



УДК 621.391

В. В. Мохор *, д-р техн. наук,

С. П. Ливенцев **, канд. техн. наук, **А. И. Артюх** *, аспирант

* Ин-т проблем моделирования в энергетике им. Г. Е. Пухова НАН Украины
(Украина, 03164, Киев, ул. Генерала Наумова, 15,
тел. (044) 4241063),

** Ин-т специальной связи и защиты информации НТУУ «КПИ»
(Украина, Киев, ул. Московская, 45/1,
тел. (044) 2945862)

Сравнительный анализ методов классификации результатов декодирования турбокодов

Дан обзор методов остановки итеративного турбодекодирования, которые позволяют сократить число избыточных итераций, выполняемых декодером. Предложена имитационная модель для оценки основных характеристик рассмотренных методов.

Дано огляд основних класів методів зупинки ітеративного турбодекодування, які дозволяють скоротити кількість надлишкових ітерацій, що виконуються декодером. Запропоновано імітаційну модель для оцінки основних характеристик розглянутих методів.

К л ю ч е в ы е с л о в а: турбокодирование, итеративное декодирование, правила остановки, имитационное моделирование.

В настоящее время перспективным направлением в области помехоустойчивого кодирования является применение турбокодов (ТК), предложенных в работе [1]. Анализ результатов исследований в данной области позволяет утверждать, что в ближайшие годы кодеки турбокодов станут стандартными в системах телекоммуникаций, так как ТК, имея псевдослучайную структуру, обеспечивают более высокий уровень помехозащищенности для широкого класса каналов и помех [2]. Применение ТК, обладающих большой исправляющей способностью, позволяет проектировать системы передачи информации, эффективно функционирующие при малых значениях отношения сигнал — шум (ОСШ).

Турбокод относится к кодам, исправляющим ошибки, в котором используется итеративное декодирование. Из этого следует, что после исправления канальной последовательности на некоторой итерации декодер должен классифицировать полученную битовую последовательность как удовлетвори-

тельную или неудовлетворительную (содержащую ошибки). В подобной ситуации возможно несколько решений.

Первый подход состоит в том, что часть информационных бит декодированной кодовой комбинации ТК является проверочными битами вложенного помехоустойчивого кода. Согласно рекомендациям CCSDS [3] в этом случае фиксировано выполнение 10-ти итераций, а в качестве вложенного помехоустойчивого кода используется циклический код избыточности 16 (расстояние Хемминга — 4). Такой подход не позволяет получить прироста быстродействия при декодировании (и прироста передачи информации). Более того, в результате использования части информационной последовательности для передачи проверочных бит циклического кода общая скорость передачи данных будет снижена. Достоинством этого метода является высокая достоверность декодированного пакета — 99,9985 % [4].

Второй подход заключается в применении так называемого правила останова, которое на основании анализа выходной информации декодера позволяет определить итерацию, на которой процесс декодирования можно считать завершенным. Очевидно, что данные методы имеют менее высокую достоверность (как показали дальнейшие исследования, до 95%), однако их несомненным достоинством является возможность сокращения числа выполняемых декодером итераций, что позволяет увеличить скорость передачи в подобных системах связи с ТК.

Высокая вычислительная сложность процесса декодирования ТК, по сравнению с которым прочие используемые процедуры обработки информации требуют гораздо меньше процессорного времени, предполагает оптимизацию работы декодера. Одним из возможных решений этой задачи является сокращение числа избыточных итераций, т.е. применение второго подхода. В связи с этим рассмотрим методы классификации декодируемой последовательности ТК (правила останова процесса декодирования).

Множество передаваемых пакетов a_i обозначим M , а подмножества корректно и некорректно классифицированных пакетов — T и F ($T \cup F = M$). Задача классификации состоит в определении этих подмножеств, что достигается с помощью правила классификации $f_p(a_i)$, которое является предикатом и позволяет выполнять проверку того, обладает ли пакет a_i свойством P . Объединяет рассматриваемые методы определение условия, выполнение которого позволит считать декодированный пакет некорректным, т. е. элементом подмножества F :

$$f_p(a_i) = \begin{cases} 1, & a_i \text{ обладает } P, \\ 0, & a_i \text{ не обладает } P. \end{cases}$$

Следовательно, можно считать, что при анализе используется не принцип верификации, а принцип фальсификации, как более строгий [5].

Если для пакета a_i выполняется R проверок условия f_P , то пакет считается корректным при

$$a_i \in (T | f_P^j(a_i) = 0, \forall j, 1 \leq j \leq R). \quad (1)$$

Будем рассматривать различные подходы (классы методов), используемые при определении предиката f_P . В отличие от известных публикаций в данном случае, что анализ функционирования рассматриваемых методов классификации осуществляется не при фиксированном ОСШ, а в условиях изменения этого параметра на интервале, что позволяет делать выводы о применимости различных правил останковки в различных условиях, в том числе и вблизи предела Шеннона. Оптимальное число итераций декодирования зависит от параметров системы передачи и ОСШ.

Основные параметры предлагаемых методов классификации следующие:

1. Избыточность по итерациям по сравнению с идеальным случаем обработки декодируемой последовательности.
2. Достоверность (вероятность принятия правильного решения).

Наилучшим считается метод, который при заданном уровне достоверности обеспечивает наименьшую избыточность по выполняемым итерациям.

Пусть для системы передачи информации с ТК задано предельное число итераций N_{\max} — максимальное, наперед заданное число итераций декодирования, в течение которого может выполняться коррекция принятой канальной последовательности. Очевидно, что при выполнении декодером фиксированного числа итераций применение каких-либо методов оценки качества процесса декодирования лишено смысла: система всегда будет выполнять заранее определенное (предельное) число итераций, после которого классификация пакета выполняется с помощью бит контрольной суммы. Однако, если декодер получит возможность классифицировать пакет по окончании каждой итерации декодирования, то одновременно он получит возможность прервать процесс итеративного декодирования в случае, если используемый метод позволяет классифицировать передаваемый пакет как удовлетворительный.

Предлагаемые методы позволяют осуществлять классификацию переданных пакетов по окончании каждой итерации декодирования на основании анализа статистики получаемых в процессе декодирования данных, а также повысить эффективность использования декодера. С учетом того что общая скорость передачи информации в системе определяется работой декодера, как наиболее медленного узла, это позволит также увеличить скорость передачи информации.

Все множество обрабатываемых декодером пакетов может быть разделено на два непересекающихся подмножества:

1) пакеты, структура ошибок в которых позволяет осуществить их корректное декодирование за число итераций, не превосходящее предельного, — декодируемый пакет (ДП);

2) пакеты, структура ошибок в которых не позволяет осуществлять их корректное декодирование или для этого требуется большее число итераций, чем предельное, — недекодируемый пакет (НДП).

Для НДП задача состоит в том, чтобы за наименьшее число итераций классифицировать искаженный каналом пакет как не подлежащий декодированию и прекратить его обработку. В идеальном случае декодер не должен обрабатывать такие пакеты вообще. Для ДП задача состоит в том, чтобы за минимальное число итераций определить, что пакет не содержит ошибок и прекратить его обработку.

Как в первом, так и во втором случае при решении задачи классификации будут выполняться избыточные итерации по декодированию. Это связано с тем, что наличие или отсутствие ошибок в пакете определяется декодером по косвенным данным.

Идеальное число итераций декодирования пакета — наименьшее число итераций декодирования, после выполнения которой последовательность информационных бит на стороне приема становится тождественной последовательности на стороне передачи. Для НДП идеальное число итераций равно нулю. Очевидно, что различным методам классификации свойственна некоторая избыточность по итерациям. Сравнивая эту избыточность с идеальным случаем, можно сделать вывод об эффективности каждого метода.

Таблица 1

Объективная оценка	Субъективная оценка	
	Декодер обнаружил признак окончания декодирования	Декодер не обнаружил признак окончания декодирования
Кодовая последовательность: декодируемая	Результат 1 — корректный: удовлетворительное декодирование возможно с некоторой избыточностью по итерациям	Результат 2 — ошибочный: удовлетворительная кодовая последовательность ошибочно классифицирована как неудовлетворительная
недекодируемая	Результат 3 — ошибочный: неудовлетворительная кодовая комбинация ошибочно классифицирована как удовлетворительная	Результат 4 — корректный: структура помех в принятой кодовой последовательности делает невозможным ее декодирование

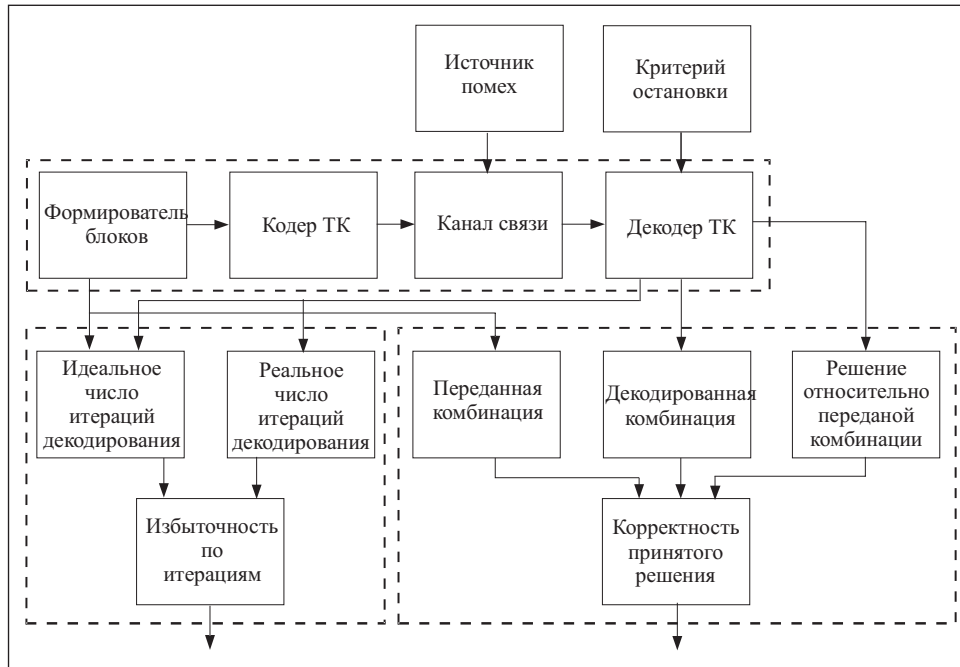


Рис. 1. Структурная схема имитационной модели анализа различных методов классификации

Объективно пакет может быть декодируемым или недекодируемым. Вместе с тем, применение метода классификации пакета связано с получением субъективной оценки. Следовательно, при декодировании пакета возможно получение одного из четырех приведенных в табл. 1 результатов, которые образуют полную группу.

Имитационное моделирование с использованием ЭВМ является эффективным и гибким способом оценки характеристик различных методов классификации. Разработанная имитационная модель (рис. 1) позволяет определять два упомянутых выше параметра анализируемого метода классификации.

Основным элементом имитационной модели является система передачи информации, состоящая из формирователя блоков, кодера ТК, канала связи и декодера ТК. Управление работой декодера осуществляется с помощью анализируемого метода классификации. Для определения корректности принятого решения и избыточности по итерациям система сравнивает декодированный пакет с пакетом, буферизированным в формирователе блоков на стороне передачи. Подобное сравнение позволяет определить реальное количество ошибок на каждом шаге декодирования. При

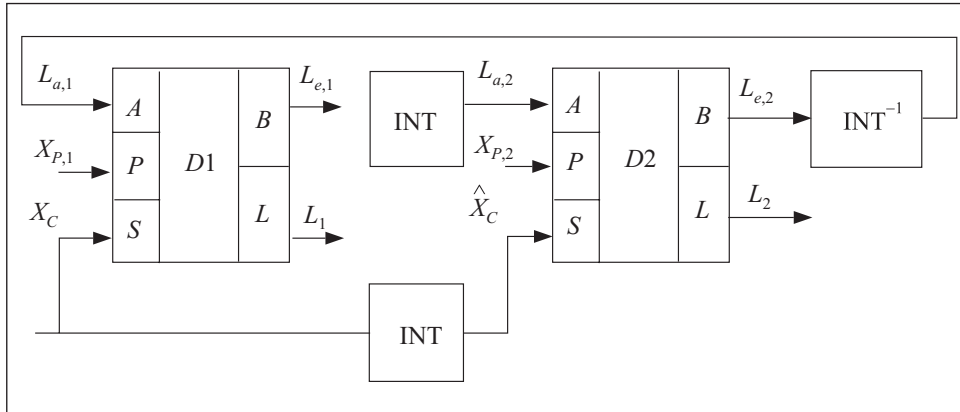


Рис. 2. Схема итеративного декодера двухкомпонентного ТК

несовпадении переданного и декодированного пакетов хотя бы в одном бите пакет считается некорректным.

В результате выполнения множества испытаний система накапливает статистические данные, которые позволяют сделать вывод о функциональных качествах используемого критерия остановки при заданном множестве параметров системы передачи и заданном уровне ОСШ в канале. Имитационное моделирование было выполнено с использованием [6].

Рассмотрим типичную систему передачи информации с ТК, кодер которой использует два параллельно соединенных рекурсивных сверточных кодера (РСК), разделенных перемежителем. Длина передаваемой по каналу кодовой последовательности совпадает с объемом перемежителя. В качестве метода перемежения используется псевдослучайная перестановка. Компонентный РСК инициализируется с помощью полиномиального генератора $G = (5/7)_{(8)}$ как наиболее простого. Кодовые слова систематического ТК, образующие передаваемую кодовую последовательность, состоят из информационного (систематического) бита и двух проверочных бит, генерируемых РСК. Таким образом, скорость кодирования составляет $R = 1/3$ (перфорация не применяется). При передаче использованы блоки длиной 400 бит. Предельное число итераций N_{\max} было выбрано равным восьми. Декодер ТК представляет собой два компонентных декодера ($D1$ и $D2$), реализующих алгоритм декодирования SISO (Soft Input Soft Output), которые разделены перемежителями (INT). Структурная схема турбодекодера показана на рис. 2.

В качестве алгоритма декодирования для компонентного декодера выбран MAX-LOG-MAP (приближенный по отношению к MAP) как наиболее простой с точки зрения вычислительной сложности.

При моделировании работы системы передачи информации использован канал с аддитивным белым гауссовым шумом, который принимал значения в интервале от 0 до 4 дБ: (далее — рабочая область). При выполнении имитационного моделирования численное значение этой величины изменялось с шагом 0,2 дБ. Вероятность появления ошибочных пакетов в рассматриваемой рабочей области показана на рис. 3.

Как можно заметить, при уменьшении ОСШ до 1,5—1,25 дБ процент НДП начинает резко и практически линейно возрастать, а в точке А вероятность появления ошибочного пакета составляет 50 %. Ниже этой точки преобладают НДП, выше — ДП. Именно в этой точке будет находиться экстремум функции числа ошибочных решений от уровня помех в канале при использовании метода классификации (результаты 2 и 3 в табл. 1).

Решения, принимаемые компонентным декодером (выход L), представляют собой вещественные числа и являются суммой трех слагаемых. Положительные значения соответствуют единицам, отрицательные — нулям. Так, для декодера $D1$ (см. рис. 2), окончательное решение относительно декодируемого бита является суммой трех слагаемых:

$$L = L_{e,1} + L_{a,1} + X_C L_C, \quad (2)$$

где $L_{e,1}$ — логарифм отношения функций правдоподобия (ЛОФП), вычисленный текущим компонентным декодером, в котором числитель соответствует вероятности того, что рассматриваемый бит примет единичное значение, знаменатель — вероятности принятия нулевого значения; $L_{a,1}$ — априорная информация относительно декодируемого бита, которая при положительном значении усиливает вероятность единичного значения, а

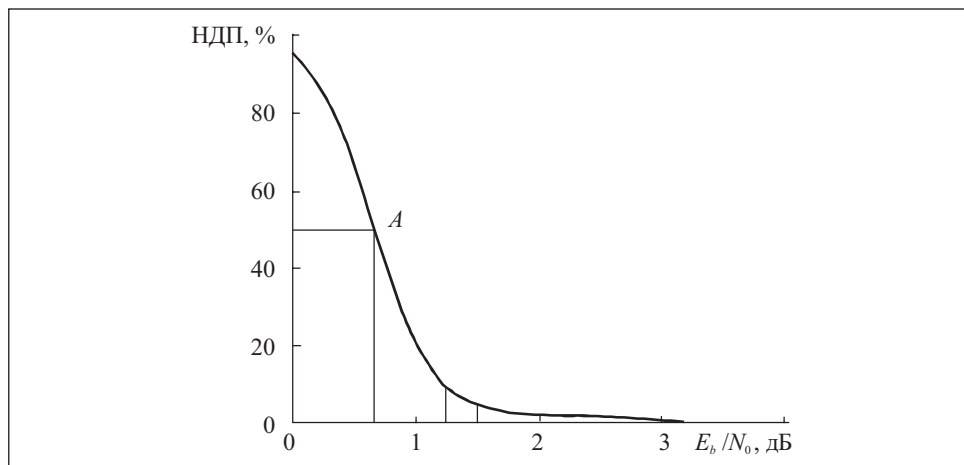


Рис. 3. Зависимость числа НДП от ОСШ

при отрицательном — нулевого; $X_C L_C$ — значение канального отсчета, умноженное на канальную надежность, т. е. величину, зависящую от уровня шума в канале, применяемой модуляции и скорости помехоустойчивого кода. Для рассматриваемого случая с применением ФМ-2 модуляции и помехоустойчивым кодом скорости $R = 1/3$ значение канальной надежности вычисляется так: $L_C = 4RE_b / N_0$.

Анализируя (2), можно сделать вывод о причинах, по которым большое число итераций не эффективно при турбодекодировании: на удаленных от начала цепочки последовательных декодерах внешняя априорная информация L_a в силу того, что она формируется с накоплением, начинает значительно превышать по модулю значение ЛОФП текущего последовательного декодера. Таким образом, декодер уже не может значительно повлиять на ранее принятое решение.

Пример изменения значений L логарифма отношения функций правдоподобия (ЛОФП), генерируемых при декодировании некоторого бита в течение пяти итераций, приведен в табл. 2, из которой видно, что даже для корректно декодируемого бита возрастание значения L при наличии канальных помех не будет монотонно возрастающим рядом.

Первым, наиболее очевидным, классом методов, с помощью которых рассматриваемую последовательность можно признать корректной, являются методы сравнения «жестких» решений, выработанных декодером на одной или нескольких последовательных итерациях (H -методы) [7]. Пусть система обрабатывает K информационных бит на $n \leq N_{\max}$ итерации, которая для каждого i бита ($1 \leq i \leq K$) использует жесткие решения двух декодеров: $u_{i,1}^n$ и $u_{i,2}^n$ — для текущей итерации, $u_{i,1}^{n-1}$ и $u_{i,2}^{n-1}$ — для предыдущей и так далее. Формальные описания различных H -методов, оперирующих жесткими решениями, приведены в табл. 3.

Таблица 2

Итерация	Декодер	L
1	D1	3,16
	D2	-1,91
2	D1	1,77
	D2	5,28
3	D1	4,83
	D2	8,40
4	D1	13,95
	D2	10,09
5	D1	15,64
	D2	19,25

Второй класс методов классификации основан на анализе изменений знака внешней информации при переходе $L_a \rightarrow L_e$ (значение ЛОФП текущего декодера является априорной информацией для следующего компонентного декодера). Колебание знака внешней информации — признак того, что декодер не может принять решение относительно рассматриваемого бита. Обозначим значение априорной информации для i -го информационного бита $L_{a,i}$, а значение ЛОФП — $L_{e,i}$. Наибо-

Таблица 3

Метод	Формальное описание	Сравнение значений
<i>H1</i>	$u_{i,1}^n = u_{i,2}^n$	На двух полуитерациях
<i>H2</i>	$u_{i,2}^n = u_{i,2}^{n-1}$	На двух итерациях
<i>H3</i>	$u_{i,2}^n = u_{i,2}^{n-1} = u_{i,2}^{n-2}$	На трех итерациях
<i>H4</i>	$u_{i,2}^n = u_{i,2}^{n-1} = u_{i,2}^{n-2} = u_{i,2}^{n-3}$	На четырех итерациях

лее простой метод данного класса может быть получен при проверке неизменности знака $L_a \rightarrow L_e$ для всех декодируемых бит (*LE*-метод) [8].

При моделировании работы декодера ТК замечено, что ошибочно декодированные биты следуют блоками, на основании чего предлагается новый *NB*-метод обнаружения ошибочной ситуации, который также можно отнести к рассматриваемому классу. С помощью *NB*-метода определяют наличие ошибки, если обнаруживаются колебания знака $L_a \rightarrow L_e$ в соседних битах декодируемой последовательности.

Рассмотрим методы, фиксирующие колебания в двух, трех и четырех соседних битах (*NB2*-, *NB3*- и *NB4*-методы).

Достоинство предлагаемого *NB2*-метода состоит в том, что в нем учтена специфика возникающих ошибок при декодировании ТК. Он является лучшим в своем классе и превосходит традиционный *LE*-метод, однако хуже *H1*-метода (до 0,5 % в переходной области), из рассмотренного выше класса. Формальное описание методов классификации, оперирующих изменением знака априорной информации, приведено в табл. 4.

Результаты моделирования методов, описанных в табл. 3 и 4, показаны на рис. 4, из которого видно, что минимум корректных классификаций находится в окрестностях точки *A* (см. рис. 3), в которой вероятности появления корректного и ошибочного пакетов равны.

Для всех рассмотренных *H*- и *NB*-методов существует общая тенденция, состоящая в том, что чем больше дополнительных данных используется для принятия решения, тем хуже результат. Таким образом, при классификации пакета целесообразно использовать информацию только с последней итерации декодирования, как наиболее достоверную.

Кроме методов, оперирующих жесткими решениями, можно выделить третий класс более сложных методов, с помощью которых анализируются «мягкие» решения (вещественные значения величин L и L_e) декодера ТК. В качестве примера рассмотрим метод, предложенный в [9], согласно которому декодирование последовательности считается удовлетворительным, если на $n < N_{\max}$ итерации выполняется неравенство

$$\min |L_i| > T, \forall i, 1 \leq i \leq K. \quad (3)$$

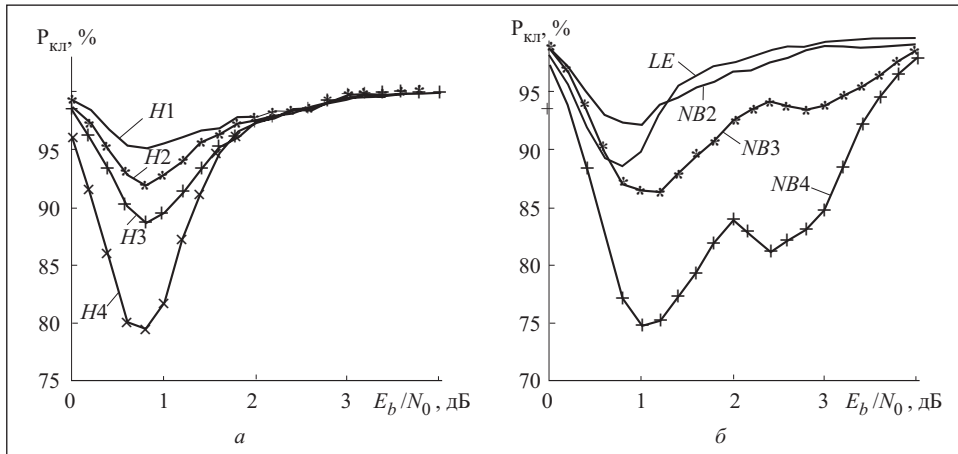


Рис. 4. Зависимость корректных классификаций $P_{\text{кл}}$ декодируемого пакета при использовании дополнительных проверок: а — для H -методов; б — для LE - и NB -методов

Таблица 4

Метод	Формальное описание	Нет изменений знака $L_a \rightarrow L_e$
LE	$L_{a,i} L_{e,i} > 0, \forall i, 1 \leq i \leq K$	Для всех бит
$NB2$	$(L_{a,i} L_{e,i} > 0) \cap (L_{a,i-1} L_{e,i-1} > 0), \forall i, 2 \leq i \leq K$	В любой паре соседних бит
$NB3$	$(L_{a,i} L_{e,i} > 0) \cap (L_{a,i-1} L_{e,i-1} > 0) \cap (L_{a,i-2} L_{e,i-2} > 0), \forall i, 3 \leq i \leq K$	В любой тройке соседних бит
$NB4$	$(L_{a,i} L_{e,i} > 0) \cap (L_{a,i-1} L_{e,i-1} > 0) \cap (L_{a,i-2} L_{e,i-2} > 0) \cap (L_{a,i-3} L_{e,i-3} > 0), \forall i, 4 \leq i \leq K$	В любой четверке соседних бит

В результате рассмотрения трех значений порога T , равных единице, пяти и 10-ти, установлено, что при $T = 10$ может быть получен наилучший результат ($LESS10$ -метод). С помощью данного метода можно классифицировать декодированную последовательность ТК как удовлетворительную, если колебания в принятии решения относительно каждого бита отсутствуют в течение некоторого числа итераций, и модуль мягкого решения будет монотонно возрастать.

Общий принцип работы всех мягких методов заключается в том, что при анализе декодированной последовательности выполняется поиск минимума модуля мягкого решения, как в (3), либо поиск среднего значения модуля мягкого решения.

Недостаток класса мягких методов заключается в том, что сравнение полученного результата осуществляется с некоторым априорно неизвестным пороговым параметром, который зависит от ОСШ в канале и параметров системы передачи.

Четвертый класс методов классификации — комбинированные методы. По сути, результат, получаемый каждым из рассмотренных выше методов, представляет собой значение булевого типа (ДП или НДП). Это делает возможным синтез комбинированного метода с помощью нескольких простых методов. Как показывают результаты моделирования, комбинированный метод, требующий подтверждения положительного результата с использованием нескольких простых методов (синтез с использованием функции *AND*), не дает положительного результата. Однако при малом значении ОСШ дополнительный прирост достоверности классификации может быть получен с помощью методов, позволяющих классифицировать пакет хотя бы по одному из критериев (синтез с использованием функции *OR*). Результаты моделирования работы комбинированных методов показаны на рис. 5. При ОСШ, равном 0,6 дБ, в окрестности точки *A* (см. рис. 3) получен прирост достоверных классификаций Δ на 0,5 % (к имеющимся 95,2 %).

Важной особенностью методов классификации, которая не рассмотрена в известных публикациях, является то, что каждый из них может быть эффективно использован только в части рабочей области. Даже среди методов, основанных на одном принципе, методы *LE* и *NB2* (см. рис. 4, б) являются предпочтительными на разных участках рабочей области. Поэтому, рассматривая любой метод классификации, следует указывать, при каком уровне помех в канале он может быть использован (на каком участке рабочей области его решения являются корректными). В [10] предложен альтернативный метод остановки турбодекодирования для *UMTS* телефонии. Как видно из рис. 5, б, по сравнению с *H1*-методом данный метод не рассчитан на работу с НДП, так как они ошибочно классифицируются как корректные (результат 3 в табл. 1).

Предлагаемый в [10] метод может быть эффективно использован только в области значений ОСШ > 3 дБ. В общем случае для рассматриваемой системы связи (см. рис. 3) можно выделить несколько рабочих подобластей. На рис. 6 для моделируемой системы связи представлены методы, наилучшим образом проявляющие себя на различных участках рабочей области. Как видим, при большом значении ОСШ результативность различных методов практически совпадает.

Эффективность различных методов, определяемая числом итераций *I*, показана на рис. 7.

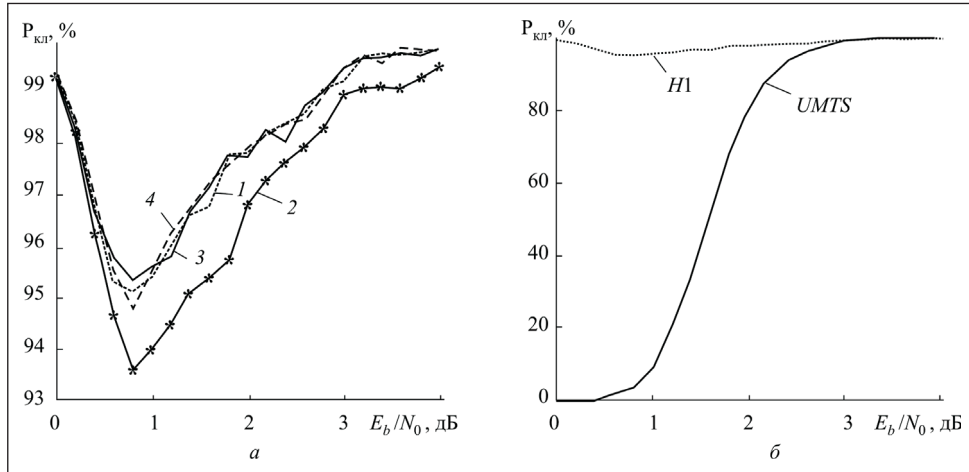


Рис. 5. Графики корректных классификаций: а — для комбинированных методов: 1 — H1; 2 — H1ORN2; 3 — H1ORLESS10; 4 — H1ORLE; б — для H1 и UMTS-методов

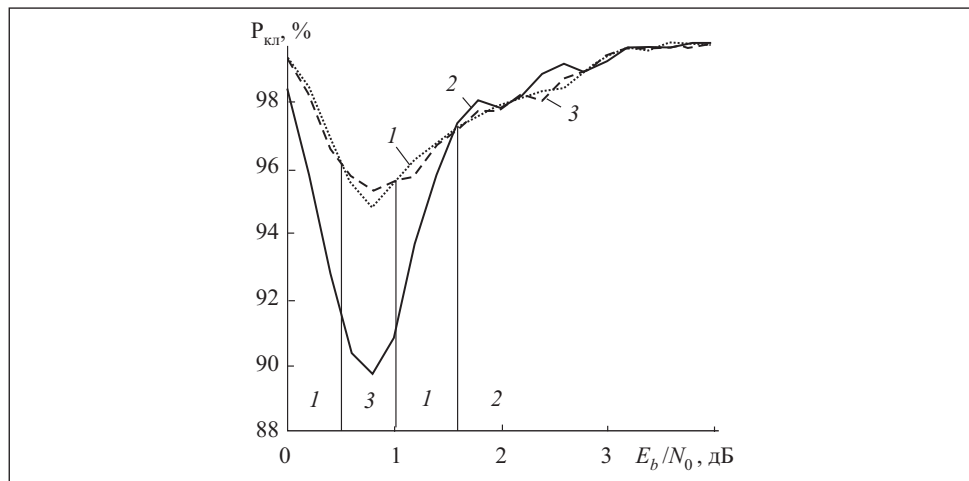


Рис. 6. Графики использования методов классификации на различных участках рабочей области: 1 — H1, OR, LE; 2 — LESS10; 3 — H1, OR, LESS10

Все рассмотренные методы классифицировали пакет как НДП в случае, если истекло максимальное число итераций N_{max} и не было выполнено условие остановки (1), согласно которому пакет признавался корректным. Относительно обеспечения достоверности методы работали удовлетворительно, однако при корректном определении НДП не выполнялось сокращение числа итераций. В связи с этим предложенные методы классификации целесообразно использовать в области, где преобладают ДП.

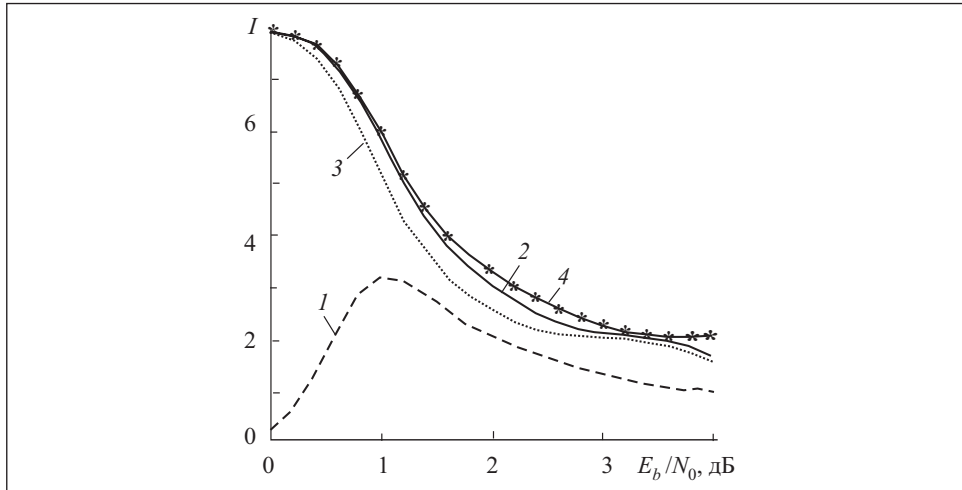


Рис. 7. Зависимость числа итераций от уровня шумов в канале: 1 — IDEAL; 2 — H1, LESS10; 3 — H1 OR LESS10, H1OR LE; 4 — LE

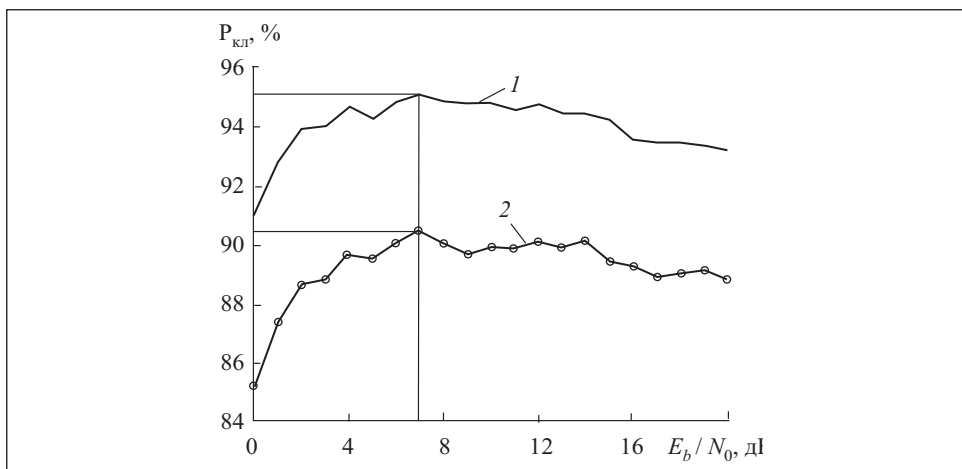


Рис. 8. Зависимость корректных классификаций принятых пакетов (1) и корректно декодированных пакетов (2) от порога срабатывания ($E_b/N_0 = 0,5$ дБ, $N = 1000$) для LE-метода

Рассмотренные методы основаны на принципе поиска признака, по которому последовательность может быть признана неудовлетворительной. Однократное нахождение этого признака является основанием для того, чтобы признать последовательность недекодируемой.

В качестве альтернативы рассмотрим LE-метод с переменным порогом срабатывания, т. е. с переменным числом несоответствий правилу остановки

f_P . Определим число несоответствий, которое может быть обнаружено без принятия решения о том, что пакет не поддается декодированию. Результат моделирования работы такого метода показан на рис. 8. Для методов с порогом срабатывания b задача классификации (1) может быть представлена в виде

$$a_i \in \left(T \left| \sum_{j=1}^R f_P^j(a_i) \leq b \right. \right),$$

где R — число проверок условия фальсификации. Для рассмотренных выше методов $R = K$. Как видим, при заданном уровне шумов в канале наилучший результат будет достигнут, если допустить, что знак $L_a \rightarrow L_e$ для всех бит ДП может быть изменен не более семи раз (число несовпадений найдено экспериментально).

Выводы. 1. Предложенная имитационная модель позволяет оценить эффективность работы различных методов классификации ДП по двум параметрам; числу корректных классификаций и числу выполняемых итераций декодирования.

2. Предложенный *NB*-метод позволяет принять решение на основании анализа знаков априорной информации соседних бит в декодируемой последовательности.

3. Отсутствие универсального метода для всех значений ОСШ, выявленное в результате имитационного моделирования, приводит к необходимости использования комбинированных методов или системы, принимающей решение о корректности голосованием.

4. Экспериментально подтверждено преимущество методов классификации с ненулевым порогом, по сравнению с аналогами, которые требуют остановки декодирования по первому несоответствию.

5. Направлением дальнейших исследований является поиск стратегии синтеза методов с ненулевым порогом и методов, позволяющих регистрировать НДП, не выполняя N_{\max} итераций декодирования.

Review of methods of halting for iterative turbo decoding is given. Those methods allow to decrease the amount of redundant iterations performing by decoder. An imitation model is proposed for main characteristics estimation of given methods.

1. Berrou C., Glavieux A., Thitimajshima P. Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: turbo-codes // Proc. Int. Conf. On Commun. ICC-93. — Geneva: Switzerland, 1993. — P. 1064—1070.
2. Банкет В. Л., Топорков Ф. В. Помехоустойчивое кодирование в волоконно-оптических системах передачи // Зв'язок. — 2006. — № 7. — С. 18—21.

3. Consultative Committee for Space Data Systems, «Telemetry Channel Coding». — <http://www.ccsds.org/documents/pdf/CCSDS.-101.0-B-4.pdf>
4. Consultative Committee for Space Data Systems, «Packet Telemetry». — <http://public.ccsds.org/publications/archive/102x0b5s.pdf>
5. Поннер К. Р. Предположения и опровержения: Рост научного знания / Пер. с англ. / — М. : Изд. АСТ, ЗАО НПЛ «Ермак», 2004. — 638 с.
6. А. С. № 15289 Программа для анализа характеристик помехоустойчивости турбокодов / Зайцев С.В., Ливенцев С.П., Горлинский Б.В. — Оpubл. 16.01.2006.
7. Matache A., Dolinar S., Pollara F. Stopping Rules for Turbo Decoders. — http://ipnpr.jpl.nasa.gov/progress_report/42-142/142J.pdf
8. Shao R., Fossorier M., Lin S. Two simple stopping criteria for iterative decoding // Proc. Int. Symposium on Inf. Theory, ISIT-98. — Cambridge, USA, 1998. — P. 16—21.
9. Valenti M., Sun J. The UMTS turbo code and an efficient decoder implementation suitable for software-defined radios // Int. Journal of Wireless Inf. Networks. — 2001. — Vol. 8, № 4. — P. 203—215.
10. Gilbert F., Kienle F., Wehn N. Low Complexity Stopping Criteria for UMTS Turbo-Decoders // Vehicular Technology Conference (VTC2003-Spring). — Jeju, Korea, April 2003. — P. 2376—2380. — http://www.eit.uni-kl.de/wehn/files/publikationen/2003/vtc_spring03_sub.pdf

Поступила 07.06.07

МОХОП Владимир Владимирович, д-р техн. наук, профессор, гл. науч. сотр. Ин-та проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины. В 1977 г. окончил Киевский ин-т гражданской авиации. Область научных исследований — математическое и компьютерное моделирование, специализированные вычислительные системы, информационная безопасность.

ЛИВЕНЦЕВ Сергей Петрович, канд. техн. наук, зам. зав. кафедрой Ин-та специальной связи и защиты информации НТУУ «КПИ». В 1981 г. окончил Киевское высшее военное инженерное училище связи им. М.И. Калинина. Область научных исследований — моделирование процессов передачи и защита информации.

АРТЮХ Алексей Иванович, аспирант Ин-та проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины. В 2006 г. окончил Черниговский государственный технологический университет. Область научных исследований — методы моделирования систем управления программируемыми средствами передачи информации с турбокодами.