для параллельного шифрования, предотвращающее несанкционированный приём ТВ программ (выработки сообщений предоставляющих право доступа (ППД) и УПД), а также для защиты условных ключей, передаваемых вместе со скремблированным сигналом для работы дескремблера.

Декодер (рис. 3, б) состоит из входного преобразователя и демультиплектора 6, принимающего из канала связи цифровую последовательность, высокоточного итеративного декодера (ВИД) ВИСК 7 (осуществляет первый ступень ВИДк), дескремблера и относительного ВИД ВИБК 8 (осуществляет второй ступень ВИДк), демультиплексора 9, микропроцессора 10, сравнивающим устройством 11, дешифраторов ДШ1 и ДШ2, линии задержки 12, блока синхронизации 13, блока оценки качества канала 14 и вспомогательного кодера 15. ВИД ВИСК 7 и ВИД ВИБК 8 могут работать в 2-х режимах (методах): 1. Режим блочного кодирования и декодирования блоковых и итеративных кодов (БКДВИК); 2. Режим алгебраического кодирования и декодирования блоковых и итеративных кодов (АКДВИК).

Демультиплексор 9 приемника выделяет из проходящего цифрового потока сообщения УПД и ППД и направляет содержащуюся в них информацию абонентской карточке. Здесь с помощью сравнивающим устройством 11 происходит сверка запрошенной або-

нением программы с имеющимся правам доступа. Если текущая дата, содержащаяся в УПД, укладывается в период оплаченной подписки, а номер программы или группы программ (класса), для которых прием разрешен, совпадает с номером запрошенной программы или включает его в своей перечень, микропроцессор 10 дает команду дешифровать в ДШ1 и ДШ2 управляющее слово и вернуть его дескремблеру и декодеру ВИБК 8, который и дескремблирует нужный поток. Сообщение УПД обеспечивает выделение в декодере УС, которое с помощью блока синхронизации 13 и линии задержки 12 синхронизирует дескремблер и дает ключ доступа в закрытый контент. Но операция дескремблирования возможна только после приёма сообщений ППД.

На вход вспомогательного кодера 15 поступает цифровой поток с выхода ВИД ВИСК 7, в котором со сигналами на выходе линии задержки 12 вместе складываются в сумматоры по модулю 2. Блок оценки качества канала 14 служит для предварительного анализа качества принятого цифрового потока, также визуальной снимки вероятностно-энергетических характеристик контента.

3.2. Принцип работы кодека

Последовательный цифровой поток от мультиплексора 1 поступает на вход относительного кодера ВИБК 2, в котором в соответствии с выбранным порождающим полиномом $g(X) = g_0 + g_1X + \dots + g_2X^2 + \dots + g_{2t-1}X^{2t-1} + X^{2t}$ производится кодирование информации самоортгональным ИБК на основе итеративного алгоритма (первый ступень итеративного кодирования). В процессе кодирования из информационных символов формируются кодовые символы $(n, k) = (2^m - 1, 2^m - 1 - 2t)$, где t –

количество ошибочных битов в символе, который может исправить итеративный блочный код. После этого формируется частное и остаток от деления $X^{n-k}m(X) = q(X)g(X) + p(X)$, здесь остаток от деления равно $p(X) = X^{n-k}m(X) \bmod g(X)$. После этого получается основной результирующий полином $U(X) = p(X) + X^{n-k}m(X)$ и эта информация передаётся к итеративному кодеру ВИСК 3. Здесь устанавливается конструктивные параметры итеративного кода: конструктивная длина K , которая равно длине самого длинного регистра сдвига, скорость кода $r = k_0/n_0$, где k_0 – набор входных символов, n_0 – определенный набор выходных символов, корректирующая способность кода, исправляющее t ошибок, длина кодового ограничения $n_A = (m+1)n_0$, где m – наивысшая степень порождающих полиномов (число проверочных символов, $m = n - k = 2t$). На выходе итеративного кодера ВИСК 3 формируется информационные символы $n_0 = a_1b_1a_2b_2a_3b_3 \dots a_kb_ka_{k+1}b_{k+1} \dots$, которые проверочные символы формируются по правилу $b_i = a_{k-s} + a_{k+s+1} \pmod{2}$, где s – шаг кода ($s = 0, 1, 2, \dots$). На данной длине кодового ограничения n_A итеративный код гарантированно исправляет одиночные и двойные ошибки. Сформированные кодовые символы с выхода итеративного кодера ВИСК 3 поступают на вход перемежителя и формирователя 5, в котором производится распределение кодовой последовательности на $I = n_A$ параллельных ветвей и записывания символов в регистры сдвиг. Символы первой ветви перемежителя передаются без задержки. Кодовые символы остальных $(I - 1)$ параллельных ветвей передаются с задержкой соответственно $\beta, 2\beta, \dots, (I - 1)\beta$ тактов. В результате перемежения каждые два входных символа на

выходе перемежителя отстоят друг от друга на n_A символов. Следовательно, плотный пакет ошибок кратностью $t_n=n_A$ после деперемежания распределяется в одиночные ошибки на длине каждой n_A . Одновременно в формирователь, состоящий из I параллельных n_A -разрядных регистров сдвига, записывается $N=I \cdot \beta \cdot n_A=n_A^2$ кодовых символов, из которых формируется n_A символов проверочной последовательности.

В первый регистр сдвига формирователя записываются первые символы всех кодовых ограничений n_A . Во второй регистр сдвига формирователя записываются вторые символы всех кодовых ограничений n_A и т.д. При этом первый b_1 символ проверочной последовательности представляет собой сумму по модулю два первых символов всех I кодовых ограничений n_A . Второй b_2 символ проверочной последовательности представляет собой сумму по модулю два вторых символов всех I кодовых ограничений n_A и т.д.

На приемной стороне кодовая последовательность поступает на информационный вход преобразователя и деперемежителя 6, в котором производится преобразование кодовой последовательности из последовательного кода в параллельный код, т.е. входная кодовая последовательность распределяется на I параллельных подпотоков, также символы информационных подпотоков одновременно поступают на входы соответствующих регистров сдвига деперемежителя. В результате деперемежания плотные пакеты ошибок преобразуются в одиночные ошибки кратностью $t_n=n_A$ из-за распределения информации на длине каждой n_A . Согласование по фазе и другим параметрам выходных информационных

подпотоков преобразователя и деперемежителя 6 с выходными информационными подпотоками ВИД ВИСК 7, дескремблера и относительного ВИД ВИБК 8 и демультимплексора 9 осуществляется блоком синхронизации 13.

С выходов преобразователя и деперемежителя 6, кодовые символы поступают на вход ВИД ВИСК 7. Производится формирование синдрома $S_i=b_i+b_i'$ (mod 2) путем анализа значений проверочных символов, обнаружение и исправление ошибок в пределах корректирующей способности итеративного кода и передача информации в дескремблер и относительного ВИД ВИБК 8. Если в канале связи пакеты ошибок не превышают кратности $t_n=n_A$ и защитный промежуток между пакетами равен $t_3=N-t_n$, то после деперемежания на вход относительного ВИД ВИБК будут поступать кодовые комбинации из n_A символов, содержащие по одной ошибке, т.е. не превышающие корректирующей способности выбранного итеративного кода. В относительном ВИД ВИБК осуществляется высокоточное итеративное декодирование кодов ВИБК на основе метода алгебраического кодирования и декодирования блоковых и итеративных кодов (АКДБИК). Информационная последовательность, которая поступает из ВИД ВИСК 7, представляется полиномом переданного кодового слова и полиномом модели ошибки:

$$r(X) = U(X) + e(X) \quad (1)$$

При этом вычисляется синдром ошибки:

$$S_i = r(X) \Big|_{X=\alpha^i} = r(\alpha^i) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} S_1 &= r(\alpha) = e_{j_1} \beta_1 + e_{j_2} \beta_2 + \dots, \\ S_2 &= r(\alpha^2) = e_{j_1} \beta_1^2 + e_{j_2} \beta_2^2 + \dots, \\ S_{2^t} &= r(\alpha^{2^t}) = e_{j_1} \beta_1^{2^t} + e_{j_2} \beta_2^{2^t} + \dots \end{aligned} \quad (3)$$

Если $S_i = 0$, то нет ошибок, в противном случае ($S_i \neq 0$), присутствует ошибка, для определения позиции и значение этих ошибок, осуществляются необходимые вычисления. Вычисляется корни полинома:

$$r(X) = a^4 + a^2 X + a^4 X^2 + a^0 X^3 + a^4 X^4 + a^3 X^5 + a^5 X^6 \quad (4)$$

и отсюда получается полином ошибки:

$$e(X) = e_{j_1} X^{j_1} + e_{j_2} X^{j_2} + \dots + e_{j_v} X^{j_v}, \quad (5)$$

где v – число ошибок. После этого вычисляется локатор ошибки:

$$\begin{aligned} \sigma(X) &= (1 + \beta_1 X)(1 + \beta_2 X) \dots (1 + \beta_i X) = \\ &= 1 + \sigma_1 X + \sigma_2 X^2 + \dots + \sigma_v X^v, \end{aligned} \quad (6)$$

если $\sigma(X) = 0$, то все корни полинома будут $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_i = 0$, если $\sigma(X) \neq 0$, то локаторы снова вычисляются. Наконец, определяется полином ошибки:

$$\hat{e}(X) = e_1 X^{j_1} + e_2 X^{j_2} = a^2 X^3 + a^3 X^4 \quad (7)$$

и восстанавливается полином, где

$$\hat{U}(X) = r(X) + \hat{e}(X) = U(X) + e(X) + \hat{e}(X) \quad (8)$$

и отсюда получается искомая выходная последовательность $U(X)$.

IV. НОВЫЙ МЕТОД КОМПОЗИЦИОННОГО КОДИРОВАНИЯ И ДЕКОДИРОВАНИЯ ВИК

В цифровом телевидении при ПКД корректирующие коды, исходя из свойств канала и вида модуляций, применяются как в отдельном (в таких схемах в качестве помехоустойчивых кодов используется только блоковые коды или сверточные коды) так и в совместном виде, которые блоковые и сверточные коды образуют как единого

двухмерного кода. Например, в каскадных схемах ПКД используются двухмерные коды на основе внешнего и внутреннего кодирования и декодирования. В качестве внешнего кода используется блочный код Рида-Соломона, а внутреннего – сверточный. Данный подход позволил существенно улучшить помехоустойчивых показателей и ВЭХ применения кодирования по сравнению с базовыми некаскадными методами. Но при работе в высокоскоростных каналах с большими шумами из-за сильного группирования, т.е. размножения ошибок и неспособности в таких условиях своевременного точного определения ошибки в кодовой последовательности пороговым декодером снижается эффективность применения таких схем кодирования с коррекцией ошибок. Поэтому есть необходимость **пересматривать методы и алгоритмы ПКД**, использующие в едином составе одновременно двух видов корректирующих кодов для усовершенствования методов декодирования и повышения эффективности применения двухмерных кодов.

Новый композиционный ВИК и композиционное кодирование (ВИК д кодов ВИБК и ВИСК). Композиционного ВИК можно представить так, как изображено на рис. 4, его структуру можно описать как массив данных, состоящий из k_1 строк и k_2 столбцов. В k_1 строках содержатся кодовые слова, образованные k_2 битами данных и $n_2 - k_2$ битами четности. Каждая из k_1 строк представляет собой кодовое слово кода (n_2, k_2) . Аналогично k_2 столбцов содержат кодовые слова, образованные из k_1 бит данных $n_1 - k_1$ бит четности. Таким образом, каждый из k_2 столбцов представляет собой кодовые слова кода (n_1, k_1) . Различные участки структуры обозначены следующим образом: d – для

данных, p_h – для горизонтальной четности (вдоль строк), и p_v – для вертикальной четности (вдоль столбцов). Каждый блок битов данных размером $k_1 \times k_2$ кодирован двумя кодами – горизонтальным и вертикальным.

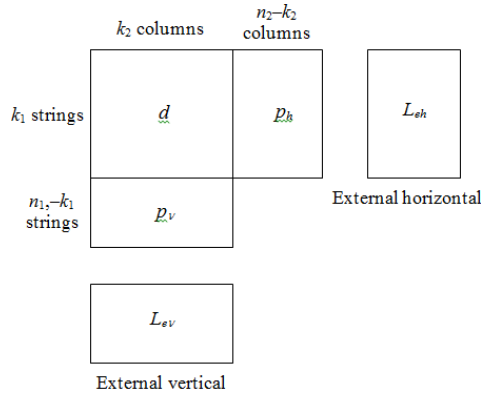


Рис 4. Структура композиционного ВИК

Здесь присутствуют и блоки L_{eh} и L_{ev} , содержащие значения внешних LLR (log-likelihood ratio), полученные из горизонтального и вертикального кодов. При этом высокоточный итеративный код ВИБК или ВИСК с коррекцией ошибок дает некоторое улучшение достоверности при приёме цифровых сигналов. Применение внешние LLR представляют собой меру этого улучшения. Такой композиционный ВИК является усовершенствованным примером каскадного и турбо кода.

Решение при финальном декодировании каждого бита и его надежности зависит от значения $L(\hat{d})$, на основе формулы:

$$L(\hat{d}) = L_C(x) + L(d) + L_e(\hat{d}). \quad (9)$$

Здесь $L_C(x)$ – значения канальных измерений составляющего LLR в приемнике; $L(d)$ – априорные значения LLR; $L_e(\hat{d})$ – внешний LLR при декодировании.

Опираясь на это уравнение, можно описать новый алгоритм, дающий внешние LLR (горизонтальное и вертикальное) и финальное $L(\hat{d})$.

Алгоритм такого итеративного декодирования для композиционного ВИК будет иметь следующий вид:

1. Устанавливается априорное LLR $L(\hat{d})=0$ (если априорные вероятности битов данных не равны).

2. Декодируется горизонтальный код и, основываясь на уравнении (9), вычисляется горизонтальное LLR:

$$L_{eh}(\hat{d}) = L(\hat{d}) - L_C(x) - L(d) \quad (10)$$

3. Для этапа 4 вертикального декодирования устанавливается $L(\hat{d}) = L_{eh}(\hat{d})$.

4. Декодируется вертикальный код и вычисляется вертикальное LLR:

$$L_{ev}(\hat{d}) = L(\hat{d}) - L_C(x) - L(d) \quad (11)$$

5. Для этапа 2 горизонтального декодирования устанавливается $L(\hat{d}) = L_{ev}(\hat{d})$.

6. После достаточного для получения надежного решения количества итераций (т.е. повторения этапов 2–5) следует перейти к этапу 7.

7. Мягким решением на выходе будет

$$L_{ev}(\hat{d}) = L_C(x) + L_{eh}(\hat{d}) - L_{ev}(\hat{d}) \quad (12)$$

ВИК является усовершенствованным видом обычного каскадного и турбо кода, который при формировании оценки информационных бит, учитывает незаметности ошибок во время горизонтального и вертикального контроля четности битов в декодере [1, 3]. В работах [1, 3, 4-8], в качестве нового вида помехоустойчивых кодов определены основные свойства ВИК, включающее в себя ВИБК и ВИСК.

V. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основе работы ПЛИС высокоточного итеративного кодера лежит модифицированный алгоритм многопорогового декодирования, который при формировании оценки информационных бит, учитывает незаметности ошибок во время горизонтального и вертикального контроля четности битов в декодере. Для этого в конструкции декодера расширено пространство элементной базы для синдромного определения ошибок [1, 3].

На рис. 5а и рис. 5б приведены характеристики многопорогового декодера (МПД) и ВИД в канале с АБГШ для коротких и длинных кодов.

При получении данных графиков использовалось от 5 до 15 итераций декодирования. На рис.5а отражены результаты моделирования коротких кодов с $d=9$ и длинных кодов. Из характеристики МПД (а) видно, что данный декодер эффективно справляется своей задачей в пределах помехоустойчивости $10^0 \div 10^{-7}$. В случаях, которым от системы декодирования требуются обеспечение высокий уровень помехоустойчивости, т.е. $P_b > 10^{-7}$, этот декодер малоэффективен. Это проблема решено с помощью алгоритма высокоточного итеративного декодирования (ВИДк). Алгоритм ВИДк разработан с учетом обнаружения и исправления не только случайных ошибок, но и системных ошибок, связанные с конструктивными характеристиками используемых кодов [1, 4, 6]. На рис. 5б представлены результаты моделирования ВИК, состоящего из кодов ВИБК ($n=255, k=123, d_{min}=33$), $q=256, R=1/2$ и ВИСК $R=1/2, K=9, d_{free}=15$. Данный график отражает зависимость оценок P_b для ВИК, кода Хемминга (КХ) и

сверточного кода (СК) от отношения сигнал-шум E_b/N_0 на информационный бит. При таком конструкциях ВИК можно достичь к хорошим результатам и обеспечивать высокую помехоустойчивость принимаемых сигналов, т.е. помехоустойчивость на уровне 10^{-12} достигается при значении $E_b/N_0=3,6$ дБ.

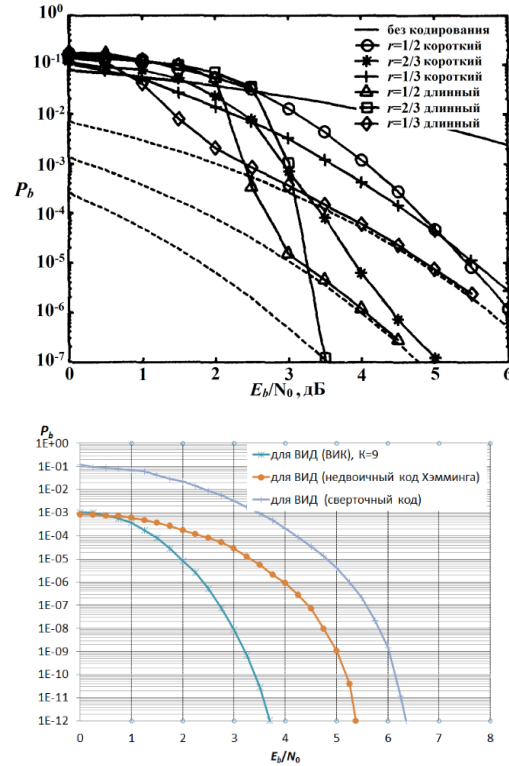


Рис 5. Вероятностно-энергетические характеристики МПД и ВИД в канале с АБГШ

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование систем цифрового телевидения, сегодня является как инновационный подход к решению задач по оптимизации телекоммуникационный процесс, который обеспечивает специалистов возможностью ознакомиться с технологией работы программного комплекса, предназначенного для моделирования существующих и вновь создаваемых цифровых телевизионных, спутниковых и иных каналов связи.

Применение высокоточного итеративного кодека на базе ПЛИС, построенного на основе данного алгоритма в качестве цифровых модулей, позволяет сократить временной цикл разработки устройств, исключает необходимость изготовления инженерных образцов, тем самым снижая затраты на проектирование. Изменение и перепроектирование структуры ПЛИС также несет в себе меньшие затраты, чем моделей СБИС.

Композиционные ВИК, составляющими кодами которым являются ВИБК и ВИСК начали широко применять в цифровом телевидении, которое канал связи этого вещания входят в группу каналов с большими шумами и замираниями. Из-за образования блоковых и сверточных кодов как единого двухмерного кода с общими параметрами, помехоустойчивость системы повышается в разы, т.е. в умножающем порядке эффективности каждого отдельного кода.

По сравнению с алгоритмами МПД, алгоритмы высокоточного итеративного декодирования обладают преимуществом еще и по энергетическому выигрышу. Так как, результаты сравнения ВЭХ, приведенные на рис. 5а и 5б, показывают, что при обеспечении помехоустойчивости на уровне 10^{-7} , алгоритмы ВИД, применяемые в кодеке имеют энергетический выигрыш, значение которого составляют в пределах 0,8–3 дБ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Atadjanov Sh.Sh.*, New method of increasing the efficiency of signal reception based on high-precision iterative decoding algorithms.

Collection of materials 2019 Sixteenth International Conference on Wireless and Optical Communication Networks (WOCN). Bhopal, India 19-21 december, year 2019. p.1-6.

- [2] *Atadjanov Sh.Sh., Radjapov T.D., Rakhimov B.N.* Development of criteria for determining the probability of error in digital television. Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, Vienna, № 1-2, 2018, January-February, P. 37-45.
- [3] *Atadjanov Sh.Sh.*, Development of option for implementation of a high-purpose iterative coding and decoding device. Collection of Republican Scientific Papers scientific and practical online conference "The Role and Importance of Innovative Technologies in the Digitalization of Social Spheres". Karshi, April 29-30, 2020, pp. 414-417.
- [4] *A.A.Abduaizov, Sh.Sh.Atadjanov.* Virtual stand for the study of channel codecs in digital information transmission systems. International Conference Innovation – 2009.October 23-24, 2009 Tashkent, Uzbekistan.
- [5] *Atadjanov Sh.Sh., Tursunova A.A.* Improving noise immunity using high-precision iterative codes. Collected works of the republican scientific and technical conference "Investigators of Muhammad al-Khwarizmi". April 27-28, 2018, Urgench, Uzbekistan. - P. 178-186.
- [6] *Atadjanov Sh.Sh. and others.* Simulation and analysis of high-precision iterative code with increased efficiency. International Scientific Journal Theoretical & Applied Science. Philadelphia, USA. Year

- 2019, Issue 04, Volume 72. 30.04.2019. pp. 421-429.
- [7] *Atadjanov Sh.Sh. and others.* Development of high-speed iterative code and its efficiency at digital signal transfer. Collection of materials of the XIV International Scientific and Technical Conference "Actual Problems of Electronic Instrument Engineering", Novosibirsk, Russia, October 2-6, 2018, pp. 13-19.
- [8] *Atadjanov Sh.Sh., Tursunova A.* Research and analysis of the effectiveness of error-correcting codes. Collection of materials International conference on importance of information-communication technologies in innovative development of sectors of economy, Dedicated to the 1235th Anniversary of Muhammad al-Khwarizmi. April 5-6, 2018, Tashkent, pp. 674-680.
- [9] *Lindsey W.C. and Simon M. K.* Telecommunication Systems Engineering. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N. J., 1973.
- [10] *Bahl L.R., Cocke J., Jelinek F., Raviv J.* Optimal Decoding of Linear Codes for Minimizing Symbol Error Rate // IEEE Trans. Inf. Theory. – 1974. – March. – Vol. 20. – P. 284-287.
- [11] *Robertson P., Villebrun E., Höher P.* A Comparison of Optimal and Sub-Optimal MAP Decoding Algorithms Operating in the Log Domain // in Proc. of the Intern. Conf. On Commun. (Seattle, US). – 1995. – June. – P. 1009-1013.
- [12] *Erfanian J., Pasupathy S., Gulag G.* Reduced complexity symbol detectors with parallel structures for ISI channels // IEEE Trans. On Commun. – 1994. – Vol. 42. – P. 1661-1671.
- [13] *Koch W., Baier A.* Optimum and sub-Optimum detection of coded data disturbed by time-varying intersymbol interference // IEEE Globecom. – 1990. – December. – P. 79-1684.
- [14] *Hagenauer J., Hoehner P.* A Viterby algorithm with soft-decision outputs and its applications // in IEEE Globecom. – 1989. – P. 1680-1686.
- [15] *Atadjanov Sh.Sh., Tursunova A.* Development of error-correcting codes based on an iterative encoding and decoding algorithm // Scientific-practical and informational-analytical journal "Muhammad al-Khorazmiy avlodlari", No. 2 (2) 2017, pp. 46-56.

Поступила в редакцию 29.03.2023

Цитирование: *Атаджанов Ш.Ш., Турсунова А.А.* (2023). Новый кодек на основе высокоточного итеративного алгоритма. *Международный Журнал Теоретических и Прикладных Вопросов Цифровых Технологий*, 2(4), –С. 7-18.

NEW CODEC BASED ON HIGH-PRECISION ITERATIVE ALGORITHM

Atadjanov Sh.Sh.¹, Tursunova A.A.²

¹Tashkent University of information technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Tashkent, Uzbekistan

¹Nurafshan branch of Tashkent University of information technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Nurafshan, Uzbekistan
sherka4282@gmail.com, tatuumb@mail.ru

Abstract. *The article considers the basic principles of constructing a system of error-correcting coding and decoding of high-precision iterative codes. For the practical implementation of methods and algorithms of high-precision iterative, a codec based on a programmable logic integrated circuit has been developed, which can be used for coding and high-precision iterative decoding block, convolutional and compositional codes in digital television systems, digital data transmission and satellite communications. The model makes it possible to construct the probabilistic-energy characteristics of high-precision iterative codes with their various code constructions, conducts research and analysis to determine the efficiency and basic properties of these codes. A new method for compositional coding of high-precision iterative codes (compositional code) has been developed.*

Keywords: *code, iteration, digital signal, sequence, error, compositional code, high-precision code, encoder, decoder.*