

8. Месарович, М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такаха. – М.: Мир, 1973. – 344 с.

К.ф.-м.н., доцент **Максимов А.В.** :  
avmaximov@gmail.com; (3852) 36-70-18 – Алтайский госуниверситет.

УДК 681.3.042.5: 621.39

## СИСТЕМА С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ И КОМБИНИРОВАННЫМ ЗАПРОСОМ

Б.В. Матвеев

На основе программного модуля системы с обратной связью и комбинированным запросом получены основные её характеристики при работе в каналах низкого качества.

**Ключевые слова:** система, обратная связь, качество, модуль, испытания, ошибка, запрос, информация, канал.

Перспективным направлением использования систем с обратной связью является применение совмещенных систем, использующих наряду с корректирующим кодированием алгоритм комбинированного запроса [1].

Основным преимуществом таких систем перед классическими является возможность передачи сообщений по каналам связи низкого качества. Реализация такой процедуры достигается прежде всего за счет объединения обнаруживающих способностей кодов, построенных на основе полиномов CRC с корректирующими кодами, имеющими определенную структуру. Такими кодами могут быть коды (32, 16) с частично увеличенной исправляющей способностью по ошибкам высокой кратности [2], а также коды Хемминга (8, 4), обеспечивающие исправление двукратных ошибок за счет объединения их возможностей с обнаруживающими свойствами полиномов CRC [3].

Протокол обработки символов может быть основан на классических процедурах систем с РОС [4], либо использовать процедуру систем с временным уплотнением [5], где передатчик поочередно передает блоки из двух буферов по прямому каналу, а по обратному каналу друг за другом следуют комбинации ACK или NACK, принадлежащие решениям по каждому из буферов.

### Система с комбинированным запросом

Структура передачи блоков в системе с комбинированным запросом представлена на рисунок 1.

Передатчик посылает на приемную сторону только информационный блок 1 без проверочных элементов 1'. Обнаружение ошибок в блоке 1 осуществляется по обычной процедуре на основе проверочного полинома

CRC-16 или CRC-32. В случае отсутствия искажений по обратному каналу посылается подтверждение ACK, после приема которого передающая сторона посылает очередной информационный блок (кадр) 2. Обнаружение ошибки получателем в блоке 2 вызывает передачу отрицательного подтверждения NACK.

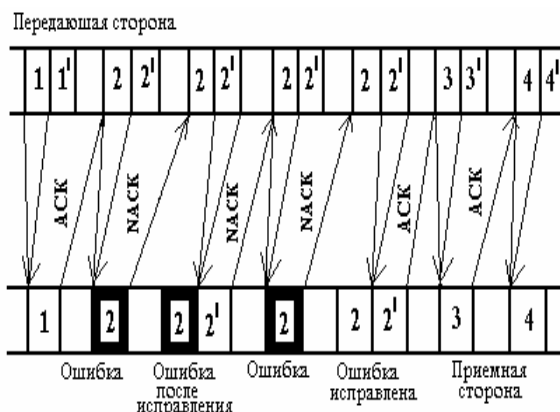


Рисунок 1 - Передача блоков в системе с комбинированным запросом

Передатчик реагирует в этом случае посылкой на приемную сторону проверочных символов кода 2', длина которых равна числу элементов информационного блока, т.е. избыточность кода равна 1. Ошибки канала связи воздействуют не только на информационный блок, но и на проверочный кадр, вызывая в нем изменения. В результате, например, исправление ошибок корректирующим кодом может оказаться невозможным и после повторной проверки на наличие искажений посылается комбинация NACK. В этом случае на приемную сторону посылаются уже не проверочные элементы, а вновь информационный блок 2. Если при обработке его вновь будут выявлены ошибки, то посылается NACK, тем самым запрашиваются повтор-

## РАЗДЕЛ I. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ СИНТЕЗА И АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

но проверочные символы 2'. Новое распределение ошибок в кадре 2 позволяет корректирующему коду (2, 2') исправить ошибки и приемной стороне послать передатчику АСК, который отреагирует на это посылкой нового кадра 3.

Таким образом, система работает в двух режимах. Первый режим соответствует процедуре обычных протоколов систем с РОС и характеризуется высокой скоростью (помехи в канале незначительные).

Второй режим повторов включается, когда появляются ошибки в информационных кадрах. При интенсивных помехах обычная система РОС будет заикливаться (повторы без остановок), а система с комбинированным запросом будет осуществлять исправление искажений за счет корректирующего кодирования, что позволяет сократить число запросов по обратному каналу и соответственно повысить скорость передачи данных.

Под каналами низкого качества (наличие интенсивных помех) будем понимать, прежде всего, такие каналы, где вероятность независимых ошибок приближается к значению  $p=0,1$  и более. Этому критерию соответствуют, например, коротковолновые (КВ) каналы связи, которые характеризуются как каналы с замираниями и имеют ту особенность, что амплитуды и фазы составляющих сигнала, приходящего к приемнику, подвержены флюктуациям. Это приводит к тому, что отдельные элементы сигнала в лучах, пришедших различными путями, взаимно перекрываются.

Обычно, чтобы избежать такой ситуации и получить приемлемое качество приходящего сигнала, снижают скорость передачи данных до значений 75-300 бит/сек, однако, и при таких мерах на выходе модема приемника наблюдается достаточно высокая вероятность ошибок в принятых кодовых комбинациях.

В [5] приводятся экспериментальные данные по некоторым КВ каналам связи, например, у канала со скоростью 75 бит/сек  $p=1,31 \cdot 10^{-2}$  и при этом коэффициент группирования ошибки  $\alpha=0,449$ . Такое описание канала ( $p$  и  $\alpha$ ) называется моделью канала по Пуртову [5]. Эта модель достаточно хорошо отражает реальные каналы и может быть использована при их моделировании.

В предлагаемом исследовании системы с комбинированным запросом модель Пуртова реализуется через марковскую модель [6], где последовательность ошибок полностью

определяется матрицей переходных вероятностей

$$\begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} \\ P_{10} & P_{11} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

для которой справедлива система уравнений

$$\begin{cases} P_0 + P_1 = 1 \\ P_1 \cdot P_{10} + P_0 \cdot P_{00} = P_0 \\ P_1 \cdot P_{11} + P_0 \cdot P_{01} = P_1. \end{cases} \quad (2)$$

Если приравнять величину вероятности ошибки в канале связи  $p$  и  $P_1$  из (2), а показатель группирования ошибок  $\alpha$  принять равным  $P_{11}$  из (1), то из уравнения (2) можно после преобразований найти значение  $P_{00}$ , которое будет определяться формулой

$$P_{00} = \frac{1 - P_1(2 - P_{11})}{1 - P_1}. \quad (3)$$

По полученному значению  $P_{00}$  (3) и значению  $P_{11}$  (1) можно осуществить моделирование на ЭВМ последовательности группирующихся ошибок, где чередование независимых ошибок с вероятностью  $p$  будет изменяться в соответствии с коэффициентом их группирования  $P_{11}$  и будет соответствовать основному выражению модели Пуртова

$$P(1 \geq n) = n^{1-\alpha} \cdot p, \quad 0 < \alpha < 1, \quad (4)$$

где  $P(1 \geq n)$  – вероятность того, что в кодовой комбинации  $n$  будет одна и более ошибок.

### Программная реализация модели

В соответствии со структурой системы с обратной связью и комбинированным запросом, была разработана её модель в виде программного модуля на основе алгоритмического языка высокого уровня СИ<sup>++</sup>.

Панель управления моделью с возможностью установки различных её параметров и контроля за уровнем различного вида помех показана на рисунке 2.

Программный модуль позволяет осуществить установку в системе полиномов вида CRC-16 или CRC-32 через окно «Выбор CRC» и проверить их работоспособность при различных видах помех (окно «Тип помех»).

При необходимости возможен контроль за интенсивностью помех через подсчитываемую частоту ошибок в окне «Исследование помех». Это значение должно совпадать с

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2010



Рисунок 2 - Панель управления программного модуля

вводимой суммарной вероятностью ошибок в прямом канале связи (окна: «Введите вероятность ошибки», «Смешанная помеха»).

Окно «Число блоков» предназначено для выбора числа информационных блоков по 16 символов в кодовом слове прямого канала (минимальное значение –1, максимальное не ограничено). Это позволяет исследовать свойства CRC-16 и CRC-32 по обнаружению ошибок при различном количестве информационных символов кодового слова и соответствующим образом выбрать их длину в рабочем варианте системы с обратной связью и комбинированным запросом.

Справа от окна «Проверка CRC» после испытаний появляется значение вероятности необнаруженной ошибки  $P_{но}$  для выбранного полинома CRC.

Окно «Тип помехи» позволяет установить три вида помех.

В окне «Группирование ошибок» имеется возможность выбрать необходимый коэффициент группирования  $\alpha$  из моделей каналов по Пуртову [5]. Выбор типа помехи «смешанная» позволяет к группирующимся ошибкам в «чистые» интервалы добавить определенное количество независимых ошибок, отражающих появление аддитивного шума в канале связи.

Максимальное число повторов по обратному каналу устанавливается в окне «Введите число повторов» (максимальное число не ограничивается).

После установки количества информационных кадров и всех необходимых пара-

метров системы с обратной связью и комбинированным запросом осуществляется ввод модели в рабочее состояние кнопкой «Полное моделирование для одной вероятности». Справа от этой кнопки в конце испытаний появится значение вероятности ошибок  $P_{ош}$  в информационных символах, полученной после применения процедур корректирующего кодирования и запросов по обратному каналу.

Под надписью «Отказов от декодирования» появляется значение числа блоков, которое невозможно было декодировать, используя максимальное значение введенного числа запросов по обратному каналу. Под надписью «Ошибок декодирования» в конце испытаний модели появляется число блоков, в которых примененный полином CRC пропустил наличие ошибок.

Скорость передачи информации подсчитывается в системе с учетом соотношения в кодовом слове числа его информационных символов и проверочных символов полинома CRC, а также числа осуществленных повторов по обратному каналу, когда передавались проверочные символы корректирующего кода или кодовые информационные слова, в случае невозможности исправить ошибки за счет проверочных символов.

В предлагаемой системе можно использовать определенные виды корректирующих кодов, например, (32, 16) или (8, 14).

Корректирующий код (32, 16) исправляет все ошибки до третьей степени кратности, а также 83% четырехкратных ошибок.

## РАЗДЕЛ I. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ СИНТЕЗА И АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Корректирующий код (8, 14) способен исправлять только однократные ошибки и обнаруживать двукратные. Однако этот код можно использовать и в режиме исправления двукратных ошибок.

Алгоритм исправления двукратных ошибок с учетом соответствующих им синдромов  $S_i$  будет выглядеть следующим образом.

После обнаружения ошибок в информационном блоке через полином CRC по обратному каналу запрашиваются проверочные символы кода Хемминга, заранее сформированные на передающей стороне. В соответствии с транспортированной матрицей  $H^T$  вычисляются синдромы для каждого участка информационного блока и проверочных символов CRC.

По синдромам однократных ошибок осуществляется их исправление по обычной процедуре. При обнаружении синдрома двукратной ошибки осуществляется её исправление путем последовательного ввода исправлений в информационные символы в соответствии с распределением ошибок по этому синдрому.

После каждого ввода исправлений осуществляется процедура определения наличия ошибок во всем кодовом слове с помощью полинома CRC. Ошибки будут исправлены, если полином CRC покажет их отсутствие, через появление соответствующей этому кодовой комбинации [4].

При наличии, например, двух двукратных ошибок в основном блоке, осуществляется аналогичная процедура, но только через парные исправления по каждому из синдромов, количество которых будет определяться как  $C_8^2$ .

При наличии ошибок в трех блоках количество переборов будет определяться как  $C_{12}^3$  и т.д.

При наличии в каждом из 12-ти кодовых комбинаций блоков двукратных ошибок общее количество переборов будет максимальным, т.е.  $C_{48}^{12}$ . Однако при практическом использовании предложенной процедуры следует ограничивать число переборов, исходя из реальной помеховой обстановки, что приведет к некоторому снижению скорости передачи за счет повторов по обратному каналу.

### Результаты экспериментов и их обсуждение

На основе программного модуля было проведено исследование свойств системы с обратной связью и комбинированным за-

просом для корректирующего кода (32,16).

При работе системы в канале плохого качества ( $p=0,1$ ) для обнаружения ошибок в прямом канале был выбран полином CRC-32, а для исправления ошибок в обратном канале был применен корректирующий код (n, 1), позволяющий при длине  $n \geq 48$  обеспечить практически безошибочную передачу по обратному каналу комбинаций запроса. Отсюда вытекает необходимость использовать минимальную длину информационного блока равную 16 бит.

Количество информационных кадров при испытаниях принималось равным  $10^8$ . Один кадр состоял из 16 информационных и 32-х проверочных символов от CRC. Число повторов в системе устанавливалось равным 100.

В таблице 1 представлены результаты испытаний системы для независимых ошибок при  $p \geq 0,1$  и числе блоков 1, где S- скорость передачи данных.

По результатам испытаний (табл. 1) можно сделать вывод, что предельным значением для работоспособности системы является величина  $p=1,3 \cdot 10^{-1}$ , так как при более низких вероятностях ошибок в канале значение  $P_{ош}$  получается больше, чем  $10^{-8}$ .

Были также осуществлены (число блоков 1) испытания модели системы с обратной связью и комбинированным запросом при более лучшем канале, чем  $p \geq 0,1$ .

Таблица 1 - Результаты испытаний при  $p \geq 0,1$

P	$10^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$
$P_{ош}$	$\leq 10^{-8}$	$\leq 10^{-8}$	$\leq 10^{-8}$
S	0,1002	0,0741	0,0577
P	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{-1}$
$P_{ош}$	$\leq 10^{-8}$	$1,25 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-5}$
S	0,0441	0,0332	0,0281

Результаты полученных значений для  $P_{ош}$  и S представлены в таблице 2. Как видно из табл. 2, результаты для скорости передачи данных в прямом канале возрастают при вероятности ошибок в принятых информационных символах  $P_{ош} \leq 10^{-8}$ .

Таблица 2 - Результаты испытаний при  $p < 0,1$

P	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05
$P_{ош}$	$\leq 10^{-8}$	$\leq 10^{-8}$	$\leq 10^{-8}$	$\leq 10^{-8}$	$\leq 10^{-8}$
S	0,11	0,13	0,15	0,17	0,198
P	0,04	0,03	0,02	0,01	
$P_{ош}$	$\leq 10^{-8}$	$\leq 10^{-8}$	$\leq 10^{-8}$	$\leq 10^{-8}$	
S	0,218	0,2379	0,260	0,290	

При вероятности  $p=10^{-2}$  скорость S достигает значения 0,29 и будет дальше увели-

чиваться до предельного значения  $S=0,33$ , что определяется соотношением между числом информационных символов в одном блоке (16 бит) и числом проверочных символов в CRC-32 (32 бит).

При вероятностях ошибок в канале связи  $p < 0,1$  можно увеличивать длину информационного блока кодового слова до 2-х и более, не ухудшая значение  $P_{\text{ош}} \leq 10^{-8}$  с повышением скорости передачи  $S$ .

В таблице 3 приведены результаты испытаний при числе блоков 2.

Таблица 3 - Результаты испытаний при числе блоков 2

P	0,09	0,08	0,06	0,05
$P_{\text{ош}}$	$\leq 10^{-8}$	$\leq 10^{-8}$	$\leq 10^{-8}$	$\leq 10^{-8}$
S	0,116	0,180	0,210	0,246
P	0,04	0,03	0,02	0,01
$P_{\text{ош}}$	$\leq 10^{-8}$	$\leq 10^{-8}$	$\leq 10^{-8}$	$\leq 10^{-8}$
S	0,270	0,300	0,330	0,390

В таблице 4 приведены результаты испытаний при числе блоков 3.

Из данных табл. 3 и табл. 4 следует, что не при всех ошибках  $p$  в канале связи с увеличением числа блоков возрастает значение скорости  $S$ .

Таблица 4 - Результаты испытаний при числе блоков 3

P	0,09	0,08	0,06	0,05
$P_{\text{ош}}$	$\leq 10^{-8}$	$\leq 10^{-8}$	$\leq 10^{-8}$	$\leq 10^{-8}$
S	0,110	0,149	0,190	0,270
P	0,04	0,03	0,02	0,01
$P_{\text{ош}}$	$\leq 10^{-8}$	$\leq 10^{-8}$	$\leq 10^{-8}$	$\leq 10^{-8}$
S	0,300	0,330	0,360	0,430

Как видно из этих таблиц, при  $p=0,09$ ,  $p=0,08$  и  $p=0,06$  увеличение числа блоков с 2 до 3 приводит к уменьшению скорости передачи. Начиная со значения  $p=0,05$ , с увеличением числа блоков скорость возрастает.

Так, для примера, в таблице 5 приведены результаты для значения  $p=0,05$ .

Таблица 5 - Результаты испытаний при  $p=0,05$

Число блоков	1	2	3	4	5	6
S	0,198	0,246	0,270	0,278	0,293	0,297

Для системы с обратной связью и комбинированным запросом было проверено её функционирование с учетом модели Пуртова [3]. Для этого случая были выбраны каналы: с  $p=0,05$   $\alpha=0,34$  и  $p=0,05$   $\alpha=0,5$ . Испытания проводились при CRC-32 и числе блоков 6. В результате при  $P_{\text{ош}} \leq 10^{-8}$  значение скорости было соответственно равным  $S=0,214$  и

$S=0,181$ . Сравнение с результатами из табл. 5 показало, что группирование ошибок при  $p=0,05$  приводит к снижению скорости передачи, из-за того, что корректирующий код (32,16) при группировании ошибок не исправляет часть из них, а система отвечает на это увеличением количества запросов по обратному каналу.

### Заключение

Таким образом, исследования системы с обратной связью показали, что можно обеспечить достоверность передачи данных порядка  $\leq 10^{-8}$  при вероятности ошибок в символах после модема порядка  $10^{-1}$ . Скорость передачи при этом составила значение  $S=0,1$ . Для канала с меньшей интенсивностью помех ( $p=0,05$ ) скорость повысилась до значения  $S=0,3$ . Для реального канала по модели Пуртова, у которого  $p=1,2 \cdot 10^{-2}$  и  $\alpha=0,34$  скорость передачи возросла до значения  $S=0,46$  при достоверности принятых символов порядка  $\leq 10^{-8}$ .

Следовательно, из полученных результатов можно сделать вывод, что система с обратной связью и комбинированным запросом может быть рекомендована для использования в каналах связи с интенсивными помехами, структура и вид которых изменяется по случайному закону в течение сеанса связи [7, 8, 9].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матвеев, Б.В. Система передачи информации с комбинированным запросом/ Б.В. Матвеев // Вестник ВГТУ. Сер. «Радиоэлектроника и системы связи». Вып.4.2 Воронеж: ВГТУ, 2002. С. 4-5.
2. Матвеев, Б.В. Корректирующий код для системы с РОС и комбинированным кодированием/ Б.В. Матвеев// Вестник ВГТУ. Сер. «Радиоэлектроника и системы связи». Вып.4.1. Воронеж: ВГТУ, 2001. С.10-11.
3. Матвеев, Б.В. Коррекция ошибок при интенсивных помехах в системах с обратной связью и комбинированным запросом/ Б.В. Матвеев, В.В. Камсков // Вестник ВГТУ. Сер. «Радиоэлектроника и системы связи». Вып.4.4. Воронеж: ВГТУ, 2004. С. 4-6.
4. Лагутенко, О.И. Модемы: Справочник пользователя/ О.И. Лагутенко - Под ред. А.Лурье. СПб.: Лань., 1997.
5. Пуртов, Л.П. Элементы теории передачи дискретной информации / Л.П. Пуртов, А.С. Замрий, А.И. Захаров -М.: Радио и связь, 1971.
6. Шувалов, В.П. Передача дискретных сообщений: Учебник для вузов/ В.П. Шувалов, Н.В. Захарченко, В.О. Шварцман и др.; Под ред. Шувалова В.П. М.: Радио и связь, 1990.

## РАЗДЕЛ I. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ СИНТЕЗА И АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

7. Арипов, М.Н. Передача дискретной информации по низкоскоростным каналам связи/ М.Н. Арипов - М: Связь, 1980.
8. Злотник, Б.М. Помехоустойчивые коды в системах связи /Б.М. Злотник - М.: Радио и связь, 1989.
9. Прокис, Джон Цифровая связь./ Дж. Прокис.- Пер.с англ./ Под ред. Кловского Д.Д. – М.: Радио и связь. 2000.

*К.т.н., доцент Матвеев Б.В. тел. (4732)-43-76-65, Воронежский государственный технический университет, кафедра радиотехники*

УДК 004.322

### ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МОДЕЛЕЙ ПРОТОКОЛОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ И ИХ ВЕРИФИКАЦИИ

В.Л. Оленев

Предложен алгоритм перехода от спецификации протокола передачи данных к созданию архитектурной диаграммы модели и далее – скелета этой модели на языке программирования высокого уровня. Так же предложен алгоритм верификации архитектурной диаграммы с целью выявления ошибок, способных осложнить компиляцию скелета модели протокола.

**Ключевые слова:** связь, протоколы, моделирование, верификация

Для безопасной, качественной и быстрой организации связи между устройствами используют протоколы передачи данных. Это наборы правил, которые определяют обмен данными между различными устройствами и программными средствами. Протокол определяет временные характеристики сигналов и структуру передаваемых данных. Сетевые протоколы определяют также и правила взаимодействия устройств в составе сети.

В настоящее время время моделирование протоколов передачи данных является очень трудоемкой и ресурсоемкой задачей. Их проектирование сопряжено с рядом трудностей, связанных с увеличением сложности проектов, повышением требований к надежности и потребляемой мощности изделий, работающих по данному протоколу, а так же необходимостью завершения проекта в кратчайшие сроки. Работая в данной сфере, важно использовать различные инструменты автоматизации, которые способны ускорить и облегчить процесс разработки и написания модели [1, 2]. В данной статье будет описан подобный метод, который позволит:

Упростить проектирование модели, основываясь на спецификации;

Описать архитектуру модели протокола, используя набор стандартных модулей, каждый из которых несет свою конкретную функциональность;

Проверить полученную модель на наличие ошибок проектирования;

Сгенерировать скелет модели на

SystemC, основываясь на спроектированной архитектуре.

Полученный код должен компилироваться без ошибок.

#### Постановка задачи

Для разработки системы моделирования протоколов передачи данных для начала нужно определить набор блоков (модулей), из которых будет состоять модель. Для этого нужно проанализировать, какая же функциональность описана в спецификациях протоколов и какие могут понадобиться модули для разработки архитектурных диаграмм.

Спецификация – это базис для создания протокола, так как реализация протокола должна отвечать всем требованиям, описанным в этой спецификации. Как правило, в достаточно подробной спецификации протокола описаны следующие части и компоненты:

Общее представление о протоколе, сфере его применения;

Описание данного протокола по слоям;

Описание набора функций, которые несет в себе слой;

Возможно, описание интерфейсов взаимодействия с другими слоями (SAP'ов);

Возможно, описание функций менеджмента слоя;

Описание взаимодействия между устройствами в составе сети; может быть частично раскидано по слоям;

Подробное описание конкретных наиболее сложных процедур;