

АНАЛОГОВЫЙ МЕТОД ДЕКОДИРОВАНИЯ М-ИЧНЫХ ЛИНЕЙНЫХ КОДОВ

Бронников В.Н., к.т.н., доц., Поддубняк В.И. к.т.н., доц.
Донецкий государственный технический университет
Донецкий институт железнодорожного транспорта,
E-mail: info@drti.donetsk.ua

Рассмотрен мягкий метод декодирования М-ичных помехоустойчивых кодов. В нем суммируется информация о каждом символе, полученная от кодового сигнала непосредственно и от использования проверочных соотношений. Метод оптимален по критерию максимума принимаемой информации, прост, позволяет применять сигнально-кодовые конструкции, обеспечивающие высокие информационно-технические характеристики систем связи, в нем отсутствует процедура рекуррентной обработки сигнала.

Method of soft decoding of M-th noiseproof codes is considered. In it the information on each symbol, received from code signal directly and from use of verifying parities is summarized. The method is optimum on criterion of a maximum of the accepted information, is simple, permits to apply signalно-code designs, ensuring the high information-technical characteristics of systems of communication, in it there is absent procedure of recurrent processing of a signal.

Использование М-ичных кодов Рида-Соломона (Р-С) позволяет получить высокие значения (до 11 дБ) энергетического выигрыша от кодирования (ЭВК) при некогерентном приеме М-ичных ортогональных сигналов [1] в основном за счет последних. При этом $M=128$, что ведет к значительному расширению спектра сигнала. Кроме того, здесь [1] имеют место потери в ЭВК вследствие использования жесткого декодирования. Снижение M ведет к увеличению этих потерь и необходимости увеличения длины кода для увеличения ЭВК, что связано с увеличением сложности декодера. Цель настоящей работы - поиск мягкого простого метода декодирования М-ичных кодов (n,k,d) средней и большой длины.

Сделаем ряд допущений. Каждый из n M -ичных символов \bar{X}_j , $j=\overline{1,n}$, однозначно зависят от m двоичных символов x_{jh} , $j=\overline{1,n}$, $h=\overline{1,m}$, $M=2^m$, будем использовать следующие обозначения символов: $\bar{X}_{jls}, \bar{X}_{jqs}$, $ls \in Q_{ls}$, $qs \in Q_{qs}$, где Q_{ls} , Q_{qs} - множества M -ичных символов в s -м проверочном соотношении (сложении по модулю M) кода (n,k,d) , ls, qs -места M -ичных символов в s -м проверочном соотношении. Используются коды с отдельными проверочными соотношениями [1]. Все информационные двоичные символы x_{jh} , $j=\overline{1,k}, h=\overline{1,m}$, и M -ичные символы \bar{X}_j , $j=\overline{1,k}$, равновероятны и независимы друг от друга. Аддитивные шумы в каналах передачи кодовых символов статистически независимы. Декодирование будем производить в соответствии с критерием максимума (принимаемой) информации. Для этого найдем количество информации $I(\bar{X}_{jls}; \hat{\bar{X}}_{jls}^{(h)})$, содержащейся относительно j -того M -ичного символа \bar{X}_{jls} , $j=\overline{1,k}$, в первичных и вторичных оценках (определяемых ниже) $\hat{\bar{X}}_{jls}^{(h)}$, в соответствии с алгоритмом, включающим выполнение следующих операций:

1) получение первичных (без использования проверочных соотношений кода) максимально правдоподобных оценок кодовых (информационных и проверочных) M -ичных символов [2]:

2)

$$\hat{\bar{X}}_{jls}^{\circ} = \arg P_{0m}(\bar{X}_{jls}) = \arg \max_{\bar{X}_{jls}} P_0(\bar{X}_{jls}), \quad j = \overline{1,n}, \quad (1)$$

$$\bar{X}_{jls} \in Q_{\bar{X}}$$

где $Q_{\bar{X}}$ - множество возможных значений M -ичных символов, $P_0(\bar{X}_{jls}) = P_0(\bar{X}_{jls}/z_{jls}(t))$ - апостериорная вероятность передачи M -ичных символов, определяемая в (радио) приемном устройстве [2] в результате приема аддитивной смеси $z_{jls}(t) = y(\bar{X}_{jls}, t) + n_j(t)$ сигнала $y(\bar{X}_{jls}, t)$, несущего информацию об M -ичном символе \bar{X}_{jls} , и шума $n_j(t)$;

2) для каждого информационного символа вычисление $d-1$ (используя $d-1$ независимых проверочных соотношений) вторичных оценок M -ичных символов:

$$\hat{X}_{jqs}^{\infty} = - \sum_{\ell s \in Q_{\ell s}} \hat{X}_{j\ell s}^{\circ} + \hat{X}_{jqs}^{\circ} \text{ mod } M, \quad j = \overline{1, k}, \quad s \in Q_s, \quad (2)$$

где $(-X)$ элемент, обратный элементу X по сложению, Q_s - множество проверочных соотношений;

и 3) $d-1$ вероятностей (используя правило умножения для независимых событий), соответственно, вторичных оценок, полученных на основании соотношения (2):

$$P_s(\hat{X}_{j\ell s}^{\infty}) = \prod_{\substack{qs \in Q_{qs} \\ qs \neq \ell s}} P_0(\hat{X}_{jqs}^{\circ}), \quad j = \overline{1, k}, \quad s \in Q_s; \quad (3)$$

4) разделение множеств $Q_j, \overline{1, k}$, полученных по (1) и (2) первичных и вторичных оценок $\hat{X}_{j\ell s}^{(h)}$, на непересекающиеся подмножества Q_{j0} ,

$Q_{j0} \subseteq Q_j$, оценок, равных значению $\bar{X}_{j\ell s}, j = \overline{1, k}$;

5) для каждого информационного M -ичного символа $\bar{X}_{j\ell s}$ вычисление количества информации [3] $I(\bar{X}_{j\ell s}; \hat{X}_{j\ell s}^{(h)})$, содержащейся в (независимых друг от друга) оценках $\hat{X}_{j\ell s}^{(h)} \in Q_{j0}, j = \overline{1, k}$:

$$I(\bar{X}_{j\ell s}) = I(\bar{X}_{j\ell s}; \hat{X}_{j\ell s}^{(h)}) = \sum_{\hat{X}_{j\ell s}^{(h)} \in Q_j} I_s(\bar{X}_{j\ell s}; \hat{X}_{j\ell s}^{(h)}), \quad (4)$$

где $I_s(\bar{X}_{j\ell s}; \hat{X}_{j\ell s}^{(h)}) = \log \frac{P_s^*(\hat{X}_{j\ell s}^{(h)})}{P_{00}(\bar{X}_{j\ell s})}$ - количество информации, полученное посредством использования соотношений (1) и (2) (проверочные

соотношения здесь рассматриваются как отдельные независимые каналы поступления информации), $P_{00}(\bar{X}_{jls}) = 1/M = 1/2^m$ - априорная вероятность значений информационных M -ичных символов,

$$P_s^*(\cdot) = \begin{cases} P_{0(\cdot)} \text{ при } \hat{X}_{jls}^{(h)} = \hat{X}_{jls}^0 \\ P_{s(\cdot)} \text{ при } \hat{X}_{jls}^{(h)} = \hat{X}_{jls}^{oo} \end{cases} \quad (5)$$

Максимально информационные оценки информационных M -ичных символов определим путем выбора таких подмножеств Q_{j0} , $Q_{j0} \subseteq Q_j$, оценок, равных \bar{X}_{jls} , $j = \overline{1, k}$, при которых количество информации $I(\bar{X}_{jls})$ равно максимальной величине $Im(\bar{X}_{jls})$:

$$\hat{X}_{jls} = \arg Im(\bar{X}_{jls}) = \arg \max I(\bar{X}_{jls}), \quad j = \overline{1, k}. \quad (6)$$

$$Q_{j0} \subseteq Q_j$$

Вероятность (апостериорная) полученных по (6) оценок \hat{X}_{jls} информационных M -ичных символов [3]

$$P(\hat{X}_{jls}) = P_{00}(\hat{X}_{jls}) \exp(Im(\hat{X}_{jls} jls)) = (1/M) \exp(Im(\hat{X}_{jls})), \quad j = \overline{1, k}. \quad (7)$$

Максимально информационные оценки информационных двоичных символов x_{jh} , $j = \overline{1, k}$, $h = \overline{1, m}$ определяются на основе их однозначной зависимости от M -ичных символов.

В случае декодирования итеративных кодов оно производится последовательно по уровням кодирования [4], тогда принятые решения по (6) используются в качестве первичных оценок кодовых (информационных и проверочных) M -ичных символов, а полученные по (7) апостериорные вероятности информационных M -ичных символов - в качестве таковых в (3) и (5) для декодирования на последующем уровне; принятие решения о принятых значениях информационных

М-ичных символов итеративных кодов производится по (6) на последнем уровне декодирования.

В этом случае появляется возможность использования длинных итеративных помехоустойчивых кодов [7] совместно с М-ичными сигналами, что расширяет возможность повышения помехоустойчивости, частотной и информационной эффективностей [8] (за счет использования соответствующих сигнально-кодовых конструкций) при относительно простом декодировании.

Рассмотренный метод декодирования отличается от такового в [7] не только возможностью декодирования М-ичных кодов, но и методом объединения информации о переданных символах: здесь метод основан на использовании критерия максимума принимаемой информации (являющейся суммой информаций, получаемых непосредственно от М-ичного сигнала и по каналам, образуемым посредством использования проверочных соотношений кода), в [7] - на использовании критерия минимума квадрата ошибки решающей функции, являющейся взвешанной суммой максимально правдоподобных мягких оценок двоичных сигналов, получаемых от использования проверочных соотношений кода и непосредственно от демодулятора.

Из (1)...(7) следует отсутствие экспоненциальной зависимости количества выполняемых операций от длины кода n , т.е. рассмотренный метод декодирования относится к классу простых методов [5].

Из изложенного следует, что здесь вся информация о любом информационном М-ичном символе X_{jls} , первоначально содержащаяся во всей совокупности $\left\{ P_0(\bar{X}_{jls}/z_{jls}(t))_{j=1}^{j=n} \right\}$ функций апостериорных вероятностей передачи кодовых (информационных и проверочных) М-ичных символов \hat{X}_{jls} , $j = \overline{1, n}$, сосредотачивается в функции апостериорной вероятности injections (смотрите (7) $P(\hat{X}_{jls})$, $\overline{1, k}$). Таким образом, здесь, как и в [4 и 6], имеет injections место декомпозиция (т.е. разъединение) информации. Отличие заключается в том, что здесь имеет место более общий случай: использование М-ичных (а не двоичных) символов ($M=2$ в частном случае).

Выводы: рассмотренный метод декодирования оптимален по критерию максимума принимаемой информации, относительно прост, позволяет применять сигнально-кодовые конструкции, обеспечи-

вающие высокие информационно-технические характеристики систем связи, в нем отсутствует иногда нежелательная (вследствие увеличения времени декодирования) процедура рекуррентной обработки сигнала [1,9,10].

Список источников

1. Кларк Дж., мл., Кейн Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи: Пер. с англ. / Под ред. Б.С. Цыбакова. - М.: Радио и связь, 1987. - 391 с.
2. Гуткин Л.С. Теория оптимальных методов радиоприема при флуктуационных помехах. - М.: Сов. радио, 1972. - 447 с.
3. Радиотехнические системы передачи информации/ Борисов В.А., Калмыков В.В., Ковальчук Я.М. и др. / Под ред. В.В. Калмыкова. - М.: Радио и связь, 1990. - 304 с.
4. Бронников В.Н., Денищенко И.Я. Аналоговые методы декодирования // Радиотехника. - 1997. - № 10. - С. 19 - 22.
5. Туркин А.И. Рекуррентный прием сложных сигналов. - М.: Радио и связь. 1988. - 247 с.
6. Бронников В.Н., Поддубняк В.И. Некогерентное детектирование многопозиционных сигналов // Радиоэлектроника (Изв. высш. учеб. заведений). - 2000. - № 3. - С 78 - 80.
7. Бронников В.Н. Метод получения мягких решений относительно символов кодов // Труды НТК-Телеком-99. Украина, Одесса, сентябрь 1999г. - С.225 - 228. // Радиотехника. - 2000. - № 12. - С. 22 - 25.
8. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации/ Зюко А. Г., Фалько А.И., Панфилов И.П., Банкет В.Л., Иващенко П.В./ Под ред. А.Г. Зюко. - М.: Радио и связь, 1985. - 271 с.
9. Бронников В.Н., Крыжановский В.В. Помехоустойчивость и эффективность передачи сообщений с помощью m -уровневых итеративных кодов (m -ИК) // Радиоэлектроника (Изв. высш. учеб. заведений). - 1993. - № 7. - С.55 - 59.
10. Berrou C., Glavieux A., Thitimajshima. Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes (1), in Proc. IEEE Int. Conf. on Communications (Geneva, Switzerland, May 1993), pp. 1064-1070.