

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ КОДИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ АТМОСФЕРНЫХ КАНАЛОВ (ОАК) И ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ (ВОЛС)

В.Л. Зубаченко, В.П. Дмитриев, П.А. Бобович, И.В. Коршунов
Центр информационных технологий в проектировании (ЦИТП РАН),
Одинцово, Московская область

Аннотация

Рассмотрена система кодирования ОАК на основе анализа особенностей работы подсистем ОАК. Показаны особенности проектирования кодера и декодера ОАК путем минимизации функций кодера и декодера.

Анализ и выбор системы кодирования

Система состоит из взаимосвязанных частей предоставляющих возможность передачи информации в открытой атмосфере посредством инфракрасного излучения (ИК-излучение) [1], [2].

Система включает в себя следующие подсистемы:

1. интерфейса со смежными сетями
2. формирования излучения ИК-излучения
3. преобразования ИК-излучения в электрические импульсы
4. управления работой приемно-передающего модуля (ППМ)
5. трансивер
6. управляющая электронно-вычислительная машина (ЭВМ)
7. система борьбы с конденсацией влаги на линзах.

1. Подсистема интерфейса со смежными сетями

Обеспечивает стыковку с локальными вычислительными сетями (ЛВС) на физическом и сетевом уровнях. Выделение этой подсистемы позволяет использовать Систему в составе разнородных сетей. Согласование работы сетей между собой на всех уровнях происходит благодаря использованию универсальной ЭВМ в составе подсистемы «управляющая ЭВМ».

2. Подсистема формирования ИК-излучения

В ней формируется поток ИК-излучения. Она состоит из многоканального формирователя мощного импульса тока и системы отслеживания уровня выходной мощности. Использование многоканального формирователя позволяет повысить надежность подсистемы и позволяет дискретно управлять мощностью излучения. Для диагностики работоспособности подсистемы используется датчик ИК-излучения, который позволяет измерять уровень выходного излучения. Информация с датчика оцифровывается аналогово-цифровым преобразователем (АЦП) и передается в управляющую ЭВМ.

3. Подсистемы преобразования ИК-излучения в электрические импульсы

Подсистемы оптоэлектронного атмосферного канала (ОАК) состоит из следующих элементов: детектор сигнала, предварительный усилитель, усили-

тель с компаратором, схема управления и мониторинга уровня сигнала.

Полученное излучение преобразуется детектором сигнала (рпн фотодиод) в электрические импульсы, усиливается и преобразуется в цифровой сигнал на компараторе. Для оптимального детектирования используется схема управления, которая построена на цифровом микроконтроллере. Схема управления позволяет изменять параметры схемы усиления и компаратора по командам от управляющей ЭВМ. Мониторинг уровня принятого сигнала информирует управляющую ЭВМ об уровне принятого сигнала.

4. Подсистема управления работой ППМ

Для управления работой ППМ используется микропроцессорная система. Она состоит из набора датчиков напряжения, управляемых ключей, интерфейсов для взаимодействия с управляющей ЭВМ и специализированной сети, в которой находятся измерители температуры и АЦП.

Датчики напряжения контролируют работу подсистемы питания и сигнализируют о колебаниях напряжения питания.

Управляемые ключи используются для управления питанием подсистемы формирователя и подсистемы борьбы с конденсацией влаги на линзах.

Вся собранная информация с датчиков напряжения, АЦП и температурных датчиков передается в управляющую ЭВМ. Команды на ключи даются с управляющей ЭВМ за исключением ситуации, когда напряжение питания одного из блоков превышает максимально допустимое значение. В таких аварийных ситуациях питания ППМ отключается.

В состав подсистемы входит и блок питания ППМ, который формирует все, необходимые напряжения для схем ППМ.

5. Подсистема «трансивер»

Данная подсистема формирует информационные кадры из полученных пакетов, кодирует их и затем они подаются на вход подсистемы формирователя. Полученный кодированный сигнал из подсистемы «преобразования ИК-излучения в электрические импульсы» декодируется, и из него формируются пакеты для последующей передачи в смежную сеть. Код, используемый при кодировании информационных кадров, обеспечивает низкое значение среднего уровня тока на излучателе.

6. Подсистема «управляющая ЭВМ»

Состоит из универсальной ЭВМ, к которой подсоединяются подсистемы: «сопряжения со смежными сетями» и «трансивер». Данная подсистема управляет взаимодействием Системы и смежных сетей между собой, и управляет работой ППМ.

Полученные информационные пакеты из смежной сети преобразуются и передаются в подсистему «трансивер», полученные информационные пакеты из подсистемы «трансивер» упаковываются и передаются обратно в смежную сеть.

Весь протокол взаимодействия, начиная с канального уровня и выше, выполняется данной подсистемой. Так как она построена на универсальной ЭВМ, то в качестве управляющей программы используется сетевая операционная система (СОС) Linux, что дает возможность в будущем подстраивать Систему под любые смежные и сети и протоколы обмена.

Получая информацию о состоянии подсистем ППМ, управляющая ЭВМ формирует команды для изменения режима работы ППМ. При получении данных о падении напряжении питания ниже определенного уровня, на ППМ передается команда на отключение напряжения питания ППМ. При получении сигнала о превышении температуры внутри ППМ над температурой на линзе в холодное время года, в ППМ передается команда на включение нагревательного элемента на линзах. При достижении равенства между температурами передается команда на отключение нагревательного элемента. При работе с нагревательным элементом выполнение всех команд контролируется через датчики напряжения.

Монитор уровня выходной мощности позволяет управляющей ЭВМ сделать выводы о состоянии излучателя и в случае его неисправности просигнализировать оператору о необходимости его замены.

Монитор уровня входного сигнала сигнализирует о необходимости изменения параметров в подсистеме приема сигнала.

Данная подсистема является наиболее важной, так как она соединяет в себе все остальные. Через нее проходят не только внешние информационные пакеты, но и все внутренние события обрабатываются здесь.

7. Подсистема борьбы с конденсацией влаги на линзах

В ее состав входят температурные датчики, расположенные на линзах и в объеме ППМ, нагревательные элементы на линзах и управляемый ключ.

Подсистема обеспечивает подавление образования конденсата на линзах за счет разности температуры на линзе и в объеме ППМ.

Вся информация с температурных датчиков поступает в управляющую ЭВМ, которая и принимает решение о необходимых действиях.

Кратко описанные выше элементы системы показывают, что ее работа зависит от взаимодействия всех подсистем между собой.

Такое построение системы передачи информации позволяет получать точную информацию о состоянии канала связи, прогнозировать аварийные ситуации и предотвращать их, изменять параметры ППМ при изменении параметров атмосферы и дает возможность интегрировать Систему в любую вычислительную сеть.

Использование в качестве управляющей программы СОС Linux позволяет предоставить весь спектр сетевых сервисов, которые необходимы для полного использования системы в составе вычислительной сети (ВС).

Информационные каналы, построены на основе ИК-излучения, предъявляют ряд требований к системе передачи информации:

1. она должна стабильно работать в широком динамическом диапазоне, как по уровню сигнала, так и по ширине импульса,
2. она должна обеспечивать однозначный прием логических примитивов,
3. она должна сигнализировать о потере «логического» канала.

Рассмотрим систему кодирования с использованием относительной фазовой модуляции. При использовании данного метода кодирования, информация передается логическими «примитивами», где номер примитива кодируется длительностью интервала времени между фронтами соседних импульсов. Каждый примитив, в свою очередь, кодирует от 2 до 8 бит информации. Данный способ кодирования позволяет с высокой эффективностью использовать канал, но для его работы важно иметь низкие колебания фазы принимаемого сигнала. Данное требование невозможно выполнить в данном варианте канала, по этой причине пришлось от него отказаться.

Следующий вариант кодирования - это последовательная передача битов информации. Данный способ кодирования очень давно используется в системах связи и зарекомендовал себя как доступный и надежный способ передачи информации. Использование его в нашем канале осложняется тем, что он не обеспечивает сигнализацию при потере «логического» канала, т.к. для кодирования логического «нуля» используется пауза. В контексте нашего канала пауза может возникнуть при возникновении препятствия на пути луча. Так же из-за широких колебаний длительности сигнала может возникнуть проблема с синхронизацией внутри блока данных.

Описание системы кодирования

В результате анализа предлагается система кодирования, которая объединяет в себе оба способа кодирования и удовлетворяет всем требованиям.

Система кодирования использует последовательную систему кодирования информации, где биты информации передаются двумя символами - логическая «единица» и логический «ноль». Информация передается блоками по 8 бит. Для кодирования символов логической «единицы» и «нуля»

используется абсолютная фазовая модуляция. Из блоков формируются пакеты информации, которые используются для передачи данных, размер пакета составляет 205 байт.

На рис.1 представлена структура блока информации.

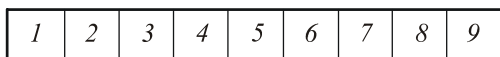


Рис. 1. Структура блока информации

Весь блок разбит на девять участков. Длительность блока составляет 18 мкс. Участок номер 1 используется для передачи символа синхронизации. Данный символ обеспечивает синхронизацию аппаратуры декодера для надежного приема последующих символов информации. Далее с участка номер 2 по участок номер 9 располагаются символы информации. Данные символы кодируют биты информации с младшего (0) по старший (7), причем символ номер 2 передает 0-ой бит, символ номер 3-й передает 1 бит и соответственно символ номер 9 передает последний, старший бит.

Структура символа представлена на рис. 2.

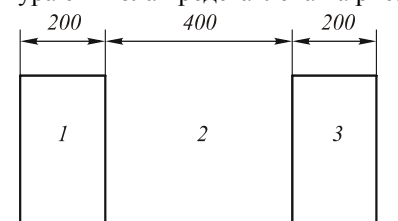


Рис. 2. Структура символа

Символ разбит на три зоны. Зона номер 1 используется для кодирования логического «нуля», зона номер 3 используется для кодирования логической «единицы», зона номер 2 используется для разделения зоны №1 от зоны №3. Символ имеет длительность 2 мкс. Длительность зон 1 и 3 составляет 200 нс, а длительность зоны 2 - 400 нс. При передаче символа импульс может располагаться только в одной зоне - №1 или №3. Длительности зон выбраны, исходя из условия, что скважность импульса должна быть не меньше 10.

Такой способ передачи логических битов позволяет однозначно определить момент потери связи, т.к. для передачи любого из битов необходимо получить импульс. Отсутствие импульса позволяет аппаратуре декодера сигнализировать драйверу об ошибке в канале связи.

Разделение логического «Нуля» и «единицы» позволяет однозначно определить, какой бит информации передает конкретный символ.

Для обеспечения надежного приема импульса используется следующая методика. На рис. 3 изображен импульс и три точки, в которых он анализируется.

При получении синхронизирующего символа, аппаратура декодера начинает вырабатывать последовательности, состоящие из трех импульсов. Пауза между импульсами имеет длительность 25 нс и импульс но-

мер 2 соответствует середине принятого импульса. Данная последовательность используется для анализа импульса в зоне №1 и зоне №3. При анализе импульса декодер фиксирует состояние приемного канала в этих трех временных точках. Если в двух точках есть активный уровень сигнала, то считается, что получен импульс, если же активный уровень только в одной точке, то такой импульс отбраковывается.

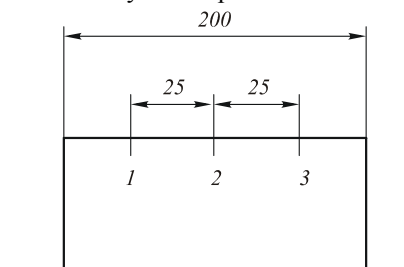


Рис. 3. Анализ импульса

Использование данной схемы анализа принятого сигнала позволяет отделить импульсы, длительность которых составляет меньше 50 нс, а так же она сохраняет работоспособность при колебаниях длительности импульса до 50 нс.

Кадр и его элементы

Кадр состоит из блоков (байтов). Кадр состоит из двух частей: служебной информации и данных. Служебная информация представлена заголовком пакета. Размер кадра составляет 205 блоков. Заголовок имеет размер в 9 блоков, остальное отдано под данные. Заголовок состоит из следующих элементов:

1. преамбула (2 блока),
2. номер станции (1 блок),
3. флаг пакета (1 блок),
4. номер пакета (2 блока),
5. длина пакета (1 блок),
6. контрольная сумма (2 блока).

Преамбула (1) обеспечивает проверку синхронности пакета, т.е. определяет начало пакета.

Флаг пакета (3) содержит информацию о типе пакета. Существует три типа пакета - пакет данных, служебный пакет и сервисный пакет.

Пакет данных содержит информацию, служебный пакет позволяет управлять процессом передачи пакетов данных, сервисный пакет используется для управления «логическим» каналом.

Контрольная сумма (5) обеспечивает защиту от ошибок в пакете.

Остальные элементы пакета используются в информационном целях драйвером канала.

В пакете данные занимают большую часть - 196 блоков. Сетевой драйвер в зависимости от потребностей операционной системы использует весь размер пакета или его часть.

Протокол передачи информации

Разработанный сетевой драйвер работает с internet стеком протоколов. По этой причине, при обмене информацией используется та же стратегия,

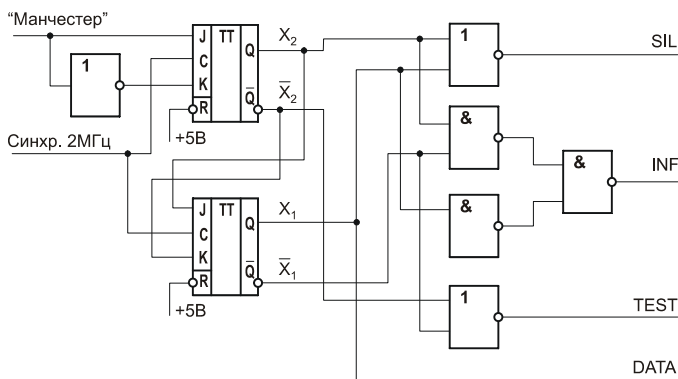


Рис. 4. Схема декодирования кода «Манчестер»

что и в протоколе IP, т.е. данные передаются в датаграммном режиме. Потери в канале обрабатываются протоколом TCP.

Проектирование кодера ОАК

Кодер предназначен для преобразования данных из кода «Манчестер», в котором они поступают с выхода сетевой карты в исходную форму. После этого необходимо преобразовать получившуюся последовательность бит данных в код 4B5B, а затем в код передачи по линии ИБВН. Таким образом, проектирование кодера сводится к проектированию следующих составляющих его устройств:

- разработка модуля (далее модуль_1) декодирования символов данных и управляющих символов из кода «Манчестер» в исходную форму;
- разработка модуля (далее модуль_2) преобразования символов данных и управляющих символов в пятибитовые символы;
- разработка модуля (далее модуль_3) преобразования параллельного кода 4B5B в последовательный ИБВН код.

На вход кодера поступают двухбитовые слова:

- 00 - отсутствие сигнала в линии;
- 01 - передается информационный ноль;
- 10 - передается информационная единица;
- 11 - передается сигнал теста связи.

Слово записывается в двухразрядный регистр, после чего поступает на вход блока анализа, который функционирует в соответствии с таблицей 1:

Таблица 1. Декодирование кода «Манчестер»

X ₁	X ₂	Сигнал	Пояснение
0	0	SIL	Отсутствие сигналов
0	1	INF	Передача 1
1	0	INF	Передача 2
1	1	TEST	Тест связи

Минимизируя полученные функции, получаем следующие уравнения для выходных сигналов в минимальной дизъюнктивной нормальной форме (МДНФ):

$$\begin{aligned}
 SIL &= \overline{X_1} \cdot \overline{X_2} \\
 INF &= \overline{X_1} X_2 + X_1 \overline{X_2} \\
 TEST &= X_1 X_2
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

После блока анализа, информация поступает на вход модуля 2, где записывается в 4-разрядный регистр. Затем, в соответствии с таблицей 2, она перекодируется в код 4B5B. Минимизируя полученные функции, получаем следующие уравнения для выходных сигналов в минимальной дизъюнктивной нормальной форме (МДНФ):

$$\begin{aligned}
 y_4 &= x_3 + x_1 \overline{x_2} + \overline{x_0} x_2, \\
 y_3 &= x_2 + x_1 x_3, \\
 y_2 &= x_1 + x_3 x_2 x_0, \\
 y_1 &= x_1 x_0 + x_3 x_2 + x_2 x_3 + x_1 x_2, \\
 y_0 &= x_0.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Получившиеся данные записываются в восьмиразрядный сдвиговый регистр и в последовательной форме поступают на модуль_3, где перекодируются в код ИБВН в соответствии со следующей таблицей 3:

Таблица 2. «Кодер 4B5B»

X ₄ X ₃ X ₂ X ₁ X ₀	Y ₄ Y ₃ Y ₂ Y ₁ Y ₀
0000	11110
0001	01001
0010	10100
0011	10101
0100	01010
0101	01011
0110	01110
0111	01111
1000	10010
1001	10011
1010	10110
1011	10111
1100	11010
1101	11011
1110	11100
1111	11101
SIL	10000
TEST	11111

Таблица 3. Кодер ИБВН

X	Q ⁿ	Y	Q ⁿ⁺¹
0	0	1	1
0	1	0	0
1	0	0	0
1	1	1	1

Минимизируя полученные функции, получаем следующие уравнения для выходных сигналов в минимальной дизъюнктивной нормальной форме (МДНФ):

$$Q^{n+1} = \bar{X} \cdot \bar{Q}^n + X \cdot Q^n \quad (3)$$

$$Y = Q^{n+1}$$

Выход Y модуля_3 является выходом кодера и с него данные в последовательном коде ИБВН поступают на вход схемы формирования импульса.

Проектирование декодера ОАК

Декодер предназначен для преобразования данных из кода ИБВН, в котором они передаются по открытому оптическому каналу связи, в последовательный код «Манчестер», который передается далее по витой паре на вход сетевой карты. Кроме того, декодер должен отслеживать ошибки, которые могут возникнуть в процессе передачи данных по ОАК и в случае их обнаружения формировать сигнал ошибки передачи данных. Проектирование декодера сводится к проектированию следующих составляющих его устройств:

- разработка модуля (далее модуль_4) преобразования символов данных и управляющих символов из кода ИБВН в параллельный код 4В5В;

- разработка модуля (далее модуль_5) преобразования пятибитовых символов данных и управляющих символов в последовательный код «Манчестер».

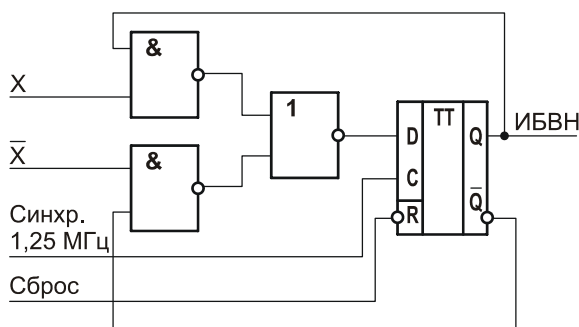


Рис. 5. Схема кодирования последовательности бит в код ИБВН

Таблица 4. Кодер ИБВН в 4В5В

X	Q ⁿ	Y	Q ⁿ⁺¹
0	0	1	0
0	1	0	0
1	0	0	1
1	1	1	1

Минимизируя полученные функции, получаем следующие уравнения для выходных сигналов в минимальной дизъюнктивной нормальной форме (МДНФ):

$$Y = \bar{X} \cdot \bar{Q}^n + X \cdot Q^n \quad (4)$$

$$Q^{n+1} = X$$

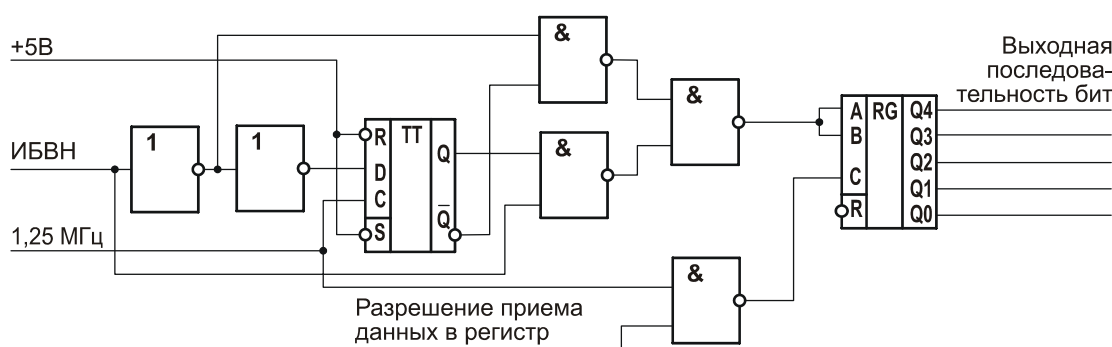


Рис. 6. Схема преобразования последовательного кода ИБВН в параллельный код

Данные записываются в последовательной форме в пятиразрядный регистр, после чего получившееся 5-битовое слово обрабатывается в соответствии с таблицей 5:

Таблица 5. Перевод 5-битовых символов в код «Манчестер»

Y ₄ Y ₃ Y ₂ Y ₁ Y ₀	X ₇ X ₆ X ₅ X ₄ X ₃ X ₂ X ₁ X ₀	Пояснения
00000	00000000	несогласованный Silence
00001	00000000	Silence, сдвинутый на такт
00010		ОШИБКА ПРИ ПЕРЕДАЧЕ
00011		ОШИБКА ПРИ ПЕРЕДАЧЕ
00100		ОШИБКА ПРИ ПЕРЕДАЧЕ

00101		ОШИБКА ПРИ ПЕРЕДАЧЕ
00110		ОШИБКА ПРИ ПЕРЕДАЧЕ
00111		ОШИБКА ПРИ ПЕРЕДАЧЕ
01000		ОШИБКА ПРИ ПЕРЕДАЧЕ
01001	01010110	
01010	01100101	
01011	01100110	
01100		ОШИБКА ПРИ ПЕРЕДАЧЕ
01101		ОШИБКА ПРИ ПЕРЕДАЧЕ
01110	01101001	
01111	01101010	
10000	00000000	Silence
10001	00000000	Silence, сдвинутый на такт
10010	10010101	
10011	10010110	
10100	01011001	
10101	01011010	
10110	10011001	
10111	10011010	
11000		ОШИБКА ПРИ ПЕРЕДАЧЕ
11001		ОШИБКА ПРИ ПЕРЕДАЧЕ
11010	10100101	
11011	10100110	
11100	10101001	
11101	10101010	
11110	01010101	
11111	00001100	Тест связи

*) Silence - кодовая последовательность, означающая отсутствие передачи данных по каналу связи.

Минимизируя полученные функции, получаем следующие уравнения для выходных сигналов в минимальной дизъюнктивной нормальной форме (МДНФ):

$$\begin{aligned}
 x_7 &= \overline{y_4 y_3 y_1} + \overline{y_4 y_2 y_1} + \overline{y_4 y_3 y_2 y_1}, \\
 x_6 &= \overline{y_3 y_2 y_1 y_0} + \overline{y_4 y_3 y_1} + \overline{y_4 y_3 y_2 y_1} + \overline{y_4 y_3 y_2 y_0}, \\
 x_5 &= \overline{y_4 y_3 y_1} + \overline{y_3 y_2 y_1} + \overline{y_4 y_3 y_2 y_1}, \\
 x_4 &= \overline{y_4 y_3 y_1} + \overline{y_4 y_3 y_2} + \overline{y_4 y_2 y_1 y_0} + \overline{y_4 y_3 y_2 y_1 y_0}, \\
 x_3 &= \overline{y_4 y_3 y_2} + \overline{y_4 y_2 y_0} + \overline{y_4 y_2 y_1} + \overline{y_4 y_3 y_2 y_1}, \\
 x_2 &= \overline{y_4 y_3 y_1} + \overline{y_4 y_2 y_1} + \overline{y_3 y_2 y_1} + \overline{y_4 y_3 y_2 y_0}, \\
 x_1 &= \overline{y_4 y_2 y_1 y_0} + \overline{y_4 y_2 y_1 y_0} + \overline{y_4 y_3 y_2 y_0} + \overline{y_4 y_3 y_2 y_0} + \overline{y_4 y_3 y_1 y_0}, \\
 x_0 &= \overline{y_4 y_2 y_0} + \overline{y_3 y_1 y_0} + \overline{y_4 y_1 y_0}, \\
 ERR &= \overline{y_4 y_3 y_1} + \overline{y_4 y_2 y_1} + \overline{y_3 y_2 y_1 y_0} + \overline{y_4 y_3 y_2 y_1}, \\
 SB &= \overline{y_3 y_2 y_1 y_0}.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Результаты работы записываются в 8-разрядный сдвиговый регистр и побитно выдаются на выход декодера.

Особенности разработки кодеров и декодеров для волоконно-оптической линии связи (ВОЛС)

Структура ВОЛС

По определению комитета IEE POSIX 1003.0: «открытая» система - это система, реализующая открытые спецификации на интерфейсы, службы и форматы данных, достаточные для того, чтобы обеспечить:

- возможность переноса (мобильность) прикладных систем, разработанных должным образом, с минимальными изменениями на широкий диапазон систем;
- совместную работу (интероперабельность) с другими прикладными системами на локальных и удаленных платформах - взаимодействие с пользователями в стиле, облегчающем им переход от системы к системе (мобильность)

пользователей). Термин «открытая спецификация» определяется, в свою очередь, как «общедоступная спецификация», которая поддерживается открытым, гласным, согласительным процессом, направленным на постоянную адаптацию новой информационной технологии, т.е. не зависит от конкретных технических или программных средств или продуктов отдельных производителей. «Открытая спецификация» одинаково доступна любой заинтересованной стороне. Более того, «открытые спецификации» находятся под контролем общественного мнения, так что все заинтересованные стороны могут принимать участие в их развитии.

Все эти свойства «открытых» систем необычайно важны, так как рынок электронных вычислительных машин и информационных систем, построенных на основе этих машин, необычайно широк. Машины и, естественно, системы, и сети резко отличаются структурой, параметрами, размерами. Число объединений и фирм-производителей вычислительных систем и сетей исчисляется многими сотнями. Вследствие этого создание современных информационных систем стало невозможным без использования общей их модели, без унификации методологии, характеристик и параметров этих систем.

Наряду с проблемой мобильности информационных систем важной является и проблема их информационной защищенности. С развитием информационных технологий требования к информационной защищенности все более ужесточаются. Например, для реализации соответствия банковской информационной системы современным требованиям безопасности должна быть обеспечена защита станций:

- попытки чтения информации в сети;
- попытки искажения информации;
- попытки навязывания устаревшей и ложной информации;
- попытки передачи от «чужого» имени или самому себе;
- несанкционированного выхода в сеть.

Использование технологии «открытых» систем не означает незащищенность системы. Однако такие свойства как интероперабельность и мобильность приложений несут в себе источник уязвимости для защищенности информации, поэтому защита информации в «открытых» системах представляет собой проблему, решение которой требует разработки специальных механизмов и стандартов.

Выбор ВОЛС для использования в «открытых» системах обусловлен следующими его преимуществами перед каналами связи на основе, например, медного кабеля:

- гораздо более высокая скорость передачи данных (сотни и тысячи Мбит/с);
- низкая удельная стоимость бита передаваемой информации (она на 2...3 порядка ниже удельной стоимости бита при его передаче по медному кабелю);

- секретность передачи информации;
- практически полная нечувствительность к внешним электромагнитным воздействиям, а, следовательно, и обеспечение сохранности информации в интероперабельной системе;
- отсутствие межканальных взаимонаводок.
- к частичным недостаткам ВОЛС можно отнести сложность монтажа, относительно высокую стоимость измерительного и испытательного оборудования и ограниченный срок службы источника оптического излучателя из-за деградиционных потерь (это относится только к лазерным диодам). [1]

Последние три положительных свойства ВОЛС очень важны для обеспечения информационной защищенности системы. Нетрудно заметить, что для обеспечения информационной защищенности системы на физическом уровне не требуется проводить никаких специальных мероприятий, так как эти требования обеспечиваются физической природой волоконно-оптического кабеля:

- нелегальное подключение к волоконно-оптическому каналу информации с помощью электромагнитной или какой-либо другой помехи не представляется возможным ввиду практически полной нечувствительности волоконно-оптического кабеля к внешним помехам;
- получение доступа к передаваемой информации посредством анализа электромагнитного излучения вблизи волоконно-оптического кабеля невозможно.

В качестве реализации волоконно-оптического канала, как канала «открытой» системы был выбран стандарт ВОРИПД (волоконно-оптический распределительный интерфейс передачи данных) ГОСТ Р-50450-92 (аналог FDDI). [5]

Успешное функционирование системы с последовательной передачей данных на основной полосе частот в соответствии с ГОСТ Р-50450-92 требует применения такого кодирования, которое объединяет функции передачи данных и тактовых импульсов. Восстановление данных из этого потока кодовых битов вызывает необходимость регенерации информации тактовой синхронизации, которая включена в поток кодовых битов. Вся информация передается в интерфейсе посредством перехода уровня сигнала или отсутствия перехода уровня сигнала в физической среде интерфейса. Минимальный интервал времени между возможными переходами уровня сигнала в физической среде интерфейса определен как элемент кодового бита. В идеале каждый переход уровня сигнала или отсутствие перехода уровня сигнала представляет полезную часть данных. Однако практически это неосуществимо, поскольку протяженные серии битов, представляемых отсутствием перехода уровня сигнала, не содержат достаточной информации для регенерации тактовых импульсов синхронизации. Кроме того, для высокоскоростной последователь-

ной передачи желательно, чтобы баланс составляющих постоянного тока поддерживался в степени, возможной для облегчения проектирования компонентов и схем интерфейса.

Управление физической средой ВОРИПД (так будем называть ВОЛС, работающий в соответствии с ГОСТ Р-50450-92) использует двойную встроенную структуру кодирования так, чтобы достичь этих характеристик. Результирующий последовательный поток кодовых битов, как он видится в передающей физической среде, содержит, по крайней мере, два перехода уровня сигнала на каждый передаваемый символ и является, таким образом, самосинхронизирующимся. И имеет максимально три последовательных нулевых элемента кода и устанавливает границы на ходу, а также дает максимальное отклонение на $\pm 10\%$ от номинала интегральной составляющей постоянного тока.

Первым уровнем кодирования, выполняемым УФС (УФС - протокол управления физической средой), является преобразование символов из УДС (УДС - протокол управления доступом к среде) в закодированные кодовые биты БВН (NRZ). Вторым уровнем кодирования, выполняемым УФС, состоит в преобразовании кодовых битов БВН (без возврата к нулю) в кодовые биты БВН (без возврата к нулю с инверсией на единицах, NRZ). Для входящего потока импульсов кодовые биты БВН должны вначале кодироваться в кодовые биты БВН, а затем декодироваться в шестнадцатеричные символы для использования в УДС.

Вся информация в ВОРИПД пересылается в виде последовательности кодовых групп, каждая из которых содержит определенную последовательность из пяти кодовых битов. Передаваемая последовательность этих кодовых групп определяется УДС.

Интерфейс между УДС и УФС использует символы для передачи логического содержания. УДС обеспечивает последовательность символов, посланных в УФС для кодирования и передачи в физическую среду, достоверность и соответствие правилам организации последовательностей символов, которые описаны ниже.

УДС передает УФС информацию с помощью непрерывного потока или последовательности символов. Символ является наименьшим элементарным объектом передачи сигнала, используемым УДС. Символы используются для передачи трех видов информации: режимов линии; управляющих символов; символов данных. Каждый символ, передаваемый между УДС и УФС, описывает определенную последовательность из пяти кодовых битов, называемую кодовой группой, подлежащей передаче.

ВОРИПД должен использовать встроенный код групповой передачи, в котором фиксированная последовательность или группа из четырех битов данных или управляющий символ кодируется в фиксированную последовательность кодовых битов. Группа из N кодовых битов называется кодовой группой. Частота синхронизации символов составляет одну пятую основной частоты. УФС принимает из УДС или представляет в УДС символ один раз за каждый символьный интервал. Символьный интервал является пятикратным интервалом кодового бита. Каждый символ, является ли он квартетом данных, режимом линии или управляющим символом, кодируется в УФС-группу из пяти кодовых битов БВН, которые, в свою очередь, кодируются в последовательность кодовых битов БВН для передачи по физической среде. Точное назначение последовательностей из пяти кодовых битов определено в табл. 6.

Таблица 6. Кодирование символов

Кодовая группа	Символ	Назначение
		Символы режима линии
00000	Q	Нет сигнала
11111	I	Холостой ход
00100	H	Останов
		Начальный ограничитель
11000	K	Первый из последовательной пары НО
10001	J	Второй из последовательной пары НО
		Символы данных
		Шестнадцатеричное значение
11110	0	0
01001	1	1
10100	2	2
10101	3	3
01010	4	4
01011	5	5
01110	6	6
01111	7	7
10010	8	8
10011	9	9
10110	A	A
10111	B	B

11010	C	C
11011	D	D
11100	E	E
11101	F	F
01101	T	Конечный ограничитель (используется для прерывания потока данных)
00111	R	Индикаторы управления Лог. 0 (сброс)
11001	S	Лог. 1 (установка)
		Значение недействительных кодов
00001	V или H	Данные кодовые наборы не должны прерываться, потому что это нарушает требования к последовательным кодовым битам нулей или к рабочим циклам. Однако коды 00001, 00010, 01000, 10000, если они будут приняты, должны интерпретироваться как Останов. (12345) - последовательный порядок передачи кодовых битов.
00010	V или H	
00011	V	
00101	V	
00110	V	
01000	V или H	
01100	V	
10000	V или H	

Символы режима линии. Эти три символа предназначены для использования в физической среде между передачами. Обнаружение любого из этих символов в кадре данных будет приоритетным и аварийно прервет любую текущую передачу данных.

Нет сигнала (Q). Символ «Нет сигнала» указывает на отсутствие любых переходов уровня сигнала в физической среде.

Останов (H). Символ «Останов» указывает управляющие последовательности (в виде режимов линии) или удаление символов нарушения кода из тракта следования символов, в то же время минимизируя любую составляющую постоянного тока из сигнала переменного тока, выданного в физическую среду.

Холостой ход (I). Символ «Холостой ход» указывает на нормальное состояние физической среды между передачами. Он обеспечивает непрерывную комбинацию заполнения для установления и поддержания синхронизма тактовых импульсов.

Управляющие символы

Начальный ограничитель (НО) используется для очерчивания начальной границы последовательности передачи данных. Эта передача данных может начаться, когда физическая среда находится в состоянии холостого хода, или же она может последовать или получить преимущество относительно предыдущей передачи. НО уникален тем, что может быть опознан независимо от ранее установленных границ символов. Следует заметить, что начальный ограничитель может встретиться в любой точке независимо от установленных ранее границ кодовой группы, как например, в случае, когда новая передача получает приоритет по отношению к предыдущей передаче, прерывая ее.

Протокол уровня звена данных (УЗД) является ответственным за сохранение должного использования НО и упорядочения кодовых групп. Последовательное следование символа J, а затем K от УЗД к УФС должно быть использовано для внедрения на-

чального ограничителя в физическую среду. Физический уровень будет представлять последовательность JK как единственным образом распознаваемую последовательность кодовых битов, которая не существует в любой другой разрешенной последовательности символа независимо от ранее установленных границ символа. Используя эту характерную особенность, приемные логические узлы физического уровня применяют поступательную последовательность JK для установления границ кодовой группы.

Первый символ НО (J). Символ J является первым символом последовательной пары символов начального ограничителя.

Конечный символ НО (K). Символ K является вторым и последним символом последовательной пары символов начального ограничителя.

Конечный ограничитель (КО) (символ T) завершает все нормальные передачи данных. Символ T не является обязательно последовательным в последовательности передачи, поскольку за конечным ограничителем может следовать один или более символов индикатора управления. Однако конечные ограничители и индикаторы управления должны всегда формировать последовательность сбалансированных, т.е. четных по числу пар символов. Если не представлен ни один из индикаторов управления, эта последовательность состоит из пары символов T. Следует заметить, что КО не может быть распознан независимо от границ символа, так что правильное декодирование данной кодовой комбинации зависит от ранее установленного тактирования границ кодовой группы.

Индикаторы управления определяют логические условия, связанные с последовательностью передачи данных. Они могут быть независимо изменены ретранслирующей станцией без изменения нормальных данных в последовательности передачи. Последовательность символов конечного ограничителя и индикаторов управления всегда сбалансирована, т.е. она состоит из четырех пар символов. Конечный ограничитель, сопровождаемый нечетным числом инди-

каторов управления, является сбалансированной последовательностью символов; конечный ограничитель, сопровождаемый четным числом индикаторов управления, балансируется добавлением заключающего конечного ограничителя. УЗД является ответственным за поддержание баланса индикаторов управления. Следует заметить, что правильное декодирование этих индикаторов управления зависит от ранее установленного тактирования кодовых групп и, таким образом, прозрачно для физического уровня.

Сброс (R). Символ «Сброс» указывает на состояние логического 0 (сброс).

Установка (S). Символ «Установка» указывает на состояние логической 1 (установка).

Символы данных (0...F) передают внутри последовательности передачи один квартет произвольных данных. Элементы 16 символов обозначаются шестнадцатеричными цифрами (0...F), а неопределенный член набора обозначается буквой *n*. Использование символов данных произвольно там, где за любым символом может следовать любой другой символ данных. Символы данных не интерпретируются УФС. Успешное декодирование УФС кодовых групп зависит от правильного приема последовательности начального ограничителя.

Символы нарушения (V) определяют состояние физической среды, которое не соответствует любому другому символу в наборе символов. Символы нарушения не должны передаваться в физической среде. Прием символов нарушения может происходить от различных сбойных ситуаций или во время последовательности тактовой синхронизации кольца.

Проектирование кодера ВОЛС

Разобьем проектирование кодера ВОЛС на три части:

- разработку модуля преобразования символов данных и управляющих символов в пятибитовые символы;
- разработку модуля преобразования параллельного кода в последовательный;
- разработку модуля преобразования кода БВН в код БВНИ для последующей передачи в физическую среду.

Работа кодера может быть описана следующей таблицей истинности (табл. 7).

Минимизируя функции, получаем следующие уравнения для выходных сигналов в минимальной дизъюнктивной нормальной форме (МДНФ):

$$\left\{ \begin{array}{l} y_0 = \overline{x_0 x_1} + \overline{x_1 x_3} + \overline{x_1 x_4} + \overline{x_0 x_2 x_4} + \\ \quad + \overline{x_0 x_2 x_4} + \overline{x_0 x_2 x_3 x_4}; \\ y_1 = \overline{x_0 x_2} + \overline{x_0 x_1 x_3} + \overline{x_1 x_2 x_3} + \overline{x_0 x_1 x_2 x_3}; \\ y_2 = \overline{x_3} + \overline{x_0 x_2 x_4} + \overline{x_0 x_1 x_2 x_4}; \\ y_3 = \overline{x_0 x_3} + \overline{x_0 x_1 x_2} + \overline{x_0 x_1 x_3} + \\ \quad + \overline{x_0 x_1 x_2} + \overline{x_0 x_1 x_3 x_4}; \\ y_4 = \overline{x_4}. \end{array} \right. \quad (6)$$

Преобразователь параллельного кода в последовательный можно реализовать с помощью пятиразрядного регистра сдвига, причем тактовая частота, управляющая сдвигом, должна быть 125 МГц, а тактовая частота, управляющая записью символа в регистр, в 5 раз меньше (25 МГц).

Таблица 7. Таблица истинности кодера

Входные сигналы $X_4 X_3 X_2 X_1 X_0$	Входные сигналы $Y_4 Y_3 Y_2 Y_1 Y_0$	Примечания
		Символы данных
00000	11110	0h
00001	01001	1h
00010	10100	2h
00011	10101	3h
00100	01010	4h
00101	01011	5h
00110	01110	6h
00111	01111	7h
01000	10010	8h
01001	10011	9h
01010	10110	Ah
01001	10111	Bh
01100	11010	Ch
01101	11011	Dh
01110	11110	Eh
01111	11101	Fh
10000	00000	Символы управления Q
10001	10001	Символы управления K
10010	xxxxx	Недействительный символ
10011	xxxxx	Недействительный символ
10100	00100	-
10101	xxxxx	-
10110	xxxxx	-
10111	00111	-
11000	11000	-
11001	11001	-
11010	xxxxx	-
11011	xxxxx	-
11100	xxxxx	-
11101	01101	-
11110	xxxxx	-
11111	11111	-

При проектировании кодера БВН - БВНИ следует заметить, что переход уровня сигнала в коде БВНИ соответствует логической 1 в коде БВН. Прием же логического 0 не отражается на уровне сигнала в линии. В табл. 8 отражена работа кодера БВН - БВНИ.

Таблица 8. Переходы кодера БВН - БВНИ

x Q ⁿ	y Q ⁿ⁺¹	Вход DD-триггера
0 0	0 1	0
0 1	1 1	1
1 0	1 1	1
1 1	0 0	0

В результате получаем следующие уравнения:

$$y = \bar{x}Q + xQ, \tag{7}$$

$$D = y.$$

Проектирование декодера ВОЛС

Проектирование декодера ВОЛС в целом аналогично проектированию кодера, описанного выше. Различие состоит в том, что принимаемые недействительные кодовые группы должны интерпретироваться, причем комбинации 00001; 00010; 01000; 10000 интерпретируются как символ Н (останов), а символы 00011; 00101; 00110; 01100 - как символы V (символы нарушения).

Переходы декодера БВНИ-БВН отражены в таблице 9.

Таблица 9

Переходы декодера БВНИ-БВН

x Q ⁿ	y Q ⁿ⁺¹	Вход DD-триггера
0 0	0 0	0
0 1	1 0	0
1 0	1 1	1
1 1	0 1	1

Полученные уравнения имеют вид:

$$y = \bar{x}Q, \tag{8}$$

$$D = x.$$

Следует заметить, что переключение триггера должно происходить не раньше, чем на выходе схемы сформируется сигнал, но и не позже, чем на вход D придет следующий сигнал x. Работа декодера описывается следующей таблицей истинности.

$$\begin{cases} y_0 = \bar{x}_0\bar{x}_1 + x_0\bar{x}_2\bar{x}_3 + x_0\bar{x}_2x_3x_4 + x_0x_1x_2x_3x_4; \\ y_1 = x_0x_1x_4 + x_0x_1x_3 + x_0x_1x_2 + x_0x_1x_3 + x_1x_2x_3x_4; \\ y_2 = x_0x_3 + x_0x_1x_2 + x_0x_2x_4 + x_0x_1x_4 + x_1x_2x_3 + x_0x_1x_2x_4 + x_1x_2x_4 + x_0x_1x_2x_3x_4; \\ y_3 = x_0x_1x_2 + x_0x_2x_3 + x_2x_3x_4 + x_0x_1x_2x_3; \\ y_4 = x_0x_4 + x_1x_4 + x_2x_4 + x_3x_4 + x_0x_1x_2x_3 + x_0x_1x_2x_3. \end{cases} \tag{9}$$

Заключение

Для оптоэлектронных атмосферных каналов (ОАК) была предложена система кодирования, которая объединяет относительную фазовую модуля-

Таблица 10. Таблица истинности декодера

Входные сигналы X ₀ X ₁ X ₂ X ₃ X ₄	Входные сигналы Y ₀ Y ₁ Y ₂ Y ₃ Y ₄	Примечания
00000	10000	Q
00001	10100	H
00010	10100	H
00011	10101	V
00100	10100	H
00101	10101	V
00110	10101	V
00111	10111	R
01000	10100	H
01001	00001	1h
01010	00100	4h
01001	00101	5h
01100	10101	V
01101	11101	T
01110	00110	6h
01111	00111	7h
10000	10100	H
10001	10001	K
10010	01000	8h
10011	01001	9h
10100	00010	2h
10101	00011	3h
10110	01010	Ah
10111	01011	Bh
11000	11000	J
11001	11001	S
11010	01100	Ch
11011	01101	Dh
11100	01110	Eh
11101	01111	Fh
11110	00000	Oh
11111	11111	I

Полученные уравнения в МДНФ имеют вид:

цию и последовательную передачу битов. Это обеспечивает надежную работу ОАК в любых погодных условиях.

Разработанные для волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) кодеры и декодеры обеспечивают

совместную работу с другими прикладными системами на локальных и удаленных платформах, т.е. взаимодействие с пользователем в стиле, облегчающем им переход от системы к системе.

Литература

1. Горохов В.А., Носов Ю.Р., Рыбаков В.С. Классификация и принципы построения оптоэлектронных линий передач логических сигналов // Микроэлектроника. – 1974. – Вып. 7. – С. 210–221.
2. Применение оптоэлектронных приборов в радиоэлектронной аппаратуре / В.П.Балашов, В.А. Грохов, В.П. Дмитриев, В.С. Рыбаков // Итоги науки и техники. Сер. Электроника. М: ВИНТИ, 1989. Т. 24. С. 60-122.
3. Якубайтис Э.А. Информационные сети и системы. Справочная книга. – М.: Финансы и статистика, 1996. – 368 с.
4. Развитие и применение открытых систем // Сб. тезисов докладов III Международной конференции, 22 – 26 апр. 1996 г. – М.: МГИЭМ. – 235 с.
5. Системы обработки информации. Волоконно-оптический распределительный интерфейс передачи данных (ВОРИПД). – М.: Госстандарт России, 1997. – 120 с.