

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПЕРЕМЕЖИТЕЛЕЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИТЕРАТИВНОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ ТУРБОКОДОВ

А.С. Жученко

(представил д.т.н., проф. Ю.В. Стасев)

В работе предложена оценка влияния перемежителей на эффективность итеративного декодирования турбокодов. При использовании этой оценки для качественного сравнения перемежителей не требуется проведения моделирования, требующего больших временных затрат.

Постановка проблемы. Для декодирования турбокодов применяется итеративный турбодекодер, состоящий из двух или более декодеров и одного или нескольких перемежителей и деперемежителей [1, 2].

Существуют различные методы построения перемежителей [2], [7 – 9]. Известно, что выбор перемежителя значительно влияет на исправляющую способность итеративного турбодекодера [2 – 7].

Для качественного сравнения (ранжирования) перемежителей необходимо определение вероятности ошибки декодирования итеративного турбодекодера для каждого перемежителя. Однако в настоящее время не существует приемлемого аналитического метода расчета вероятности ошибки итеративного турбодекодера для конкретного перемежителя.

Таким образом, для выполнения ранжирования перемежителей необходимо проведение моделирования, которое занимает много времени даже при использовании современной вычислительной техники.

Введение оценки влияния перемежителей на эффективность итеративного декодирования позволяет отказаться от проведения моделирования, что значительно сокращает время выполнения ранжирования [3, 4].

Анализ литературы. Впервые оценка влияния перемежителей на эффективность итеративного декодирования была предложена в [3]. Более точная оценка предложена в работе [4].

Недостатком оценки, рассматриваемой в [4], является усреднение влияния перемежителя и деперемежителя на исправляющую способность турбодекодера, что уменьшает точность ранжирования близких по свойствам перемежителей.

Цель статьи – оценка влияния перемежителей на эффективность

итеративного декодирования турбокодов.

Оценка влияния перемежителей на эффективность итеративного декодирования турбокодов. Рассмотрим итеративный турбодекодер с двумя составляющими декодерами. Составляющие декодеры – это декодеры максимума апостериорной вероятности или MAP (maximum a posterior probability) декодеры, производящие мягкие решения [1, 2, 10].

Каждый составляющий декодер имеет вход для априорного отношения правдоподобия, входы для принятой последовательности информационных и проверочных символов.

Мягкое решение на выходе любого из составляющих декодеров представляет собой отношение правдоподобия для принятого информационного символа. Отношение правдоподобия состоит из трех составляющих: априорного отношения правдоподобия, внутреннего отношения правдоподобия и внешнего отношения правдоподобия [1, 2, 11]. Далее, для краткости, априорное отношение правдоподобия будем называть априорной информацией, а внешнее отношение правдоподобия – внешней информацией.

В итеративном турбодекодере внешняя информация с выхода одного из составляющих декодеров после перемежения или деперемежения используется как априорная информация для другого декодера. Процесс декодирования первым и вторым декодером называется итерацией. Каждая итерация состоит из двух фаз. В первой фазе одной итерации производится декодирование первым декодером. Во второй фазе итерации производится декодирование вторым декодером с учетом априорной информации, получаемой из внешней информации первого декодера, путем перемежения.

Характеристики итеративного турбодекодера зависят от степени корреляции внешней информации, которой обмениваются составляющие декодеры, с последовательностью принятых символов. На степень корреляции в значительной мере оказывает влияние выбор перемежителя [3 – 5].

В [3, 4] был проведен анализ коэффициентов корреляции на первой и второй фазах первой итерации, а также предложена аппроксимация этих коэффициентов корреляции.

Обозначим внешнюю информацию на выходе любого из составляющих декодеров как $\xi^{(f)}(i) = \{\xi_1^{(f)}(i), \dots, \xi_k^{(f)}(i), \dots, \xi_N^{(f)}(i)\}$, где $f=1, 2$ – фаза итерации, $i=1, 2, \dots, I$ – номер итерации, I – количество итераций, N – количество информационных символов в кодовом блоке турбокода, а последовательность принятых информационных символов как $X = \{x_1, \dots, x_k, \dots, x_N\}$. Априорную информацию на априорном входе любого из составляющих декодеров представим как

$$\xi^{(f)}(i) = \left\{ \xi_1^{(f)}(i), \dots, \xi_k^{(f)}(i), \dots, \xi_N^{(f)}(i) \right\}.$$

Коэффициенты корреляции внешней информации на выходе первого декодера с каждым из принятых информационных символов на первой итерации первой фазы декодирования могут быть представлены матрицей $\rho^{(1)}(1)$, в которой элемент $\rho_{k,j}^{(1)}(1)$ определяет коэффициент корреляции между $\xi_k^{(1)}(1)$ и x_j .

В [3, 4] предложена следующая аппроксимация коэффициентов корреляции $\rho_{k,j}^{(1)}(1)$:

$$\hat{\rho}_{k,j}^{(1)}(1) = \begin{cases} a \cdot \exp\{-c|k-j|\}, & \text{если } j \neq k; \\ 0, & \text{если } j = k, \end{cases} \quad (1)$$

где $k, j = 1, 2, \dots, N$, N – количество информационных символов в кодированном блоке турбокода. Постоянные a и c зависят от выбранных составляющих кодов и могут быть оценены экспериментально.

На рис. 1 представлена схема модели итеративного турбодекодера для принятого информационного символа на позиции j и внешней информации на позиции k для первой итерации, которая состоит из двух MAP декодеров и двух перемежителей. $\xi^{(2)}(1)$

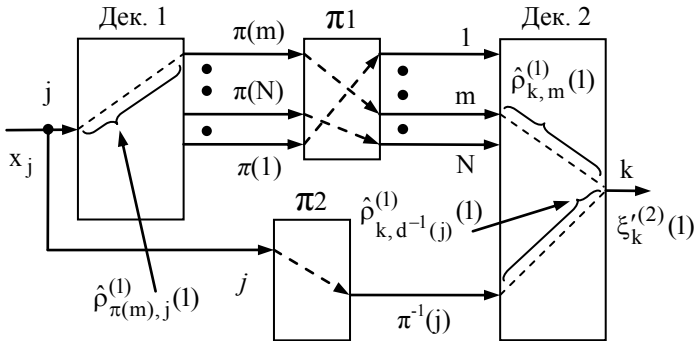


Рис. 1. Схема модели итеративного турбодекодера для первой итерации

Перемежитель $\pi 1$ необходим для перемежения внешней информации с выхода первого декодера, а перемежитель $\pi 2$ – для перемежения принятой последовательности информационных символов. Для наглядности на каждом из составляющих декодеров показаны коэффициенты корреляции

между входами и выходами. Перемежитель представлен вектором $\pi(m)$, деперемежитель – $\pi^{-1}(m)$.

Коэффициенты корреляции внешней информации на выходе второго декодера с каждым из принятых информационных символов на первой итерации второй фазы декодирования могут быть представлены матрицей $\hat{\rho}_{k,j}^{(2)}(1)$. В [3, 4] предлагается аппроксимировать $\hat{\rho}_{k,j}^{(2)}(1)$ следующим образом:

$$\hat{\rho}_{k,j}^{(2)}(1) = \frac{1}{2} a \exp\left\{-c|\pi^{-1}(j)-k|\right\} + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^N a^2 \exp\left\{-c(|\pi(m)-j|+|k-m|)\right\}, \quad (2)$$

где $\pi^{-1}(j) \neq k$, $m \neq k$, $\pi(m) \neq j$, $k, j = 1, 2, \dots, N$.

На рис. 2 представлена схема модели итеративного турбодекодера для второй итерации. Блок 1 – перемежитель. Блок 2 – деперемежитель.

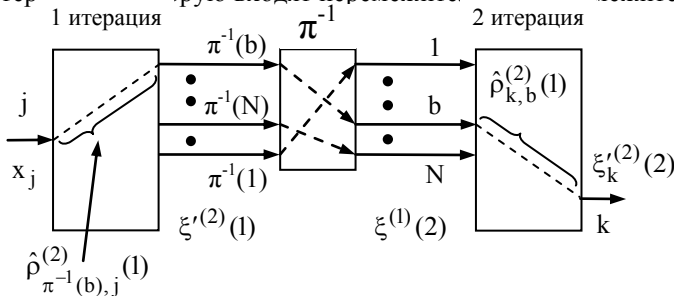


Рис. 2. Схема модели итеративного турбодекодера для второй итерации

Схема на рис. 2 состоит из блока 1, блока 2 и деперемежителя π^{-1} . Блоки 1 и 2 представляют собой схему модели итеративного турбодекодера для одной итерации, представленную на рис. 1.

На рис. 3 сплошной линией представлены экспериментально полученные коэффициенты корреляции внешней информации на выходе 25 второго декодера $\xi_{25}^{(2)}(2)$ с каждым из принятых информационных символов во второй фазе декодирования второй итерации. При этом предполагается, что используется ФМ в канале без памяти с аддитивным белым гауссовским шумом, отношение энергии одного символа к спектральной плотности мощности шума $E_b/N_0 = 1$ дБ, количество информационных символов 50, все информационные символы в блоке нулевые, порождающие многочлены состав-

ляющих сверточных кодов турбокода в восьмеричной форме $(7, 5)_8$. Постоянные $a = 0,23$, $c = 0,31$ были оценены экспериментально. Коэффициенты корреляции внешней информации на выходе второго декодера с каждым из принятых информационных символов на второй итерации второй фазы декодирования могут быть представлены матрицей $\hat{\rho}^{(2)}(2)$, в которой элемент

$\hat{\rho}_{k,j}^{(2)}(2)$ представляет коэффициент корреляции между $\xi_k^{(2)}(2)$ и x_j .



Рис. 3. Коэффициенты корреляции внешней информации на позиции 25 второго декодера с каждым из принятых информационных символов на второй итерации второй фазы декодирования

Предлагается аппроксимировать $\hat{\rho}_{k,j}^{(2)}(2)$ следующим образом:

$$\hat{\rho}_{k,j}^{(2)}(2) = \sum_{b=1}^N \hat{\rho}_{\pi^{-1}(b),j}^{(2)}(1) \cdot \hat{\rho}_{k,b}^{(2)}(1), \quad (3)$$

где $\hat{\rho}_{k,j}^{(2)}(1)$ – коэффициенты корреляции внешней информации второго декодера с принятой последовательностью информационных символов на первой итерации.

Коэффициенты корреляции аппроксимируются как сумма коэффициентов корреляции всех N “путей корреляции”, а корреляция одного “пути” представляет собой произведение коэффициентов корреляции, которые определяются выражением (2).

На рис. 3 пунктирной линией представлены, полученные из выражения (3) коэффициенты корреляции внешней информации на позиции 25 второго декодера $\xi_{25}^{(2)}(2)$ с каждым из принятых информационных символов на второй итерации второй фазы декодирования. Из рисунка видно, что коэффициенты корреляции, полученные из выражения (3), близки к экспериментально полученным коэффициентам корреляции.

В качестве оценки влияния перемежителей на эффективность итеративного декодирования предлагается использовать выражение

$$IDS' = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N V_k,$$

где V_k – дисперсия элементов строки матрицы $\rho^{(2)}(2)$, которая определяется следующим образом:

$$V_k = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N \left(\rho_{k,j}^{(2)}(2) - \overline{\rho_{k,j}^{(2)}(2)} \right)^2,$$

где $\overline{\rho_{k,j}^{(2)}(2)}$ – среднее значение коэффициентов корреляции в строке матрицы $\rho^{(2)}(2)$.

Для подтверждения того, что предлагаемая оценка влияния перемежителей на эффективность итеративного декодирования более точна, чем оценка в [4], было проведено моделирование и построены зависимости вероятности ошибки на бит от отношения E_b/N_0 для различных типов перемежителей. Моделирование проводилось для канала без памяти с аддитивным белым гауссовским шумом и ФМ. Был выбран турбокод со скоростью 1/3, порождающими многочленами составляющих сверточных кодов в восьмеричной форме (7, 5)₈, количеством информационных символов 256. При этом первый составляющий кодер устанавливается в конечное нулевое состояние дополнительной последовательностью, которая поступает в перемежитель, конечное состояние второго кодера может быть произвольным. Количество итераций 8.

На рис. 4 представлены зависимости вероятности ошибки на бит от отношения E_b/N_0 для пяти различных типов перемежителей, причем большинство перемежителей были выбраны с примерно одинаковыми свойствами. На рис. 4 кривая 1 – псевдослучайный перемежитель; кривая 2 – перемежитель Berrou and Glavieux, [2]; кривая 3 – перемежитель S-random, [7, 8]; кривая 4 – перемежитель Dithered-diagonal, [9]; кривая 5 – Correlation design, [5].

Далее, исходя из результатов моделирования, было проведено ранжирование перемежителей и определены нормированные оценки влияния перемежителей на эффективность итеративного декодирования IDS [4] и IDS'. Для нормирования использовалось наименьшее значение IDS или IDS'.

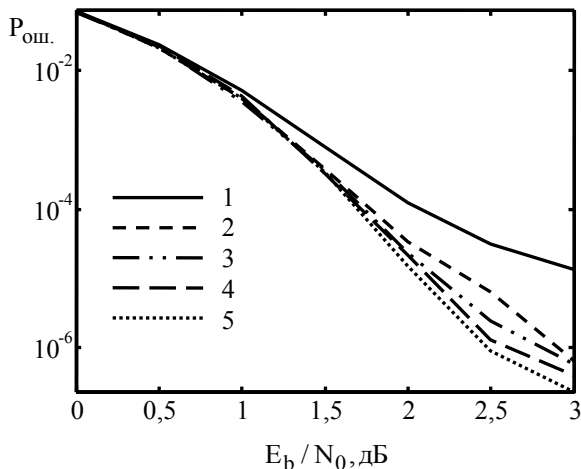


Рис. 4. Зависимость вероятности ошибки на бит от отношения E_b / N_0 для различных типов перемежителей

В табл. 1 представлены результаты ранжирования перемежителей, причем перемежитель с большим порядковым номером обеспечивает лучшую исправляющую способность итеративного турбодекодера, чем перемежитель с меньшим порядковым номером.

Таблица 1
Ранжирование перемежителей

№	Перемежитель	IDS	IDS'
1	Псевдослучайный	1,1448	1,4491
2	Berrou and Glavieux, [2]	1,0310	1,1174
3	S-random, [7, 8]	1,0259	1,0701
4	Dithered-diagonal, [9]	1	1,0115
5	Correlation design, [5]	1,0039	1

Из табл. 1 следует, что предлагаемая оценка IDS' более точна, чем IDS, предложенная в [4], так как при использовании оценки IDS будет

допущена ошибка при ранжировании. При использовании предлагаемой оценки IDS' ранжирование будет произведено правильно.

Выводы. Научным результатом работы является оценка влияния перемежителей на эффективность итеративного декодирования турбокодов. С практической стороны использование полученной оценки позволяет производить ранжирование перемежителей без проведения моделирования, что значительно сокращает время проведения ранжирования.

Направление дальнейших исследований – использование полученной оценки при построении перемежителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Berrou C., Glavieux A., Thitimjshima P. Near Shannon limit error correcting coding: Turbo codes // *Int. Conf. on Commun. – Geneva, Switzerland. – May 1993. – P. 1064 – 1070.*
2. Berrou C., Glavieux A. Near Optimum Error Correcing Coding and Decoding: Turbo-Codes // *IEEE Trans. On Comm. – October 1996. – Vol. 44, No. 10. – P. 1261 – 1271.*
3. Hokfelt J., Edfors O., Maseng T. Assesing interleaver suitability for turbo codes // *Nordic Radio Symposium. – Saltsjobaden, Sweden. – October 1998. – Электр. пещурц. – Мемод доцмына: <http://citeseer.nj.nec.com>.*
4. Hokfelt J., Edfors O., Maseng T. Turbo codes: correlated extrinsic information and its impact on iterative decoding performance // *Department of Applied Electronics Lund University. – Электр. пещурц. – Мемод доцмына: <http://citeseer.nj.nec.com>.*
5. Hokfelt J., Edfors O., Maseng T. Interleaver design for turbo codes based on the performance of iterative decoding // *IEEE Communication Letters. – February 2000. – Vol. 5, No. 2. – P. 52 – 54.*
6. Barbulescu A., Pietrobon S. Terminating the trellis of turbo-codes in the same state // *Electronics Letters. – January 1995. – Vol. 31. – P. 22 – 23.*
7. Dolinar S., Divsalar D. Weight distributions for turbo codes using random and nonrandom permutations // *TDA progress report 42–122. – Jet propulsion Lab., Pasadena, CA. – August 1995. – P. 56 – 64.*
8. Divsalar D., Benedetto S., Pollara F., Montorsi G. Turbo codes: Principles and applications // *Lecture Notes. – October 1997. – P. 42– 51.*
9. Crozier S. New high-spread high-distance interleavers for turbo-codes // *20th Biennial Symposium on Communications. – Kingston, Ontario, Canada. – May 2000. – P. 3 – 7.*
10. Bahl L., Cocke J., Jelinek F., Raviv J. Optimal decoding of linear codes for minimizing symbol error rate // *IEEE Trans. Inform. Theory. – Mar. 1974. – Vol. IT–20. – P. 429 – 445.*

Поступила 11.08.2004

ЖУЧЕНКО Александр Сергеевич, адъюнкт. В 1999 году окончил Харьковский во-

енный университет. Область научных интересов – помехоустойчивое кодирование.
