

В. О. АЛЕКСАНДРОВ, С. В. КУЗНЕЦОВ, канд. техн. наук,
А. Г. СНИСАРЕНКО, Л. С. СОРОКА, канд. техн. наук

**КОМБИНИРОВАННАЯ СИСТЕМА АДРЕСНОГО ПЕРЕСПРОСА
 С ВАРЬИРУЕМЫМ ЧИСЛОМ ПОВТОРОВ И ИСПРАВЛЕНИЕМ
 ОШИБОК ТЕСТИРОВАНИЕМ**

Системы передачи данных адресного переспроса являются наиболее эффективными с точки зрения скоростных характеристик, однако классический алгоритм работы указанной системы требует наличия буфера бесконечного объема [1].

Есть алгоритм, позволяющий ограничить объем буфера путем применения специальной процедуры нумерации блоков и подсчета «расстояний» между самым старым из запрашиваемых блоков и текущим [2]. Однако это несколько ухудшает пропускную способность системы. По сути дела, такой алгоритм может рассматриваться как алгоритм, занимающий промежуточное положение между системой с безадресным повторением и блокировкой и системой адресного переспроса.

Гораздо эффективнее сокращать объем буфера за счет уменьшения числа переспросов линейных блоков путем выдачи в канал связи (КС) запрашиваемого блока, причем число выдаваемых в КС копий принятого с ошибками блока увеличивается по мере приближения буфера к переполнению [3]. С этой же целью предоставляется необходимым на приемной стороне применение процедуры исправления ошибок, т. е. создание комбинированной системы с переспросом и исправлением.

Очевидно, что пропускная способность системы, использующей такой алгоритм, будет выше, чем у системы, применяющей специальный алгоритм нумерации блоков (системы адресного переспроса с конечным объемом буфера) и не ниже, а как будет показано далее, в некоторых случаях выше, чем у классической системы адресного переспроса.

Рассмотрим многоуровневый алгоритм работы такой системы при условии, что буферы приемника и передатчика имеют объем qN , где N — длина петли обратной связи в блоках, т. е. число блоков, которое можно передать в канал до получения сигнала обратной связи.

Уровень 0. Если передатчиком по каналу обратной связи (КОС) получен сигнал «Подтверждение» (П), то передатчик осуществляет посылку на приемную сторону следующего блока из входной очереди.

Уровень 1. Если после выдачи в КС блока из входной очереди по КОС получен сигнал «Запрос» (З), запрашиваемый блок передается n_1 раз, далее осуществляется выдача блоков из входной очереди.

Уровень 2. Если все n_1 копий получены с неисправимыми декодером приемника ошибками (соответственно по КОС передатчик принял n_1 сигналов «З»), блок повторяется n_2 раз

.

Уровень q . Если все n_{q-1} копий линейного блока получены с неисправимыми декодером ошибками, имеет место полное заполнение буфера приемника. Блок повторяется n_q раз.

Уровень $q + 1$. Если все n_q копий получены с неисправимыми ошибками, буфер приемника полностью заполнен, переданные на этом уровне блоки в буферный накопитель не вмещаются, следовательно, на последние по КОС посылаются сигналы «З». Система остается на этом уровне, пока не будет декодирования без ошибок.

Рассмотрим детально работу системы с четырьмя уровнями: на нулевом и первом уровнях передается одна копия блока $n_0 = n_1 = 1$, а на втором уровне передаются две копии $n_2 = n_q = 2$. Объем буфера приемника и передатчика равен $2N$.

Алгоритм работы передатчика. Передатчик осуществляет нумерацию блоков и выдачу их в КС с одновременной записью в буферный накопитель. Если по «текущему» блоку (т. е. по которому ожидается сигнал обратной связи) получен сигнал «П», то производится исключение копии блока из буферного накопителя, производится выдача следующего блока из входной очереди (если очереди нет, то передатчик ничего не передает в КС до тех пор, пока не поступит очередной линейный блок). Когда по текущему блоку по КОС получен сигнал «З», то осуществляется выдача одной копии из буферного накопителя (если система находилась на нулевом или первом уровнях) и производится переход на следующий уровень, или две копии, если система находилась на втором уровне. Далее на втором уровне выдается две копии до момента прихода сигнала «П» на запрашиваемый блок, после получения указанного сигнала линейный блок вычеркивается из буферного накопителя. Аналогично производится выдача в случае потери сигнала обратной связи. В случае, если приходит сигнал «З» сразу на несколько блоков, то два раза повторяется блок, имеющий самый старший номер.

Алгоритм работы приемника. Положим, что приемник находится в нормальном состоянии, когда на его входе отсутствуют линейные блоки и буферный накопитель приемника (БНП) пуст. В этом состоянии при приеме блока с номером i для последнего вычисляется синдром. Если синдром равен 0, $S = 0$, то блок выдается получателю, по КОС посылается сигнал «П», а приемник приступает к обработке очередного поступившего на его вход блока. В случае, если $S \neq 0$, приемник переходит в состояние блокировки, система уходит на уровень 1, приемник запоминает блок с номером i и $N - 1$ последующих блоков в БНП. Через интервал времени, необходимый для приема $N - 1$ блоков, приемник получает первую копию блока i . Если синдром $S = 0$, то получателю выдаются блоки с номером i и $N - 1$ последующих блоков, если последние приняты без ошибок. Система возвращается на уровень 0. Если синдром $S \neq 0$, то на основании записанного в БНП блока i и полученной копии блока производится процедура декодирования тестированием [4], заключающаяся в следующем. Из БНП извлекается блок X_i и складывается по модулю два с полученной копией: $X_i \oplus X'_i = E$. Сформированный таким образом вектор ошибок содержит на позициях ошибок блоков X_i и X'_i единицы. Далее производится перебор всех возможных сочетаний единичных позиций

вектора надежности. Если ошибки исправлены (ошибки исправлены в том случае, когда отсутствуют ошибки в одинаковых позициях копий блоков и общее число ошибок не больше принятой исправляющей способности декодера (η), определяемой из быстродействия аппаратуры декодера и канальной скорости), то аналогично процедуре описанной выше, получателю выдаются блоки с номерами i до $N + i - 1$, БНП опорожняется, система переходит на уровень 0. Если ошибки декодером не исправлены (имеют место неисправимые ошибки), система переходит на уровень 2, по КОС передается сигнал «З», из БНП удаляется копия блока i и осуществляется запись последующих $N - 1$ блоков. После получения на уровне 2 двух копий блока X_i , каждая из них проверяется на наличие ошибок (на равенство синдрома нулю) и если хотя бы в одной копии ошибки отсутствуют ($S = 0$), то указанная копия выдается получателю, по КОС посылается сигнал «П», система переходит на уровень 0. Если имеют место ошибки в обоих копиях, то производится описанная выше процедура декодирования. К этому моменту времени БНП объемом $2N$ заполнен и если ошибки неисправимы, то последующие $N - 3$ блоков не будут приняты из-за переполнения БНП, поэтому на указанные блоки формируется сигнал «З». Если же ошибки декодером исправлены, то блок X_i и последующие $2N - 1$ блоков выдаются получателю (в случае отсутствия в них ошибок), БНП опорожняется, приемник возвращается в нормальное состояние, система переходит на уровень 0.

Проведем оценку пропускной способности системы, использующей описанный алгоритм работы в предположении, что прямой канал является двоичным симметричным каналом без памяти, а в обратном канале помехи отсутствуют.

Введем следующие обозначения: пусть H_0^A, H_0^B, H_0^C — события, состоящие в том, что при первой передаче линейного блока X_i в нем отсутствуют ошибки, имеют место обнаруживаемые и необнаруживаемые ошибки соответственно; Q_j^A, Q_j^B, Q_j^C — события, состоящие в том, что при j -той повторной передаче, $j \geq 1$, сообщение принято без ошибок, с обнаружением и с необнаружением ошибок соответственно; P_j^A и P_j^B — события, состоящие в том, что в результате тестирования ошибки в блоке исправлены и имеют место неисправимые ошибки соответственно; K_j^A, K_j^B — события состоящие в том, что при приеме j -го блока приемник восстанавливает или не восстанавливает блок соответственно.

Выведем вероятности приема блока по уровням.

Уровень 0:

$$P(0) = P(H_0^A) = P_A = (1 - \varepsilon)^n,$$

где ε — вероятность ошибки на символ в канале связи; n — длина блока в битах.

Уровень 1:

$$\begin{aligned} P(1) &= P(H_0^B K_1^A) = P(K_0^B K_1^A) = P(K_0^B) P(K_1^A | K_0^B) = \\ &= P(H_0^B) [P(Q_1^A) + P(Q_1^B P_1^A | H_0^B)] = \\ &= P(H_0^B) [P(Q_1^A) + P(Q_1^B) P(P_1^A | H_0^B Q_1^B)]. \end{aligned}$$

так как

$$P(H_0^B K_1^A) = (1 - P_A) [P_A + (1 - P_A) P(P_1^A | H_0^B Q_1^B)],$$

где

$$P(H_0^A) = P(Q_j^A) = (1 - \varepsilon)^n = P_A; \quad P(H_0^C) = P(Q_j^C) = P_C;$$

и $P_C \ll P_A$, то $P(H_0^B) = P(Q_j^B) = 1 - P_A - P_C \approx 1 - P_A$. Пусть

$$q_1 = P(P_1^A | H_0^B Q_1^B) = \frac{P(P_1^A H_0^B Q_1^B)}{P(H_0^B) P(Q_1^B)};$$

$$q = \frac{q_1}{(1 - P_A)^2}, \quad \text{где } q_1 = P(P_1^A H_0^B Q_1^B);$$

$$q_1 = \sum_{l_1=1}^{2\eta-1} \sum_{l_2=1}^{2\eta-1} \frac{n!}{l_1! l_2! (n - l_1 - l_2)!} \varepsilon^{(l_1+l_2)} (1 - \varepsilon)^{2n-l_1-l_2}.$$

η — число ошибок, исправляемых декодером).

Тогда

$$P(1) \leq (1 - P_A) [P_A + (1 - P_A) q],$$

или, обозначив через

$$P_1 = [P_A + (1 - P_A) q], \quad P(1) \leq (1 - P_A) P_1.$$

Уровень 2:

$$P(2) = P(H_0^B K_1^B K_2^A) = P(H_0^B K_1^B) P(K_2^A);$$

$$P(H_0^B K_1^B) = P(H_0^B) P(K_1^B | H_0^B) = P(H_0^B) \times \\ \times [1 - P(K_1^A | H_0^B)] = (1 - P_A)(1 - P_1);$$

$$P(K_2^A) = P[Q_2^A \cup Q_2^B Q_3^A \cup Q_3^B Q_2^B P_2^A | Q_2^B Q_3^B] = P(Q_2^A) + \\ + P(Q_2^B) P(Q_3^A) + P(Q_2^B) P(Q_3^B) P(P_2^A | Q_2^B Q_3^B) = \\ = P_A + (1 - P_A) P_A + (1 - P_A)^2 P(P_2^A | Q_2^B Q_3^B).$$

Нетрудно показать, что вероятность

$$P(P_2^A | Q_2^B Q_3^B) = q; \quad P(K_2^A) = P_A + (1 - P_A) P_A + (1 - P_A)^2 q.$$

Обозначим $P_2 = P(K_2^A)$. Используя выведенные вероятности, найдем среднее число передач, необходимых для приема одного блока:

$$E[V] \leq P_A + 2(1 - P_A) P_1 + [(N + 1) + 2](1 - P_A)(1 - P_1) P_2 + \\ + [2(N + 1) + 2](1 - P_A)(1 - P_1)(1 - P_2) P_2 + [3(N + 1) + 2] \times \\ \times (1 - P_A)(1 - P_1)(1 - P_2)^2 P_2 + \dots + [k(N + 1) + 2] \times \\ \times (1 - P_A)(1 - P_1)(1 - P_2)^{k-1} P_2.$$

Найдя сумму ряда, получаем

$$E[V] \leq P_A + 2(1 - P_A) P_1 + \frac{(1 - P_A)(1 - P_1)[(N + 1) + 2 P_2]}{P_2}.$$

Пропускная способность описываемой системы

$$\eta \leq \frac{1}{E[V]} \frac{k}{n}.$$

Обычно $k/n \approx 1$, тогда $\eta < 1/E [V]$. На рисунке приведены графики пропускной способности рассматриваемой системы, применяющей декодер, исправляющий две и четыре ошибки и использующей буфера на 14 блоков (кривые 2 и 1 соответственно).

Для сравнения приведены графики пропускной способности системы с адресным переспросом и бесконечным объемом буфера (кривая 3), пропускная способность которой $\eta = (1 - \epsilon)^n$, и системы адресного переспроса с конечным объемом буфера (кривая 4), для которой

$$\eta > \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \lambda_1 + \lambda_2 N},$$

где

$$\lambda_0 = \frac{\beta}{1-\gamma} (1 - \beta\gamma^{N-1});$$

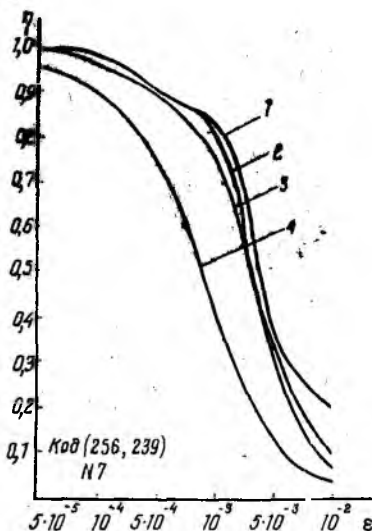
$$\lambda_1 = P_n^2 \{ \alpha^{N-2} + (1 - P_n) \times \\ \times P_n^{N-2} + (1 - P_n)^2 \gamma^{N-2} \};$$

$$\lambda_2 = 3 - P_n^2 \alpha^{N-2} - \alpha^2 \beta^{N-2} - \beta\gamma^{N-2};$$

$$P_n = (1 - \epsilon)^n; \alpha = 1 - (1 - P_n)^2;$$

$$\beta = 1 - (1 - P_n)^3; \gamma = 1 - (1 - P_n)^4$$

Список литературы: 1. Шварцман В. О., Емельянов Г. А. Теория передачи дискретной информации. М. 1979. 424 с. 2. Philips Yu., Sku Lin. An efficient selective-repeat ARQ scheme for satellite channels and its throughput analysis // IEEE Trans. Commun. 1981. № 3. P. 353—363. 3. Weldom E. J. An Improved Selective-Repeat ARQ strategy // IEEE Trans. Commun. 1982. № 3. P. 480—486. 4. Оценка пропускной способности систем с адресным переспросом и исправлением / Александров В. О., Кузнецов С. В., Приходько С. И., Сорока Л. С. // Изв. вузов. Радиотехника. № 9. 1986. С. 42—47.



Поступила в редколлегию 29.01.88

УДК 621.373.826

А. И. СТАРИКОВ, А. А. МИШНЕВ, канд. физ.-мат. наук,

А. В. ДЯДЧЕНКО, канд. физ.-мат. наук, В. Т. ПЛАКСИЙ, канд. физ.-мат. наук

ФОРМИРОВАТЕЛЬ ТОКОВЫХ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ ПИТАНИЯ СВЧ-ПОЛУПРОВОДИКОВЫХ ДИОДОВ

Одно из современных направлений в электронике СВЧ — генерация и усиление электромагнитных колебаний при помощи полупроводниковых диодов, которые в настоящее время выделены в отдельный класс твердотельных электронных приборов. Это полупроводниковые генераторные СВЧ-диоды (диоды с отрицательным дифференциальным сопротивлением), к которым относятся лавинно-пролетные (ЛПД) или