

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. ЛОМОНОСОВА

ФАКУЛЬТЕТ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАТЕМАТИКИ И КИБЕРНЕТИКИ

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

“Моделирование сигналов модемов, использующих стандарты

ITU-T V.22bis, V.26A/B, V.27ter, V.29, V.32, V.32bis.

Математическое моделирование телефонной линии связи.”

Бодунова Николая Владимировича,

Научный руководитель: Сухомлин Владимир Александрович

Содержание

1. Введение	4
1.1 Терминология	4
1.2 История вопроса	5
1.3 Цель работы	8
1.4 Постановка задачи	8
1.4.1 Техническое задание	8
1.4.2 Интеграция комплекса	8
1.4.3 Перспективы развития	8
2. Технические особенности	9
2.1 Виды современных модемов	9
2.2 Каналы связи	10
3. Разработка	11
3.1 Общее описание системы	11
3.2 Имитатор сигнала модема	13
3.2.1 Средство подготовки исходных данных	13
3.2.2 Скремблер	14
3.2.3 Мэппер	15
3.2.4 Фильтр	17
3.2.5 Модулятор	19
3.3 Модель линии связи	21
3.3.1 Амплитудно-частотная характеристика	21
3.3.2 Аддитивный гауссовский шум	22
3.3.3 Импульсные помехи	23

3.3.4 Эхо-сигналы	24
3.3.5 Фазовое дрожание	25
4. Реализация	25
4.1 Реализация имитатора сигнала модема	25
4.2 Реализация модели линии связи	27
4.3 Язык реализации	28
5. Заключение	28
6. Список использованной литературы	29
7. Приложения	30

1. Введение

1.1 Терминология

ССИТТ (The International Telegraph and Telephone Consultative Comitee) -Международный Консультативный Комитет по Телефонии и Телеграфии (МККТТ). В последнее время изменил название на ИТУ-Т (International Telecommunications Union - Telecommunications)

Стандарты серии “V” - стандарты ИТУ - Т, касающиеся передачи данных по каналам телефонных сетей общего пользования.

дуплексный режим работы - возможность одновременной работы устройства на передачу и на прием

полудуплексный режим работы - возможность работы устройства и на передачу, и на прием, но не одновременно

симплексный режим работы - возможность работы устройства только на передачу или только на прием

АЧХ - амплитудно-частотная характеристика, зависимость уровня ослабления сигнала от его частоты.

аддитивный гауссовский шум - случайная помеха, присутствующая в канале связи в каждый момент времени. Амплитуда этой помехи подчиняется закону распределения Гаусса

импульсная помеха - кратковременная помеха, которая может присутствовать в любой момент времени с вероятностью, определяемой равномерным законом распределения. Амплитуда этой помехи подчиняется нормальному закону распределения

фазовое дрожание - случайное отклонение фазы сигнала от текущей в каждый момент времени. Величина отклонения подчиняется нормальному закону распределения

эхо - сигнал - сигнал, вызванный частичным отражением передаваемого сигнала при переходе сигнала из одной среды в другую. Форма эхо-сигнала совпадает с формой исходного сигнала

сдвиг частоты сигнала - отклонение частоты на стороне приемника от частоты на стороне передатчика

1.2 История вопроса

В настоящее время все больше информации передается в цифровом виде. Данные, передаваемые в цифровом виде, не подвержены искажениям и могут быть переданы на любое расстояние без каких-либо изменений. К сожалению, до недавнего времени практически все каналы связи были аналоговыми, непригодными для передачи цифровой информации. Это связано с тем, что цифровая информация - это поток прямоугольных импульсов с четко определенными временными параметрами. Широкий частотный спектр цифрового сигнала вызывает значительные сложности при передаче его по аналоговому каналу связи (вернее, это очень дорого с экономической точки зрения). Кроме того, при передаче цифрового сигнала по обычному проводнику с ростом расстояния все большее влияние оказывает не активное сопротивление проводника (это можно преодолеть простым увеличением мощности сигнала), а его реактивное сопротивление, т.е. емкость и индуктивность проводника, которые искажают временные параметры прямоугольного импульса. Так, например, ни один из стандартов передачи цифровых данных по витой паре или коаксиальному кабелю не специфицирует передачу на расстояние свыше 1 км.

Решением проблемы является применение модуляции аналогового сигнала цифровым.

Электрический сигнал, распространяющийся по каналу, характеризуется тремя параметрами - амплитудой, частотой и фазой. Изменение одного из этих параметров или их совокупности в зависимости от значений информационных бит и составляет физическую сущность процесса модуляции.

Говоря о видах модуляции, ограничимся только теми видами, которые реально используются в модемах. Их всего три: частотная, фазоразностная и многопозиционная амплитудно-фазовая модуляция. Все остальные виды - это вариации трех вышеперечисленных.

При частотной модуляции (FSK, Frequency Shift Keying) значениям 0 и 1 информационного бита соответствуют разные частоты синусоидального сигнала при неизменной его амплитуде. Частотная модуляция весьма помехоустойчива, поскольку искажению при помехах подвергается в основном амплитуда сигнала, а не частота. При этом достоверность демодуляции, а значит и помехоустойчивость тем выше, чем больше периодов сигнала попадает во временной интервал, соответствующий передаче одного символа. Но увеличение временного интервала снижает скорость передачи информации. С другой стороны, необходимая для этого вида модуляции ширина спектра сигнала может быть значительно уже всей полосы канала. Отсюда вытекает область применения FSK - низкоскоростные, но высоконадежные стандарты, позволяющие осуществлять связь в каналах с большими искажениями амплитудно-частотной характеристики, или с усеченной полосой пропускания.

При фазоразностной модуляции (DPSK, Differential Phase Shift Keying) изменяемым в зависимости от значения информационного элемента параметром является фаза сигнала при неизменной амплитуде и частоте. При этом каждому информационному элементу ставится в соответствие не абсолютное значение фазы, а ее изменение относительно предыдущего значения. Если информационный элемент есть дибит (два идущих подряд бита, рассматриваемых как один символ алфавита), то в зависимости от его значения (00, 01, 10 или 11) фаза сигнала может измениться на 90°, 180°, 270° или не измениться вовсе. Из теории информации известно, что фазовая модуляция наиболее информативна, однако увеличение числа кодируемых бит выше трех (8 позиций поворота фазы) приводит к резкому снижению помехоустойчивости. Поэтому на высоких скоростях применяются комбинированные амплитудно-фазовые методы модуляции.

Многопозиционную амплитудно-фазовую модуляцию называют еще квадратурной амплитудной модуляцией (QAM, Quadrature Amplitude Modulation). В этом методе помимо изменения фазы сигнала используется изменение его амплитуды, что позволяет

увеличивать число кодируемых бит. В настоящее время используются виды модуляции, в которых количество кодируемых на одном бодовом интервале информационных бит может достигать до 8, а, соответственно, число позиций сигнала в сигнальном пространстве - до 256. Однако, применение многоточечной QAM в чистом виде сталкивается с серьезными проблемами, связанными с недостаточной помехоустойчивостью кодирования. Поэтому во всех современных высокоскоростных протоколах используется разновидность этого вида модуляции - модуляция с решетчатым кодированием или треллис-кодированием (TCM, Trellis Coded Modulation), которая позволяет повысить помехозащищенность передачи информации - снизить требования к отношению сигнал/шум в канале на величину от 3 до 6 дБ. Суть этого кодирования заключается в введении избыточности. Пространство сигналов расширяется вдвое путем добавления к информационным битам еще одного, который образуется посредством сверточного кодирования над частью информационных бит и введения элементов запаздывания. Расширенная таким образом группа подвергается все той же многопозиционной амплитудно-фазовой модуляции. В процессе демодуляции принятого сигнала производится его декодирование по алгоритму Витерби, позволяющему за счет введенной избыточности и знания предыстории выбрать по критерию максимального правдоподобия из сигнального пространства наиболее достоверную точку и, тем самым, определить значения информационных бит.

Скорость модуляции - количество информационных интервалов в единицу времени - жестко ограничена критерием Найквиста, гласящим, что скорость передачи информации по каналу с ограниченным спектром не может превосходить ширины этого спектра. Скорость передачи информации по каналу определяется количеством бит, передаваемых в секунду. Она может совпадать со скоростью модуляции, если каждому информационному биту, который может принимать значение 0 или 1, соответствует временной отрезок модулированного сигнала, характеризуемый одной из двух predeterminedных совокупностей значений амплитуды, частоты и фазы. В этом случае модуляционная скорость (еще ее называют линейной или бодовой) равна информационной, т.е. 1 Бод = 1 бит/с. Но кодируемый элемент может соответствовать не одному, а, например, двум битам информации (дибиту). В этом случае информационная скорость будет вдвое превосходить бодовую, а параметры сигнала на бодовом интервале могут принимать одну из четырех совокупностей значений, соответствующих 00, 01, 10 или 11.

В общем случае, если на бодовом интервале кодируется n бит, то информационная скорость будет превосходить бодовую в n раз. Но количество возможных состояний сигнала в трехмерном (в общем случае) пространстве - амплитуда, частота, фаза - будет равно 2^n . Это значит, что демодулятор модема, получив на бодовом интервале некий сигнал, должен будет сравнить его с 2^n эталонными сигналами и безошибочно выбрать один из них для декодирования искомых n бит. Таким образом, с увеличением емкости кодирования и ростом информационной скорости относительно бодовой, расстояние в сигнальном пространстве между двумя соседними точками сокращается в степенной прогрессии. А это, в свою очередь, предъявляет все более жесткие требования к "чистоте" канала передачи. Теоретически возможная скорость в реальном канале определяется формулой Шеннона:

$$V = F \log_2 (1+S/N),$$

где F - ширина полосы пропускания канала,

S/N - отношение сигнал/шум.

Второй множитель и определяет возможности канала с точки зрения его зашумленности. Так, например, если отношение сигнал/шум соответствует 20 дБ, т.е. мощность сигнала, доходящего до удаленного модема, в 100 раз превосходит мощность шума, и используется полная полоса канала тональной частоты (3100 Гц), максимальная граница по Шеннону равна 20640 бит/с.

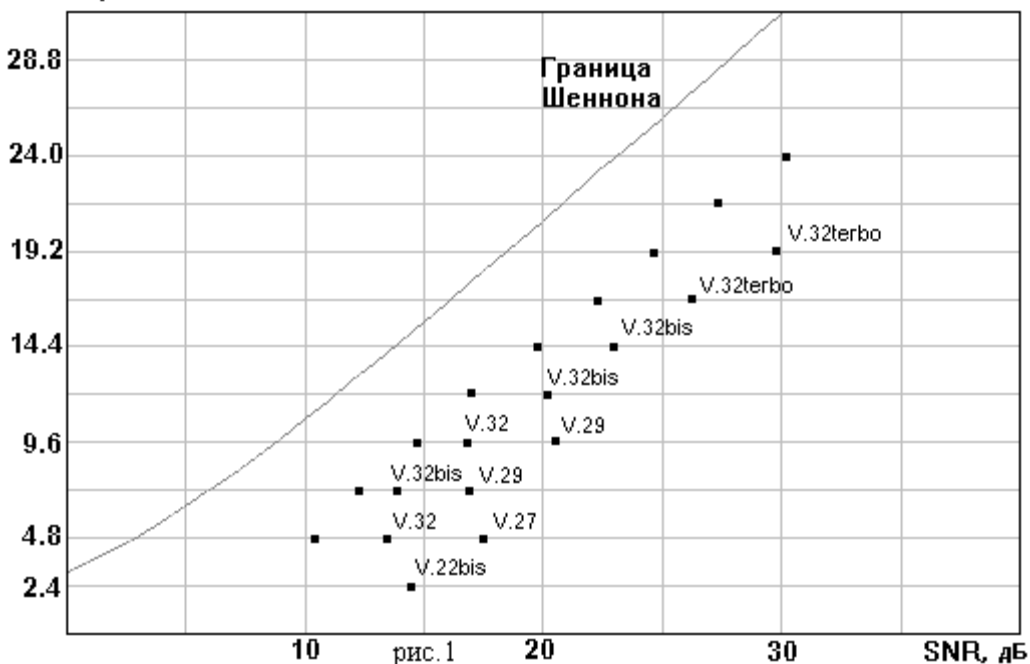
Скорость обмена - измеряется в байтах в секунду и определяет реальную скорость передачи информации между устройствами обработки с учетом устранения избыточности

и потерь на реализацию механизма защиты от ошибок. Физический предел также установлен Шенноном и определяется уже не свойствами канала, а свойствами самой передаваемой информации: $W = V / H$,

где H - ее энтропия.

На рисунке 1 показано место нескольких стандартов на фоне теоретического предела Шеннона для канала с полосой 3100 Гц. Абсолютные значения отношения сигнал/шум SNR (signal-to-noise ratio) носят оценочный характер и соответствуют вероятности ошибки порядка 10^{-4}

R , кбит/с



Диапазон скоростей передачи информации модемами с использованием модуляции составляет в настоящее время (75 - 19200) бит/с, а при введении в модем функций защиты от ошибок и сжатия данных реальная скорость передачи может достигать 57600 бит/с (протоколы X.2 и K56flex)

1.3 Цель работы

Имитационный программный комплекс служит для создания тестовых последовательностей, при помощи которых можно было бы отлаживать приемную аппаратуру и проводить проверку ее совместимости с рекомендациями ИТУ-Т.

Результаты работы комплекса могут быть выданы как в виде файла с записанными в него значениями напряжения сигнала через определенные промежутки времени, так и через цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП).

Запись в файл ведется при тестировании самого комплекса и не требует никакой дополнительной аппаратуры. Выдача на ЦАП используется при работе комплекса в качестве источника сигнала модема при отладке разрабатываемой приемной части (как правило, тоже моделируемой программно)

1.4 Постановка задачи

1.4.1 Техническое задание

Программный комплекс должен обеспечивать:

-имитацию сигналов модемов в соответствии со стандартами ITU-T

V.22bis, V.26A, V.26B, V.27ter, V.29, V.32, V.32bis

-имитацию следующих характеристик телефонной линии

- амплитудно-частотной характеристики
- аддитивного гауссовского шума
- сдвига частоты сигнала
- фазового дрожания сигнала
- импульсных помех
- эхо-сигналов

- корректное функционирование в среде Windows 95 в режиме эмуляции DOS

1.4.2 Интеграция комплекса

Комплекс может быть интегрирован в систему разработки приемной части соответствующих стандартов передачи данных. Это позволяет с высокой степенью точности и повторяемости задавать наличие и уровень помех при изучении реакции на них приемной системы.

1.4.3 Перспективы развития

При необходимости комплекс может быть дополнен многими из существующих в настоящий момент стандартами передачи информации по телефонной линии связи. Для этого не требуется вносить изменений в схему комплекса, а лишь добавить в блок мэппера дополнительную функцию, интерпретирующую входной поток битов в соответствии с новым стандартом и внести параметры стандарта в файл STANDARD.H

Модель линии может использоваться как независимый блок при отладке других моделей, в том числе как модель более широкополосного, чем телефонный, канала при отладке систем передачи данных более высоких уровней. В этом случае достаточно изменить частоту дискретизации и убрать строку, которая проверяет входной файл на наличие заголовка, либо добавить к входному файлу заголовок (иначе будет выдаваться сообщение об ошибке).

2. Технические особенности

2.1 Виды современных модемов

По типу используемого канала модемы делятся на модемы для арендованных каналов и модемы для коммутируемых каналов.

По области применения модемы делятся на модемы для передачи данных и модемы для передачи факсимильной информации (факс-модемы).

По конструктивному исполнению модемы делятся на автономные, встраиваемые (в том числе и в переносные компьютеры), модемы для групповых устройств.

Наряду с функциями модуляции/демодуляции в большинстве современных модемов реализованы команды "интеллектуального" управления, функции защиты от ошибок, сжатия данных. В ряде типов модемов имеются защита доступа, возможности сетевого управления, засекречивание информации.

Основные характеристики модемов на разные скорости и для разных применений на международном уровне определены Рекомендациями МККТТ.

Приведем краткое описание рекомендаций, реализованных в комплексе:

V.22 bis - модемный протокол, 2400 бит/с, амплитудно-фазовая модуляция, дуплексный, с частотным разделением каналов, для работы по коммутируемым и выделенным 2-х проводным телефонным линиям.

V.26A/B - модемный протокол, 2400 бит/с, относительная фазовая модуляция, дуплексный, для работы по выделенным 4-х проводным телефонным линиям. V.26A отличается от V.26B только величиной фазового скачка.

V.27 ter - факс-протокол, 4800 бит/с, относительная фазовая модуляция, полудуплексный, для работы по коммутируемым телефонным линиям.

V.29 - факс-протокол, 9600 бит/с, амплитудно-фазовая модуляция, дуплексный, для работы по выделенным 4-х проводным телефонным линиям.

V.32 - модемный протокол, 9600 бит/с, амплитудно-фазовая модуляция, дуплексный, для работы по коммутируемым и выделенным телефонным линиям.

V.32 bis - модемный протокол, 14400 бит/с, амплитудно-фазовая модуляция, дуплексный, для работы по коммутируемым и выделенным телефонным линиям.

Кроме того, для модемов стандартизованы:

- V.42 - протокол коррекции ошибок, включая альтернативные процедуры, совместимые с MNP2-4;
- V.42bis - протокол сжатия данных; поддерживается также альтернативный протокол сжатия MNP5;
- V.54 - система встроенных тестов приема/передачи;
- G.712 - энергетические параметры сигналов модема;
- V.24 - перечень цепей стыка между компьютером и модемом;
- V.28 - электрические характеристики цепей стыка для внешнего модема.

2.2 Каналы связи

Канал связи - совокупность линейных и станционных сооружений, обеспечивающая связь между двумя абонентами. Телефонный канал или канал тональной частоты (ТЧ) - канал с полосой пропускания 300 - 3400 Гц.

Приведем выдержку из приказа Госкомсвязи России № 74 от 03.06.97

“ Эксплуатационные нормы на электрические параметры сети ТФОП ”

Параметр	Норма
Соотношение сигнал/шум на выходе коммутируемого канала у абонента или на районной АТС не должно быть менее следующих значений (дБ) на каналах городской, сельской или внутризонавой сети при измерении на каналах междугородной сети длиной < 2500 км и длиной > 2500 км.	25,0 25, 0 20,0
Размах дрожания фазы сигнала (джиттер) частотой 20-300 Гц, измеренный у абонента или на районной АТС не должен превышать (градусов)	15
Затухание эхо-сигнала относительно основного не должно быть менее указанных ниже значений (дБ):	
Эхо говорящего на АТС(в зависимости от места расположения дифсистемы на сети вызывающего абонента:)	23,0 - 15,0
Эхо слушающего на АТС (в зависимости от места расположения дифсистемы на сети вызывающего абонента):	24,0 - 22,0

Таблица 1

В табл. 2 показано влияние их и некоторых других видов помех на работу модемов при использовании наиболее распространенных способов модуляции по рекомендациям V.32bis, V.32, V.22bis.

Диапазоны параметров помехозащищенности модемов					
Дестабилизирующий фактор	Скорость в линии, бит/с				
	V.32, V.32bis			V.22bis	
	14400	9600	4800	2400	1200
Допустимое количество транзитов по ТЧ каналов, п	0...6			2...12	6...12
Сигнал/шум, дБ	> 23	> 16	> 9	14...18	7...10
Чувствительность, дБм	-38...-50			-42...-56	
Дрожание фазы (размах), угловых градусов	> 8	> 15	> 45	15...50	> 45
Смещение несущей частоты, Гц	+ - (7...24)				
Эхо-сигнал передающего	не более 1-го эхо с задержкой не более 10...250 мс			не влияет на помехозащищенность	
Затухание Эхо-сигнала принимающего, дБ	> 28	> 20	> 12	> 20	> 12
Импульсные помехи, шумовые всплески и замирания сигнала или скачка мощн., дБ	автоматический переустанов соединения (retrain)		retrain, но возможно и самовосстановление синхронизма		самовосстановление
	2...10			3...40	6...40

Таблица 2

3. Разработка

3.1 Общее описание системы

Программный комплекс имитации сигналов телефонных линий предназначен для имитации сигналов модемов, соответствующих следующим рекомендациям ИТУ-Т: V.22bis, V.26A, V.26B, V.27ter, V.29, V.32, V.32bis. Комплекс также включает в себя средства моделирования искажений сигнала в линии.

Комплекс может работать как одна программа, на вход которой поступает файл, а на выходе выдаются цифровые выборки аналогового сигнала с частотой дискретизации 9600 Гц. Соответствующий режим работы задается BAT - файлом, пример которого приведен в приложении. 2

Архитектура системы имеет вид, изображенный на рисунке 2.

Все блоки комплекса используют в качестве входного параметра идентификатор стандарта и идентификатор режима стандарта. После считывания его из заголовка блок обращается к файлу STANDARD.H, откуда считывает свой рабочий параметр, соответствующий данному стандарту.

Анализ стандартов, заданных для реализации показывает, что разрабатываемые модели для каждого стандарта могут быть разбиты на блоки, которые будут для некоторых стандартов одинаковыми или иметь небольшие различия. Так, например, во всех стандартах производится скремблирование битового потока,

но скремблирующие полиномы могут различаться в зависимости от стандарта. Таким образом, каждый блок комплекса можно рассматривать как некоторую функцию, которой при вызове передаются параметры, соответствующие задаваемому стандарту. Эта функция возвращает значение в унифицированном виде - файле, содержащем результаты ее работы для того, чтобы они были корректно восприняты следующими функциями-блоками.

3.2 Имитатор сигнала модема

3.2.1 Средство подготовки исходных данных

Вводить для каждого блока информацию, сообщаящую ему, по какому стандарту следует обрабатывать входные данные, довольно утомительно. Достаточно сделать это один раз - при генерации заголовка файла. Потом этот заголовок будет автоматически переписан из входного файла в выходной.

Заголовок имеет следующую структуру:

Строки	Формат содержимого
0 - 49	Имя автора выборки, вводится пользователем
50 - 77	дата и время создания файла
78 , 79	перевод строки
80 - 157	цель создания выборки, строка 1
158 , 159	перевод строки
160 - 237	цель создания выборки, строка 2
238 , 239	перевод строки
240 - 279	название блока, сгенерировавшего файл generated by: 'addhead.exe' - addhead.exe 'scrambler' - scrmlbr.exe 'mapper' - mapper.exe 'modulator' - modul.exe 'filter' - filter.exe 'line' - line.exe
280 - 317	'стандарт: ' + идентификатор стандарта
318 , 319	перевод строки
320 - 317	'файл: ' + имя исходного файла
318 , 319	перевод строки
320 - 959	зарезервировано для дальнейшего использования

далее без изменений идет исходный текст передаваемого файла.

Пример выходного файла:

Иван Иванович Иванов
18, февраль, 1998 21:03
Тест функционирования модели
на примере передачи файла test1.txt
был создан файлом: addhead.exe
стандарт: V32bis_14400
файл: AUTOEXEC.BAT

```
C:\WINDOWS\net start
C:\DOS\SMARTDRV.EXE 16384 128
PATH=C:\WINDOWS;C:\; C:\BC31\BIN;C:\DOS; C:\DN.149; C:\PCAD\EXE
LH /L:1,28288 C:\WINDOWS\MSCDEX.EXE /S /D:MSCD001
SET TEMP=C:\WINDOWS\TEMP
C:\DOS\MOUSE.COM 1
DN
```

...

3.2.2 Скремблер.

При передаче символов приемник определяет окончание передачи текущего символа и начало передачи следующего по скачку фазы сигнала. Такой метод синхронизации называется выделением синхропоследовательности из принимаемого сигнала. При передаче длинной последовательности одинаковых символов выходной сигнал может принять вид чистой синусоиды. Это недопустимо, так как на стороне приемника будет невозможно определить окончание передачи текущего символа и начало следующего (данное явление называется потерей синхронизации). Для избежания этого используется скремблирование, т.е. передаваемый поток битов проходит через устройство, называемое скремблером, которое производит перестановку битов в псевдослучайной последовательности, исключая последовательную передачу одинаковых символов. Вид преобразованной последовательности определяется скремблирующим полиномом. (Со стороны приемника дескремблер производит обратную операцию, восстанавливая исходную последовательность).

Структурная схема скремблера приведена на рис.3. Для данного примера скремблирующий полином имеет вид

$$D_s = 1 \oplus x^{-18} \oplus x^{-23}$$

Знак “ \oplus ” означает логическую операцию “исключающее ИЛИ”

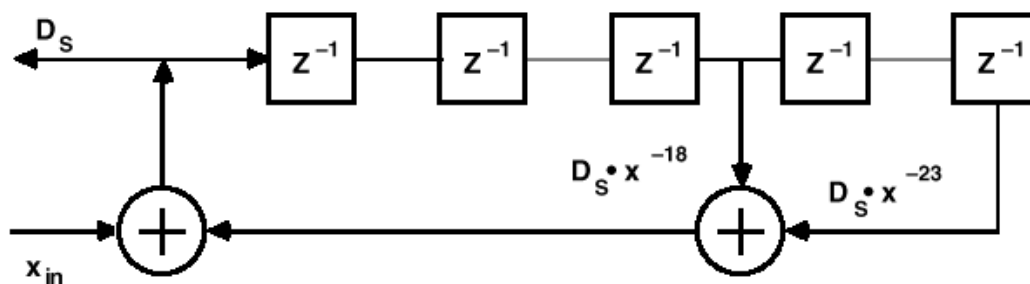


рис.3

Скремблирование может производиться по любому из полиномов, используемых в стандартах V.22bis, V.26A, V.26B, V.27ter, V.29, V.32, V.32bis. Полином определяется по идентификатору стандарта из заголовка файла.

Пример выходного файла (без заголовка) :

```
...
LE^-+BÍ|+ò%vM51Ãe;ùä|-É • TmNfâ%Vó.ÿÅó>s`óîÈ|“O~2-xÝ;Å -? ">byô×fç=h-c|ât$ñ|ç
ýÕ6û#ÒBðvs|e$-1p)Vœe
iÐ-^-á|L5•@`ñ°û×N|-
ÛT>øK|x)ML]éLò=Òûyãî+Z:
```

~-X|&yþ

...

Эффективность работы скремблера показана на рис. 4, где приведен пример сжатия архиватором WinZip 6.2 скремблированного и нескремблированного файлов

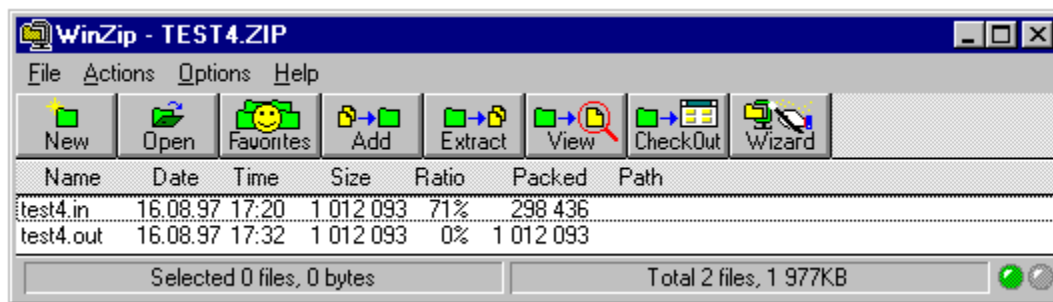


рис.4

Здесь **test4.in** - файл до прохождения через скремблер, **test4.out** - после прохождения через скремблер. Как видно из рис.4, нескремблированный файл сжался более чем в 3 раза, скремблированный же не сжался ни на байт, т.к. в нем нет последовательно стоящих одинаковых символов.

3.2.3 Мэппер

Мэппер преобразует входной битовый поток в блоки, которые соответствуют двоичному коду номера точки на фазовой плоскости. Преобразование может производиться в одних стандартах просто разбивкой входного потока на группы по N бит, в других стандартах над группами производятся достаточно сложные преобразования. Пример преобразования в стандарте V.32bis приведен на рис.5

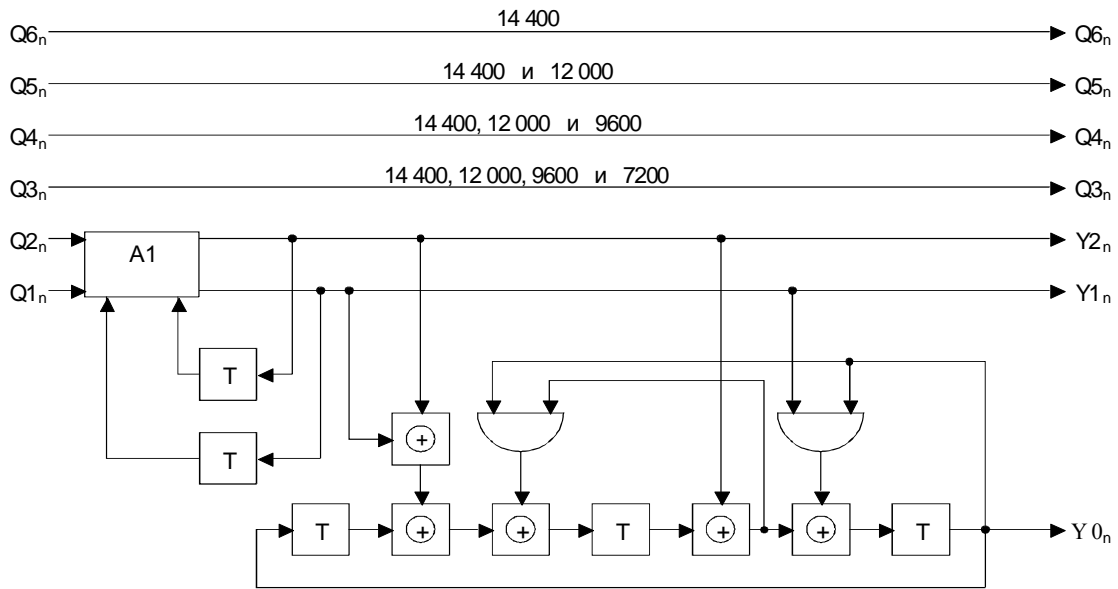


рис.5

A1 на этом рисунке - конечный автомат с 2 входами, 2 выходами и 16 состояниями. Добавочный бит Y0 вместе с битами Y1, Y2 (вместо Q1, Q2) используется для помехоустойчивого кодирования. Каждой группе из 7 бит соответствует точка на фазовой плоскости. Пример такого соответствия приведен на рис.6

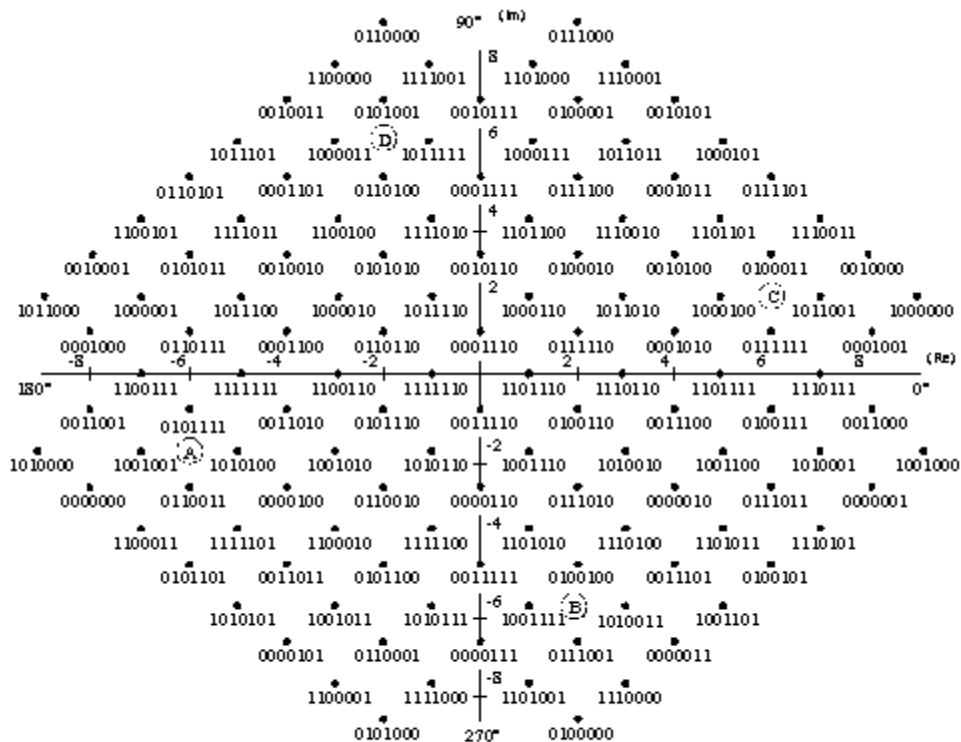


Рис.6

Точка на комплексной плоскости интерпретируется как комплексный сигнал

действительной составляющей $Re = X * \cos (F)$ и мнимой составляющей $Im = Y * \sin (F)$, где F - определенная для каждого стандарта модуляционная скорость. Соответственно на выходе мэппера получаются две волны. Пример выходного файла:

```

...
1.000000      8.000000      1 0 1 0 0 0
7.000000     -2.000000      1 0 0 0 0 1
2.000000      3.000000      0 0 0 0 1 0
1.000000      4.000000      1 0 1 1 0 0
7.000000     -2.000000      1 0 0 0 0 1
6.000000     -5.000000      0 0 0 1 0 1
-5.000000    -4.000000      1 1 1 1 0 1

```

...
В первом столбце записана амплитуда действительной составляющей, во втором столбце - мнимой. В третьем столбце записана группа битов, соответствующая данной точке на комплексной плоскости. Третий столбец используется только для отладки модели, его значения не воспринимаются следующим блоком.

Далее мнимая и действительная составляющие обрабатываются отдельно, как было показано выше на рис.2

3.2.4 Фильтр

Блок фильтра выполняет две функции: генерацию синусоидального сигнала (с частотой дискретизации 9600 Гц) , и частотой сигнала, соответствующей темпу передачи информации для данного стандарта, а также фильтрацию сгенерированного сигнала фильтром низких частот (pulse - shaping фильтром). Математическое описание этого фильтра следующее:

$$P(x) = \frac{\sin(\pi * t) * \cos(\alpha * \pi * t / T)}{(\pi * t / T) * ((1 - (2 * (\alpha * t / T))^2))} \quad (*)$$

Где T - скорость передачи символа, t - время, @ - rolloff factor, коэффициент, зависящий от ширины полосы пропускания, для телефонного канала принимается равным 0.25.

Каждый символ передается за четыре временных символьных интервала посредством импульса с формой, показанной на рис.7. Импульс может быть построен по 192 точкам

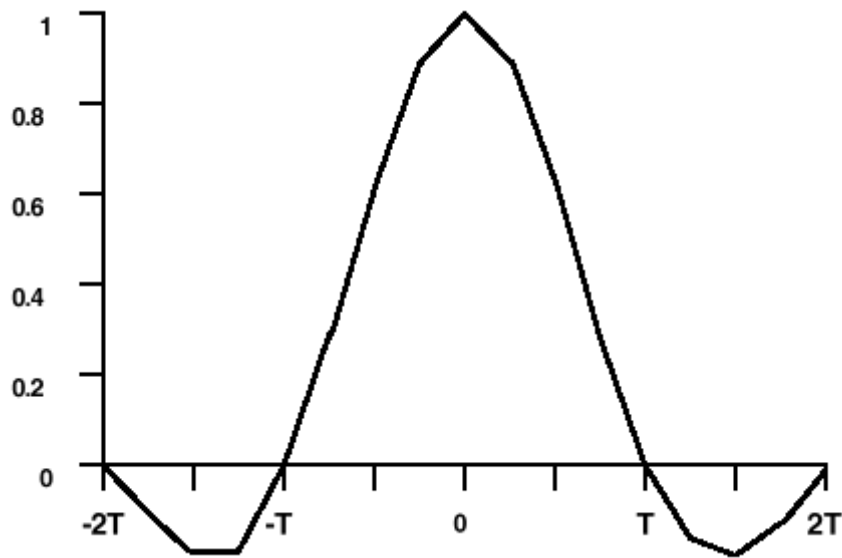


рис.7

При этом следующий символ начинает передаваться в следующем символьном интервале, но соседние символы не влияют друг на друга, т.к. значения сигнала воспринимаются приемником лишь в 1-м, 48-м, 96-м, 144-м и 192-м дискретах, в эти моменты лишь одно значение не равно нулю, а остальные нулевые и не влияют на это значение, что видно из рис.8.

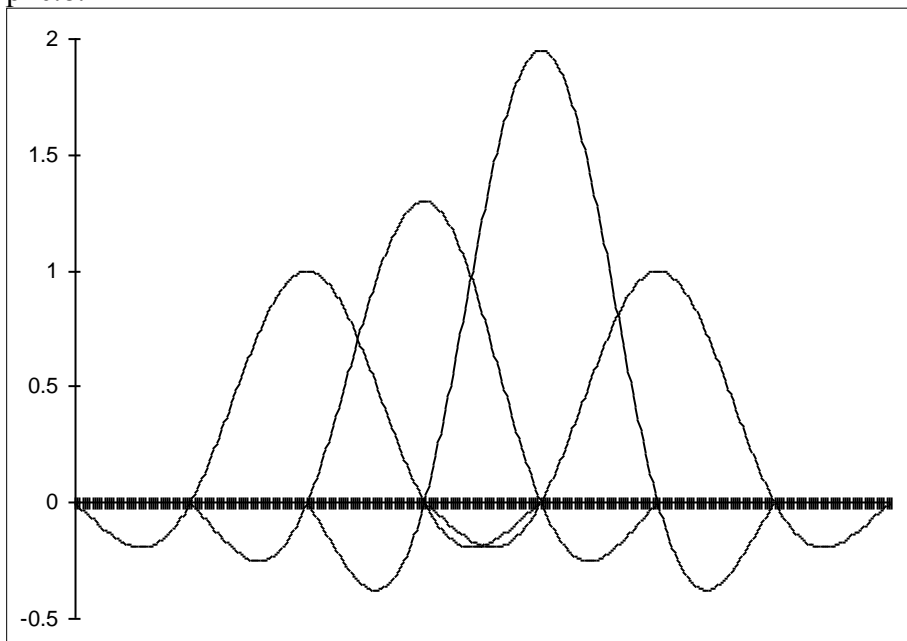


рис.8

Пример выходного файла:

```

...
2.000000   -9.000000
1.006683   -4.058814
0.211551   1.414427
0.114480   5.854885
1.000000   8.000000
2.387105   7.751852
...

```

3.2.5 Модулятор

На вход модулятора поступают действительная и мнимая компоненты сигнала, прошедшие обработку, на выходе выдается сигнал (с частотой дискретизации 9600 Гц), модулированный несущей частотой, соответствующей текущему стандарту. Выходной сигнал генерируется по следующей формуле:

$$x(k) = \text{Re}(k) \cos \omega_c k + \text{Im}(k) \sin \omega_c k$$

Схема модулятора приведена на рис.9

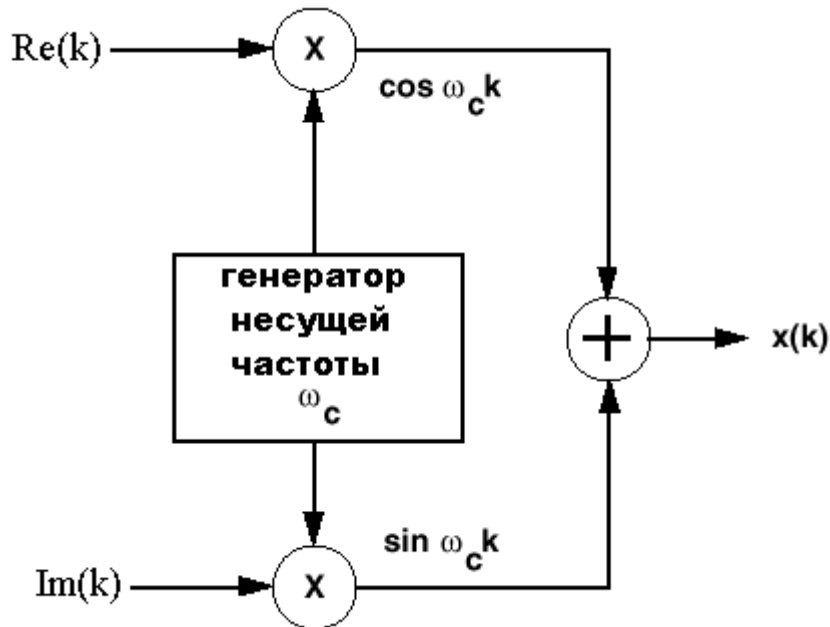


рис.9

Пример выходного файла:

```

...
-0.308594
-1.779381
-1.140553
1.023684
1.388675
0.096156
0.131239
0.841385
0.154297
-0.964091
-0.998790
-0.800143
-0.308594
0.781903
0.750110
...

```

При необходимости можно моделировать изменение частоты несущей, пределы которого определены в соответствующих стандартах.

На этом имитатор сигнала модема заканчивает свою работу. Пример спектра выходного сигнала, соответствующий стандарту V.32bis для режима 14400 бит/сек с включенным pulse-shaping фильтром приведен на рис. 10

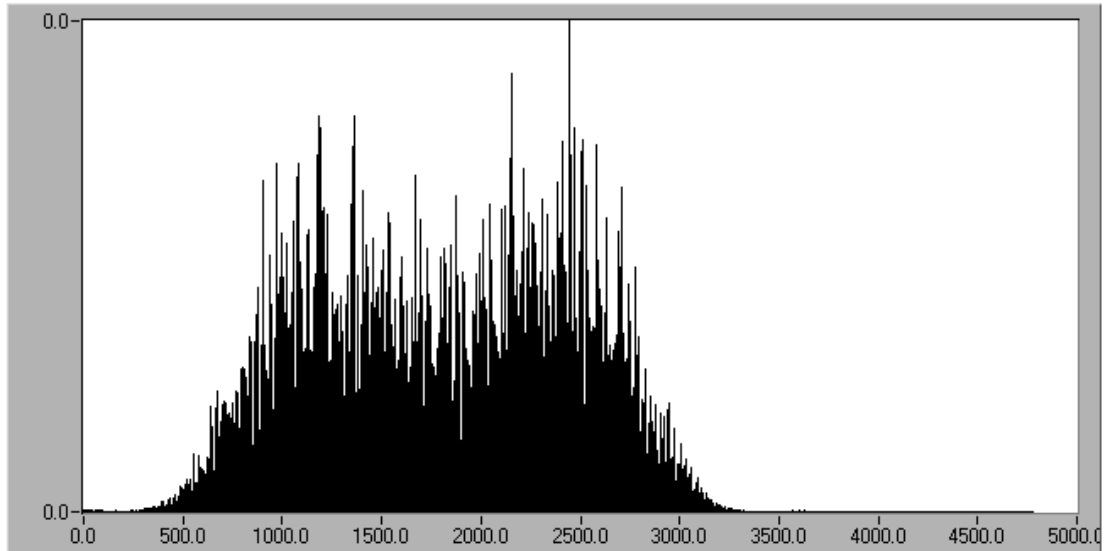


рис.10

Пример спектра сигнала при передаче того же файла, но с выключенным pulse-shaping фильтром приведен на рис. 11

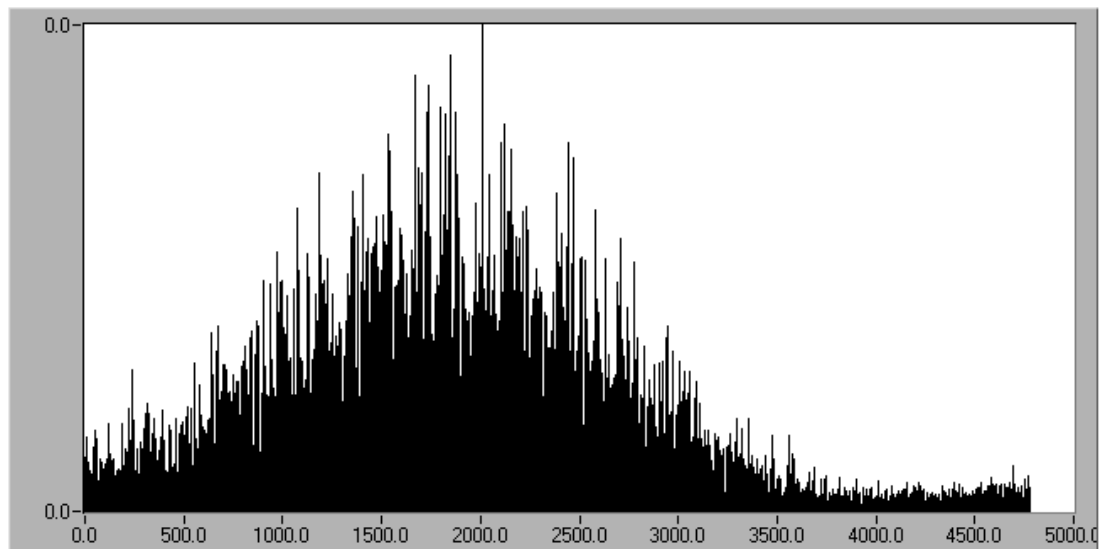


рис.11

3.3 Модель линии связи.

Блок включает в себя моделирование следующих параметров телефонной линии связи:

- АЧХ линии;
- аддитивного гауссовского шума;
- фазового дрожания сигнала;
- импульсных помех в линии;
- эхо-сигналов.

Параметры линии считываются из файла TASK.TXT , так как каждый раз вводить новые параметры с командной строки довольно долго.

3.3.1 Амплитудно-частотная характеристика

Моделирование АЧХ линии реализовано в виде цифрового фильтра с конечной импульсной характеристикой, т.е. конечным временем отклика на входное воздействие (finite impulse response -FIR). Структура его показана на рис.12. Другое название этого фильтра, также устоявшееся в литературе - нерекурсивный фильтр. Значение выходного сигнала $y(n)$ в момент времени

$T = n$ зависит от значений входного сигнала в $(n - 1)$ предыдущие моменты времени и вычисляется по формуле :

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h_k(n) x(n-k) \quad (**)$$

Здесь $h_k(n)$ - коэффициенты цифрового фильтра, они определяют все параметры фильтра - амплитудно-частотную характеристику, тип окна и т.д. Число звеньев n называется длиной фильтра. T - элемент задержки на 1 такт (как он понимается в теории автоматов).

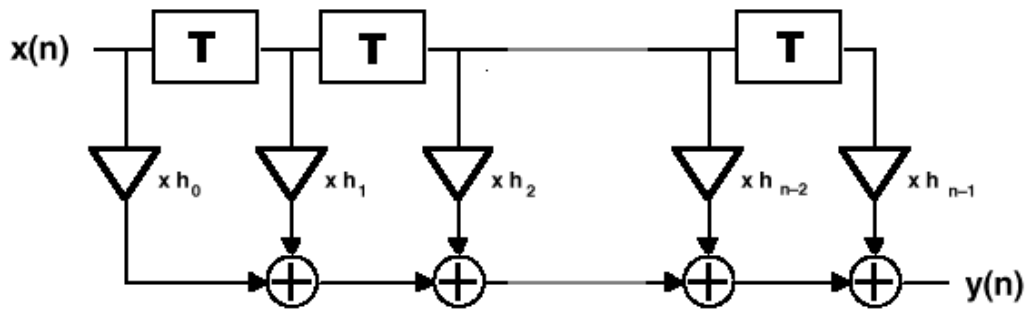


рис.12

Длина фильтра в комплексе определяется числом коэффициентов. Оно может быть, вообще говоря, любым, а на практике - довольно большим (ограниченным лишь объемом оперативной памяти, в которой они размещаются).

Коэффициенты фильтра считываются из отдельного файла COEFF.TXT.

На рис.13 показан частотный спектр шумового сигнала с нормальным распределением до прохождения через линию связи.

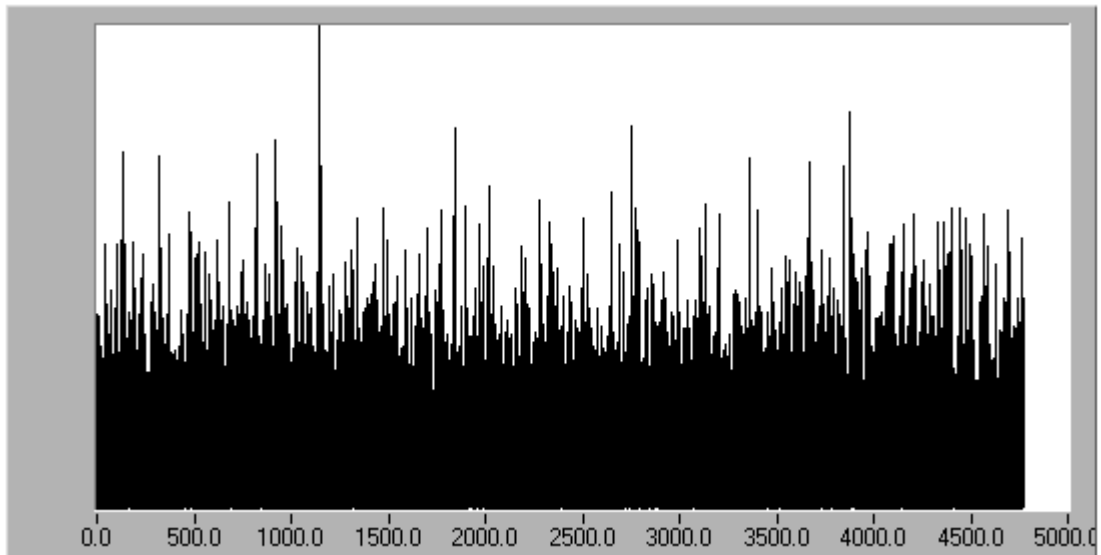


рис.13

Спектр этого сигнала, прошедшего через фильтр со следующими данными: длина фильтра - 20 звеньев, тип - полосовой с окном Хэмминга, полоса пропускаемых частот 300 - 3400 Гц показан на рис.14

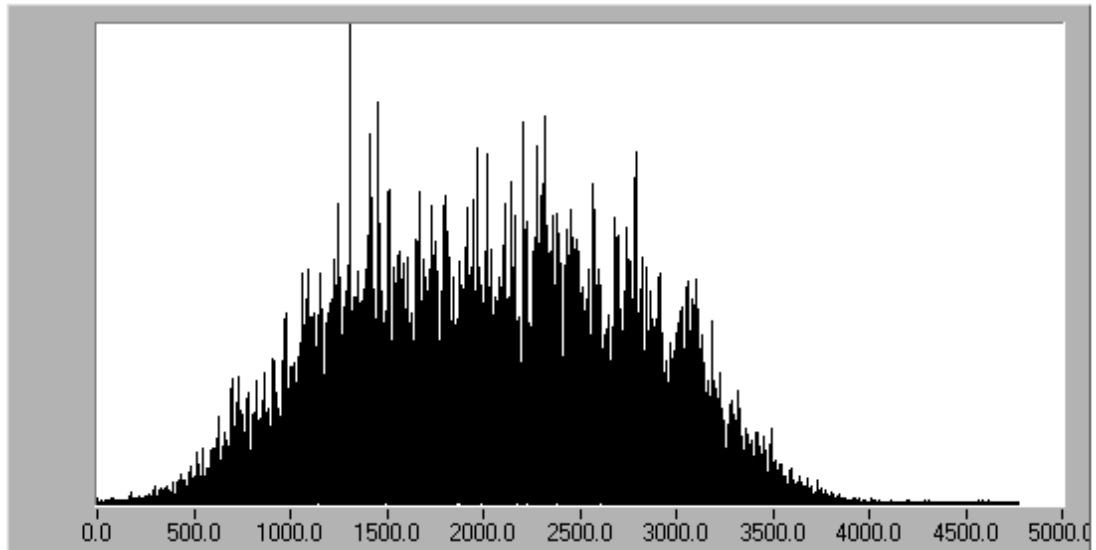


рис.14

3.3.2 Аддитивный гауссовский шум

Он реализован как добавление к **каждому** значению сигнала некоторой случайной величины, имеющей распределение Гаусса. Функция распределения имеет вид :

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-(u-a)^2/2\sigma^2} du$$

где σ - среднеквадратичное отклонение (вводится пользователем) а u - математическое ожидание (принимается равным нулю, т.к. вероятности возникновения положительной и отрицательной помехи равны)

Форма синусоидального сигнала, показанная на рис. при добавлении шумовой компоненты будет иметь вид, показанный на рис.15

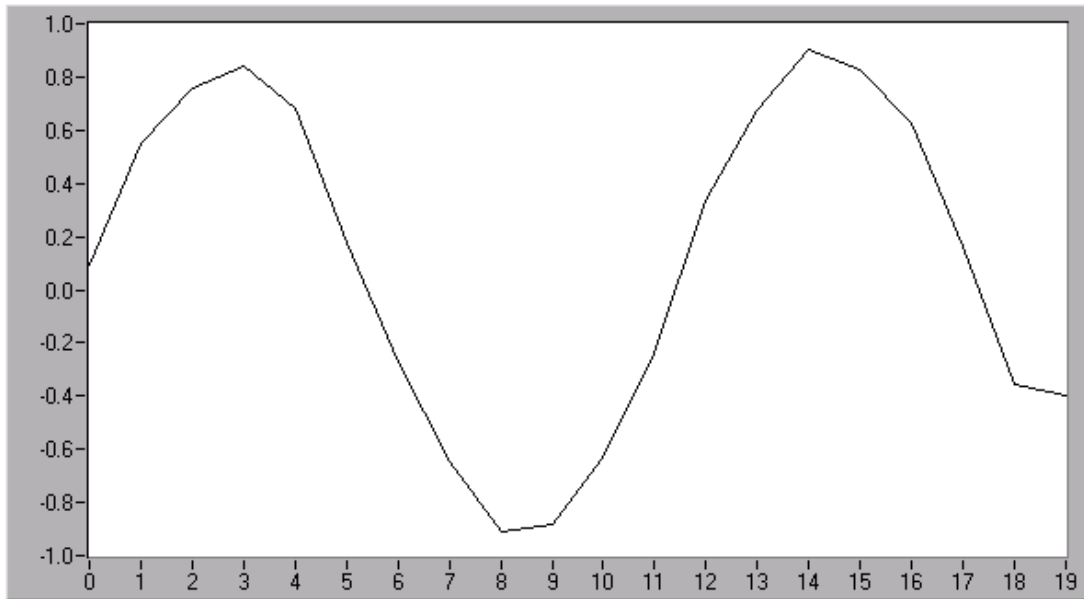


рис.15

3.3.3 Импульсные помехи.

Импульсные помехи реализованы двумя способами, из них пользователь должен выбрать какой-либо один:

- 1) Появление в случайном (по равномерному закону распределения)

$$F(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & x \leq b \end{cases}$$

(где a и b - границы диапазона, на котором берется случайное значение)
 дискрете помехи с амплитудой, подчиняющейся нормальному закону распределения.

- 2) Пользователь вручную (возможно, с использованием отдельно разработанной программы) задает номер дискрета и амплитуду помехи для него.

Пример воздействия на синусоидальную волну импульсных помех показан на рис. 16. Помехи присутствуют в 3, 10 и 13 дискретах.

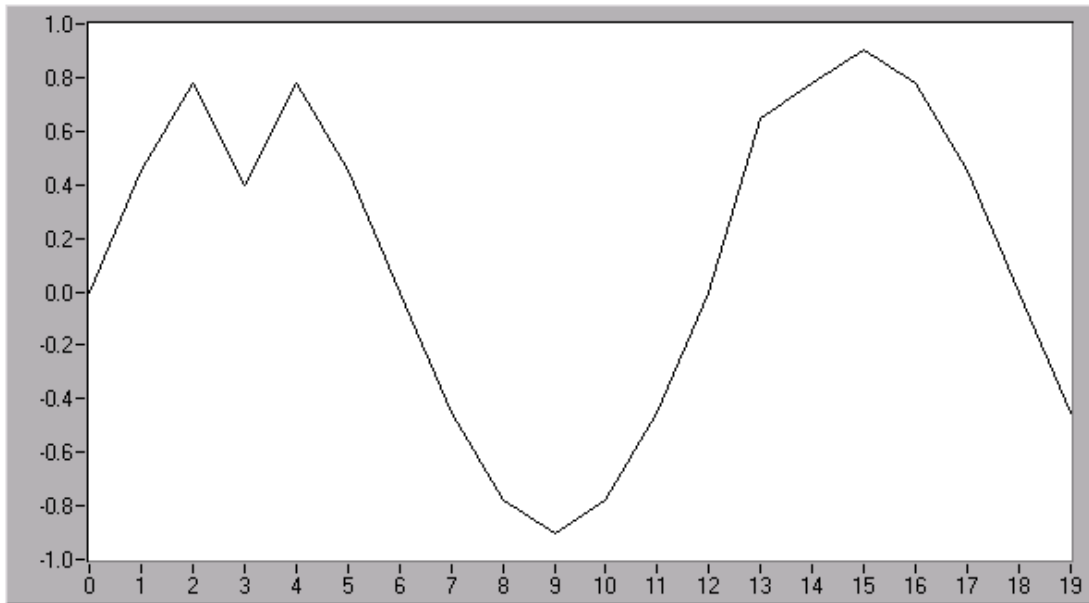


рис.16

3.3.4 Эхо-сигналы

Эхо-сигналы реализованы как добавление к текущему значению сигнала предыдущего значения, задержанного на некоторое, определяемое пользователем, время. Число эхо-сигналов и их амплитуда также определяются пользователем.

На рис.17 приведена форма эхо - сигнала от синусоидальной волны с коэффициентом отражения 0.3 и частотой 480 Гц с задержкой 0.00104166 сек (20 дискретов), т.е. эхо-сигнал синфазен к основному, поэтому их значения складываются.

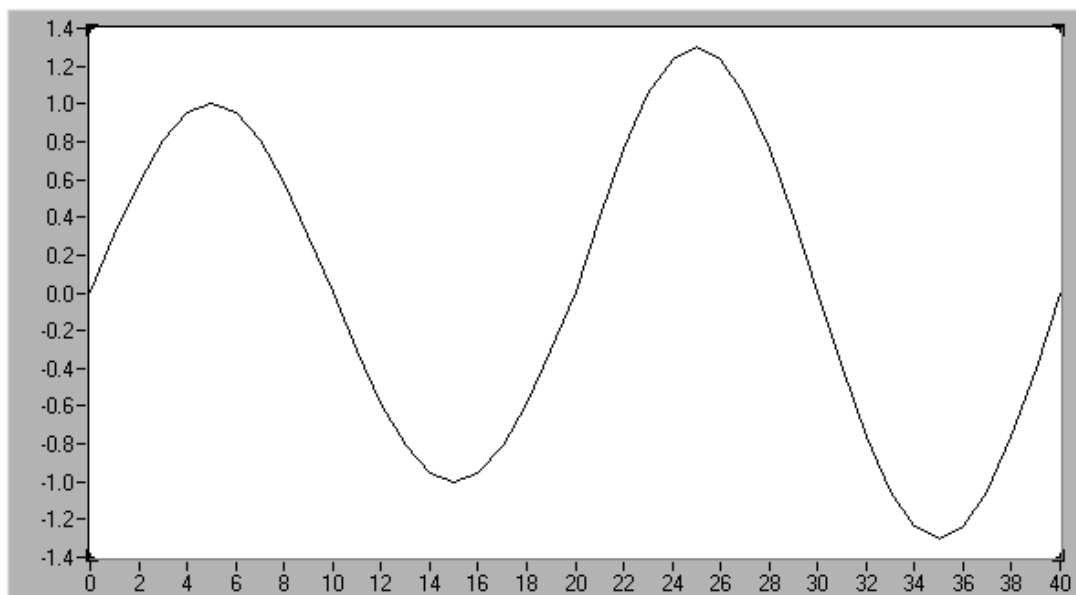


рис. 17

3.3.5 Фазовое дрожание.

Фазовое дрожание реализовано как сдвиг сигнала по фазе на некоторую случайную величину, подчиненную гауссовскому закону распределения.

Форма сигнала, соответствующая синусоиде после прохождения ее через модель линии связи со среднеквадратичным отклонением 45 градусов показана на рис.18

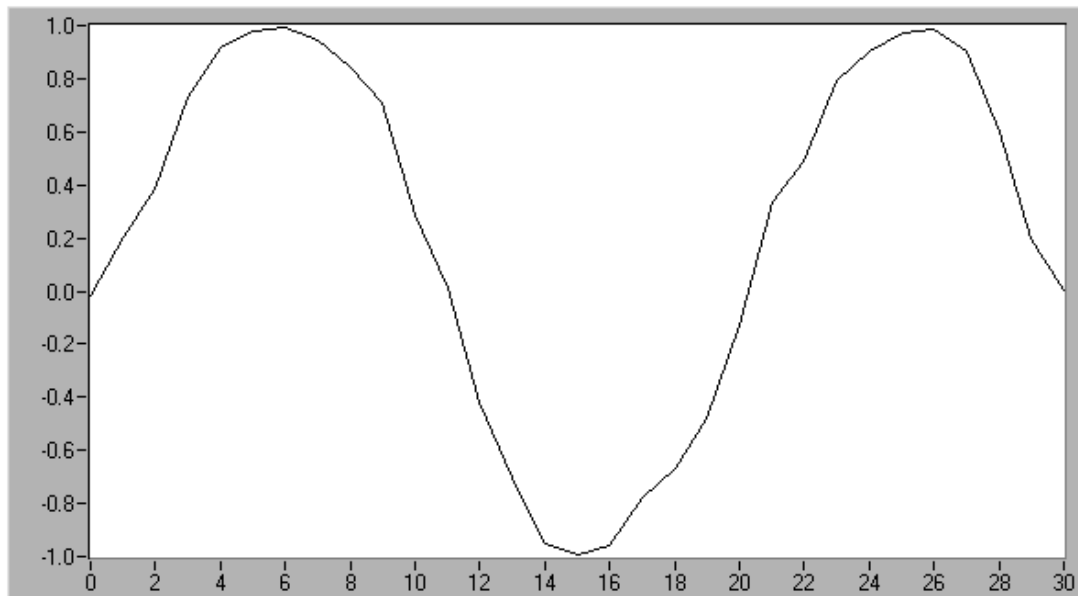


рис.18

4.Реализация

4.1 Реализация имитатора сигнала модема

Общая концепция реализации такова : все моделируемые стандарты имеют одинаковую структуру прохождения передаваемого сигнала - сигнал вначале проходит через скремблер, затем поступает на мэппер, где группе битов сопоставляется определенным образом точка на фазовой плоскости и выдаются параметры действительной и мнимой компонент несущей, после сигнал проходит через фильтр, где производится генерация волны действительной и мнимой компонент с частотой дискретизации 9600 Гц, фильтрация их

pulse-shaping фильтром, потом в модуляторе они преобразуются в действительный сигнал и поступают на оконечный блок - модель линии связи.

Рассмотрим подробнее некоторые интересные моменты реализации :

Блок скремблера :

При работе скремблера вначале считывается идентификатор стандарта из заголовка файла и по нему считываются номера N1 и N2 битов, используемых для скремблирования, из файла STANDARD.H. (например, для стандарта V.32bis N1 и N2 равны 18 и 23 соответственно)

В блоке есть также переменная **array** (с начальной инициализацией нулевым значением) типа unsigned long, в которой хранятся 32 предыдущих бита (уже прошедших через скремблер).

Входной файл читается как битовый поток, из этого потока берется очередной i - ый бит, после чего производится побитовая операция “исключающее ИЛИ “ для него и

предыдущих $(i - N1)$ - го и $(i - N2)$ - го битов, хранящихся в переменной **array**. Потом старший бит выдается в выходной поток, переменная **array** сдвигается влево на 1 бит, а результат операции “исключающее ИЛИ “ записывается в младший бит. После этого цикл повторяется.

Блок мэппера :

При работе мэппера вначале считывается идентификатор стандарта из заголовка файла и по нему определяется (путем обращения к файлу STANDARD.H), каким образом интерпретировать входной битовый поток - например, группами по 2 бита (V.26) или по 6 бит (V.32 bis). После этим группам или непосредственно (например, V.26) или же после помехоустойчивого кодирования с добавлением дополнительного бита (например, V.32 bis) сопоставляется точка на комплексной плоскости следующим способом : есть два двумерных массива, один из них содержит одномерные массивы групп битов (например, $\{0, 0, 1, 1, 0, 1, 0\}$), другой - соответствующие им одномерные массивы значений действительной и мнимой составляющей сигнала (например, $\{-4, -1\}$)

Полученная из битового потока группа интерпретируется как одномерный массив из N элементов (N - число битов в группе) и в цикле сравнивается с элементами двумерного массива. При совпадении запоминается индекс одномерного массива в первой группе и по нему находятся значения действительной и мнимой составляющей во второй группе, которые и выдаются в качестве результата. В качестве контрольной информации также записывается сама группа битов : это сильно облегчает отладку приемной части.

Блок фильтра:

При работе фильтра из входного файла считывается амплитуда модулирующего колебания и по этому значению с частотой дискретизации генерируется волна, определяемая формулой (*). Происходит это так: при частоте дискретизации - 9600 Гц модуляционная скорость является зависимой от стандарта и изменяется от 600 Гц (V22bis) до 2400 Гц (V32bis). Следовательно одному периоду модуляции в разных стандартах соответствует разное целое число отсчетов с частотой дискретизации 9600 Гц - 16 отсчетов для V.32 и 64 отсчета для V.22 bis. При этом нужные значения не вычисляются непосредственно по формуле (*) (что заняло бы очень много времени), а постоянно расположены в памяти, нормированные к 1, в виде массива из 192 элементов. Такое количество необходимо, чтобы для любого из реализуемых стандартов можно было выбрать целое число значений. Так, например, для V.22bis значения выбираются через 3 элемента, для V.32 - через 12 элементов. Таким образом, одновременно производятся дискретизация и фильтрация модулирующего колебания. Полученные значения выводятся в файл и поступают на модулятор, и потом на модель линии связи.

4.2 Реализация модели линии связи

Модель линии реализована в одном файле. Это сделано для сокращения времени работы программы. При реализации модели линии используется такой прием программирования, как циклический буфер.

Вначале считывается файл с коэффициентами и подсчитывается их количество N . После этого создается массив динамической памяти типа `float` с размером, равным числу коэффициентов. Затем файл читается повторно и коэффициенты загружаются в этот массив.

После этого считывается файл с параметрами помех, в нем ищется строка, начинающаяся с ключевого слова `echo`, за которым следуют задержка эхо-сигнала в секундах и коэффициент ослабления. Величина задержки умножается на 9600 (число дискретов в 1 секунде). Полученное число сравнивается с N и по наибольшему создается второй динамический массив, из которого будет находиться значение сигнала $N / 9600$ секунд назад, и который используется также как циклический буфер. Тогда вычисления по формуле (**) можно реализовать в виде простого цикла перемножения двух элементов массивов с полученными индексами и сложением результата с полученным на предыдущем цикле.

Аддитивный гауссовский шум реализован таким образом: каждый дискрет сигнала складывается с результатом работы функции, генерирующей случайные числа, распределенные по закону Гаусса.

Импульсные помехи реализованы несколько иначе: для случайных помех вначале вызывается функция, генерирующая числа, распределенные по равномерному закону. Полученное число сравнивается с вероятностью, заданной пользователем. Если число меньше, вызывается функция, генерирующая числа, распределенные по закону Гаусса, результат работы которой складывается с текущим значением сигнала.

Гистограммы, построенные на 1 миллионе выходных значений функций, генерирующих числа, распределенные по нормальному и равномерному закону, показаны на рис. 19 и 20 соответственно.

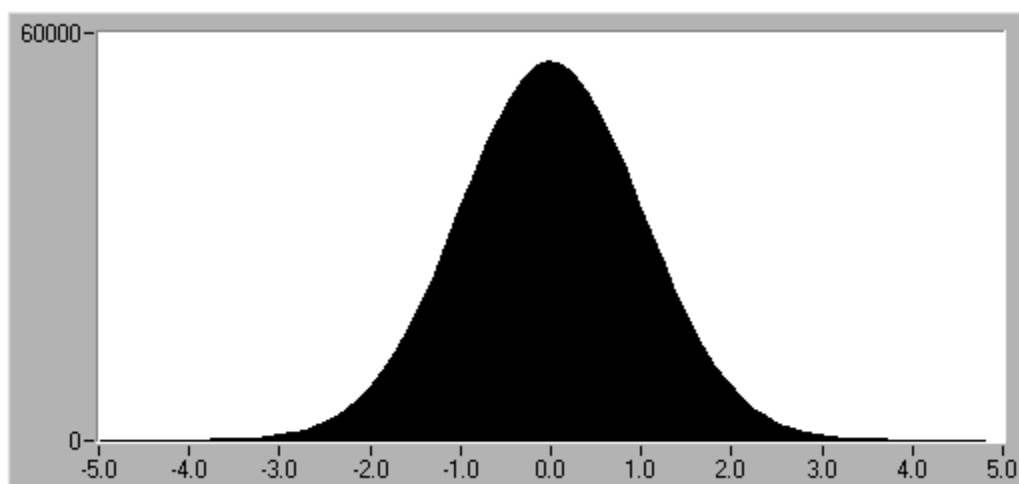


рис.19

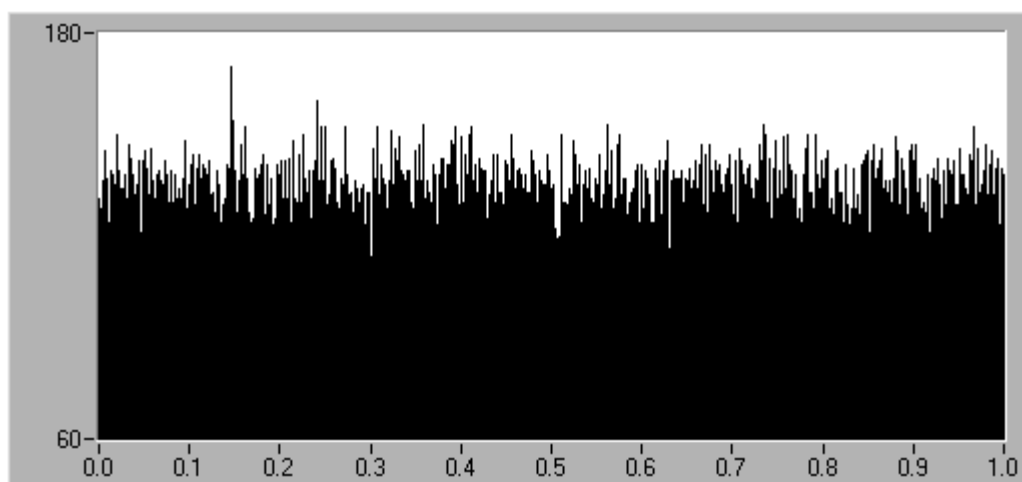


рис.20

4.3 Язык реализации.

Комплекс был реализован на языке C++ (в среде Borland C ++ 3.1). При разработке программ активно применялась объектно-ориентированная технология программирования. При реализации программы моделирования значительное внимание было уделено уменьшению времени работы программы. Графические результаты работы блоков комплекса были представлены с помощью инструментального пакета LabVIEW фирмы National Instruments.

5. Заключение

В настоящей работе были рассмотрены вопросы разработки комплекса, предназначенного для отладки и тестирования приемной части модемов, работающих в соответствии с некоторыми рекомендациями серии V ITU-T. В результате были разработаны:
- программный имитационный комплекс, позволяющий создавать тестовые последовательности, необходимые для отладки аппаратуры цифрового приема данных и проверки ее на совместимость с рекомендациями V.22 bis, V.26, V.27ter, V.29, V.32 bis ITU-T.

- модель линии связи, позволяющая имитировать искажения, которым подвергается сигнал в реальном телефонном канале.

Комплекс может использоваться на компьютерах, имеющих процессор не ниже 386 и не менее 4 Мб ОЗУ. Операционная система - MS-DOS 3.00 и выше, Windows'95, Windows NT (в режиме эмуляции DOS). В последних двух случаях требования к конфигурации компьютера значительно повышаются.

В настоящее время комплекс проходит испытания. Кроме того, в связи с требованием заказчика вводится возможность выдачи результатов работы комплекса не на дорогостоящий АЦП, а на линейный выход сравнительно дешевой обычной звуковой карты.

На диске программные файлы комплекса занимают 1 Мб, но для выходных файлов может потребоваться значительно больший объем (так, например, для входного файла размером в 10 Кб выходной файл для стандарта V.26A будет иметь размер 6 Мб).

6. Список литературы

1. Л. Рабинер, Б. Гоулд. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М, Мир, 1978
2. ADSP-2100 Family Application Handbook. Analog Devices, 1990
3. Richard J. Higgins. Digital signal processing in VLSI. PRENTICE HALL, Engelwood Gliffs, 1990
4. Vinay K. Ingle, John G. Proakis. Digital signal processing laboratory. PRENTICE HALL, Engelwood Gliffs, 1991
5. ITU-T Recommendation V.22 bis. 2400 bits per second duplex modem using the frequency division technique standardized for use on the general switched telephone network and on point-to-point 2-wire leased telephone-type circuits. Malaga-Torremolinos, 1984.
6. ITU-T Recommendation V.26. 2400 bits per second modem standardized for use on 4-wire leased telephone-type circuits. Mar del Plata, 1968; amended at Geneva, 1972, 1976 and 1980, Malaga-Torremolinos, 1984.
7. ITU-T Recommendation V.27 ter. 4800/2400 bits per second modem standardized for use in the general switched telephone network. Geneva, 1976; amended at Geneva, 1980, Malaga-Torremolinos, 1984.
8. ITU-T Recommendation V.29. 9600 bits per second modem standardized for use on point-to-point 4-wire leased telephone-type circuits. Geneva, 1976, amended at Geneva, 1980, Malaga-Torremolinos, 1984, and at Melbourne 1988.
9. ITU-T Recommendation V.32. A family of 2-wire, duplex modems operating at data signalling rates of up to 9600 bit/s for use on the general switched telephone network and at leased telephone-type circuits. Malaga-Torremolinos, 1984, amended Melbourne 1988, and Helsinki, 1993.
10. ITU-T Recommendation V.32bis. A duplex modems operating at data signalling rates of up to 14400 bit/s for use on the general switched telephone network and on leased point-to-point 2-wire telephone-type circuits. Geneva, 1991.

Приложение А

Исходный текст блока скремблера

```
////////////////////////////////////
//                               //
//  Машина      MONSTER          //
//                               //
//  this is block of scrambler  головной модуль //
//                               //
//      реализация                //
//                               //
//  Это файл scramblr.cpp        //
//                               //
//  Версия 3.4 от 15.02.98      //
//                               //
////////////////////////////////////
// Автор: Бодунов Н.В.

#include "../common/headers.h"
#include "scramblr.h"
#include "../common/standard.h"
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <iostream.h>
#include <conio.h>

// Подпрограмма обработки ошибок запуска с командной строки
void error()
{
    fprintf( stderr, "Ошибка ! Вводите : "
            "scramblr <имя входного файла> <имя выходного файла>");
}

int main(int argc, char * argv[])
{
    unsigned char in_byte = 0, out_byte = 0;
    int first, second;

    FILE *in = fopen(argv[1], "rb");

    if (in == NULL)
        fprintf(stderr, "Не открывается входной файл");

    FILE *out = fopen(argv[2], "wb");

    if (out == NULL)
        fprintf(stderr, "Не открывается выходной файл");

    // Объявление символьного массива, в который будет
    // переписан заголовок
    char head[head_size];
    // Копирование в этот массив заголовка входного файла и
    // замена имени предыдущего блока на " скремблер "
    copy_head(head, in, argv[1], "скремблер");

    // Создание символьного массива для имени стандарта и
```

```

    // запись в него
    char temp[30];
    read_standard(head, temp);
// идентификация стандарта и проверка, есть ли он
    // в списке поддерживаемых
    int ind = check_standard(temp);

    if (ind == -1)
    {
        fprintf(stderr, "\n\n\t\t\t\t\tФайл должен содержать заголовок!");
        return -1;
    }

    // Чтение номера первого и второго битов
    // скремблирующего полинома из заголовочного файла
    // standard.h
    first = ModulationMethod[ind].info.ScramblerPolinomBit1;
    second = ModulationMethod[ind].info.ScramblerPolinomBit2;

    // Запись заголовка выходного файла
    fwrite(head, 1, head_size, out);

    while (!feof(in) && !ferror(in))
    {
        // Побайтное чтение входного файла      if (!fread(&in_byte, 1, 1, in))
        break;

        // Поочередный сдвиг выходного байта для записи в
        // младший бит результата скремблирования
        out_byte <<= 1;

        // Если скремблер выдал " 1 " - младший бит
        // выходного байта устанавливается в " 1 ",
        // если получился " 0 " - младший бит выходного
        // байта не изменяется
        if (result)
            out_byte ++;

        // Теперь следующий бит делается текущим
        in_byte <<= 1;    }

        fwrite(&out_byte, 1, 1, out);
    }

    fclose(in);
    fclose(out);
    fprintf(stderr, "\n\n\t\t\t\t\tĪđĩãðàìà çàääðøáíà óñĩãøí");
    return 0;
}

```

Приложение Б

Пример BAT - файла для последовательного прохождения передаваемого файла через блоки комплекса

Запускается с командной строки
RUN.BAT < имя передаваемого файла >

```
REM Добавление заголовка к передаваемому файлу  
addhead %1 addhead.out < standard.txt
```

```
REM Копирование в каталог следующего блока  
copy addhead.out ..\scramblr  
cd ..\scramblr
```

```
REM Прохождение файла через скремблер  
scramblr addhead.out scramblr.out  
copy scramblr.out ..\mapper  
cd ..\mapper
```

```
REM Прохождение файла через мэппер  
mapper scramblr.out mapper.out  
copy mapper.out ..\filter  
cd ..\filter
```

```
REM Прохождение файла через фильтр  
filter mapper.out filter.out  
copy filter.out ..\modulato  
cd ..\modulato
```

```
REM Прохождение файла через модулятор  
modul filter.out modul.out  
copy modul.out ..\line  
cd ..\line
```

```
REM Прохождение файла через линию связи  
line modul.out line.out task.txt coeff1.txt
```

```
REM Вырезание заголовка у выходного файла  
delhead.exe line.out line.end
```