УДК 621.391

О. П. МАЛОФЕЙ, канд. техн. наук, *В. Н. ТУПКАЛО*, канд. техн. наук,
А. В. КАМЫШ

О ПОВЫШЕНИИ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ПРИЕМА В СИСТЕМАХ РАДИОСВЯЗИ

Обширные экспериментальные исследования эффективности корректирующих кодов в реальных радиоканалах показали, что в режиме исправления ошибок при $n \leqslant 511$ коды повышают достоверность не более, чем на один порядок, а потери вследствие избыточности кода при этом достигают 50—80 %. Расчеты свидетельствуют, что с увеличением длины комбинации до 64—128 единичных символов потери в скорости уменьшаются до 6—10 %, а коэффициент повышения верности увеличивается на два порядка [1].

В системах передачи данных в целях достижения максимального выигрыша в верности приема могут использоваться одновременно несколько кодовых и несколько косвенных способов обнаружения ошибок [2]. Комбинированным является такой принцип обнаружения ошибок, при котором особое значение приобретает согласование способов обнаружения ошибок.

Рассмотрим вероятностное пространство ошибок при приеме. Ошибки имеют различный характер: $0 \to 1$ или $1 \to 0$, разную кратность и случайный характер распределения в пределах принимаемой кодовой комбинации. Пусть P — вероятность ошибочного приема единичных символов. Применение того или иного способа обнаружения ошибок обеспечивает выявление какой-то их части. Обозначим пространство элементарных событий — ошибок через Ω, а его элементы — через ω_1, ω_2, ... Следовательно, $\Omega=\{\omega_i,\ i=1, 2, 3, ..., N\}$, где N — число элементов в Ω. Пусть ошибки, обнаруживаемые первым способом, составляют число A_1, которое является подмножеством Ω, т. е. $A_1 \in \Omega$. Тогда $P(A_1)=\sum\limits_{\omega_i\in A_1} P(\omega_i)$, а вероятность необнаруживаемых ошибок $P_{\text{но}}=P-P(A_1)$.

Если использовать комбинированно два способа обнаружения ошибок (косвенный и кодовый), вероятность совместного обнаружения ошибок определится суммой событий A_1 и A_2, т. е. объединением подмножеств $A_1 \bigcup A_2$ и пересечением $A_1 \bigcap A_2=\varnothing$, где

$$P(A_1\bigcup A_2)=\sum_{\omega_i\in A_1\bigcup A_2} P(\omega_i)=P(A_1)+P(A_2)-P(A_1\bigcap A_2).$$

При одновременном использовании нескольких способов (косвенных и кодовых) вероятность обнаружения ошибок

$$P(\bigcup_{i=1}^{\alpha} A)=\sum_{i=1}^{\alpha} P(A_i)-\sum_{i<j} P(A_iA_j)+\sum_{i<j<\gamma} P(A_iA_jA_\gamma)-...+(-1)^{\alpha-1}P(\bigcap_{i=1}^{\alpha} A_i).$$

Тогда вероятность необнаруживаемых ошибок $P_{\text{но}}=P-P(\bigcup\limits_{i=1}^{\alpha} A_i)$.

При таком комбинированном контроле ошибок способы обнаружения должны меньше дублировать и больше дополнять друг друга, т. е. вероятности пересечений множества A_i должны стремиться к нулю.

Вводя в систему ПДИ детектор качества, наряду с кодовыми методами защиты информации можно удешевить АПД. Кроме того, учет параметров пакетирования искажений позволяет, например, с помощью детектора качества сигналов с оптимальными зонами стираний, уменьшить вероятность необнаруженной ошибки на два-три порядка, уменьшить величину потерь скорости передачи в системах с переспросом, снизить избыточность кода [3].

Исправление стираний в кодах с повторением позволяет значительно повысить помехоустойчивость достаточно простыми средствами [3], реализовав следующий метод.

Осуществляется N-кратное повторение сообщений, закодированных (n, k) кодом, где $\{m-1<N<2m-1, m=3, 4...\}$. Если имеет место двукратное повторение сообщения, при обнаружении ошибки в первом повторении $(\vec{Y}_1)$ его целесообразно запомнить. При приеме второго повторения $(\vec{Y}_2)$ фиксируются соответствующие ему стирания $(\vec{\theta})$, и определяется результат сложения по модулю два одноименных символов $\vec{Y}_1$ и $\vec{Y}_2$, $\vec{\psi}=\vec{Y}_1\oplus\vec{Y}_2$. Результат логического перемножения $\vec{\theta}$ и $\vec{\psi}$ $\vec{E}=\vec{\theta}\vec{\psi}$ с большой вероятностью указывает на искаженные символы второго повторения, которые инвертируются в соответствии с $\vec{E}$. Скорректированная комбинация $\vec{X}=\vec{Y}_2\oplus\vec{E}$ подвергается кодовой проверке и при отсутствии ошибок выдается для дальнейшей обработки, а так же совместно с первой $\vec{Y}_1$ формируется код числа единиц в одноименных символах двух повторений

$$R=\sum_{i=1}^{2} Y_i.$$

Неверная коррекция элементов во втором повторении происходит в тех случаях, когда одноименным несовпадающим символам соответствует ложное стирание. Если суммарное количество таких коррекций совместно с искажениями на нестертых позициях второго повторения превысит обнаруживающую способность кода ($\sigma=d-1$), то будет иметь место необнаруживаемая ошибка. Вероятность необнаруженных ошибок определится соотношением

$$P_{но}(s,n)\cong\frac{1}{2^{n-n_s}}\left[\sum_{l=d}^{n} C_n^l P_0^l (1-P_0)^{n-l} + \sum_{i=1}^{d-1}\sum_{j=d-1}^{n} C_n^i P_0^i q_s^i (1-P_0)^{n-i} C_{n-i}^j P^j (1-P)^{n-(i+j)}\right].$$

Если выделить слагаемые, имеющие наибольший вес, то

$$P_{но}(s,n)\approx\frac{1}{2^{n-n_s}}\left[C_n^d P_0^d + C_{n-1}^{d-1} n P_0 q_s P^{d-1}\right].$$

Вероятность обнаружения ошибок, характеризующую потери информации при приеме второго повторения, найдем по формуле

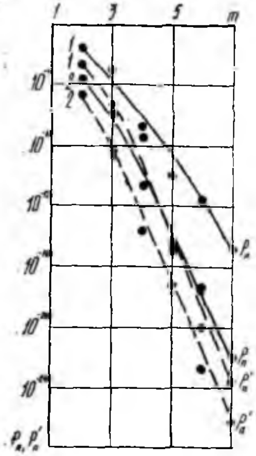
$$P_{оо}(s,n)\cong\sum_{i=1}^{d-1}\sum_{j=0}^{d-1-i} C_n^i C_{n-i}^j P_0^i q_s^i (1-P_0)^{n-i}(1-P)^{n-(i+j)}$$

или приближенно $P_{оо}(s,\ n)\approx nP_0q_s$ где j — число стираемых символов; i — число ошибок на нестертых позициях; P_0 — вероятность искажения единичного символа; P — вероятность трансформации символа при отсутствии стираний; q_s — вероятность ложного стирания; n — число символов в принятой комбинации; d — кодовое расстояние.

Когда второе повторение не удовлетворяет условию верности, происходит прием последующих $N-2$ повторений с коррекцией ненадежных элементов, местоположение которых определяет сигнал стирания θ, если код числа единиц в одноименных символах предшествующей группы повторений имеет максимальное или минимальное значение

$$R_{N-1}=\max\left(\sum_{i=1}^{N-1}\vec{Y}_i\right)\cup\min\left(\sum_{i=1}^{N-1}\vec{Y}_i\right).$$

При ограниченном числе элементов памяти ρ, каждый из которых имеет n ячеек, максимальный код числа единиц в одноименных символах ограничен числом повторений $R_N = 2^\rho - 1$ и определяет возможности исправления стираний. Следовательно, при дальнейшем приеме очередного повторения эффект исправления не имеет места. Но при этом ограничении возможна мажоритарная обработка принимаемых повторений сообщения с формированием результата голосования по большинству, определяемого правилом



$$\beta_{m(2m-1)} = \begin{cases} 1, \text{ если } \sum_{i=1}^{2m-1} \vec{Y}_i \geqslant m; \\ 0, \text{ если } \sum_{i=1}^{2m-1} \vec{Y}_i < m, \text{ где } m = 2^\rho - 1. \end{cases}$$

Использование сигнала, учитывающего качество канала связи θ для коррекции однократных ошибок в одноименных символах второго и всех последующих до $2^\rho - 1$ включительно повторений сообщения, позволяет увеличить помехоустойчивость. Это можно показать на примере определения вероятности потерь информации, сравнивая рассмотренный метод и метод адаптивного мажоритарного декодирования [3].

Вероятность искажения единичного символа в итоговой кодовой комбинации, полученной в результате мажоритарной обработки $2m-1$ повторений определяется выражением $P_э(m) \cong \cong C^m_{2m-1} P^m_0$, а в комбинированном методе, объединяющем процедуру демодуляции и декодирования, $P'_э(m) \cong C^{m-1}_{2(m-1)} P_0 P^{m-1}$. Следовательно, потери информации для каждого из сравниваемых методов можно найти при помощи выражений

$$P_п = nC^m_{2m-1} P^m_0; \; P'_п = nC^{m-1}_{2(m-1)} P_0 P^{m-1}.$$

Отношение этих величин позволит определить степень снижения потерь информации

$$\eta = P_п / P'_п = [(C^m_{2m-1})/(C^{m-1}_{2(m-1)})] P^{m-1}_0 P^{1-m}.$$

Если взять конкретные значения $P_0 = 10^{-2}$, $P = 10^{-3}$, $m = 2$, что соответствует наличию семи повторений $N = 7$, $\rho = 3$, то $\eta = = 1{,}75 \cdot 10^3$.

Характер изменения вероятности потерь от параметра числа повторов для двух рассмотренных алгоритмов (рисунок) показывает, что новый алгоритм имеет улучшенные вероятностно-временные характеристики и может быть использован в системах радиосвязи с каналами связи плохого качества.