

УДК 004.312.20

Т.А. Дмитриева

РАЗРАБОТКА МНОГОУРОВНЕВОГО МНОГОПороГОВОГО УСТРОЙСТВА ДЕКОДИРОВАНИЯ

Предложен алгоритм многоуровневого декодирования на основе многопорогового декодера. Разработана структурная схема устройства, реализующая данный алгоритм на аппаратном уровне. Получены характеристики многоуровневого многопорогового декодера, которые показывают дополнительный энергетический выигрыш в 0,3 дБ от применения предложенной модификации многопорогового декодера.

Введение. При передаче цифровых данных по каналу с шумом всегда существует вероятность того, что принятые данные будут содержать ошибки. Помехоустойчивое кодирование помогает решить эту проблему, снизив уровень ошибок до приемлемого. В настоящее время существует множество различных методов коррекции ошибок [1]. Среди них можно выделить многопороговый декодер (МПД) [2], решения которого стремятся к решению оптимального декодера, при этом сложность его выполнения линейно зависит от длины кода.

Сложность МПД существенно меньше сложности других методов декодирования, например, сверточный МПД при его аппаратной реализации в некоторых случаях в 1000 и более раз быстрее турбокодов [3].

Цель работы состоит в том, чтобы разработать модификацию алгоритма МПД, которая повысит эффективность его работы. Применение усложненного МПД будет возможно в условиях невысокой скорости передачи в медленных каналах (1–10 Мбит/с).

Теоретические предпосылки модификации МПД. Рассмотрим зависимость вероятности ошибки на бит $P_b(e)$ на выходе МПД от уровня шума E_b/N_0 для кода с $d = 9$, $R = 4/8$, $I = 20$ итераций декодирования, длина кода $n = 3640$, при использовании мягкого модема (рисунок 1). Пунктиром на рисунке показана вероятность ошибки декодирования кода с $d = 9$ оптимальным декодером.

Проанализируем вид представленной зависимости. Пока шум в канале большой (0–1,5 дБ), декодер не справляется и совершает много ошибок, поэтому график снижается очень медленно. Далее шум постепенно уменьшается (1,5–3 дБ), и чем меньше становится отношение E_b/N_0 , тем МПД лучше исправляет ошибки. Потом наступает такой момент, когда при определенном отношении сигнал-шум (на рисунке 1 –

3 дБ) декодер достигает своих лучших возможностей, то есть график достигает области насыщения вероятности ошибки и начинает совпадать с графиком оптимального (переборного) декодера.

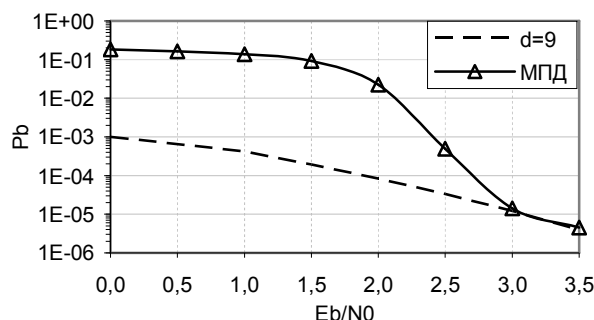


Рисунок 1 – Характеристики мягкого МПД для $d = 9$, $R = 4/8$

Представленный на рисунке 1 вид зависимости ошибки справедлив для любого многопорогового декодера, разница только в значениях вероятности ошибки и отношении сигнал-шум, при котором график достигнет области насыщения ошибки и начнет совпадать с оптимальным.

Многопороговый декодер требует тщательного подбора параметров декодирования (таких, например, как величина порогов на разных итерациях, веса информационных символов). От данных настроек сильно зависит вероятность ошибки на бит на выходе декодера. Сравним результаты декодирования одной и той же информационной последовательности (нулевой) несколькими декодерами с различными настройками.

Как видно из рисунка 2, из канала поступает последовательность информационных бит с некоторыми квантованными весами (число уровней квантования $Q = 16$). Вес бита означает его надежность, то есть чем больше вес, тем выше надежность. Знак "-" говорит о том, что значение бита 0, знак "+" – значение бита 1. Так как по каналу была передана нулевая кодовая последовательность, то видно, что в канале был искажен бит C_{11} .

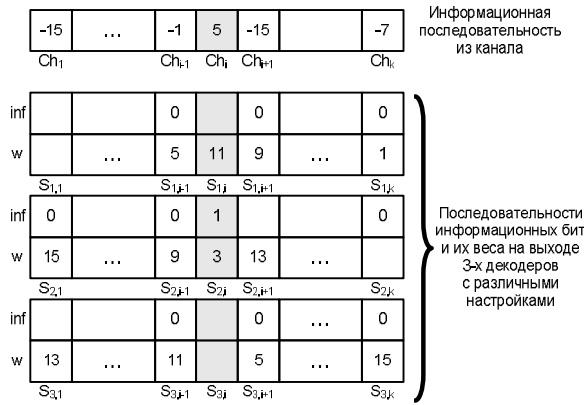


Рисунок 2 – Сравнение результатов декодирования несколькими МПД с различными настройками

Также на рисунке 2 приведены результаты декодирования последовательности Ch, полученной из канала тремя многопороговыми декодерами с различными настройками. На выходе каждого декодера получены массивы информационных бит inf и их веса w. Из рисунка видно, что первый и третий декодеры исправили канальную ошибку и приняли решение о том, что S_i символ – это 0, а второй декодер не смог исправить этот бит. Причем всеми тремя декодерами были вынесены разные решения о надежности битов.

Разработка многоуровневой модификации многопорогового декодера. Очевидно, что декодеры с разными настройками ошибаются в разных битах. На основе данного свойства можно предложить следующий метод улучшения характеристик МПД. Для повышения надежности решений можно сделать "голосование по большинству" (если больше половины декодеров приняло решение, что бит равен 0, то за результирующий бит берем 0, если 1 – то 1) для каждого бита среди решений всех трех декодеров. Тогда из примера (рисунок 2) получим, что итоговое значение бита S_i равно 0 (рисунок 3).

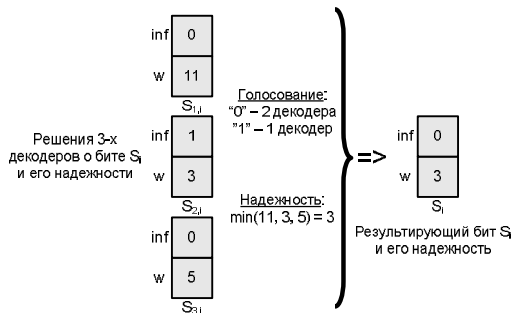


Рисунок 3 – "Голосование по большинству" для бита S_i

Кроме того, если для полученной последовательности принять за надежность i-го бита

минимальную надежность по всем i-м битам всех декодеров и попробовать еще раз декодировать дополнительным декодером, то эффективность должна еще повыситься.

Рассмотрим общую схему предлагаемого алгоритма на основе многопорогового декодера (МПД), изображенную на рисунке 4.

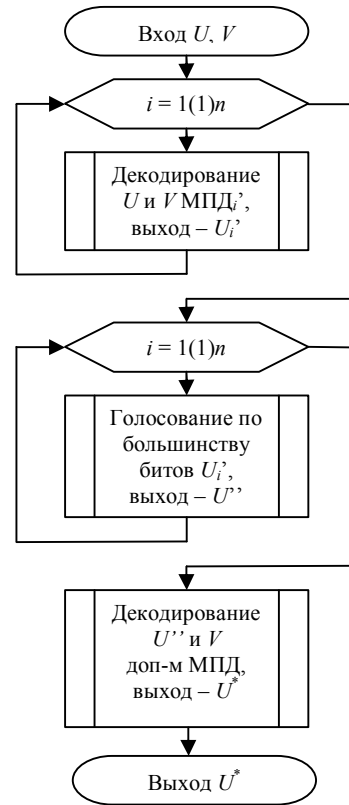


Рисунок 4 – Многоуровневая модификация алгоритма МПД

На вход алгоритма поступают U и V – последовательности информационных и проверочных бит, принятых из канала связи. Число используемых блоковых МПД с различными настройками обозначено n. Поступившую из канала последовательность декодируем n многопороговыми декодерами (МПД_i), каждый из которых имеет различные настройки (количество итераций декодирования, весовые коэффициенты, пороги декодирования). На выходе получаем i декодированных сообщений, обозначенных как U_i, i = 1(1)n. Далее среди каждого бита u_{i,j}, j = 1(1)blockLen (где blockLen – длина информационной части сообщения) производится голосование по большинству, на основе которого формируется бит u_j. На выходе имеем последовательность бит U*. Данное сообщение еще раз декодируется дополнительным блоковым многопороговым декодером, в качестве проверочных символов берутся проверочные биты V,

полученные из канала. На выходе модифицированного алгоритма на основе многопорогового декодера имеем декодированную информационную последовательность бит U^* .

Предложенный алгоритм, основанный на многопороговом декодере, может быть реализован как на программном, так и на аппаратном уровне. Рассмотрим устройство многоуровневого многопорогового декодера.

Устройство многоуровневого многопорогового декодера. Структурная схема устройства, позволяющего улучшить характеристики декодирования МПД, представлена на рисунке 5.

Устройство работает следующим образом.

На вход каждого из N многопороговых декодеров с различными настройками (блоки $1_1 -$

1_N) подается последовательность бит из канала с некоторой надежностью. Все N декодеров выносят мягкие решения относительно декодируемых символов.

Полученные N мягких решений поступают на вход блока 2, который выделяет из мягкого решения для каждого бита его жесткое значение и его надежность. Жесткие значения битов заносятся в регистр 3 (блоки $3_1 - 3_N$), а надежность битов – в регистр 4 (блоки $4_1 - 4_N$).

Данные со всех регистров 3 попадают в блок подсчета голосов 6, который вычисляет количество решений, принятых N МПД с различными настройками, о том или ином значении для каждого бита.

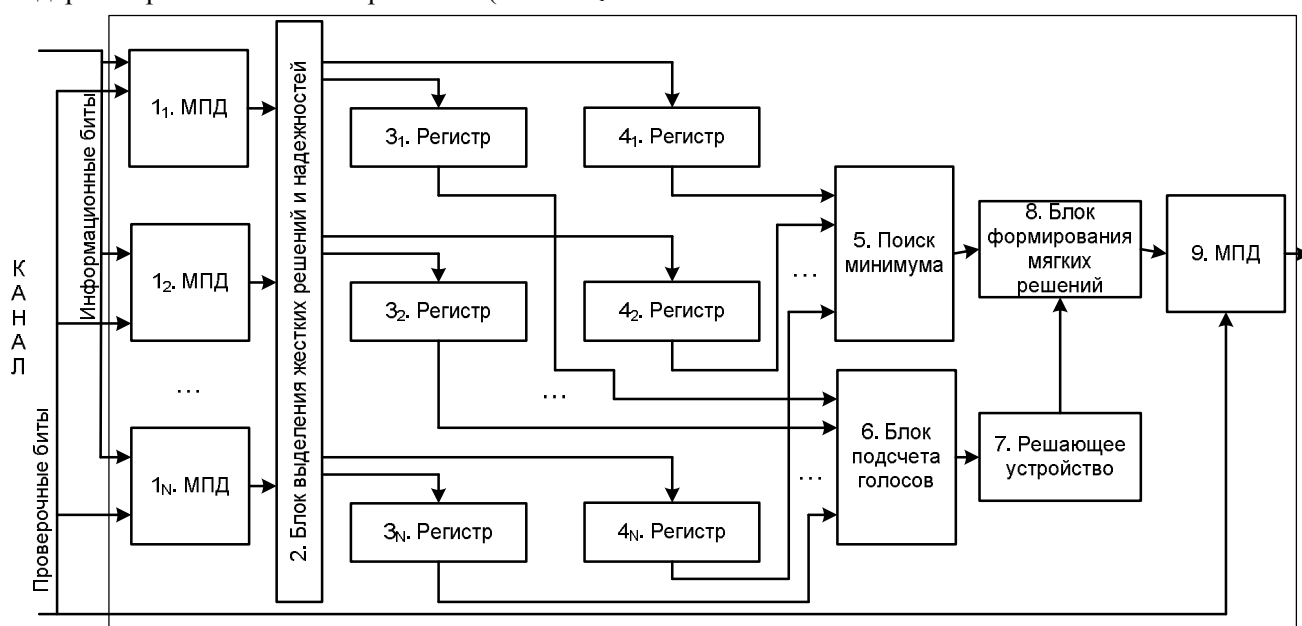


Рисунок 5 – Структурная схема многоуровневого многопорогового декодера

На основе вычисленного значения количества голосов о каждом бите блок 7 (решающее устройство) принимает решение относительно нового значения каждого бита.

С регистров 4 данные поступают в блок 5 (поиск минимума), в котором для каждого бита блока определяется его надежность как минимальное значение среди надежностей этого бита, принятых всеми N декодерами.

Данные с блоков 5 и 7 подаются на вход блока формирования мягких решений 8, который объединяет значения. На выходе получаем новые, скорректированные мягкие решения.

Полученные решения снова передаются для декодирования МПД на вход блока 9. В качестве проверочных символов берутся значения, полученные из канала.

Следует заметить, что разработанный многоуровневый метод декодирования можно при-

менять не только для многопороговых декодеров, но и для любых схем с мажоритарным решением относительно декодируемых символов.

Положительный эффект, а именно повышение эффективности, достигается за счет того, что на основе решений нескольких декодеров выбирается наиболее точное решение о значении декодируемых битов.

Рассмотрим результаты моделирования данного метода, чтобы убедиться в том, что характеристики эффективности будут улучшены.

Экспериментальные характеристики многоуровневой модификации многопорогового декодера. В данном пункте представлены зависимости вероятности ошибки на бит $P_b(e)$ на выходе многоуровневого МПД от уровня шу-

ма E_b/N_0 в канале связи с аддитивным белым гауссовским шумом при использовании мягкого модема с двоичной фазовой модуляцией.

На рисунке 6 представлены характеристики многоуровневого МПД (МУМПД) для кода с кодовой скоростью $R=4/8$, минимальным кодовым расстоянием $d=9$, длиной кодового ограничения $n=3640$ при использовании мягкого модема. В качестве составляющих МУМПД были взяты пять блоковых МПД с различными настройками весов и порогов, число итераций $I=20$. Пунктиром на рисунке показана вероятность ошибки декодирования с $d=9$ оптимальным декодером.

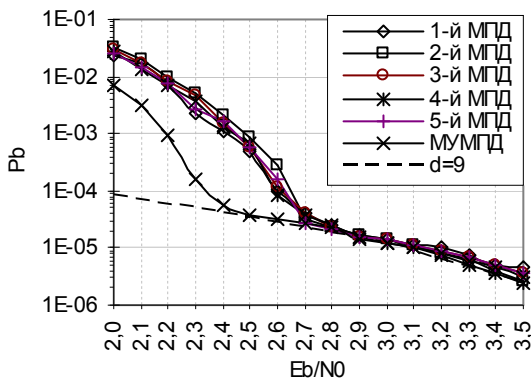


Рисунок 6 – МУМПД кода с $R=4/8$, $d=9$

На рисунке 7 показана характеристика МУМПД для кода с кодовой скоростью $R=5/10$, минимальным кодовым расстоянием $d=11$, длиной кодового ограничения $n=7210$ при использовании мягкого модема. Число итераций $I=20$ для каждого из составляющих МПД.

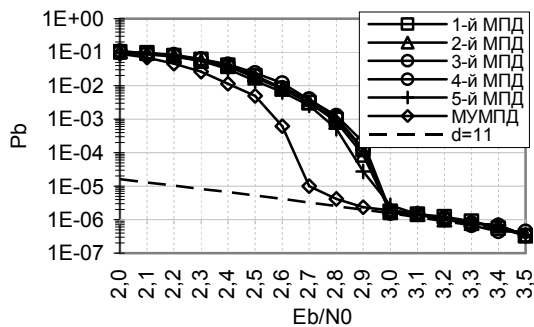


Рисунок 7 – МУМПД кода с $R=5/10$, $d=11$

На следующем рисунке (рисунок 8) представлена характеристика многоуровневого МПД для кода с $R=2/4$, $d=13$, $n=3564$, $I=10$, мягкий модем.

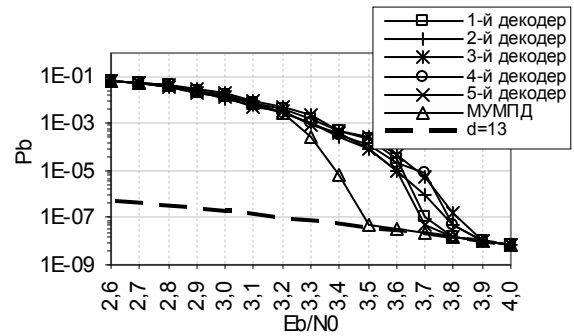


Рисунок 8 – МУМПД кода с $R=2/4$, $d=13$

Характеристика многоуровневого МПД для кода с $R=3/6$, $d=7$, $n=10998$, $I=10$, мягкий модем, приведена на рисунке 9.

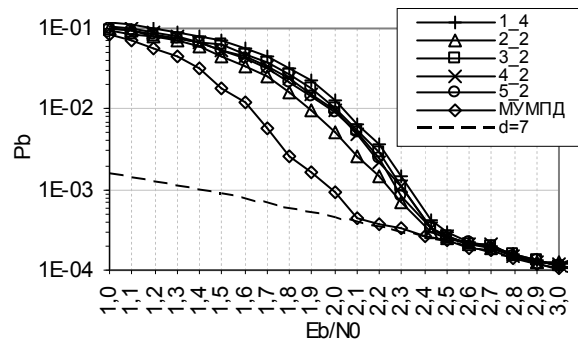


Рисунок 9 – МУМПД кода с $R=3/6$, $d=7$

Как видно из приведенных рисунков, применение предложенного многоуровневого метода с использованием пяти многопороговых декодеров для кодов с кодовой скоростью $R=1/2$ при различных значениях кодового расстояния d дает примерно одинаковый эффект, равный 0,3 дБ.

Исследование влияния параметров на работу многоуровневого МПД. Рассмотрим, как влияют на работу и сложность многоуровневого МПД изменение числа используемых при голосовании декодеров.

Проведем исследование на МУМПД для кода с кодовой скоростью $R=2/4$, минимальным кодовым расстоянием $d=11$, длиной кодового ограничения $n=3620$ при использовании мягкого модема. В качестве составляющих МУМПД возьмем пять блоковых МПД с различными настройками весов и порогов, число итераций $I=10$.

Из рисунка 10 видно, что МУМПД с двумя декодерами не дает никакого результата, применение трех декодеров дает выигрыш, равный 0,1 дБ, четырех – 0,2 дБ, пяти – 0,3 дБ. Дальнейшее изменение числа составляющих декодеров с пяти до девяти позволяет получить увеличение выигрыша до 0,4 дБ.

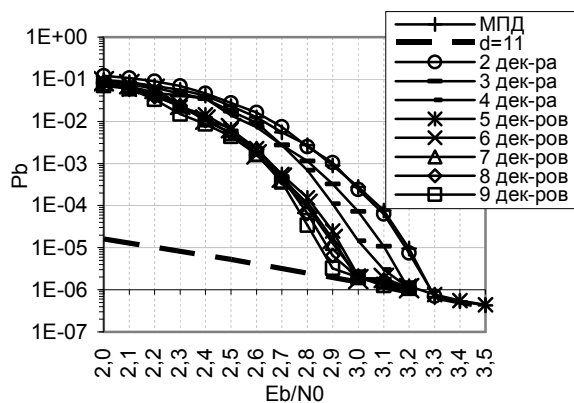


Рисунок 10 – Влияние числа составляющих декодеров на характеристики МУМПД

Выбор числа декодеров, равно пяти, обоснован следующим. При использовании менее пяти декодеров, эффект от предложенного многоуровневого метода незначителен. При применении пяти декодеров проведенные исследования показывают улучшение в 0,3 дБ. Увеличение числа декодеров может быть проведено и далее. Однако не следует забывать о том, что чем большее число декодеров используется, тем выше становится сложность предложенного многоуровневого метода декодирования. При этом энергетический выигрыш для числа декодеров, превышающих пять, больше всего лишь на 0,1 дБ.

Рассчитаем количество операций $N_{\text{МУМПД}}$, требуемых для декодирования одного информационного бита многоуровневого блочного МПД.

Алгоритм МУМПД включает в себя следующие операции:

- декодирование каждым составляющим декодером одной и той же последовательности бит;
- поиск минимума (операция сравнения) среди значений конкретного бита для каждого из составляющих МПД;
- подсчет числа голосов;
- операция коррекции бита (при необходимости);
- декодирование заключительным декодером.

Таким образом

$$N_{\text{МУМПД}} \approx \sum_{i=1}^{N_d+1} N_{\text{МПД}_i} + N_d + N_d + 1 \approx \sum_{i=1}^{N_d+1} N_{\text{МПД}} + 2 \cdot N_d + 1, \quad (1)$$

где $N_{\text{МПД}_i}$ – количество операций, необходимых для декодирования одного информационного

бита каждого из составляющих МУМПД декодеров и заключительного декодера, N_d – число составляющих декодеров.

Произведем расчет изменения сложности МУМПД с увеличением числа используемых декодеров. Используем тот же многоуровневый декодер, что и для данных на рисунке 10. Исходные данные: $I = 10$, $d = 11$. При расчете сложности составляющих МПД (в рассматриваемом примере у них одинаковое число итераций) будем использовать формулу $N_{\text{МПД}_i} = (I + 1)(d + 2) = (10 + 1)(11 + 2) = 143$ операции.

Из таблицы видно, что сложность многоуровневого МПД по сравнению с МПД увеличивается пропорционально числу используемых декодеров ($N_d + 1$).

N_d	$N_{\text{МУМПД}}$, операций	$N_{\text{МУМПД}} / N_{\text{МПД}}$
2	$= 3 \cdot 143 + 2 \cdot 3 + 1 = 436$	3,05
3	$= 4 \cdot 143 + 2 \cdot 4 + 1 = 581$	4,07
4	$= 5 \cdot 143 + 2 \cdot 5 + 1 = 726$	5,08
5	$= 6 \cdot 143 + 2 \cdot 6 + 1 = 871$	6,09
6	$= 7 \cdot 143 + 2 \cdot 7 + 1 = 1016$	7,10
7	$= 8 \cdot 143 + 2 \cdot 8 + 1 = 1161$	8,12
8	$= 9 \cdot 143 + 2 \cdot 9 + 1 = 1306$	9,13
9	$= 10 \cdot 143 + 2 \cdot 10 + 1 = 1451$	10,15

Заключение. Предложена многоуровневая модификация многопорогового декодера. Рассмотрена структурная схема устройства, реализующая данный алгоритм на аппаратном уровне. Получены характеристики многоуровневого многопорогового декодера, которые показывают дополнительный энергетический выигрыш в 0,3 дБ от применения предложенной модификации. Проведено исследование влияния параметров на работу многоуровневого МПД. Сделан вывод о том, что оптимальное число составляющих декодеров равно пяти.

Библиографический список

1. Дмитриева Т.А. Обзор помехоустойчивых кодов и алгоритмов их декодирования / Математическое и программное обеспечение информационных систем: межвуз. сб. науч. тр. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – С. 47-52.
2. Золотарёв В.В. Теория и алгоритмы многопорогового декодирования. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 279 с.
3. Золотарёв В.В., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы: справочник / под. ред. чл.-кор. РАН Ю.Б. Зубарева. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 126 с.