

Описание демоверсии программы **MTDDEMO-2016**, иллюстрирующей принципы работы многопорогового декодера (МПД).

Программа представляет собой exe-модуль, работающий под управлением операционной системы Windows, который демонстрирует работу многопорогового декодера (МПД) в случае его использования для декодирования блокового кода длины $n=2000$ бит с кодовой скоростью $R=1/2$ и минимальным кодовым расстоянием $d=23$.

Перед запуском программы необходимо предварительно распаковать стандартными программными средствами zip-файл, переписанный с первой страницы "О методе" веб-сайта www.mtdbest.ru. Занимаемая память на диске менее 100 Кбайт.

После этого программа запускается двойным щелчком «мыши» на модуле **mtddemo-2016.exe**.

Программа осуществляет имитацию непрерывной передачи и последующего декодирования бесконечной последовательности кодовых блоков и может быть завершена в любой момент, как обычно для приложений Windows, нажатием на "x" в верхнем правом углу экранного окна.

Выбрать удобный для наблюдения темп работы демонстрационной модели можно, нажимая несколько раз клавишу «g» ("greater") для ускорения ее работы и клавишу «l» ("less") (обе – английский регистр) для замедления работы модели.

Работа программы начинается с формирования на экране дисплея трех цветных блоков массивов данных, каждый из которых состоит их 1000 квадратиков, соответствующих двоичным данным принятого кода, в информационных и проверочных символах которого содержатся точно по 1000 битов. Первый верхний блок под названием “**difference**” является контрольным и его роль будет видна из дальнейшего описания.

Демонстрационная программа начинает свою работу с имитации передачи данных по каналу связи с большим уровнем шума. Сначала заполняется средний информационный 1000-битовый блок с именем «**information**». По мере его заполнения, т. е. передачи данных, меняется цвет заполнения соответствующих квадратиков. Ошибки при передаче информационных битов отмечены красным цветом.

Затем идет заполнение принятыми контрольными битами самого нижнего, проверочного блока с именем «**Syndrome**». Ошибки передачи в его проверочных символах отмечены синим цветом.

Затем, как это всегда делается в линейных кодах, вычисляется синдром принятого сообщения. Именно он нужен при коррекции ошибок, т. к. заполняющие его нули и единички зависят только от ошибок передачи кодового блока. Результат вычисления сохраняется в нижней блоке «**syndrome**». Единички синдрома, определяемые ошибками в проверочных символах, по-прежнему остаются синими. А те единицы синдрома, т.е. квадратики нижнего массива данных, которые возникли из-за ошибок в информационных символах, окрашены в красный цвет. Таким образом, из представления массива синдрома еще перед началом процесса декодирования ясно видно, что основное число единичек в массиве синдрома связано с ошибками в информационных символах кода, которые и надо исправить.

После вычисления синдрома начинается главная многоходовая попытка декодирования всех информационных символов кода. Целью декодирования является исправление всех информационных ошибок, находящихся в среднем массиве демонстрационной картины, при высоком уровне шума в канале. В предлагаемом варианте демодекодера имитируется передача при весьма высоком уровне шума двоичного симметричного канала без памяти (ДСК) со средней вероятностью ошибки около 0,06. Это очень высокая вероятность ошибки для кодовой скорости $R=1/2$, недоступная декодерам алгебраических кодов, декодерам, работающим в соответствии с алгоритмом Витерби и последовательным декодерам сверточных кодов.

Рассматриваемый ниже декодер, как можно будет увидеть по окончательным результатам его работы, совсем не совершает никаких ошибок даже при выбранном очень высоком уровне шума. Он исправляет все ошибки при не более, чем 10 попытках последовательной коррекции информации. Но отсутствие итоговых ошибок за длительный, но очень ограниченный период работы декодера в данной демоверсии не является доказательством его всегда безошибочной работы. Таким образом, предлагаемая вниманию специалистов демоверсия не может быть использована для набора статистики ошибок алгоритма МПД даже для данных конкретных параметров модели канала. Этот демомультик только иллюстрирует успешный процесс строгого приближения последовательности решений МПД к решению оптимального декодера (ОД) при каждой попытке изменения декодируемых информационных символов кода.

Целью выполненных настроек в модели демодекодера является иллюстрация важности точного выбора параметров всех элементов схемы декодера, что только и может обеспечить успех в реализации идеи многократного уточнения решений декодера, реализующего МПД алгоритм. Подчеркнем также, что используемый в МПД код также должен быть построен в соответствии со всеми строгими требованиями и ограничениями, обеспечивающими минимальный уровень размножения ошибок (РО) декодирования в мажоритарных схемах.

Рассмотрим основной процесс декодирования. Он начинается с появления одного черного квадратика в среднем информационном регистре и более двадцати таких же квадратиков (ячеек) в нижнем регистре синдрома. Это место того информационного символа, с которого начинается процесс коррекции ошибок. В дальнейшем перемещающиеся по информационному массиву квадратики соответствуют очередному выбранному для данного шага декодирования информационному символу, для которого МПД вычисляет обычную сумму нулей и единиц на пороговом элементе по проверкам, которые в синдромном массиве отмечены чёрным. Информационный символ, все относящиеся к нему проверки и символ в верхнем разностном регистре "**Difference**", относящийся к декодируемому символу всегда инвертируются ($0 \rightarrow 1$ и $1 \rightarrow 0$), если на пороговом элементе число единиц оказывается большим, чем количество нулей. После этого пороговый элемент смещается на следующий декодируемый символ, что соответствует переходу и к новой группе проверок относительно него, и т.д. По мере перемещения позиции декодируемого символа меняются фоновые тона среднего регистра, что позволяет отличать уже декодированные символы от тех, которые еще ни разу не изменялись.

После каждого изменения информационного символа в среднем регистре в верхнем контрольном регистре "**difference**" оно отмечается белым цветом, если решение порогового элемента (ПЭ) было правильным, и зеленым, если оно было ошибочным. Если неправильно измененный символ на одной из следующих итераций был снова корректируется, то цвет соответствующей ячейки опять изменяется на фоновый для этого массива. Поскольку содержимое проверок каждого декодируемого символа в блоке синдрома также меняется (инвертируется) каждый раз, если информационный символ кода исправляется, то по мере успешного продвижения процесса декодирования происходит изменение, в основном, цвета красных ячеек синдрома на фоновые, хотя иногда происходят и другие цветовые замены.

Процесс декодирования сопровождается динамическим контролем его параметров, которые высвечиваются в блоке текущих значений процессов декодирования в нижнем правом углу экрана. Показываются номер декодируемого блока, номер итерации, и текущее расстояние решения МПД до принятого сообщения. Последний параметр является ключевым для алгоритма МПД и в соответствии с основными теоретическими положениями Оптимизационной Теории (ОТ) о свойствах МПД, он только уменьшается на всех шагах принятия решения о декодируемых символах. Строгое монотонное уменьшение расстояния каждого нового решения МПД об очередном декодированном символе доказано в Основной теореме об МПД. Это верно для всего кодового блока в целом, даже если на некоторых шагах декодер принимает относительно конкретного информационного бита ошибочное решение. Таковы свойства многомерных цифровых пространств. Непрерывно

высвечиваемое значение расстояния изменяется от исходного веса синдрома, который определяется сразу после его вычисления, и до конечного минимального веса ошибок в принятом блоке, поскольку из конечного вида декодируемых блоков будет следовать, что все информационные ошибки в представленных для демонстрации МПД блоках исправлены. Если бы МПД в конце процедуры коррекции ошибок не исправил все информационные ошибки (в реальности это редко, но всегда обязательно происходит!), то конечные цифры диагностики были бы другими. Таким образом, на каждом шаге декодирования текущее наблюдаемое расстояние равно общему количеству цветных (отличных от фонового тона блоков) квадратиков в массивах “**difference**” и «**syndrome**», потому что в них находятся единички, а в ячейках, цвета которых соответствуют фоновым для этих массивов, находятся нули. Для удобства контроля вес вектора шума и первоначальный вес синдрома на старте процесса коррекции показываются при декодировании текущего блока в левом нижнем углу экрана.

В декодере заложено предельное количество просмотров принятого сообщения (итераций декодирования), равное 10. В случае, если после некоторого числа просмотров кода на некоторой, например, 5-й итерации не происходит изменений никаких информационных символов блока, декодирование прекращается и считается, что процедура работы МПД для этого блока закончена. При этом подсчитывается расстояние решения декодера до принятого сообщения и результаты работы порогового элемента на всех итерациях.

После завершения процедуры декодирования каждого блока в нижнем левом углу показывается исходное значение датчика случайных чисел $RAND=7$, длина информационного блока $K=1000$, кодовое расстояние $d=23$.

Ниже показывается строка, содержащая число декодированных символов (1000), количество ошибок в принятых информационных символах, затем в проверочных символах данного блока и, наконец, число ошибок после каждой итерации декодирования. Нули на позициях последних итераций соответствуют отсутствию ошибок декодера в блоке после завершения процедуры его обработки.

Далее слева – веса синдрома. Первое число - это стартовый вес (расстояние до принятого сообщения) синдрома, а затем, начиная с четвертой позиции - веса синдрома после каждой итерации. В случае правильного декодирования на последней итерации (а это имеет место в течение всего реального времени работы демодекодера, которое обычно доступно для зрителей мультлика) оказывается, что вес синдрома совпадает с весом ошибок в проверочных символах кода. Поскольку единичек, обусловленных ошибками в информационных символах, в синдроме нет, т. к. декодер очень высокоэффективен, то, значит, все заключительные состояния массивов декодера, когда красных ячеек в блоке синдроме тоже нет, соответствуют

правильным итоговым решением МПД. Так как МПД выполняет число декодирований символов, которое просто пропорционально длине кода, то его сложность растёт с длиной кода лишь линейно. А оптимальный декодер, просматривая 2^{1000} возможных решений, должен был бы выполнить число операций большее, чем количество атомов во Вселенной. Но решения МПД при теоретически минимальной сложности обычно всегда совпадают с решениями именно таких (абсолютно недоступных!) лучших по вероятности ошибки декодирования оптимальных переборных декодеров. Это и есть главное достижение Оптимизационной Теории и алгоритмов МПД.

После декодирования очередного блока происходит временное стирание верхнего контрольного блока на экране дисплея. На его месте высвечиваются интегральные данные по всем обработанным в процессе имитации декодирования блокам с указанием общего числа обработанных информационных символов, ошибок в информационных и проверочных символах, а также общего числа ошибок, остающихся после каждой итерации декодирования.

Всегда можно нажать в выпадающем меню **File** на строчку **Pause** и остановить текущую картинку на экране, например, для более глубокого анализа численных данных, относящихся к процедуре декодирования. Повторное нажатие на **Pause** возобновляет процессы мультфильма.

Все замечания и предложения по данной демоверсии программы работы МПД можно направлять автору.

Версия мультфильма **mpddemo-2016.exe** для WINDOWS может управляться из меню в левом верхнем углу.

На наших порталах имеются также две специальных демоверсии программ коррекции ошибок на основе МПД алгоритмов, пригодные для проведения лабораторных работ по методам многопорогового декодирования. Они допускают выполнение студентами или обучаемыми на курсах повышения квалификации специалистами различных заданий по выбору кодов и интенсивности потоков ошибок канала с целью изучения принципов работы и разнообразных возможностей этого эффективного алгоритма.

Автор проф. д.т.н. **ЗОЛОТАРЁВ Валерий Владимирович**

Для связи в Москве:

т.раб. 8-(495)-333-24-12,

моб.: 8-916-518-86-28,

e-mail: zolotasd@yandex.ru ,

www.mtdbest.iki.rssi.ru,

www.mtdbest.ru .