

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.396.43(076.5)

Буркова Маргарита

Помехоустойчивость систем цифровой связи и спутникового вещания

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук

по специальности 1-38 80 05 Приборы и методы преобразования
изображений и звука

Научный руководитель
Липкович Эдуард Борисович
доцент кафедры СТК

Минск 2015

Библиотека БГУИР

Нормоконтроль
Ткаченко Анатолий Пантелеевич

ВВЕДЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Прогресс в области систем спутниковой связи вещания основывается на поиске более совершенных решений с целью повышения пропускной способности, энергетической эффективности и высокой достоверности приема. В этом направлении выполнено большое число теоретических и экспериментальных исследований зарубежными и отечественными учёными, среди которых можно выделить: Дж. Прокиса, Б. Склера, В.Л. Банкета, В.М. Дорофеева, Ю.Б. Зубарева, В.В. Золоторёва и др. Значимый вклад в развитие теории помехоустойчивости и пропускной способности цифровых связи внесён известным теоретиком К. Шенноном. Им установлена граница реализуемости цифровых систем по двум важнейшим показателям – спектральной эффективности и порогового отношения энергии, затрачиваемой на передачу бита информации, к спектральной плотности мощности шума. В рамках установленных Шенноном предельно реализуемых цифровых систем с максимальной пропускной способностью разработано большое число сигнально-кодовых конструкций, отвечающих теоретическим положениям. Эти конструкции, построенные на вероятностном анализе возникновения ошибок в каналах связи, предусматривают использование программного моделирования процессов коррекции ошибок.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Неотъемлемым условием эффективной работы цифровых систем спутниковой связи, телевизионного вещания и мультимедийного обмена информацией, а также обеспечения надёжного контроля и телеуправления бортовыми системами является применение помехоустойчивого канального кодирования и полосноберегающих методов модуляции.

В диссертации излагаются основные положения по получившим широкое применение видам свёрточного и блочного кодирования и декодирования в цифровых системах с фазовой и квадратурной амплитудной модуляцией. Обсуждаются особенности функционирования передающих трактов земных станций спутниковых систем стандартов DVB-S и DVB-S2. Показано, что помехоустойчивость приёмных систем улучшается с увеличением длины кодового ограничения кодера и внесённой избыточности в цифровой поток, наличия мягкого декодирования по алгоритму Витерби, каскадного кодирования, скремблирования и перемежения. Указывается, что для численной оценки помехоустойчивости систем обычно предусматривается компьютерное моделирование, результаты которого представляются в виде графических зависимостей и не позволяют напрямую вести расчёт.

В диссертационной работе ставятся и решаются задачи:

- анализа методов построения и расчётов кодеров свёрточного кодирования в цифровых системах связи;
- детализации принципов работы передающих средств спутникового цифрового вещания стандартов DVB-S и DVB-S2 предусматривающих помехоустойчивое кодирование, скремблирование и перемежение данных;
- получения математических соотношений, увязывающих энергетические показатели приёмных систем (пороговое отношение E_0/N_0 и отношение несущая/шум) с параметрами модуляции, свёрточного кодирования, декодирования и уровнем достоверности приёма;
- получения расчётных формул для определения информационной эффективности и выигрыша от свёрточного кодирования при использовании многопозиционных видов модуляции;
- проведения расчётов по полученным формулам для оценки поведения характеристик помехоустойчивости при изменении параметров модуляции, кодирования и уровня ошибок;
- оценки достоверности полученных соотношений путём сравнения рассчитанных графических зависимостей с теоретическими и экспериментальными результатами, приведёнными в технической литературе.

БАЗОВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы, даётся краткая характеристика её разработанности, определяются объект и предмет исследования, цель и задачи, указана теоретико-методологическая основа, отмечены элементы научной новизны, формулируются основные положения диссертации, выносимые на защиту.

Первая глава «Базовые принципы модуляции и помехоустойчивого кодирования в спутниковых системах передачи» носит теоретический характер и состоит из двух подразделов.

В подразделе 1.1. «Помехоустойчивое кодирование в системах цифровой связи и спутникового вещания» выделены два существенных вопроса. Первый – общие принципы кодирования и декодирования и классификация помехоустойчивых кодов. Так в основе помехоустойчивого кодирования лежит введение в передаваемые сообщения определенной избыточности. При систематическом кодировании избыточные символы дописываются вслед за информационными, образуя кодовое слово. Символы на $(n-k)$ позициях являются различными функциями от информационных символов, обеспечивая тем самым избыточность, необходимую для обнаружения и исправления ошибок. Кроме того, рассмотрены такие параметры помехоустойчивого кода, как [1]:

- основание кода q – число элементарных символов, выбранных для передачи сообщений (для двоичного кода $q_2 = \{0;1\}$);

- длина кода n – число символов, выбранных для передачи сообщений;
- число информационных позиций в коде k , выбранных для передачи данных;
- число проверочных (контрольных) позиций в коде $r = n - k$;
- мощность кода M – число кодовых комбинаций, выбранных для передачи сообщений;
- скорость передачи кода $R = k/n$ характеризует качество кода;
- кодовое расстояние кода d характеризует возможности кода по контролю ошибок.

В соответствии с тем, как вводится избыточность в сообщение, коды, исправляющие ошибки, могут быть разделены на два класса: блочные и сверточные коды (СК). Особенности помехоустойчивого кодирования при использовании сверточных кодов является вторым вопросом и рассматривается в подразделе 1.1.2. СК – коды, которые исправляют ошибки, используя последовательную обработку информации короткими фрагментами. Данные коды характеризуются длиной кодового ограничения или конструктивной длиной кода $K = l + 1$; относительной скоростью кода $R_{ск} = k/n$; свободным расстоянием d_c ; генераторным полиномом $G(X)$, подчеркивающим оптимальность кодера, и формируются кодерами «с памятью», то есть если в каждый момент времени в кодер входит k символов входной последовательности, то на выходе кодера образуются n символов выходной последовательности [2]. Рассматриваемый тип кодов образуется множеством двоичных последовательностей, порождаемых сверточным кодером (структурная схема внутреннего сверточного кодера с длиной кодового ограничения $K = 7$ представлена в работе).

Среди различных алгоритмов декодирования сверточных кодов, алгоритм максимального правдоподобия Витерби (АВ) получил наиболее широкое распространение в системах связи, в которых необходимо обеспечить экономию энергетического ресурса [3]. АВ основан на использовании вероятностных характеристик принимаемых сигналов. Одним из преимуществ алгоритма является то, что сложность реализации декодера с мягким решением мало отличается от сложности реализации декодера с жестким решением. Недостатком является экспоненциальный рост сложности декодера в зависимости от длины кодового ограничения (K) сверточного кодера, поэтому алгоритм Витерби целесообразно использовать при $K < 10$.

В подразделе 1.2. «Системы цифрового многопрограммного вещания форматов DVB-S и DVB-S2» рассматриваются особенности форматов DVB-S и DVB-S2, структурные схемы и принципы их работы. Так, в DVB-S совместное использование энергетически эффективной квадратурной фазовой модуляции QPSK и каскадного кодирования для канала на базе укороченного кода Рида-Соломона (РС) и сверточного кода в сочетании с алгоритмом декодирования Витерби с мягким решением обеспечивает высокую помехоустойчивость системы в условиях воздействия шумовых и интерференционных помех, а также нелинейности бортового ретранслятора.

Важнейшим фактором создания нового стандарта DVB-S2 стали планы массового запуска HDTV (телевидение высокой четкости или высокого разрешения – ТВЧ). К числу основных задач, стоящих перед создателями стандарта, относят задачи повышения эффективности использования полосы канала и энергетической эффективности. Новый стандарт DVB-S2 предусматривает четыре схемы модуляции. Первые две, 4- ФМ и 8- ФМ, предназначены для использования в вещательных сетях поскольку допускают работу в режиме, близком к насыщению передатчика искусственного спутника Земли (ИСЗ). Более скоростные схемы модуляции, 16- АФМ и 32- АФМ, ориентированы на профессиональные сети. Также стандарт имеет следующие основные отличия: используется кодирование кодом Боуза – Чоудхури – Хоквингема (БЧХ) и кодирование с низкой плотностью проверки на четность (LDPC), принято несколько форматов модуляции и кодирования, допускающих изменение параметров. Для более содержательного рассмотрения и сравнения двух форматов проводится сравнительный анализ сигнально-кодовых конструкций в системах спутникового вещания (подраздел 1.2.3) и сравнение свойств сигналов с многопозиционной фазовой и амплитудно-фазовой модуляцией (подраздел 1.2.4).

Вторая глава «Математическое моделирование помехоустойчивости системы при отсутствии кодирования» носит практико-ориентированный характер и состоит из двух разделов, рассматривающих системы с многопозиционной квадратурной амплитудной модуляцией (М-КАМ) (подраздел 2.2) и с фазовой модуляцией (М-ФМ) (подраздел 2.3). Определение энергетической эффективности систем цифровой связи, которые используют М-КАМ и М-ФМ при наличии в каналах связи аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ), осложнено тем, что отсутствуют точные аналитические выражения для расчета помехоустойчивости.

В разделе 2 представлена методика получения расчетных формул для определения порогового отношения h_0^{M-KAM} ($h_0^{M-ФМ}$) и отношения средней мощности несущей к мощности шума на входе приемника (ОНШ) ρ_0^{M-KAM} ($\rho_0^{M-ФМ}$), при которых обеспечиваются заданная вероятность ошибки $P_{ош}$ на выходе когерентного демодулятора. С помощью полученных выражений построены зависимости $\rho_0^{M-KAM} = f(P_{ош})$ ($\rho_0^{M-ФМ} = f(P_{ош})$) и $h_0^{M-KAM} = f(P_{ош})$ ($h_0^{M-ФМ} = f(P_{ош})$) для различных порядков модуляции. Если сравнивать результаты расчета по полученным формулам с результатами, полученными путем компьютерного моделирования, то можно утверждать, что разработанные математические модели расчета верны и дают высокую точность.

Кроме того, проведено сравнение энергетической эффективности систем с М-ФМ и с М-КАМ для одинаковых значений $P_{ош}$. Для значений $M_{ФМ} = M_{КАМ}$ проигрыш в эффективности М-ФМ растет с ростом M . Равенство эффективностей данных систем наблюдается при $M_{ФМ} = M_{КАМ} = 4$. Несмотря на потери в энергетической эффективности систем с ФМ, их выигрыш состоит в постоянстве огибающей радиосигнала, что важно при минимизации

нелинейных искажений в передающих трактах систем. Поэтому часто при выборе вида модуляции предпочтение отдают 8-ФМ, а не двухуровневой 8-КАМ с пик-фактором $(3 \cdot (\sqrt{M} - 1)) / (\sqrt{M} + 1) = 1,43$, несмотря на проигрыш в энергетической эффективности на 1,65 дБ.

Третья глава «Математическое моделирование помехоустойчивости системы при наличии свёрточного кодирования» носит практико-ориентированный характер и так же состоит из двух разделов, рассматривающих системы с многопозиционной квадратурной амплитудной модуляцией (М-КАМ) (подраздел 3.1) и с фазовой модуляцией (М-ФМ) (подраздел 3.2). В подразделах устанавливаются расчётные формулы для h_k^{M-KAM} (h_k^{M-FM}), ρ_k^{M-KAM} (ρ_k^{M-FM}) и определяется важнейший показатель эффективности различных видов помехоустойчивого кодирования – энергетический выигрыш от кодирования (ЭВК) ΔG_K . Этот показатель характеризует меру снижения порогового отношения или ОНШ за счет применения кодирования при неизменных значениях M и $P_{ош.в}$.

Поведение ЭВК в функции $P_{ош.в}$ с ростом M из формульного представления не столь очевидно, таким образом в работе показаны зависимости $\Delta G_K^{M-KAM} = f(P_{ош.в})$ ($\Delta G_K^{M-FM} = f(P_{ош.в})$) для различных M при $R_{ск} = 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8$ при длине кодового ограничения $K = 7$ и 9 . По построенным графикам для системы с М-КАМ модуляцией можно сделать вывод, что в диапазоне рабочих значений при $P_{ош.в}$ в пределах от 10^{-4} до 10^{-7} увеличение M ведет к небольшому росту ЭВК, однако при дальнейшем снижении $P_{ош.в}$ кривые сливаются, стремясь к верхней границе. В частности при $P_{ош.в} = 10^{-4}$ и $K = 7$ изменение порядка модуляции от $M = 4$ до $M = 265$ приводит к изменению ΔG от 3,9 до 4,4 дБ. К тому же, из графиков следует, что с повышением длины кодового ограничения выигрыш от кодирования увеличивается на 0,3...0,5 дБ, а при одинаковых значениях K лучшими характеристиками обладают коды с меньшей кодовой скоростью.

Для системы с М-ФМ в диапазоне рабочих значений $P_{ош.в}$ в пределах от 10^{-3} до 10^{-7} увеличение M ведет к небольшому росту ЭВК, однако при дальнейшем снижении $P_{ош.в}$ кривые сливаются, стремясь к верхней границе $\Delta G_K^{FM-M} = 5,74$ дБ для $R_{ск} = 3/4$, $d_c = 5$, $K=7$.

К одной из характеристик свёрточного кодирования относится число выходных каналов N , который влияет на показатель коррекции свободного расстояния Хэмминга d_c и отражается в выигрыше от кодирования $\Delta G_K^{M-KAM} = f(P_{ош.в})$ ($\Delta G_K^{M-FM} = f(P_{ош.в})$). В работе рассмотрено увеличение числа N от 2 до 6 для различных M при $R_{ск} = 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8$, $K=7$ и $P_{ош.в} = 10^{-4}$, полученные результаты представлены графически и сделаны выводы. Так, для наиболее часто принимаемой на практике скорости свёрточного кода $R_{ск} = 3/4$ выигрыш от кодирования ΔG_K^{M-KAM} составляет 3,914 ... 4,777 дБ. Для широко используемой 8-ФМ при скорости свёрточного кодирования $R_{ск} = 3/4$ – ΔG_K^{M-FM} располагается в границах 4,076...4,643 дБ.

Четвёртая глава «Информационная эффективность в цифровых системах связи» носит, как и предыдущие разделы, практико-ориентированный характер. В ней рассматриваются: спектральная эффективность, энергетическая эффективность и информационная эффективность через математические соотношения и графические представления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Базируясь на проведенных в диссертационной работе теоретических исследованиях, касающихся помехоустойчивости спутниковых цифровых систем, можно сделать вывод:

– получены расчётные соотношения для определения помехоустойчивости, информационной эффективности и выигрыша от кодирования в цифровых системах с многопозиционными видами модуляции и свёрточным кодированием. Соотношения получены для канала с аддитивным белым гауссовым шумом при когерентной демодуляции и декодировании с мягким принятием решения по алгоритму Витерби. С помощью полученных соотношений возможны расчёты без привлечения компьютерного моделирования;

– на основании полученных соотношений построены графические зависимости, позволяющие установить характерные закономерности для цифровых систем с М-ФМ и М-КАМ модуляциями и свёрточным кодированием;

– дана оценка выигрыша от кодирования в зависимости от вероятности ошибок на бит информации, величина которого определяется параметрами модуляции и кодирования и не зависит от вида модуляции (М-ФМ или М-КАМ);

– дана оценка достоверности полученных соотношений путём сравнения результатов расчёта с теоретическими и экспериментальными данными, приведёнными в технической литературе.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

- Липкович, Э. Б. Расчёт показателей эффективности систем с многопозиционной модуляцией и свёрточным кодированием / Э. Б. Липкович, М. Буркова // Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ-БГУИР (Минск, 18-19 марта 2014 года) : материалы конф. В 2ч. Ч.1 / редкол. : А.А. Кураев [и др.]. – Минск : БГУИР, 2014. – 539 с.
- Липкович, Э. Б. Эффективность свёрточного кодирования в цифровых системах с многопозиционной модуляцией / Э. Б. Липкович, М. Буркова // Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-

летию МРТИ-БГУИР (Минск, 18-19 марта 2014 года) : материалы конф. В 2ч. Ч.1 / редкол. : А.А. Кураев [и др.]. – Минск : БГУИР, 2014. – 539 с.

- Буркова, М. Математические модели расчёта характеристик цифровых радиосистем / М. Буркова, Э. Б. Липкович // Современные средства связи. 14-15 октября 2014 г. XIX НТК – Минск : Высший колледж связи, 2014. - 180с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Список использованных источников

- [1] Морелос-Сарагоса, Р. Искусство помехоустойчивого кодирования: методы, алгоритмы, применение / Р. Морелос-Сарагоса; пер. с англ. – М. : Техносфера, 2005. – 320 с.
- [2] Волков, Л. Н. Системы цифровой радиосвязи : базовые методы и характеристики : учеб. пособие / Л. Н. Волков, М. С. Немировский, Ю. С. Шинаков. – М. : Эко-Трендз, 2005. – 392 с.
- [3] Гаранин, М. В. Системы и сети передачи информации : учеб. пособие для вузов / М. В. Гаранин, В. И. Журавлев, С. В. Кунегин. – М. : Радио и связь, 2001. – 336 с.