

рега с маской.

При этом для получения корректных результатов координатной привязки с применением нечетких масок необходимо проанализировать возможные значения яркости пикселей суши и воды в разное время суток и в различных регионах земного шара, после чего составить библиотеку функций принадлежности яркости пикселей нечетким множествам «Вода» и «Суша», конкретных для каждого региона и времени суток. Следует отметить, что если использовать одни и те же функции принадлежности для всех времен суток и регионов Земли, никаких преимуществ нечетких масок перед бинарными уже не будет.

Библиографический список

1. Еремеев В.В., Егошкин Н.А., Москвитин А.Э. Координатная привязка изображений от геостационарных спутников по контурным точкам диска Земли // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2007. № 22. С. 10-17.
2. Еремеев В.В., Козлов Е.П. Автоматическая координатная привязка изображений от геостационарных космических систем наблюдений Земли по электронным картам // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2008. № 23. С. 14-20.
3. Злобин В.К., Еремеев В.В. Обработка аэрокосмических изображений. М.: Физматлит. 2006. 288 с.
4. Демидова Л.А., Кураковский В.В., Пылькин А.Н. Принятие решений в условиях неопределенности. М.: Горячая линия-Телеком. 2012. 288 с.
5. Демидова Л.А., Нестеров Н.И., Тишкин Р.В. Сегментация спутниковых изображений с применением аппарата теории нечетких множеств // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2012. № 41. С. 11-17.
6. Демидова Л.А., Титов С.Б. Подход к проблеме нечеткой кластеризации в условиях неопределенности выбора целевой функции // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2009. № 29. С. 54-60.
7. Демидова Л.А., Тишкин Р.В., Юдаков А.А. Разработка ансамбля алгоритмов кластеризации на основе матриц подобия меток кластеров и алгоритма спектральной факторизации // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 4-1 (46). С. 9-17.
8. Демидова Л.А., Тишкин Р.В., Труханов С.В. Решение задачи идентификации гиперспектральных характеристик объектов с использованием системы интеллектуальной обработки данных гиперспектральной съемки // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 47. С. 10-18.
9. Матов Г.Н., Тишкин Р.В., Ушенкин В.А., Юдаков А.А. Применение нечетких мер подобия в задаче совмещения изображений поверхности земли // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 2 (44). С. 18-26.
10. Тишкин Р.В. Мягкие вычисления в задачах сегментации космических изображений // Цифровая обработка сигналов. 2010. № 3. С. 25-29.
11. Леоненков А. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург. 2003. 736 с.: ил.
12. Таганов А.И. Применение нечетких множеств для формализации процессов анализа и идентификации важности рисков программного проекта // Системы управления и информационные технологии. 2007. № 4 (30). С. 46-51.
13. Russo F., Ramponi G. Working on Image Data Using Fuzzy Rules // Proc. Sixth European Signal Processing Conf. EUSIPCO-92. Bruxelles. 1992. P. 1413-1416.
14. Solaiman B., Fiset R., Cavayas F. Automatic Road Extraction Using Fuzzy Mask Concepts // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings. 1998. P. 894-896.
15. Van der Weken D., Nachtegaal M., Kerre E.E. An overview of similarity measures for images // Proceedings of ICASSP 2002 (IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech and Signal Processing). Orlando. USA. 2002. P. 3317-3320.

УДК 621.391

В.Т. Као, Г.В. Овечкин

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОУРОВНЕВОГО МНОГОПороГОВОГО ДЕКОДЕРА САМООрТОГОНАЛЬНЫХ КОДОВ

Рассмотрены варианты реализации многоуровневого многопорогового декодера самоортогональных кодов и исследована их эффективность. Предложены новые модификации данных методов, позволяющие приблизить область эффективной работы декодера к пропускной способности канала на несколько десятых дБ за счет лучшего учета информации о надежности декодированных символов решающим устройством, чем ранее. Даны рекомендации по выбору наилучшего алгоритма работы решающего устройства и параметров многоуровневого многопорогового декодера.

Ключевые слова: помехоустойчивое кодирование, самоортогональный код, многопороговый декодер, многоуровневый многопороговый декодер.

Введение. Сравнение алгоритмов декодирования помехоустойчивых кодов [1] показывает, что самые эффективные алгоритмы, например реализующие алгоритмы декодирования Витерби (АВ) и методы декодирования турбо кодов (ТК) для длинных кодов, слишком сложны. Сложность оптимального АВ растет экспоненциально с ростом конструктивной длины кода K , в связи с чем на практике данный метод обычно применяется для декодирования кодов с $K \leq 9$, обладающих невысокой эффективностью [2]. Сложность декодирования ТК определяется сложностью методов декодирования составляющих кодов и количеством итераций декодирования. Она также оказывается слишком большой для их применения в составе высокоскоростных систем связи [2]. Одним из наиболее эффективных декодеров и, вместе с тем, достаточно простым для реализации является многопороговый декодер (МПД) самоортогональных кодов (СОК) [3]. Сложность МПД пропорциональна кодовому расстоянию применяемых кодов и числу итераций декодирования. Эта сложность при типичных параметрах кодера и декодера оказывается в сотни раз меньше сложности декодеров турбо кодов [2]. При этом обычный МПД немного уступает по эффективности декодерам ТК. Для повышения эффективности МПД можно использовать подходы, основанные, например, на применении каскадирования [5, 6]. Но при этом требуется внести изменения в систему связи как на стороне передатчика, так и на стороне приемника, что не всегда возможно. В [7] предложен метод улучшения эффективности декодирования СОК за счет декодирования принятого из канала потока данных несколькими составляющими МПД с различными настройками с последующим формированием результата декодирования на основе голосования по большинству. Такой декодер был назван многоуровневым МПД [7]. Заметим, что данная схема декодирования была недостаточно проработана и ее эффективность можно несколько улучшить.

Цель работы: исследование и улучшение эффективности декодирования самоортогональных кодов с помощью многоуровневого МПД.

Схема параллельного соединения МПД. Сначала рассмотрим вариант реализации многоуровневого МПД, использующего только параллельное соединение нескольких МПД (рисунок 1). В таком декодере мягкие решения демодулятора посылаются параллельно на N составляющих МПД. Все N декодеров выносят свои решения относительно декодируемых символов, в результате чего получаются N декодированных сообщений, поступающих на устройство выбора. Данное устройство

формирует результат декодирования каждого бита сообщения по большинству голосов.

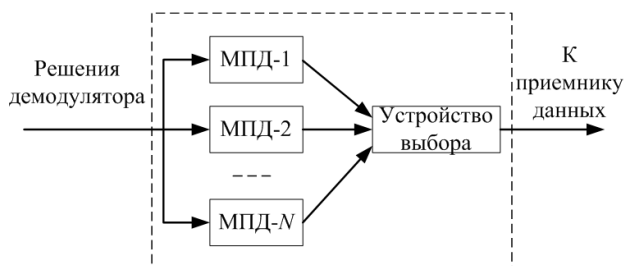


Рисунок 1 – Параллельное соединение МПД

Для получения наибольшей эффективности схемы желательно, чтобы все N МПД обладали примерно одинаковой, близкой к наилучшей, эффективностью, и, кроме этого, параметры декодеров должны достаточно отличаться друг от друга для того, чтобы оставшиеся комбинации ошибок на выходе составляющих декодеров с большой вероятностью были разными.

Рассмотрим эффективность данной системы в канале с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) при использовании двоичной фазовой модуляции (BPSK) и 16-ти уровневом квантовании решения на выходе демодулятора.

На рисунке 2 представлены полученные с помощью разработанных программных средств результаты моделирования данной системы для блочного СОК с кодовой скоростью $R = 2/4$, минимальным кодовым расстоянием $d = 9$ и длиной блока $n = 20748$.

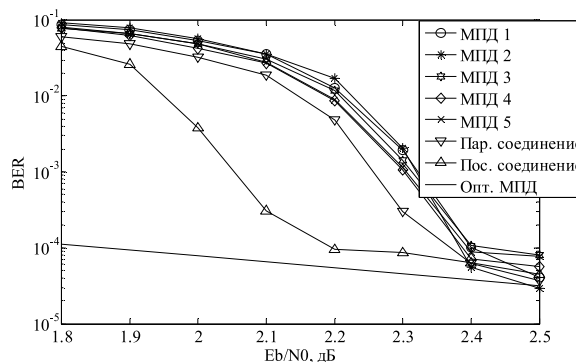


Рисунок 2 – Эффективность параллельной схемы декодирования

При получении графиков использовалось пять МПД с разными параметрами весов и порогов, число итераций $I = 15$. Их характеристики показаны кривыми «МПД 1»...«МПД 5». Из графиков видно, что все пять декодеров имеют сопоставимую эффективность. Многоуровневый МПД (кривая «Пар. соединение») позволяет приблизить границу эффективной работы декодера в области больших шумов к пропускной способности канала примерно

на 0,1 дБ по сравнению с обычным МПД. Отметим, что в области малых шумов выигрыш увеличить не удастся, поскольку в этой области каждый составляющий МПД уже работает почти как оптимальный декодер для используемого кода (кривая «Опт. МПД»), эффективность которого улучшить невозможно. Также заметим, что сложность параллельной схемы по сравнению со сложностью обычного МПД увеличивается в несколько раз, но все равно остается меньше сложности других сопоставимых по эффективности алгоритмов.

Схема последовательно-параллельного соединения МПД. Рассмотрим эффективность многоуровневого МПД, в котором после устройства выбора используется еще один МПД. Такой декодер представлен на рисунке 3. В данном случае дополнительно с помощью внешнего МПД осуществляется декодирование полученного после устройства выбора сообщения. Это позволяет еще немного повысить эффективность декодирования.

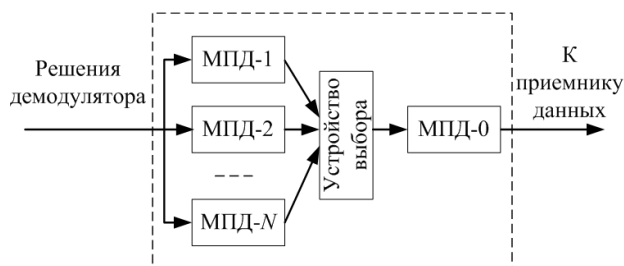


Рисунок 3 – Последовательно-параллельное соединение МПД

Результаты моделирования схемы последовательно-параллельного соединения МПД, состоящей из шести МПД для тех же условий, представлены на рисунке 2 кривой «Пос. соединение». Видно, что при подключении еще одного МПД после устройства выбора получается дополнительный выигрыш до 0,2 дБ по сравнению с параллельной схемой. При этом сложность реализации увеличивается всего на 20 %.

Влияние числа составляющих декодеров на эффективность и сложность многоуровневого МПД. Характеристики параллельной схемы при использовании от трех до восьми составляющих МПД в тех же условиях представлены на рисунке 4. Из рисунка видно, что при использовании трех и четырех декодеров получается выигрыш порядка 0,05 дБ, при применении пяти декодеров выигрыш составляет около 0,1 дБ. При увеличении числа декодеров до восьми улучшения практически не наблюдается. Таким образом, в данной схеме целесообразно использование пяти декодеров. Сложность декодера по сравнению с базовым МПД увеличивается пропорционально числу составляющих декодеров.

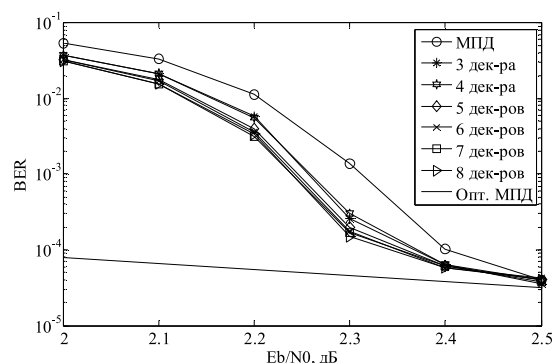


Рисунок 4 – Эффективность параллельной схемы декодирования

На рисунке 5 представлены характеристики последовательно-параллельной схемы при использовании от трех до восьми МПД декодеров на первом этапе перед устройством выбора. Из рисунка видно, что при использовании трех и четырех декодеров на первом этапе получается дополнительный выигрыш 0,2 дБ. Увеличение декодеров до пяти позволяет получить выигрыш 0,3 дБ. Увеличение числа декодеров можно проводить и далее, но это увеличивает сложность декодера, а дополнительный выигрыш оказывается незначительным.

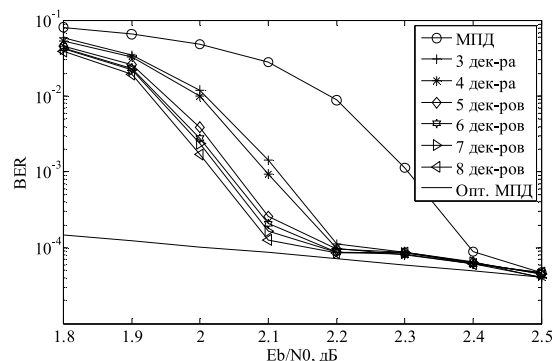


Рисунок 5 – Характеристики последовательно-параллельной схемы декодирования

Итак, последовательно-параллельная схема многоуровневого МПД обеспечивает на 0,2 дБ лучшие характеристики по сравнению к параллельной схемой и на 0,3 дБ лучшие по сравнению с обычным МПД. Число декодеров влияет на характеристики последовательно-параллельной схемы так же, как и на характеристики параллельной схемы. В схемах целесообразно использовать пять декодеров перед устройством выбора, что дает хороший результат при обеспечении невысокой сложности реализации схемы.

Влияние алгоритма работы устройства выбора. Ранее была рассмотрена эффективность последовательно – параллельной схемы при использовании устройством выбора мажоритарного подхода для определения значения битов сообщения. При таком подходе устройство выбора использует толь-

ко информационную часть, полученную от составляющих МПД, и выбирает каждый бит по большинству голосов. Основной шаг выбора заключается в том, что для произвольно взятого символа u_i вычисляется функция правдоподобия L_i , зависящая от символов $u_{i,k}$, полученных от N внутренних декодеров

$$L_i = \sum_{k=1}^N (2u_{i,k} - 1). \quad (1)$$

Если $L_i > 0$, то символ u_i равен 1, в противном случае $u_i = 0$.

Вместе с тем, можно предложить несколько вариантов определения такого решения, использующих, в том числе информацию о надежности решений относительно декодированных символов от внутренних МПД. Ниже предложены и исследованы алгоритмы получения решения относительно декодированных символов на основе решения всех составляющих МПД. При этом рассмотрены такие алгоритмы работы устройства выбора, как выбор символа с максимальной надежностью и мажоритарный выбор с учетом веса декодированного символа.

Сначала рассмотрим первый алгоритм, когда **устройство выбора определяет информационные биты по символу с максимальной надежностью**. Под надежностью декодированного символа будем понимать значения суммы на пороговом элементе для этого символа после декодирования. Очевидно, что чем ближе эта сумма к нулю, тем менее надежным является этот символ, и наоборот, чем больше значение модуля этой суммы, тем более надежным является символ. Обозначим через $w_{i,k}$ значение надежности i -го информационного символа, полученное от k -го внутреннего МПД. Для получения значения информационного символа u_i сравнивают N значений надежности $w_{i,k}$ и выбирают значение u_i , равное значению символа от декодера, у которого самое большое значение надежности:

$$u_i = u_{i,m}, \text{ где } m = \arg \max_k (w_{i,k}). \quad (2)$$

Характеристики схем параллельного и последовательно-параллельного многоуровневого МПД при выборе информационного символа по максимальной надежности для блочного СОК с кодовой скоростью $R = 2/4$, кодовым расстоянием $d = 9$, длиной кода $n = 20748$ при пяти параллельно включенных МПД с $I = 15$ итерациями декодирования представлены на рисунке 6 кривыми «Пар. макс» и «Пос. макс». Эти графики получены для канала с АБГШ при использовании модуляции типа BPSK и 16-ти уровневое квантования решения демодулятора.

Для сравнения кривой «МПД» на рисунке

представлена зависимость вероятности ошибки обычного МПД для этого же кода, кривой «Опт. МПД» представлена зависимость вероятности ошибки оптимального декодера для используемого СОК, а кривыми «Пар. жесткое» и «Пос. жесткое» представлены характеристики параллельной и последовательно-параллельной схем при использовании в них мажоритарного алгоритма работы устройства выбора. Из графика видно, что выбор информационного бита по максимальной надежности в схеме параллельного соединения МПД не дает выигрыша по сравнению с голосованием по большинству, а в схеме последовательно-параллельного соединения получается выигрыш порядка 0,05 дБ.

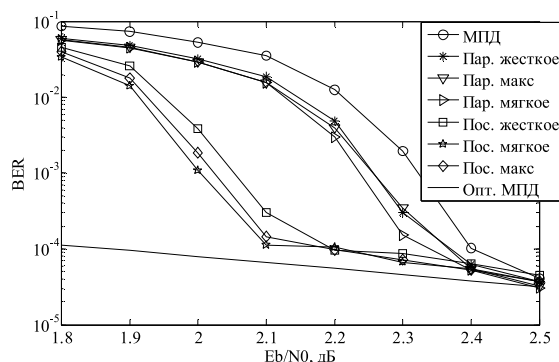


Рисунок 6 – Характеристики многоуровневого МПД при различных алгоритмах выбора информационного символа

В основе второго алгоритма лежит **мажоритарный выбор информационного бита с учетом всех надежностей, сформированных составляющими декодерами относительно декодированного символа**. В данном случае на вход устройства выбора поступает N решений $u_{i,k}$ составляющих МПД относительно i -го информационного символа и их надежности $w_{i,k}$. Для каждого бита u_i устройство выбора вычисляет функцию правдоподобия L_i

$$L_i = \sum_{k=1}^N (2u_{i,k} - 1)w_{i,k}. \quad (3)$$

Если $L_i > 0$, то символ u_i принимает значение 1, иначе $u_i = 0$.

Характеристики схем, использующих данный алгоритм работы устройства выбора, для тех же условий, что и ранее, представлены на рисунке 6 кривыми «Пар. мягкое» и «Пос. мягкое». Из сравнения эффективности этих двух схем со схемами, использующими ранее рассмотренные алгоритмы работы устройства выбора, следует, что при использовании мажоритарного выбора информационного бита с учетом всех надежностей, сформированных составляющими декодерами, получается еще немного (до 0,05 дБ) лучшая эффективность.

Эффективность многоуровневого МПД для

кода с большим кодовым расстоянием. Для систем связи, требующих более высокую достоверность декодирования, нужен код с большим кодовым расстоянием. Рассмотрим эффективность предложенных схем, использующих параллельно пять МПД для СОК с кодовой скоростью $R = 8/16$ и длиной кода $n = 63472$ битов при значении кодового расстояния $d = 17$ и использовании $I = 13$ итераций декодирования в тех же условиях, что и ранее. Эти характеристики представлены на рисунке 7 кривыми с названиями, совпадающими с названиями на рисунке 6. Отметим, что схема последовательно-параллельного соединения МПД дает выигрыш, равный 0,3 дБ, и при большем значении кодового расстояния.

Закключение. Важнейшим достоинством МПД алгоритмов наряду с высокой эффективностью оказывается возможность их чрезвычайно высокого быстродействия как при программной, так и при аппаратной реализации. Это позволяет комбинировать несколько МПД в одной схеме декодирования для получения большего выигрыша кодирования при сохранении невысокой сложности реализации по сравнению с другими методами коррекции ошибок.

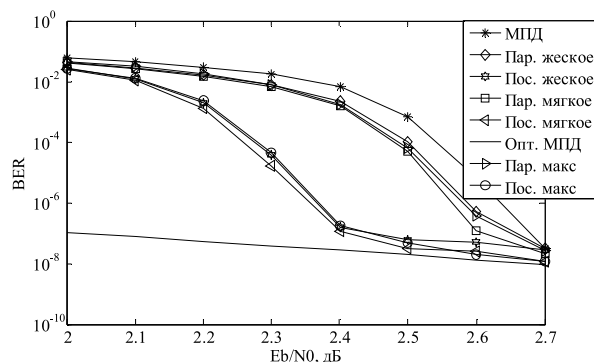


Рисунок 7 – Характеристики многоуровневого МПД при различных алгоритмах выбора информационного бита для кода с $d = 17$

Предложенные в работе алгоритмы работы устройства выбора, определяющие значения ин-

формационного символа для внешнего многопорогового декодера многоуровневого МПД, позволяют практически без увеличения сложности реализации приблизить область эффективной работы декодера к пропускной способности канала на несколько десятых долей дБ. Учитывая, что базовый МПД уже позволял эффективно исправлять ошибки при очень высоком уровне шума, это является серьезным результатом.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №14-07-00824) и гранта Президента РФ (грант МД-639.2014.9).

Библиографический список

1. Зубарев Ю.Б., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование в цифровых системах передачи данных // Электросвязь. М., 2008. №12. С. 2-11.
2. Золотарев В.В., Овечкин Г.В. Сложность реализации эффективных методов декодирования помехоустойчивых кодов // 6-я межд. конф. и выст. «Цифровая обработка сигналов и ее применение». М.: 2004. Том 1. С. 220-221.
3. Золотарев В.В., Зубарев Ю.Б., Овечкин Г.В. Многопороговые декодеры и оптимизационная теория кодирования. – М.: Горячая линия – Телеком, 2012. 239 с.
4. Гринченко Н.Н., Золотарев В.В., Овечкин Г.В., Овечкин П.В. Многопороговое декодирование в каналах с многопозиционной модуляцией // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2006. № 19. С. 179-182.
5. Овечкин Г.В. Методы улучшения эффективности многопорогового декодера самоортогональных кодов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2004. № 14. С. 54-58.
6. Овечкин Г.В., Овечкин П.В. Использование не двоичного многопорогового декодера в каскадных схемах коррекции ошибок // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2009. № 30. С. 7-12.
7. Дмитриева Т.А. Разработка многоуровневого многопорогового устройства декодирования // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2007. № 22. С. 73-78.

УДК 612.172.2

Т.А. Витязева, А.А. Михеев

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В ЗАДАЧАХ АНАЛИЗА ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА

Предложено использовать многоскоростную обработку сигналов для выделения медленноволновых составляющих ритма сердца на основе цифровой фильтрации в режиме реального времени. Проектируется и подробно описывается многоступенчатая структура понижения частоты дискрети-