

Учреждение образования Белорусский
государственный университет информатики и
радиоэлектроники

УДК _____

Серченя
Анна, Андреевна

Математические модели оценки эффективности систем радиосвязи с
многопозиционной модуляцией и помехоустойчивым кодированием

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук

по специальности «Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

Научный руководитель

Липкович Э. Б.

доцент

Минск 2020

ВВЕДЕНИЕ

В телекоммуникационной научно-технической и бизнес среде в последнее время ведется дискуссия о роли и месте радиорелейной (РР) связи в системе передачи информации. Особенно она обострилась с началом широкого внедрения в практику связи волоконно-оптических линий с их огромными возможностями обеспечения пропускной способности на значительные расстояния при минимальном воздействии на них внешней среды. С появлением столь могучего конкурента РР связи прочили неминуемое забвение. Однако, как показывает практика, этого не произошло. Более того, на сегодняшний день каждый из этих родов связи имеет свои четко очерченные границы применимости, более того, они мирно сосуществуют и очень часто взаимно дополняют друг друга. Впрочем, так и должно быть, когда во главу угла ставится решение единой задачи [1].

При передаче цифровых данных по каналам с шумами всегда существует вероятность того, что принятые данные будут содержать ошибки. Наиболее эффективным способом исправления ошибок является применение методов помехоустойчивого кодирования. На сегодняшний день теории кодирования известно множество кодов и методов их декодирования, различающихся корректирующей способностью, сложностью реализации и рядом других параметров [2].

Широкое распространение получили двоичные алгебраические блочные коды – коды Рида-Соломона, декодирование которых осуществляется преимущественно на основе жестких решений. Для повышения спектральной эффективности осуществляется переход к методам решетчатой кодовой модуляции с использованием сверточных кодов, допускающих мягкое вероятностное декодирование. Также применяются последовательные каскадные конструкции на основе кодов Рида-Соломона и сверточных кодов [3].

В современных телекоммуникационных технологиях классические коды (к которым относятся алгебраические блочные коды и сверточные коды, а также последовательные каскадные конструкции) применяются только в составе более эффективных турбоподобных каскадных конструкций. Также с учетом особенностей развития телекоммуникационных технологий предложены новые базовые конструкции, применяемые как отдельно, так и в качестве элементов каскадных конструкций. К ним относятся полярные коды, коды с малой плотностью проверок на четность, коды Лаби. Эволюция подходов к декодированию кодовых конструкций заключается в переходе от алгебраического жесткого декодирования и вероятностного мягкого декодирования к итеративному декодированию, позволяющему использовать

как жесткие, так и мягкие решения. При этом итеративный принцип обработки информации можно рассматривать как универсальный подход к декодированию различных кодовых конструкций.

Целью данной работы является рассчитать эффективность помехоустойчивых видов кодирования при использовании кодов Рида-Соломона, а также сверточных кодов как отдельно, так и в составе каскадных конструкций (двухступенчатое/трехступенчатое кодирование), сравнить их и сделать вывод, какие конструкции более эффективны.

Для достижения поставленной цели необходимо проанализировать наиболее значимые показатели систем радиосвязи, учитываемые при их разработке и оценке помехоустойчивости, провести обзор существующих методов расчета выбранных показателей, рассмотреть многопозиционные методы модуляции, кодирование кодами Рида-Соломона, сверточное кодирование, многоступенчатое кодирование, разработать математические модели расчета основных характеристик систем радиорелейной связи и выполнить сравнительный анализ эффективности каналов радиосвязи при различных видах модуляции и кодирования.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Цель работы заключается в разработке математических моделей расчета помехоустойчивости систем радиосвязи и вещания при использовании помехоустойчивых способов кодирования и полосноберегающих методов модуляции.

Задачи исследования состоят в получении аналитических соотношений, описывающих каналы связи и вещания при использовании одноступенчатого и многоступенчатого кодирования и анализе полученных результатов.

В данной работе представлены впервые полученные соотношения для определения требуемого отношения сигнал-шум на входе декодера при заданной вероятности. Данные соотношения могут быть применены к системам, использующим разные виды модуляции (в т.ч. высокоформатные), а также конструктивную длину кода, чего не могли себе позволить уже имеющиеся формулы, зависящие от перечисленных параметров и работающие исключительно для одного их сочетания. Кроме того, исходные расчетные соотношения требовали наличия таблицы спектров весов кода, расчет которых является отдельной сложной математической задачей, тогда как предложенные в диссертации модели лишены этого ограничения и не требуют

предварительно подготовленных данных, помимо основных параметров выбранных кода и модуляции. В результате использование новых соотношений упрощается порядок проводимых исследований, обеспечивается непрерывность расчетов и расширяется область применения полученных результатов.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования данных соотношений на производстве при необходимости быстрого получения достаточно точного результата для широкого набора исходных данных, а также для использования в учебном процессе.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В настоящее время от системы связи требуется обеспечивать высокую помехоустойчивость приема и в то же время предоставлять высокую спектральную эффективность канала связи. Первое обеспечивается все более усложняющимися каскадными конструкциями помехоустойчивых кодов, а второе – использованием высокоформатных видов модуляции. Данные требования предъявляются ко всем современным средствам связи. Основной проблемой является разработка необходимых математических моделей, которые позволили бы рассчитывать основные характеристики канала (в частности, необходимое отношение несущая/шум для обеспечения требуемой вероятности ошибки.)

В первом разделе диссертации рассматриваются вопросы, касающиеся принципов построения радиорелейных систем связи, их архитектуры. Рассмотрены некоторые показатели эффективности цифровых систем, а именно спектральная, энергетическая и информационная эффективности. А также дается общая характеристика помехоустойчивого кодирования и модуляции и чуть более детальное описание некоторых их видов.

Во втором разделе основное внимание уделено построению отдельных структур радиотракта, таким, как сверточный кодер, кодер Рида-Соломона, скремблер/дескремблер, перемежитель/деперемежитель, модулятор.

Третий раздел является ключевым в данной диссертации, т.к. он содержит базовые формулы для случая применения одноступенчатого кодирования, на основе которых получают формулы для многокаскадных структур, а также систем без кодирования. По рассчитанным значениям построены графические зависимости.

Ниже представлены соотношения для системы, использующей одноступенчатое кодирование сверточными кодами.

$$h_{Ki} = 10 \lg \left[2,3 \left(D_i - \lg \sqrt{2,3 D_i / \mu_i} \right) / \mu_i \right], \text{ дБ}; \quad (1)$$

$$D_i = -\lg(P_b) - \lg \left[(N-1)^2 \cdot \left(\sqrt{\pi q_i / C_i} \right) \right] + \lg \sqrt{(\mu_i / q_i)}; \quad (2)$$

$$\mu_i = q_i \cdot R_K \cdot d_C \cdot \beta_i; \quad (3)$$

$$\beta_i = \left[1 - \frac{L_M}{(1-R_K)L_M - \lg(P_b)} \right] / \left[1 + \left[\sqrt{P_b} / (1-R_K) \right] \right]; \quad (4)$$

$$L_M = \lg \left(R_K d_C \sqrt{d_C q_i} \right). \quad (5)$$

На рисунке приведен пример зависимости ОСШ от вероятности ошибки $h_{kl} = f(P_b)$ для набора модуляций КАМ-М.

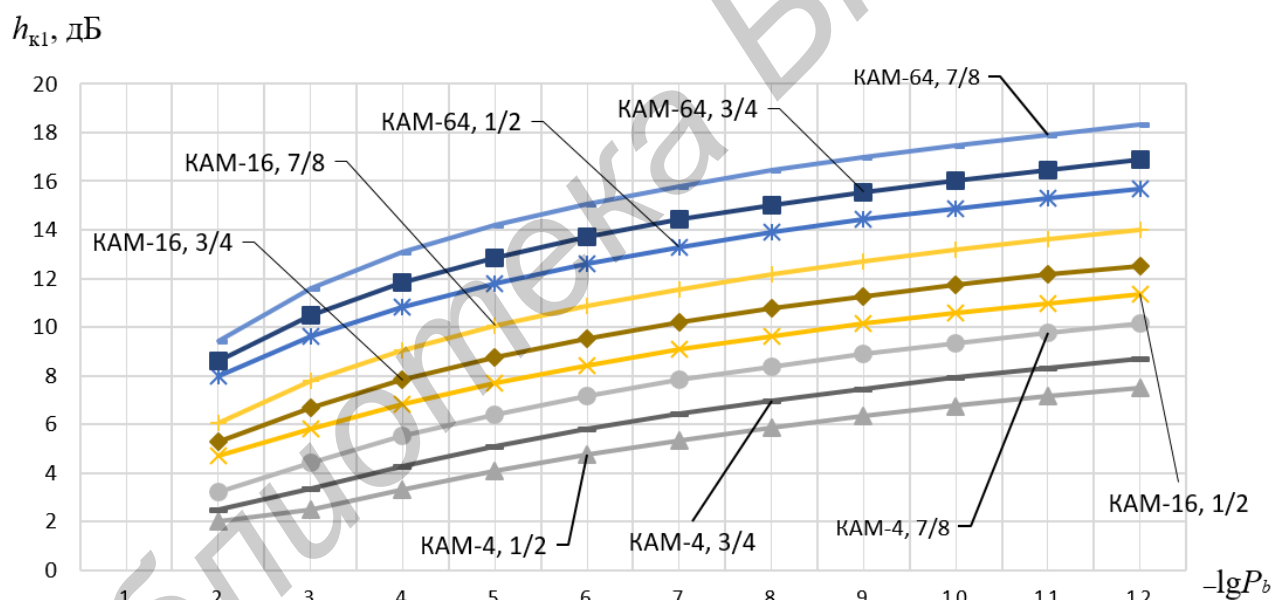


Рисунок 1 – Зависимости $h_{kl} = f(P_b)$ для КАМ-М

Из анализа приведенных зависимостей следует, что с ростом порядка модуляции M и снижением P_b наблюдается рост значений ОСШ, необходимых для обеспечения заданных вероятностей ошибок P_b на выходе декодера Витерби. Однако уровни этих значений заметно ниже, чем в случае отсутствия кодирования, что связано с исправлением ошибок.

Для получения соотношений для систем, не использующих кодирование, необходимо все параметры кодера приравнять к единице. В результате получим следующие формулы:

$$h_{0i} = 10 \cdot \lg \left[2,3 \left(A_i - \lg \sqrt{2,3 \cdot A_i / (q_i)} \right) / q_i \right], \text{ дБ}; \quad (6)$$

$$A_i = -\lg P_b - \lg \left(\sqrt{\pi \cdot q_i / C_i} \right). \quad (7)$$

В качестве критерия оценки эффективности исправления ошибок на приеме был выбран энергетический выигрыш от кодирования (ЭВК). Он характеризует меру снижения ОСШ за счет использования процедур, связанных с кодированием при сохранении характеристик канала и достоверности приема, принятых в случае отсутствия кодирования.

Если при определении ЭВК сравниваются значения ОСШ для одинаковых ошибок P_b , видов и порядков модуляции при отсутствии и наличии кодирования, то

$$\Delta G_i = h_{0i} - h_{Ki} = \rho_{0i} - \rho_{Ki} + 10 \cdot \lg R_K, \text{ дБ}. \quad (8)$$

С учетом (8) и соотношений для определения h_{0i} и h_{Ki} , величина ЭВК при мягком декодировании рассчитывается по формулам

$$\Delta G_i = 10 \cdot \lg (R_K \cdot d_C \cdot \beta_i \cdot \xi_i), \text{ дБ}; \quad (9)$$

$$\xi_i = \left[A_i - 0,5 \cdot \lg (2,3 \cdot A_i / q_i) \right] / \left[D_i - 0,5 \cdot \lg (2,3 \cdot D_i / \mu_i) \right]. \quad (10)$$

На рисунке 2 приведены зависимости $\Delta G_i = f(P_b)$ для мягкого декодирования сигналов с КАМ-М и ФМ-М при $K = 7$ и $R_K = 3/4$.

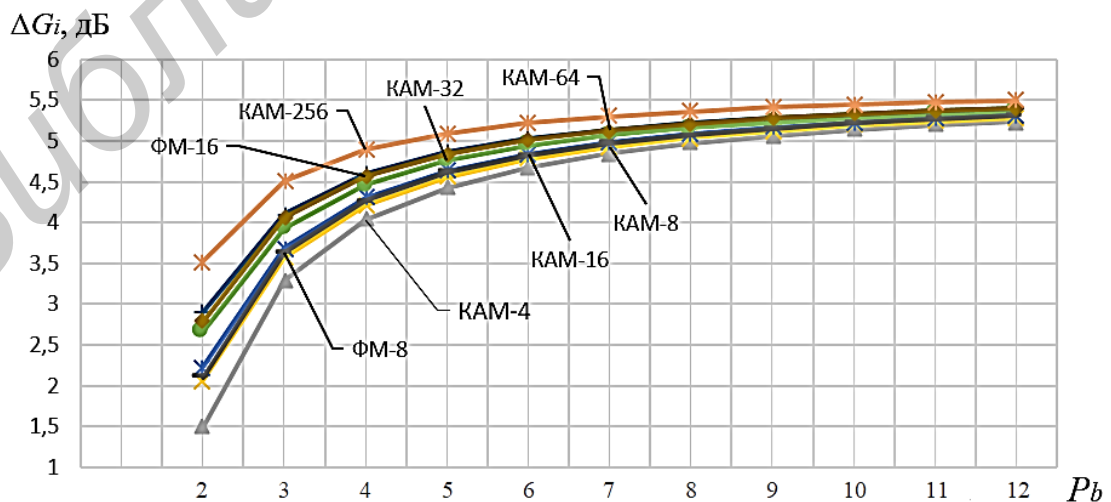


Рисунок 2 – Зависимость $\Delta G_i = f(P_b)$ при $R_K = 3/4$ для КАМ-М и ФМ-М

Аналитические соотношения для расчета помехоустойчивости при использовании кодов Рида-Соломона имеют сходную структуру с выражениями для сверточного кодирования:

$$h_{к.РС} = 10 \lg \left[2,3 \left(B_i - \lg \sqrt{2,3 B_i / \mu_{РС}} \right) / \mu_{РС} \right], \text{ дБ}; \quad (11)$$

$$B_i = -\lg P_b - \lg(\sqrt{\pi q_i} / C_i) + \lg \sqrt{\mu_{РС} / q_i}; \quad (12)$$

$$\mu_{РС} = R_{РС}(t+1) \cdot \beta_{РС} \cdot q_i; \quad (13)$$

$$\beta_{РС} = \left[1 - \frac{L_{РС}}{3,5 L_{РС} \sqrt{P_b} (-\lg P_b)} \right] / Q_{РС}; \quad (14)$$

$$L_{РС} = \lg \left[R_{РС} \cdot (t+1) \sqrt{d_M q_i} \right]; \quad Q_{РС} = 1 + \lg[(t+1)n / 2t(-\lg P_b)]. \quad (15)$$

Если при расчете величина $Q_{РС} \leq 1$, то в формуле (3.50) значение $Q_{РС}$ не учитывается. Подобно (9) и (10), ЭВК в каналах систем, использующих коды РС, рассчитывается по следующим формулам:

$$\Delta G_{РС} = h_0 - h_{к.РС} = 10 \lg \left[R_{РС}(t+1) \beta_{РС} \cdot \xi_{РС} \right], \text{ дБ}; \quad (16)$$

$$\xi_{РС} = (A_i - \lg \sqrt{2,3 A_i / (q_i \cdot \alpha_K)}) / (B_i - \lg \sqrt{2,3 B_i / \mu_{РС}}). \quad (17)$$

На рисунке 3 представлены зависимости $h_k = f(P_b)$ при использовании кодов Рида-Соломона при использовании многопозиционных видов модуляции.

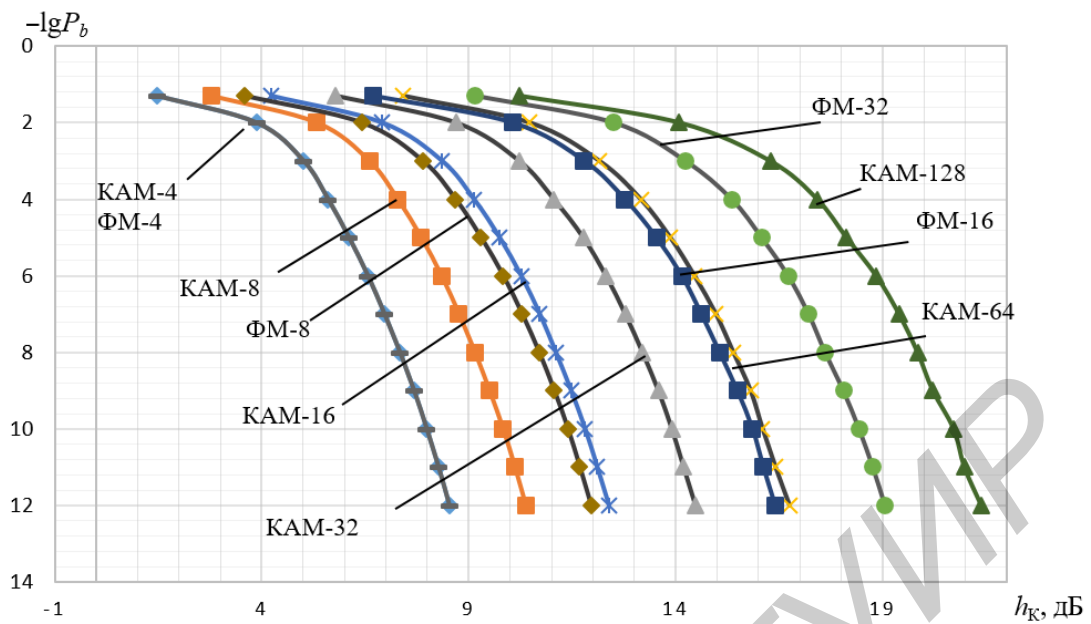


Рисунок 3 – Зависимости $h_k = f(P_b)$ для различных видов модуляции при использовании кодов Рида – Соломона

В разделе был сделан сравнительный анализ использования кодов Рида-Соломона и сверточных кодов. На рисунке 4 приведены кривые зависимости ЭВК от вероятности ошибки.

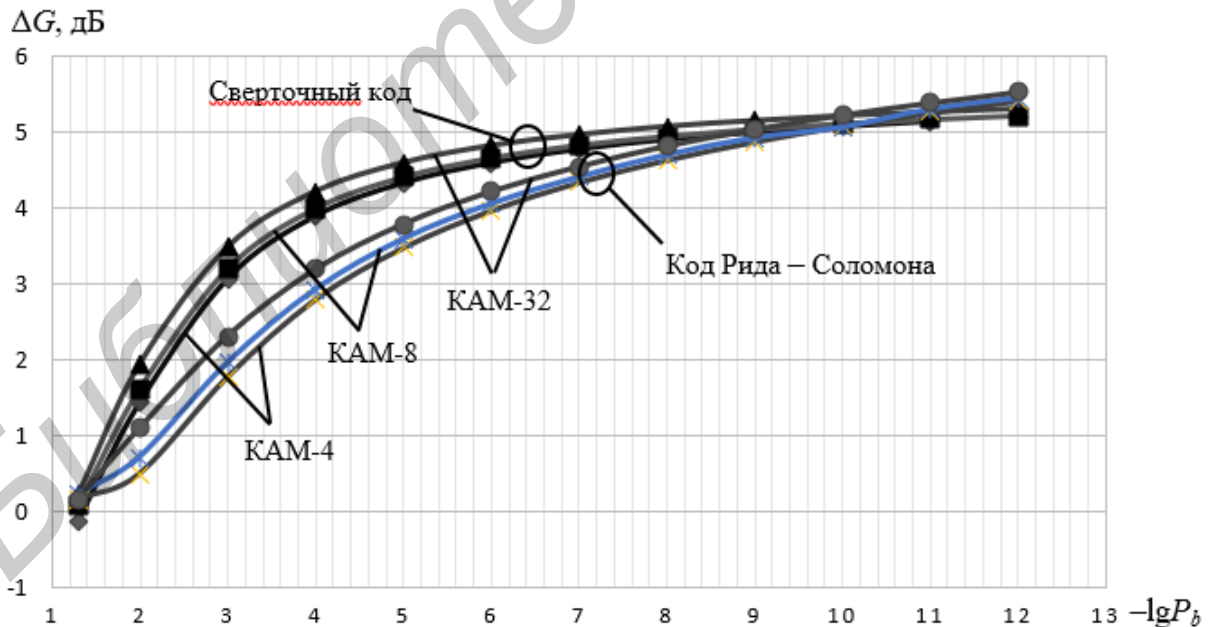


Рисунок 4 – Сравнительная оценка ЭВК для двух типов кодирования

Анализ приведенных зависимостей показывает, что в зоне ошибок от 10^{-2} до 10^{-8} сверточное кодирование имеет преимущества в ЭВК и, следовательно, обладает лучшей энергетической эффективностью по

сравнению с кодом РС для принятых параметров и видов модуляции. Аналогичное поведение ЭВК наблюдается при сравнении кодов РС и сверточных кодов с многопозиционной фазовой модуляцией. Различие в ЭВК между зависимостями однотипного вида модуляции и $P_b = 10^{-5}$ составляет около 1 дБ.

Четвертый раздел является логическим продолжением и развитием третьего, т.к. там представлена модель для расчета помехоустойчивости при использовании двухкаскадного сверточного кодирования, а также пример ее использования. Содержащиеся в ней формулы по своей структуре напоминают соотношения для однокаскадного кодирования, что подтверждает универсальность представляемых в работе математических решений.

Представим ниже пошаговую методику расчета помехоустойчивости при использовании многопозиционных видов модуляции с сверточного двухкаскадного кодирования.

1. Функция взаимосвязи между параметрами первой ступени декодирования

$$\beta_{i12} = R_{12} \left[1 - \frac{q_i k_1 W_1 \lg(R_{12} \cdot d_{c1})}{(n_1 - 1) \cdot (-\lg P_{b1})} \right] / \left[1 + W_1 k_1 (n_1 - k_1) \sqrt{R_{12} \cdot P_{b1}} \right],$$

где $W_1 = d_{c1}^* / K$; $R_{12} = R_1 \cdot R_2$.

2. Показатель эффективности декодирования первой ступени

$$\mu_{i12} = q_i \cdot R_{12} \cdot d_{c1} \cdot \beta_{i12}.$$

3. Требуемое значение ОСШ, при котором на выходе первой ступени декодирования обеспечивается P_{b1}

$$h'_k = \frac{2,3}{\mu_{i12}} \left[D_{i1} - \lg \sqrt{\frac{(2,3(D_{i1} - V_{i1}))}{\mu_{i12}}} \right];$$

$$D_{i1} = -\lg P_{b1} - \lg \left[\sqrt{\pi q_i / C_i} \right] + \lg \sqrt{\mu_{i12} / q_i};$$

$$V_{i1} = \lg \sqrt{\frac{2,3}{\mu_{i12}} \left[D_{i1} - 0,5 \lg \sqrt{\frac{2,3}{\mu_{i12}} D_{i1}} \right]}.$$

4. Вероятность ошибки на выходе демодулятора

$$P_{\text{ош}} = \frac{C_i}{\sqrt{q_i \pi R_{12} h'_k}} \cdot 10^{-q_i R_{12} h'_k / 2,3}.$$

5. Исправляющая способность первой ступени декодирования

$$I_{Д1} = P_{\text{ош}} / P_{b1}.$$

6. Примерное значение $(-\lg P_{b2})$ на выходе второй ступени декодирования

$$-\lg P_{b2} = -\lg P_{b1} - \lg \sqrt{R_2 d_{c2}} + \left[\mu_{i12} \cdot h'_k(R_2 d_{c2} - 1) / 2,3 \right].$$

7. Показатель эффективности декодирования второй ступени

$$\mu_{i22} = R_2 \cdot d_{c2} \left[1 - \frac{q_i k_2 W_2 \lg(R_2 \cdot d_{c2})}{(n_2 - 1) \cdot (-\lg P_{b2})} \right],$$

где $W_1 = W_2$.

8. Результирующий показатель эффективности каскадного декодирования

$$\mu_{ip} = \mu_{i12} \cdot \mu_{i22}.$$

9. Вероятность ошибки на выходе второй ступени декодирования

$$P_{b2} = \frac{C_i \sqrt{\mu_{ip}}}{q_i \sqrt{\pi h'_k}} \cdot 10^{-\mu_{ip} h'_k / 2,3}.$$

10. Исправляющая способность второй ступени декодирования

$$I_{Д2} = P_{b1} / P_{b2}.$$

11. ЭВК, обеспечиваемый первой ступенью декодирования по сравнению с режимом без кодирования при $P_{b0} = P_{b1}$

$$\Delta G_{1-2} = h_0^{(т.2)} - h_k^{(т.1)}, \text{ дБ},$$

где $h_0^{(т.2)}$ – значение ОСШ в отсутствие кодирования, рассчитываемое по (4.16)–(4.17) при $P_{b0} = P_{b1}$, дБ; $h_k^{(т.1)}$ – значение ОСШ, при котором на выходе первой ступени декодирования реализуется P_{b1} , дБ.

12. ЭВК, обеспечиваемый двумя ступенями декодирования по сравнению с режимами без кодирования при условии $P_{b0} = P_{b2}$

$$\Delta G_{3-6} = h_0^{(т.6)} - h_k^{(т.3)}, \text{ дБ},$$

где $h_0^{(т.6)}$ – значение ОСШ в отсутствие кодирования при $P_{b0} = P_{b2}$, дБ; $h_k^{(т.3)}$ – значение ОСШ, равное $h_k^{(т.1)}$, дБ.

13. Максимальное значение ЭВК ΔG_M (4.20) при двухступенчатом декодировании по сравнению с режимом без кодирования

$$\Delta G_M = 10 \lg [d_{c1} \cdot R_1 \cdot R_2^2 \cdot d_{c2}], \text{ дБ.}$$

14. Энергетический выигрыш от использования второй ступени декодирования при обеспечении вероятности ошибки P_{b2}

$$\Delta G_{3-5} = h_k^{(т.5)} - h_k^{(т.1)}, \text{ дБ,}$$

где $h_k^{(т.5)}$ – значение ОСШ, при котором на выходе первой ступени декодирования вероятность ошибки $P_{b1} = P_{b2}$.

15. Энергетический выигрыш от использования двухкаскадного кодирования и декодирования по сравнению с однокаскадным кодированием и декодированием при обеспечении P_{b2}

$$\Delta G_{3-4} = h_k^{(т.4)} - h_k^{(т.3)}, \text{ дБ,}$$

где $h_k^{(т.4)}$ – значение ОСШ, рассчитываемое по формулам пунктов 1 – 3 при условии $R_{12} = R_1$.

16. Проигрыш в спектральной эффективности однокаскадному кодированию из-за введения в составной код дополнительной избыточности

$$\Delta \gamma_c = R_1 / R_{12}.$$

17. Выигрыш в информационной эффективности системы, использующей составное кодирование по сравнению с одноступенчатым кодированием, при обеспечении в обоих решениях вероятность ошибок P_{b2}

$$\Delta \eta_{\text{инф}} = \eta_{\text{инф}2} / \eta_{\text{инф}1} = \frac{R_2 \cdot \lg(1 + mR_1 \cdot h_k^{(т.4)})}{\lg(1 + mR_{12} \cdot h_k^{(т.3)})},$$

где $\eta_{\text{инф}2}; \eta_{\text{инф}1}$ – информационная эффективность систем при двух- и однокаскадном кодировании.

Помимо получения результата функции $h_k = f(P_b)$, методика содержит также соотношения для расчета выигрыша от кодирования при использовании двухкаскадного кодирования и декодирования по сравнению с иными вариантами кодирования в системе. А также с ее помощью можно рассчитать проигрыш в спектральной и выигрыш и информационной эффективности без каких-либо затруднений, используя весьма простые формулы.

На основании приведенных в методике расчетных соотношений и полученных данных для случая КАМ-4, $R_1 = 3/4, R_2 = 7/8, K_1 = K_2 = 7$ были

построены графические зависимости с указанием для $P_{b1} = 10^{-4}$ реперных точек расчета.

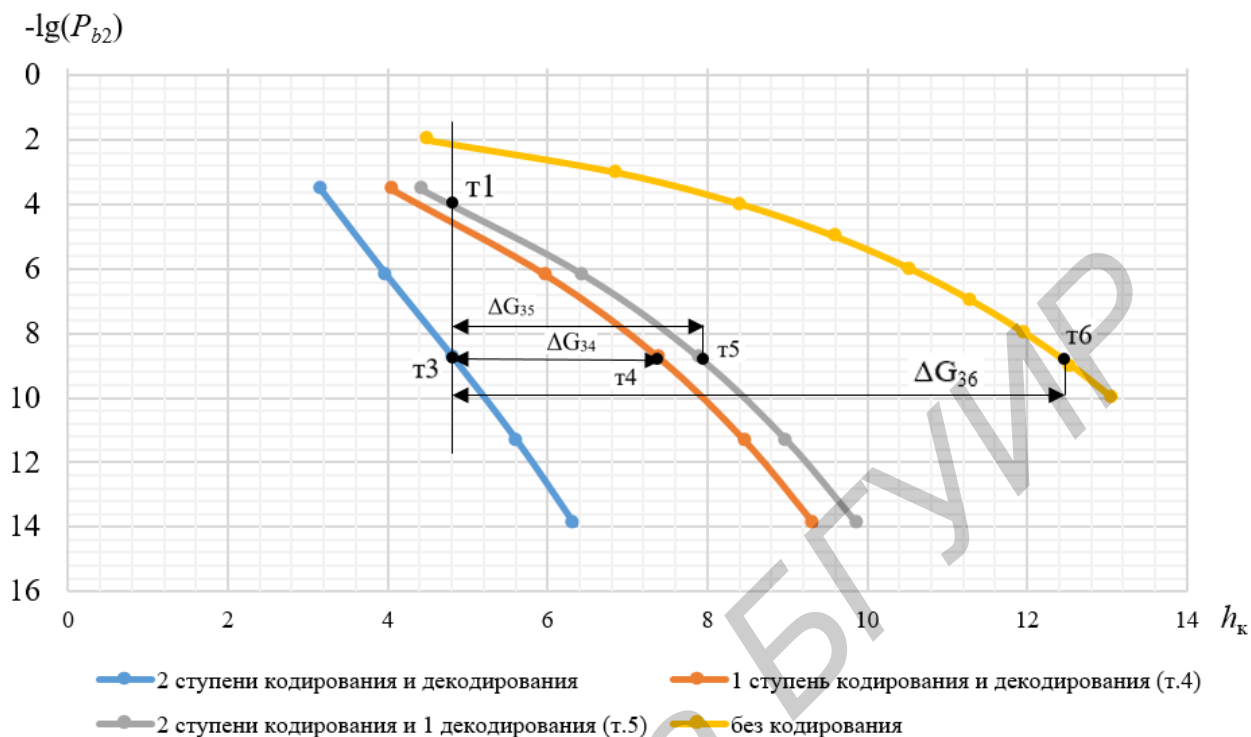


Рисунок 4.2 Зависимости помехоустойчивости для КАМ-4, $R_1 = 3/4$, $R_2 = 7/8$, $K_1 = K_2 = 7$ при использовании: 1 – двух ступеней кодирования и декодирования; 2 – одной ступени кодирования и декодирования; 3 – двух ступеней кодирования и одной ступени декодирования; 4 – без кодирования

Из анализа зависимостей, а также полученных в ходе расчетов данных следует, что с введением в рассмотрение внешней ступени кодирования с $R_2 = 7/8$ обеспечивается выигрыш в помехоустойчивости на 2 дБ при $P_{b1} = 10^{-3}$ и на 2,58 дБ при $P_{b1} = 10^{-4}$. При этом информационная эффективность увеличивается при $P_{b1} = 10^{-4}$ в 1,21 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной диссертации были разработаны математические модели для оценки показателей эффективности цифровых радиорелейных и спутниковых систем связи с распространенными и перспективными видами модуляции. Для этого были рассмотрены и проанализированы различные методы модуляции и способы помехоустойчивого кодирования при условии

обеспечения требуемой достоверности приема, применяемые в цифровых радиорелейных и спутниковых системах связи.

Были получены расчётные соотношения для определения помехоустойчивости, информационной эффективности и выигрыша от кодирования в цифровых системах с многопозиционными видами модуляции и сверточным кодированием и кодированием Рида-Соломона, а также каскадным кодированием сверточными кодами. Соотношения получены для канала с аддитивным белым гауссовым шумом при когерентной демодуляции и декодировании с мягким принятием решения по алгоритму Витерби при применении сверточного кодирования и жесткого декодирования при использовании кодирования кодами Рида-Соломона. По полученным выражениям были построены таблицы и графические зависимости.

По результатам проведенной работы можно сделать следующий вывод: при равных энергетических показателях спектральная эффективность выше у кодов РС. Это связано с тем, что они длиннее и проверочная часть у них имеет меньший вес. А при равных спектральных эффективностях энергетические эффективности исследуемых кодов близки, однако все же СК обладают лучшими характеристиками. Таким образом, при необходимости системы с высокой пропускной способностью рекомендуется использовать кодирование длинными кодами Рида-Соломона, в то время как при необходимости увеличения помехоустойчивости системы стоит использовать помехоустойчивое кодирования сверточными кодами. Кроме того, при использовании вместо одноступенчатого кодирования многоступенчатого, наблюдается существенный выигрыш в вероятности ошибки на выходе крайнего декодера при сохранении отношения сигнал-шум, определяемого первым декодером. Кроме того, нельзя не заметить, что при многоступенчатом кодировании наблюдается некоторый проигрыш в спектральной эффективности, однако же наряду с ним имеется выигрыш в информационной эффективности.

Для оценки точности полученных аналитических выражений было произведено их сравнение с доступными экспериментальными данными, приведенными в технической литературе, и данными, указанными в стандартах. Расхождения между рассчитанными значениями и справочными данными можно считать незначительными. Следовательно, можно говорить о том, что полученные математические модели достаточно точно описывают зависимости ОНШ от вероятности ошибок и могут быть использованы для расчета показателей помехоустойчивости. Эти выражения могут быть использованы в учебном процессе, они являются универсальными, применимы для различных сочетаний модуляции и кодирования и дают достаточно точный результат.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Серченя, А.А. Сравнительная оценка помехоустойчивого кодирования при использовании разных типов кодов / А. А. Серченя // Инфокоммуникации: 55-я юбилейная конференция аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22 – 26 апреля 2019 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2019. – С. 49 – 50.

2. Липкович, Э.Б. Оценка эффективности каналов распределительной системы стандарта DVB-S2 / Э.Б. Липкович, А.А. Павловский, А.А. Серченя // Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных = Telecommunications: Networks and Technologies, Algebraic Coding and Data Security : материалы международного научно-технического семинара, Минск, ноябрь – декабрь 2019 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; ред. Бобов М. Н. [и др.].– Минск : БГУИР, 2019. – С. 106 – 113.

3. Липкович, Э.Б. Аналитическая модель расчета помехоустойчивости систем с многопозиционными видами модуляции и кодированием по алгоритму Рида–Соломона / Липкович Э.Б., Ковшик В.А., Серченя А.А. // Доклады БГУИР. – 2020. – № 18 (1). – С. 35 – 42. – <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-1-35-42>.