

УДК 621.391.037

Н.А. Пчелин

СИНТЕЗ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ ОБМЕНА ДАННЫМИ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ

Пчелин Никита Александрович, окончил Ульяновское высшее военное командное училище связи. Главный конструктор ФНПЦ АО «НПО «Марс». Имеет статьи в области помехоустойчивого кодирования. [e-mail: pna3@yandex.ru].

Аннотация

Возрастающие требования к управлению элементами интегрированных информационно-управляющих комплексов диктуют необходимость применения разнородных по организации протоколов обмена и длительности циклов управления, в связи с чем для защиты информации реального времени от ошибок в подобных системах целесообразно использовать набор отличающихся по избыточности помехоустойчивых кодов, обрабатываемых на единой аппаратной платформе. Для реализации подобной концепции рационально использовать короткие блоковые коды, которые уместны при передаче малых по объему данных и которые могут быть легко трансформированы для защиты больших объемов данных с использованием технологии каскадного кодирования. Уменьшение длины кодовых последовательностей при заданных требованиях по достоверности данных приводит к необходимости гибкого синтеза сведений о сигналах, получаемых из непрерывного канала связи, и мягких итеративных алгоритмов обработки выбранных избыточных кодов. В полной мере заданным требованиям отвечают конструкции, созданные на основе адаптивных систем.

Ключевые слова: кодирование, адаптация, синтез, канал связи.

SYNTHESIS OF ADAPTIVE SYSTEMS FOR DATA EXCHANGE IN INTEGRATED INFORMATION CONTROL COMPLEXES

Nikita Aleksandrovich Pchelin, graduated from Ulyanovsk High Education Military Communications Academy; Chief Designer at FRPC JSC 'RPA 'Mars'; an author of articles in the field of noiseless coding. e-mail: pna3@yandex.ru.

Abstract

The increasing requirements to elements control in integrated information control complexes lead to the necessity of using data communications protocols that are different in organization and control cycles duration. Due to this fact, it is reasonable to use the set of redundant-different noiseless codes processed on the single hardware platform in the context of real-time information security. In order to realize such a concept, it is efficient to use short block codes relevant for transmitting small data that could be transformed for big data security with the use of cascade coding technology. Shortening code sequences at specified requirements in data adequacy leads to the need of the flexible synthesis of signals data received from a continuous communications channel and soft iterative algorithms for selected redundant codes processing. Constructions on the basis of adaptive systems meet the requirements in full extent.

Key words: coding, adaptation, synthesis, communication channel.

ВВЕДЕНИЕ

Процесс интеграции независимых информационно-управляющих комплексов (ИУК), создаваемых для решения конкретных задач, может быть успешным только на основе консолидированной унификации программно-аппаратной платформы, составляющей множество разнородных элементов подобной системы. Наряду с передачей больших объемов данных объективно возрастающие требования к оперативности управления современных и перспективных ИУК диктуют необходимость применения коротких циклов управления (ЦУ), например, в ходе за-

вершающей стадии высокоточных процессов или реализации кратких команд гиперзвуковых технологий. Для защиты информации реального времени от ошибок в подобных системах целесообразно использовать короткие помехоустойчивые коды, которые с учетом специфики ИУК оказываются универсальными по сравнению с их длинными аналогами. Такие коды обеспечивают относительно оперативное переключение режимов параметрической адаптации системы защиты от ошибок в каналах связи ИУК. В случае возникновения потребности обмена мультимедийными данными больших объемов короткие коды за счет структурной адаптации коде-

ков трансформируются в каскадные конструкции [1, 2]. В статье рассматриваются необходимость синтеза телекоммуникационных систем, используемых в составе ИУК, и возможность применения для этого двоичных кодов.

ЗАДАЧА СИНТЕЗА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СОСТАВЕ ИУК

Уменьшение длины кодовых последовательностей при заданных требованиях по достоверности данных, циркулирующих в ИУК, приводит к необходимости гибкого синтеза сведений о сигналах, получаемых из непрерывного канала связи, и мягких эффективных алгоритмов обработки используемых в системе связи ИУК избыточных кодов [1]. Поэтому телекоммуникационные технологии играют решающую роль в способах организации и структуре построения существующих и проектируемых мобильных ИУК или специализированных систем управления (СУ), призванных осуществлять сбор заданного набора сведений об управляемых объектах и, в соответствии с целевой функцией $F\{V, U, T, P\}$, выполнять управление такими объектами. В СУ множество объектов V считается заданным априори, в то время как множество условий функционирования U может изменяться и оказывать стохастическое влияние на достижение $F\{\bullet\}$ в актуальные интервалы времени T и с заданной достоверностью P информации, циркулирующей в СУ [1, 2]. Как правило, границы существования параметра T СУ определяются длительностью цикла управления $T_{ц\gamma}$, выполнение которого является показателем эффективности (ПЭ) достижения $F\{\bullet\}$. В условиях действия интенсивных мешающих факторов снижение параметра $T_{ц\gamma}$ может быть достигнуто только за счет применения интегрированных СУ и ИУК на основе материального носителя в виде системы связи, способной передавать не только короткие сигналы управления, но и большие объемы мультимедийных данных, например, при взаимодействии двух и более радиолокационных станций в общей зоне обзора при воздействии стационарных активных шумовых помех [3].

Наличие прямого и обратного каналов связи в классической СУ требует выполнения обязательного условия $k_{оз}(T_{нк} + T_{ок}) \ll T_{ц\gamma}$, где $k_{оз} > 0$ – коэффициент, определяющий общую задержку данных при их обработке в кодеке. В простейшем случае $k_{оз}$ означает число повторов данных при использовании алгоритмических методов повышения достоверности, при этом $T_{нк}$ и $T_{ок}$ представляют время нахождения управляющей информации в прямом и обратном каналах связи соответственно. Время $\Delta = T_{ц\gamma} - T_{cc}$, где $T_{cc} = k_{оз}(T_{нк} + T_{ок})$, в СУ тратится на обработку данных и принятие решения как в управляемом, так и в управляющем объекте, при этом часто $\Delta \gg 0$ [4]. Указанные соотношения могут кратно увеличиваться в ходе сбора и обработки информации в иерархических ИУК. С учетом неравенства $T_{cc} \ll T_{ц\gamma}$ в $F\{\bullet\}$ при заданных V и U актуальным становится параметр P , поскольку в ИУК к обработке могут быть приняты только достоверные данные.

В ходе разработки телекоммуникационной системы (ТКС) приходится учитывать большое количество различных факторов, которые в той или иной степени могут влиять на эффективность ее функционирования в реальных условиях. Естественно, на этапе проектирования, как правило, отсутствуют полные сведения о месте применения, назначении системы связи и возможности влияния на процесс ее функционирования внешней среды. Для достижения гарантируемых значений показателей эффективности системы связи и ИУК в целом с учетом современных технологических возможностей и высокочастотных деструктивных воздействий на нее со стороны возможных игроков неизвестные компоненты условий их функционирования целесообразно наделить антагонистическими (конфликтными) свойствами.

В работе [5] показано, что с точки зрения общего подхода к синтезу ТКС множество условий функционирования системы U целесообразно рассматривать как совокупность двух подмножеств: подмножества $U_{он} \in U$, в котором условия функционирования системы определены априори, и подмножества $U_{но} \in U$, для которого условия его реализации до реального применения системы остаются неизвестными. Условия из состава множества $U_{но}$ с высокой вероятностью возникают в ТКС, предназначенных для использования в игровых ситуациях с антагонистическими интересами, в ходе проявления аномальных явлений и возникновения аварийных ситуаций. Подмножество $U_{но}$ распространяется на решение задач защиты цифровых данных от влияния на них мешающих факторов при передаче данных по каналам с помехами. Это определяется высокой априорной неопределенностью канала связи как элемента любой ТКС, особенно систем с применением радиointерфейса [5].

При создании системы в условиях неопределенности полагается неполное знание условий функционирования проектируемой системы. Фактически в этом случае определяется целый класс сред, например множество $U_{но'}$, в которых может применяться система. При этом для формулировки математически корректной задачи так или иначе используются дополнительные сведения об условиях применения системы, содержание которых и порождает различные подходы к ее синтезу [5].

Важным свойством класса условий $U_{но'}$, приводящих к специфическим задачам синтеза систем, является их конфликтность. Конфликтность условий функционирования ТКС накладывает существенный отпечаток на принципы постановки и решения задач синтеза подобных систем. Синтезируемый для функционирования в конфликтных условиях элемент ТКС должен обладать свойством устойчивости не к какому-либо заданному типу внешних воздействий, а к целому классу. Подразумевается, что воздействие выбирается оптимальным (по крайней мере оптимизированным) из класса, ограниченного совокупностью энергетических, технических, экономических и интеллектуальных ресурсов противодействующей системы [2]. Сущность конфликтной среды заключается

в том, что конкретизация элемента $U_{no} \in U$ для данной системы \hat{V} может осуществляться за счет влияния природных стохастических факторов или противной стороны (противника), целью которой является решение противоположной задачи, например, оптимизированным в энергетическом смысле влиянием на ТКС с целью минимизации значения показателя эффективности (ПЭ) $F\{\bullet\}$ вплоть до фатального срыва функционирования ИУК [1, 5].

Далее рассмотрим возможность реализации гибкого синтеза сведений о сигналах, получаемых из непрерывного канала связи, и мягких итеративных алгоритмов обработки выбранных избыточных кодов с применением недвоичных кодов.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕДВОИЧНЫХ КОДОВ В СОВРЕМЕННЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Принципиально любые классы кодов могут быть представлены как недвоичные структуры. Среди них наибольшее распространение нашли коды Рида-Соломона (РС), которые при любой конфигурации значений длины кодового блока данных n_{pc} и выбранном числе информационных символов k_{pc} однозначно являются максимально декодируемыми [6]. Именно эта особенность кодов РС делает их привлекательными для реализации схем каскадного кодирования, поскольку при постоянном значении n_{pc} допустимы любые изменения k_{pc} , что крайне важно для гибкого решения проблем синхронизации адаптивных кодеков по параметрам порождающих полиномов [6].

В условиях деградации параметров непрерывного канала связи использование коротких кодовых комбинаций недвоичного кода для передачи коротких команд управления, характерных для ИУК, является предпочтительным. Поэтому переход на полусловную систему формирования информационных разрядов в таких системах обеспечивает заметный энергетический выигрыш даже в системе с жестким декодированием внутреннего кода системы каскадного кодирования [7]. Более того, рассмотренная конструкция кодека позволяет в полной мере реализовать возможности лексикографического разбиения пространства комбинаций недвоичного кода РС. Если код РС рассматривается над полем $FG(2^{k_1})$, то при $\varphi = k_2 = 1$ единственный кластер содержит 2^{k_1} комбинаций. Подобная система не имеет смысла. При $k_2 = k_1 = 3$ и $\langle \varphi \rangle = 2$ всего разрешенных кодовых комбинаций в коде РС будет $N = 2^{k_1 \times k_2} = 2^9$, а базовый кластер в такой конструкции включает в себя всего 2^3 комбинаций. Следовательно, объем обрабатываемой информации

в декодере снижается в 2^6 раз. Характеристики различных кодов РС над полем $FG(2^8)$, полученные в ходе аналитического моделирования, приведены на рисунке 1.

Граничная оценка для параметра BER при использовании каскадного кода на основе кода РС и декодировании внутреннего кода методом кластерного подхода выполнялась в работе [8] по методике, предложенной в работе [9]. Полагалось, что внутренним кодом обнаруживаются ошибки, а символы кода РС с обнаруженными ошибками стираются. Если число стертых подблоков больше $n_2 - k_2$, то стирается вся комбинация кода РС, но если число стираний меньше или равно $n_2 - k_2$, то стирания исправляются кодом РС. Очевидно, внешний код не обнаруживает ошибку в случае, если нестертые символы кода РС совпадут в соответствующих позициях с символами одной из кодовых комбинаций, отличной от переданной [5].

Верхняя оценка для неправильного декодирования комбинации кода РС в работе [8] получает вид:

$$P_{ноРС} \leq \left(1 - \frac{1}{q}\right) \cdot \frac{k_2!}{(n_2 - k_2)! \cdot (k_2 - 1)!} \times \times S_{КОМ}^{n_2 - k_2} \cdot P_{КОМ} (1 - S_{КОМ} - P_{КОМ})^{k_2 - 1}, \quad (1)$$

где $S_{КОМ}$ – вероятность стирания комбинации кода РС, а $P_{КОМ}$ – вероятность ошибочного декодирования комбинации этого кода. Универсальность выражения (1) определяется возможностью одновременного учета параметров системы внешнего и внутреннего кодов [8]. Аналитическое моделирование системы связи с кодом РС над двоичным полем степени расширения четыре и внутренним линейным кодом (7, 4, 3) на базе (1) выполнено в работе [8] при $n_2 = 15$,

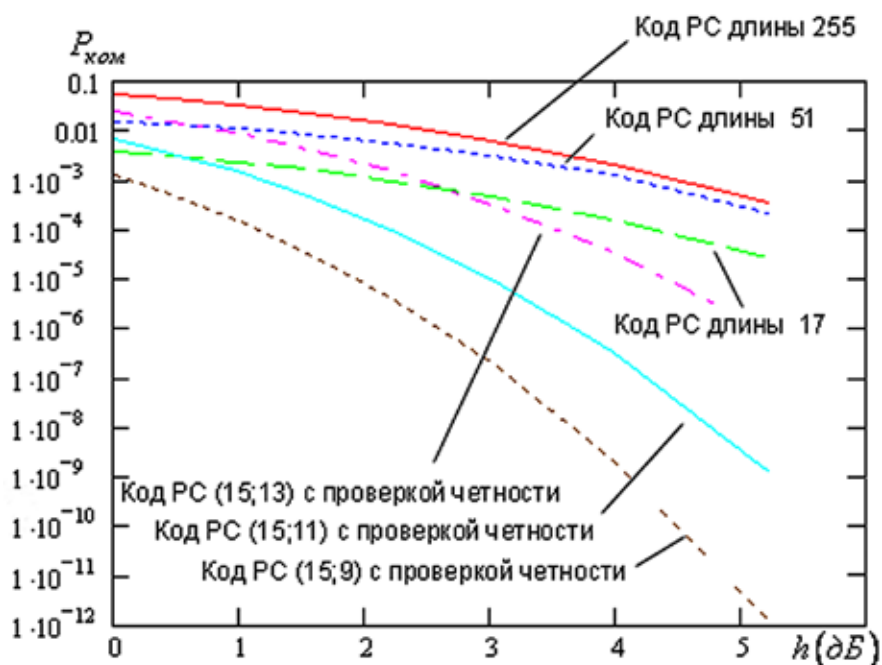


Рис. 1. Сравнительные характеристики вероятности ошибки на комбинацию для кодов РС различной длины

а значение k_1 последовательно изменялось от $k_1 = 13$ до $k_1 = 9$. Результаты моделирования представлены на рисунках 2 и 3.

В случае повышения уровня помех при использовании третьего варианта помехоустойчивого кодирования в системе обмена данными возможно применение метода многократной передачи сообщения с последующей выборкой правильно декодированных информационных блоков. Информационные блоки от источника информации в полубайтовом формате поступают на вход одного из кодеров РС, где осуществляется кодирование этих блоков с той или иной степенью избыточности. Уровень вводимой в код избыточности определяется по команде из блока согласования режимов, который может получать информацию от приемника о состоянии канала связи. Подобные команды возможно получить по каналу обратной связи или предусмотреть в специальном алгоритме. Закодированные комбинации кода РС поступают на вход кодера проверки четности. Таким образом, каждый символ кода РС получает дополнительную избыточность, что повышает общие корректирующие возможности кода. Далее сигналы поступают на вход повторителя. В случае благоприятной помеховой обстановки повторитель не запоминает переданную кодовую комбинацию каскадного кода. Такая комбинация направляется на вход широкополосного передатчика. При ухудшении помеховой обстановки, изменении вида помехи блок согласования режимов формирует команду для повторителя на повтор переданного блока. Число повторов зависит от вида помехи. В системе предусмотрены двукратные, трехкратные, четырехкратные и пятикратные повторы. Основная роль декодера заключается в декодировании принятых кодовых комбинаций и оценке помеховой обстановки по показателям мягкого декодирования комбинаций кода первой и второй ступеней.

В ходе исследований было установлено, что в качестве параметра, адекватно определяющего момент перехода системы с одного кода РС на другой, может служить математическое ожидание значений целочисленных мягких решений символов (МРС). Такое утверждение основано на результатах специально организованного эксперимента, в котором за информационный параметр для смены адаптивного режима работы кодеков выбирались:

- количество подряд идущих символов с максимальными значениями МРС на длине зачетного отрезка;
- дисперсия значений МРС, вычисляемая на длине зачетного отрезка;
- значение математического ожидания МРС на длине зачетного отрезка.

Под длиной зачетного отрезка понималась средняя длина кодовой комбинации, содержащей полезную информацию. Таким образом, смена режимов адаптации не требовала передачи специальных тестовых последовательностей. Анализ полученных результатов показал, что первый вариант требует от процессора приемника значительных вычислительных затрат и, более того, он не является информативным при низких значениях отношения сигнал/шум.

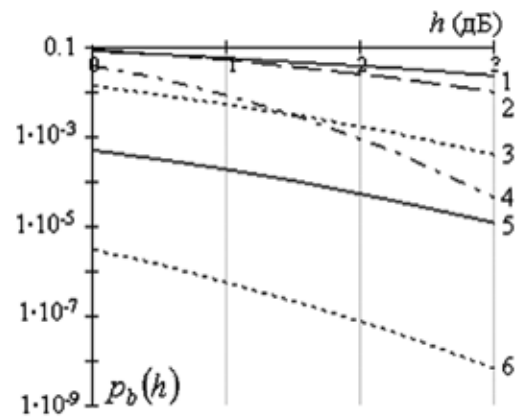


Рис. 2. Характеристики каскадного кода с параметрами внутреннего кода (7, 4, 3) и кода РС (15, 13, 3): 1 – безыбыточное кодирование; 2 – вероятность обнаружения ошибки кодом Хэмминга; 3 – вероятность ошибки комбинации внутреннего кода; 4 – вероятность ошибочного декодирования комбинации кода РС; 5 – трехкратное повторение символов; 6 – пятикратное повторение символов

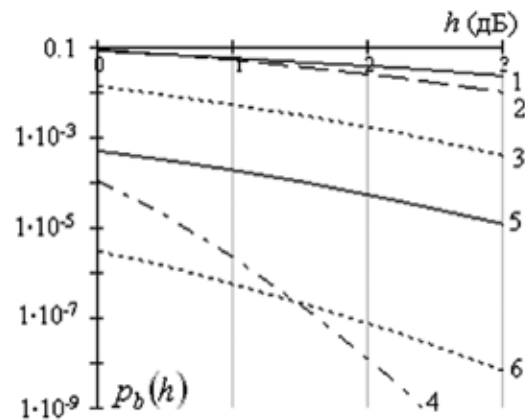


Рис. 3. Характеристики каскадного кода с параметрами внутреннего кода (7, 4, 3) и внешнего кода РС (15, 9, 7): 1 – безыбыточное кодирование; 2 – вероятность обнаружения ошибки кодом Хэмминга; 3 – вероятность ошибки комбинации внутреннего кода; 4 – вероятность ошибочного декодирования комбинации кода РС; 5 – трехкратное синхронное накопление символов; 6 – пятикратное синхронное накопление символов

Второй вариант требует меньших вычислительных затрат, но для его получения необходимо обработать символы всего зачетного отрезка. Кроме того, у данного параметра наблюдался большой разброс значений от одного эксперимента к другому даже при одном и том же отношении сигнал/шум.

Третий вариант оказался приемлемым по числу выполняемых операций и простоте их реализации. Значения математического ожидания достаточно точно соответствовали уровню отношения сигнал/шум, и поэтому данный параметр был выбран в качестве основного.

Для сравнения на рисунках 4 и 5 приведены тренды минимальных и максимальных значений дисперсии МРС

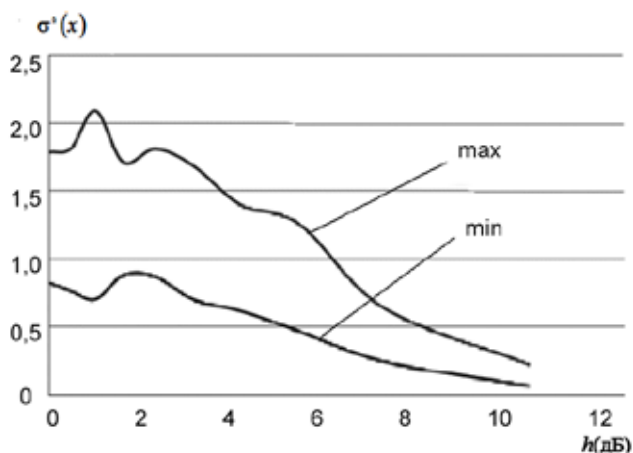


Рис. 4. Разброс параметров дисперсии МРС

на длине зачетного отрезка в условиях различных отношений сигнал/шум, а также аналогичные значения для математического ожидания тех же МРС [7].

Зависимость математического ожидания значений МРС для характеристики состояния канала связи предпочтительна из-за малого разброса параметров и ярко выраженной линейной зависимости. Измерение указанных параметров осуществлялось на ограниченных длинах кодовых комбинаций. Для приведенных рисунков длина кодового блока принималась равной 250 битам. В случае ухудшения помеховой обстановки декодер через блок управления накопителя и счетчик формирует команду на изменение режима обработки данных и передает эту команду на блок запросов, который по обратному каналу связи осуществляет изменение режима работы кодера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье раскрыта разработанная концепция применения избыточных кодов небольшой длины в современных высокоскоростных ИУК и представлены методы согласования параметров системы защиты от ошибок с длительностью цикла управления в таких ИУК. Показано, что снижение длины последовательностей избыточных кодов в таких системах может быть компенсировано путем применения мягких методов декодирования помехоустойчивых кодов и методов полного использования приемником введенной в код избыточности. Методами аналитического моделирования доказано преимущество мягкого лексикографического декодирования кодов РС, обеспечивающего существенное снижение сложности реализации декодера за счет исключения из алгоритма декодирования процедуры поиска локаторов ошибок (процедуры Ченя), которая требует значительного вычислительного ресурса и выполнения нерегулярных действий в подборе полинома локаторов ошибок.

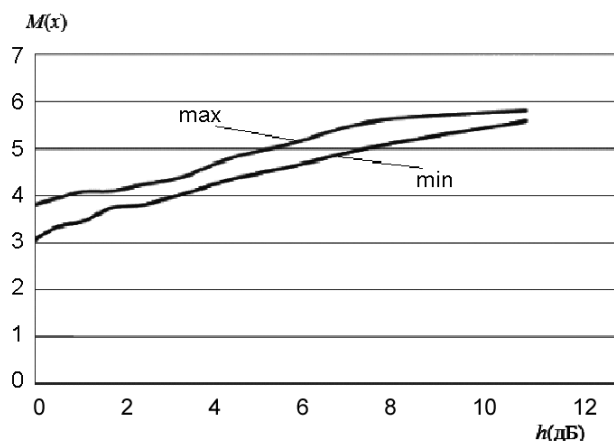


Рис. 5. Разброс параметров математического ожидания МРС

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гладких А.А. Основы теории мягкого декодирования избыточных кодов в стирающем канале связи. – Ульяновск : УлГТУ, 2010. – 379 с.
2. Чуднов А.М. Помехоустойчивость линий и сетей связи в условиях оптимизированных помех / под ред. А.П. Родимова. – Л. : ВАС. 1986. – 84 с.
3. Геращенко С.В. Оптимизация пространственного распределения энергетического ресурса двух РЛС и ФАР в условиях нестационарной помеховой обстановки при поиске и обнаружении целей в общей зоне обзора // Радиотехника. – 2011. – № 10. – С. 51–54.
4. Гладких А.А., Чилихин Н.Ю. Декодирование полярных кодов в декодере Арикана на базе индексов мягких решений // Инфокоммуникационные технологии. – 2014. – № 3. – С. 11–17.
5. Шакуров Р.Ш. Разработка и моделирование алгоритмов списочного декодирования блоковых кодов методом вычисления кластера : дис. ... канд. техн. наук. – Ульяновск : УлГТУ, 2011. – 139 с.
6. Форни Д.Г. Экспоненциальные границы для ошибок в системах со стиранием, декодированием списком и решающей обратной связью // Некоторые вопросы теории кодирования. – М. : 1970. – С. 166–205.
7. Баскакова Е.С. Исследование и разработка алгоритмов итеративного декодирования избыточных кодов в системе информационно-управляющих комплексов : дис. ... канд. техн. наук. – Самара : ПГУТИ, 2013. – 136 с.
8. Черторийский С.Ю. Разработка и моделирование алгоритмов декодирования обобщенных каскадных кодов в каналах спутниковых систем : дис. ... канд. техн. наук. – Ульяновск : УлГТУ, 2008. – 147 с.
9. Коржик В.И., Финк Л.М. Помехоустойчивое кодирование дискретных сообщений в каналах со случайной структурой. – М. : Связь, 1975. – 272 с.

REFERENCES

1. Gladkikh A.A. *Osnovy teorii miagkogo dekodirovaniia izbytochnykh kodov v stiraishchem kanale svyazi* [Soft-Decision Decoding Essentials of Redundant Codes in Erasure Communications Channel]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2010. 379 p.
2. Chudnov A.M. *Pomekhoustoichivost linii i setei svyazi v usloviakh optimizirovannykh pomekh pod red. A.P. Rodimova* [Noise Immunity of Links and Networks in Optimized Interferences, edited by A.P. Rodimov]. Leningrad, VAS Publ., 1986. 84 p.
3. Gerashchenko S.V. Optimizatsiia prostranstvennogo raspredeleniia energeticheskogo resursa dvukh RLS i FAR v usloviakh nestatsionarnoi pomekhovoi obstanovki pri poiske i obnaruzhenii tselei v obshchei zone obzora [Optimization of Spatial Distribution of Power Resources of Two Radars from the Phased Array under Conditions of Nonstationary Clutter Scene by Searching and Detecting of the Purposes in Total Zone of Survey]. *Radiotekhnika* [Radioengineering], 2011, no. 10, pp. 51–54.
4. Gladkikh A.A., Chilikhin N.Yu. Dekodirovanie poliarnykh kodov v dekodere Arikana na baze indeksov miagkikh reshenii [Decoding Polar Codes in Decoder of Arikana based on Indexes Soft-Decisions]. *Infokommunikatsionnye tekhnologii* [Infokommunikatsionnye Tehnologii], 2014, no. 3, pp. 11–17.
5. Shakurov R.Sh. *Razrabotka i modelirovanie algoritmov spisochnogo dekodirovaniia blokovykh kodov metodom vychisleniia klastera*. Dis. kand. tekhn. nauk [Development and Modeling of List Decoding Algorithms of Block Code by using of the Cluster Computing Method. Cand. eng. sci. diss.]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2011. 139 p.
6. Forni D.G. Eksponentsialnye granitsy dlia oshibok v sistemakh so stiraaniem, dekodirovaniiem spiskom i reshaisushchei obratnoi svyaziu [Exponential Bounds for Errors in Systems with Cancellation, List Decoding, and Decision Feedback]. *Nekotorye voprosy teorii kodirovaniia* [Some Questions on the Coding Theory], Moscow, 1970, pp. 166–205.
7. Baskakova E.S. *Issledovanie i razrabotka algoritmov iterativnogo dekodirovaniia izbytochnykh kodov v sisteme informatsionno-upravliaiushchikh kompleksov*. Dis. kand. tekhn. nauk [Research and Development of the Iterative Decoding Algorithms for Redundant Code in the System of Information and Control Complexes. Cand. eng. sci. diss.]. Samara, PGUTI Publ., 2013. 136 p.
8. Chertoriisky S.Iu. *Razrabotka i modelirovanie algoritmov dekodirovaniia obobshchennykh kaskadnykh kodov v kanalakh sputnikovyykh system*. Dis. kand. tekhn. nauk [Development and Modeling of Decoding Algorithms for Generalized Concatenated Codes in Spacecraft Channels. Cand. eng. sci. diss.]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2008. 147 p.
9. Korzhik V.I., Fink L.M. *Pomekhoustoichivoe kodirovanie diskretnykh soobshchenii v kanalakh so sluchainoi strukturoi* [The Noiseless Coding of Discrete Messages in Channels of Random Structure]. Moscow, Svyaz Publ., 1975. 272 p.