

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ**  
**Государственное образовательное учреждение**  
**высшего профессионального образования**  
**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ**  
**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ**  
**им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»**

---

***В.А. Никамин***

# **ЦИФРОВЫЕ ЗВУКОВЫЕ ИНТЕРФЕЙСЫ**

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ**



**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**  
**2010**

УДК 004.5  
ББК 373.2-044  
Н62

Рецензент  
доктор технических наук, профессор  
**А.А. Фадеев**

*Утверждено  
редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия*

**Никамин В.А.**

Н62 Цифровые звуковые интерфейсы: учебное пособие / В.А. Никамин;  
ГОУВПО СПбГУТ. СПб, 2010. – ? с.

Обобщен материал, касающийся наиболее распространенных в настоящее время цифровых звуковых интерфейсов – как профессиональных (AES3, AES10, SDIF, TDIF), так и потребительских (S/PDIF, Toslink). Подробно рассматриваются форматы данных, передаваемых посредством этих интерфейсов, электрические характеристики сигналов и типы соединительных линий.

Издание предназначено для студентов, обучающихся по специальностям 210405 «Радиосвязь, радиовещание и телевидение» и 201400 «Аудиовизуальная техника», а также для специалистов, работающих в области подготовки записи и воспроизведения различных звуковых программ.

**УДК 004.5  
ББК 373.2-044**

© В.А. Никамин, 2010

© Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Санкт-Петербургский государственный  
университет телекоммуникаций  
им. проф. М.А.Бонч-Бруевича», 2010

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В современную эпоху аналоговая аудиоаппаратура, безраздельно господствовавшая до самого последнего времени в звукозаписывающих студиях и в домашнем обиходе, практически полностью вытеснена аппаратурой цифровой. По этой причине бесхитростные «аналоговые» соединительные кабели, состоящие из куска провода с разъемами на концах, постепенно уступают место цифровым звуковым интерфейсам, которые кроме соединительного кабеля включают в себя еще и сложные устройства преобразования передаваемой информации в тот или иной стандартный формат.

Нередко кроме самой звуковой информации требуется передавать еще и множество разнообразных сопутствующих данных, а также сигнал синхронизации, обеспечивающий правильное и безошибочное декодирование принятой информации на приемном конце.

На сегодняшний день существует достаточно много типов цифровых звуковых интерфейсов. Некоторые из этих интерфейсов стандартизованы соответствующими организациями и получили статус международных (AES3, AES10, S/PDIF). Большая же их часть являются «фирменными» разработками и такого статуса не имеют (SDIF, TDIF, ADI), но, тем не менее, широко распространены по причине широкого распространения звукового оборудования фирм-разработчиков.

Обилие цифровых звуковых интерфейсов способно поставить пользователя в затруднительное положение, поскольку требует от него хотя бы элементарного представления о том, что за сигналы передаются с помощью данного интерфейса. Наиболее сложные ситуации возникают, когда встает вопрос совместимости различных интерфейсов, например, очень похожих друг на друга профессионального AES3 и потребительского S/PDIF.

Эти интерфейсы, хотя и имеют одну и ту же структуру передаваемых данных, но все же отличаются друг от друга – как уровнями передаваемых по соединительной линии сигналов, так и значением бит блока статуса канала. Поэтому при попытке подключения выхода одного из них к входу другого данные могут интерпретироваться неправильно (если вообще будут как-то интерпретироваться), и звуковой сигнал будет искажен.

Часто пользователь, имевший дело преимущественно с аналоговой аппаратурой, недооценивает роль сигналов синхронизации при работе с цифровой аппаратурой. Между тем, всякая цифровая система способна работать только при наличии соответствующих сигналов синхронизации. Именно тех, которые конкретно для нее предназначены. Замена здесь не допускается. Иначе никакого звука можно и не услышать.

Некоторые интерфейсы (AES3) способны формировать самосинхронизирующийся поток данных, т.е. сигналы синхронизации в принципе могут извлекаться из него непосредственно в приемном устройстве с помощью петли фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и устройства цикловой синхронизации (УЦС). Хотя при передаче сигнала на большие расстояния даже здесь предполагается использование сигналов внешней синхронизации.

Большинство же интерфейсов предполагает передачу того или иного сигнала синхронизации вместе с основным сигналом. И этот сигнал синхронизации является атрибутом именно того интерфейса, для которого он предназначен. Использовать сигналы синхронизации, предназначенные для другого интерфейса, недопустимо, даже если это сигналы имеют одно и то же название (например, сигнал синхронизации по словам – WCLK, LRCK; сигнал частоты дискретизации –  $f_T$  и пр.).

Цель данной публикации – ознакомить пользователя с наиболее распространенными сегодня цифровыми звуковыми интерфейсами и обратить его внимание на сложности, которые могут возникнуть при работе с цифровой аппаратурой.

## ВВЕДЕНИЕ

Английское слово *interface* имеет несколько значений: граница раздела, поверхность раздела, сопряжение, стык, устройство сопряжения, поэтому в различных областях техники в понятие *интерфейс* специалисты вкладывают разный смысл.

В одном случае под интерфейсом понимают совокупность компьютерных программ, с помощью которых пользователь может общаться с машиной, т.е. это правила взаимодействия операционной системы компьютера (машины) с пользователем (физическим лицом).

В другом случае это совокупность программных и аппаратных средств, обеспечивающих логическое и физическое взаимодействие отдельных блоков и программ вычислительной системы (внутрисистемное взаимодействие).

В третьем случае это также совокупность программных и аппаратных средств, но эти средства обеспечивают логическое и физическое взаимодействие между устройствами и оборудованием принципиально различного назначения.

Последнее определение наиболее близко к определению цифрового звукового интерфейса, поскольку с его помощью обеспечивается взаимодействие аппаратуры принципиально различного функционального назначения: магнитофонов, микшеров, синтезаторов, лазерных проигрывателей, цифровых усилителей, компьютеров, тюнеров, ИКМ-адаптеров, микрофонов и т.д.

Таким образом, условимся называть **цифровым звуковым интерфейсом совокупность программных и аппаратных средств, обеспечивающих обмен цифровой звуковой информацией между аудиооборудованием.**

В общем случае интерфейс включает в себя преобразователь информации в один из стандартных форматов (кодер интерфейса), соединительную линию, включающую в себя входной и выходной разъемы и соединительный кабель, и устройство обратного преобразования информации – декодер интерфейса (рис. В1).

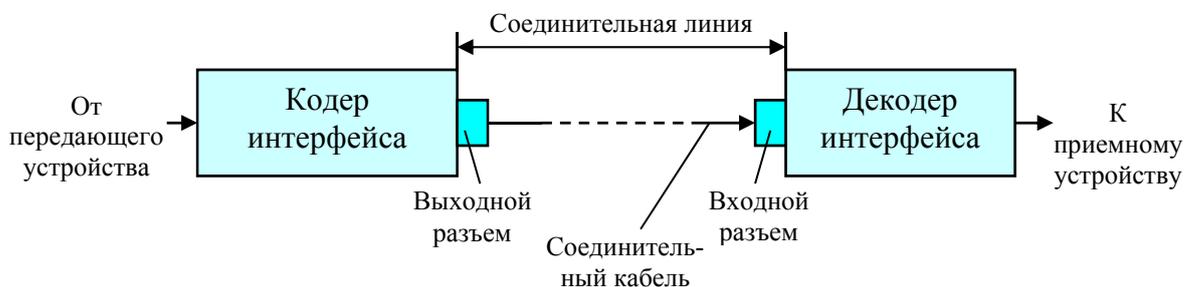


Рис. В1. Структурная схема цифрового звукового интерфейса

Форматы данных у разных интерфейсов сильно отличаются по содержанию, а кодеры и декодеры – по сложности. В одном случае через интерфейс передается только непосредственно цифровой звуковой сигнал в виде последовательности отсчетов, сигнал синхронизации и очень ограниченное число

дополнительных данных – как, например, в формате TDIF, где кроме цифрового звукового сигнала и сигналов синхронизации, передается только указатель наличия или отсутствия имфазиса.

В других форматах количество дополнительных данных гораздо больше, и информация организуется в блоки, каждый из которых снабжен блочной синхрогруппой (SDIF-2, ADI). Может использоваться и дополнительная канальная модуляция потока данных (SDIF-3).

В наиболее сложных форматах (AES3, AES10, S/PDIF) объем дополнительной информации сопоставим с объемом основных звуковых данных, а сам формат имеет очень сложную многоуровневую структуру (слова, кадры, субкадры, блоки). Здесь используется несколько видов синхронизирующей информации, в том числе несколько разных синхрогрупп, данные кодируются кодами, контролирующими ошибки, и перед передачей в канал модулируются канальными кодами.

В качестве соединительной линии могут использоваться экранированная витая пара, коаксиальный кабель или оптическое волокно, поэтому выходные и входные цепи интерфейсов всегда имеют соответствующие буферные каскады или преобразователи физического представления сигнала: электрического в оптический (светодиод или полупроводниковый лазер) и оптический в электрический (фотодиод).

## 1. AES3 (AES/EBU)

*Стандарт AES3 содержит практические рекомендации, относящиеся к формату последовательной передачи двух каналов цифровых звуковых данных, представленных в линейном ИКМ-коде [1].* Первая редакция данного стандарта была разработана в 1985 году усилиями Международного общества инженеров-разработчиков звукового оборудования **AES (Audio Engineering Society)**, после длительного анализа и обсуждения была утверждена под названием **AES3-1985**. Этот стандарт был поддержан Европейским радиовещательным союзом **EBU (European Broadcasting Union)**, получил статус международного и стал называться **AES/EBU [2]**, хотя в документах AES он по-прежнему обозначается **AES3**. Впоследствии стандарт неоднократно пересматривался и дополнялся – первый раз в 1992 году (версия AES3-1992), последний раз в 2009 году (версия AES3-2009).

Несмотря на то, что стандарт AES3 изначально разрабатывался как двухканальный, спецификация на него является достаточно гибкой и позволяет использовать его для передачи многоканального звукового сигнала, а также для передачи звуковых сигналов с повышенными частотами дискретизации.

Стандарт AES3 оказался настолько удачным и гармоничным, что многие организации по стандартизации опубликовали свои, очень похожие на него версии [3].

Международная электротехническая комиссия **IEC (International Electrotechnical Commission)** разработала формат **IEC-60958 (type 1)** передачи звуковых данных для профессионального использования, в том числе и для целей радиовещания.

Международный консультативный комитет по радиосвязи и радиовещанию **CCIR (International Radio Consultative Committee)** утвердил свои рекомендации по организации потока звуковых данных по каналам связи и вещания **Rec. 647 (1990)**.

Японская ассоциация электронной промышленности **EIAJ (Electronic Industries Association of Japan)** разработала и утвердила аналогичный формат **EIAJ CP-340-type I**.

Американский национальный институт стандартов **ANSI (American National Standards Institute)** ратифицировал стандарт **ANSI S4.40-1985**.

Европейский радиовещательный союз **EBU (European Broadcasting Union)** утвердил технический документ **EBU Tech. 3250-E**.

### 1.1. Формат данных

Наименьшей структурной единицей в AES3 является 32-разрядный субкадр (рис 1.1), содержащий в качестве основных данных 20-разрядное значение звукового отсчета одного из двух стереоканалов. Два субкадра, в одном из которых содержатся данные о значении отсчета левого канала в двоичном дополнительном коде (субкадр L), а в другом – отсчета правого канала в дво-

ичном дополнительном коде (субкадр R), составляют кадр. В том случае если передается монофонический звуковой сигнал, его отсчеты располагаются в субкадре L, а субкадр R заполняется «нулями».

Каждые 192 последовательных кадра составляют блок данных (рис. 1.2).



Рис. 1.1. Формат субкадра интерфейса AES3

Для передачи через соединительную линию данные модулируются **бифазным (двухфазным) канальным кодом Vi-ф-М**. Это нужно для придания полученной последовательности свойство самосинхронизации. Канальный код Vi-ф-М (бифазный маркированный), используемый для этой цели, характеризуется наличием обязательного изменения уровня в начале каждого тактового интервала.

Кроме того, при передаче логической «единицы» изменение уровня есть еще и в центре тактового интервала. При передаче же логического «нуля» такое изменение отсутствует (рис. 1.3) [4–6]. Звуковые данные внутри субкадра представлены в двоичном дополнительном коде и располагаются младшими разрядами вперед, что является недостатком интерфейса, так как почти во всех ЦАП и АЦП преобразование начинается со старшего разряда. Поэтому и при кодировании перед передачей по интерфейсу и при декодировании при приеме, приходится «переворачивать» отсчеты.

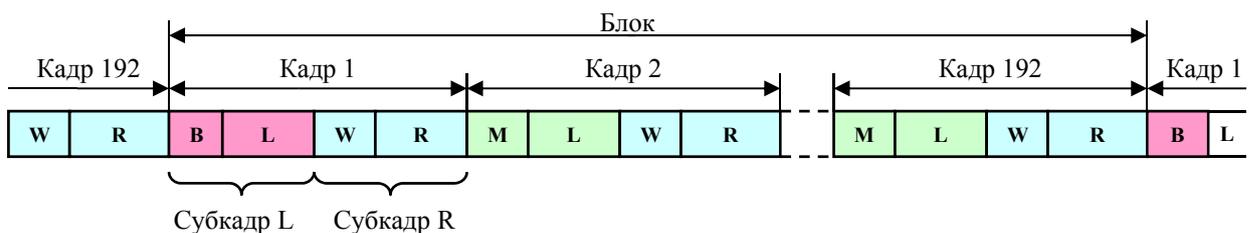


Рис. 1.2. Структура блока интерфейса AES/EBU

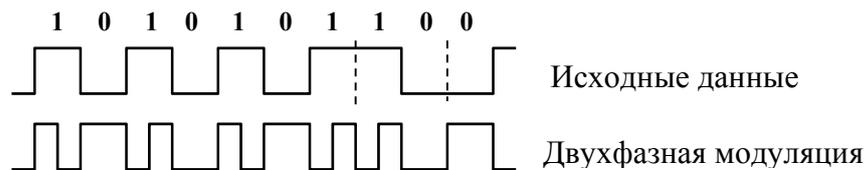


Рис. 1.3. Двухфазная модуляция по методу Vi-ф-М

Для передачи отсчета в субкадре зарезервировано 20 разрядов, если используются 16 разрядов, первые 4 разряда (самые младшие) заполняются

«нулями». Если используются 24 разряда, самые младшие разряды записываются в **зоне дополнительных данных AUX**, расположенной между основными данными и синхрогруппой.

**Синхрогруппа**, расположенная в начале каждого субкадра и занимающая первые четыре разряда, имеет три различные конфигурации. Одна из них **В** обозначает начало субкадра L первого кадра блока, другая **М** – начало любого другого субкадра L внутри блока. Третья форма **W** обозначает начало субкадра R – независимо от его положения в блоке (рис. 1.2 и 1.4).

Для того чтобы синхрогруппу можно было легко опознать, в её конфигурации присутствуют не встречающиеся в потоке данных элементы – интервалы между изменениями уровня (перепадами) в полтора такта и отсутствие обязательного перепада на границе двух тактов.

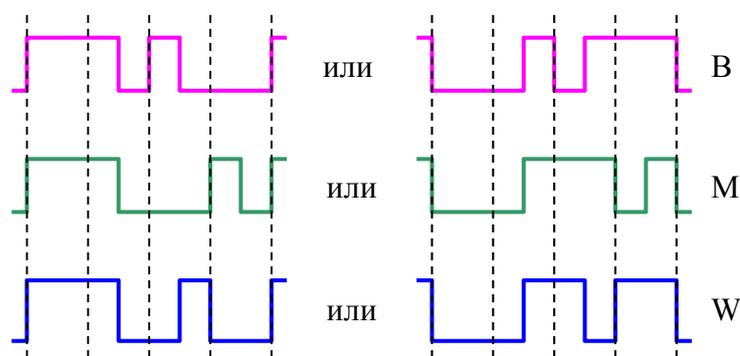


Рис. 1.4. Различные конфигурации синхрогрупп:

В – канал L в начале блока, М – канал L внутри блока, W – канал R

В каждом субкадре, кроме синхрогруппы, имеются еще четыре вспомогательных разряда – V, U, C и P.

Разряд **V (Validity)** является указателем достоверности отсчета, значение которого содержится в основных данных субкадра. Достоверной в данном случае считается отсчет, не являющийся результатом маскирования (интерполяции, приглушения и т.д.). Если отсчет достоверен, то  $V = 0$ .

Разряд **U (User data)** – это разряд пользователя. Рекомендации по заполнению битов пользователя изложены в стандарте AES18-1992, а также в техническом документе EBU 3250 [7].

Разряд **C (Channel status data)** характеризует состояние каждого из двух каналов L и R и содержит в себе информацию о типе передаваемых по каналу данных. Каждые 192 разряда, содержащиеся в субкадрах, соответствующих одному из каналов L и R одного блока, делятся на 24 байта, которые описывают состояние рассматриваемого канала. Общая структура блока, характеризующего состояние канала, показана на рис. 1.5.

Разряд **P (Parity bit)** – это бит четности. Его значение выбирается таким, чтобы общее число «единиц» в значащей части субкадра (без синхрогруппы) было четным. С его помощью можно обнаружить наличие нечетного числа ошибок в субкадре.

Байт	0	1	2	3	4	5	6	7	Бит
0	Pro=1	Audio	Emphasis		Lock	$f_s$			7
1	Channel mode			User bit management					15
2	AUX		Word length			Резерв			23
3	Описание многоканального режима								31
4	DAR signal		Резерв						39
5	Резерв								47
6	Буквенно-цифровой код источника данных в формате ASCII								55
7									
8									
9									
10	Буквенно-цифровой код в формате ASCII, характеризующий предназначение данных								87
11									
12									
13									
14	Код адреса локальной выборки звукового сигнала (32-разрядный двоичный)								119
15									
16									
17									
18	Код времени дня (32-разрядный двоичный)								151
19									
20									
21									
22	Резерв			Reliability flags					183
23	CRCC								191

Рис. 1.5. Спецификация 24 байт блока статуса канала в интерфейсе AES3

Рассмотрим более подробно значение битов и байт блока статуса канала.

Байт 0 блока статуса канала содержит информацию, которая, прежде всего, идентифицирует данные, как данные, предназначенные для профессионального использования (бит 0 – Pro=1), а также характеризует их содержание – звуковые или незвуковые (бит 1 – Audio) (табл. 1). Кроме того, здесь содержится информация об использовании имфазиса (биты 2, 3, 4 – Emphasis), о частоте дискретизации звукового сигнала (биты 6,7 –  $f_s$ ) и о наличии внешней синхронизации (бит 5 – Lock).

Содержание 0-го байта блока статуса канала

<b>Бит 0 – Pro=1</b>
0 – использование блока статуса канала в потребительской сфере 1 – использование блока статуса канала в профессиональной сфере
<b>Бит 1 – Audio</b>
0 – цифровые звуковые данные 1 – данные, не являющиеся звуковыми
<b>Биты 2, 3, 4 – Emphasis (информация о наличии имфазиса)</b>
000 – информация об использовании имфазиса отсутствует 100 – имфазис не используется 110 – имфазис с характеристикой 50/15 мкс* 111 – имфазис с характеристикой ССИТТ J.17**
<b>Бит 5 – Lock</b>
0 – петля автоматического слежения по частоте дискретизации замкнута 1 – петля автоматического слежения по частоте дискретизации разомкнута
<b>Биты 6, 7 – <math>f_s</math> (информация о частоте дискретизации)</b>
00 – информация о частоте дискретизации отсутствует 01 – частота дискретизации 48 кГц 10 – частота дискретизации 44,1 кГц 11 – частота дискретизации 32 кГц

\*Имфазис с характеристикой 50/15 мкс наиболее распространен и используется, к примеру, в формате CD. Характеристика преимфазиса такого типа показана на рис. 1.6.

\*\*ССИТТ – **International Telegraph and Telephone Consultative Committee** (Международный консультативный комитет по телеграфной и телефонной связи). Характеристика преимфазиса в соответствии с рекомендациями ССИТТ представлена на рис. 1.7.

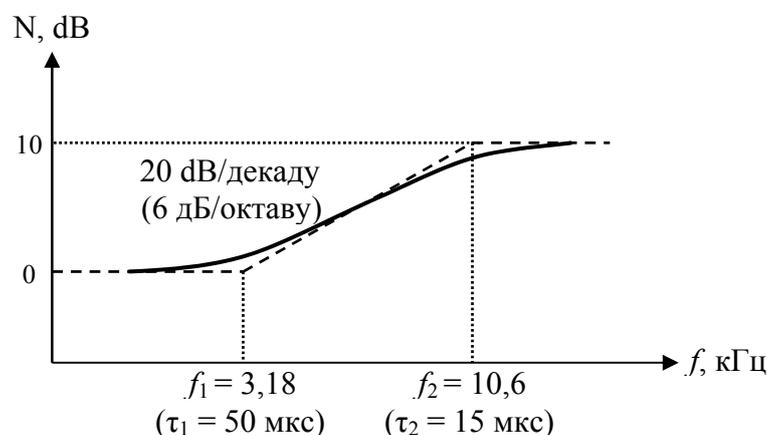


Рис. 1.6. Характеристика преимфазиса 50/15

### Вносимое затухание

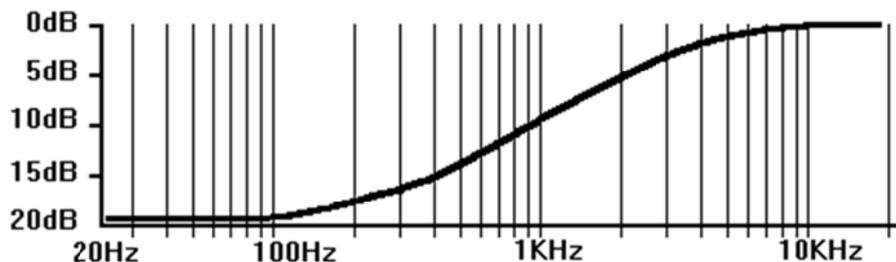


Рис. 1.7. Характеристика преимфазиса, соответствующего рекомендациям ССІТТ

Байт 1 характеризует режим передачи звукового сигнала: одноканальный монофонический, два отдельных канала, двухканальный стереофонический или многоканальный (биты 0, 1, 2, 3 – Channel mode), а также способ формирования бит пользователя (биты 4, 5, 6, 7 – User bit management) (табл. 1.2).

Таблица 1.2

#### Содержание 1-го байта блока статуса канала

<b>Биты 0, 1, 2, 3 – информация о режиме кодирования канала</b>
0000 – информация отсутствует
0001 – двухканальный
0010 – одноканальный
0011 – первичный/вторичный
0100 – стереофонический
0101 – резерв
0110 – резерв
0111 – одноканальный при удвоенной частоте дискретизации
1000 – одноканальный при удвоенной частоте дискретизации
1001 – одноканальный при удвоенной частоте дискретизации
1111 – многоканальный режим
<b>Биты 4, 5, 6, 7 – форма заполнения бит пользователя</b>
0000 – биты пользователя отсутствуют
0001 – блок из 192 битов
0010 – заполнение в соответствии с рекомендациями AES18
0011 – заполнение определено пользователем

Байт 2 оговаривает максимальную длину отсчета звукового сигнала (биты 0, 1, 2 – AUX) и число реально используемых битов (биты 3, 4, 5 – Word length). Биты 6 и 7 – резервные (табл. 1.3).

Таблица 1.3

## Содержание 2-го байта блока статуса канала

<b>Биты 0, 1, 2 – максимальное количество бит на отсчет</b>		
000	– максимум 20 битов	
001	– максимум 24 бита	
010	– максимум 20 битов (одноразовое согласование)	
011	– резерв	
<b>Биты 3, 4, 5 – кол-во битов (длина отсчета 24 бита) (длина отсчета 20 битов)</b>		
000	нет информации	нет информации
001	23 бита	19 битов
010	22 бита	18 битов
011	21 бит	17 битов
100	20 битов	16 битов
101	24 бита	20 битов
<b>Биты 6,7 – резерв</b>		

Байт 3 зарезервирован для использования в режиме передачи многоканального звукового сигнала.

Байт 4, так же как и байт 3, предназначен для использования в многоканальном режиме передачи звукового сигнала. Биты 0 и 1 характеризуют точность поддержания внешнего сигнала синхронизации: Grade 1 ( $\pm 1$  ppm) и Grade 2 ( $\pm 10$  ppm). Биты 3,4,5 и 6 указывают на использование одной из альтернативных частот дискретизации, кратных либо  $f_s = 44,1$  кГц (22,05, 88,2 и 176,4 кГц), либо  $f_s = 48$  кГц (24, 96 и 192 кГц) (табл. 1.4).

Байт 5 является резервным и рассчитан на возможность использования в будущем для передачи каких-либо дополнительных данных.

Байты с 6 по 9 содержат буквенно-цифровой код в формате ASCII\*, характеризующий источник данных, передаваемых по этому каналу.

\*ASCII (*American Standard Code for Information Interchange* – американский стандартный код для обмена информацией) – представляет собой 7-битный код, предназначенный для отображения десятичных цифр, букв латинского и национального алфавитов, знаков препинания и управляющих символов. В компьютерах обычно используют 8-битное расширение ASCII.

Байты с 10 по 13 содержат буквенно-цифровой код в формате ASCII, характеризующий предназначение данных, передаваемых по этому каналу.

Байты с 14 по 17 определяют адрес локальной выборки звукового сигнала.

Байты с 18 по 21 отражают текущее время дня с точностью до периода следования блоков статуса канала. При частоте дискретизации 48 кГц период следования блоков составит 4 мс. Этот код времени может быть использован для синхронизации по кадрам сопутствующего передаваемым звуковым данным видеоизображения.

Таблица 1.4

## Содержание 4-го байта блока статуса канала

<b>Биты 0,1 – опорный сигнал (AES11)</b>
00 – отсутствует
01 – уровень точности 1 (Grade 1)
10 – уровень точности 2 (Grade 2)
11 – резерв
<b>Бит 2 – резерв</b>
<b>Биты 3,4,5,6 – частота дискретизации</b>
0000 – не указана
1000 – 24 кГц
0100 – 96 кГц
1100 – 192 кГц
0010 – резерв
1010 – резерв
0110 – резерв
1110 – резерв
0001 – резерв
1001 – 22,05 кГц
0101 – 88,2 кГц
1101 – 176,4 кГц
0011 – резерв
1011 – резерв
0111 – резерв
1111 – определяется пользователем
<b>Бит 7 – наличие указателя частоты дискретизации</b>
0 – нет указателя
1 – указатель присутствует

Байт 22 содержит информацию о достоверности данных блока статуса канала (биты 4, 5, 6, 7 – Reliability flags). Биты 1, 2, 3 и 4 этого байта – резервные.

Последний 23 байт представляет собой остаток от побитного деления всех предшествующих битов блока статуса канала на порождающий многочлен  $g(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$  кода CRCC (Cyclic Redundancy Check Code), обеспечивающий возможность обнаружения ошибок в данных блока.

Один из возможных вариантов реализации схемы деления битов блока статуса канала на порождающий многочлен кода CRCC, построенной на основе регистра сдвига с обратными связями, показан на рис. 1.8.

Регистр сдвига выполнен на D-триггерах и элементах ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ, выполняющих операцию сложения по модулю 2. Биты блока статуса канала подаются на вход регистра и одновременно на выход устройства. После того, как последний бит данных записан в регистр, из него выводится полученный в результате деления 8-разрядный остаток.

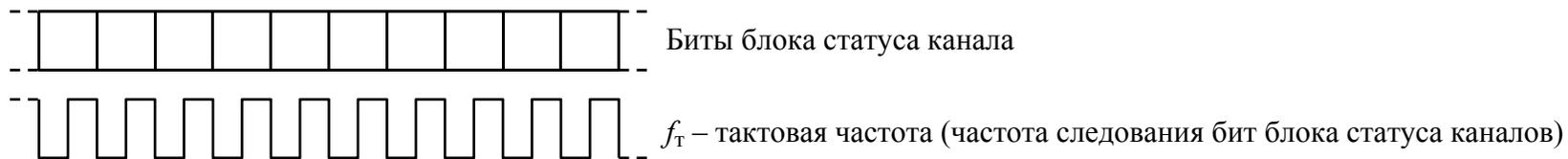
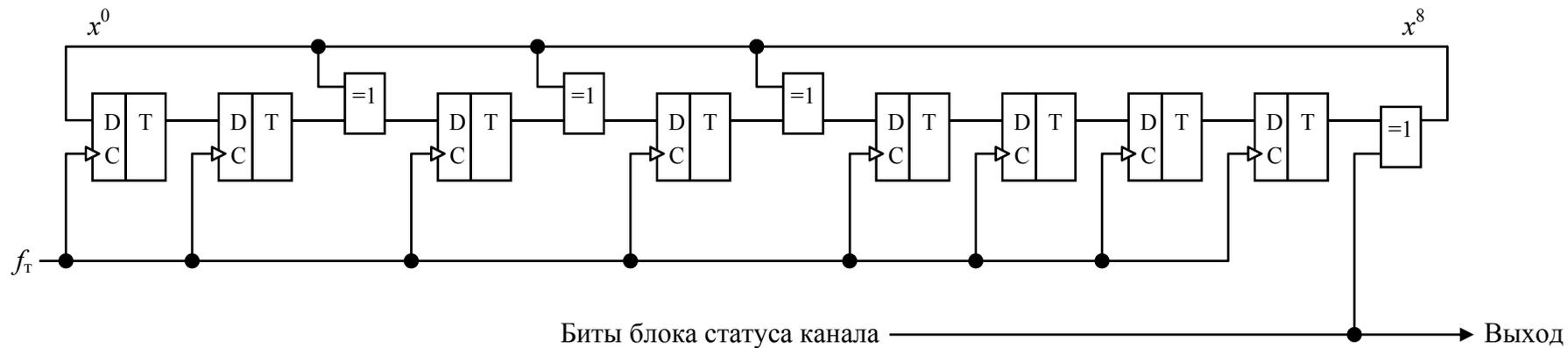


Рис. 1.8. Схема вычисления остатка от деления битов блока статуса канала на порождающий многочлен  $g(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$  кода CRCC и временные диаграммы, поясняющие ее работу

Стандарт AES3 определяет три уровня заполнения блока статуса канала, использование которых определяется характером данных, передаваемых от источника программ к приемному устройству: минимальный, стандартный и расширенный.

При использовании *минимального уровня* первый бит блока статуса канала (бит 0 в 0-м байте) устанавливается в «1», что указывает на профессиональный статус передаваемых данных, а все остальные биты блока устанавливаются в «0».

При использовании *стандартного уровня* информацию должны содержать байты 0, 1, 2 (частота дискретизации, использование преимфазиса, характер звукового сигнала – моно, стерео и пр., число разрядов квантования и т.п.) и байт 23, который содержит данные CRCC. Этот уровень используется наиболее часто.

*Расширенный уровень* предполагает использование всех битов блока статуса канала.

Как отмечалось ранее, звуковые данные, передаваемые через интерфейс AES3, могут иметь разрешение до 24 бит на отсчет. Однако в большинстве случаев разрядность отсчетов звукового сигнала не превышает 20. Четыре оставшихся бита, обозначенные на рис. 1 как AUX, могут в этом случае использоваться для передачи двух дополнительных речевых каналов, сопровождающих основные звуковые данные. Частота дискретизации в этих дополнительных каналах будет составлять 1/3 от основной частоты дискретизации, а разрядность отсчетов – 12 битов. Другими словами, каждый 12-разрядный отсчет дополнительного канала будет распределяться между тремя последовательными субкадрами соответствующего основного канала – по 4 бита в каждом субкадре.

Очевидно, что частота  $f_T$  следования битов данных по интерфейсу будет в 32 раза выше удвоенной частоты дискретизации  $f_s$  передаваемого сигнала:

$$f_T = 32 \times 2 f_s.$$

Для проигрывателя компакт-дисков и DAT-магнитофона в режиме работы с частотой дискретизации 44,1 кГц,

$$f_T = 32 \times 2 \times 44,1 \text{ кГц} = 2822,4 \text{ кГц} = 2,822 \text{ МГц}.$$

Если частота дискретизации DAT-магнитофона 48 кГц,

$$f_T = 32 \times 2 \times 48 \text{ кГц} = 3072 \text{ кГц} = 3,072 \text{ МГц}.$$

Если частота дискретизации 96 кГц,  $f_T = 6,144 \text{ МГц}$ ,

а если 192 кГц,  $f_T = 12,288 \text{ МГц}$ .

Для источников с частотой дискретизации 32 кГц

$$f_T = 32 \times 2 \times 32 \text{ кГц} = 2048 \text{ кГц} = 2,048 \text{ МГц}.$$

## 1.2. Электрические характеристики

Непосредственное соединение цифровой аппаратуры в AES3 осуществляется с помощью специальных соединителей. Соединители могут быть как электрическими (коаксиальными), так и оптическими.

Электрические характеристики соединителей интерфейса частично совместимы с RS-422. Дифференциальное напряжение на выходе передающего модуля должно быть в пределах от 2 до 2,7 В, фронты импульсов от 5 до 30 нс, фазовое дрожание (джиттер) не должно превышать 4 нс. В профессиональной технике всегда используется симметричная балансная линия (то есть сигнал передается одновременно по двум проводам и в противофазе) в виде витой пары с трехконтактными соединителями XLR, использовавшимися еще в аналоговой технике (рис. 1.9). Источник сигнала и приемник должны быть оснащены соответственно выходным и входным симметрирующими трансформаторами, и обязательно иметь идентичные выходное и входное сопротивления, составляющее  $110 \text{ Ом} \pm 20\%$  на частотах от 100 кГц до  $128 f_{к, \max}$  ( $f_{к}$  – частота следования кадров).

Передача по кабелю, имеющему волновое сопротивление  $110 \text{ Ом} \pm 20\%$  на частотах от 100 кГц до  $128 f_{к, \max}$ , возможна на расстояние до 500 м без коррекции и до 1000 м с коррекцией. По обычному кабелю – на 70 м без коррекции и до 250 м с коррекцией. Эксплуатация интерфейса без оконечной нагрузки  $110 \text{ Ом}$  недопустима из-за значительного влияния отраженной волны. Схема соединения с применением витой пары приведена на рис. 1.10.



Рис. 1.9. Соединитель типа XLR

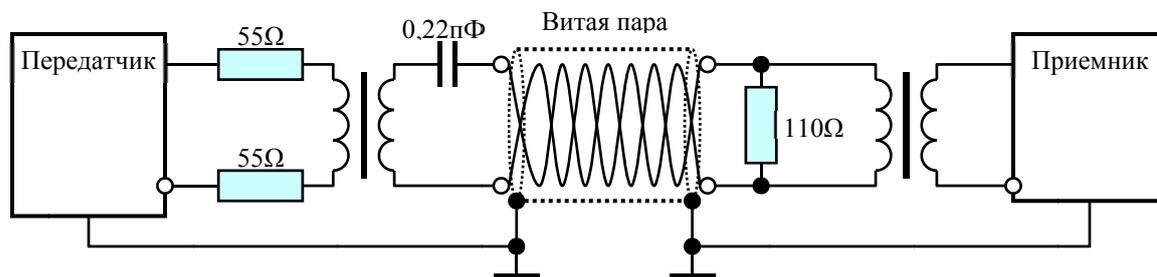


Рис. 1.10. Схема коммутации с помощью витой пары, рекомендуемая стандартом AES3

Несколько позже был стандартизован коаксиальный вариант интерфейса AES3 – AES3ID, допускающий передачу данных по высококачественному коаксиальному кабелю на расстояние до 1 км с использованием соединителей типа BNC (рис. 1.11). При этом выходное напряжение передатчика должно составлять  $1 \pm 0,1$  В на нагрузке 75 Ом. Характеристики, сходные с аналоговым видеосигналом (размах 1 В, полоса частот около 6 МГц), позволяют передавать этот сигнал по имеющимся аналоговым студийным видеотрактам с их корректирующими усилителями и коммутаторами (рис. 1.12).



Рис. 1.11. Соединитель типа BNC

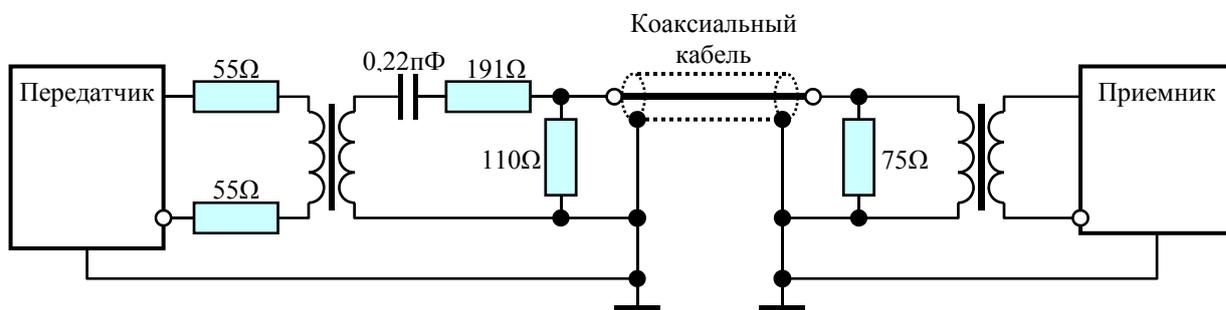


Рис. 1.12. Схема коммутации с помощью коаксиального кабеля, рекомендуемая стандартом AES3ID

## 2. S/PDIF

Потребительским аналогом профессионального интерфейса AES3 является **S/PDIF (Sony/Philips Digital Interface Format)**, похожий на AES3, но имеющий несколько иные и электрические характеристики, и формат незвуковых данных [8].

Так же, как и AES3, S/PDIF имеет аналоги, утвержденные другими международными органами по стандартизации. Например, Международная электротехническая комиссия **IEC (International Electrotechnical Commission)** утвердила очень похожий на S/PDIF формат **IEC-60958 (type II)**. Если вспомнить про AES3, то у него аналогом является тот же IEC-60958, но type I. До 1998 года IEC-60958 именовался IEC-958. Японский аналог формата AES3 – EIAJ CP-340 (type I) также имеет потребительский вариант (аналог S/PDIF) с тем же номером: EIAJ CP-340 (type II).

Благодаря схожести характеристик AES3 и S/PDIF, в некоторых случаях профессиональная и потребительская аппаратура могут соединяться напрямую. Однако без точного знания технических особенностей используемой аппаратуры выполнять такие соединения не рекомендуется, поскольку имеет место существенная разница в электрических характеристиках AES3 и S/PDIF, и, кроме того, у них разный формат блока статуса канала. Результат соединения может быть непредсказуемым. Аппаратура, адаптированная к работе с обоими форматами, должна интерпретировать информацию, содержащуюся в блоке статуса канала, руководствуясь значением первого («нулевого») бита первого («нулевого») байта этого блока: «1» – профессиональный формат; «0» – потребительский формат.

### 2.1. Формат данных

Итак, как уже упоминалось выше, формат данных S/PDIF (структура субкадра, кадра, блока) полностью совпадает с форматом данных AES3.

Отличие состоит только в значениях битов и байт блока статуса канала (рис. 2.1).

В формате S/PDIF, в отличие от AES3, определены только первые четыре байта блока.

Бит 0 **байта 0** (Pro=0) в формате S/PDIF всегда имеет значение «0», что указывает на потребительское назначение данных, передаваемых через интерфейс (табл. 2.1). Бит 1 (Audio) определяет характер данных как звуковые «0» или незвуковые «1». Бит 2 (Copy) определяет возможность копирования передаваемых данных: «0» - копирование запрещено, «1» – копирование разрешено. Биты 3,4,5 (Emphasis) в том случае, когда данные являются звуковыми, указывают на наличие «100» или отсутствие «000» преэмфазиса. Биты 6, 7, определяющие режим передачи, всегда имеют значение «00».

Байт	0	1	2	3	4	5	6	7	Бит
0	Pro=0	Audio	Copy	Emphasis			Mode		7
1	Category code							L	15
2	Source number				Channel number				23
3	$f_s$				Clock accuracy		Резерв		31
4	Резерв								39
...									...
23									191

Рис. 2.1. Спецификация 24 байт блока статуса канала в интерфейсе S/PDIF

Таблица 2.1

Содержание 0-го байта блока статуса канала

<b>Бит 0 Pro=0 (потребительские данные)</b>	
0	Блок статуса канала соответствует потребителскому формату
1	Блок статуса канала соответствует профессиональному формату
<b>Бит 1 Audio</b>	
0	Цифровые звуковые данные
1	Незвуковые данные
<b>Бит 2 Copy/copyright (возможность копирования)</b>	
0	Копирование запрещено/авторские права защищены
1	Копирование возможно/авторские права не защищены
<b>Биты 3, 4, 5 Emphasis – если бит 1=0 (цифровые звуковые данные)</b>	
000	Отсутствует – 2-канальный звуковой сигнал
100	50/15 мкс – 2-канальный звуковой сигнал
010	Резерв – 2-канальный звуковой сигнал
110	Резерв – 2-канальный звуковой сигнал
xx1	Резерв – 4-канальный звуковой сигнал
<b>Биты 3, 4, 5 – если бит 1 = 1 (незвуковые данные)</b>	
000	Цифровые данные
xxx	Все другие состояния битов 3, 4, 5 (резерв)
<b>Биты 6, 7 Mode (Режим)</b>	
00	Режим 9 (определяется байтами 13)
xx	Все другие состояния битов 6, 7 (резерв)

Если рекордер, имеющий вход интерфейса S/PDIF, подключен к источнику сигнала в формате AES3, его декодер может интерпретировать индикатор преимфазиса профессионального интерфейса (бит 2 байта 0) как инструкцию к запрету копирования и блокировать функцию записи рекордера.

В аналогичных обстоятельствах, когда источником сигнала является аппарат с выходом в формате S/PDIF, а приемником – профессиональный рекордер с входом в формате AES3, профессиональный рекордер может правильно идентифицировать данные как потребительские, анализируя бит 0 (который в данном случае будет иметь значение «0»), но ошибиться в интерпретации бита запрета копирования (бит 2), истолковав его как признак того, что информация о наличии имфазиса отсутствует. Таким образом, следует обращать особое внимание на то, какой именно тип интерфейса используется в объединяемой посредством интерфейса аппаратуре.

Биты 0–6 **байта 1** (Category code) представляют собой код категории источника, т.е. указывают на тип оборудования, которое является источником передаваемых данных (табл. 2.1.2). В режиме 00 таким оборудованием могут служить проигрыватели CD, DVD, MiniDisc, DAT-рекордеры, синтезаторы, преобразователи частоты дискретизации, цифровые тюнеры и т.п. Бит 7 байта 1 (L) указывает на статус источника, т.е. на то, являются ли передаваемые данные оригиналом или копией.

Первые три бита (0,1,2) из семи бит кода категории источника определяют класс оборудования, которое служит источником звукового сигнала, а последние четыре (3, 4, 5 и 6) – конкретный его тип внутри этого класса.

Например, если три первых бита имеют значение 001, оборудование принадлежит к классу приемников сигналов цифрового звукового вещания (табл. 2.2.1). Последние четыре бита кода категории источника указывают на систему радиовещания, в которой функционирует приемное оборудование: европейская (1000), американская (0011), японская (0000) и пр.

Таблица 2.2

## Содержание 1-го байта блока статуса канала

<b>Биты 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 – Category code (код категории источника)</b>		
Биты 0,1,2,3	Биты 4,5,6	
0000	000	Общая
	001	Экспериментальная
	xxx	Резерв
0001	xxx	Твердотельная память
001x	xxx	Приемник цифрового радиовещания
010x	xxx	Преобразователь частоты дискретизации
0110	0xx	Ц/А-преобразователь без копирайта
	1xx	Ц/А-преобразователь с копирайтом
0111	xxx	Приемник цифрового радиовещания
100x	xxx	Оптические (лазерные) дисковые носители
101x	xxx	Муз. инструменты, микшеры и т.д.
110x	xxx	Магнитные ленточные и дисковые носители
111x	xxx	Резерв
<b>Бит 7 – L (статус источника)</b>		
	<b>Только для кодов категории: 001xxxx, 0111xxx, 100xxxx</b>	
0	Оригинал или предварительно записанные данные	
1	Нет указаний или копия от 1-й и выше	
<b>Все другие коды категории</b>		
0	Нет указаний или копия от 1-й и выше	
1	Оригинал или предварительно записанные данные	

Таблица 2.2.1

## Типы оборудования, принадлежащие к категории 001

Биты 3,4,5,6	Приемники сигналов цифрового звукового вещания
0000	Японская система радиовещания
0011	Американская система радиовещания
1000	Европейская система радиовещания
0001	Электронные системы доставки программ (интернет)
xxxx	Прочие состояния битов 3–7 (резерв)

Оптические лазерные носители в формате S/PDIF отнесены к категории 100 (табл. 2.2.2). Тем самым одновременно определяется и структура субкадра – 16 битов на отсчет и частота дискретизации 44,1 кГц. При этом содержимое служебного канала Q компакт-диска побитно (один бит за один кадр данных в формате CD) переносится в канал U (биты пользователя) интерфейса S/PDIF. Содержимое канала P компакт-диска, который ис-

пользуется как индикатор музыка/пауза, в канал U интерфейса S/PDIF не передается. Начало данных субкода обозначается последовательностью, состоящей как минимум из 16 «нулей», следующих за стартовым битом высокого уровня. После этого следуют 7 битов субкода (каналы Q–W).

Таблица 2.2.2

Типы оборудования, принадлежащие к категории 100

Биты 3,4,5,6	Оптические лазерные носители
0000	CD, совместимые с IEC-908 (CD-Audio)
1000	CD, несовместимые с IEC-908 (прочие разновидности CD)
1001	MD – MiniDisc
xxxx	Прочие состояния битов 3–7 (резерв)

К категории 101 относятся микшеры, электронные музыкальные инструменты (синтезаторы) и микрофоны (табл. 2.2.3).

Таблица 2.2.3

Типы оборудования, принадлежащие к категории 101

Биты 3,4,5,6	Музыкальные инструменты, микшеры и т.п.
0000	Синтезаторы
1000	Микрофоны
xxxx	Прочие состояния битов 3–7 (резерв)

Категория 010 включает в себя устройства перекодирования цифрового звукового сигнала, связанного с преобразованием частоты дискретизации, и процессоры цифровой обработки сигнала (табл. 2.2.4).

Устройства цифровой магнитной записи относятся к категории 110 (табл. 2.2.5). Структура субкадра интерфейса S/PDIF при этом определяется следующим образом. Длина слова звуковых данных принимается, равной 24 битам. Однако для передачи самого 16-разрядного звукового отсчета используются биты с 12-го по 27-й (младший разряд – первый), а биты с 4 по 11 используются для передачи байта данных субкода. Кроме того, для обеспечения возможности редактирования данных может передаваться и синхронизирующая информация.

Таблица 2.2.4

Типы оборудования, принадлежащие к категории 010

Биты 3,4,5,6	Цифровые преобразователи звукового сигнала
0000	ИКМ-кодеры/декодеры
0010	АЦП, цифровые звуковые семплы
0100	Микшеры цифрового звукового сигнала
1100	Преобразователи частоты дискретизации
xxxx	Прочие состояния битов 3–7 (резерв)

Таблица 2.2.5

Типы оборудования, принадлежащие к категории 110

Биты 3,4,5,6	Устройства цифровой магнитной записи
0000	DAT
1000	Видеомагнитофоны с ИКМ-адаптером
xxxx	Прочие состояния битов 3–7 (резерв)

**Байт 2** блока статуса канала определяет номер источника программ (биты 0, 1, 2, 3 – Source number) и номер канала (биты 4, 5, 6, 7 – Channel number) (табл. 2.3).

Таблица 2.3

Содержание 2-го байта блока статуса канала

Биты 0,1,2,3 Source number (номер источника)	
0000	Не определен
1000	1
0100	2
1100	3
0010	4
0111	14 (0-й бит – младший, 3-й – старший)
1111	15
Биты 4,5,6,7 Channel number (номер канала)	
0000	Не определен
1000	A (левый в 2-канальном формате)
0100	B (правый в 2-канальном формате)
1100	C
0111	N (4-й бит – младший, 7-й – старший)
1111	O

**Байт 3** блока статуса канала определяет частоту дискретизации (биты 0,1,2,3 –  $f_s$ ) и точность поддержания тактовой частоты (биты 4, 5, 6, 7 – Clock accuracy) (табл. 2.4).

Таблица 2.4

Содержание 3-го байта блока статуса канала

<b>Биты 0,1,2,3 – <math>f_s</math> (частота дискретизации)</b>	
0000	44,1 кГц
0100	48 кГц
1100	32 кГц
1100	Преобразователь частоты дискретизации
xxxx	Прочие состояния бит 0-3 – в резерве
<b>Биты 4, 5 Clock accuracy (точность синхронизации)</b>	
00	Уровень II, $\pm 1000$ ppm (низкая точность)
01	Уровень III, изменение высоты тона
10	Уровень I, $\pm 50$ ppm (высокая точность)
11	Резерв
<b>Биты 6,7</b>	
xx	Резерв

## 2.2. Соединительные линии интерфейса S/PDIF

Потребительский интерфейс в отличие от профессионального не требует балансной линии с низким импедансом. Для выполнения соединений хорошо подходит самый обычный коаксиальный телевизионный кабель с волновым сопротивлением 75 Ом, однако максимально допустимая длина кабеля – не более 10 м.

Электрические сигналы формата S/PDIF имеют существенно меньшую величину, в сравнении с форматом AES3, и в размахе составляют всего 0,4–0,5 В без постоянной составляющей.

Передающий и приемный модули должны иметь трансформаторную развязку. При этом выходное и входное сопротивления источника и приемника сигналов должно составлять 75 Ом в отличие от аналогичных схем в формате AES3, где эти величины составляют 110 Ом.

Для передачи сигнала в формате S/PDIF могут использоваться оптические соединительные линии Toslink, при этом длина пластикового волокна кабеля может достигать 15 м. При использовании оптических кабелей с кварцевым волокном длина соединения может достигать 1 км.

### 3. AES10 (MADI)

Интерфейс AES10 или MADI (Multichannel Audio Digital Interface) является многоканальным расширением своего предшественника – двухканального интерфейса AES3 и предназначен для последовательной передачи 32, 56 или 64 каналов цифровых звуковых данных, представленных в линейном коде с частотой дискретизации в диапазоне от 32 до 96 кГц и имеющих разрешение до 24 бит на канал. Кроме того, интерфейс может быть адаптирован для передачи звуковых данных с разрешением 28 битов на канал.

Интерфейс MADI впервые был принят в 1991 году (AES10–1991). Спустя некоторое время он был доработан, и в 2003 году была утверждена его новая версия – AES10-2003. Последняя редакция стандарта на этот интерфейс была утверждена в 2008 году [9].

В отличие от интерфейса AES3, где обеспечивается самосинхронизация формируемого потока данных, интерфейс MADI требует использования внешнего сигнала синхронизации, который формируется в соответствии с рекомендациями стандарта AES11 [10].

#### 3.1 Организация потока данных, передаваемых через интерфейс

Передаваемые через интерфейс данные организованы в **кадры**, каждый из которых содержит  $N$  32-разрядных **субкадров** (каналов), эквивалентных субкадрам формата AES3. Каждый субкадр MADI, так же, как и субкадр AES3, содержит  $n$ -й отсчет соответствующего канала и дополнительные служебные символы. Нумерация каналов начинается с 0 до  $N-1$  (рис. 3.1). На рис. 3.1 показана структура кадра для частоты дискретизации 48 кГц и 56 каналов передачи (номера отсчетов в одном и том же кадре совпадают).

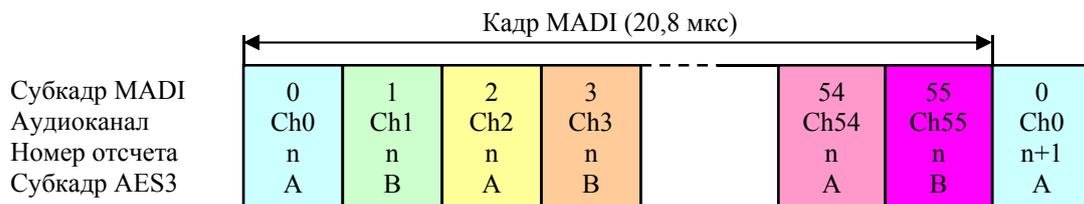


Рис. 3.1. Структура кадра MADI для частоты дискретизации 48 кГц и 56 каналов передачи звуковых данных

На рис. 3.2 и 3.3 показаны варианты формирования кадра для частоты дискретизации 48 кГц и 28 каналов передачи звуковых данных.

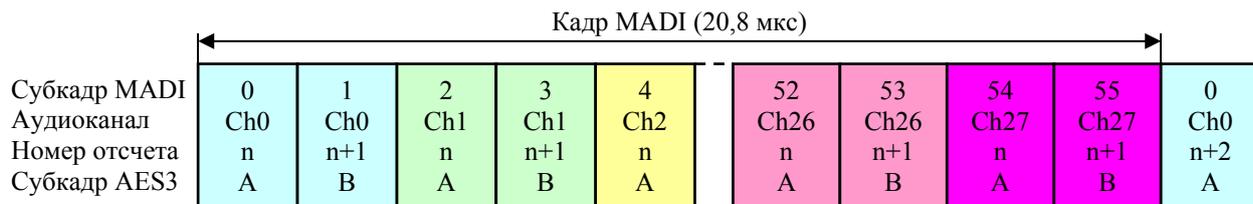


Рис. 3.2. Структура кадра MAD1 для частоты дискретизации 96 кГц и 28 каналов передачи звуковых данных (вариант 1)

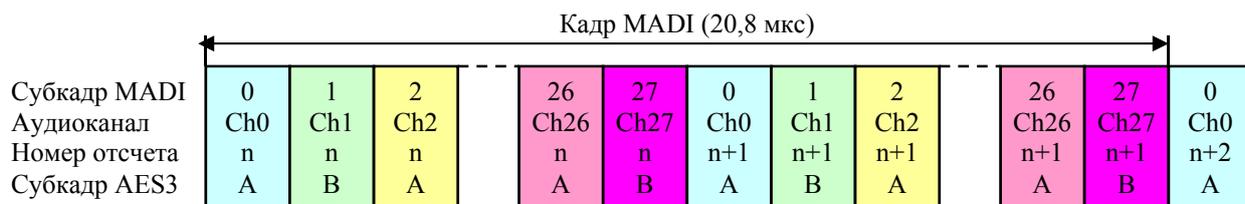


Рис. 3.3. Структура кадра MAD1 для частоты дискретизации 96 кГц и 28 каналов передачи звуковых данных (вариант 2)

### 3.2. Формат субкадра

Каждый каналный субкадр интерфейса по стандарту MAD1, так же, как субкадр интерфейса по стандарту AES3, состоит из 32 битов (рис. 3.4).

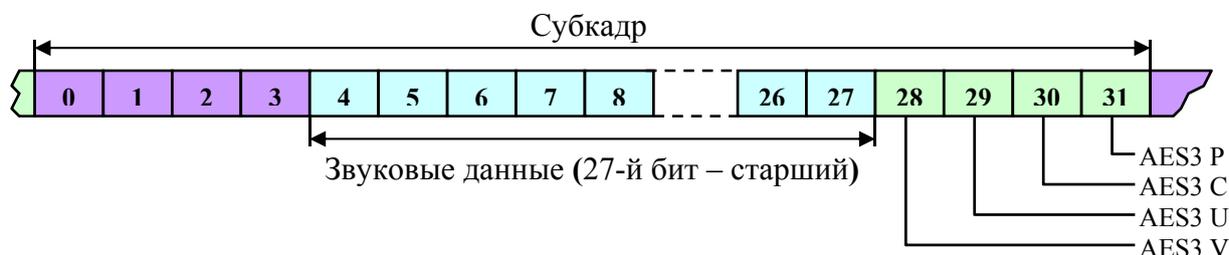


Рис. 3.4. Формат данных субкадра

Звуковые (или иные) данные, представленные в двоичном дополнительном коде, располагаются в промежутке с 4 по 27-й разряды (27-й бит – старший). Если разрядность отсчета меньше 24 битов, то все незначащие биты равны 0. Незначащие биты располагаются в младших разрядах отсчета. Например, если используются 20-разрядные отсчеты, то значащие биты располагаются с 27-го по 8-й разряд включительно (27-й разряд – старший), а биты с 7-го по 4-й – нули. Если данный канал не используется вовсе, то все разряды звуковых данных равны нулю.

Используемые (активные) каналы всегда располагаются в начале кадра MAD1, а неактивные – на его последних позициях.

Разряды с 28-го по 31-й – это разряды V, U, C и P, которые имеют то же самое значение, что и в стандарте AES3.

**Разряд V (validity)** – указатель достоверности отсчета: равен 0, если отсчет не является результатом маскирования (интерполяции, приглушения и пр.), и равен 1 в противном случае.

**Разряд U (user)** – разряд пользователя.

**Разряд C (channel)** – характеризует состояние канала.

**Разряд P (parity)** – дополняет количество «единиц» в разрядах с 30-го по 4-й включительно до четного числа. Если число «единиц» в этих разрядах четно – он равен «0», если нечетно – «1».

**Первый (0-й)** разряд субкадра MADI – разряд синхронизации, являющийся «1» для первого (0-го) субкадра MADI в кадре MADI, и «0» – для всех остальных субкадров.

**Второй (1-й)** разряд субкадра MADI – идентификатор активности данного канала. Если канал активен – этот разряд имеет значение «1», если не активен – «0».

**Третий (2-й)** разряд субкадра MADI – идентификатор канала (субкадра) A/B в формате AES3. Для канала A этот разряд имеет значение «0», для канала B – «1».

**Четвертый (3-й)** разряд субкадра MADI – идентификатор начала блока в формате AES3, имеющий значение «1», – это первый субкадр блока в формате AES3. Для всех остальных субкадров блока AES3 этот разряд имеет значение «0».

### 3.3. Формат передачи данных по каналу

Перед передачей данных по каналу они кодируются каналным кодом, известным как **4B5B**. Для этого все 32 бита субкадра (канала) разбиваются на восемь 4-разрядных слов (табл. 3.1). Каждое 4-разрядное слово перекодируется в 5-разрядное в соответствии с табл. 3.2. Полученные 5-разрядные слова передаются слева направо, как указано в табл. 3.3, образуя последовательность (рис. 3.5).

Скорость потока исходных данных, передаваемых по интерфейсу, должна поддерживаться вблизи 100 Мбит/с, но не превышать этого значения. Соответственно скорость потока каналных битов после выполнения операции кодирования кодом 4B5B должна быть вблизи 125 Мбит/с. Частоты дискретизации и разрядность квантования звукового сигнала в разных случаях отличаются друг от друга, поэтому выполнить это требование напрямую довольно затруднительно.

Следовательно, для обеспечения требуемой скорости потока данных на выходе передатчика, а также для поддержания синхронной работы передатчика и приемника информации, в поток данных вставляется необходи-

мое число синхрогрупп, не несущих никакой смысловой информации, которые легко может распознать декодер канального кода 4B5B.

Таблица 3.1  
Образование 4 разрядных слов  
из символов субкадра MAD1

Слово	Разряды субкадра
0	0123
1	4567
2	89..
3	....
4	....
5	....
6	....
7	...31

Таблица 3.2  
Кодирование по методу 4B5B

4-разрядное слово	5-разрядное слово
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

Таблица 3.3  
Порядок передачи  
5-разрядных канальных бит

Слово	Канальные разряды
0	01234
1	56789
2	.....
3	.....
4	.....
5	.....
6	.....
7	....39



Рис. 3.5. Данные субкадра, кодированные канальным кодом 4B5B

Такие синхрогруппы вставляются, по меньшей мере, один раз за время передачи кадра MAD1. Синхрогруппа всегда располагается между двумя смежными 40-битными субкадрами. Синхрогруппа, расположенная в конце кадра, имеет вид 11000 10001, однако это не единственная конфигурация синхрогруппы – всего таких конфигураций может быть до 32-х. Синхрогруппы при необходимости могут вставляться между смежными каналами (субкадрами) внутри одного и того же кадра. Могут быть вставлены не одна, а несколько синхрогрупп. Точный порядок использования синхрогрупп стандартом не регламентируется (рис. 3.6).

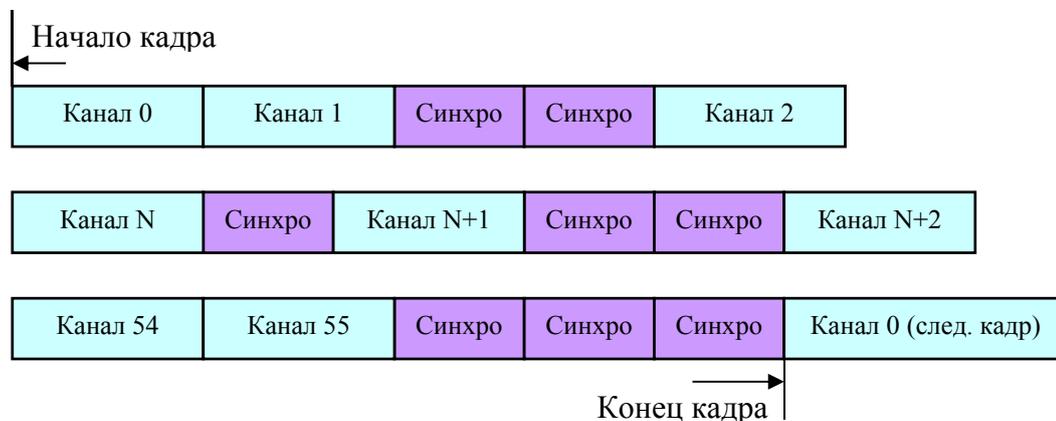


Рис. 3.6. Примеры использования синхрогрупп

### 3.4. Частота дискретизации и число передаваемых каналов

Частота дискретизации, на которой может использоваться интерфейс MADI при определенном числе каналов, должна принадлежать одному из диапазонов:

- а) для 56 каналов – от 32 кГц до 48 кГц  $\pm 12,5\%$ ;
- б) для 64 каналов – от 32 кГц до 48 кГц – номинальная частота;
- в) для 28 каналов – от 64 кГц до 96 кГц  $\pm 12,5\%$ .

Сигналы с более высокой частотой дискретизации (например, 192 кГц) могут передаваться путем использования двух или более числа каналов на отсчет.

Для 56 каналов при частоте дискретизации 48 кГц $\pm 12,5\%$  или для 28 каналов при частоте дискретизации 96 кГц $\pm 12,5\%$  результирующая скорость цифрового потока данных не должна превышать 96,768 Мбит/с. Для 64 каналов при частоте дискретизации 48 кГц или 32 каналов при частоте дискретизации 96 кГц результирующая скорость цифрового потока данных не должна превышать 98,304 Мбит/с.

Для 56 каналов при частоте дискретизации 32 кГц результирующая скорость потока данных не должна быть меньше 50,176 Мбит/с.

Максимально допустимая скорость потока данных, передаваемых через интерфейс MADI, для любых сочетаний числа активных каналов и частоты дискретизации не должна превышать 100 Мбит/с.

Максимально допустимая скорость потока канальных битов (после преобразования в код 4B5B), не должна превышать 125 Мбит/с.

### 3.5. Электрические характеристики

Электрическое соединение приемника и передатчика интерфейса осуществляется при помощи коаксиального кабеля с характеристическим сопротивлением  $75\pm 2\Omega$  длиной не более 50 м. Возможно соединение с помощью оптического кабеля.

К примеру, при использовании оптического интерфейса FDDI длина линии может достигать 2 км. Может быть также использована синхронная линия оптической связи SONET (Synchronous Optical NETWORK), при этом сигнал синхронизации также передается по оптической линии.

Размах напряжения на выходе передатчика должен быть от 0,3 до 0,6 В. Время нарастания и спада электрического сигнала между величинами 20 и 80% амплитуды должно быть не более 3 нс и не менее 1 нс. Используются разъемы типа BNC. Для обеспечения необходимого уровня сигнала на выходе передатчика и на входе приемника размещаются буферные каскады (рис. 3.7 и 3.8).

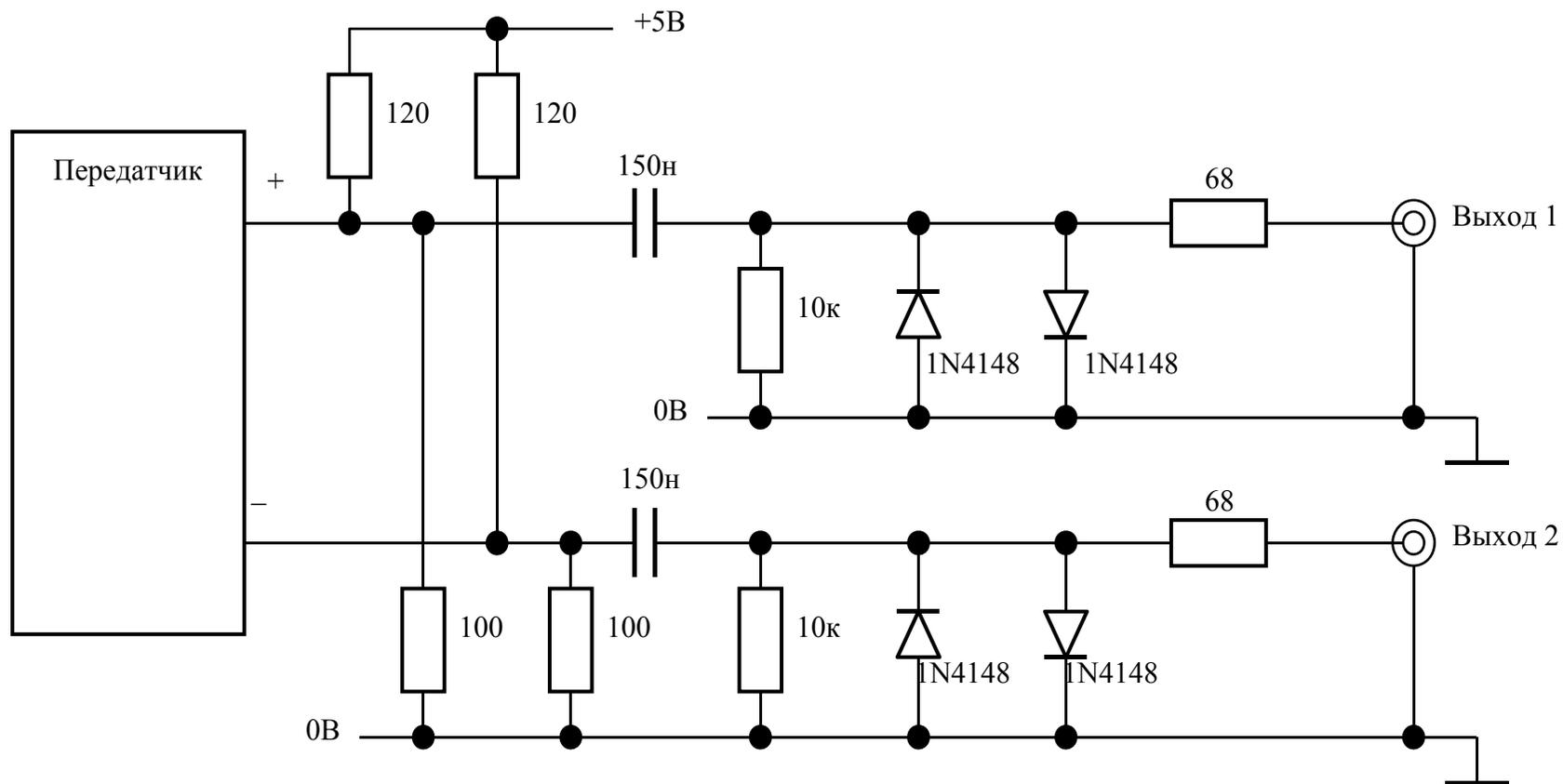


Рис. 3.7. Схема буферной цепи передатчика интерфейса MADI

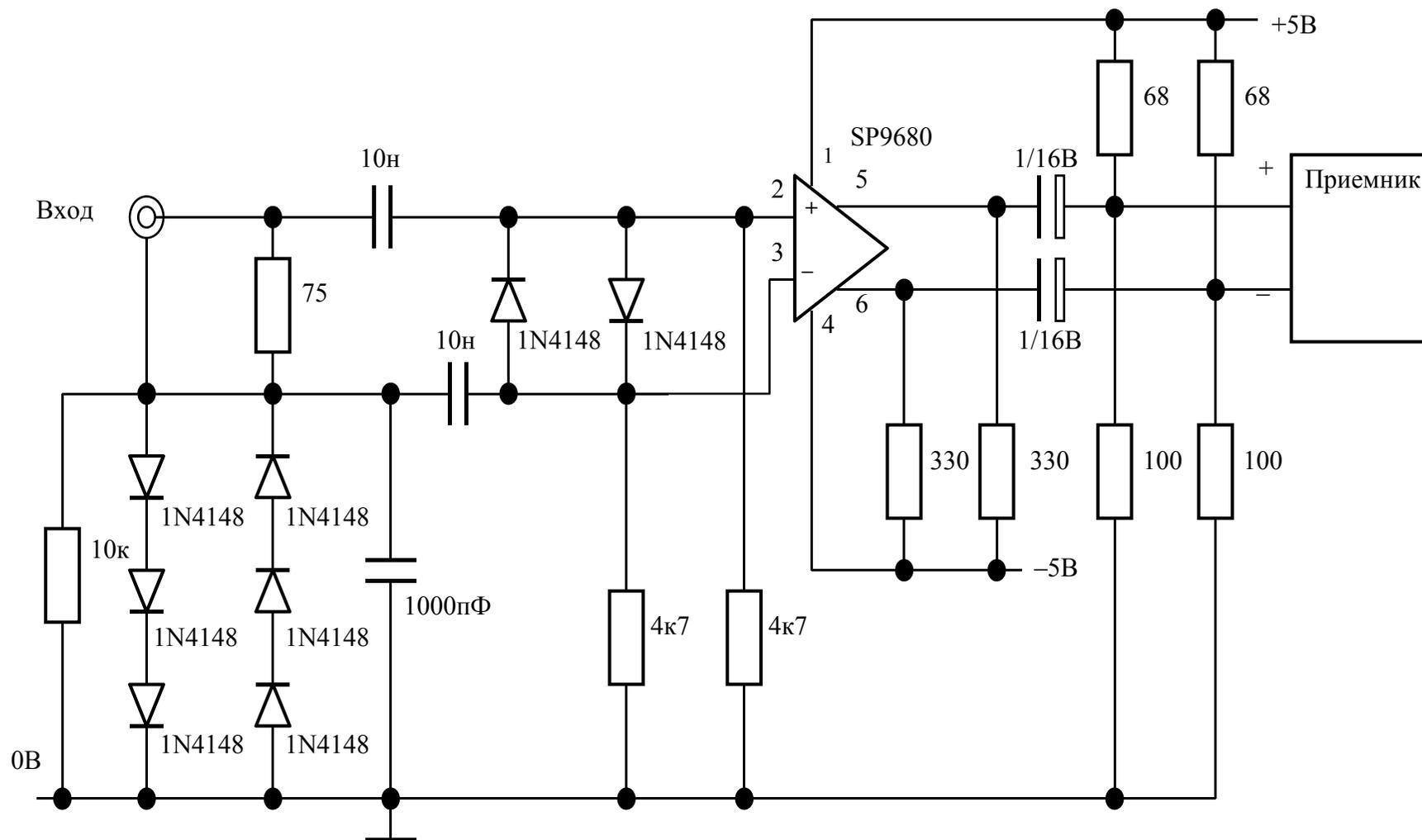


Рис. 3.8. Схема буферной цепи приемника интерфейса MAD1



## 4. SDIF

Существует два типа интерфейсов, которые обозначаются одной и той же аббревиатурой SDIF (Sony Digital Interface Format) – SDIF-2 и SDIF-3. Оба являются последовательными одноканальными, предполагают наличие отдельного кабеля для передачи сигнала синхронизации и предназначены для использования в профессиональной сфере [11].

Рассмотрим каждый из них в отдельности.

### 4.1. SDIF-2

Интерфейс SDIF-2 предназначен для передачи цифровых звуковых сигналов, представленных в виде ИКМ-отчетов с числом разрядов до 20. Частота дискретизации (частота следования отсчетов звукового сигнала) может быть как 44,1 кГц, так и 48 кГц. Для передачи двухканального стереофонического сигнала необходимо использовать два отдельных небалансных коаксиальных кабеля с волновым сопротивлением 75 Ом для передачи каждого звукового канала и один кабель – для передачи сигнала синхронизации. Если требуется передавать 6-канальный звуковой сигнал (в формате 5.1), следует использовать шесть кабелей для аудиосигналов и один кабель для сигнала синхронизации. Коммутация кабелей осуществляется с помощью соединителей типа BNC (рис. 4.1). Для того чтобы не возникало фазовых искажений, длина всех используемых кабелей должна быть одинаковой. Сигналы, передаваемые по интерфейсу SDIF-2, должны иметь уровни, совместимые с ТТЛ-логикой.



Рис. 4.1. Разъем типа BNC

Данные, передаваемые по каждому из звуковых каналов интерфейса SDIF-2, представлены в виде последовательности 32-разрядных слов (рис. 4.2), которые в свою очередь организованы в блоки из 256 таких слов в каждом (рис. 4.3). Сигнал синхронизации представляет собой последовательность импульсов со скважностью 2 (длительность импульса высокого уровня равна длительности паузы низкого уровня), следующих с частотой, равной используемой частоте дискретизации (44,1 или 48 кГц).

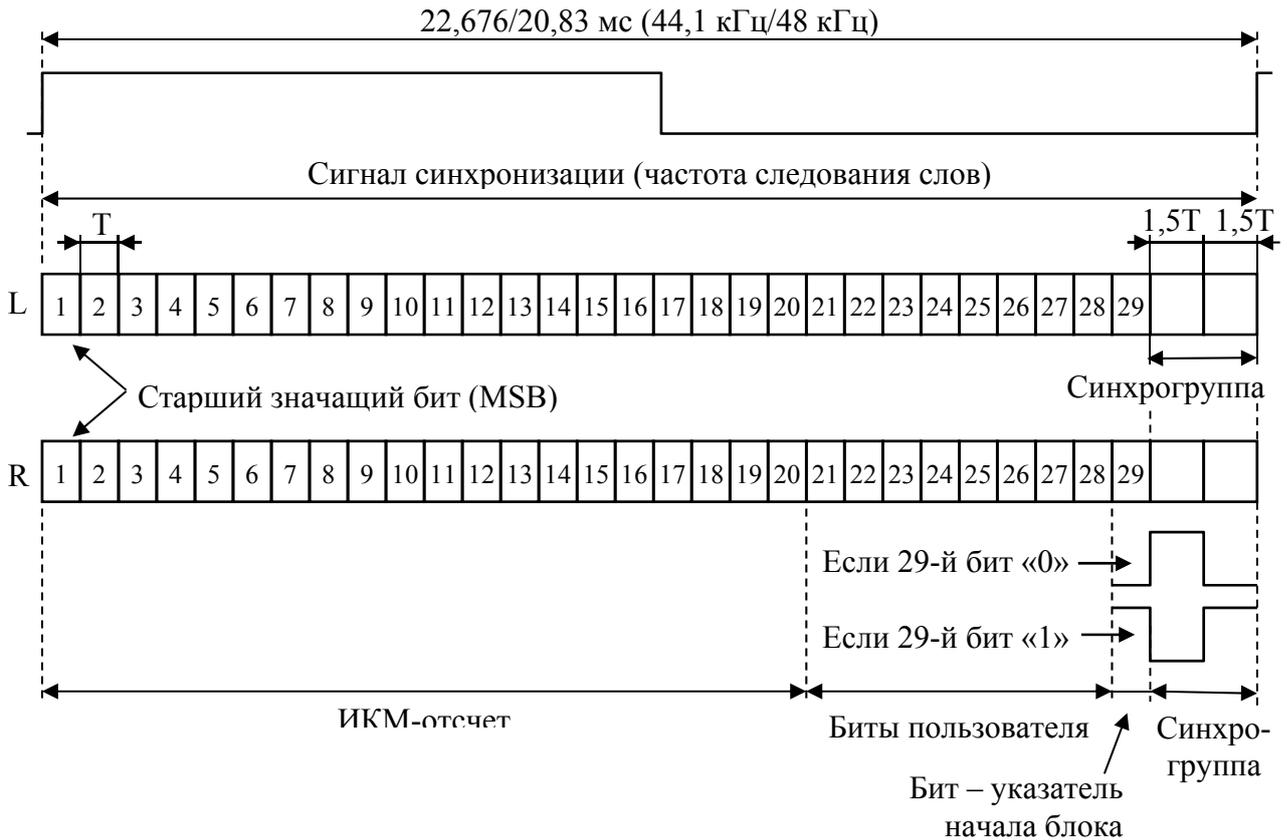


Рис. 4.2. Структура данных, передаваемых через интерфейс SDIF-2 (для 2-канального стереосигнала)

Первые 20 позиций в слове предназначены для битов ИКМ-отсчета, который располагается на этих позициях старшими разрядами вперед, т.е. 1-й бит – самый старший (MSB – Most Significant Bit). Если отсчеты 16-разрядные, то на последних четырех позициях (17, 18, 19 и 20) передаются «00». Следующие пять позиций (с 21-го по 25-й) пока не используются – они зарезервированы для возможного применения в будущем. Здесь также должны располагаться «00». На следующих двух позициях (26, 27) располагаются два бита, которые указывают на то, использовались или не использовались предыскажения (имфазис) во время процедуры аналого-цифрового преобразования передаваемого звукового сигнала. Если не использовались, то значения этих бит – «00», если использовались – «01».

Значение 28-го бита указывает на наличие или отсутствие запрета копирования передаваемой фонограммы: если этот бит является «нулем», то копирование разрешено, если «единицей», то запрещено. Следующий 29-й бит указывает на то, что данное слово является первым в блоке из 256 таких слов: в первом слове значение этого бита – «1», во всех остальных – «0».

И, наконец, последние три позиции слова предназначены для синхрогруппы, которая представляет собой два последовательных нестандартных интервала в 1,5 периода канальной тактовой частоты. Использование нестандартных интервалов – довольно распространенный прием при формировании синхрогрупп, поскольку в этом случае она легче опознается и выделяется из последовательного потока информационных битов.

Если предыдущий 29-й бит слова является «1» (первое слово в блоке), то уровень первого интервала синхрогруппы – «низкий», а уровень второго интервала синхрогруппы соответственно – «высокий» (рис. 4.2). Если 29-й бит является «0» (все прочие слова блока) – первый интервал имеет «высокий» уровень, а второй – «низкий».

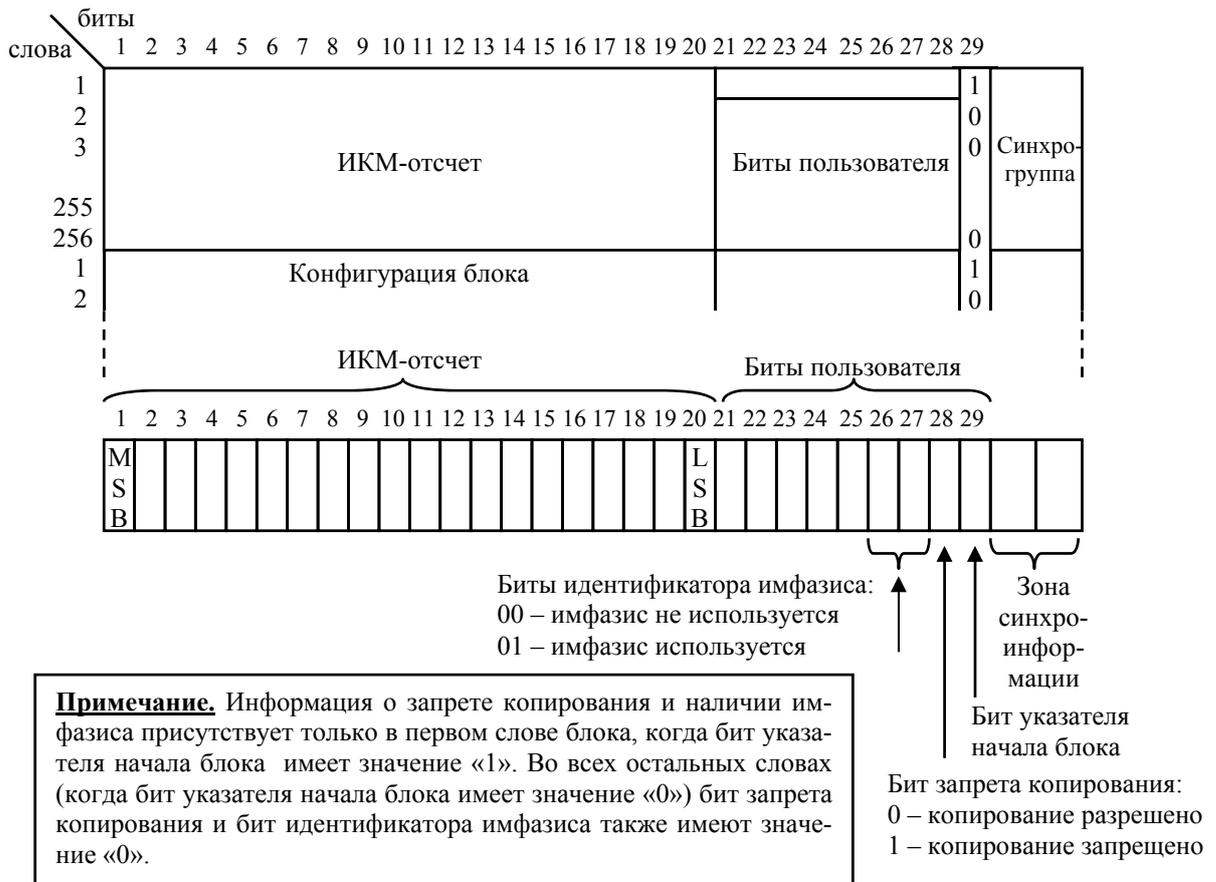


Рис. 4.3. Структура блока данных, передаваемых через интерфейс SDIF-2

Следует отметить, что информация о запрете копирования и наличии имфазиса относится ко всему звуковому файлу, передаваемому через интерфейс, поэтому она присутствует только в первом слове блока, когда бит указателя его начала имеет значение «1». Во всех остальных словах, когда бит указателя начала блока имеет значение «0», биты запрета копирования и идентификатора имфазиса также имеют значение «0».

## 4.2 SDIF-3

Интерфейс SDIF-3 по физической структуре очень похож на SDIF-2: для передачи каждого из звуковых каналов и сигнала синхронизации применяются отдельные кабели, но звуковые данные здесь представлены не в форме ИКМ-отсчетов, а в виде одноканального потока DSD, который используется для представления цифрового звукового сигнала в формате SuperAudioCD (SACD) либо со скоростью следования информационных битов 2,8224 Мбит/с (однократная скорость), либо со скоростью 5,6448 Мбит/с (удвоенная скорость).

В качестве сигнала синхронизации может использоваться как частота дискретизации формата CD 44,1 кГц, так и частота дискретизации формата SACD 2,8224 МГц. На практике плата кодера интерфейса SDIF-3 может иметь выходы как обеих этих частот, так и только одной из них (рис. 4.4).

Звуковые данные перед передачей по интерфейсу SDIF-3 инвертируются и модулируются двухфазным уровневым кодом (Bi-φ-L), который также известен как манчестерское кодирование, фазовое кодирование PE (Phase Encoding), фазовая модуляция и модуляция с расщеплением фазы.

Этот метод модуляции характеризуется изменением уровня в центре тактового интервала от «высокого» к «низкому» при кодировании «0» и от «низкого» к «высокому» при кодировании «1». Если несколько «0» или «1» следуют подряд один за другим – в этом случае в начале каждого последующего тактового интервала происходит возврат уровня к требуемому исходному [1] (рис. 4.5). Используя такой метод модуляции потока данных, он приобретает свойство самосинхронизации, т.е. расстояние между соседними перепадами уровня не превышает одного тактового интервала.



Рис. 4.4. Временные диаграммы сигналов интерфейса SDIF-3 для однократной скорости следования битов DSD:  
 а – сигнал частоты дискретизации  $f_s = 44,1 \text{ кГц}$ ;  
 б – сигнал удвоенной частоты дискретизации одноканального потока данных в формате DSD;  
 в – данные в формате DSD





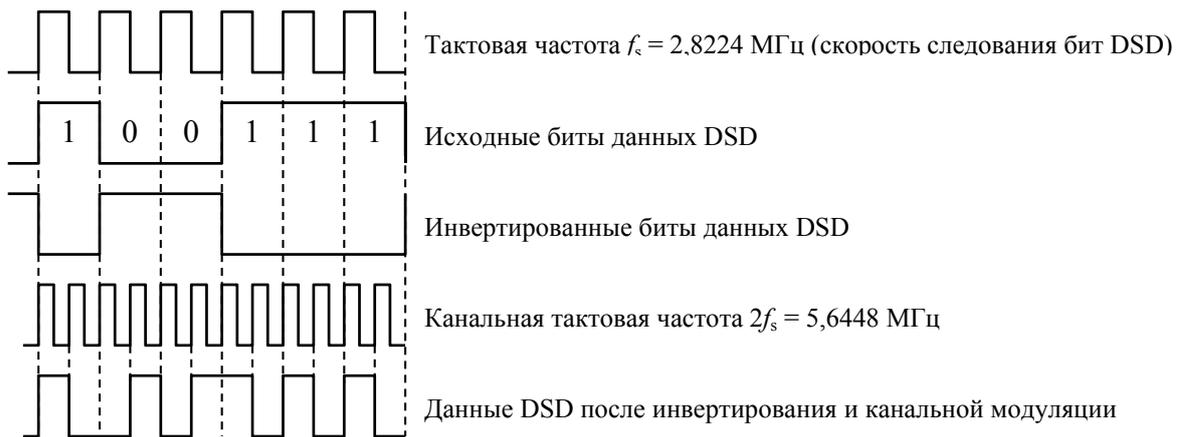


Рис. 4.5. Модуляция данных DSD двухфазным уровнем кодом Bi-φ-L

При передаче данных DSD с однократной скоростью ( $f_s = 2,8224$  Мбит/с) канальная тактовая частота составляет 5,6448 МГц, при передаче данных DSD с удвоенной скоростью ( $f_s = 5,6448$  Мбит/с) канальная тактовая частота составляет 11,2896 МГц.

Временные соотношения между сигналом синхронизации WCK (Word Clock – частота слов 44,1 кГц) и канальными битами показаны на рис. 4.6.



\* Измеряется непосредственно на выходном разьеме источника сигнала, когда кабель еще не подключен;  $t_{TLH} = t_{THL}$  (желательно)

Рис. 4.6. Временные характеристики сигналов интерфейса SDIF-3

Временные характеристики сигналов интерфейса SDIF-3 измеряются по уровням  $0,9V_{OH}$  и  $0,1V_{OH}$ , где  $V_{OH}$  – значение «высокого» уровня выходного сигнала (рис. 4.7).

Уровни сигналов интерфейса должны быть совместимыми с уровнями ТТЛ-логики и иметь следующие значения:

$$V_{OH} > 2,4 \text{ В} - \text{«высокий»}, V_{OL} < 0,55 \text{ В} - \text{«низкий»}.$$

Для передачи цифрового звукового сигнала и сигнала синхронизации интерфейса SDIF-3 также используются небалансные коаксиальные кабели с волновым сопротивлением 75 Ом, которые так же, как и в случае интерфейса SDIF-2, должны иметь одинаковую длину.

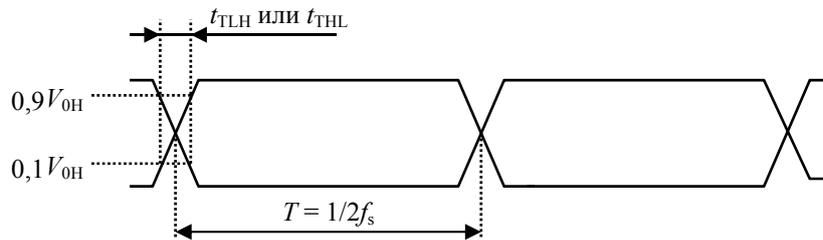


Рис. 4.7. Измерение временных характеристик сигналов интерфейса SDIF-3

Рекомендуемые схемы выходного каскада источника сигнала интерфейса SDIF-3 и входного каскада приемника приведены на рис. 4.8 и 4.9 соответственно.

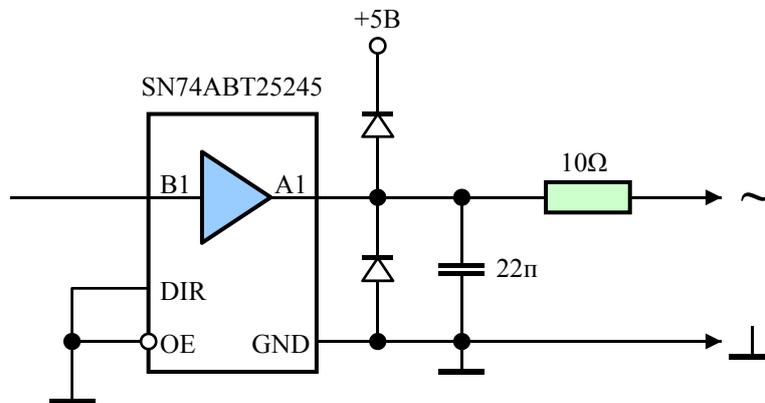
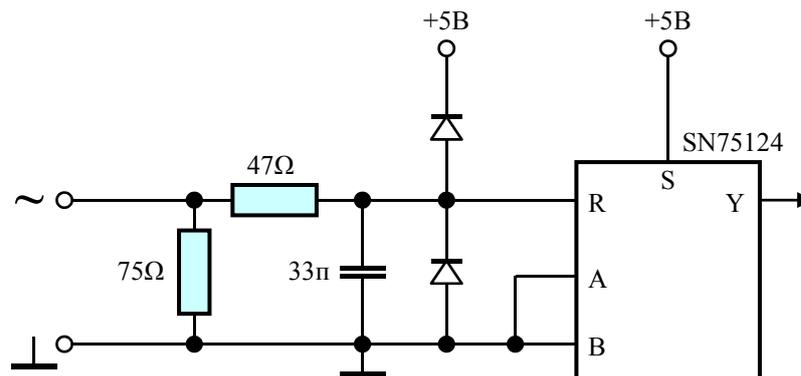


Рис. 4.8. Выходной небалансный каскад кодера интерфейса SDIF-3



44 Рис. 4.9. Входной небалансный каскад декодера интерфейса SDIF-3

Поскольку формат SDIF-3 предусматривает использование отдельных кабелей для передачи сигналов каждого из цифровых звуковых каналов и отдельного кабеля для передачи сигнала синхронизации WCK, следует учитывать то, что задержка между ними может оказаться разной и разница будет сравнима с длительностью канального бита. Поэтому следует быть внимательным при выборе кабелей (длина кабелей должна быть одинаковой) и используемой схемы соединения отдельных модулей аппаратуры (выбор источника синхронизирующего сигнала). На рис. 4.10 и 4.11 приведены примеры рекомендуемых схем коммутации.

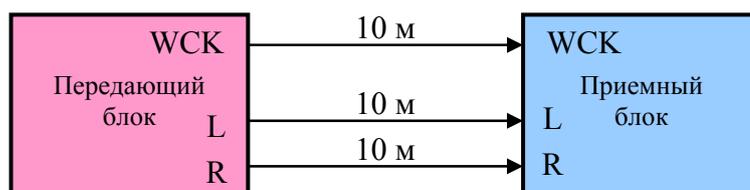


Рис. 4.10. Источником синхронизирующего сигнала WCK является передающий блок, т.е. источник звукового сигнала (кодер)

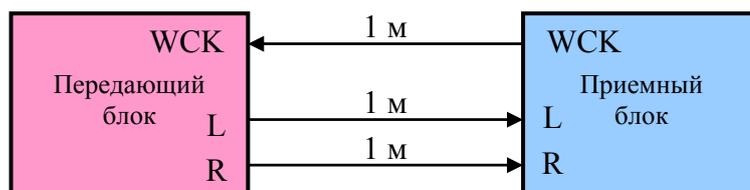


Рис. 4.11. Источником синхронизирующего сигнала WCK является приемный блок, т.е. получатель звукового сигнала (декодер)

## 5. TDIF

Восьмиканальный цифровой интерфейс TDIF (TASCAM Digital Interface Format) был разработан фирмой TASCAM для своих 8-дорожечных цифровых магнитофонов типа DTRS. Обеспечивает одновременную двустороннюю передачу по одному кабелю до 8 каналов цифрового звука (8 каналов передачи и/или 8 каналов приема) в формате до 24 бит/48 кГц и 24 бит/44,1 кГц. Для подключения кабеля используется 25-штырьковый разъем D-sub.

D-sub – сокращение от полного названия разъема «D-subminiature». Однако «субминиатюрным» этот разъем считался лишь в те времена, когда он впервые появился как элемент компьютерной техники – в 1952 году. Сейчас же, наоборот, он является одним из самых больших среди всех тех разъемов, которые применяются для компьютерных соединений. Разработан и введен в употребление фирмой ИТТ Canon.

Разъем D-sub может содержать два и более параллельных рядов контактов или гнезд (их число может быть равно не только 25, как в случае интерфейса TDIF, но и 9,15,37,50), которые обычно окружены металлическим экраном в форме латинской буквы D (отсюда и название D-sub). Экран, кроме выполнения своей основной функции – защиты от электромагнитных помех, еще и обеспечивает надежное механическое закрепление штекера кабеля в гнезде. Несимметричная форма в виде буквы D делает невозможным неправильную ориентацию разъема. Часть разъема, содержащая штырьки, называется по-английски *male connector* или *plug* (по-русски *штекер* или *вилка*), а часть, содержащая гнезда – *female connector* или *socket* (*розетка*). Экран розетки плотно входит внутрь экрана вилки. Если используются экранированные кабели, экраны разъемов соединяются с экранами кабелей, обеспечивая, таким образом, непрерывное экранирование для всего соединения.

В принятой фирмой ИТТ Canon системе буква D обозначает всю серию разъемов D-sub, а вторая буква используется для указания размера разъема, исходя из числа стандартных контактов, которые могут разместиться внутри D-образного экрана (A = 15 контактов, B = 25, C = 37, D = 50, E = 9), после чего следует цифра, обозначающая фактическое число используемых контактов, и буква, обозначающая тип разъема: M (male) – вилка, F (female) – розетка, P (plug) – штекер, S (socket) – розетка.

Например, DB25M обозначает разъем D-sub с экраном, вмещающим 25 контактов, и фактическим числом контактов, равным 25. Контакты в этих разъемах находятся на расстоянии 2,74 мм, а ряды – на 2,84 мм. Нумерация контактов разъема DB25M показана на рис. 5.1, а внешний вид разъема – на рис. 5.2.

Самая первая спецификация на этот интерфейс обозначалась как TDIF-1, версия 1.0. Она была разработана для магнитофонов DA-88 и не

содержала сигнала синхронизации по словам, который нужно было подавать по отдельному кабелю с разъемами BNS. В более поздней спецификации 1.1 этот недостаток был исправлен, и сигнал синхронизации по словам был включен в спецификацию. Описание сигналов на контактах разъема DB25M для спецификации TDIF-1, версии 1.0 приведено в табл. 5.1.

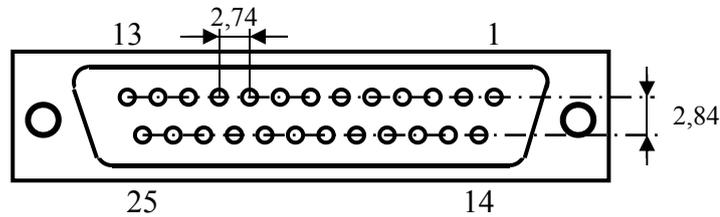


Рис. 5.1. Разъем DB25M (розетка)

LRCK – это сигнал синхронизации по словам, который представляет собой последовательность импульсов со скважностью 2, следующих с частотой дискретизации, при этом низкий уровень сигнала соответствует передаче отсчетов левого звукового канала (рис. 5.3, а), а высокий – передаче отсчетов правого звукового канала (см. рис. 5.3, б). Сигналы  $f_{s0}$  и  $f_{s1}$  – это сигналы тактовых частот, соответствующих скорости передачи бит звуковых отсчетов (рис. 5.3, в).

Сигнал EPRN указывает на наличие/отсутствие имфазиса, т.е. использования или не использования предискажений при аналого-цифровом преобразовании звукового сигнала, при этом параметры цепей имфазиса соответствуют стандарту CD-Audio.

Таблица 5.1

Спецификация TDIF-1 версии 1.1 сигналов на контактах разъема DB25M

№ контакта	Описание сигнала	№ контакта	Описание сигнала
1	Выход 1 (каналы 1/2)	14	«Земля»
2	Выход 2 (каналы 3/4)	15	«Земля»
3	Выход 3 (каналы 5/6)	16	«Земля»
4	Выход 4 (каналы 7/8)	17	«Земля»
5	Выход сигнала LRCK	18	Выход сигнала EPRN
6	Выход тактовой частоты $f_{s0}$	19	Выход тактовой частоты $f_{s1}$
7	«Земля»	20	Вход тактовой частоты $f_{s1}$
8	Вход тактовой частоты $f_{s0}$	21	Вход сигнала EPRN
9	Вход сигнала LRCK	22	«Земля»
10	Вход 4 (каналы 7/8)	23	«Земля»
11	Вход 3 (каналы 5/6)	24	«Земля»
12	Вход 2 (каналы 3/4)	25	«Земля»

13	Вход 1 (каналы 1/2)	–	–
----	---------------------	---	---

Спецификация TDIF-1 версии 2.0 допускает передачу звуковых сигналов с удвоенной (96 и 88,2 кГц) и 4-кратной (192 и 176,4 кГц) частотами дискретизации.



Рис. 5.2. Внешний вид разъемов DB25M

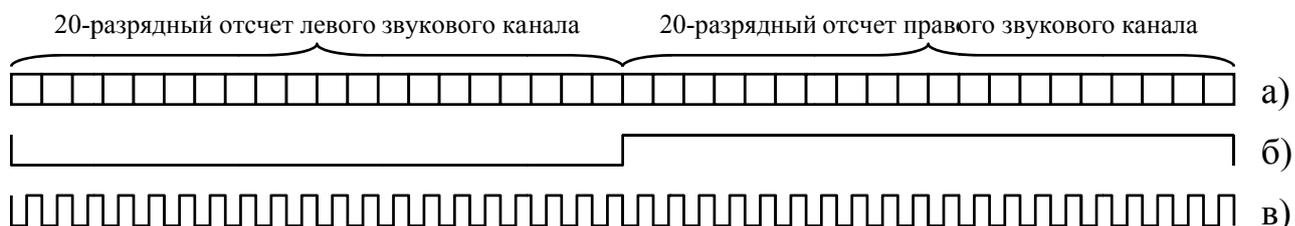


Рис. 5.3. Временные диаграммы сигналов интерфейса TDIF при передаче 20-разрядных отсчетов звукового сигнала:  
а – отсчеты звукового сигнала;  
б – сигнал частоты слов LRCK; в – сигнал тактовой частоты  $f_T$

## 6. ADI (Lightpipe)

Предложенный фирмой Alisis, многоканальный цифровой оптический интерфейс ADI (Alesis Digital Interface) или, как его еще называют – Lightpipe, предназначен для последовательной передачи по оптоволоконному кабелю восьми цифровых звуковых каналов с разрешением до 24 битов на каждый канал [11]. Иногда интерфейс ADI ошибочно называют ADAT – по названию формата 8-канальных цифровых магнитофонов фирмы Alesis (ADAT – Alesis Digital Audio Tape), для которых он изначально предназначался. Может использоваться в профессиональной работе для выполнения соединений между цифровыми рекордерами, микшерными пультами, цифровыми звуковыми рабочими станциями, процессорами эффектов, цифровыми клавиатурами и пр. В случае использования оптических кабелей с сердечником из пластикового волокна длина кабеля может достигать 10 м, кабель с сердечником из кварцевого волокна может иметь длину до 30 м.

Исходные цифровые звуковые данные в обычном NRZ-представлении (NRZ – Non Return to Zero) при передаче через интерфейс организуются в кадры и модулируются по методу NRZI (Non Return to Zero Inverted), при котором «единица» кодируется наличием изменения уровня сигнала, а «нуль» – отсутствием такого изменения (рис. 6.1).

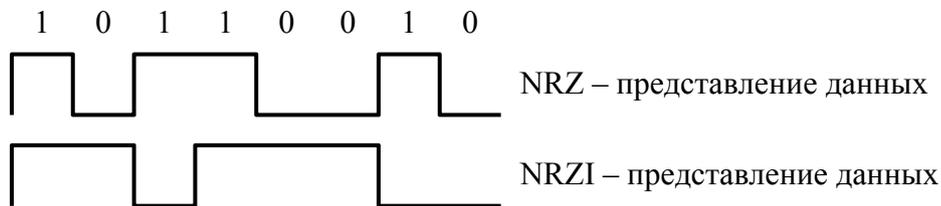


Рис. 6.1. Формы представления цифровых данных

Каждый кадр содержит по одному отсчету каждого из восьми каналов – всего, таким образом, в кадре содержится восемь 24-разрядных отсчетов или 192 бита исходных данных (рис. 6.2). Начало кадра отмечается синхрогруппой, содержащей 10 последовательных «0». За синхрогруппой следует служебная группа из четырех битов пользователя (user bits). Далее следуют 192 бита данных. После синхрогруппы, служебной группы и каждого 24-разрядного отсчета вставляются разделительные биты – «1», нужные для того, чтобы обеспечить самосинхронизируемость формируемой последовательности, т.е. возможность выделения из потока данных тактового синхросигнала. Даже в том случае если все биты данных будут равны «0» (изменения уровня сигнала отсутствуют), то наличие, по крайней мере, одной «1» (обозначаемой наличием перепада уровня сигнала) на 24 последова-

тельных «0» позволит устройству тактовой синхронизации контролировать фазовое соотношение между битами данных и импульсами тактовой частоты.

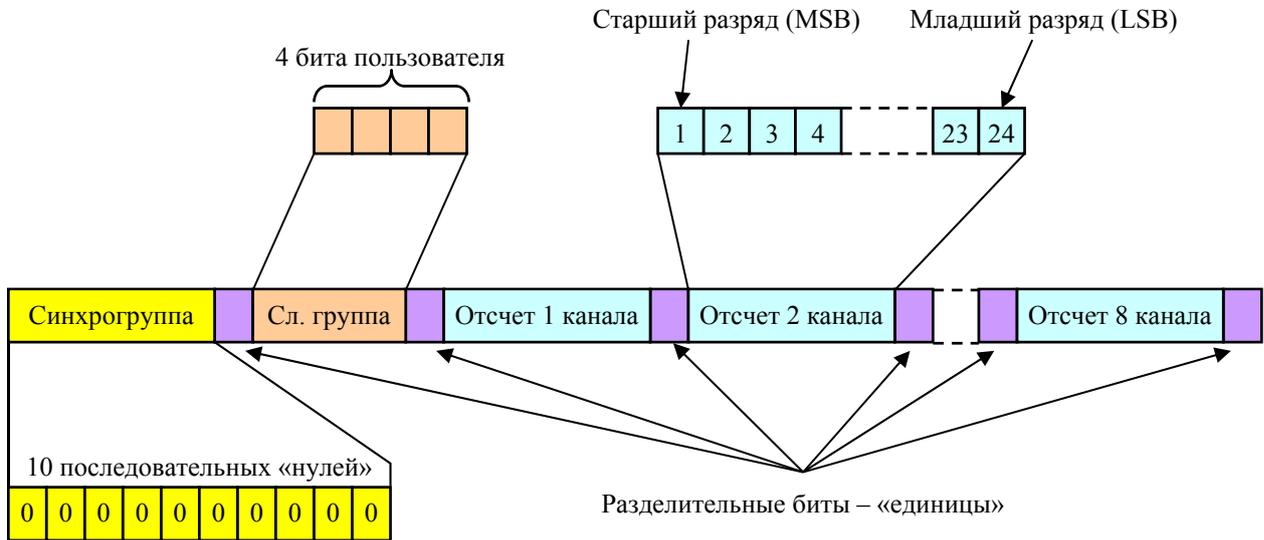


Рис. 6.2. Структура кадра информации, передаваемой по интерфейсу ADI (256 битов)

Значение тактовой частоты зависит от частоты дискретизации передаваемого цифрового звукового сигнала.

При частоте дискретизации  $f_d = 48$  кГц скорость  $V_d$  потока исходных данных  $V_d = 48000 \times 24 \times 8 = 9216000$  бит/с = 9,216 Мбит/с.

После добавления к исходному потоку данных синхрогрупп, служебных групп и разделительных битов, скорость потока данных  $V_{ch}$ , непосредственно передаваемых через интерфейс ADI, увеличится в 256/192 раз и составит

$$V_{ch} = V_d (256/192) \approx 12,288 \text{ Мбит/с.}$$

Следовательно, при использовании частоты дискретизации  $f_d = 48$  кГц значение канальной тактовой частоты  $f_T = 12,288$  МГц.

## 7. TOSLINK

**TOSLINK** – это стандартная система соединения компонент звукового тракта с помощью оптоволоконной линии связи (световода), разработанная компанией Toshiba в 1983 году.

**TOSLINK** – это официально зарегистрированная торговая марка данного продукта фирмы, образованная, как нетрудно догадаться, от соединения ее названия (**TOSHIBA**) и слова **LINK** – линия связи. Существуют различные варианты написания слова TOSLINK: TosLink, TOSlink, Tos-link или просто Toslink. Стандартное же название системы – **EIAJ optical**.

Нередко систему Toslink называют интерфейсом, хотя, строго говоря, интерфейсом она не является, поскольку интерфейс предполагает преобразование формата данных, передаваемых с его помощью. В системе же Toslink преобразование формата данных не производится, а происходит только изменение их физического представления – из импульсов электрического тока в импульсы света. Тем не менее, позволить себе «вольность», назвав систему Toslink интерфейсом, иногда можно.

Первоначально система Toslink предназначалась для передачи цифровых звуковых сигналов от своих фирменных CD-проигрывателей к цифровым усилителям (AV-ресиверам) в формате CD (44,1 кГц/16 бит). Технология передачи цифровых звуковых сигналов оптическими методами хорошо зарекомендовала себя на практике, и вскоре была адаптирована для использования со всеми прочими CD-проигрывателями – независимо от производителя. В дальнейшем с появлением новых видов источников цифровых звуковых сигналов DAT-магнитофонов, MD и DVD-проигрывателей, система Toslink стала использоваться и с ними.

Вначале цифровые звуковые сигналы передавались только в виде потока 16-разрядных отсчетов с частотой дискретизации 44,1 кГц (в соответствии с форматом данных по стандарту CD-Audio), впоследствии разрядность отсчетов и частота дискретизации стали соответствовать формату данных источника звуковых программ. После того, как появились и получили широкое распространение цифровые звуковые интерфейсы S/PDIF (потребительский) и AES3 (профессиональный), данные в системе Toslink стали передаваться в формате, соответствующем этим стандартам (форматы данных интерфейсов S/PDIF и AES3 одинаковые). При этом данные, передаваемые с помощью такого интерфейса, могут содержать в себе не только двухканальный (стереофонический) звуковой сигнал, но также и многоканальный звуковой сигнал в формате 5.1, кодированный, к примеру, по стандарту Dolby Digital или DTS (DVD-Audio).

Принцип передачи света внутри стеклянного волокна известен очень давно – впервые он был продемонстрирован еще во времена английской королевы Виктории (1837–1901). Однако технология производства оптово-

локна была разработана только в 50-х годах прошлого века. Тогда же началось и его использование в различных областях науки и техники.

Применение оптоволокна в связи началось еще позже – только в 70-х годах минувшего столетия. Возможность использования прозрачного волокна для передачи света, модулированного информационным сигналом на большие расстояния, основана на явлении полного внутреннего отражения светового пучка, распространяющегося в оптически более плотной среде, покрытой материалом оптически менее плотным.

В соответствии с законом преломления луч света, падающий на границу раздела двух однородных изотропных сред, изменяет свое направление.

При этом падающий луч, преломленный луч и нормаль к поверхности в точке падения лежат в одной плоскости, а между углом падения  $\varepsilon_1$  и углом преломления  $\varepsilon_2$  существует следующая зависимость (рис. 7.1):

$$n_1 \sin \varepsilon_1 = n_2 \sin \varepsilon_2,$$

где  $n_1, n_2$  – показатели преломления оптических сред.

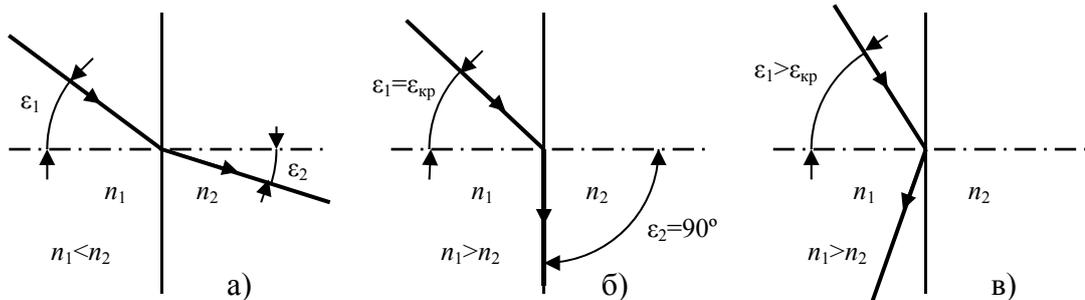


Рис. 7.1. Преломление и отражение луча на границе раздела двух оптических сред с разными показателями преломления

Если световой поток пересекает границу раздела со стороны оптически менее плотной среды ( $n_1 < n_2$ ), то, как следует из вышеприведенной формулы, угол падения  $\varepsilon_1$  будет больше угла преломления  $\varepsilon_2$  (рис. 7.1, а).

При распространении луча из оптически более плотной среды в среду оптически менее плотную ( $n_1 > n_2$ ) угол падения будет меньше угла преломления и при некотором предельном значении угла падения  $\varepsilon_1$ , которое называется **критическим**  $\Sigma_{кр}$ , угол преломления  $\varepsilon_2$  достигнет значения  $90^\circ$ , и преломленный луч будет распространяться вдоль границы раздела (рис. 7.1, б).

Если в тех же самых условиях ( $n_1 > n_2$ ) угол падения  $\varepsilon_1$  превысит критическую величину  $\Sigma_{кр}$ , преломления не будет вовсе, а произойдет полное внутреннее отражение падающего луча (рис. 7.1, в). Поверхность раздела при этом как бы приобретает свойства зеркала и практически вся переносимая световым лучом энергия остается в отраженном пучке.

Значение критического угла для каждой пары оптических сред с известными показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$  можно определить по формуле:

$$\sin \varepsilon_{\text{кр}} = n_2/n_1.$$

Если представить оптический волновод в виде цилиндра из прозрачного материала с показателем преломления  $n_1$ , покрытого материалом с показателем преломления  $n_2$  ( $n_1 > n_2$ ), как показано на рис. 7.2, то генерируемый источником излучения свет будет испытывать полное внутреннее отражение при распространении по волноводу, если половина угла сходимости входного луча  $\alpha$  будет составлять с критическим углом  $\varepsilon_{\text{кр}}$  угол не более  $90^\circ$  ( $\alpha + \varepsilon_{\text{кр}} \leq 90^\circ$ ) или, что то же самое, если числовая апертура NA ( $NA = n_1 \cdot \sin \alpha$ ) источника излучения будет не более величины:

$$NA \leq n_1 \cdot \sin (90^\circ - \varepsilon_{\text{кр}}) = n_1 \cdot \sin (90^\circ - \arcsin n_2/n_1).$$

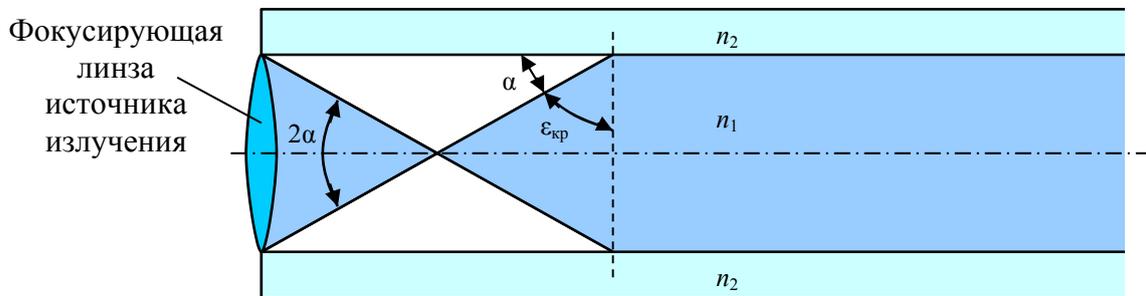


Рис. 7.2. Оптический волновод

На практике NA стремятся сделать несколько меньше предельной величины, для того чтобы обеспечить запас на изгиб оптического волновода. При этом в технических условиях на волновод оговаривают минимально допустимый радиус изгиба, при котором все еще выполняются условия для полного внутреннего отражения распространяющегося по волноводу света.

Существует три типа оптоволокон: полностью полимерное (изготовленное из кремнийорганического компаунда), полностью кварцевое (изготовленное из кварцевого стекла, которое в данном случае имеет аморфную структуру и по этой причине является не таким хрупким, как кристаллический кварц) и кварцевое с полимерной оболочкой.

Самыми лучшими характеристиками с точки зрения ослабления оптического излучения обладает *полностью кварцевое волокно*, которое по этой причине может использоваться для передачи сигнала на достаточно большие расстояния.

*Полностью полимерное волокно* используется на небольших расстояниях порядка нескольких метров.

*Кварцевое волокно в полимерной оболочке* занимает промежуточное положение и используется на средних расстояниях.

Конструкция оптоволоконного кабеля достаточно проста (рис. 7.3). Центральная светопроводящая сердцевина из оптически более плотного материала окружена оболочкой из оптически менее плотного материала, которая в свою очередь покрыта защитной оболочкой.

Защитное покрытие, предназначенное для предохранения кабеля от механических воздействий и нанесения цветной маркировки) чаще всего также бывает двухслойным: внутренний слой из кремнийорганического компаунда (СИЭЛ), внешний – фторопласт, нейлон, полиэтилен или эпоксидакрилат.

В том случае, когда и центральная светопроводящая сердцевина и внешняя оболочка изготовлены из одного и того же материала (кварцевого стекла или полимера), разница их показателей преломления достигается за счет применения легирующих добавок. В качестве легирующей добавки, увеличивающей показатель преломления кварцевого стекла, используется двуокись германия ( $\text{GeO}_2$ ) или более дешевый фосфорный ангидрид ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ). Такое кварцевое стекло используется для изготовления сердцевины оптоволокна. Для уменьшения показателя преломления используют добавки оксида бора. Такое кварцевое стекло используют для изготовления оболочки.

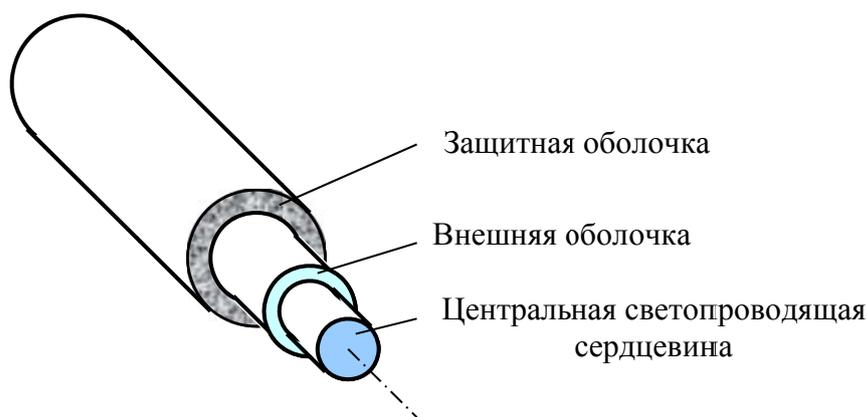


Рис. 7.3. Структура оптоволоконного кабеля

Преимущества оптоволоконной соединительной линии очевидны. Волоконно-оптические кабели не восприимчивы к помехам со стороны электромагнитных полей радиодиапазонов, и сами не создают таких помех. Поэтому в плане электромагнитной совместимости – это идеальные средства передачи информации. Столь же совершенны они и по электробезопасности, поскольку переносимые в них мощности малы. Кроме того, информацию, передаваемую с помощью света, невозможно прослушать, что чрезвычайно важно в условиях конфиденциальности.

Оптоволоконные линии связи широко используются для передачи информации на большие расстояния, поскольку в сравнении с традиционными проводными линиями, коаксиальными кабелями, СВЧ-волноводами,

для их изготовления не требуется применение дорогих и дефицитных материалов (например, меди). Производство стекловолокна нуждается, в основном, только в наличии окислов кремния, который является самым распространенным на Земле веществом. Волокна из прозрачных пластиков также почти не нуждаются в редких материалах.

Значит, источники сырья для производства световолокон практически не ограничены. Кроме того, материалы для изготовления оптических кабелей не подвержены коррозии и экологически безопасны.

Скорость передачи данных по оптоволокну может быть чрезвычайно высока, если использовать в качестве источника несущего колебания когерентное лазерное излучение.

Еще в 1988 году между Европой и США был проложен и введен в эксплуатацию трансатлантический телефонный оптоволоконный кабель TAT-8. В 2003 году за счет применения технологии спектрального уплотнения была достигнута скорость передачи данных по одному оптоволокну 10,72 Тбит/с.

*Спектральное уплотнение каналов* (WDM – Wavelength-Division Multiplexing – мультиплексирование с разделением по длине волны) – технология, позволяющая одновременно передавать несколько информационных каналов по одному оптоволокну на разных несущих частотах.

Для передачи цифровых звуковых сигналов в бытовых условиях и в условиях студии не требуются чрезмерно высокие скорости потока данных – обычно скорость потока данных, передаваемых через интерфейс Toslink, составляет 3,1 – 125 Мбит/с. Не требуются здесь и очень длинные кабели.

В бытовых условия длина оптического кабеля обычно не превышает 1–1,5 м, в студийных – 10–15 м, поэтому диапазон длин выпускаемых кабелей Toslink составляет 0,5–10 м. Однако встречаются кабели длиной до 30 м и более (например, для подключения антенн спутникового радиовещания). Вследствие этих же причин нет необходимости использовать в качестве источника излучения дорогостоящий полупроводниковый лазер – вполне достаточно дешевого серийного светодиода.

Конструктивно оптический соединитель стандарта EIAJ optical (Toslink) состоит из трех основных частей: передающего и приемного модулей и оптоволоконного кабеля (рис. 7.4).

*Передающий модуль* оптического соединителя включает в себя излучатель света, в качестве которого используется обычный светодиод, и микросхему кодера, встроенную прямо в гнездо соединителя и залитую специальным изолирующим материалом.

*Приемный модуль* состоит из кремниевого фотодиода и микросхемы декодера, тем же способом встроенной в гнездо соединителя.

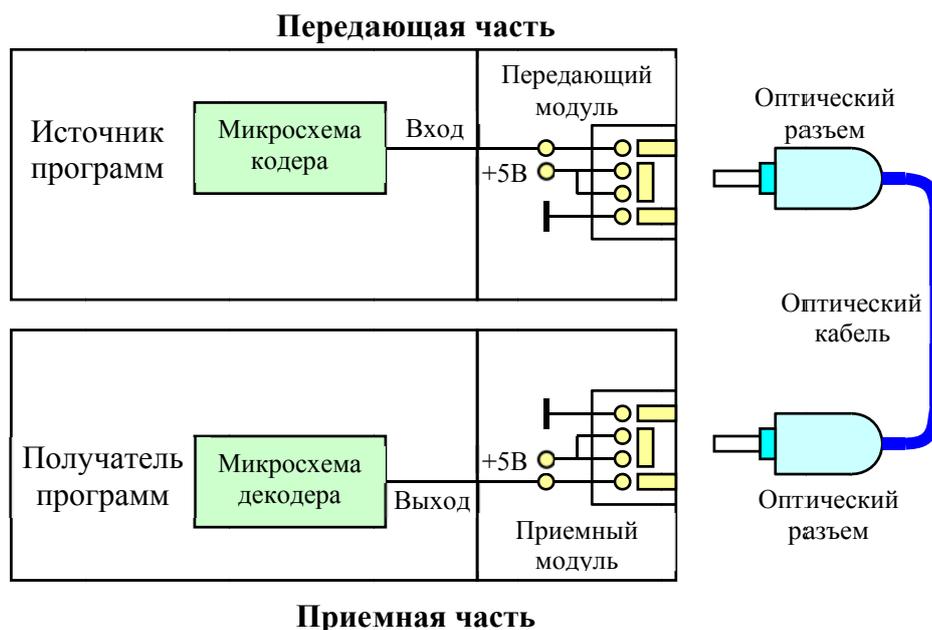


Рис. 7.4. Оптический соединитель

*Оптоволоконный кабель* представляет собой оптоволокну в защитной пластиковой оболочке с двумя оптическими разъемами (штекерами) на обоих концах (рис. 7.5). В качестве оптоволокну может использоваться одиночная полимерная нить с внешним диаметром 1 мм, жгут из нескольких (или даже нескольких десятков) более тонких полимерных нитей или кварцевая нить диаметром 0,1 мм.



Рис. 7.5. Оптоволоконный кабель Toslink



Рис. 7.6. Гнездо оптического соединителя Toslink JIS F05

Существует несколько типов разъемов Toslink. Для соединения компонент звуковой аппаратуры чаще всего используются стандартные разъемы JIS F05 (JIS C5974-1993 F05), имеющие квадратную форму (рис. 7.6 и 7.7). Реже используется 3,5 мм штыревой разъем типа Miniplug (Mini Toslink) (рис. 7.8). Для согласования разъемов Toslink и Mini Toslink существуют специальные переходники – адаптеры (рис. 7.9).



Рис. 7.7. Штекер оптического соединителя Toslink JIS F05



Рис. 7.8. Штекер оптического соединителя MiniToslink



Рис. 7.9. Переходник Toslink – MiniToslink

## ЛИТЕРАТУРА

1. AES3-2009: AES standard for digital audio engineering – Serial transmission format for two-channel linearly represented digital audio data, 2004.
2. Specification of the Digital Audio Interface (The AES/EBU interface) Tech. 3250-E // 3th Ed, 2004.
3. ITU-R Recommendation BS647: A digital audio interface for broadcasting studios, 2004.
4. Adaptive Coding for Self-clocking Recording / *A. Gabor* // IEEE Transaction on Magnetics. 1967. Vol. 4. P. 866–868.
5. Цифровая звукозапись / Под ред. *Дж. Маеса и М. Веркаммена*; пер. с англ. М.: Мир, 2004. – 352 с.
6. Форматы цифровой звукозаписи / *В.А. Никамин*. СПб: ЭЛБИ, 1998. – 264 с.
7. EBU document Tech. 3250 – Supplement 1, 1992: Format, for the user data channel of the digital audio interface (The AES/EBU interface), 1992.
8. The Art of Digital Audio / *J. Watkinson* // 3th Edition: Focal Press, 2001.
9. AES10-2008: AES Recommended Practice for Digital Audio Engineering – Serial Multichannel Audio Digital Interface (MADI) (Revision of AES10-1991).
10. AES11-1991: AES Recommended practice for digital audio engineering -Synchronization of digital audio equipment in studio operations, 1991.
11. Principles of Digital Audio / *C. Pohlman Ken* // 5th Ed: McGraw-Hill, 2005. – 860 p.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
1. AES3 (AES/EBU)	7
1.1. Формат данных	–
1.2. Электрические характеристики	17
2. S/PDIF	20
2.1. Формат данных	–
2.2. Соединительные линии интерфейса S/PDIF	26
3. AES10 (MADI).	27
3.1. Организация потока данных, передаваемых через интерфейс	–
3.2. Формат субкадра	28
3.3. Формат передачи данных по каналу	29
3.4. Частота дискретизации и число передаваемых каналов	32
3.5. Электрические характеристики	–
4. SDIF	35
4.1. SDIF-2	–
4.2. SDIF-3	38
5. TDIF	43
6. ADI (Lightpipe)	46
7. Toslink	48
Литература	56

*Виктор Александрович Никамин*

ЦИФРОВЫЕ ЗВУКОВЫЕ  
ИНТЕРФЕЙСЫ

Учебное пособие

Редактор *Л.А. Медведева*

План 2010 г., п. 29

Подписано к печати

Объем 3,75 уч.-изд. л. Тираж 100 экз. Зак. 80

Издательство «Теледом» ГОУВПО СПбГУТ

191186 СПб, наб. р. Мойки, 61

Отпечатано в СПбГУТ

