



中华人民共和国国家标准

GB/T 43670—2024

空间数据与信息传输系统 航天器 SpaceFibre 总线通信协议

Space data and information transfer systems—
SpaceFibre data bus communication protocol on spacecraft

2024-03-15 发布

2024-07-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	V
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 缩略语	4
5 总则	4
5.1 协议栈	4
5.2 拓扑结构	6
6 业务定义	6
6.1 业务说明	6
6.2 网络层业务	7
6.3 数据链路层业务	7
6.4 物理层业务	8
6.5 管理信息库业务	8
7 格式定义	8
7.1 8B/10B 编解码方式	8
7.2 控制字	11
7.3 字符	23
7.4 帧格式	24
7.5 数据包格式	26
7.6 控制字与帧优先级	27
7.7 K 码汇总表	28
7.8 控制字符符号汇总表	28
8 物理层协议	29
8.1 物理层功能	29
8.2 串行化	30
9 数据链路层协议	31
9.1 信道子层协议	31
9.2 多信道子层协议	44
9.3 链路控制子层协议	55
10 网络层协议	79
10.1 网络层功能	79
10.2 SpaceFibre 网络	80
10.3 虚拟网络	81
10.4 链路	83
10.5 发送数据包	83
10.6 接收数据包	83
10.7 路由交换机	84

10.8 数据包寻址 87

10.9 组自适应路由 89

10.10 数据包多播 89

10.11 广播消息 89

10.12 SpaceFibre 节点 90

10.13 SpaceFibre 单元 91

11 管理信息库 92

11.1 管理信息库功能 92

11.2 网络管理 92

11.3 配置参数 92

11.4 状态参数 95

12 可靠性设计 96

12.1 服务质量保证机制 96

12.2 FDIR 机制 97

附录 A (资料性) SpaceFibre 总线物理层设计参考 98

附录 B (规范性) SpaceFibre 总线通信协议业务接口 120

附录 C (资料性) SpaceFibre 总线通信协议 CRC 校验码计算 129

参考文献 131

图 1 SpaceFibre 总线协议栈示意图 5

图 2 SpaceFibre 总线最简网络示意图 6

图 3 SpaceFibre 总线复杂网络示意图 6

图 4 8B/10B 编码符号的 D/K 字符表示法示意图 9

图 5 数据包末尾的填充字符 24

图 6 数据包开头和结尾的填充字符 24

图 7 单信道数据帧结构 25

图 8 空闲帧结构 26

图 9 广播帧结构 26

图 10 SpaceFibre 数据包格式 27

图 11 物理层接口 30

图 12 单信道链路的信道子层接口 32

图 13 多信道与信道子层的连接接口 33

图 14 信道初始化状态机 34

图 15 接收同步状态机 43

图 16 多信道子层接口 45

图 17 两端信道数量不同的多信道链路 45

图 18 多信道链路上的字构成行 46

图 19 在多信道链路上展开数据 47

图 20 多信道链路中使用 PAD 控制字补齐 47

图 21 多信道链路的行对齐 49

图 22 对齐状态机 51

图 23 包含单向信道的多信道链路 53

图 24 链路控制子层接口 56

图 25	加扰/解扰器	64
图 26	一个短数据帧的加扰示例	64
图 27	空闲帧加扰效果	65
图 28	16 位 CRC 计算中的位排序示意	67
图 29	8 位 CRC 计算中的位排序示意	68
图 30	接收错误状态机	72
图 31	数据字识别状态机	74
图 32	链路复位状态机	77
图 33	网络层接口关系	80
图 34	SpaceFibre 网络构成	81
图 35	虚拟网络的关系	83
图 36	SpaceFibre 路由交换机的组成	85
图 37	SpaceFibre 节点组件和节点例化	91
图 38	SpaceFibre 单元的组件和例化	92
图 A.1	电物理层单方向结构示意图	98
图 A.2	串行输出信号	101
图 A.3	串行输出测试电路	102
图 A.4	串行眼图模板	102
图 A.5	串行输入信号	103
图 A.6	飞行电缆组件单个信道示意图	106
图 A.7	飞行连接器转接保护器	107
图 A.8	EGSE 电缆组件单个信道连接示意	109
图 A.9	EGSE 至飞行适配器电缆组件示意	110
图 A.10	单向光纤物理层结构组成	110
图 A.11	采用有源光纤的单向光纤物理层结构组成	111
图 A.12	1 Gbit/s~5 Gbit/s 发送器的电-光眼图模板	112
图 A.13	1 Gbit/s~10 Gbit/s 发射器的电-光眼图模板	113
图 A.14	包含一个信道的飞行光缆组件	116
图 A.15	包含多个信道的飞行光缆组件	117
图 A.16	非对称链路的飞行光缆组件	117
图 A.17	飞行用有源光缆组件	119
图 C.1	数据帧的 CRC 校验码计算示例	129
图 C.2	广播帧和 FCT 的 CRC 校验码计算示例	130
表 1	5B/6B 编码表(8 bit 数据的低 5 位编码)	10
表 2	3B/4B 编码表(8 bit 数据的高 3 位编码)	11
表 3	信道控制字	11
表 4	多信道控制字	16
表 5	数据帧控制字	17
表 6	流控制字	20
表 7	错误恢复控制字	21
表 8	接收错误指示控制字	23
表 9	SpaceFibre 标准字符	23

表 10	填充控制字符	24
表 11	K 码汇总表	28
表 12	控制字符号汇总表	28
表 13	不同 QoS 类型的优先权值	60
表 14	路由交换机地址	85
表 15	SpaceFibre 配置参数	93
表 16	SpaceFibre 状态参数	95
表 A.1	控制字符号汇总表	99
表 A.2	1 Gbit/s~3.125 Gbit/s 串行眼图模板间距	99
表 A.3	3.125 Gbit/s~6.25 Gbit/s 串行眼图模板间距	100
表 A.4	1 Gbit/s~3.125 Gbit/s 的驱动器和接收器特性	100
表 A.5	3.125 Gbit/s~6.25 Gbit/s 的驱动器和接收器特性	101
表 A.6	飞行电缆组件连接器触点终端连接关系	106
表 A.7	飞行连接器转接保护器连接器触点端接	107
表 A.8	EGSE 电缆组件连接器触点终端连接关系	109
表 A.9	EGSE 至飞行适配器电缆组件连接器触点终端连接关系	109
表 A.10	1 Gbit/s~5 Gbit/s 发射器的电-光特性	112
表 A.11	1 Gbit/s~10 Gbit/s 发射器的电-光特性	113
表 A.12	1 Gbit/s~5 Gbit/s 接收器的电-光特性	114
表 A.13	1 Gbit/s~10 Gbit/s 接收器的电-光特性	115
表 A.14	飞行光缆组件中每条 SpaceFibre 信道的连接器触点连接关系	116
表 A.15	飞行有源光缆组件连接器中每条 SpaceFibre 信道的信号	118
表 A.16	飞行有源光缆组件中每条 SpaceFibre 信道的连接器触点连接关系	119



前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由全国宇航技术及其应用标准化技术委员会(SAC/TC 425)提出并归口。

本文件起草单位：北京空间飞行器总体设计部、中国空间技术研究院、北京微电子技术研究所、中国航天标准化研究所、厦门洋池科技研究院有限公司、国网思极位置服务有限公司、浙江汇隆晶片技术有限公司。

本文件主要起草人：牛跃华、汪路元、许志宏、李欣、刘伟伟、庞亚龙、赵文彦、郭鹤鹤、詹盼盼、田苗苗、吴伟、李珂、王文平、飞海东、许冬彦、王丹、冯国平、蒋帅、张溢、郭佳鑫、许捷立、赵光、辜批林。



空间数据与信息传输系统

航天器 SpaceFibre 总线通信协议

1 范围

本文件规定了航天器 SpaceFibre 总线通信协议的业务、数据格式、物理层协议、数据链路层协议、网络层协议、管理信息库和可靠性设计。

本文件适用于航天器内的 SpaceFibre 总线及其相关设备的研制与使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 42041 航天术语 空间数据与信息传输

3 术语和定义

GB/T 42041 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

活动信道 active lane

处于激活状态的单向信道或双向信道。

3.2

非对称链路 asymmetric link

包含多条信道的链路中,有一条或多条信道为单向信道的链路。

3.3

可用带宽 available bandwidth

从上次更新带宽信用至当前的时段内,链路中所有虚拟信道所发送的数据字以及控制字的数量。

3.4

带宽利用率 bandwidth utilisation

分配给某虚拟信道的带宽在最近时段内已使用的比例。

注:当虚拟信道的带宽信用达到上限阈值或下限阈值时,短时无需进行带宽利用率测算。

3.5

双向信道 bi-directional lane

在链路上进行双向信息传输的活动信道。

3.6

广播消息 broadcast message

发送给网络上每个节点的 8 字节应用数据,以及表示应用数据含义的 8 位广播类型标识。

3.7

广播帧 broadcast frame

在广播消息前后分别加上广播帧开始(SBF)和广播帧结束(EBF),对广播消息进行封装后的帧。

3.8

D 码 D-code

在使用的 8B/10B 编码传输方案中,将 8 位数据字符首先用 9 位编码值进行表示,其中包含 1 位设置为 0 的 D/K 标志位和 8 位数据字符的一种编码。

3.9

K 码 K-code

在使用的 8B/10B 编码传输方案中,将 8 位控制字符首先用 9 位编码值进行表示,其中包含 1 位设置为 1 的 D/K 标志位和 8 位控制字符,且 8 位控制字符只能为 12 种有效取值之一的一种编码。

3.10

逗号码 comma

SpaceFibre 链路中采用的一种特殊专用控制符号。

注:取值为 K28.5 或 K28.7。

3.11

控制字 control word

用来进行 SpaceFibre 协议控制的字符。

注:控制字包含逗号码,以及由 K 码后跟随 3 个数据字符或填充字符组成的广播帧结束(EBF)、数据帧结束(EDF)、流控制令牌(FCT)、接收错误控制字(RXERR)等。

3.12

游程值 disparity

码流中“1”与“0”个数之差。

3.13

当前运行游程值 current running disparity

一串码流从开始到当前传输过程中所积累的游程值。

注:码流中 1 比 0 的个数多时游程值为正,反之为负。

3.14

数据字 data word

由 4 个 SpaceFibre 标准字符或填充字符组成的字。

3.15

数据段 data segment

一个或多个数据包中最多 $N \times 64$ 个连续数据字构成的分组。

注: N 是小于或等于“最大数据发送信道数”控制参数的整数。

3.16

包结束符 end of packet marker

表示数据包结束的标准字符。

3.17

端点 end-point

网络与主控系统之间提供接入网络的一路接口。

3.18

错误包结束符 end-pointerror end of packet marker

表示发生错误的数据包结束的标准字符。

3.19

流控制令牌 flow control token

用于管理链路上可交换 $M \times 64$ 个数据字的数据流控制字。

注：其中 M 是 1 到 8 之间的整数。

3.20

热备份信道 hot redundant lane

当前未发送数据,但已处于活动状态,可随时替换故障的数据发送使能置位的信道。

3.21

无效符号 invalid symbol

不在 SpaceFibre 通信协议的 8B/10B 解码表中的符号,即不在 D 码或 K 码的有效符号范围内的异常符号。

3.22

信道 lane

在两个设备之间运行 SpaceFibre 通信协议的一条物理连接。

注：信道能够通过电缆介质或光纤介质实现,能够为双向传输或单向传输。

3.23

线路驱动器 line driver

通过一种特定传输介质驱动信号的电路单元。

3.24

线路接收器 line receiver

通过一种特定传输介质接收发来的信号的电路单元。

3.25

链路 link

位于两个 SpaceFibre 端口之间用于在两个端口之间传输数据包和广播消息的双向连接。

注：一条链路包含一个或多个信道。

3.26

链路带宽 link bandwidth

1 s 内能够通过 SpaceFibre 链路发送的数据字和控制字的数量。

3.27

链路复位 link reset

用于复位 SpaceFibre 链路的链路控制子层及其以下各层的控制信号。

3.28

路径地址 path address

位于数据包起始部分的一个或多个数据字符组成的序列,用于定义数据包跨 SpaceFibre 网络从源端到目的端的路由。

3.29

逻辑地址 logical address

位于数据包头部特定位置,用于标识数据包目的地址的数据字符。

3.30

管理参数 management parameter

管理 SpaceFibre 节点或路由交换机工作模式的配置参数、控制参数或状态值。

3.31

多信道链路 multi-lane link

包含两个或两个以上信道的 SpaceFibre 链路。

3.32

归一化预期带宽 normalised expected bandwidth

一个虚拟信道在整个链路带宽中预计使用的带宽比例。

3.33

接收行 receiving row

多信道链路中在近乎相同的时间内从并行的所有数据接收信道收到的一组数据字。

注：相同的时间指在一个信道上接收一个字所用的时间，即小于或等于 40 个比特周期。

3.34

发送行 sending row

多信道链路中在近乎相同的时间内通过并行的所有数据发送信道发送的一组数据字。

注：相同的时间指在一个信道上发送一个字所用的时间。

4 缩略语

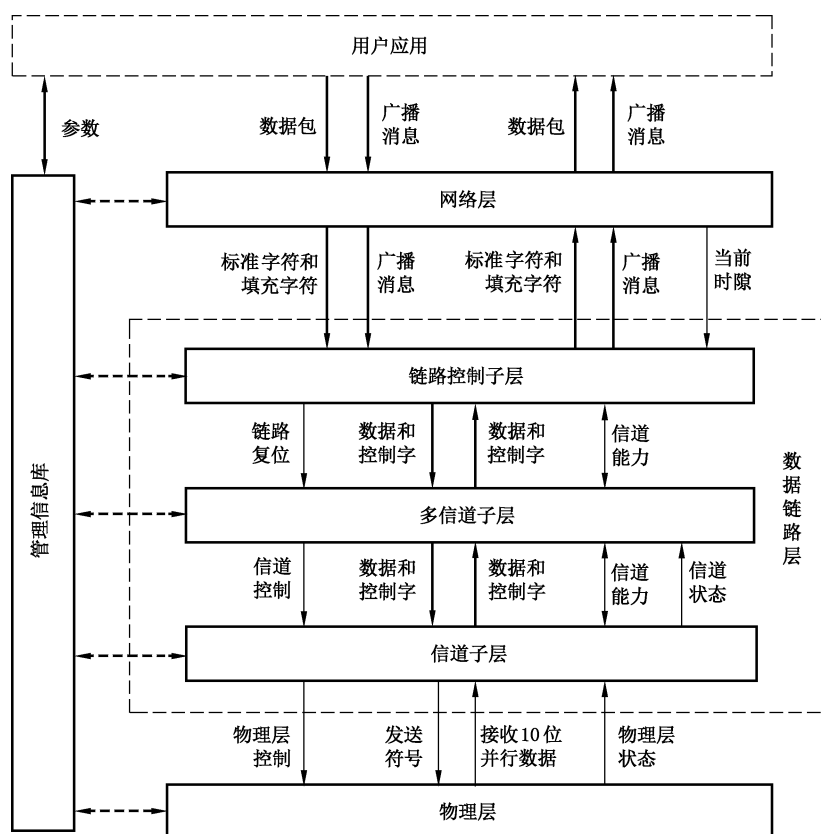
下列缩略语适用于本文件。

- BER: 比特误码率(Bit Error Rate)
- CDR: 时钟数据恢复(Clock Data Recovery)
- CML: 电流模式逻辑(Current Mode Logic)
- CRC: 循环冗余校验(Cyclic Redundancy Check)
- DMA: 直接存储器访问(Direct Memory Access)
- EGSE: 电子地面支持设备(Electronic Ground Support Equipment)
- ER: 消光比(Extinction Ratio)
- FDIR: 故障检测、隔离与恢复(Fault Detection, Isolation and Recovery)
- FIFO: 先入先出型缓存(First In First Out)
- LFSR: 线性反馈移位寄存器(Linear Feedback Shift Register)
- LoS: 信号丢失指示(Loss of Signal Indication)
- OMA: 光调制幅度(Optical Modulation Amplitude)
- PD: 光电探测器(Photo Detector)
- PRBS: 伪随机比特序列(Pseudo-random Bit Sequence)
- QoS: 服务质量(Quality of Service)
- RMAP: 远程存储器访问(Remote Memory Access Protocol)
- UI: 单位间隔(Unit Interval)
- UML: 通用建模语言(Universal Modelling Language)
- VCSEL: 垂直腔面发射激光器(Vertical Cavity Surface Emitting Laser)
- VML: 电压模式逻辑(Voltage Mode Logic)

5 总则

5.1 协议栈

SpaceFibre 总线是一种面向航天应用而设计的万兆级以上超高速数据链路和网络。SpaceFibre 总线的完整协议栈由物理层、数据链路层、网络层及管理信息库组成，其中数据链路层分为信道子层、多信道子层和链路控制子层，多信道子层为可选层。SpaceFibre 总线协议栈如图 1 所示。



- 注 1: ———— 代表主要并行数据流。
 注 2: ———— 代表串行数据或控制/状态流。
 注 3: - - - - - 代表配置与管理信息。

图 1 SpaceFibre 总线协议栈示意图

各协议层包含下列内容。

- 网络层主要负责将应用信息通过 SpaceFibre 网络传输。它提供两类业务：数据包传输业务和广播消息业务。数据包传输业务通过 SpaceFibre 网络传输 SpaceFibre 数据包，其格式与路由方式和 SpaceWire 一致。SpaceFibre 同时支持路径寻址与逻辑寻址。广播消息业务负责向网络中的所有节点广播 8 字节的短消息。这些消息可以携带时间信息以及同步信号，用于指示多种网络事件的发生。
- 链路控制子层主要负责提供 QoS 以及管理 SpaceFibre 链路上的信息流，采用 1 个或多个具备独立流控制的虚拟信道，将需要通过链路传输的信息组成帧以支持 QoS 与可选的数据加扰以降低电磁辐射。链路控制子层还负责错误恢复，支持重新发送链路远端检测到出错的或丢失的帧/控制字。SpaceFibre 对瞬态错误有着很强的恢复能力。
- 多信道子层负责并行处理多条 SpaceFibre 信道以提供更高的数据吞吐量。当一个信道发生错误时，多信道子层支持降级工作，自动将流量分配到仍正常工作的信道上。一个 SpaceFibre 链路是逻辑上的数据链路，可由一条或多条物理信道组成。SpaceFibre 链路中是否使用多信道是可选的。
- 信道子层负责建立信道上的通信连接，将数据与控制字编码为符号，通过信道发送或接收符号，将收到的符号解码为数据或控制字，当信道发生错误时重新建立信道上的通信连接。采用 8B/10B 编码，提供直流平衡信号，可采用交流耦合提供电气隔离。
- 在物理层中，发送端负责将 8B/10B 符号串行化后发送到物理介质中去。接收端负责从介质

中将接收到的串行比特流恢复出时钟与数据。在传输介质方面,SpaceFibre 同时支持铜缆以及光纤。物理层接收信道子层发来的业务请求,负责控制线路驱动器、接收器和串行器/解串器的处理,并报告线路接收器和串行器/解串器的状态。

- f) 管理信息库负责配置、控制与监控 SpaceFibre 协议栈中各个层的状态。管理信息库提供管理业务,接收用户应用发来的业务请求,并能够直接访问网络层、链路控制子层、多信道子层、信道子层、物理层的相关配置参数、控制参数与状态参数。
- g) 应用层由用户自行定义,本文件不作约束。

5.2 拓扑结构

SpaceFibre 总线网络由节点、路由器和链路组成,节点之间通过链路和路由器(可选)连接。一个最简网络,由两个节点和一条链路组成,如图 2 所示。一个较为复杂的网络,由多个节点、路由器及多条链路组成,如图 3 所示。其中,链路为全双工、串行、点到点传输线路,传输介质可以为屏蔽同轴电缆、双绞电缆或光纤。网络中的信息交互以数据包的方式进行传输,数据包的源及目的设备均为节点。

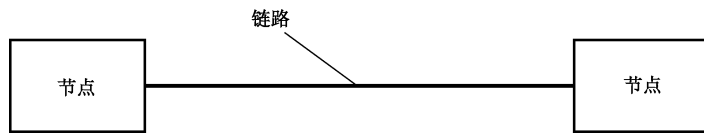


图 2 SpaceFibre 总线最简网络示意图

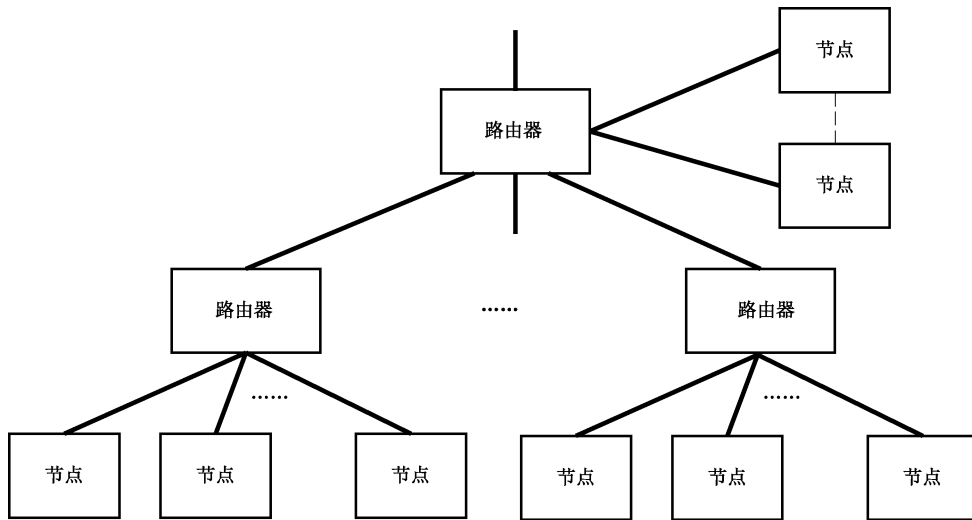


图 3 SpaceFibre 总线复杂网络示意图

6 业务定义



6.1 业务说明

SpaceFibre 总线提供对应 OSI 模型中网络层、数据链路层和物理层的业务,以及管理信息库业务,具体包括:

- a) 网络层提供包传输业务、广播消息业务;
- b) 数据链路层提供虚拟信道业务、广播消息业务、时隙规划同步业务;

c) 物理层提供传输符号业务、控制业务。

其中,SpaceFibre 总线物理层设计见附录 A,用户程序可以直接访问的只有网络层业务和管理信息库业务,业务描述中涉及的原语定义按附录 B 执行。数据链路层与物理层业务仅与其相邻层之间具有接口。

6.2 网络层业务

6.2.1 包传输业务

网络层包传输业务支持用户程序通过 SpaceFibre 网络发送和接收数据包,包括以下内容。

- a) 当用户程序有数据包通过 SpaceFibre 网络发送时,采用 SEND_PACKET.request 原语向 SpaceFibre 网络层包传输业务接口传送数据包内容并指定发送所用的虚拟网络。SpaceFibre 节点接收到原语后使用指定的虚拟网络完成数据包发送。
- b) 当 SpaceFibre 节点接收到数据包时,采用 READ_PACKET.indication 原语将数据包内容和数据包传输所用的虚拟网络、接收状态等参数,通过网络层包传输业务接口传递给接收数据包的用户程序。

6.2.2 广播消息业务

网络层广播消息业务支持用户程序通过 SpaceFibre 网络发送和接收广播消息,包括以下内容。

- a) 当用户程序有广播消息要通过 SpaceFibre 网络发送时,采用 BROADCAST_MESSAGE.request 原语向 SpaceFibre 网络层广播消息业务接口传送广播消息内容、消息类型并指定发送消息所用的广播通道。SpaceFibre 节点接收到原语后根据链路优先级规则,立即通过指定的广播通道发送广播消息。
- b) 当 SpaceFibre 节点接收到广播消息时,采用 BROADCAST_MESSAGE.indication 原语将广播消息内容和广播类型、广播通道、接收状态等参数,通过广播消息业务接口传递给接收广播消息的用户程序。

6.3 数据链路层业务

6.3.1 虚拟信道业务

数据链路层虚拟信道业务支持网络层通过指定虚拟信道发送和接收数据字符,包含以下内容。

- a) 当网络层用户有一个标准字符 N-Char 或填充字符 Fill 通过 SpaceFibre 总线链路的特定虚拟信道发送时,采用 TX_N-CHAR.request 原语向数据链路层传送字符内容并指定发送所用的虚拟信道号。数据链路层接收到该原语后,在 SpaceFibre 总线介质访问控制器允许的情况下,立即通过指定的虚拟信道发送数据字符。
- b) 当数据链路层接收到标准字符 N-Char 或填充字符 Fill 时,采用 RX_N-CHAR.indication 原语将字符内容和接收虚拟信道号传递给网络层用户。网络层接收到该原语后读取接收到的字符。

6.3.2 广播消息业务

数据链路层广播消息业务支持网络层通过指定广播通道发送和接收广播消息,包含以下内容。

- a) 当网络层用户有广播消息要通过 SpaceFibre 总线链路的特定广播通道发送时,采用 TX_BROADCAST.request 原语向数据链路层传送广播消息内容、消息类型、消息状态并指定发送消息所用的广播通道。数据链路层接收到该原语后,在完成当前字发送后,或者当有广播帧已经开始发送时,在该广播帧发送完成后,立即通过指定的广播通道发送广播消息。

- b) 当数据链路层接收到有效的广播消息时,采用 RX_BROADCAST.indication 原语将广播消息内容、消息类型、消息状态和广播通道号传递给网络层用户。网络层接收原语后验证广播消息的有效性并转发有效的广播消息。

6.3.3 时隙同步业务

数据链路层时隙同步业务基于广播消息实现 SpaceFibre 网络系统中所有节点和交换机的时隙同步,支持网络系统按照时隙规划数据流量进行确定性通信。

当网络层接收到广播消息中提供的新时隙标识信息时,采用 SCHEDULE.request 原语向数据链路层传递时隙参数。数据链路层接收到该原语后使用时隙参数更新时隙控制信息,结束上一个时隙并开始下一个时隙。

6.4 物理层业务

6.4.1 符号传输业务

物理层符号传输业务支持信道子层通过物理层发送和接收数据编码后的信息符号,包含以下内容。

- a) 当信道子层有符号要通过 SpaceFibre 总线链路发送时,采用 TX_SYMBOL.request 原语将符号内容传递给物理层。物理层接收到原语后,将符号串行化并通过 SpaceFibre 链路发送。
- b) 当物理层通过 SpaceFibre 总线链路接收到符号并完成串并转换时,采用 RX_10BITS.indication 原语将转换后的信息符号传递给信道子层。

6.4.2 控制业务

物理层控制业务支持上层对物理层工作模式进行设置并获取物理层的工作状态,包含以下内容。

- a) 当信道子层需要控制物理层的操作时,采用 PHYSICAL_CONTROL.request 原语向物理层传递发送使能、接收使能、极性反转等控制参数。物理层接收到该原语后,根据原语传入的控制参数设置物理层的工作模式。
- b) 当物理层工作状态发生变化时,通过 PHYSICAL_STATUS.indication 原语将信号丢失等状态反馈给信道子层,由上层进行处理。

6.5 管理信息库业务

管理信息库业务实现对 SpaceFibre 总线链路管理参数的设置和查询,包含以下内容。

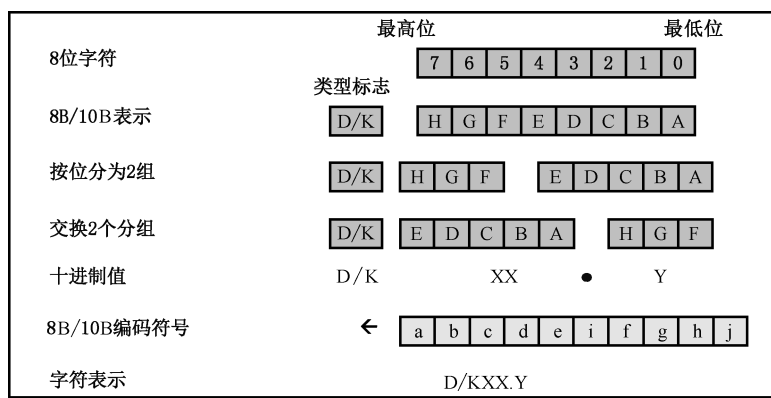
- a) 当需要更改 SpaceFibre 总线端口的管理参数时,管理程序采用 SET_MANAGEMENT_PARAMETER.request 原语将参数标识、新参数值传递给管理信息库业务接口。SpaceFibre 总线端口接收到该原语后,使用原语中提供的新值更新指定的管理参数。
- b) 当需要读取 SpaceFibre 总线端口管理参数值时,管理程序采用 GET_MANAGEMENT_PARAMETER.request 原语将要获取的参数标识传递给管理信息库业务接口。SpaceFibre 总线端口接收到该原语后,提供指定的管理参数的值。

7 格式定义

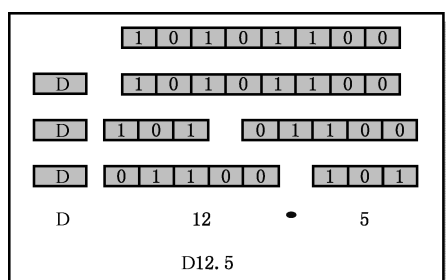
7.1 8B/10B 编解码方式

SpaceFibre 总线采用 8B/10B 的编码和解码方式,发送端将需要传输的 8 bit 数据字符或者控制字符编码成 10 bit 待发送符号后通过信道传输,相应的在接收端对 10 bit 符号进行解码后恢复出 8 bit 字符。8B/10B 编码和解码具体要求包含下列内容。

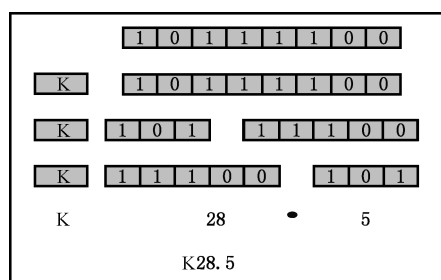
- a) 8B/10B 编码采用特定表示方法描述数据字符和控制字符。数据字符的格式为 D/XX.Y, 其中 XX 是发送数据字节的最低有效 5 位的十进制, Y 是发送数据字节的最高有效 3 位的十进制。类似的, 控制字符为 K/XX.Y。
- b) 对数据进行 8B/10B 编码时, 将 8 位数据的低 5 位标记为 EDCBA, 编码后形成 10 位符号的低 6 位由低到高表示为 abcdei, 将 8 位数据的高 3 位标记为 HGF, 编码后形成 10 位符号的高 4 位由低到高表示为 fghj, 最后组合成 10 位编码符号 abcdeifghj, 最低位 a 最先传输。如图 4 所示。
- c) 8B/10B 编码器应按照表 1 将数据字符或控制字符的低 5 位编码, 按照表 2 将数据字符或控制字符的高 3 位编码。
- d) 为确保传输信号的直流平衡, 发送器应根据所发送 8B/10B 编码符号的游程值维护当前运行游程值:
 - 1) 当一个 8 bit 数据字符或控制字符被编码时, 若当前运行游程值为正, 则该数据或控制字符应被编码成游程值为 0 或负值的符号;
 - 2) 当一个 8 bit 数据字符或控制字符被编码时, 若当前运行游程值为负, 则该数据或控制字符应被编码成游程值为 0 或正值的符号。
- e) 复位时, 当前运行游程值被设置为 +1 或者 -1。
- f) 为检测游程值错误, 接收器应根据接收到 8B/10B 编码符号的游程值累加维护当前运行游程值:
 - 1) 若当前运行游程值 > +1 或 < -1 时, 接收器应报告一个游程值错误;
 - 2) 当游程值错误出现时, 若接收器中的当前运行游程值 > +1, 则其应被置为 +1; 若当前运行游程值 < -1, 则其应被置为 -1。
- g) 当接收到一个符号时, 应按照 8B/10B 符号表解码成 8 bit 数据字符或控制字符。



a) 8B/10B 编码 D/K 字符表示法



b) D12.5 字符表示示例



c) K28.5 字符表示示例

图 4 8B/10B 编码符号的 D/K 字符表示法示意图

表 1 5B/6B 编码表(8 bit 数据的低 5 位编码)

输入		输出	
数据输入	数据位 43210 EDCBA	当前运行游程值为-1 abcdei	当前运行游程值为+1 abcdei
D00.y	00000	100111	011000
D01.y	00001	011101	100010
D02.y	00010	101101	010010
D03.y	00011	110001	
D04.y	00100	110101	001010
D05.y	00101	101001	
D06.y	00110	011001	
D07.y	00111	111000	000111
D08.y	01000	111001	000110
D09.y	01001	100101	
D10.y	01010	010101	
D11.y	01011	110100	
D12.y	01100	001101	
D13.y	01101	101100	
D14.y	01110	011100	
D15.y	01111	010111	101000
D16.y	10000	011011	100100
D17.y	10001	100011	
D18.y	10010	010011	
D19.y	10011	110010	
D20.y	10100	001011	
D21.y	10101	101010	
D22.y	10110	011010	
D/K23.y	10111	111010	000101
D24.y	11000	110011	001100
D25.y	11001	100110	
D26.y	11010	010110	
D/K27.y	11011	110110	001001
D28.y	11100	001110	
K28.y	11100	001111	110000
D/K29.y	11101	101110	010001
D/K30.y	11110	011110	100001
D31.y	11111	101011	010100

表 2 3B/4B 编码表(8 bit 数据的高 3 位编码)

输入		输出	
数据输入	数据位 765 HGF	5B/6B 游程值为-1 fghj	5B/6B 游程值为+1 fghj
D/Kxx,0	000	1011	0100
Dxx,1	001	1001	
Kxx,1	001	0110	1001
Dxx,2	010	0101	
Kxx,2	010	1010	0101
D/Kxx,3	011	1100	0011
D/Kxx,4	100	1101	0010
Dxx,5	101	1010	
Kxx,5	101	0101	1010
Dxx,6	110	0110	
Kxx,6	110	1001	0110
Dxx,7	111	1110/0111	0001/1000
Kxx,7	111	0111	1000

7.2 控制字

7.2.1 控制字组成

SpaceFibre 总线采用的控制字包括：

- 信道控制字；
- 多信道控制字；
- 数据链路控制字；
- 流控制字；
- 错误恢复控制字；
- 接收错误指示控制字，由接收器产生，但不在 SpaceFibre 总线链路中传输。

7.2.2 信道控制字

7.2.2.1 基本属性

信道控制字用于初始化 SpaceFibre 信道、指示信号丢失、指示信道即将进入待机状态。信道控制字的组成如表 3 所示。

表 3 信道控制字

名称	控制字	功能
跳过控制字 SKIP	Comma, LLCW, SKIP, SKIP K28.7, D14.6, D31.3, D31.3	跳过控制字。每发送 5 000 个数据或控制字符后发送一个 SKIP, 以支持接收端进行弹性缓存操作, 实现速率匹配

表 3 信道控制字 (续)

名称	控制字	功能
空闲控制字 IDLE	Comma, LLCW, IDLE, IDLE K28.7, D14.6, D15.6, D15.6	空闲控制字。当链路初始化完毕但数据链路或多信道子层没有提供有效的待发送字时,发送 IDLE 以维持链路连接
初始化控制字 1 INIT1	Init Comma, LLCW, INIT1, INIT1 K28.5, D14.6, D6.2, D6.2	初始化控制字 1, 在初始化握手过程中发送。D6.2 为中性字符, 即游程为 0
反相的初始化控制字 1 iINIT1	Init Comma, iLLCW, iINIT1, iINIT1 K28.5, D17.1, D25.5, D25.5	反相的初始化控制字 1, 当物理层信号翻转时, 在初始化握手过程中会接收到。D25.5 为中性字符, 即游程为 0
初始化控制字 2 INIT2	Init Comma, LLCW, INIT2, INIT2 K28.5, D14.6, D6.5, D6.5	初始化控制字 2, 初始化握手过程中发送。D6.5 为中性字符, 即游程为 0
反相的初始化控制字 2 iINIT2	Init Comma, iLLCW, iINIT2, iINIT2 K28.5, D17.1, D25.2, D25.2	反相的初始化控制字 2, 当物理层信号翻转时, 在初始化握手过程中会接收到。D25.2 为中性字符, 即游程为 0
初始化控制字 3 INIT3	Init Comma, LLCW, INIT3, Capability K28.5, D14.6, D24.1, D0.0-D31.7	初始化控制字 3, 初始化握手过程中发送。Capability 字段描述发送该 INIT3 的信道端所支持的功能。可用于本地端与信道另一端的 SpaceFibre 端口交换所支持的功能信息, 使得信道两端能够按照可能的最高效方式运行工作
待机控制字 STANDBY	Comma, LLCW, STBY, Reason K28.7, D14.6, D30.3, D0.0-D31.7	待机控制字, 指示发送器正转移到待机状态, 并将其驱动器变为三态(停止输出)。当主机没有要传输的数据, 并且当前没有正在接收的数据时, 可以用来节约功耗。待机原因字段可用于指示发送待机控制字的原因或提供其他状态信息
信号丢失控制字 LOST_SIGNAL	Comma, LLCW, LOS, Reason K28.7, D14.6, D4.3, D0.0-D2.0	信号丢失控制字, 用于指示发送该控制字的链路端接收器检测到信号丢失。原因字段用于指示引起无信号的原因

7.2.2.2 跳过控制字 (SKIP)

跳过控制字记为 SKIP 控制字, 其定义包含以下内容:

- a) SKIP 控制字以 K28.7 逗号开始, 该逗号是控制字的最低字节, 最先被发送;
- b) SKIP 控制字的第 2 个符号为信道子层控制字标识符 LLCW, 该标识符值为 D14.6, 表示该控制字由信道子层产生与使用;
- c) SKIP 控制字的第 3 个符号为 D31.3 的值, 表示该信道子层控制字是 SKIP 控制字;
- d) SKIP 控制字的第 4 个(最后一个)符号与第 3 个符号相同。

7.2.2.3 空闲控制字 (IDLE)

空闲控制字记为 IDLE 控制字, 其定义包含以下内容:

- a) IDLE 控制字以 K28.7 逗号码开始,该逗号码是控制字的最低字节,最先被发送;
- b) IDLE 控制字的第 2 个符号为信道子层控制字标识符 LLCW,该标识符值为 D14.6,表示该控制字由信道子层产生与使用;
- c) IDLE 控制字的第 3 个符号为 D15.6 的值,表示该信道子层控制字是 IDLE 控制字;
- d) IDLE 控制字的第 4 个(最后一个)符号与第 3 个符号相同。

7.2.2.4 初始化控制字 1(INIT1)

初始化控制字 1 记为 INIT1 控制字,其定义包含以下内容:

- a) INIT1 控制字用于信道初始化,以 K28.5 初始逗号码开始,该逗号码是控制字的最低字节,被最先发送;
- b) INIT1 控制字的第 2 个符号为信道子层控制字标识符 LLCW,该标识符值为 D14.6,表示该控制字由信道子层产生与使用;
- c) INIT1 控制字的第 3 个符号为 D6.2 的值,表示该信道子层控制字是 INIT1 控制字;
- d) INIT1 控制字的第 4 个(最后一个)符号与第 3 个符号相同。

7.2.2.5 反相的初始化控制字 1(iINIT1)

反相的初始化控制字 1 记为 iINIT1 控制字,其定义包含以下内容:

- a) iINIT1 控制字用于信道初始化,以 K28.5 初始逗号码开始,该逗号码是控制字的最低字节,被最先发送;
- b) iINIT1 控制字的第 2 个符号为翻转的信道子层控制字标识符 iLLCW,该标识符值为 D17.1,表示该控制字由信道子层产生与使用;
- c) iINIT1 控制字的第 3 个符号为 D25.5 的值,表示该信道子层控制字是翻转的 INIT1 控制字;
- d) iINIT1 控制字的第 4 个(最后一个)符号与第 3 个符号相同;
- e) iINIT1 控制字不能由 SpaceFibre 端口产生。当 SpaceFibre 发送器或接收器的差分对信号 CML+ 与 CML- 的 PCB 走线交叉时(极性互换)才会产生翻转的 INIT1。

7.2.2.6 初始化控制字 2(INIT2)

初始化控制器 2 记为 INIT2 控制字,其定义包含以下内容:

- a) INIT2 控制字用于信道初始化,以 K28.5 初始逗号码开始,该逗号码是控制字的最低字节,被最先发送;
- b) INIT2 控制字的第 2 个符号为信道子层控制字标识符 LLCW,该标识符值为 D14.6,表示该控制字由信道子层产生与使用;
- c) INIT2 控制字的第 3 个符号为 D6.5 的值,表示该信道子层控制字是 INIT2 控制字;
- d) INIT2 控制字的第 4 个(最后一个)符号与第 3 个符号相同。

7.2.2.7 反相的初始化控制字 2(iINIT2)

反相的初始化控制字 2 记为 iINIT2 控制字,其定义包含以下内容。

- a) iINIT2 控制字用于信道初始化,以 K28.5 初始逗号码开始,该逗号码是控制字的最低字节,被最先发送。
- b) iINIT2 控制字的第 2 个符号为翻转的信道子层控制字标识符 iLLCW,该标识符值为 D17.1,表示该控制字由信道子层产生与使用。
- c) iINIT2 控制字的第 3 个符号为 D25.2 的值,表示该信道子层控制字是翻转的 INIT2 控制字。
- d) iINIT2 控制字的第 4 个(最后一个)符号与第 3 个符号相同。

- e) iINIT2 控制字不能由 SpaceFibre 端口产生。当 SpaceFibre 发送器或接收器的差分对信号 CML+ 与 CML- 的 PCB 走线交叉时(极性互换)才会产生反相的 INIT2。

7.2.2.8 初始化控制字 3(INIT3)

初始化控制字 3 记为 INIT3 控制字,其定义包含下列内容。

- a) INIT3 控制字用于信道初始化,以 K28.5 初始逗号码开始,该逗号码是控制字的最低字节,被最先发送。
- b) INIT3 控制字的第 2 个符号为信道子层控制字标识符 LLCW,该标识符值为 D14.6,表示该控制字由信道子层产生与使用。
- c) INIT3 控制字的第 3 个符号为 D24.1 的值,表示该信道子层控制字是 INIT3 控制字。
- d) INIT3 控制字的第 4 个(最后一个)符号信道功能(Capability),该值为 D0.0~D31.7 之间的数据符号,包含表示该信道功能的控制标志信息。
- e) Capability 功能数据字符包含如下字段:
 - 1) Bit0:INIT3 链路复位标志;
 - 2) Bit1:INIT3 信道启动标志;
 - 3) Bit2:INIT3 数据加扰标志;
 - 4) Bit3:INIT3 多信道功能标志;
 - 5) Bit4:INIT3 路由器标志;
 - 6) Bit5~Bit7:保留,发送端将其置 0,接收端将其忽略。
- f) INIT3 链路复位标志置为如下值之一:
 - 1) INIT3 链路复位标志=0,表示发送 INIT3 的 SpaceFibre 端口中至少有一个信道自上次链路复位或上电复位后进入过一次 Active 状态;
 - 2) INIT3 链路复位标志=1,表示发送 INIT3 的 SpaceFibre 端口中没有任何一个信道自上次链路复位或上电复位后进入过 Active 状态。复位时各参数的默认值见第 11 章。
- g) INIT3 信道启动标志置为如下值之一:
 - 1) INIT3 信道启动标志=0,表示发送 INIT3 的 SpaceFibre 信道未设置信道启动(LaneStart)管理参数;
 - 2) INIT3 信道启动标志=1,表示发送 INIT3 的 SpaceFibre 信道设置了信道启动(LaneStart)管理参数。
- h) INIT3 数据加扰标志置为如下值之一:
 - 1) INIT3 数据加扰标志=0,表示发送 INIT3 的 SpaceFibre 端口未对数据帧中的数据施加扰动;
 - 2) INIT3 数据加扰标志=1,表示发送 INIT3 的 SpaceFibre 端口对数据帧中的数据施加了扰动。
- i) INIT3 支持多信道功能标志置为如下值之一:
 - 1) INIT3 多信道功能标志=0,表示发送 INIT3 的 SpaceFibre 信道不具备以多信道链路模式运行的功能;
 - 2) INIT3 多信道功能标志=1,表示发送 INIT3 的 SpaceFibre 信道具备以多信道链路模式运行的功能。
- j) INIT3 路由器标志置为如下值之一:
 - 1) INIT3RoutingSwitch=0,表示发送 INIT3 的 SpaceFibre 信道不是路由器链路中的信道;
 - 2) INIT3RoutingSwitch=1,表示发送 INIT3 的 SpaceFibre 信道是路由器链路中的信道。

7.2.2.9 待机控制字(STANDBY)

待机控制字记为 STANDBY 控制字,其定义包含下列内容。

- a) STANDBY 控制字以 K28.7 逗号开始,该逗号是控制字的最低字节,被最先发送。
- b) STANDBY 控制字的第 2 个符号为信道子层控制字标识符 LLCW,该标识符值为 D14.6,表示该控制字由信道子层产生与使用。
- c) STANDBY 控制字的第 3 个符号为 D30.3 的值,表示该信道子层控制字是 STANDBY 控制字。
- d) STANDBY 控制字的第 4 个(最后一个)符号是待机原因字段,取值 D0.0~D31.7 之间的数据符号,该字段包含了发送 STANDBY 符号的原因。
- e) 若 SpaceFibre 接口不支持信道待机原因的发送,待机原因字段被设置为 D0.0。
- f) 待机原因数据字符包含以下字段:
 - 1) Bit0:当被置为 1 时,表示支持待机原因字段且字段内其他位有效;当被置为 0 时,表示不支持待机原因,待机原因字段内其他位在发送时均被置为 0,且被接收端忽略;
 - 2) Bit1:当被置为 1 时,表示 STANDBY 的发送端在信道断开后设置了自动启动 AutoStart,允许 STANDBY 的接收端再次启动信道;当被置为 0 时,表示 STANDBY 的发送端在信道断开后禁用了 AutoStart,不准许 STANDBY 的接收端再次启动信道;
 - 3) Bit2:当被置为 1 时,表示 STANDBY 的发送端稍后会设置信道启动 LaneStart 试图重新启动信道;当被置为 0 时,表示 LaneStart 将会保持未设置状态;
 - 4) Bit3:当被置为 1 时,表示待机原因字段的第 4 位~第 7 位包含应用实现相关信息(用户自定义);当被置为 0 时,表示待机原因字段的第 4 位~第 7 位被保留;
 - 5) Bit4~Bit7:当 Bit3 被置为 1 时,表示待机原因字段的第 4 位~第 7 位包含应用实现相关信息(用户自定义)来告知信道禁用的原因;当 Bit3 被置为 0 时,表示第 4 位~第 7 位保留,在发送时被置为 0,且被接收器忽略。

7.2.2.10 信号丢失控制字(LOST_SIGNAL)

信号丢失控制字记为 LOST_SIGNAL 控制字,其定义包含下列内容。

- a) LOST_SIGNAL 控制字以 K28.7 逗号开始,该逗号是控制字的最低字节,被最先发送。
- b) LOST_SIGNAL 控制字的第 2 个符号为信道子层控制字标识符 LLCW,该标识符值为 D14.6,表示该控制字由信道子层产生与使用。
- c) STANDBY 控制字的第 3 个符号应为 D4.3 的值,表示该信道子层控制字是 STANDBY 控制字。
- d) STANDBY 控制字的第 4 个(最后一个)符号是信号丢失原因字段,该值为 D0.0~D2.0 之间的数据字符,包含信号丢失原因信息。
- e) 信号丢失原因数据字符包含以下 2 个字段:
 - 1) Bit0~Bit1:the LOS_Cause 状态位;
 - 2) Bit2~Bit7:保留,在发送时置为 0,被接收器忽略。
- f) 状态位被设置为以下值:
 - 1) LOS_Cause=0b00,表示发送 LOST_SIGNAL 的 SpaceFibre 端口中的接收器接收不到足够强度的信号;
 - 2) LOS_Cause=0b01,表示发送 LOST_SIGNAL 的 SpaceFibre 端口检测到了太多的接收错误,导致不能可靠地工作;
 - 3) LOS_Cause=0b10,表示发送 LOST_SIGNAL 的 SpaceFibre 端口中的信道在 Active 状态下接收到了 INIT1,且该信道不是一个 RxOnly 信道。

7.2.3 多信道控制字

7.2.3.1 基本属性

多信道控制字用于对在一条链路中的多条信道上并行传输的控制字进行对齐,并支持不对称链路中单向信道的初始化。多信道控制字的组成见表 4。

表 4 多信道控制字

名称	控制字	功能
激活控制字 ACTIVE	Comma, ACTIVE, ACT_LS, ACT_MS K28.7, D0.1, D0.0-D31.7, D0.0-D31.7	单向信道初始化。 ACT_LS 和 ACT_MS 字段共包含 16 bit,每比特可对应一个信道,第 N bit 对应通道 N。当特定比特置位时,表示发送 ACTIVE 控制字的链路末端的对应通道处于活动状态。ACTIVE 控制字在所有活动信道上同时发送
对齐控制字 ALIGN	Comma, ALIGN, LANES, iLANES K28.7, D23.3, D0.0-D31.7, D0.0-D31.7	多信道对齐。 LANES 字段包含 2 个子字段:信道数量和信道号。信道数量字段长度为 4 bit,包含发送 ALIGN 控制字的链路末端的活跃信道数量。信道号字段长度为 4 bit,包含发送 ALIGN 控制字的信道号。对于具有多个活动信道的多信道链路,在每个信道上发送的 ALIGN 控制字是唯一的,各自都包含其信道号。iLANES 字段是 LANES 字段的按位取反,用于检查信息完整
补齐控制字 PAD	Comma, Fill, Fill, Fill K28.7, K27.7, K27.7, K27.7	多信道补齐。 逗号后面的 3 个符号都是 K27.7,即 Fill 填充,表示该控制字为 PAD 控制字

7.2.3.2 激活控制字(ACTIVE)

激活控制字记为 ACTIVE 控制字,其包含以下内容:

- a) ACTIVE 控制字应以 K28.7 逗号开始,该逗号是控制字的最低字节,被最先发送;
- b) ACTIVE 控制字的第 2 个符号应为 D0.1 的值,表示该控制字是 ACTIVE 控制字;
- c) ACTIVE 控制字的第 3 个符号应包含 16 位 ACT 字段的低 8 位,每位代表一个可用的信道,第 N 位对应信道 N;
- d) ACTIVE 控制字的第 4 个符号应包含 16 位 ACT 字段的高 8 位;
- e) 当 ACTIVE 控制字中 ACT 字段里的特定位被置为 1 时,表示发送 ACTIVE 控制字的链路端中相应的信道处于活跃状态。

7.2.3.3 对齐控制字(ALIGN)

对齐控制字记为 ALIGN 控制字,其定义包含以下内容。

- a) ALIGN 控制字应以 K28.7 逗号开始,该逗号是控制字的最低字节,被最先发送。
- b) ALIGN 控制字的第 2 个符号应为 D23.3 的值,表示该控制字是 ALIGN 控制字。
- c) ACTIVE 控制字的第 3 个符号应包含 8 bit 的 LANES 字段,分为两部分:Bit0~Bit3 为 #LANES 字段,表示活跃信道数量;Bit4~Bit7 为活跃信道编号字段。
- d) ALIGN 控制字中的 4-bit #LANES 字段应包含发送 ALIGN 的链路端中包含的活跃信道数

量,取值 0b0000 表示 16 个信道均处于活跃状态。

- e) ALIGN 控制字中的 4-bit 活跃信道编号字段应包含发送 ALIGN 的活跃信道自身的信道编号。
- f) ALIGN 控制字的第 4 个(最后一个)符号应为第 3 个符号的按位取反结果,用于在接收器收到 ALIGN 控制字后将其内容向上层传递之前检查 LANES 字段的完整性。

7.2.3.4 补齐控制字(PAD)

补齐控制字记为 PAD 控制字,其定义为:

- a) PAD 控制字应以 K28.7 逗号码开始,该逗号码是控制字的最低字节,被最先发送;
- b) PAD 控制字的第 2 个、第 3 个、第 4 个符号应为同一个值 K27.7,表示该控制字为 PAD 控制字。

7.2.4 数据链路控制字

7.2.4.1 帧控制字的使用

对通过链路发送的数据帧、广播帧和空闲帧应使用帧控制字进行封装,数据帧控制字组成见表 5。

表 5 数据帧控制字

名称	控制字	功能
数据帧开始控制字 SDF	Comma,SDF,VC,Reserved K28.7,D16.2,D0.0-D31.0, D0.0	数据帧开始。包含帧类型以及值在 0~31 之间的虚拟信道号
数据帧结束控制字 EDF	EDF,SEQ_NUM,CRC_LS,CRC_MS K28.0,D0.0-D31.7,D0.0-D31.7,D0.0-D31.7	数据帧结束。 EDF 以 K28.0 开头,而不是逗号码,与其他所有控制字均不一样,SEQ_NUM 是由链路控制子层添加到 EDF 中的序列号,用于检查数据帧、广播帧和 FCT 是否丢失、重复或失序。序列号是链路上传输的帧的序列号,在每个虚拟信道上独立的。 CRC 是一个 16 位的 CRC,用于确保数据帧不包含任何错误,具体计算见附录 C 中 C.2
广播帧开始控制字 SBF	Comma,SBF,BC,B_TYPE K28.7,D29.2,D0.0-D31.7, D0.0-D31.7	广播帧开始。包含广播通道(BC)和广播类型(B_TYPE): BC 是一个 0~255 之间的数字,给出广播通道的编号; B_TYPE 是一个 0~255 之间的数字,标识广播消息的类型
广播帧结束控制字 EBF	EBF,STATUS,SEQ_NUM, CRC K28.2,D0.0-D1.0,D0.0-D31.7, D0.0-D31.7	广播帧结束。 EBF 以 K28.2 开头,而不是逗号码,与其他所有控制字均不一样,以区分 EBF STATUS 字段有 6 个保留位、一个 DELAYED 标志和一个 LATE 标志。当路由交换机中的广播消息由于先前的广播消息仍在发送过程中或多个广播消息同时到达而被延迟时,将设置 DELAYED 标志。当广播消息因错误而延迟时,将设置 LATE 标志。广播机制中使用 LATE 标志,以防止广播消息的副本延迟时广播消息的被多次发送。 SEQ_NUM 是由链路控制子层添加到 EBF 中的序列号,用于检查数据帧、广播帧和 FCT 是否丢失、重复或失序。序列号是链路上传输的帧的序列号,并不是每个虚拟信道独立的。 CRC 是一个 8 位的 CRC,用于确保广播帧不包含任何错误,具体计算见 C.3

表 5 数据帧控制字 (续)

名称	控制字	功能
空闲帧开始控制字 SIF	Comma, SIF, SEQ_NUM, CRC K28.7, D4.2, D0.0-D31.7, D0.0-D31.7	空闲帧开始。包含帧类型、序列号 (SEQ_NUM) 和 CRC。 SEQ_NUM 是由链路控制子层添加到 SIF 中的序列号, 用于检查数据帧、广播帧和 FCT 是否丢失、重复或失序。 CRC 是一个 8 位的 CRC, 用于确保 SIF 控制字不包含任何错误。 帧控制字中没有空闲帧结束控制字

7.2.4.2 序列号 (SEQ_NUM)

序列号定义包含下列内容。

- a) 序列号 SEQ_NUM, 用于空闲帧开始 SIF、数据帧结束 EDF、广播帧结束 EBF、FCT 和 ACK、NACK 和 FULL 控制字中, 包含以下 2 个字段:
 - 1) Bit0~Bit6: 7 位序列计数;
 - 2) Bit7: 序列计数极性标志。
- b) 7 位序列计数字段包含一个模 128 的整数, 在发送新的数据帧、广播帧或 FCT 之前的时刻递增。
- c) 链路复位后, 7 位序列计数字段设置为 0。
- d) 链路复位后, 序列计数极性标志设置为 0。
- e) 如果极性标志为 0, 则 7 位序列计数的数值视为正数。
- f) 如果极性标志为 1, 则 7 位序列计数的数值视为负数。
- g) 每次启动新的错误恢复时, 序列计数极性标志应翻转。序列计数极性标志用于区分错误恢复过程开始前发送的帧、ACK 和 NACK。错误恢复过程以 RETRY 控制字开头, 然后开始执行错误恢复的过程。每次启动一个新的错误恢复过程并发送一个 RETRY 控制字时, 序列计数极性标志会翻转, 以区分帧的新序列计数与旧序列计数, 见 9.3.7。

7.2.4.3 数据帧开始控制字 (SDF)

数据帧开始控制字记为 SDF 控制字, 其定义包含以下内容。

- a) SDF 控制字用于指示数据帧的开始。
- b) SDF 控制字以 K28.7 逗号码开始, 该逗号码是控制字的最低字节, 最先被发送。
- c) SDF 控制字的第 2 个符号为 D16.2 的值, 表示该控制字是 SDF 控制字。
- d) SDF 控制字的第 3 个符号为一个值在 D0.0~D31.0 之间的数据符号, 分别包含 VC0~VC31 的虚拟信道编号, 表示该帧是通过哪个虚拟信道传输的。其他值 (除了 D0.0~D31.0) 被保留。
- e) SDF 控制字的第 4 个符号保留, 设置为 D0.0。

7.2.4.4 数据帧结束控制字 (EDF)

数据帧结束控制字记为 EDF 控制字, 其定义包含以下内容。

- a) EDF 控制字用于指示数据帧的结束。
- b) EDF 控制字以 K28.0 控制字符开始, 该控制字符是控制字的最低字节, 最先被发送。
- c) EDF 控制字的第 2 个符号为一个值从 D0.0~D31.7 之间的数据符号, 包含本数据帧的序列号。
- d) EDF 控制字的第 3 个符号为一个值从 D0.0~D31.7 之间的数据符号, 包含 16 位 CRC 校验值

的低字节,该 CRC 校验范围覆盖当前本信道发送的整个数据帧,包括 SDF、EDF,但不包含 EDF 中的 16 位 CRC 字段。

- e) EDF 控制字的第 4 个符号为一个值从 D0.0~D31.7 之间的数据符号,包含 16 位 CRC 校验值的高字节,该 CRC 校验范围覆盖当前本信道发送的整个数据帧,包括 SDF、EDF,但不包含 EDF 中的 16 位 CRC 字段,CRC 用于在数据帧被向上层传送前确认该数据帧的完整性。CRC 校验计算时若遇到 K 码,则只计算 K 码的数值,不包含 K/D 标志位。

7.2.4.5 广播帧开始控制字(SBF)

广播帧开始控制字记为 SBF 控制字,其定义包含以下内容。

- a) SBF 控制字被用于指示广播帧的开始。
- b) SBF 控制字以 K28.7 逗号码开始,该逗号码是控制字的最低字节,最先被发送。
- c) SBF 控制字的第 2 个符号为 D29.2 的值,表示该控制字是 SBF 控制字。
- d) SBF 控制字的第 3 个符号为一个值在 D0.0~D31.7 之间的数据符号,包含该条广播帧所传输的广播通道号。
- e) SBF 控制字的第 4 个符号为一个值在 D0.0~D31.7 之间的数据符号,包含该条广播帧的广播类型 B_TYPE。广播类型决定广播消息的类型,例如时间消息、错误消息、事件信号消息,以及当几个不同的广播消息同时到达时路由器转发该消息的优先级。

7.2.4.6 广播帧结束控制字(EBF)

广播帧结束控制字记为 EBF 控制字,其定义包含下列内容。

- a) EBF 控制字被用于指示广播帧的结束。
- b) EBF 控制字以 K28.2 控制字符开始,该控制字符是控制字的最低字节,最先被发送。
- c) EBF 控制字的第 2 个符号为一个值从 D0.0~D3.0 之间的数据符号,包含以下标志。
 - 1) 第 1 位是 DELAYED 标志,当本广播帧因为其他广播帧而延迟时,该位置“0”。当路由器中的广播消息由于先前的广播消息仍在发送过程中或多个广播消息同时到达而被延迟时,网络层将设置 DELAYED 标志。DELAYED 标志用于指示广播消息受到短暂延迟,不应用于时间同步目的。
 - 2) 第 0 位是 LATE,当置位时,表示广播帧已被链路上发生的暂时性或持久性错误延迟,或没有链路可用于转发广播帧。当链路控制子层中有错误或没有活跃信道可以转发广播帧时,将设置 LATE 标志。LATE 标志用于丢弃旧的广播消息并避免广播消息重复,见 10.11.2。
 - 3) 未设置 DELAYED 标志和 LATE 标志的广播消息的延迟取决于具体的应用实现,并且应在相应设备的手册中详细说明。
- d) EBF 控制字的第 2 个符号中剩下的第 2 位~第 7 位是保留位,在发送时被置为“0”且被接收器忽略。
- e) EBF 控制字的第 3 个符号为一个值在 D0.0~D31.7 之间的数据符号,包含该条广播帧的序列号。
- f) EBF 控制字的第 4 个符号为一个值从 D0.0~D31.7 之间的数据符号,包含 8 位 CRC 校验值,该 CRC 校验范围覆盖当前的整个广播帧,包括 SBF、EBF,但不包含 EBF 中的 8 位 CRC 字段,CRC 用于在广播帧内容被向上层传送前确认该广播帧的完整性。CRC 校验计算时若遇到 K 码,则只计算 K 码的数值,不包含 K/D 标志位。

7.2.4.7 空闲帧开始控制字(SIF)

空闲帧开始控制字记为 SIF 控制字,其定义包含以下内容。

- a) SIF 控制字被用于指示空闲帧的开始。
- b) SIF 控制字以 K28.7 逗号开始,该逗号是控制字的最低字节,最先被发送。
- c) SIF 控制字的第 2 个符号为 D4.2 的值,表示该控制字是 SIF 控制字。
- d) SIF 控制字的第 3 个符号为一个值在 D0.0~D31.7 之间的数据符号,包含本 SpaceFibre 链路中传输的上一个数据帧、FCT 或广播帧的序列号。
- e) SIF 控制字的第 4 个符号为一个值在 D0.0~D31.7 之间的数据符号,包含一个 8 位 CRC 校验,覆盖本控制字的前 3 个字符,用以在将该 SIF 控制字传递给上层发生作用前验证其完整性。CRC 校验计算时若遇到 K 码,则只计算 K 码的数值,不包含 K/D 标志位。

7.2.5 流控制字(FCT)

流控制字记为 FCT 控制字,其定义包含下列内容。

- a) FCT 控制字用于支持虚拟信道上的流控制,流控制字见表 6。
- b) FCT 控制字用于指示指定虚拟信道的接收缓冲区有空间容纳另一个完整的数据帧。
- c) FCT 控制字以 K28.3 控制字符开始,该控制字符是控制字的最低字节,最先被发送。
- d) FCT 控制字的第 2 个符号为一个值在 D0.0~D31.7 之间的数据字符,包含 2 个字段:
 - 1) 一个 3 bit 的 Multiplier 字段,采用 Bit7~Bit5 表示;
 - 2) 一个 5 bit 的通道编号字段 ChannelNumber,采用 Bit4~Bit0 表示。
- e) Multiplier 字段指示了 FCT 的值,当前 FCT 能够交换 $M \times 64$ 个数据字,其中 M 是 FCT 中 Multiplier 字段的值加 1,因此 $M=1 \sim M=8$ 时对应的 Multiplier 字段值分别就是 0~7。
- f) 通道编号字段 ChannelNumber 指示该 FCT 是给哪一个虚拟信道的。
- g) FCT 控制字的第 3 个符号为一个值在 D0.0~D31.7 之间的数据字符,包含当前 FCT 的序列号。FCT 与数据帧和广播帧共用一套序列号计数。
- h) FCT 控制字的第 4 个符号(最后一个符号)为一个值在 D0.0~D31.7 之间的数据字符,包含 8 位CRC 校验,校验范围覆盖 FCT 的前 3 个字符,不包括 8 位 CRC 字段自身,用于接收到 FCT 并传递给上层前确认该 FCT 的完整性。CRC 校验计算时若遇到 K 码,则只计算 K 码的数值,不包含 K/D 标志位。

表 6 流控制字

名称	控制字	功能
流控制字 FCT	FCT, Multiplier/Channel #, SEQ_NUM, CRC K28.3, D0.0-D31.7, D0.0-D31.7, D0.0-D31.7	流控制令牌。指示特定虚拟信道的接收缓冲区有空间容纳另一个完整的数据帧。 FCT 是一个 K 码, K28.3, 表示该控制字是一个 FCT。 Multiplier 是一个 3 bit 字段决定了 FCT 的值。 Channel number 通道编号规定了这个 FCT 是给哪个虚拟信道的。 SEQ_NUM 是由链路控制子层添加到 FCT 中的序列号,用于检查数据帧、广播帧和 FCT 是否丢失、重复或失序。 CRC 是一个 8 位的 CRC,用于确保 FCT 不包含任何错误

7.2.6 错误恢复控制字

7.2.6.1 基本属性

错误恢复控制字被用来确认正确接收的数据帧、广播帧和 FCT,以及否定错误接收的数据帧、广播

帧和 FCT。错误恢复控制字的组成见表 7。

表 7 错误恢复控制字

名称	控制字	功能
确认控制字 ACK	Comma, ACK, SEQ_NUM, CRC K28.7, D2.5, D0.0-D31.7, D0.0-D31.7	帧确认。指示数据帧、广播帧或 FCT 已接收, 没有错误且顺序正确。序列号 SEQ_NUM 是已经被确认的数据帧、广播帧或 FCT 中的序列号。采用 8 位 CRC 校验用来确认 ACK 的完整性
否认控制字 NACK	Comma, NACK, SEQ_NUM, CRC K28.7, D27.5, D0.0-D31.7, D0.0-D31.7	帧否认。指示数据帧、广播帧或 FCT 未能正确接收。序列号 SEQ_NUM 是上一个已经被确认的数据帧、广播帧或 FCT 中的序列号。采用 8 位 CRC 校验用来确认 NACK 的完整性
满控制字 FULL	Comma, FULL, SEQ_NUM, CRC K28.7, D15.3, D0.0-D31.7, D0.0-D31.7	错误恢复缓存满指示。 指示错误恢复缓冲区已满。为了缓解这种情况, 链路的另一端应发送先前接收到的帧/FCT 的确认, 当本端接收到该确认时, 将释放错误恢复缓冲区中的空间。序列号 SEQ_NUM 是上一个已经被确认的数据帧、广播帧或 FCT 中的序列号。采用 8 位 CRC 校验来确认 FULL 的完整性。 如果错误恢复缓冲区足够大, 可以处理大约两倍于信道上可以承载的字符数, 通常不会发送 FULL。仅当错误恢复缓冲区较小, 并且使用很长的传输线缆工作或者在发送数据时链路断开连接时, 才会出现发送 FULL 的情况
重试控制字 RETRY	Comma, RETRY, Reserved, Reserved K28.7, D7.4, D0.0, D0.0	重试控制字, 提供错误恢复指示功能。 用于向链路远端表明本端已经收到了一个 NACK, 即将发送错误恢复缓存中的内容

7.2.6.2 确认控制字 (ACK)

确认控制字记为 ACK 控制字, 其定义包含下列内容。

- ACK 控制字用来指示数据帧、FCT 或广播帧已经被正确接收, 没有错误且顺序正确。
- ACK 控制字以 K28.7 逗号码开始, 该逗号码是控制字的最低字节, 最先被发送。
- ACK 控制字的第 2 个符号为 D2.5 的值, 表示该信道子层控制字是 ACK 控制字。
- ACK 控制字的第 3 个符号为一个值在 D0.0~D31.7 之间的数据符号, 包含本正在被确认的数据帧、FCT 或广播帧的序列号 SEQ_NUM。
- ACK 控制字的第 4 个符号为一个值从 D0.0~D31.7 的数据符号, 包含一个 8 位 CRC 校验, 范围覆盖 ACK 的前 3 个字符, 不包含 8 位 CRC 本身, 用以在接收到 ACK 并向上层传递发生作用前确认其完整性。CRC 校验计算时若遇到 K 码, 则只计算 K 码的数值, 不包含 K/D 标志位。

7.2.6.3 否认控制字 (NACK)

否认控制字记为 NACK 控制字, 其定义包含下列内容。

- NACK 控制字用来指示数据帧、FCT 或广播帧未能被正确接收。
- NACK 控制字以 K28.7 逗号码开始, 该逗号码是控制字的最低字节, 最先被发送。
- NACK 控制字的第 2 个符号为 D27.5 的值, 表示该控制字是 NACK 控制字。

- d) NACK 控制字的第 3 个符号为一个值在 D0.0~D31.7 之间的数据符号,包含上一个正确接收的数据帧、FCT 或广播帧的序列号 SEQ_NUM。若传输 NACK 前已发送的数据帧、FCT 与广播帧的序列号在所传输 NACK 中所带序列号之后,那么这些数据帧、FCT 与广播帧都将被重传,重传时的顺序可能与之前不同。
- e) NACK 控制字的第 4 个符号(最后一个)应为值在 D0.0~D31.7 之间的数据符号,包含一个 8 位 CRC 校验,范围覆盖 NACK 的前 3 个字符,不包含 8 位 CRC 本身,用以在接收到 NACK 并向上层传递发生作用前确认其完整性。CRC 校验计算时若遇到 K 码,则只计算 K 码的数值,不包含 D/K 标志位。

7.2.6.4 满控制字(FULL)

满控制字记为 FULL 控制字,其定义包含下列内容。

- a) FULL 控制字用来指示错误恢复缓存已满。
- b) FULL 控制字以 K28.7 逗号码开始,该逗号码是控制字的最低字节,被最先发送。
- c) FULL 控制字的第 2 个符号为 D15.3 的值,表示该控制字是 FULL 控制字。
- d) FULL 控制字的第 3 个符号为一个值在 D0.0~D31.7 之间的数据符号,包含该 SpaceFibre 链路中传输的上一个数据帧、FCT 或广播帧的序列号 SEQ_NUM。
- e) FULL 控制字的第 4 个符号(最后一个)为值在 D0.0~D31.7 之间的数据符号,包含一个 8 位 CRC 校验,范围覆盖 FULL 的前 3 个字符,不包含 8 位 CRC 本身,用以在接收到 FULL 并向上层传递发生作用前确认其完整性。CRC 校验计算时若遇到 K 码,则只计算 K 码的数值,不包含 D/K 标志位。

7.2.6.5 重试控制字(RETRY)

重试控制字记为 RETRY 控制字,其定义包含下列内容:

- a) RETRY 控制字用来表示错误恢复缓存中的内容即将被发送;
- b) RETRY 控制字以 K28.7 逗号码开始,该逗号码是控制字的最低字节,被最先发送;
- c) RETRY 控制字的第 2 个符号为 D7.4 的值,表示该控制字是 RETRY 控制字;
- d) RETRY 控制字的第 3 个符号与第 4 个符号为保留符号,发送时将其置为 D0.0 并且在接收时忽略。

7.2.7 接收错误指示控制字(RXERR)

接收错误指示控制字记为 RXERR 控制字,其定义包含下列内容。

- a) RXERR 控制字应被信道子层使用,以指示从接收数据流中检测到的游程值错误、非法码错误以及其他错误。接收错误指示控制字不通过 SpaceFibre 链路传输,只在接收器端使用,以向上层协议指示有错误发生。接收错误指示控制字见表 8。
- b) RXERR 控制字用来指示接收到的数据或控制字中含有或可能含有错误。
- c) RXERR 控制字应由一个错误符号 K0.0 后跟随 3 个 D0.0 符号组成。
- d) 因为 RXERR 控制字中包含非法符号,其不能被发送器发送,只能在接收器端用于向上层指示错误。
- e) 当检测到信号丢失(LoS),至少一个 RXERR 控制字被传递给多信道子层或链路控制子层。
- f) 当接收器无输入信号(LoS)时,数据与 RXERR 控制字不能被向上传递给多信道或链路控制子层。
- g) 当接收器无输入信号(LoS)时,RXERR 控制字允许被连续向上传递给多信道或链路控制子层。

表 8 接收错误指示控制字

名称	控制字	功能
接收错误指示控制字 RXERR	Error,保留,保留,保留 K0.0,D0.0,D0.0,D0.0	指示解码器从接收数据流中检测到了错误。接收过程中任何一个出错的字(包含一个或多个符号)都采用 RXERR 替换。当接收同步状态机未进入就绪状态时,接收数据流均替换为 RXERR

7.3 字符

7.3.1 标准字符(N-Chars)

SpaceFibre 标准字符见表 9,其具体包含下列内容。

- SpaceFibre 数据字符直接用数据符号 D0.0~D31.7 表示。如 SpaceFibre 数据字符 0x39 用数据符号 D25.1 表示。SpaceFibre 标准字符,包括数据字符、EOP 与 EEP 与 SpaceWire 标准字符,包括数据字符、EOP 与 EEP 等价,携带相同类型的信息,二者只是编码方式不同。
- SpaceFibre 中的 EOP 用 K29.7 表示。
- SpaceFibre 中的 EEP 用 K30.7 表示。
- 数据帧中的一个字中不能出现多于一个 EOP 或 EEP。
- EOP 与 EEP 字符用于指示一个 SpaceFibre 数据包的结束。
- 数据帧中任意一个字中的数据字符来自同一个 SpaceWire 数据包。
- 紧随 EOP 或 EEP 后的数据字符为后续 SpaceFibre 数据包的第一个数据字符。

表 9 SpaceFibre 标准字符

名称	符号	功能
数据 Data	D0.0~D31.7	每一个 SpaceFibre 字符包含一个字节的的数据。数据字节 0x00 用符号 D0.0 表示,数据字节 0x01 用符号 D01.0 表示,依次类推,数据字节 0xFF 用符号 D31.7 表示
正确包结束符 EOP	K29.7	代表 SpaceFibre 数据包结束 EOP。可出现于数据帧中数据字段的任何点,指示一个 SpaceFibre 数据包的结束。紧随 EOP 之后的数据字节是下一个数据包的第一个字节
错误包结束符 EEP	K30.7	代表 SpaceFibre 数据包错误结束 EEP。可出现于数据帧中数据字段的任何点,指示一个 SpaceFibre 数据包带有错误的结束了。紧随 EEP 之后的数据字节是下一个数据包的第一个字节

7.3.2 填充控制字符(Fill)

填充控制字符,简称为 Fill 字符,其具体包含下列内容。

- Fill 字符用 K27.7 表示,见表 10,用于填充一个 SpaceFibre 数据包的起始或结束部分。
- Fill 字符用来填充一个数据字中 EOP 或 EEP 之后的后续空字符。由于 SpaceFibre 以 4 个 N-Char 标准字符组成的字为单位进行数据发送,因此当 EOP 或 EEP 出现在一个数据字的非

最后一个字符位置时,有必要用 Fill 将一个字中前后的空字符填充,保证数据包发送满足低延时。由 2 个短数据包在数据帧中进行 32 位对齐的数据包末尾的填充字符示例如图 5 所示,其中 D 表示数据字符,E 表示 EOP 或 EEP,F 表示 Fill 字符。

- c) Fill 字符只能在一个包结束的 EOP 或 EEP 与下一个包开始的第一个数据字符之间发送。Fill 字符加在数据包开头时,是为了将长度不是 4 字节的整数倍的路径地址对齐为 4 字节的整数倍,或者用来填充在路由转发中被删除的路径地址字符,以保证在数据包到达目的端时保持其中的字对齐。数据包开头和结尾的填充字符示例如图 6 所示,其中 D 代表数据字符,E 代表 EOP 或 EEP,F 代表 Fill,P 代表一个字符的路径地址。
- d) Fill 字符通过 SpaceFibre 链路传输,在链路接收端被放入虚拟信道缓冲区。
- e) 在一个单信道链路中,不准许传输由 4 个 Fill 组成的数据字。在多信道链路中,数据通过几个信道并行发送,此时包开头或结尾的一行数据有可能通过多信道链路发送,则存在一个或多个信道中有数据但其余信道中只有 Fill 填充的情况。

表 10 填充控制字符

名称	符号	功能
填充控制字符 Fill	K27.7	当虚拟信道输出缓冲区中标准字符数量不是 4 的整数倍时,用填充字符进行填充,以形成完整的字



D	D	D	D
D	E	F	F
D	D	D	D
D	D	D	D
E	F	F	F

图 5 数据包末尾的填充字符

F	F	F	P
P	P	P	P
D	D	D	D
D	D	D	D
E	F	F	F

图 6 数据包开头和结尾的填充字符

7.4 帧格式

7.4.1 基本属性

帧格式的基本属性如下:

- a) 一个帧中包含来自虚拟信道或广播通道的用户数据,或空闲数据;
- b) SpaceFibre 总线支持 3 种类型的帧:数据帧、广播帧、空闲帧。

7.4.2 数据帧

单信道数据帧结构如图 7 所示。

0	7	8	15	16	23	24	31
COMMA	SDF		VC		RESERVED		
DATA 1 LS	DATA 1		DATA 1		DATA 1 MS		
DATA 2 LS	DATA 2		DATA 2		DATA 2 MS		
...		
DATA N LS	DATA N		DATA N		DATA N MS		
EDF	SEQ_NUM		CRC_LS		CRC_MS		

图 7 单信道数据帧结构

单信道数据帧结构说明如下：

- 数据帧以 SDF 控制字开始,以 EDF 控制字结束；
- 每个数据帧中的数据量在 1 个~ $N \times 64$ 个数据字之间,其中 N 是小于或等于管理参数“最大数据发送信道数”的整数；
- 每个数据字包含 4 个 SpaceFibre 标准字符或填充字符 Fills；
- SDF 控制字中的 VC 字段应明确是哪一个虚拟信道发送的这个数据帧以及这个数据帧应由哪个虚拟信道接收,见 7.2.4.3 d)；
- SDF 控制字中的 reserved 字段是被保留的,被置为 D0.0,且在该 SDF 字被接收识别时忽略该字段,见 7.2.4.3 e)；
- EDF 控制字中的序列号 SEQ_NUM 应包含当前帧的序列号值,见 7.2.4.4 c)；
- EDF 控制字中包含 16 位 CRC 校验,覆盖 SDF 控制字、数据帧中的数据、EDF 控制字,见 7.2.4.4 d)和 7.2.4.4 e)。

7.4.3 空闲帧

空闲帧结构如图 8 所示,具体包含下列内容。

- 空闲帧以 SIF 控制字开始。每个空闲帧中的数据量应在 0 个~ $N \times 64$ 个数据字之间,其中 N 是小于或等于管理参数“最大数据发送信道数”的整数。空闲帧至少包含一个 SIF 控制字。
- 空闲帧以下一个数据帧、广播帧或空闲帧的开始作为结束。没有空闲帧结束控制字。
- 空闲帧的 SEQ_NUM 为上一个发送的数据帧、广播帧或 FCT 的序列号。
- 帧中的 PRBS 字段包含一个伪随机序列。伪随机序列 PRBS 应按照本文件中规定的算法产生。用来计算链路复位后第一个空闲帧中 PRBS 的种子值被设置为 0xFFFF。在多信道链路中,每个信道中的 PRBS 字都有相同的值。
- 当新的空闲帧需要发送时,PRBS 发生器应接着上一个空闲帧中的伪随机序列继续产生伪随机序列。
- 当有广播帧、数据帧需要发送时,空闲帧在最近的一个字边沿结束。
- 在任何情况下当一个信道发送了一个含有 64 个 PRBS 字空闲帧时,该帧都应结束。当有更多的广播或数据帧要发送时,空闲帧的长度可以包含 0 个~64 个数据字。
- 当一个空闲帧结束时,若没有信息需要发送,则下一个空闲帧应立刻开始。

0	7 8	15 16	23 24	31
COMMA	SIF	SEQ_NUM	CRC	
PRBS 1 LS	PRBS 1	PRBS 1	PRBS 1 MS	
PRBS 2 LS	PRBS 2	PRBS 2	PRBS 2 MS	
...	
PRBS N LS	PRBS N	PRBS N	PRBS N MS	

图 8 空闲帧结构

7.4.4 广播帧

广播帧结构如图 9 所示。

0	7 8	15 16	23 24	31
COMMA	SBF	BC	B_TYPE	
DATA 1 LS	DATA 1	DATA 1	DATA 1 MS	
DATA 2 LS	DATA 2	DATA 2	DATA 2 MS	
EBF	STATUS	SEQ_NUM	CRC	

图 9 广播帧结构

7.5 数据包格式

SpaceFibre 数据包格式如图 10 所示,具体包含下列内容。

- a) SpaceFibre 数据包包含目的地址、负载以及 EOP 或 EEP 包结束标识。
- b) 数据包的开头为以下内容之一：
 - 1) 链路复位后写入虚拟信道中的第一个数据字符；
 - 2) 在虚拟信道上紧跟在 EOP 或 EEP 之后的数据字符,该数据字符为前一个数据包结束后的第一个数据字符。
- c) 目的地址部分可包含 1 个或多个数据字符,用于指示该数据包的目的地,寻址方式见 10.8。
- d) 负载部分是从目的地址之后直到 EOP 或 EEP 之前的其余字符,包含数据包源端向数据包目的端发送的数据。
- e) SpaceFibre 数据包以下列标准字符之一为结束标志,并且表示新数据包的开始：
 - 1) EOP 标志,表示数据包接收完整；
 - 2) EEP 标志,表示数据包由于发生错误而过早的结束。
- f) 当数据包中发生错误导致数据包中数据丢失时,该数据包以 EEP 结束。
- g) EOP 或 EEP 后的下一个数据字符为新数据包的第一个数据字符,通常是目的地址或者目的地址的第一个字节。
- h) SpaceFibre 数据包可为任意长度,但数据包源不应产生 0 长度数据包。当发生错误时,网络上会出现连续的 EOP 或 EEP,由此产生 0 长度数据包,零长度数据包会被其遇到的第一个路由交换机丢弃。



图 10 SpaceFibre 数据包格式

7.6 控制字与帧优先级

SpaceFibre 总线中所使用的控制字与帧优先级的定义包含下列内容。

- a) 链路建立前的信道初始化过程中,只有 3 个信道子层控制字被发送:INIT1、INIT2、INIT3。
- b) 信道初始化过程中,信道子层控制字应遵循如下优先级:
 - 1) INIT1、INIT2 与 INIT3,最高优先级;
 - 2) 包含 PRBS 的数据字可以在初始化中出现,但是优先级最低。
- c) 一旦一个或多个信道被建立,形成链路,控制字与帧应遵循以下优先级:
 - 1) SKIP,最高优先级;
 - 2) LOST_SIGNAL;
 - 3) STANDBY;
 - 4) ALIGN;
 - 5) ACTIVE;
 - 6) RETRY;
 - 7) 错误恢复缓存中的待重传广播帧;
 - 8) 广播帧;
 - 9) ACK/NACK;
 - 10) 错误恢复缓存中的待重传 FCT;
 - 11) FCT;
 - 12) FULL;
 - 13) 错误恢复缓存中的待重传数据帧;
 - 14) 数据帧;
 - 15) 空闲帧;
 - 16) IDLE,最低优先级。
- d) SKIP 控制字能够插入在数据帧、广播帧或空闲帧中。
- e) LOST_SIGNAL 控制字能够插入在数据帧、广播帧或空闲帧中。
- f) STANDBY 控制字能够插入在数据帧、广播帧或空闲帧中。
- g) ALIGN 控制字能够插入在数据帧、广播帧或空闲帧中。
- h) ACTIVE 控制字能够插入在数据帧、广播帧或空闲帧中。
- i) RETRY 控制字能够插入在数据帧、广播帧或空闲帧中。
- j) 广播帧能够插入在数据帧中。
- k) ACK 控制字能够插入在数据帧或空闲帧中。
- l) NACK 控制字能够插入在数据帧或空闲帧中。
- m) FCT 控制字能够插入在数据帧或空闲帧中。
- n) FULL 控制字能够插入在数据帧或空闲帧中。
- o) 仅当没有数据帧、广播帧或控制字需要发送时,才会发送空闲帧。
- p) 仅当没有其他帧或控制字需要发送时,才会发送 IDLE 控制字。
- q) 当正在重传错误恢复缓存中的广播帧时,应等到错误恢复缓存中所有广播帧都重传完毕后才

能发送新广播帧。

- r) 当正在重传错误恢复缓存中的广播帧或 FCT 时,应等到错误恢复缓存中所有广播帧或 FCT 都重传完毕后才能发送新 FCT。
- s) 当正在重传错误恢复缓存中的广播帧或 FCT 或数据帧时,应等到错误恢复缓存中所有广播帧或 FCT 或数据帧都重传完毕后才能发送新数据帧。

7.7 K 码汇总表

SpaceFibre 总线中所使用的 K 码及其含义见表 11。

表 11 K 码汇总表

K 码	含义	游程值
K0.0	RxError	不适用
K28.0	EDF	0
K28.1	未使用	+2 或 -2
K28.2	EBF	+2 或 -2
K28.3	FCT	+2 或 -2
K28.4	未使用	0
K28.5	初始化 Comma	+2 或 -2
K28.6	未使用	+2 或 -2
K28.7	Comma	0
K23.7	未使用	0
K27.7	填充 Fill	0
K29.7	包结束符 EOP	0
K30.7	错误包结束符 EEP	0

7.8 控制符号汇总表

SpaceFibre 总线中控制符号的数据码值及含义见表 12。

表 12 控制符号汇总表

D 码	含义	游程值
D0.1	ACTIVE	-2 或 +2
D2.5	ACK	-2 或 +2
D4.2	SIF	-2 或 +2
D4.3	LOST_SIGNAL	-2 或 +2
D6.2/D25.5	INIT1/iINIT1	0
D6.5/D25.2	INIT2/iINIT2	0

表 12 控制字符符号汇总表 (续)

D 码	含义	游程值
D7.4	RETRY	-2 或 +2
D14.6/D17.1	LLCW/iLLCW	0
D15.3	FULL	-2 或 +2
D15.6	IDLE	-2 或 +2
D16.2	SDF	-2 或 +2
D23.3	ALIGN	-2 或 +2
D24.1	INIT3	-2 或 +2
D27.5	NACK	-2 或 +2
D29.2	SBF	-2 或 +2
D30.3	STANDBY	-2 或 +2
D31.3	SKIP	-2 或 +2

8 物理层协议

8.1 物理层功能

物理层的接口如图 11 所示,其功能包括下列内容。

- a) 物理层需要对 SpaceFibre 符号进行串行化与解串行化,通过物理介质传输和接收 SpaceFibre 串行数据,并且定义了构成物理介质的线缆、连接器、电缆组件和 PCB 的走线。
- b) 物理层需要接收来自于信道子层的 10 位 TX 符号,并将 10 位的 RX 数据上传给信道子层。
- c) 物理层需要接收以下来自于信道子层的控制信号:
 - 1) 线路驱动使能;
 - 2) 线路接收使能;
 - 3) 线路 CDR 使能;
 - 4) 反转 RX 信号极性。
- d) 物理层需要提供一个用于指示链路信号丢失状态的标志信号给信道子层。
- e) 物理层需要向物理连接的远端物理层发送一个 TX 信号。
- f) 物理层需要接收来自于物理连接远端物理层的 RX 信号。
- g) 物理层应由管理信息库中的以下管理参数控制:
 - 1) 近端串行环回使能;
 - 2) 远端串行环回使能。

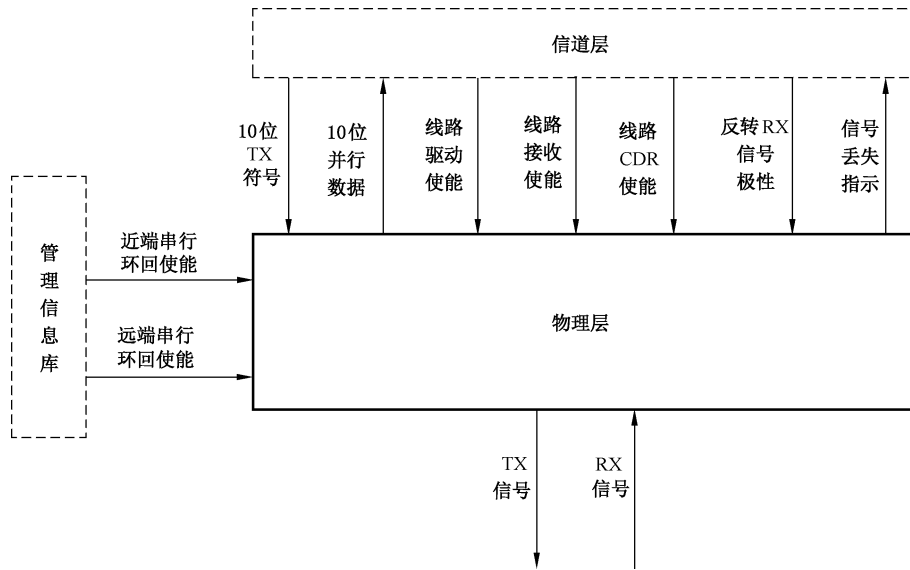


图 11 物理层接口

8.2 串行化

8.2.1 串行器/解串器

8.2.1.1 串行化操作应包含下列操作。

- a) 10 位符号通过物理介质串行传输。
- b) 使用串行器将每个并行 10 位符号转换为串行比特流,并依次发送符号中的每个比特。串行器按并行方式接收 1 个、2 个或 4 个符号输入。
- c) 10 位符号的最低有效位首先传送。
- d) 从线路接收器接收的数字信号由 CDR 电路采样,以恢复串行比特流。
- e) CDR 电路在状态寄存器中指示何时实现位同步,以提供状态信息。

8.2.1.2 解串器操作应包含以下操作。

- a) 恢复的串行比特流由解串器转换为 10 bit 并行形式。解串器提供 1 组、2 组或 4 组 10 位并行数据,具体取决于实现方式。
- b) 当解串器的输入端出现有效的串行比特流时,解串器在收到不超过 150 000 bit 后从该串行比特流中恢复数据。此时保证任何与 CDR 相关的 PLL 或类似电路已锁定。
- c) 当反转 RX 极性控制信号声明有效时,解串器的 10 位并行输出的每个位都反转。这可通过反转进入解串器的串行数据或反转解串器输出的每位数据实现。

8.2.2 串行环回

串行环回机制的功能包含:

- a) SpaceFibre 端口中应提供串行环回机制以支持测试;
- b) 近端串行环回应将发送端串行器输出的位流直接连接到接收端解串器的串行输入端;
- c) 远端串行环回应将线路接收器输出的数字信号直接连接到线路驱动器的输入端。

8.2.3 数据码速率

SpaceFibre 信道的数据码速设置包含下列内容。

- a) SpaceFibre 信道的数据码速率在信道的每个方向上应相同,偏差不超过 $\pm 0.01\%$ 。
- b) SpaceFibre 信道的数据码速率应为以下速率之一: 1 Gbit/s, 1.25 Gbit/s, 2 Gbit/s, 2.5 Gbit/s, 3.125 Gbit/s, 5 Gbit/s 或 6.25 Gbit/s, 且偏差在 $\pm 0.01\%$ 之内。
- c) SpaceFibre 信道两端的数据码速率可以是任意速率,但应确保两端的数据码速率相同,偏差在 $\pm 0.01\%$ 。在多信道链路中每个信道采用相同的时钟或参考时钟,以相同的数据码速率运行。

8.2.4 信号丢失

SpaceFibre 信道中的 LoS 信号称为 NoSignal 信号,具体定义包含下列内容。

- a) 当物理层接收器接收的 RX 信号电平低于接收器的最小阈值时,或者当信号变化密度低于某个值时,应声明 NoSignal 信号。
- b) 当接收器未提供 LoS 功能时, NoSignal 信号可按以下任一方式设置。
 - 1) 始终置为无效,表示接收器始终收到信号。
 - 2) 以其他方式确定其值。例如 NoSignal 的值可以通过计算给定时间内接收器输出端的位转换次数来确定,并在位转换密度达到合适的阈值时声明 NoSignal。

9 数据链路层协议

9.1 信道子层协议

9.1.1 信道子层功能

SpaceFibre 总线信道子层功能具体包括下列内容。

- a) 信道子层负责在 SpaceFibre 信道上建立通信,将数据和控制字编码为符号,在信道上发送和接收符号,将接收到的符号解码为数据和控制字,并在信道发生错误后重新建立信道上的通信。
- b) 对于单信道链路,信道子层应从链路控制子层接收数据字和链路控制子层控制字。
- c) 对于单信道链路,信道子层应将数据字和链路控制子层控制字传递到链路控制子层。
- d) 对于多信道链路,信道子层应从多信道子层接收数据字、多信道控制字和链路控制子层控制字。
- e) 对于多信道链路,信道子层应将数据字、多信道子层控制字和链路控制子层控制字传递给多信道子层。
- f) 信道子层应接收来自链路控制子层或多信道子层的信道复位(LaneReset)命令。
- g) 信道子层应接收来自链路控制子层或多信道子层的近端功能控制信息。
- h) 信道子层应将 INIT3 的 Capability 字段中接收的远端功能信息报告给链路控制子层或多信道子层。
- i) 信道子层应接收来自多信道子层的 RxOnly、TxOnly 和 FarEndActive 信道控制信息。
- j) 在单信道链路的情况下,信道子层应向多信道子层或链路控制子层提供信道状态信息。
- k) 信道子层应将发送符号传递给物理层。
- l) 信道子层应从物理层接收 10 位并行数据。
- m) 信道子层应使用以下信号控制物理层:
 - 1) 线路驱动器使能;
 - 2) 线路接收器使能;
 - 3) 线路 CDR 使能;

- 4) 反转 RX 信号极性。
- n) 当接收器输入端没有信号时,物理层应通知信道子层 NoSignal。
- o) 信道子层应由管理信息库中的以下管理参数控制,其中 i 是信道号:
 - 1) 信道启动 LaneStart(i);
 - 2) 自启动 AutoStart(i);
 - 3) 信道复位 LaneReset(i);
 - 4) 并行环回 ParallelLoopback(i),当实现了该功能时可提供;
 - 5) 待机原因 Standbyreason(i)。
- p) 信道子层应向管理信息库提供以下状态信息,其中 i 是信道号:
 - 1) 信道状态 LaneState(i);
 - 2) 错误信息 ErrorInformation(i);
 - 3) 信号丢失指示 LossOfSignal(i);
 - 4) 远端能力参数 Far-EndCapabilities(i);
 - 5) 接收极性 RXPolarity(i)。

图 12 所示为单信道链路的信道子层输入和输出接口,图 13 所示为多信道链路的信道子层输入和输出接口。

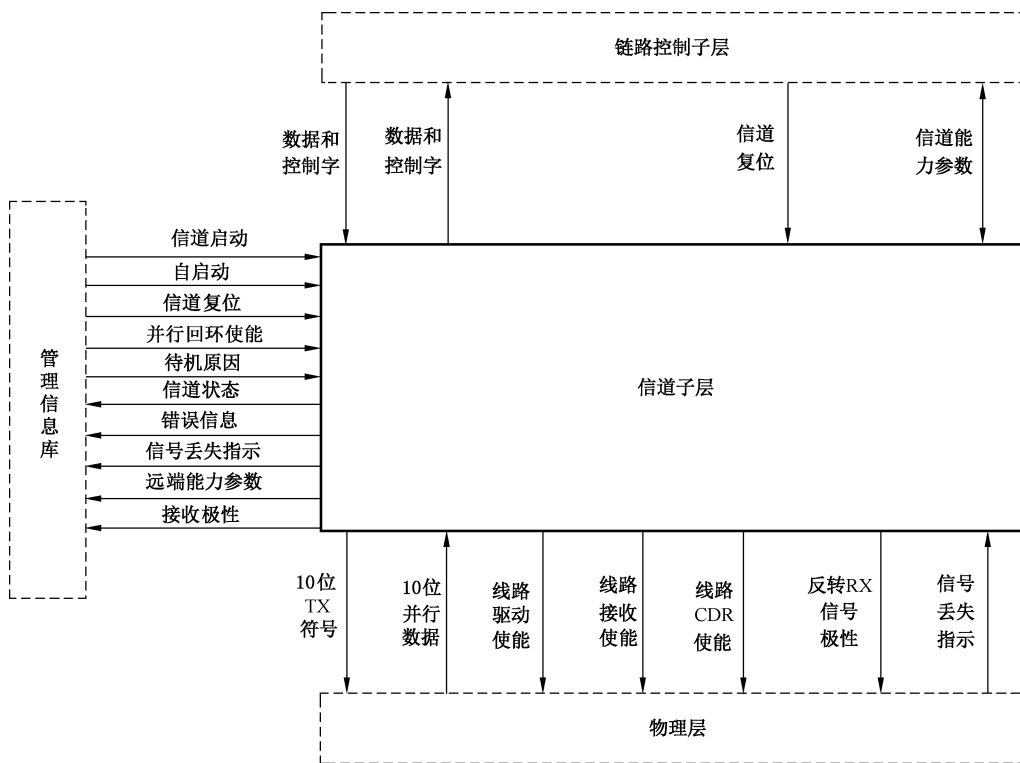


图 12 单信道链路的信道子层接口

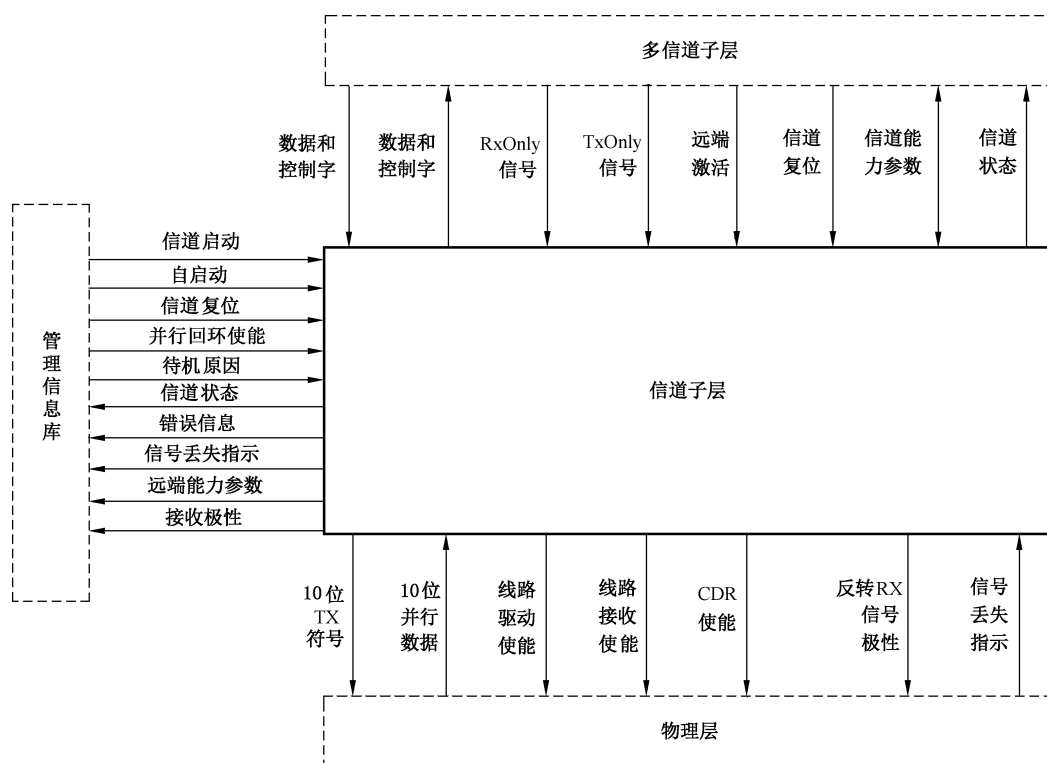
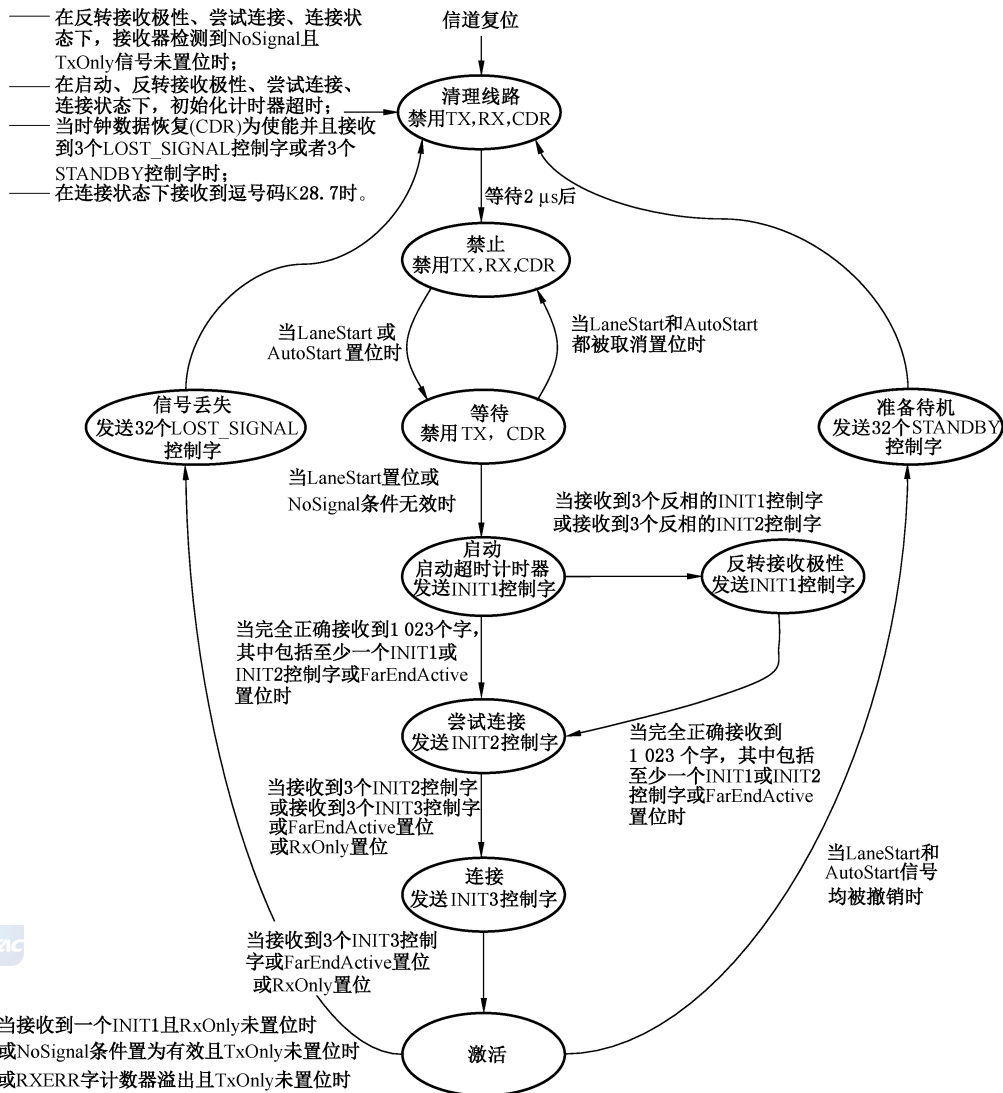


图 13 多信道与信道子层的连接接口

9.1.2 信道初始化与待机管理

9.1.2.1 基本属性

SpaceFibre 信道的初始化由信道初始化状态机控制,包括建立连接并响应待机管理请求。信道初始化状态机的状态转换如图 14 所示。在状态机正常运行中,对各种状态转移条件进行连续判断,包括 Start、AutoStart、RxOnly、TxOnly 和管理参数的值。



注 1: NoSignal 无信号表示所有接收器的输入接口都未检测到信号。

注 2: 在所有状态下设置; RxOnly 置位时禁用 TX, TxOnly 置位时禁用 RX。

图 14 信道初始化状态机

9.1.2.2 RXERR 控制字计数器

RXERR 控制字计数器设置应满足：

- 设置 RXERR 控制字计数器用于检查信道上的 BER；
- 在信道复位(LaneReset)时, RXERR 控制字计数器的值为 0, RXERR 控制字计数器的工作方式见 9.1.2.11。

9.1.2.3 远端激活状态指示(FarEndActive)

远端激活状态指示信号设置应满足：

- 对每个信道提供一个远端激活状态指示信号 FarEndActive；
- 当某个信道远端的信道初始化状态机处于激活状态时, 近端通过任意信道能接收到 ACTIVE 控制字并进行确认, 声明该信道的 FarEndActive 状态信号；

- c) 对于单信道链路,不声明 FarEndActive 状态信号。

9.1.2.4 清理线路状态(ClearLine)

清理线路状态记为 ClearLine,应满足以下要求。

- a) 信道初始化状态机根据以下条件之一进入 ClearLine 状态:
- 1) 收到 LaneReset 命令;
 - 2) 从 Started 状态,当初始化超时计时器到期时;
 - 3) 从 InvertRxPolarity 状态,当初始化超时计时器到期时;
 - 4) 从 Connecting 状态,当初始化超时计时器到期时;
 - 5) 从 Connected 状态,当初始化超时计时器到期时;
 - 6) 从 Connected 状态,当收到逗号码 K28.7 时;
 - 7) 在任意状态下,当 CDR 为使能并且接收到 3 个连续 LOST_SIGNAL 字时;
 - 8) 在任意状态下,当 CDR 为使能并且接收到 3 个连续 STANDBY 字时;
 - 9) 从 InvertRxPolarity 状态,当在接收器处检测到 NoSignal 且 TxOnly 信号未声明时;
 - 10) 从 Connecting 状态,当在接收器处检测到 NoSignal 且 TxOnly 信号未声明时;
 - 11) 从 Connected 状态,当在接收器处检测到 NoSignal 且 TxOnly 信号未声明时;
 - 12) 在 PrepareStandby 状态下,发送 32 个 STANDBY 控制字后;
 - 13) 从 LossOfSignal 状态,发送 32 个 LOST_SIGNAL 控制字后。
- b) 当处于 ClearLine 状态时,信道初始化状态机执行以下操作:
- 1) 启动一个 2 μ s 超时计时器;
 - 2) 不准许复位信道管理参数寄存器;
 - 3) 关闭接收器位反转功能;
 - 4) 不准许用发送器的驱动器。
- c) 当处于 ClearLine 状态时,信道初始化状态机不准许用接收器驱动器、接收器和 CDR 电路。这是为了节省功耗,同时复位时钟恢复逻辑以免出现问题导致串行器/解串器发生故障,从而造成信道断开。
- d) 信道初始化状态机根据以下条件离开 ClearLine 状态:当 2 μ s 超时计时器到期时,进入 Disabled 状态。这个时间足以让信号通过所要求的最长光纤电缆(100m)后再返回,并留出了在电缆每端处理信号的时间。

9.1.2.5 禁用状态(Disabled)

禁用状态记为 Disabled,应满足下列要求。

- a) 信道初始化状态机在以下条件下进入 Disabled 状态:从 ClearLine 状态,在等待 2 μ s 后。
- b) 当处于 Disabled 状态时,信道初始化状态机不准许用发送器驱动器、接收器和 CDR 电路。
- c) 信道初始化状态机根据下列条件之一离开 Disabled 状态,并按照下面给定的顺序进行判断和转移:
- 1) 当 LaneReset 被置位时,转移到 ClearLine 状态;
 - 2) 当 LaneStart 或 AutoStart 置位时,转移至 Wait 状态。

9.1.2.6 等待状态(Wait)

等待状态记为 Wait,应满足下列要求。

- a) 信道初始化状态机在 Disabled 的状态,且 LaneStart 或 AutoStart 置位时进入 Wait 状态。
- b) 当处于 Wait 状态时,信道初始化状态机启动下列任一操作:

- 1) 启用包含 NoSignal 检测电路的接收器;
- 2) 仅启用 NoSignal 检测电。
- c) 当处于 Wait 状态时,信道初始化状态机不准许用发送器驱动器,以节省功耗。
- d) 当处于 Wait 状态时,信道初始化状态机不准许用接收器和 CDR 电路。
- e) 当处于 Wait 状态且 TxOnly 被置位时,信道初始化状态机不准许用接收器。
- f) 信道初始化状态机根据以下条件之一离开 Wait 状态,并按以下顺序进行判断:
 - 1) 当 LaneReset 被置位时,转移到 ClearLine 状态;
 - 2) 当 LaneStart 和 AutoStart 都被取消置位时,转移到 Disabled 状态;
 - 3) 当 LaneStart 置位或 NoSignal 取消置位时,转移至 Started 状态。

9.1.2.7 启动状态(Started)



启动状态记为 Started,应满足下列要求。

- a) 信道初始化状态机在 Wait 状态,且 LaneStart 被置位或 NoSignal 被撤销时进入 Started 状态。
- b) 当处于 Started 状态时,信道初始化状态机执行以下操作:
 - 1) 进入状态后,启动一个初始化超时计时器,设置为传输 5000 个字所需的时间;
 - 2) 当 RxOnly 未置位时,使能发送器驱动器;
 - 3) 当 TxOnly 未置位时,启用接收器和 CDR;
 - 4) 发送 INIT1 控制字;
 - 5) 接收信道子层控制字 LLCW。
- c) 当处于 Started 状态并且 RxOnly 被置位时,信道初始化状态机不准许用发送器驱动器,以节省功耗。
- d) 当处于 Started 状态并且 TxOnly 被置位时,信道初始化状态机不准许用接收器和 CDR。
- e) 当处于 Started 状态时,信道初始化状态机可重复发送 INIT1 控制字并且后面跟随最多 64 个伪随机数据字的序列。采用 INIT1 后跟随最多 64 个伪随机数据字的序列替代连续的 INIT1 序列,可以减少初始化期间的 EM 发射并支持自适应均衡,这在 5 Gbit/s 以上数据信号速率下是必需的。
- f) 信道初始化状态机根据以下条件之一离开 Started 状态,以下条件按给定的顺序进行判断。
 - 1) 当 LaneReset 被置位时,转移到 ClearLine 状态。
 - 2) 当 FarEndActive 条件被置位时,转移至 Connecting 状态。FarEndActive 条件通过多信道链路中的双向信道接收,见 9.1.2.3。对于单信道链路,FarEndActive 条件处于撤销状态。
 - 3) 当共接收到 1023 个字,其中包括至少一个 INIT1 或 INIT2 控制字,并且中间未被任何 RXERR 控制字打断时,转移至 Connecting 状态。
 - 4) 当接收到 3 个反相的 INIT1 控制字或 3 个反相 INIT2 控制字,并且中间未收到任何 RX-ERR 控制字时,转移至 InvertRxPolarity 状态。
 - 5) 当初始化超时计时器到期时,转移至 ClearLine 状态。
 - 6) 当收到 3 个连续的 LOST_SIGNAL 或 3 个连续的 STANDBY 控制字时,转移到 ClearLine 状态。

9.1.2.8 反转接收极性状态(InvertRxPolarity)

反转接收极性状态记为 InvertRxPolarity,应满足下列要求。

- a) 信道初始化状态机根据以下条件之一进入 InvertRxPolarity 状态:
 - 1) 在 Started 状态下,当接收到 3 个反相的 INIT1 控制字,且在此过程中未接收到任何

RXERR控制字时；

- 2) 在 Started 状态下,当接收到 3 个反相的 INIT2 控制字,且在此过程中未接收到任何 RXERR 控制字时。
- b) 当处于 InvertRxPolarity 状态时,信道初始化状态机执行以下操作:
 - 1) 当 RxOnly 未置位时,使能发送器驱动器;
 - 2) 当 TxOnly 未置位时,启用接收器和 CDR;
 - 3) 反转接收到的比特位;
 - 4) 发送 INIT1 控制字;
 - 5) 接收信道子层控制字 LLCW。
 - c) 当处于 InvertRxPolarity 状态且 RxOnly 被置位时,信道初始化状态机不允许用发送器驱动器。
 - d) 当处于 InvertRxPolarity 状态并且 TxOnly 被置位时,信道初始化状态机不允许用接收器和 CDR。此处要求是为了与其他状态保持一致,但在 TxOnly 置位时实际无法进入 InvertRxPolarity 状态,因此无法接收任何内容。
 - e) 当处于 InvertRxPolarity 状态时,信道初始化状态机可以重复发送 INIT1 控制字并且后面跟随最多 64 个伪随机数据字的序列。
 - f) 信道初始化状态机根据下列条件之一离开 InvertRxPolarity 状态,并按下列给定的顺序进行判断:
 - 1) 当 LaneReset 被置位时,转移到 ClearLine 状态;
 - 2) 当在接收器输入端检测到 NoSignal 且未声明 TxOnly 信号时,转移至 ClearLine 状态;
 - 3) 当 FarEndActive 条件声明时,转移至 Connecting 状态;
 - 4) 当共接收到 1 023 个字,其中包括至少一个 INIT1 或 INIT2 控制字,并且中间未收到任何 RXERR 控制字时,转移至 Connecting 状态;
 - 5) 当初始化超时计时器到期时,转移至 ClearLine 状态;
 - 6) 当收到 3 个连续的 LOST_SIGNAL 或 3 个连续的 STANDBY 控制字时,转移到 ClearLine 状态。

9.1.2.9 尝试连接状态(Connecting)

尝试连接状态记为 Connecting,应满足下列要求。

- a) 信道初始化状态机根据以下条件之一下进入 Connecting 状态:
 - 1) 在 Started 状态下,当 FarEndActive 置位时;
 - 2) 在 Started 状态下,当总共接收到 1 023 个字,其中包括至少一个 INIT1 或 INIT2 控制字,并且中间未收到任何 RXERR 控制字时;
 - 3) 在 InvertRxPolarity 状态下,当 FarEndActive 置位时;
 - 4) 在 InvertRxPolarity 状态下,当总共接收到 1 023 个字,其中包括至少一个 INIT1 或 INIT2 控制字,并且中间未收到任何 RXERR 控制字时。
- b) 当处于 Connecting 状态时,信道初始化状态机执行以下操作:
 - 1) 当 RxOnly 未置位时,使能发送器驱动器;
 - 2) 当 TxOnly 未置位时,启用接收器和 CDR;
 - 3) 发送 INIT2 控制字;
 - 4) 接收信道子层控制字 LLCW。
- c) 当处于 Connecting 状态且 RxOnly 被置位时,信道初始化状态机不允许用发送器驱动器。
- d) 当处于 Connecting 状态且 TxOnly 被置位时,信道初始化状态机不允许用接收器和 CDR。

- e) 当处于 Connecting 状态时,信道初始化状态机可以重复发送 INIT2 控制字并且后面跟随最多 64 个伪随机数据字的序列。
- f) 信道初始化状态机根据以下条件之一上离开 Connecting 状态,并按以下顺序进行判断:
 - 1) 当 LaneReset 被置位时,转移到 ClearLine 状态;
 - 2) 当在接收器输入端检测到 NoSignal 且未声明 TxOnly 信号时,转移至 ClearLine 状态;
 - 3) 当 RxOnly 置位时,转移至 Connected 状态;
 - 4) 当 FarEndActive 条件声明时,转移至 Connected 状态;
 - 5) 当接收到 3 个 INIT2 控制字且其间未收到任何 RXERR 控制字时,转移至 Connected 状态;
 - 6) 当接收到具有相同初始化参数的 3 个 INIT3 控制字,且其间未收到任何 RXERR 控制字时,转移至 Connected 状态;
 - 7) 当初始化超时计时器到期后,转移至 ClearLine 状态;
 - 8) 当收到 3 个连续的 LOST_SIGNAL 或 3 个连续的 STANDBY 控制字时,转移至 ClearLine 状态。

9.1.2.10 连接状态(Connected)

连接状态记为 Connected,应满足下列要求。

- a) 信道初始化状态机根据以下条件之一进入 Connected 状态:
 - 1) 在 Connecting 状态下,当 FarEndActive 置位时;
 - 2) 在 Connecting 状态下,当 RxOnly 置位时;
 - 3) 在 Connecting 状态下,当接收到 3 个 INIT2 控制字,且其间未收到任何 RXERR 控制字时;
 - 4) 在 Connecting 状态下,当接收到 3 个具有相同初始化参数的 INIT3 控制字,且其间未收到任何 RXERR 控制字时。
- b) 当处于 Connected 状态时,信道初始化状态机执行以下操作。
 - 1) 当 RxOnly 未置位时,使能发送器驱动器。
 - 2) 当 TxOnly 未置位时,启用接收器和 CDR。
 - 3) 发送 INIT3 控制字,在其中最高字符位置设置初始化参数,即 Capability 字段,具体设定如下:
 - Bit0:INIT3 链路复位标志;
 - Bit1:INIT3 信道启动标志;
 - Bit2:INIT3 数据加扰标志;
 - Bit3:INIT3 多信道功能标志;
 - Bit4:INIT3 路由器标志;
 - Bit5~Bit7:保留位,发送时设置为 0,接收时忽略。
 - 4) 接收信道子层控制字 LLCW。
 - 5) 保存 INIT3 控制字最高字符提供的初始化参数,即 Capability 字段。
 - 6) 当接收到具有相同初始化参数的 3 个 INIT3 控制字,且其间未收到任何 RXERR 控制字时,将 INIT3 控制字中 Capability 字段的值传送给链路控制子层或多信道子层,同时传送给管理信息库。
 - 7) 将 RXERR 字计数器清零。
- c) 当处于 Connected 状态且 RxOnly 被置位时,信道初始化状态机不允许用发送器驱动器。
- d) 当处于 Connected 状态且 TxOnly 被置位时,信道初始化状态机不允许用接收器和 CDR。

- e) 信道初始化状态机根据以下条件之一下离开 Connected 状态,这些条件按给定的顺序进行判断。
- 1) 当 LaneReset 被置位时,转移到 ClearLine 状态。
 - 2) 当在接收器输入端检测到 NoSignal 且 TxOnly 信号未声明时,转移至 ClearLine 状态。
 - 3) 当 RxOnly 置位时,移至 Active 状态。
 - 4) 当 FarEndActive 条件被置位并且至少发送了一个 INIT3 控制字时,转移到 Active 状态。
 - 5) 当接收到具有相同初始化参数的 3 个 INIT3 控制字,且其间未收到任何 RXERR 控制字,并且至少发送了 3 个 INIT3 控制字时,转移到 Active 状态。
 - 6) 当初始化超时计时器到期后,转移到 ClearLine 状态。
 - 7) 当收到 3 个连续的 LOST_SIGNAL 或 3 个连续的 STANDBY 控制字时,转移到 ClearLine 状态。
 - 8) 当收到一个 Comma 码 K28.7 时,转移至 ClearLine 状态。当 INIT3 控制字因任何原因丢失时,因为 LOST_SIGNAL 和 STANDBY 都以 Comma 码开头,本项要求可减少错误恢复时间。

9.1.2.11 激活状态(Active)

激活状态记为 Active,应满足下列要求。

- a) 信道初始化状态机根据以下条件下进入 Active 状态:
- 1) 在 Connected 状态下,当声明了 FarEndActive 条件并且已发送至少一个 INIT3 控制字时;
 - 2) 在 Connected 状态下,当 RxOnly 被置位时;
 - 3) 在 Connected 状态下,当接收到 3 个具有相同 Capability 参数值的 INIT3 控制字,且其间未收到任何 RXERR 控制字,并且至少已发送了 3 个 INIT3 控制字时。
- b) 当处于 Active 状态时,信道初始化状态机执行以下操作。
- 1) 停止初始化超时计时器。
 - 2) 当 RxOnly 未置位时,使能发送器驱动器。
 - 3) 当 TxOnly 未置位时,启用接收器和 CDR。
 - 4) 使能发送来自多信道子层或链路控制子层的数据和控制字。
 - 5) 将接收到的数据和控制字传递到多信道子层或链路控制子层。
 - 6) 每当收到 RXERR 时,将 RXERR 控制字计数器加 1。
 - 7) 每当收到超过 15 000 个~16 384 个字时,将 RXERR 控制字计数器减 1。
 - 8) 当接收到 LOST_SIGNAL,STANDBY 或 INIT1 控制字时,向多信道子层或链路控制子层传递 1 个 RXERR 控制字。
 - 9) 过滤出信道控制字,见表 3,保证它们不会传递到多信道子层或链路控制子层。信道控制字由信道初始化状态机使用,不传递到所在的多信道子层或链路控制子层。
- c) 当处于 Active 状态且 RxOnly 被置位时,信道初始化状态机不准许用发送器驱动器。
- d) 当处于 Active 状态且 TxOnly 被置位时,信道初始化状态机不准许用接收器和 CDR。
- e) 信道初始化状态机根据下列条件之一离开 Active 状态,这些条件按下列给定的顺序进行判断。
- 1) 当 LaneReset 被置位时,转移到 ClearLine 状态。
 - 2) 当声明 NoSignal 指示接收器处有信号丢失且 TxOnly 未声明时,转移至 LossOfSignal 状态。
 - 3) 当 RXERR 控制字计数器达到 255 并且 TxOnly 未声明时,转移至 LossOfSignal 状态。

- 4) 当接收到一个 INIT1 控制字且 RxOnly 未声明时,转移至 LossOfSignal 状态。
- 5) 当 LaneStart 和 AutoStart 信号均撤销声明时,转移到 PrepareStandby 状态。
- 6) 当收到 3 个连续的 LOST_SIGNAL 或 3 个连续的 STANDBY 控制字时,转移至 ClearLine 状态。
- 7) 当离开此状态时,至少向多信道子层或链路控制子层传递 1 个 RXERR 控制字。当 RXERR 字错误计数器达到 255 时,表明信道中的误码率已经非常高,因此重新初始化信道以尝试恢复正确的运行状态。

9.1.2.12 准备待机状态(PrepareStandby)

准备待机状态记为 PrepareStandby,应满足下列要求。

- a) 信道初始化状态机根据以下条件进入 PrepareStandby 状态:在 Active 状态下,当 LaneStart 和 AutoStart 信号均被撤销时。
- b) 当处于 PrepareStandby 状态时,信道初始化状态机执行以下操作。
 - 1) 当 RxOnly 未置位时,使能发送器驱动器。
 - 2) 当 TxOnly 未置位时,启用接收器和 CDR。
 - 3) 发送 32 个 STANDBY 控制字。32 个 STANDBY 控制字能够充分保证在信道近端进入 ClearLine 状态后,触发信道远端检测到 NoSignal 状态之前,已经有 3 个 STANDBY 控制字通过信道远端的接收流水通道和接收弹性缓存。当 SpaceFibre 信道的近端进入 PrepareStandby 状态时,远端根据接收到 3 个 STANDBY 控制字进入 ClearLine 状态,而非检测到 NoSignal 信号并通过 LossOfSignal 状态。
- c) 当处于 PrepareStandby 状态并且 RxOnly 被置位时,信道初始化状态机不准许用发送器驱动器。
- d) 当处于 PrepareStandby 状态并且 TxOnly 被置位时,信道初始化状态机不准许用接收器和 CDR。
- e) 信道初始化状态机根据以下条件之一离开 PrepareStandby 状态,这些条件应按给定的顺序进行判断:
 - 1) 当 LaneReset 被置位时,移动到 ClearLine 状态;
 - 2) 当发送了 32 个 STANDBY 控制字时,移动到 ClearLine 状态;
 - 3) 当接收到 3 个连续的 LOST_SIGNAL 或 3 个连续的 STANDBY 控制字时,移动到 ClearLine 状态。

9.1.2.13 信号丢失状态(LossOfSignal)



信号丢失状态记为 LossOfSignal,应满足下列要求。

- a) 信道初始化状态机根据以下条件进入 LossOfSignal 状态。
 - 1) 在 Active 状态下,当接收到一个 INIT1 且 RxOnly 未置位时。
 - 2) 在 Active 状态下,当接收器中表示输入无信号的 NoSignal 条件置为有效,且 TxOnly 未置位时。
 - 3) 在 Active 状态下,当 RXERR 字计数器溢出且 TxOnly 未置位时。每次收到一个 RXERR 字时,计数器的值加 1,同时计数器的值周期性的递减。此计数器的溢出产生从 Active 状态退出的条件,并表明发生了一个持续性的错误。
- b) 当处于 LossOfSignal 状态时,信道初始化状态机执行以下操作。
 - 1) 当 RxOnly 未置位时,使能发送器驱动器。
 - 2) 当 TxOnly 未置位时,启用接收器和 CDR。

- 3) 发送 32 个 LOST_SIGNAL 控制字。当 SpaceFibre 信道的近端进入 LossOfSignal 状态并发送 LOST_SIGNAL 控制字后,链路的远端根据接收到 3 个 LOST_SIGNAL 控制字而进入 Clearline 状态,而非检测到 NoSignal 信号并通过 LossOfSignal 状态。
- c) 当处于 LossOfSignal 状态并且 RxOnly 被置位时,信道初始化状态机不准许用发送器驱动器。
- d) 当处于 LossOfSignal 状态且 TxOnly 被置位时,信道初始化状态机不准许用接收器和 CDR。此要求是为了与其他状态一致,实际上如果在 LossOfSignal 状态则信道不可能为 TxOnly,因为此前正在接收符号流。
- e) 信道初始化状态机根据以下条件之一离开 LossOfSignal 状态,并按给定的顺序进行判断:
 - 1) 当 LaneReset 被置位时,移动到 ClearLine 状态;
 - 2) 当发送了 32 个 LOST_SIGNAL 控制字时,移至 ClearLine 状态;
 - 3) 当接收到 3 个连续的 LOST_SIGNAL 或 3 个连续的 STANDBY 控制字时,移动到 Clear-Line 状态。

9.1.3 数据码速率补偿

数据码速率补偿设计应满足下列内容。

- a) 信道每端的发送器以相同的标称数据信号速率发送数据。
- b) 当信道两端以相同的标称数据信号速率运行时,数据信号速率的最大允许误差为 $\pm 0.01\%$ 。由于在信道的每一端使用的本地时钟的差异,信道一端的发送器和信道另一端的接收器的数据信号速率可能不同。典型晶体振荡器的性能优于 $\pm 0.01\%$ 数据信号速率误差。
- c) 采用接收弹性缓存补偿信道两端的数据信号速率差异。
- d) 信道初始化状态机进入 Active 状态后,在发送数据流中每 5 000 个字插入一次 SKIP 控制字。
- e) SKIP 控制字用于补偿信道两端之间数据信号速率的任何微小差异。

9.1.4 IDLE 控制字

IDLE 控制字定义为以下内容。

- a) 当没有其他数据或控制字发送时,应发送 IDLE 控制字。这样保证在发送的数据中不留有间隙,因为接收器中的 CDR 应对输入数据流保持锁定。
- b) 收到 IDLE 控制字后,从接收弹性缓冲区中读出时应丢弃。

9.1.5 并行环回

并行环回功能具体包含以下内容:

- a) 如果没有提供串行环回功能,见 8.2.2,则应在 SpaceFibre 端口中提供并行环回功能以支持测试;
- b) 当提供了串行环回功能时,可以在 SpaceFibre 端口中提供并行环回功能用于测试;
- c) 在使能情况下,当完成数据速率调整后,近端并行环回应采用发送流中的字替换接收流中的字;
- d) 在使能情况下,当完成数据速率调整后,远端并行环回应采用接收流中的字替换发送流中的字。

9.1.6 符号同步

符号同步设计应满足以下要求:

- a) 符号之间的边界通过检测 Comma 码序列确定,至少要用 Comma 码序列的 7 位进行符号同步;

- b) 正的 Comma 码序列为 00111111;
- c) 负的 Comma 码序列为 11000000;
- d) 对正和负的 Comma 码都进行检测并用于同步;
- e) 当使用继承的串行器/解串器设备时,可仅对正 Comma 码或仅对负 Comma 码执行同步;
- f) 10 位宽输入流对齐或重新对齐,以形成正确对齐的符号流,以便每个 10 位组包含一个完整的符号;
- g) 每当 Comma 码序列被检测的位置与上一个 Comma 码序列被检测的位置不同时,对 10 位宽输入流进行重新对齐。

9.1.7 字同步

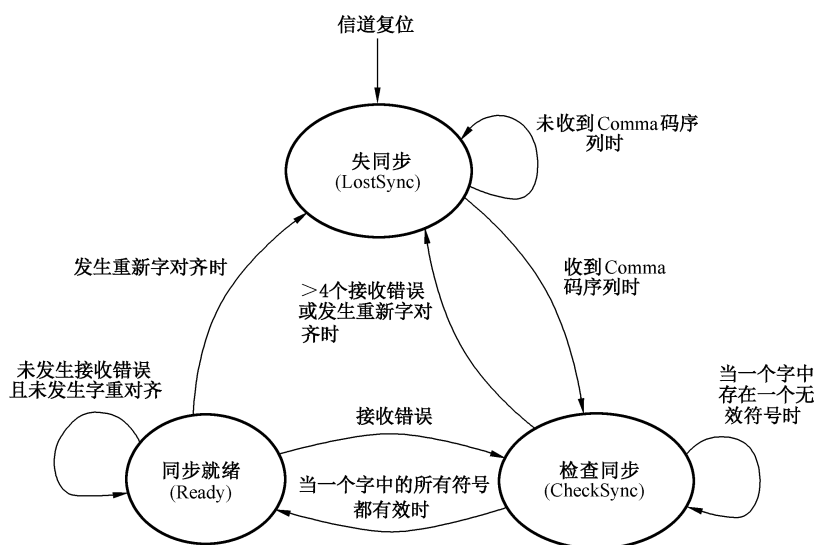
字同步设计应满足下列要求。

- a) 1 个符号字包括 4 个符号。
- b) 在符号字中传输的第一个符号为最低有效符号。
- c) Comma 码只能出现在符号字的最低有效符号位置。
- d) 只要接收到 Comma 码序列,就执行字同步动作。
- e) 字同步选择连续的 4 个符号为一组,则 Comma 码序列在最低有效符号位置出现。
- f) 达到字同步时,第一个字在最低有效符号位置包含一个 Comma 码控制符号,后面跟着 3 个符号。
- g) 后续的每 4 个符号组构成连续的符号字。
- h) 发生以下任何一种情况时,重新进行字同步:
 - 1) 10 位宽数据流重新对齐,见 9.1.6 g);
 - 2) Comma 码出现在一个字中最低有效符号位置之外的任何位置。
- i) 当字重新对齐时,当前接收的字设置为 RXERR 控制字。
- j) 如果游程值错误,将其指示给接收同步状态机并将当前符号设置为 RxError,符号表示为 K0.0。
- k) 如果接收到无法识别的符号,则向接收同步状态机指示符号错误,并将当前符号设置为 RxError(K0.0)。
- l) 如果一个字中包含了一个 RxError,即 K0.0 符号,表明发生了错误,该字与前一个字一起设置为 RXERR 控制字。

9.1.8 接收同步状态机

9.1.8.1 基本属性

应使用接收同步状态机来确定输入的符号和字何时达到了同步。接收同步状态机的状态图如图 15 所示。



注 1: 接收错误 = 不平衡错误或检测到无效符号时。

注 2: 重新字对齐 = 字同步失效, 即 Comma 码序列位于第一个符号以外的位置。

图 15 接收同步状态机

9.1.8.2 失同步状态 (LostSync)

失同步状态记为 LostSync, 应满足以下要求。

- a) 根据以下条件之一进入 LostSync 状态:
 - 1) 收到 LaneReset 命令;
 - 2) 在 CheckSync 状态下, 当发生字重新对齐时, 或者当接收到包含无效符号或包含游程值错误的符号总共超过 4 个时;
 - 3) 在 Ready 状态下, 当发生字重新对齐时。
- b) 处于 LostSync 状态时, 接收同步状态机执行以下操作: 用 RXERR 控制字替换任何接收到的数据和控制字。
- c) 接收同步状态机根据以下条件离开 LostSync 状态: 当收到 Comma 码序列时, 转移到 CheckSync 状态。

9.1.8.3 检查同步状态 (CheckSync)

检查同步状态记为 CheckSync, 应满足以下要求。

- a) 根据以下条件之一进入 CheckSync 状态:
 - 1) 在 LostSync 状态下, 当收到 Comma 码序列时;
 - 2) 在 Ready 状态下, 当发生不平衡错误或检测到无效符号时。
- b) 处于 CheckSync 状态时, 接收同步状态机执行以下操作:
 - 1) 接收符号;
 - 2) 对接收到的包含无效符号或包含游程值错误的字进行计数。
- c) 接收同步状态机根据以下条件之一离开 CheckSync 状态, 并按以下顺序进行判断:
 - 1) 当 LaneReset 被置位时, 转移至 LostSync 状态;
 - 2) 当发生字重新对齐时, 转移至 LostSync 状态;
 - 3) 当接收到包含无效符号或包含游程值错误的字数总共超过 4 个时, 转移至 LostSync

状态；

- 4) 当一个字中的所有符号都有效时,转移到 Ready 状态。

9.1.8.4 同步就绪状态(Ready)

同步就绪状态记为 Ready,应满足以下要求。

- a) 根据以下条件进入 Ready 状态:在 CheckSync 状态下,当一个字中的所有符号都有效时。
- b) 处于 Ready 状态时,接收同步状态机启动正常接收符号流的操作。
- c) 接收同步状态机根据以下条件之一离开 Ready 状态,并按以下顺序进行判断:
 - 1) 当 LaneReset 被置位时,转移至 LostSync 状态;
 - 2) 当发生游程值错误或收到无效符号时,转移至 CheckSync 状态;
 - 3) 当发生字重新对齐时,转移至 LostSync 状态。

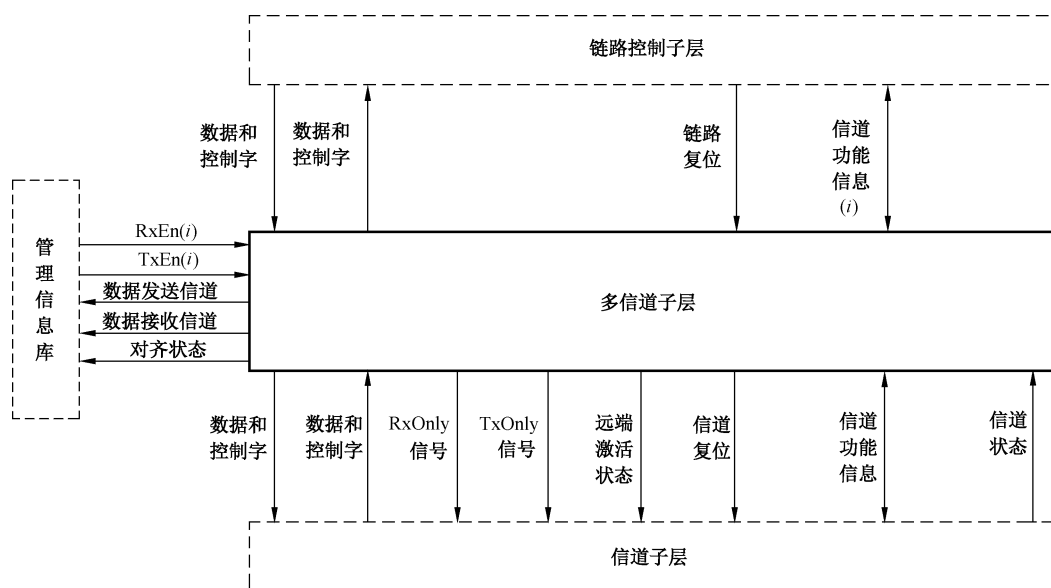
9.2 多信道子层协议

9.2.1 多信道子层功能

多信道子层功能包括下列内容。

- a) 多信道子层负责协调管理多个信道使其作为一条 SpaceFibre 链路运行,并在需要的时候负责信道故障恢复。
- b) 多信道子层应在作为单个链路共同运行的多个信道上发送和接收数据字和链路控制子层控制字。多信道子层允许多个信道同时运行,以提供比单信道更高的带宽。
- c) 多信道子层应从链路控制子层接收数据字和链路控制子层控制字。
- d) 多信道子层应将信道子层接收的数据字和链路控制子层控制字传递到链路控制子层。
- e) 多信道子层应将数据字以及链路控制子层和多信道子层控制字传递到信道子层。
- f) 多信道子层应从信道子层接收数据字以及链路控制子层和多信道子层控制字。
- g) 当信道为仅发送信道时(TxOnly),多信道子层应通知信道子层。
- h) 当信道为仅接收信道时(RxOnly),多信道子层将通知信道子层。
- i) 当信道的远端处于激活状态(FarEndActive)时,多信道子层应通知信道子层。
- j) 多信道子层应能够对一个或多个近端信道接口分别声明信道复位 LaneReset,以保证多信道子层可以对信道子层中的每个信道独立执行信道复位 LaneReset。
- k) 多信道子层应通过信道子层告知每个信道的状态,见 9.2.9。
- l) 多信道子层应接收来自数据链路的近端功能控制信息。
- m) 多信道子层应将通过 INIT3 控制字的 Capability 字段接收的所有信道的远端能力信息报告给链路控制子层。
- n) 多信道子层应将近端 Capability 控制信息传递给信道子层。
- o) 多信道子层应从信道子层接收每个信道远端能力信息,该信息通过 INIT3 控制字中每个信道的 Capability 字段进行接收。
- p) 多信道子层应具有管理参数,该参数确定哪些信道允许发送(TxEn)和允许接收(RxEn)。
- q) 多信道子层应向管理信息库提供以下状态信息:
 - 1) 数据发送信道;
 - 2) 数据接收信道;
 - 3) 对齐状态。

多信道子层的输入输出接口如图 16 所示。



注：i 为信道号。

图 16 多信道子层接口

9.2.2 多信道链路

多信道 SpaceFibre 链路设计应满足下列要求。

- a) 多信道 SpaceFibre 链路包含两个或多个信道，最大信道数量为 16，这些信道共同运行以提供比单个信道更高的带宽。
- b) 多信道子层中的每个信道具有信道编号，编号从 0 开始并按照每个信道依次增加。如果有 4 个信道，则编号为 0、1、2、3。
- c) 链路一端的信道号为 L 的信道连接到链路另一端的信道号为 L 的信道上。
- d) 具有给定数量信道的多信道接口能够连接到另一个具有不同信道数量的多信道接口，只要保证具有相同编号的信道连接在一起。图 17 中显示了链路两端具有不同信道数的多信道链路。
- e) 多信道链路中的所有信道基于相同的时钟或参考时钟，按照相同的数据码速率运行。

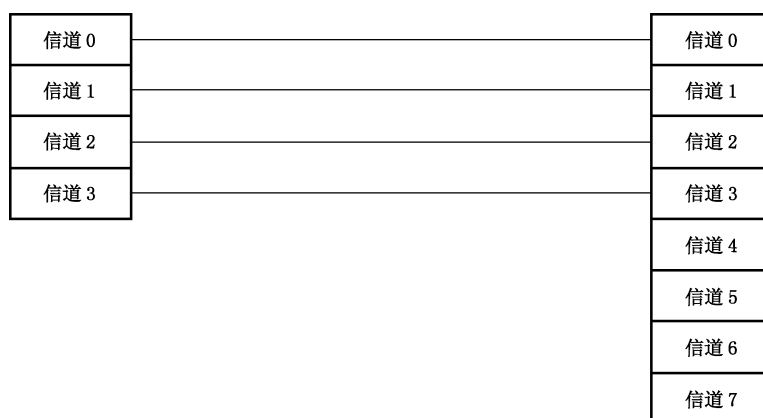


图 17 两端信道数量不同的多信道链路

9.2.3 多信道旁路

多信道操作应能够被关闭或者旁路,从而支持 SpaceFibre 链路只运行在一条信道上。

9.2.4 多信道分配

9.2.4.1 多信道行

多信道链路上的字构成行的具体设计应满足以下要求。

- a) 通过多信道链路发送的数据和控制字被分布在链路的数据发送信道上。
- b) 一组传递给数据发送信道的数据字和控制字共同组成一行字,其中每个字对应一个数据发送信道。图 18 给出了多信道分布示例,在此示例中有 3 个活动的数据发送信道和 1 个非活动的数据发送信道。字编号代表数据帧中的数据字。信道子层的控制字会复制到所有信道上。
- c) 一行包括一组 L 个字,其中 L 是数据发送信道的数量。
- d) 当发送数据链路控制字时,每个数据链路控制字被复制到所有数据发送信道上进行发送,形成填充有相同控制字的行。其中 EDF 控制字除外,因为不同的 EDF 控制字具有不同 CRC 值,EDF 的 CRC16 字段在每个信道上会根据该信道中发送的数据不同而不同。
- e) 当接收到所有数据发送信道上经过复制形成的一行数据链路控制字时,选择其中任意一个传递到链路控制子层。

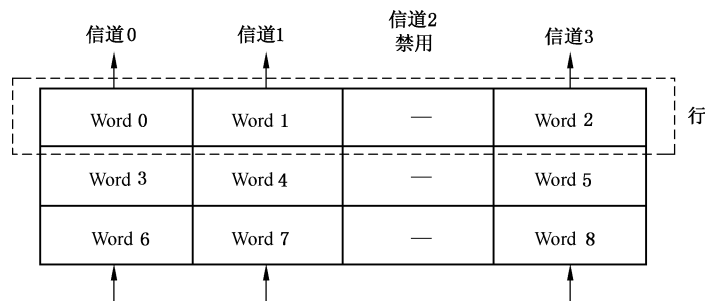


图 18 多信道链路上的字构成行

9.2.4.2 数据帧的多信道处理

数据帧的多信道处理应包含下列内容。

- a) 来自数据帧的包括 EOP,EEP 和 Fill 的一系列数据字分布在发送行上,第一个数据字分配在最低编号的数据发送信道,下一个数据字分配在次低编号的数据发送信道上,依次类推一直到最高编号的数据发送信道。图 19 中给出了示例。最低编号的数据发送信道传输该行的第一个数据字,下一个数据发送信道传输该行的下一个数据字,依此类推到最高编号的数据发送信道上传输该行的最后一个数据字。
- b) 如果数据帧的长度不是数据发送信道数的整倍数,则在数据帧末尾 EDF 控制字之前的发送行中使用 PAD 控制字来填充未使用的字,PAD 控制字的数量小于数据发送信道的数量。图 20 中给出了示例。
- c) 数据加扰在每个数据发送信道上独立执行。
- d) 16 位 CRC 校验值在每个数据发送信道上独立计算。
- e) EOP、EEP 和 Fill 控制字符包括在针对数据帧中的每列数据计算的 16 位 CRC 中,对于 K 码仅包含数据字段,忽略 K 标志位。数据列指的是某一信道中的数据。

- f) PAD字不应包括在针对数据帧中的每列数据计算的16位CRC中。PAD不是链路控制子层中生成的原始数据帧的一部分,因此不包含在链路控制子层中定义的16位CRC中。
- g) 在数据帧结尾,当EDF控制字放置在每个活动信道上时,对每个数据发送信道独立计算的16位CRC放在EDF控制字的CRC_LS和CRC_MS字段中。
- h) 在信道或多信道子层中完成16位CRC的生成和检查。
- i) 数据帧中的最大字数为 $N \times 64$,其中 N 为小于或等于“最大数据发送信道数量”参数的整数。这样在使用多信道时可增加数据帧大小,从而使得因控制字复制产生的协议开销不会增加。

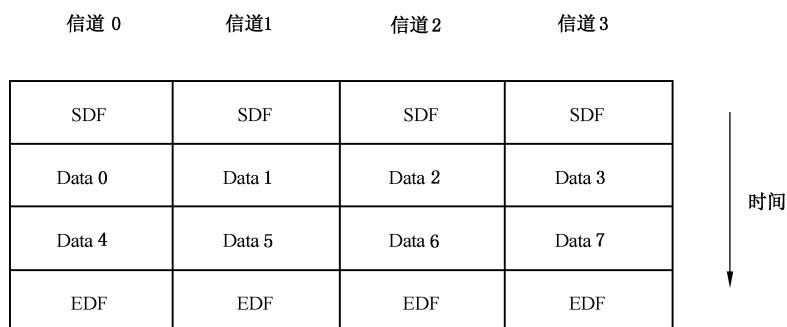


图 19 在多信道链路上展开数据

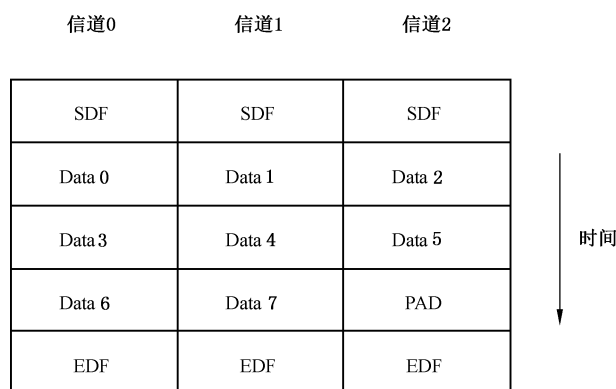


图 20 多信道链路中使用 PAD 控制字补齐

9.2.4.3 广播消息的多信道处理

来自广播帧的数据字应被复制并通过同一发送行中的所有数据发送信道进行发送。即多信道系统中的广播消息占用的带宽是单信道系统中占用带宽的 L 倍,其中 L 是数据发送信道的数量。

9.2.4.4 空闲帧的多信道处理

空闲帧中的每个PRBS数据字应被复制并通过同一发送行中的所有数据发送信道发送。

9.2.4.5 信道子层控制字的多信道处理

信道子层控制字的多信道处理包含下列要求。

- a) 当发送了一个SKIP控制字时,多信道子层应同时向所有信道发送指示。随后SKIP控制字同时所有信道上发送,即所有活动信道都包含一个SKIP控制字。
- b) IDLE控制字不应从任何活动信道发送。

- c) 多信道子层应始终向活动信道传送字,从而保证信道子层不需要插入 IDLE 控制字。
- d) 实际设计中允许通过活动信道发送 IDLE 控制字,但需要通过所有活动信道同时发送。即发送一个完整的 IDLE 控制字行。

9.2.5 多信道汇聚

多信道汇聚处理应满足下列要求。

- a) 采用一组对齐 FIFO(每个信道一个)来保证每个信道上接收到的数据和控制字在读取之前能够正确对齐成行。
- b) 当数据或控制字通过信道到达时,将其置于该信道的对齐 FIFO 中。
- c) 当接收来自数据帧的数据字时,最低编号的数据接收信道接收该行的第一个数据字,下一个数据接收信道接收该行的下一个数据字,依此类推至最高编号的数据接收信道接收该行的最后一个数据字。
- d) 当对齐 FIFO 中的信息对齐时,数据或控制字从所有数据接收信道的对齐 FIFO 一次一行地并行读出。
- e) 对于接收到的具有相同链路控制子层控制字的接收行,只能将其中一个链路控制子层控制字传递到链路控制子层。
- f) 当接收行无效或包含 RXERR 时,整个行被丢弃,并向链路控制子层传递一个 RXERR 控制字。

9.2.6 信道对齐

9.2.6.1 基本属性

信道对齐操作包含下列要求。

- a) 信道对齐操作应保证链路的每个活跃信道都正确对齐,以便在从信道读取信息时,能够一起完整读取一行字。一条链路中各个信道的细微差异可能导致一个信道接收到某一行中的字比其他信道同一行中的字稍早或稍晚,由此导致读取行中的数据发生错误。行对齐能够对延迟差异进行补偿,确保行的所有字能够排列规整一起读取;
- b) 在对齐之后,第一行读取应包含接收到的第一组 L 个字,下一行包含下一组 L 个字,依此类推。行对齐如图 21 所示。





图 21 多信道链路的行对齐

9.2.6.2 有效和无效的接收行

信道中包含有效和无效的接收行，其各自满足下列条件。

- a) 有效的接收行应满足以下条件之一：
 - 1) 仅包含数据字或由数据字和 PAD 控制字组成；
 - 2) 仅包含控制字，不含任何 PAD 控制字，有关 PAD 的详细信息见 9.2.4.2。
- b) 无效的接收行应同时满足以下两个条件：
 - 1) 包含一个或多个数据字或 PAD 控制字；
 - 2) 包含非 PAD 的一个或多个控制字。

需要注意 EOP、EEP 和 Fill 是可以出现在数据帧中的控制字符，不是控制字。

9.2.6.3 激活控制字和对齐控制字

多信道中激活控制字 (ACTIVE) 和对齐控制字 (ALIGN) 使用应满足下列要求。

- a) ACTIVE 控制字由多信道链路的每一端发送给另一端，以表明哪条信道为活动信道。
- b) 当接收到具有相同值的 2 个连续 ACTIVE 控制字时，则该 ACTIVE 控制字有效。
- c) ALIGN 控制字用于在活动信道上对齐一行。

- d) 当链路需要对齐其信道时,在所有活动信道上重复发送 7 个 ACTIVE 控制字跟随 1 个 ALIGN 控制字的序列,直到链路中的所有信道对齐,见 9.2.7。
- e) 当收到的 ALIGN 控制字中包含的 iLANES 字段与 LANES 字段为按位反转时,认为该 ALIGN 控制字正确。
- f) 接收错误的 ALIGN 控制字忽略,不用于字对齐,也不标记错误。接收错误的 ALIGN 控制字与正确接收的 ALIGN 控制或 ACTIVE 控制字外的其他字同等看待。
- g) 当满足以下所有条件时,正确接收的 ALIGN 控制字判为有效:
 - 1) ALIGN 控制字的 # LANES 字段等于接收 ALIGN 控制字的链路端中接收使能(RxEn 置位)的活动信道数;
 - 2) ALIGN 控制字的 LaneNumber 字段中包含的信道号与接收 ALIGN 控制字的信道的信道号相同。
- h) 当满足以下任何条件时,正确接收的 ALIGN 控制字判为无效:
 - 1) ALIGN 控制字的 # LANES 字段不等于接收 ALIGN 控制字的链路端中接收使能(RxEn 置位)的活动信道数;
 - 2) ALIGN 控制字的 LaneNumber 字段中包含的信道号与接收 ALIGN 控制字的信道的信道号不相同。
- i) 当一个接收行不是全部由 ACTIVE 控制字构成但包含一个或多个 ACTIVE 控制字时,该接收行被丢弃,并向链路控制子层传递一个 RXERR 控制字。

9.2.6.4 字对齐缓存

SpaceFibre 总线采用 FIFO 实现字对齐缓存,对齐 FIFO 应满足下列要求。

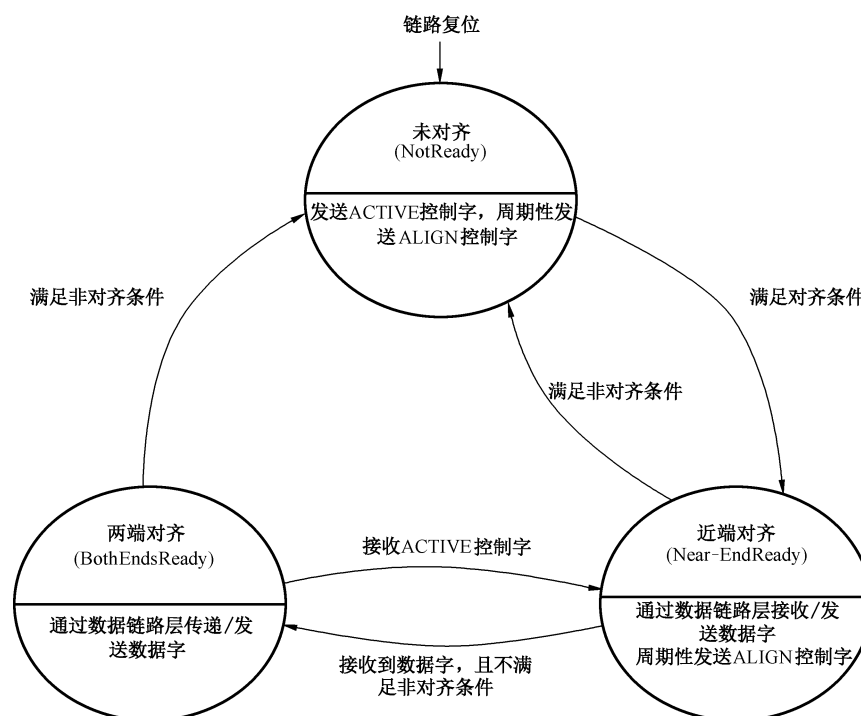
- a) 为每个信道设置一个对齐 FIFO。
- b) 每个对齐 FIFO 能存储 3 个或 4 个字。因为每 8 个字中会发送 1 次带有 ALIGN 控制字的行,将对齐 FIFO 的大小限制为小于 8 个字,避免接收混淆不同发送行的 ALIGN 控制字。其典型偏差最多为 1 或 2 个字。
- c) 当数据或控制字从信道子层到达时,被放置在该信道的对齐 FIFO 中。
- d) 当要从对齐 FIFO 中读出的下一个字是有效的 ALIGN 控制字时,需要所有数据接收信道读取的下一个字均是有效的 ALIGN 控制字,否则不从对齐 FIFO 中读取 ALIGN 控制字。
- e) 当要读取的下一个字是数据字或非有效 ALIGN 控制字之外的控制字时,从对齐 FIFO 读取该字。
- f) 当要从每个数据接收信道的对齐 FIFO 读取的下一个字是有效的 ALIGN 控制字时,该行已完全对齐,所有 ALIGN 控制字同时从对齐 FIFO 中读出。
- g) 当行完全对齐并且已经读取了 ALIGN 控制字时,后续每个行包含对齐的数据和控制字,每行被读取,直到发生未对齐情况并且对齐状态机进入 NotReady 状态。对齐状态机的描述见 9.2.7。行的对齐如图 21 所示。未对齐情况的描述见 9.2.7.2 c)。
- h) 如果在向某个对齐 FIFO 写入一个字后出现满的情况,则清空所有对齐 FIFO。当一个 ALIGN 控制字丢失并被 RXERR 控制字替换时,可能会发生这种情况。
- i) 当信道进入活动状态时,清空该信道的对齐 FIFO。当信道之前处于接收过程时,可以确保对齐 FIFO 不包含之前的字,因为要开始进行对齐。

9.2.7 对齐状态机

9.2.7.1 基本属性

对齐状态机基本属性包括下列内容。

- a) 对齐状态机负责保证在与链路控制子层之间传递任何字之前对齐所有活动信道的数据行。对齐状态机的状态图如图 22 所示。
- b) 当出现以下所有情况时,出现对齐条件:
 - 1) 所有信道都已对齐;
 - 2) 远端处于活动状态的信道与近端处于活动状态的信道相同。
- c) 当出现下列一种或多种情况时,出现非对齐条件:
 - 1) 处于活跃状态的近端信道已发生变化;
 - 2) 处于活跃状态的远端信道已发生变化;
 - 3) 有一个对齐 FIFO 溢出;
 - 4) 收到一个正确但无效的 ALIGN 控制字;
 - 5) 收到一个无效的接收行;
 - 6) 进入 Near-EndReady 状态后 $4\ \mu\text{s}$ 内发生一个 RXERR。



注 1: 对齐条件为所有信道对齐且远端处于激活状态的信道与近端处于激活状态的信道相同。

注 2: 非对齐条件为处于激活状态的近端信道发生变化或处于激活状态的远端信道发生变化或有对齐 FIFO 溢出或正确收到一个无效的 ALIGN 控制字或收到一个无效的接收行或进入近端对齐状态后 $4\ \mu\text{s}$ 内发生 RXERR。

图 22 对齐状态机

9.2.7.2 未对齐状态 (NotReady)

未对齐状态记为 NotReady, 应满足下列要求。

- a) 对齐状态机根据以下条件之一进入 NotReady 状态:

- 1) 链路复位;
 - 2) 在 Near-EndReady 状态,当出现未对齐条件时;
 - 3) 在 BothEndsReady 状态,当出现未对齐条件时。
- b) 当处于 NotReady 状态时,对齐状态机执行以下操作:
- 1) 在所有活动信道上重复发送 7 个 ACTIVE 控制字后面跟随 1 个 ALIGN 控制字的序列;
 - 2) 向链路控制子层传递 RXERR 字;
- c) 当对齐条件满足时,对齐状态机跳出 NotReady 状态并转移至 Near-EndReady 状态。

9.2.7.3 近端对齐状态(Near-EndReady)

近端对齐状态记为 Near-EndReady,应满足下列要求。

- a) 对齐状态机根据以下条件之一进入 Near-EndReady 状态:
- 1) 从 NotReady 状态,当满足对齐条件时;
 - 2) 从 BothEndsReady 状态,当接收到一个 ACTIVE 控制字时。
- b) 当处于 Near-EndReady 状态时,对齐状态机执行以下操作:
- 1) 从链路控制子层接收数据字和链路控制子层控制字,并将它们传递到活动信道进行发送;
 - 2) 从活动信道接收数据字和链路控制子层控制字,并将它们传递到链路控制子层;
 - 3) 在每个近端活动信道上每 7 个数据字或控制字后重复发送一个 ALIGN 控制字。
- c) 对齐状态机根据以下条件之一跳出 Near-EndReady 状态,并按以下顺序进行判断:
- 1) 当链路复位被置位时,进入 NotReady 状态;
 - 2) 当出现未对齐情况时,转移到 NotReady 状态;
 - 3) 当在一个或多个信道中接收到一个数据字并且活动信道对齐时,不是未对齐,则转移到 BothEndsReady 状态。

9.2.7.4 对端对齐状态(BothEndsReady)

对端对齐状态记为 BothEndsReady,应满足以下要求。

- a) 当以下所有条件满足时,对齐状态机从 Near-EndReady 状态进入 BothEndsReady 状态:
- 1) 在一个或多个信道中接收到一个数据字;
 - 2) 活动信道不是未对齐。
- b) 当处于 Both-EndsReady 状态时,对齐状态机执行以下操作:
- 1) 从链路控制子层接收数据字和链路控制子层控制字,并将它们传递到活动信道进行发送;
 - 2) 从活动信道接收数据字和链路控制子层控制字,并将它们传递到链路控制子层。
- c) 对齐状态机根据以下条件之一跳出 BothEndsReady 状态,并按下列的顺序进行判断:
- 1) 当链路复位被置位时,进入 NotReady 状态;
 - 2) 当出现未对齐情况时,转移到 NotReady 状态;
 - 3) 当收到一个 ACTIVE 控制字时,进入 Near-EndReady 状态。

9.2.8 非对称链路

多信道链路中的非对称链路功能包含下列内容。

- a) 链路应包括部分单向的信道,这些单向信道仅在一个方向上发送信息,但至少要有—条信道能够在两个方向上发送信息。一个包含一条或多条单向信道的链路至少有一条信道为双向信道,这样单向信道可以被正确初始化。
- b) 单向链路的一端只能传输,而该链路的另一端只能接收。图 23 中示例了包含部分单向信道的多信道链路。

- c) 信道的每一端应设置发送使能 TxEn 和接收使能 RxEn 管理参数,功能如下:
- 1) 当 TxEn=1 且 RxEn=1 时,信道此端作为双向信道运行;
 - 2) 当 TxEn=1 且 RxEn=0 时,信道此端作为仅发送的单向信道运行,从该端发送数据需将 TxEn 参数设置为 1;
 - 3) 当 TxEn=0 且 RxEn=1 时,信道此端作为仅接收的单向信道运行,从该端接收数据需将 RxEn 参数设置为 1;
 - 4) 当 TxEn=0 且 RxEn=0 时,信道此端被禁用,既不能发送也不能接收信息。



图 23 包含单向信道的多信道链路

9.2.9 单向信道的初始化

9.2.9.1 基本属性

单向信道初始化操作应满足以下要求。

- a) ACTIVE 控制字用于向链路远端指示近端哪些信道处于激活状态,ACTIVE 控制字中的 ACT 字段的比特位 L 指示信道 L 的状态,具体如下:
 - 1) BitL=0,表示信道 L 未处于激活状态;
 - 2) BitL=1,表示信道 L 处于激活状态。
- b) ACTIVE 控制字由所有双向信道和 TxOnly 信道发送。ACTIVE 控制字也用于指示 RxOnly 信道检测到错误并退出活动状态的情况,这样对应的另一端的 TxOnly 信道收到通知后进行复位。
- c) 多信道子层将以下信息传递到信道子层中的每个信道,以用于初始化单向信道:
 - 1) TxOnly,用于指示信道作为仅发送信道运行;
 - 2) RxOnly,用于指示信道作为仅接收信道运行;
 - 3) FarEndActive,用于通知仅发送信道的信道初始化状态机,表明该链路远端的初始化状态机已锁定到初始化信息并且已进入激活状态。

9.2.9.2 远端激活条件(FarEndActive)

远端激活条件记为 FarEndActive,应满足以下要求:

- a) 当接收到位 L=1 的有效 ACTIVE 控制字时,对应于信道 L 的 FarEndActive 条件置位;
- b) 当接收到位 L=0 的有效 ACTIVE 控制字时,对应于信道 L 的 FarEndActive 条件清除;
- c) 当信道 L 的信道初始化状态机处于 ClearLine 状态时,对应于信道 L 的 FarEndActive 条件清除。

9.2.9.3 仅发送使能条件(TxOnly)

仅发送使能条件记为 TxOnly,应满足下列要求。

- a) 信道 L 的 TxOnly 条件 TxOnly(L), 在下列任一条件发生时置位:
 - 1) LaneState(L) 不处于 ClearLine 状态且 TxEn(L)=1 并且 RxEn(L)=0;
 - 2) LaneState(L) 处于 Started 状态并且 FarEndActive(L) 置位。
- b) 信道 L 的 TxOnly 条件 TxOnly(L), 在下列任何条件发生时撤销:
 - 1) TxEn(L)=0;
 - 2) RxEn(L)=1;
 - 3) LaneState(L) 处于 ClearLine 状态。

9.2.9.4 仅接收使能条件(RxOnly)

仅接收使能条件记为 RxOnly, 应满足下列要求。

- a) 信道 L 的 RxOnly 条件 RxOnly(L), 在下列任一条件发生时置位:
 - 1) 非对称多信道链路中至少有一个双向信道处于活动状态;
 - 2) TxEn(L)=0 且 RxEn(L)=1。
- b) 信道 L 的 RxOnly 条件 RxOnly(L), 在下列任何条件发生时撤销:
 - 1) TxEn(L)=1;
 - 2) RxEn(L)=0。

9.2.9.5 信道复位条件(LaneReset)

信道复位条件记为 LaneReset, 应满足下列要求。

- a) 信道 L 的复位条件 LaneReset(L), 在出现以下任何一种情况时置位:
 - 1) LinkReset 被声明;
 - 2) LaneState(L) 处于 Active 状态, 并且 TxOnly(L) 被置位, 并且 FarEndActive(L) 没有被置位;
 - 3) LaneState(L) 处于 Active 状态, 并且 TxOnly(L) 被置位, 并且没有一条处于活动状态的双向信道。
- b) LaneState(L) 处于 ClearLine 状态, 并且 LinkReset 被撤销时, 信道 L 的复位条件 LaneReset(L) 撤销。

9.2.10 热备份信道

热备份信道设计应满足以下要求。

- a) 为了在信道发生故障时支持快速切换到备份信道, 允许在多信道链路中包含一条或多条热备份信道。链路两侧的热备份信道数可以不同, 可以在非对称链路中提供热备份。
- b) 热备份信道按照与普通信道相同的方式进行初始化。
- c) 初始化后, 热备份信道发送信道子层和多信道子层控制字, 而不发送任何链路控制子层的字。
- d) 如果活动的发送信道的数量小于或等于“最大数据发送信道数”配置参数的值, 则所有活动的发送信道作为数据发送信道。
- e) 若活动的发送信道的数量大于配置参数“最大数据发送信道数”的值, 则活动发送信道配置如下:
 - 1) 具有最低信道号的活动发送信道为数据发送信道, 其中数据发送信道的数量为配置参数“最大数据发送信道数”中指定的最大数量;
 - 2) 具有较高信道号的其他活动发送信道为热备份信道。
- f) 链路控制子层只能将信息传递给数据发送信道。热备份信道是一条活动的发送信道, 但不是数据发送信道。数据帧、广播帧和空闲帧不通过热备份信道发送, 从而简化了来自链路控制

子层的数据流映射到多个信道所需的控制逻辑。

- g) 除需要发送信道子层或多信道子层控制字的情况,热备份信道发送 PRBS 序列,PRBS 序列生成多项式和初始序列值见 9.3.6.2.3 b)、9.3.6.2.3 c)、9.3.6.2.3 d)的要求。PRBS 可最大限度地减小电磁辐射。
- h) 热备份信道相比非热备份的活动信道具有更高的信道编号。
- i) 当热备份活动信道发送 ALIGN 控制字时,其字段 LANES 和 iLANES 均设置为 0。这表示该信道是热备份信道。
- j) 当活动信道接收到 ALIGN 控制字时,该信道为数据接收信道,除非 ALIGN 控制字的 LANES 和 iLANES 字段均为 0,在这种情况下信道不是数据接收信道。只有作为数据接收信道的信道允许接收链路控制子层字。如果信道不是数据接收信道,则意味着该信道的远端是热备份信道。
- k) 不是数据接收信道的信道只能处于它接收到的信道子层和多信道子层控制字,任何其他接收的字丢弃。如果信道的远端为活动的发送信道,是一个热备份信道,在这种情况下接收到的 PRBS 字被丢弃。
- l) 当一条数据发送信道出现故障并断开连接时,多信道子层自动将具有最低信道编号的热备份信道升级为数据发送信道。这比激活冷备份信道速度要快得多,因为不需要信道初始化的时间。当一条数据发送信道发生故障时,运行新的对齐操作并且新的 ALIGN 控制字会向链路的远端指示哪些信道是数据接收信道,需要接收链路控制子层字。

9.3 链路控制子层协议

9.3.1 链路控制子层功能

链路控制子层功能具体包括下列内容。

- a) 链路控制子层负责管理链路上的信息流,发送和接收标准字符及填充字符,发送和接收广播信息,提供 QoS 保证,并在可能的情况下从链路上发生的错误中恢复。
- b) 链路控制子层接收来自网络层的标准字符,填充字符和广播信息。
- c) 链路控制子层向网络层传送标准字符,填充字符和广播信息。
- d) 链路控制子层接收来自网络层的当前时隙识别信息。
- e) 链路控制子层传递数据字和控制字至多信道子层或信道子层。
- f) 链路控制子层从多信道子层或信道子层接收数据字和控制字。
- g) 链路控制子层采用以下信号控制多信道子层或信道子层:
 - 1) LinkReset,用于多信道子层复位;
 - 2) LaneReset,用于信道子层复位。
- h) 链路控制子层向多信道子层或信道子层传递近端 Capability 功能控制信息。
- i) 链路控制子层从多信道子层或信道子层接收远端 Capability 功能信息,该信息通过 INIT3 控制字中每个信道的 Capability 字段接收。
- j) 链路控制子层由管理信息库的如下管理参数控制。
 - 1) 每个虚拟信道的 QoS 参数。
 - 2) 归一化的预期广播带宽参数。
 - 3) 数据加扰参数 DataScrambled。
 - 4) 链路复位参数 LinkReset。链路复位也可在另一端表明自身链路已复位时自动执行。
 - 5) 接口复位参数 InterfaceReset。
- k) 链路控制子层向管理信息库提供如下状态信息:

- 1) 每个虚拟信道的虚拟信道状态；
- 2) 错误信息；
- 3) 远端链路复位状态 FarEndLinkReset。

链路控制子层的输入输出相关接口如图 24 所示。

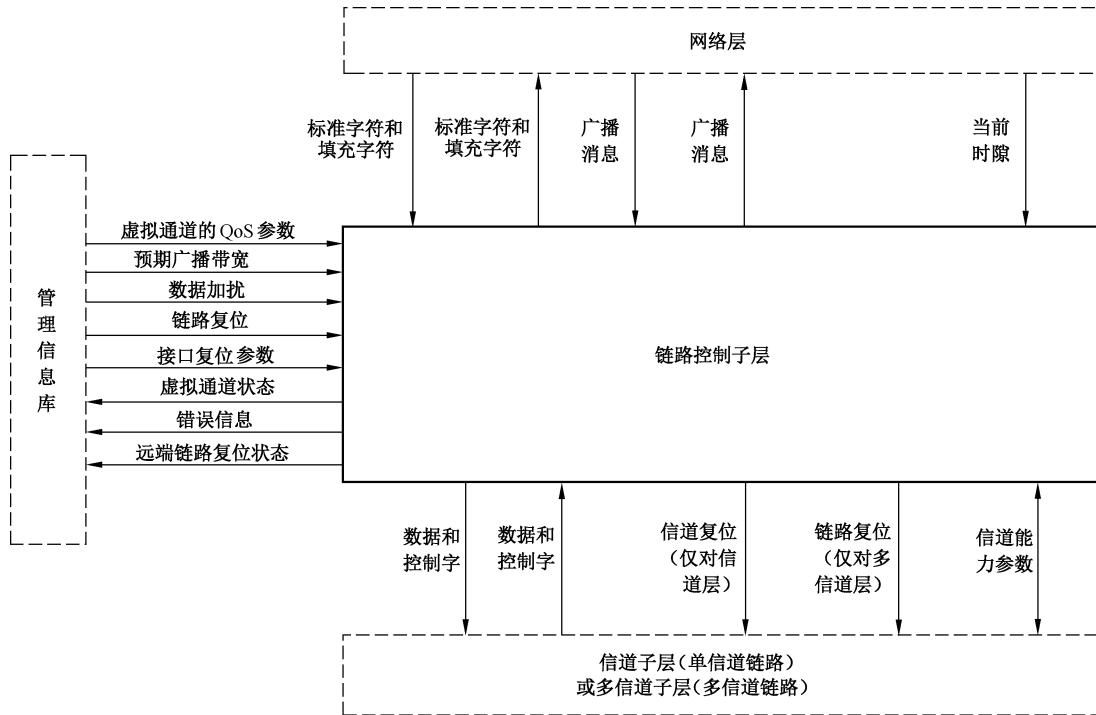


图 24 链路控制子层接口

9.3.2 虚拟信道

9.3.2.1 基本属性

SpaceFibre 端口的虚拟信道设计应满足以下要求。

- a) 链路控制子层提供给网络层访问的接口称为 SpaceFibre 端口,其中包含一个或多个虚拟信道输出缓冲区以及一个或多个虚拟信道输入缓冲区。通常虚拟信道输入缓冲区数量和输出缓冲区数量相同。
- b) 一个 SpaceFibre 端口最多包含 32 个虚拟信道,每个虚拟信道在 0~31 的范围内分配唯一的通道编号。虚拟信道编号 32~255 在本文件中保留暂不使用。
- c) SpaceFibre 端口内的虚拟信道从 0 开始顺序进行编号。
- d) 对于特定的虚拟信道通过其虚拟信道编号进行识别。
- e) 每个虚拟信道设置一个虚拟信道输出缓冲区和一个虚拟信道输入缓冲区。

9.3.2.2 输出虚拟信道缓冲区

SpaceFibre 端口的虚拟信道输出缓冲区设计要求包括下列内容。

- a) 虚拟信道输出缓冲区应能缓存 256 个 SpaceFibre 标准字符或填充字符。256 对应于单信道链路中一个完整的 SpaceFibre 数据帧的长度。为了支持高数据率或长线缆传输距离情况,虚拟信道输出缓冲区应设计更大一些,通常最小设计为 512 个 SpaceFibre 标准字符或填充字符。

- b) 若要在虚拟信道上发送 SpaceFibre 数据包,链路控制子层须从网络层接收标准字符和填充字符,组成 SpaceFibre 数据包,从数据包起始位置的标准字符或填充字符开始,将数据包放入虚拟信道缓冲区。
- c) 如果输出虚拟信道缓冲区已满,链路控制子层应不再从网络层继续接收该虚拟信道的标准字符或填充字符,直到虚拟信道输出缓冲区中有空间。
- d) 当有一个 SpaceFibre 数据包写入输出缓冲区完成时,只要虚拟信道缓冲区有至少一个标准字符或填充字符的接收空间,则该虚拟信道中下一个将要发送的 SpaceFibre 数据包应开始写入虚拟信道输出缓冲区。这样在虚拟信道输出缓冲区内有可能出现多个小的数据包等候传输的情况。
- e) SpaceFibre 数据包按照其写入输出虚拟信道缓冲区顺序,在对应的虚拟信道上发送。
- f) 写入 SpaceFibre 链路一端的输出虚拟信道缓冲区标准字符和填充字符,通过 SpaceFibre 链路传送至另一端具有相同虚拟信道编号的虚拟信道输入缓冲区。
- g) 当链路复位 LinkReset 声明时,应执行如下操作:
- 1) 清空所有的输出虚拟信道缓冲区;
 - 2) 对于每个输出虚拟信道缓冲区,如果用户程序写入的最后一个字符不是 EOP、EEP 或 Fill(填充字符),则从写入的数据字符开始,直到下一个 EOP 或 EEP 之间的字符都做丢弃处理,并且 EOP 或 EEP 也做丢弃处理。
- h) 虚拟信道应支持连续操作模式,该模式通过配置参数 Continuous Mode(VC)激活,可对每个虚拟信道独立设置。
- i) 当一个输出虚拟信道缓冲区对应的虚拟信道被设置为连续模式时,如果缓冲区即将达到满状态,或者无信道处于活动状态且缓冲区非空,则应执行如下操作:
- 1) 清空输出虚拟信道缓冲区;
 - 2) 向输出虚拟信道缓冲区写入一个 EEP 字符;
 - 3) 如果用户程序写入的最后一个字符不是 EOP、EEP 或 Fill 填充字符,则新写入的数据字符,直到下一个 EOP 或 EEP 字符都做丢弃处理,并且 EOP 或 EEP 也丢弃。

9.3.2.3 输入虚拟信道缓冲区

SpaceFibre 端口的输入虚拟信道缓冲区设计要求包含下列内容。

- a) 当 SpaceFibre 数据包的数据段被接收时,应被置于发送虚拟信道所对应的输入虚拟信道缓冲区中。输入虚拟信道缓冲区中的 SpaceFibre 标准字符顺序与链路另一端发送它们的输出虚拟信道缓冲区中的相同。
- b) 输入虚拟信道缓冲区应能缓冲 256 个 SpaceFibre 标准字符或填充字符。该值(256)取决于设计实现情况。为了保证高数据速率或长线缆传输情况下虚拟信道的性能,输入虚拟信道缓冲区的应设计更大一些。通常缓冲区大小设计为至少能缓存 1 024 个 SpaceFibre 标准字符或填充字符。
- c) 当输入虚拟信道缓冲区中有标准字符准备好时,链路控制子层应通知网络层该输入虚拟信道缓冲区中已准备好数据供读取。
- d) 当链路复位声明时,进行如下操作:
- 1) 清空所有输入虚拟信道缓冲区;
 - 2) 如果从输入虚拟信道缓冲区读取的最后一个字符不是 EOP、EEP 或 Fill 填充字符,则下一个从输入虚拟信道缓冲区读入的字符应为 EEP。

9.3.3 流控制

9.3.3.1 虚拟信道输出流控制

SpaceFibre 端口的虚拟信道输出流控制需满足下列要求。

- a) 每个输出虚拟信道缓冲区采用一个 FCT 信用计数器跟踪对应远端输入虚拟信道的可用空间, FCT 信用计数器代表可发送的数据量。
- b) 当下列两个条件均满足时, 输出虚拟信道缓冲区向介质访问控制器指示有一个数据段已准备好可以发送:
 - 1) FCT 信用计数器的值大于 0;
 - 2) 输出虚拟信道缓冲区包含 $N \times 64$ 个数据字, 或包含一个 EOP 或 EEP 字符, 或缓冲区已满。其中 $N \times 64$ 是该虚拟信道一个数据帧允许的最大数据字数, N 是一个小于或等于“最大数据发送信道数”参数的整数。数据帧详细信息见 7.4.2。
- c) 当主机能够按照全速率连续无间隔地提供数据字时, 主机通知输出虚拟信道缓冲区, 然后输出虚拟信道缓冲区向介质访问控制器表明已有数据帧准备好可以发送。当发送连续数据包流或大数据包时, 可减少延迟。
- d) 当被告知现在可以在 SpaceFibre 链路上发送另一个数据段时, 输出虚拟信道缓冲区传递最大 $N \times 64$ 个数据字给介质访问控制器, 以在 SpaceFibre 链路上发送, 其中 N 是一个小于或等于“最大数据发送信道数”参数的整数。如果 SpaceFibre 接口和主机系统之间的端口大于 32 比特位宽, 则可能需要更多 Fill 填充字符来填充以保证数据包载荷字对齐。
- e) 一旦链路复位, FCT 信用计数器置为 0。
- f) 一旦信道复位, FCT 信用计数不准许更改。
- g) 当某特定虚拟信道接收到一个 FCT 时, 该虚拟信道的 FCT 信用计数器增加 $M \times 64$, 其中 M 是 FCT 中的 Multiplier 字段的值加 1。FCT 表明链路远端的虚拟信道缓冲区可再接收 $M \times 64$ 个数据字, 见 7.2.4.2。
- h) 当一个数据段通过某个特定的虚拟信道发送给介质访问控制器时, 发送的数据字个数从 FCT 信用计数器中减去。
- i) 如果发生 FCT 信用计数器溢出, FCT 信用计数器的值保持不变, 为饱和最大值, 同时应向状态寄存器报告错误。
- j) FCT 信用计数器的大小至少为 $1 \times 64 \times M$, 对应 1 个 FCT。
- k) FCT 信用计数器的大小至少为 $4 \times 64 \times M$, 对应 4 个 FCT。注意在 2.5 Gbit/s 的数据信号速率情况下, 为了虚拟信道在 100 m 距离能够达到最大数据速率的性能, 需要大小为 $4 \times 64 \times M$ 的 FCT 信用计数。而在 6.26 Gbit/s 的数据信号速率情况下, 则需要支持 6 个 FCT 的信用计数。

9.3.3.2 虚拟信道输入流控制

SpaceFibre 端口的虚拟信道输入流控制需满足下列要求。

- a) 当接收到数据段时, 数据段中的数据字存储在对应的输入虚拟信道缓冲区。
- b) 在链路复位后, 对输入虚拟信道缓冲区内部每个 $M \times 64$ 的数据字空间, 请求发送一个 FCT。其中 M 为 FCT 的 Multiplier 字段的值再加 1。如果虚拟信道输入缓冲区可以容纳超过 $M \times 64$ 个数据字, 则链路复位后该虚拟信道会发送若干个 FCT, 见 7.2.4.2。
- c) 当网络层从输入虚拟信道缓冲区读走 $M \times 64$ 个数据字时, 虚拟信道输入缓冲区应请求发送 1 个 FCT。其中 M 为 FCT 的 Multiplier 字段的值加 1。 $M \times 64$ 个数据字应在一段时间内读

取,但不要求同时读取。一个 FCT 等效于交换 $M \times 64$ 个数据字,其中 M 为 FCT 的 Multiplier 字段的值加 1,见 7.2.4.2。当多信道链路中包含超过 8 条信道时,将发送两个 FCT,因为 FCT 的 Multiplier 最大值为 8,见 7.2.4.2 e)。这意味着当一个链路中信道数量超过 8 条时,协议的开销会增加(多发送 FCT)。如果一个帧包含 EOP 或 EEP,则有可能这个帧在包含标准字符的同时也包含一些填充字符,用于填充标准字符以构成 4 的整倍数,即完整的数据字,在链路控制子层,这些填充字和标准字符同等看待,并在链路上进行传输最后传输至链路远端的输入虚拟信道缓冲区中。

- d) 当多个不同虚拟信道缓冲区同时请求发送 FCT 时,采用仲裁方式。
- e) 如果输入虚拟信道缓冲区溢出,则 SpaceFibre 链路复位并报告该错误。输入虚拟信道缓冲区在正常工作的情况下不应出现溢出。当溢出时表明发生了严重错误,此时唯一解决方法是复位链路。

9.3.4 介质访问控制器

9.3.4.1 介质访问控制

介质访问控制要求包含下列内容。

- a) 介质访问控制器负责确定哪个虚拟信道可发送下一个数据段。
- b) 只有输出虚拟信道缓冲区中需发送的数据可以构成一个数据段时,才允许该输出虚拟信道缓冲区参与竞争发送下一个数据段。
- c) 只有虚拟信道的 FCT 信用计数器表明 SpaceFibre 链路远端的输入虚拟信道缓冲区中有可用空间能够接收下一个数据段时,才允许该虚拟信道参与竞争发送下一个数据段。
- d) 每个已经准备好数据的输出虚拟信道缓冲区,当对应 SpaceFibre 链路远端的输入虚拟信道缓冲区中有可用空间时形成了已就绪的虚拟信道,如果在当前时隙中该虚拟信道被允许发送数据,则应竞争发送下一个数据段。关于时隙和时隙内发送许可的描述见 9.3.4.3。

9.3.4.2 服务质量(QoS)



虚拟信道的 QoS 设计要求包括下列内容。

- a) 每个虚拟信道应支持如下 QoS:优先级,带宽预留和时隙规划。
- b) 当硬件资源极其受限且链路中虚拟信道的数量不超过 2 个时,可不支持带宽预留或按时隙规划的 QoS。这种情况限制了设备的可用性与互操作性,意味着无法支持乱发节点故障保护。
- c) 每个虚拟信道的 QoS 参数应能够单独设置,以便于不同的虚拟信道可以应用不同的 QoS。

9.3.4.3 时隙规划服务质量保证

时隙规划设计要求包括下列内容。

- a) 应将时间划分为长度相同的 64 个时隙,时隙长度在系统级确定。根据应用情况,典型的时隙持续时间一般在 $100 \mu\text{s} \sim 16 \text{ ms}$ 范围内。时隙数量 64 个是为了与 SpaceWire 时间码兼容。
- b) 网络层应提供一个时隙结束以及下一个时隙开始的指示,同时包括相应时隙的编号。通过这种方式,网络层能够在每个路由器或节点中同步进行时隙规划 QoS。
- c) 时隙规划应指明在哪个时隙中允许哪个虚拟信道发送数据。对于每个虚拟信道,有一个它可以发送数据的虚拟信道的列表。
- d) 若干个虚拟信道应能够被规划在同一个时隙内发送数据。
- e) 如果两个或多个虚拟信道被调度到同一个时隙内发送消息,介质访问控制器应为具有最高优先权的虚拟信道发送数据。优先权的信息见 9.3.4.4。

- f) 当一个时隙开始时,若某个虚拟信道被调度在该时隙发送数据,其输出虚拟信道缓冲区已有准备好可发送的数据,且 SpaceFibre 链路远端对应的输入虚拟信道缓冲区中有接收空间,则该虚拟信道应根据其优先权与其他虚拟信道竞争在链路上发送数据帧。
- g) 在当前时隙没有被调度的虚拟信道,不准许参与竞争链路发送数据。
- h) 在时间片结束的时候,所有发送数据的虚拟信道在完成当前数据段发送后应停止发送其他数据段,除非该虚拟信道的缓冲区在下一个时隙中也被调度发送数据。SpaceFibre 链路上的虚拟信道数据流调度应为该链路上前一个时隙未发送完的任何数据段预留空间,保证在上一个时隙开始发送但在时隙结束时尚未完成发送的数据段能够完成发送。
- i) 当 SpaceFibre 网络无需使用时隙规划 QoS 时,则所有虚拟信道的调度列表应设置为允许使用所有时隙。

9.3.4.4 优先权值

虚拟信道优先权值记为 Precedence,需满足下列要求。

- a) 若要在链路上发送信息,虚拟信道基于优先权值和调度列表信息来与其他虚拟信道进行竞争。
- b) 介质访问控制器应根据每个虚拟信道的优先权值,来确定允许哪个已准备好的虚拟信道发送一个数据段。
- c) 当前一个数据段的最后一个字被介质访问控制器从输出虚拟信道缓冲区读出时,对虚拟信道的优先权值进行比较。
- d) 已准备好且具有最高优先权值的虚拟信道缓冲区被允许发送下一个数据段。
- e) 虚拟信道的优先权值由其 QoS 参数和其带宽信用决定。
- f) 虚拟信道的优先权值由优先级级别加上该虚拟信道的当前带宽信用值计算得出。虚拟信道的优先级级别根据其优先级管理参数直接得出,见 9.3.4.6。计算优先权值时,表 13 中列出的 QoS 机制均需考虑在内。如果带宽信用低于最小带宽信用阈值,优先级级别设置为 0,见 9.3.4.5。

表 13 不同 QoS 类型的优先权值

QoS	优先权值 Precedence
<p>优先级 Priority</p>	<ul style="list-style-type: none"> a) 在没有更高优先级的虚拟信道准备好发送数据时,允许当前优先级虚拟信道发送数据; b) 支持多个优先级等级; c) 如果两个或多个优先级虚拟信道设置为相同的优先级级别,且均已准备好发送数据,则带宽信用最高的虚拟信道可以先发送一个数据段; d) 如果 SpaceFibre 网络要求仅使用优先级 QoS 机制,每个虚拟信道应分配不同的优先级级别一般优先级和带宽预留机制共同使用; e) 当一个虚拟信道的优先级 QoS 参数设置为最低优先级时,该虚拟信道获得最大努力 QoS
<p>带宽预留 Bandwidth Reserved</p>	<ul style="list-style-type: none"> a) 带宽预留机制基于虚拟信道的链路预留带宽和近期链路利用率,确定虚拟信道的优先权值。 b) 每个虚拟信道基于本通道的链路带宽预留和近期链路利用率计算出带宽信用。 c) 拥有较大预留带宽和较低近期带宽利用率的虚拟信道具有高带宽信用。拥有相同预留带宽和较高近期带宽利用率的虚拟信道具有较低的带宽信用。 d) 在同一个优先权级别下,各个虚拟信道基于当前带宽信用来竞争发送下一个数据段。 e) 在没有更高优先级的虚拟信道准备好发送数据,并且同一个优先级的其他虚拟信道也没有准备好要发送数据时,允许当前带宽预留虚拟信道发送数据。 f) 如果一个 SpaceFibre 网络仅要求具有带宽预留功能,将所有虚拟信道设置为相同的优先级即可实现

表 13 不同 QoS 类型的优先权值 (续)

QoS	优先权值 Precedence
时隙规划 Scheduled	a) 时隙规划 QoS 机制提供了一种保证 SpaceFibre 网络资源的完全确定性分配的方案。 b) 时间被分割成一系列时隙,在时隙内可调度虚拟信道发送数据。当一个时隙到来时如果虚拟信道被调度在该时隙发送数据,则它可以基于自身的优先权值发送数据。 c) 在其他所有时隙内,若当前虚拟信道没有被调度发送数据,即使其他虚拟信道也都没有数据发送,也不准许其发送任何数据。 d) 如果一个虚拟信道在当前时隙内被调度,但是没有数据需要在该时间片进行发送,或者链路远端对应输入虚拟信道缓冲区没有足够空间,则当前时隙中其他被调度的虚拟信道可以使用此部分将要浪费的带宽资源。如果每个虚拟信道使用不同时隙进行数据发送,可以提供一种无需考虑优先级或带宽预留的简单时隙规划 QoS

9.3.4.5 带宽信用

输出虚拟信道带宽信用设计要求包括下列内容。

- a) 每个输出虚拟信道应维护一个带宽信用测量结果。
- b) 带宽信用应在每次有一个数据段在任何虚拟信道上发送完成后进行更新。
- c) 若无数据段发送,带宽信用应在近似等于发送一个完整数据帧或更短的时间后进行更新。若无数据发送,已使用带宽为 0,见 g)。
- d) SpaceFibre 链路的可用带宽应根据该链路的所有虚拟信道在上一次带宽信用更新后发送的数据字或控制字数量来进行测量。在规定虚拟信道的带宽分配方案时,为便于理解按照整个链路可分配容量的百分比进行计算,可直接对各虚拟信道分配一定百分比的带宽,同时为广播消息和一般应急事件预留一定的备用带宽。在设置带宽分配时,对每个虚拟信道分配略高于其实际需求的带宽,这样带宽计数器能够正常达到最大值,而且所有虚拟信道实际带宽分配之和小于 100%,也为广播、ACK、FCT 等保留余量。
- e) 应按照虚拟信道预期使用的带宽为其分配一定比例的链路带宽,预期带宽为归一化预期带宽,包含了因使用帧分隔符和其他控制字所产生的开销。无论虚拟信道提供何种 QoS,归一化预期带宽信息通过管理参数提供给所有虚拟信道。
- f) 虚拟信道的已使用带宽为该通道自上一次更新带宽信用后发送的数据帧字数,包括帧分隔符在内。除了刚发送了一个数据帧的虚拟信道,其他所有虚拟信道的已使用带宽为 0。
- g) 每个虚拟信道的带宽信用值应独立按公式(1)计算:

$$\text{带宽信用值} = \sum_n \left(\text{可用带宽}[n] - \frac{\text{已使用带宽}[n]}{\text{归一化预期带宽}[c]} \right) \dots\dots\dots (1)$$

式中:

n ——之前发送的帧或字的序列的整数。

c ——当前计算的虚拟信道的通道号。

由公式(1)得到的带宽信用值在带宽信用正负极限处达到饱和,见 j)。

注:带宽信用值反映了该虚拟信道近期使用链路资源的情况,在近期可用带宽中本信道使用越多,则信用值下降越多。

- h) 如果有其他更高效的方法,也可用于确定带宽信用,只要能够给出与 g) 相同的结果。
- i) 若虚拟信道的归一化预期带宽为 0 时,该虚拟信道不准许发送任何数据。
- j) 带宽信用允许为负数。若某虚拟信道的带宽信用为负,则该虚拟信道使用带宽已超出其预期使用的链路带宽。

- k) 带宽信用值在带宽信用的正负极限处达到饱和。因此当带宽信用超过带宽信用极限时,信用值应设定为带宽信用极限值。
- l) 当一个虚拟信道的带宽信用达到带宽信用上极限,并且保持该值的时间至少达到虚拟信道空闲时间极限,则该虚拟信道应在状态寄存器中表明自己处于空闲状态,使用带宽远小于预期。网络管理程序能够利用此信息检查链路中各虚拟信道对链路带宽的正确使用情况。虚拟信道空闲时间极限是应用于所有虚拟信道的配置参数,典型值为 1 ms。
- m) 对每个虚拟信道,应设置最小带宽信用阈值。低于该阈值时认为虚拟信道使用带宽超过为其分配的带宽。
- n) 最小带宽信用阈值应设置为带宽信用负极限值的 90%左右。
- o) 当虚拟信道的带宽信用达到最小带宽信用阈值时,应在状态寄存器中表明虚拟信道使用的带宽超过预期。
- p) 当虚拟信道的带宽信用值低于最小带宽信用阈值时,应将该虚拟信道的优先等级暂时设置为 0,直到其带宽信用值高于最小带宽信用阈值。从而防止具有高优先权的虚拟信道占用的带宽远高于其预期使用带宽。
- q) 在接口复位时,带宽信用应设置为 0。
- r) 在接口复位时,虚拟信道 0(VC0)的归一化期望带宽应设置为约 10%,所有其他应设置为其最小值。在接口复位后,本地应用程序或远程应用程序可以根据需要,设置每个虚拟信道的归一化期望带宽。虚拟信道 0(VC0)用于 SpaceFibre 网络的配置、控制和监测功能。见 10.3 z)、10.3 aa)、10.3 bb)。

9.3.4.6 优先级

SpaceFibre 端口优先级设计应满足下列要求。

- a) SpaceFibre 端口支持 Q 个优先级,编号为 0~Q-1,其中 0 为优先权最高的优先级。
- b) SpaceFibre 端口至少支持 4 个优先级:0~3,其中优先级 0 的优先权最高,优先级 3 的优先权最低。
- c) SpaceFibre 端口可以支持比 4 个更多的优先级。
- d) 每个优先级的优先级级别值(R_v)用公式(2)表示:

$$R_v = 2B(Q - 1 - R) + B \quad \dots\dots\dots(2)$$

式中:

- B——带宽信用极限;
- Q——优先级总级数;
- R——优先级。

注:无论当前带宽信用值为多少,一个优先级中的优先权值不能与相邻优先级中的优先权值重叠。例如在具有 16 个优先权的设计中,优先级 15 的优先权值为 B,优先级 14 的优先权值为 3B,优先级 0 的优先权值为 31B。

- e) 每个虚拟信道能够被分配任何一个优先级。
- f) 多个虚拟信道能够设置为相同的优先级。
- g) 当多个虚拟信道具有相同的优先级时,带宽信用值最高的虚拟信道具有最高的优先权值。
- h) 接口复位后,每个虚拟信道的 QoS 设置为最低优先级。

9.3.4.7 综合服务质量

当某一时隙到来时,时隙规划调度到该时隙中发送数据的虚拟信道如果已准备好要发送的数据,应根据优先权值与其他调度到该时隙中发送数据的虚拟信道竞争链路。当某个时隙到来时,调度到该时

隙中的已经准备好发送数据的虚拟信道若具有相同的优先权值,则仅根据虚拟信道的带宽信用进行竞争。如果所有虚拟信道使用相同的优先级,相当于使用带宽预留的 QoS。如果虚拟信道使用带宽超过其分配带宽,则通过乱发节点故障保护机制将其优先级设置为最低级别。

9.3.5 广播流控制

SpaceFibre 总线广播流控制设计应包含下列内容。

- a) 采用广播带宽信用计数器与广播机制相配合,用于监控和限制广播消息所占用的链路带宽。
- b) 介质访问控制器为所有广播通道设置一个共同的广播带宽信用计数器。
- c) 广播带宽信用计数器监测所有广播通道的总带宽。
- d) 在链路复位时,广播带宽信用计数器计数设置为 0。
- e) 每发送一个广播帧,广播带宽信用计数器计数减 1。广播帧具有 4 个字的固定大小,因此广播带宽信用测量单位为 4 个字或 1 个广播帧。
- f) 由管理参数“归一化预期广播带宽”指定预留给广播消息的链路带宽比例,预留带宽中包括广播帧分隔符产生的额外开销。
- g) 广播带宽信用计数器在广播带宽信用极限处达到饱和计数值。因此,当广播带宽信用超过广播带宽信用极限时,将设置为广播带宽信用极限值。
- h) 广播带宽信用极限设置为常数,其值为 256 个广播。这将允许广播通道在最多发送 256 条广播消息后停止发送广播消息。256 个广播帧为 1 024 个字。
- i) 广播带宽信用计数器的值不准许为负值。
- j) 当广播带宽信用计数器的值为 0 时,不应发送广播帧。
- k) 在经过的时间间隔等于发送 4 个字的时间除以归一化预期广播带宽时,广播带宽信用加 1。

9.3.6 组帧

9.3.6.1 数据封装

链路控制子层的数据帧封装具体包含下列内容。

- a) 数据段在传递到信道子层或多信道子层之前应封装为数据帧,数据帧以 SDF 开始,之后为数据段,结尾为 EDF。
- b) 广播消息在传递到信道子层或多信道子层之前应封装在广播帧中,广播帧以 SBF 开始,之后为广播信息,结尾为 EBF。
- c) 当链路复位条件出现时,当前数据帧或广播帧应停止传送给信道子层或多信道子层,重新开始新的数据帧或广播帧。

9.3.6.2 电磁辐射抑制措施

9.3.6.2.1 数据加扰

数据帧的加扰设计包括下列内容。

- a) 当管理参数 DataScrambled 置为有效时,数据帧的数据字在传输前应进行加扰,加扰方式是将数据与加扰多项式产生的随机数序列按比特位相乘。按位相乘处理为异或(XOR)函数。图 25 所示给出了明确说明。扰码器也可以用其他方式实现。
- b) 应采用的扰码生成多项式为 $G(X) = X^{16} + X^5 + X^4 + X^3 + 1$ 。
- c) 扰码器随机数初始值应为 0xFFFF。0xFFFF 对应到随机数生成器中的所有触发器设置为 1。
- d) 在每个新数据帧的开始,应对扰码器重新初始化。
- e) 随机数生成器的单比特输出序列应与数据字的单比特序列进行异或操作。随机数生成器只在

有数据位需要加扰时才生成随机数,当没有数据需要做 XOR 操作时,随机数生成器停止。例如,当 FCT 在数据帧中交错传输时,随机数生成器仅针对数据帧中的数据运行。

- f) 每个数据字中最低有效字符的最低有效位应首先进行加扰。
- g) 当数据中出现 EOP 或 EEP 或 Fill 填充字符时,不允许用加扰数据对其进行替换。随机数生成器将 EOP 或 EEP 或 Fill 填充字符视为数据字符,仍然继续正常生成对应随机数。
- h) 图 26 给出了一个未加扰数据帧和对应的加扰后数据帧的示例。上面为未加扰的数据帧,下面为对应加扰后的数据帧。当数据加扰时,CRC 根据加扰后的数据计算。

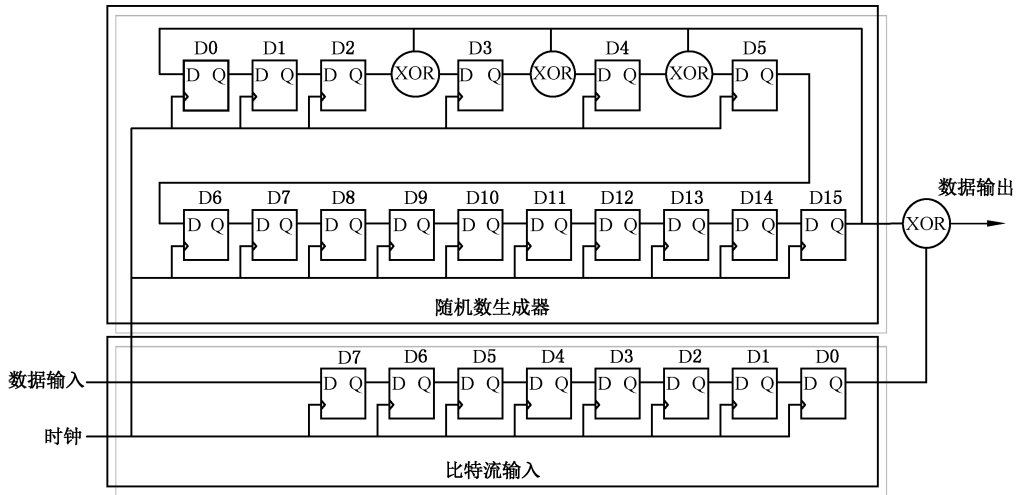


图 25 加扰/解扰器

0	7	8	15	16	23	24	31
COMMA	SDF	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00
0x00	0x01	0x02	0x03	0x04	0x05	0x06	0x07
0x08	EOP	Fill	Fill	0x08	0x09	0x0A	0x0B
EDF	0x22	0x28	0xA8	0x2C	0x2D	0x2E	0x2F

a) 未加扰的原始数据帧

0	7	8	15	16	23	24	31
COMMA	SDF	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00
0xFF	0x16	0xC2	0x17	0xB6	0xE2	0x04	0x85
0x7A	EOP	Fill	Fill	0x7A	0x7B	0x7C	0x7D
EDF	0x22	0x98	0xDA	0x26	0x27	0x28	0x29

b) 加扰后的数据帧

图 26 一个短数据帧的加扰示例

9.3.6.2.2 数据帧解扰

数据帧解扰设计具体包含下列内容。

- a) 当接收到数据帧并且信道子层 INIT3 的 DataScrambled 标志为有效,表明接收到的数据为加

扰后数据,应进行解扰,解扰方法是采用与加扰时相同的扰码序列与数据进行异或操作。

- b) 代表 EOP、EEP、Fill 填充字符的控制字符不做解扰处理。

9.3.6.2.3 空闲帧加扰

空闲帧加扰设计具体包含下列内容。

- 空闲帧的 PRBS 部分应填充由伪随机位序列生成多项式生成的伪随机序列。PRBS 序列扩展了空闲帧的电磁辐射频谱,同时当信道空闲只发送空闲帧时,还可用于帮助测量发射器和接收器的眼图。
- 当新的空闲帧开始时,空闲帧 PRBS 生成器不应重新初始化。
- 应采用的伪随机序列生成多项式为 $G(X) = X^{16} + X^5 + X^4 + X^3 + 1$ 。
- 在链路复位时,PRBS 生成器的初始值应为 0xFFFF,对应的随机数生成器中的所有触发器设置为 1。
- 随机数初始值 0xFFFF 用于计算链路复位后的第一个空闲字。链路复位后,第一个空闲帧包含的值如图 27 所示。
- 随机数生成器的单比特输出序列应构成空闲帧中的 PRBS。
- PRBS 应首先用于填充每个字中最低有效字符的最低有效位。
- 当有控制字嵌入到空闲帧中时,随机数生成器应暂时停止。例如当 FCT 嵌入到空闲帧中时。
- 当空闲帧中 PRBS 字段没有遵循所需 PRBS 序列时,不应引起错误。

字节1	字节2	字节3	字节4
COMMA	SIF	SEQ_NUM	CRC
0xFF	0x17	0xC0	0x14
0xB2	0xE7	0x02	0x82
0x72	0x6E	0x28	0xA6

图 27 空闲帧加扰效果

9.3.6.3 序列号

9.3.6.3.1 发送序列号

发送序列号应满足下列设计要求。

- 在 SpacFibre 端口的发送端维护一个 7 位发送序列计数器,以保存上一个发送的数据帧、广播帧或 FCT 控制字中的 SEQ_NUM 字段的 7 位序列计数值。
- 7 位发送序列计数器按照模 128 进行计数。
- 发送极性标志与 7 位发送序列计数器共同构成序列号 SEQ_NUM。发送极性标志及其用途见 9.3.7.3。
- 当 SpaceFibre 端口链路复位时,发送序列计数器清零。
- 当 SpaceFibre 端口链路复位时,发送极性标志清零。
- 在每次新的错误恢复操作开始时,发送极性标志反转。
- 发送序列计数器及相关的极性标志为数据帧、FCT、广播帧、空闲帧和 FULL 控制字提供序列号。

- h) 在一个数据帧结尾、广播帧结尾或 FCT 控制字即将从链路控制子层传递到信道子层或多信道子层之前,将发送序列计数器的当前值递增,并将计数器新值与极性标志的当前值一起放置在数据帧结尾、广播帧结尾或 FCT 控制字的序列号 SEQ_NUM 字段中。每递增 128 个序列号后,计数器重复滚动之前的计数序列。链路复位后发送的第一帧(通常是 FCT)的 SEQ_NUM 会设置为+1,即序列计数器先被复位为 0,然后在发送 EDF、EBF 或 FCT 之前立即递增到+1。
- i) 当一个 FULL 控制字或空闲帧从链路控制子层传递到信道子层或多信道子层时,发送序列计数器的当前值及极性标志的当前值放置在空闲帧起始的 SIF 或 FULL 控制字的序列号 SEQ_NUM 字段中。

9.3.6.3.2 接收序列号

接收序列号应满足下列设计要求。

- a) 在 SpaceFibre 端口的接收端应维护一个 7 位接收序列计数器,以保存上一个正确接收的数据帧、广播帧或 FCT 控制字中的 SEQ_NUM 字段的 7 位序列计数值。
- b) 7 位接收序列计数器按照模 128 进行计数。
- c) 接收极性标志与 7 位接收序列计数器共同构成接收序列号,用其值对接收到的序列号 SEQ_NUM 进行检查。
- d) 接收极性标志由接收错误状态机确定。
- e) 接收序列计数器在 SpaceFibre 端口链路复位时清零。
- f) 接收极性标志在 SpaceFibre 端口链路复位时清零。
- g) 接收序列计数器在 SpaceFibre 端口信道复位时不能修改。
- h) 接收极性标志在 SpaceFibre 端口信道复位时不能修改。
- i) 应使用 7 位接收序列计数器及接收极性标志检查数据帧、FCT、广播帧、空闲帧和 FULL 控制字的序列号。
- j) 当包含有效 CRC 值的 EDF、EBF、SIF、FCT 或 FULL 控制字从信道子层或多信道子层进入链路控制子层时,对照接收序列计数器和接收极性标志的当前值检查其序列号 SEQ_NUM 的正确性。
- k) 如果接收的 EDF、EBF 或 FCT 的 SEQ_NUM 字段中序列计数比接收序列计数器多 1,并且 SEQ_NUM 字段中的极性标志与接收极性标志匹配,则接收对应的数据帧、广播帧或 FCT。
- l) 如果接收的 SIF 或 FULL 的序列号 SEQ_NUM 具有与接收序列计数器相同的计数值,并且 SEQ_NUM 的极性标志与接收极性标志匹配,则接收空闲帧或 FULL。空闲帧或 FULL 中包含的是最后一个发送的数据帧、广播帧或 FCT 的序列号。
- m) 在检查通过后接收数据帧、FCT 或广播帧时,接收序列计数器相应递增。
- n) 如果接收的 EDF、EBF 或 FCT 的 SEQ_NUM 字段中序列计数不是比接收序列计数器多 1,或者 SEQ_NUM 字段中的极性标志与接收极性标志不同,则发生了序列错误,该数据帧、FCT 或广播帧丢弃。当一个数据帧、广播帧或者 FCT 的序列号 SEQ_NUM 的计数值按照模 128 计算不是比接收序列计数器的值大 1 或者极性标志不同时,会发生序列错误。在空闲帧或 FULL 控制字的序列号与接收序列号的值不匹配时也会发生序列错误。当序列错误发生时如何处理见 9.3.7.2.2。关于接收序列号极性标志的更多信息见 9.3.7.3。
- o) 如果接收的 SIF 或 FULL 的序列号 SEQ_NUM 中计数值不同于接收序列计数器,或者 SEQ_NUM 的极性标志与接收极性标志不同,则发生了序列错误,丢弃该空闲帧或 FULL。
- p) 当数据帧、FCT 或广播帧被丢弃时,接收序列计数器不递增。

9.3.6.4 数据帧的 CRC 校验

数据帧应进行 CRC 校验,具体包含下列内容。

- 数据帧采用 16 位的 CRC 校验。CRC 校验范围应覆盖整个数据帧,从数据帧起始控制字的逗号开始,到数据帧结尾控制字的序列号结束。在单信道链路中 CRC 校验覆盖整个数据帧。在多信道链路中,每个信道都分别有一个 CRC 覆盖该信道发送的数据帧的部分。
- K 码标志不应包含在 CRC 计算中,只有 K 码和 D 码的数据值参与计算。例如逗号码 K28.7 在 CRC 计算时替换为 D28.7。
- 当数据中出现 EOP 或 EEP 或 Fill 填充控制字时,K 码中表示 EOP 或 EEP 或 Fill 含义的数据值包含在 CRC 计算中。例如 EOP 由 K29.7 表示,因此 D29.7 用在 CRC 计算中。将 EOP 或 EEP 或 Fill 包含在 CRC 计算中是为了对其进行 CRC 校验保护。
- 当帧中的数据加扰时,使用加扰后的数据计算 CRC。
- 对每个数据帧采用 ITU 多项式 $X^{16} + X^{12} + X^5 + 1$ 生成 16 位 CRC,16 位 CRC 的初始值为 0xFFFF。
- 首先计算每个字中最低有效字符的最低有效位。当使用 LFSR 计算 CRC 时,计算出的 CRC 值是 LFSR 中寄存器的反序值,见图 28。如果将两个 CRC 字节也包含在 CRC 校验生成过程,则未检测到错误时 CRC 校验生成结果为零,检测到错误时结果非零。
- 当能够带来设计简化时,可以在多信道子层或信道子层中计算 16 位 CRC。从实现的角度来看,多信道子层和信道子层实际上是构成链路控制子层一部分的子层。

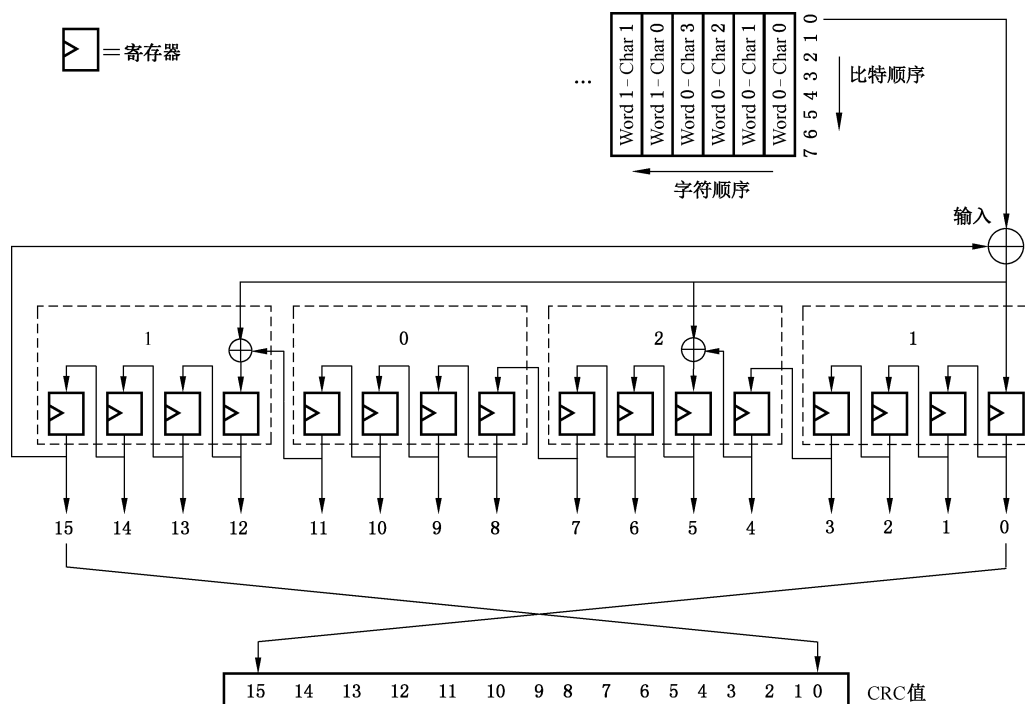


图 28 16 位 CRC 计算中的位排序示意

9.3.6.5 广播帧与特殊控制字的 CRC 校验

广播帧、SIF、FCT、FULL、ACK 和 NACK 的 CRC 校验满足下列要求。

- 广播帧、SIF、FCT、FULL、ACK 和 NACK 应采用 8 位 CRC 校验,8 位 CRC 校验覆盖整个广

播帧,从广播帧起始控制字的逗号码开始,直到广播帧结尾控制字的序列号结束。

- b) 在 CRC 计算中包含控制字符时,使用其对应的数据值。如逗号码 K28.7 在 CRC 计算时替换为 D28.7。
- c) 8 位 CRC 的生成多项式为 $X^8 + X^2 + X + 1$,8 位 CRC 的初始值为 0x00,8 位 CRC 计算过程的比特顺序见图 29。
- d) 若采用 CRC 计算程序对除去 CRC 字节本身的编码覆盖内容进行校验,则生成 CRC 校验码后,直接与期望的 CRC 编码进行比较。如果生成的 CRC 码与所要求的期望值相同,则表示未检测到错误,否则表示检测到一个错误。
- e) 若采用 CRC 计算程序对包括 CRC 字节本身的编码覆盖内容进行校验,则生成的 CRC 校验码为 0 表示未检测到错误,否则表示数据内容发生了错误。
- f) 当能够带来设计简化时,可在多信道子层或信道子层中计算 8 位 CRC。从实现的角度多信道子层和信道子层是构成数据链路层一部分的子层。

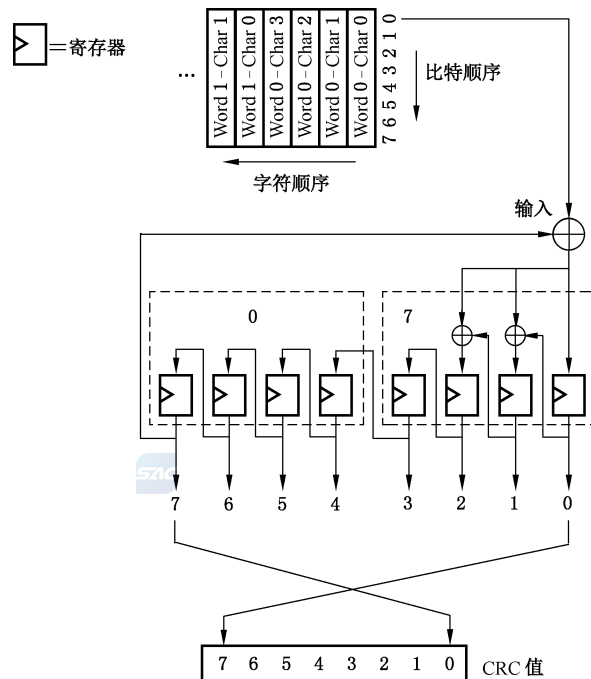


图 29 8 位 CRC 计算中的位排序示意

9.3.6.6 空闲帧

空闲帧设计应满足下列要求。

- a) 当无数据帧、FCT、广播帧或 FULL 需要发送时,产生空闲帧。
- b) 空闲帧起始位置的序列号字段设置为发送序列计数及极性标志的当前值。链路复位后,发送序列计数器设置为 0,因此,如果空闲帧是链路复位后发送的第一帧,则其序列号为 0。如果数据帧、FCT 或广播帧为链路复位后发送的第一帧,则其序列号字段为 1。
- c) 空闲帧的起始控制字之后跟随一系列伪随机数据字,在发送时形成 9.3.6.2.3 规定的伪随机位序列。

9.3.6.7 帧接收

帧接收的相关处理应满足下列要求。

- a) 当收到一个无 CRC 错误的完整数据帧,且帧中包含的序列号正确时,根据其虚拟信道号将该数据帧中包含的数据段写入对应的输入虚拟信道缓冲区。
- b) 当收到一个带有 CRC 错误或顺序错误的帧时丢弃。
- c) 当收到一个无 CRC 错误的完整广播帧,且帧中包含的序列号正确时,该广播帧中包含的广播消息写入广播消息接口。
- d) 当收到一个带有 CRC 错误或顺序错误的广播帧时丢弃。
- e) 当收到一个无 CRC 错误的 FCT,且其中包含的序列号正确时,将该 FCT 传递给 FCT 中的虚拟信道号所指示的虚拟信道的输出流量控制逻辑。
- f) 当收到一个带有 CRC 错误或顺序错误的 FCT 时丢弃。

9.3.7 错误恢复

9.3.7.1 错误恢复缓冲区

错误恢复缓冲区的要求包含下列内容。

- a) 数据段、FCT 和广播消息在传递到多信道子层或信道子层,通过 SpaceFibre 链路发送以前,应暂时缓存在错误恢复缓冲区中,以便在发生错误时能够重新发送。
- b) 无论错误恢复缓冲区中包含了多少个数据段和广播消息,应至少还能够存储一个 FCT。
- c) 无论错误恢复缓冲区中包含多少个数据段和 FCT,应至少还能够存储一个广播消息。根据 SEQ_NUM 的范围,在经过发送之后错误恢复缓冲区中保存的帧或 FCT 控制字的总数小于 128。
- d) 错误恢复缓冲区中的数据段、FCT 和广播消息应按照它们在 SpaceFibre 链路上发送时所确定的序列号 SEQ_NUM 进行索引。序列号描述见 9.3.6.3。
- e) 当错误恢复缓冲区中的内容要重新发送时,广播帧总是在 FCT 和数据帧之前优先发送,即使这些广播帧在收到 NACK 之前尚未发送过。
- f) 当需要规模较小、功能简化的 SpaceFibre 接口,且发送和接收低延迟的广播消息不是非常重要时,错误恢复缓冲区中的内容可以按任何顺序重新发送。
- g) 当错误恢复缓冲区中的内容被重新发送时应分配新的序列号,这些序列号跟随在远端上一个正确接收的序列号之后,序列号初始值为 NACK 控制字中接收到的 SEQ_NUM 字段序列号值加 1,并随着每一个重传或正常发送的帧或 FCT 递增。重新发送的数据帧、FCT 和广播帧的 SEQ_NUM 中的极性标志设置为新极性值,根据 9.3.6.3.1 中的规定确定发送极性标志。
- h) 在链路复位时,应清空错误恢复缓冲区。
- i) 在信道复位时,不应清空错误恢复缓冲区。
- j) 当发送了一个 RETRY 控制字时,错误恢复尝试次数应递增。
- k) 错误恢复尝试次数应保存并通过状态寄存器提供。
- l) 错误恢复尝试次数应能够通过上电复位或接口复位,或通过管理信息库的命令清除。
- m) 错误恢复缓冲区的大小应根据具体实现决定。适合错误恢复缓冲区的大小应足够缓存线路上所有正在传输的数据和控制字,缓存时间应支持发送这些内容并通过答复接收到 ACK 确认。当使用多信道时,线路上按比例持有更多的数据。
- n) 当缓冲区中没有足够的空间来存储 FCT、广播帧二者之一或全部或部分数据帧时,认为错误恢复缓冲区已满。
- o) 当错误恢复缓冲区已满时,或者当其中共有 127 个帧或 FCT 等待确认时,则不能再接收更多数据段、FCT 和广播消息。
- p) 当错误恢复缓冲区已满时,链路控制子层只能发送 FULL、ACK 和 NACK。

- q) 当错误恢复缓冲区已满时,应发送 FULL 控制字。控制字的优先级见 7.2.4.4,根据对控制字优先级的要求,当缓冲区中没有空间存储一个数据帧但有空间存储一个广播帧时,在 FULL 之前会发送一个广播帧。
- r) 当共有 127 个帧或 FCT 等待确认时,应发送 FULL 控制字。根据序列号值的范围,127 是待处理帧或 FCT 的最大数量。
- s) 当发生 RXERR 或 CRC 错误时,如果下列所有情况同时出现,应发送 FULL 控制字。
 - 1) 所有输出虚拟信道缓冲区为空。
 - 2) 没有待发送的数据帧、FCT 或者广播帧。
 - 3) 错误恢复缓冲区非空。如果由于错误导致一个 ACK 控制字未收到,则只有在新的数据帧、广播帧或 FCT 发送后才会收到新的 ACK。本条保证在上述情况下能够收到新的 ACK 并清空错误恢复缓冲区。

9.3.7.2 应答控制

9.3.7.2.1 发送确认应答 ACK

发送确认应答 ACK 满足下列要求。

- a) 当收到一个数据帧、广播帧、FCT 或 FULL,且没有发生序列错误或 CRC 错误时,应请求发送一个 ACK。
- b) 在遵循控制字优先权的前提下,应优先发送提出请求的 ACK。ACK 在发送之前不进行缓存。
- c) 在发送一个 ACK 之后,至少需要发送 15 个数据字,才能发送下一个 ACK。这样可保证带宽预留 QoS 独立于数据帧大小运行。
- d) 如果在 ACK 等待期间收到另一个数据帧、广播帧、FCT 或 FULL,则只发送一个 ACK。即一个 ACK 可对应一个或多个数据帧、广播帧、FCT 或 FULL。
- e) 当发送 ACK 时,应包含接收序列计数器和接收极性标志的当前值。
- f) 当有一个 NACK 请求发送时,应取消发送所有待处理的 ACK。

9.3.7.2.2 发送否认应答 NACK

发送否认应答 NACK 满足下列要求。

- a) 发生以下任一种情况时,应请求发送一个 NACK:
 - 1) 数据字识别状态机处于接收数据帧、接收广播帧、接收广播帧与数据帧状态时,收到一个 RXERR 控制字或者发生 CRC 错误;
 - 2) 在 CRC 有效的控制字中检测到序列号错误。
 - 注 1: 仅在需要执行错误恢复操作时发送一个 NACK。因而当数据字标识状态机处于 RxNothing 或 RxIdle 状态时,即使检测到错误,也无需发送 NACK。
 - 注 2: FULL 控制字或空闲帧的序列号与上一次正确接收的数据帧、FCT 或广播帧的序列号相同,即与接收序列计数器的当前值相同。如果不是,则表明发生序列错误,存在已发送帧未被正确接收的情况。此时发送一个 NACK 告知远端最后一个正确接收的数据帧、FCT 或广播帧的信息。
 - 注 3: 当收到具有正确序列号的空闲帧时,无需发送 ACK,正确的序列号表明最后一个数据帧、FCT 或广播帧已经正确接收。如果对该帧应答的 ACK 丢失,不会造成影响,除非错误恢复缓冲区已满。这种情况一般不会发生,除非有更多的数据帧、FCT 或者广播帧已发送,此时会发送其他的 ACK。
- b) 当收到无法识别的控制字时,不能请求发送 NACK。这是为了保证后续版本的 SpaceFibre 标准向前兼容。
- c) 在遵循控制字优先级的前提下,请求发送的 NACK 应优先发送。请求发送而无法立即发送的 NACK 表示 NACK 被挂起正在等待发送。挂起的 NACK 应立即发送。

- d) 在发送 NACK 时,应使用接收序列计数器的当前值和由接收错误状态机确定的接收极性标志。接收极性标志的相关规定见 9.3.7.3。
- e) 当请求发送 ACK 时,所有挂起的 NACK 应取消不再发送。

9.3.7.2.3 接收确认应答 ACK

接收确认应答 ACK 满足下列要求。

- a) 收到 ACK 时,应使用 CRC 对其进行错误检查。
- b) 如果 ACK 的 CRC 有效且其序列号的极性标志与发送极性标志的值相同,则该 ACK 视为有效。
- c) 当收到有效的 ACK 时,应从帧错误恢复缓冲区中删除所有已经发送的序列号小于或等于 ACK 中序列计数的数据帧、广播帧和 FCT,按照模 128 计数规律进行检查,并考虑计数回转的情况。
- d) 当收到的 ACK 的序列计数与之前接收的有效 ACK 或 NACK 的序列计数不同,并且错误恢复缓冲区中也没有与该 ACK 序列计数相同的数据帧、FCT 或广播帧时,应复位 SpaceFibre 链路,并声明一个状态参数指示协议错误引起链路复位。

9.3.7.2.4 接收否认应答 NACK

接收否认应答 NACK 满足下列要求。

- a) 当收到 NACK 时,应对其使用 CRC 进行错误检查。
- b) 如果 NACK 的 CRC 有效且其序列号的极性标志与发送极性标志的值相同,则该 NACK 视为有效。
- c) 在收到有效的 NACK 时,按照顺序执行下列操作。
 - 1) 从帧错误恢复缓冲区中删除所有已经发送的序列号小于或等于 NACK 中序列计数的数据帧、FCT 和广播帧,按照模 128 计数规律进行检查,将计数回转的情况考虑在内。
 - 2) 将发送序列计数器的值设置为 NACK 中序列计数的值。
 - 3) 在发送错误恢复缓冲区的内容之前发送一个 RETRY 控制字。
 - 4) 反转发送序列号中的极性标志。
 - 5) 按照 7.6 中规定的优先级,重新发送数据帧、FCT 和广播消息。
 - 6) 根据 NACK 指示的没有正确接收的范围,重新发送错误恢复缓冲区中保留的该部分数据帧、FCT 或广播帧。
 - 7) 在数据帧、广播帧和 FCT 重新发送时,为其分配新的序列号。发送 NACK 的原因见 9.3.7.2.2。错误恢复缓冲区中保留的数据帧、FCT 或广播帧的序列计数大于 NACK 中的序列计数。
- d) 如果接收到的 NACK 中序列号 SEQ_NUM 的极性标志与发送极性标志不同,则忽略该 NACK 并且不触发错误恢复。避免造成多次错误恢复尝试的问题。
- e) 当收到的 NACK 的序列计数与之前接收的有效 ACK 或 NACK 的序列计数不同,并且错误恢复缓冲区中也没有与该 NACK 序列计数相同的数据帧、FCT 或广播帧时,复位 SpaceFibre 链路,并声明一个状态参数指示协议错误引起链路复位。

9.3.7.3 接收错误状态机

9.3.7.3.1 基本属性

接收错误状态机用于确定接收序列号中接收极性标志字段的的状态。接收错误状态机的状态图如图 30 所示。

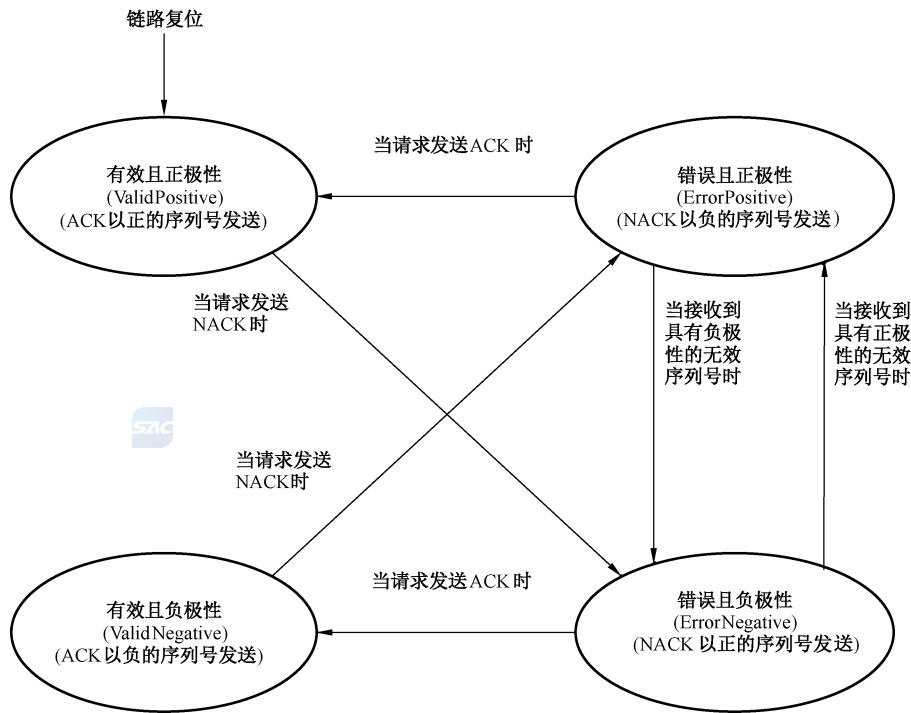


图 30 接收错误状态机

9.3.7.3.2 有效且正极性状态(ValidPositive)

有效且正极性状态记为 ValidPositive,应满足下列要求。

- a) 在下列条件下,进入 ValidPositive 状态:
 - 1) 收到 LinkReset 命令;
 - 2) 在 ErrorPositive 状态下,当请求发送一个 ACK 时。
- b) 当处于 ValidPositive 状态时,接收极性标志为正,因而 ACK 以正的序列号发送。
- c) 在下列条件下,接收错误状态机跳出 ValidPositive 状态:当请求发送 NACK 时,在发送 NACK 之前,进入到 ErrorNegative 状态。由于 NACK 的发送极性与接收错误状态机所指示的极性相反,因此 NACK 以正的序列号发送。

9.3.7.3.3 有效且负极性状态(ValidNegative)

有效且负极性状态记为 ValidNegative,应满足下列要求。

- a) 在 ErrorNegative 状态下,当请求发送 ACK 时,进入 ValidNegative 状态。
- b) 当处于 ValidNegative 状态时,接收极性标志为负。因此,ACK 以负的序列号发送。
- c) 在下列条件下,接收错误状态机离开 ValidNegative 状态:当请求发送 NACK 时,在发送 NACK 之前,转入 ErrorPositive 状态。因而 NACK 是以负的序列号发送。

9.3.7.3.4 错误且正极性状态(ErrorPositive)

错误且正极性状态记为 ErrorPositive,应满足下列要求。

- a) 在下列条件下,进入 ErrorPositive 状态:
 - 1) 在 ValidNegative 状态下,当请求发送 NACK 时;

- 2) 在 ErrorNegative 状态下,当接收到具有负极性的无效序列号时。
- b) 当处于 ErrorPositive 状态时,接收极性标志为正。由于 NACK 的极性与接收错误状态机所指示的极性相反,因此 NACK 以负的序列号发送。
- c) 在下列情况下,接收错误状态机跳出 ErrorPositive 状态。
 - 1) 当请求发送 ACK 时,在发送 ACK 之前,移动到 ValidPositive 状态。
 - 2) 当接收到包含正序列号的数据帧、广播帧、FCT、SIF 或 FULL 但序列号的计数不正确、乱序时,在发送响应该错误的任何 NACK 之前,转移到 ErrorNegative 状态。因此 ACK 以正的序列号发送。

9.3.7.3.5 错误且负极性状态(ErrorNegative)

错误且负极性状态记为 ErrorNegative,应满足下列要求。

- a) 在下列条件下,进入 ErrorNegative 状态:
 - 1) 在 ValidPositive 状态下,当请求发送 NACK 时;
 - 2) 在 ErrorPositive 状态下,当接收到具有正极性的无效序列号时。
- b) 当处于 ErrorNegative 状态时,接收极性标志为负。NACK 以正的序列号发送。
- c) 在下列情况下,接收错误状态机跳出 ErrorNegative 状态。
 - 1) 当请求发送 ACK 时,在发送 ACK 之前,移动到 ValidNegative 状态。
 - 2) 当接收到包含负序列号的数据帧、广播帧、FCT、SIF 或 FULL 但序列号的计数不正确、乱序时,在发送响应该错误的任何 NACK 之前,转移到 ErrorPositive 状态。因此 ACK 以负的序列号发送。

9.3.8 数据字识别状态机

9.3.8.1 基本属性

数据字识别状态机的基本属性包含以下内容。

- a) 数据字识别状态机用于识别数据字所属的帧类型,以支持不同帧类型的解复用。数据字识别状态机的状态转换见图 31。
- b) 接收到未知的控制字时不应导致错误。未知控制字应忽略,以保证与后续 SpaceFibre 升级发展相兼容。

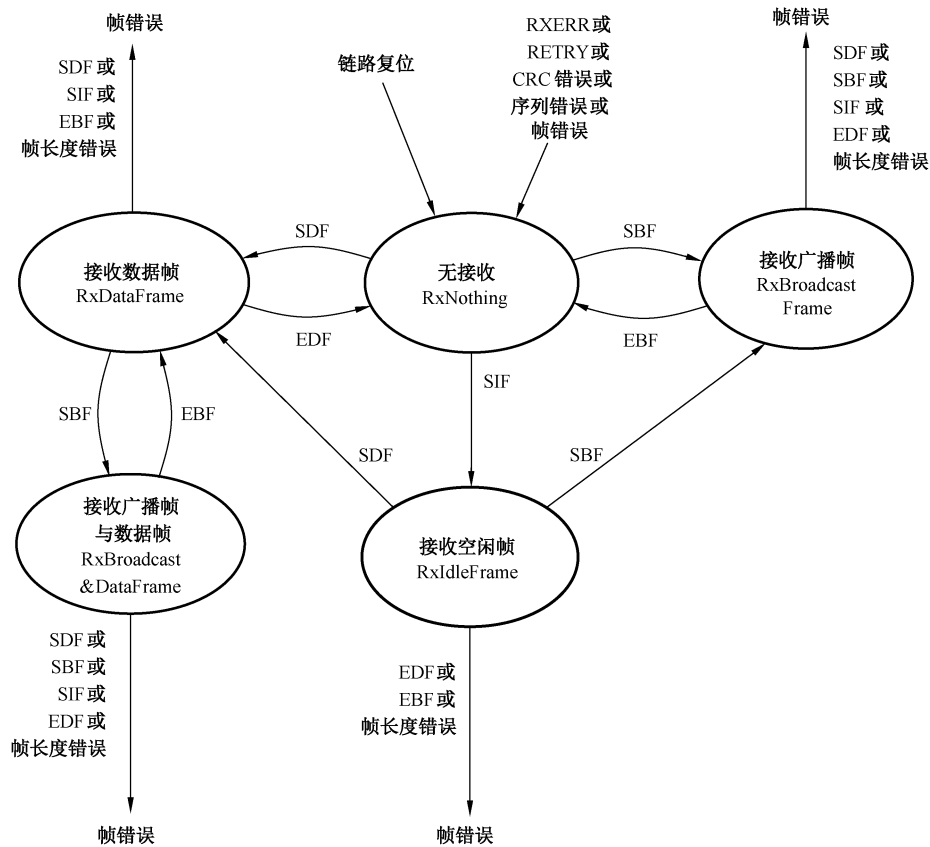


图 31 数据字识别状态机

9.3.8.2 无接收状态 (RxNothing)

无接收状态记为 RxNothing, 应满足下列要求。

a) 在下列条件之一发生时, 进入 RxNothing 状态:

- 1) 在链路复位后;
- 2) 在 RxDataFrame 状态下当接收到一个 EDF 时;
- 3) 在 RxBroadcastFrame 状态下当接收到一个 EBF 时;
- 4) 在任何状态下, 当接收到 RXERR、RETRY、序列错误、CRC 错误、非预期控制字或帧长度错误时。

注: 当数据帧、FCT 或广播帧的 SEQ_NUM 中的序列计数按照模 128 计算不是比接收序列计数器的值多 1, 或其中极性标志的值与接收极性标志不同时, 发生序列错误。另外, 当空闲帧或 FULL 控制字的序列号与接收序列号的值不匹配时, 也属于序列错误。非预期控制字是指在非预期时间收到的有效控制字。因此, 其处理方式与未知控制字不同。

b) 当处于 RxNothing 状态时, 数据字识别状态机执行以下操作:

- 1) 表明没有接收到帧数据;
- 2) 丢弃接收到的任何 EBF 和 EDF。

c) 在下列情况下, 数据字识别状态机跳出 RxNothing 状态。

- 1) 当收到 SBF 时, 转移到 RxBroadcastFrame 状态。
- 2) 当接收到 SDF 时, 转移到 RxDataFrame 状态。
- 3) 当接收到 SIF 时, 转移到 RxIdleFrame 状态。在 RxNothing 状态下接收到 EDF 或 EBF 时, 不采取任何操作。

9.3.8.3 接收数据帧状态(RxDataFrame)

接收数据帧状态记为 RxDataFrame,应满足下列要求。

- a) 在下列条件之一发生时,进入 RxDataFrame 状态:
 - 1) 在 RxNothing 状态下,当收到一个 SDF 时;
 - 2) 在 RxIdleFrame 状态下,当收到一个 SDF 时;
 - 3) 在 RxBroadcast&DataFrame 状态下,当收到一个 EBF 时。
- b) 当处于 RxDataFrame 状态时,数据字识别状态机执行以下操作:
 - 1) 表明接收到的数据字属于一个数据帧;
 - 2) 统计数据帧中接收到的数据字数。
- c) 数据字识别状态机在下列条件之一发生时跳出 RxDataFrame 状态,并且按下面给定的顺序进行判断。
 - 1) 当收到 RETRY 时,转移到 RxNothing 状态。
 - 2) 当接收到 RXERR 时,转移到 RxNothing 状态。
 - 3) 当检测到 CRC 错误时,转移到 RxNothing 状态。
 - 4) 当检测到序列错误时,转移到 RxNothing 状态。
 - 5) 当收到 SBF 时,转移到 RxBroadcast&DataFrame 状态。
 - 6) 当接收到 EDF 时,转移到 RxNothing 状态。
 - 7) 当出现以下一种或多种情况时,给出帧错误标志,并转移到 RxNothing 状态。
 - 收到一个 SDF。
 - 收到一个 SIF。
 - 收到一个 EBF。
 - 数据字计数器超过了一个数据帧中允许的最大数据量。数据帧中允许的最大数据量为 $L \times 64$,其中 L 是管理参数“最大数据发送信道数”的值。

9.3.8.4 接收广播帧状态(RxBroadcastFrame)

接收广播帧状态记为 RxBroadcastFrame,应满足下列要求。

- a) 在下列条件之一发生时,转入 RxBroadcastFrame 状态:
 - 1) 在 RxNothing 状态下,当接收到一个 SBF 时;
 - 2) 在 RxIdleFrame 状态下,当接收到一个 SBF 时。
- b) 当处于 RxBroadcastFrame 状态时,数据字识别状态机执行以下操作:
 - 1) 表明接收到的数据字属于广播帧;
 - 2) 统计广播帧中接收到的数据字数。
- c) 数据字识别状态机在下列条件之一发生时跳出 RxBroadcastFrame 状态,并且按以下给定的顺序进行判断。
 - 1) 当收到 RETRY 时,转移到 RxNothing 状态。
 - 2) 当收到 RXERR 时,转移到 RxNothing 状态。
 - 3) 当检测到 CRC 错误时,转移到 RxNothing 状态。
 - 4) 当检测到序列错误时,转移到 RxNothing 状态。
 - 5) 当接收到 EBF 并且广播字计数器等于广播帧中允许的数据字数时,转移到 RxNothing 状态。
 - 6) 当出现以下一种或多种情况时,给出帧错误标志,并转移到 RxNothing 状态:

- 收到一个 SDF；
- 收到一个 SBF；
- 收到一个 SIF；
- 收到一个 EDF；
- 接收到一个 EBF，并且广播字计数器不等于广播帧中允许的数据字数；
- 广播字计数器超过一个广播帧中允许的数据字数。

9.3.8.5 接收广播帧与数据帧状态(RxBroadcast&DataFrame)

接收广播帧与数据帧状态记为 RxBroadcast&DataFrame，应满足下列要求。

- a) 在 RxDataFrame 状态下，当收到 SBF 时，转入 RxBroadcast&DataFrame 状态。
- b) 当处于 RxBroadcast&DataFrame 状态时，数据字识别状态机执行以下操作：
 - 1) 表明接收到的数据字属于广播帧；
 - 2) 统计广播帧中接收到的数据字数。
- c) 数据字识别状态机应在发生下列条件之一时，跳出 RxBroadcast&DataFrame 状态，并且按以下给定的顺序进行判断。
 - 1) 当收到 RETRY 时，转移到 RxNothing 状态。
 - 2) 当收到 RXERR 时，转移到 RxNothing 状态。
 - 3) 当检测到 CRC 错误时，转移到 RxNothing 状态。
 - 4) 当检测到序列错误时，转移到 RxNothing 状态。
 - 5) 当接收到 EBF 并且广播字计数器等于广播帧中允许的数据字数时，转移到 RxDataFrame 状态。
 - 6) 当出现以下一种或多种情况时，给出帧错误标志，并转移到 RxNothing 状态：
 - 收到一个 SDF；
 - 收到一个 SBF；
 - 收到一个 SIF；
 - 收到一个 EDF；
 - 接收到一个 EBF，并且广播字计数器不等于广播帧中允许的数据字数；
 - 广播字计数器超过一个广播帧中允许的数据字数。

9.3.8.6 接收空闲帧状态(RxIdleFrame)

接收空闲帧状态记为 RxIdleFrame，应满足下列要求。

- a) 在 RxNothing 状态下，当收到一个 SIF 时，转入 RxIdleFrame 状态。
- b) 当处于 RxIdleFrame 状态时，数据字识别状态机执行以下操作：
 - 1) 表明接收到的数据字属于空闲帧；
 - 2) 统计正在接收的数据字数。
- c) 数据字识别状态机在发生下列条件之一时，跳出 RxIdleFrame 状态，并且按以下给定的顺序进行判断。
 - 1) 当收到 RETRY 时，转移到 RxNothing 状态。
 - 2) 当收到 RXERR 时，转移到 RxNothing 状态。
 - 3) 当检测到 CRC 错误时，转移到 RxNothing 状态。
 - 4) 当检测到序列错误时，转移到 RxNothing 状态。
 - 5) 当收到 SBF 时，转移到 RxBroadcastFrame 状态。
 - 6) 当收到 SDF 时，转移到 RxDataFrame 状态。

- 7) 当出现以下一种或多种情况时,给出帧错误标志,并转移到 RxNothing 状态:
- 收到一个 EDF;
 - 收到一个 EBF;
 - 数据字计数器超过一个空闲帧中允许的最大数据量。

9.3.8.7 控制字操作

对控制字应按照以下要求操作。

- 在任何状态下,能够接收 FCT、ACK、NACK、FULL 和 RETRY 控制字。
- 当收到未知的控制字时忽略,并且不采取任何操作。这是为了与 SpaceFibre 标准的未来发展保持兼容性。

9.3.9 链路复位状态机

9.3.9.1 基本属性

当链路的一端或另一端被复位时,应采用链路复位状态机来确保链路的两端均进行复位。链路复位状态机的状态图见图 32。

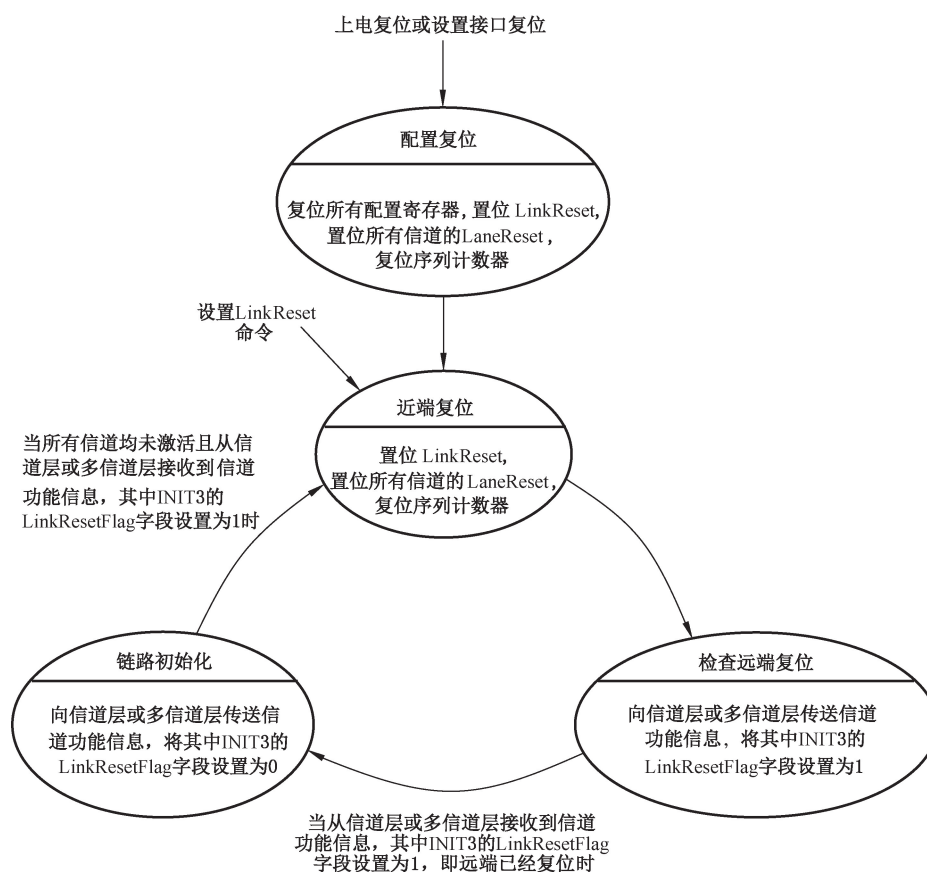


图 32 链路复位状态机

9.3.9.2 配置复位状态 (ConfigurationReset)

配置复位状态记为 (ConfigurationReset), 应满足下列要求。

- 在下列条件之一发生时,进入 ConfigurationReset 状态:

- 1) 当上电复位条件 PowerOnReset 成立时;
- 2) 当设置了 InterfaceReset 管理参数时。
- b) 当处于 ConfigurationReset 状态时,链路复位状态机执行以下操作:
 - 1) 复位所有配置寄存器;
 - 2) 声明 LinkReset 条件;
 - 3) 声明所有信道的 LaneReset 条件。当触发 LinkReset 条件时,序列计数器和相关逻辑被复位,见 7.2.4.2 c)。
- c) 链路复位状态机从 ConfigurationReset 状态直接转入 Near-EndReset 状态,无需条件触发。

9.3.9.3 近端复位状态(Near-EndReset)

近端复位状态记为 Near-EndReset,应满足下列要求。

- a) 在下列条件之一发生时,进入 Near-EndReset 状态:
 - 1) 从 ConfigurationReset 状态无条件转入;
 - 2) 当设置了 LinkReset 管理参数时;
 - 3) 在 LinkInitialised 状态下,当所有信道均未激活且从信道子层或多信道子层接收到信道功能信息,其中 INIT3 的 LinkResetFlag 字段设置为 1,表示远端已复位时。
- b) 当处于 Near-EndReset 状态时,链路复位状态机启动以下动作:
 - 1) 声明 LinkReset 条件;
 - 2) 声明所有信道的 LaneReset 条件;
 - 3) 复位序列计数器和相关逻辑功能。
- c) 在下列任一条件发生时,链路复位状态机离开 Near-EndReset 状态,以下条件按照给定的顺序进行判断:
 - 1) 当上电复位条件 PowerOnReset 成立时,转移到 ConfigurationReset 状态;
 - 2) 当设置了 InterfaceReset 管理参数时,转移到 ConfigurationReset 状态;
 - 3) 无条件转移到 CheckFar-EndReset 状态。

9.3.9.4 检查远端复位状态(CheckFar-EndReset)

检查远端复位状态记为 CheckFar-EndReset,应满足下列要求。

- a) 在 Near-EndReset 状态下,无条件转入应进入 CheckFar-EndReset 状态。
- b) 当处于 CheckFar-EndReset 状态时,链路复位状态机执行以下操作:向信道子层或多信道子层传送信道功能信息,将 INIT3 的 LinkResetFlag 字段设置为 1。
- c) 在下列条件之一发生时,链路复位状态机应跳出 CheckFar-EndReset 状态,按照以下条件给定的顺序进行判断:
 - 1) 当上电复位条件 PowerOnReset 触发时,转移到 ConfigurationReset 状态;
 - 2) 当设置了 InterfaceReset 管理参数时,转移到 ConfigurationReset 状态;
 - 3) 当设置了 LinkReset 管理参数时,转移到 Near-EndReset 状态;
 - 4) 当从信道子层或多信道子层接收到信道功能信息,其中 INIT3 的 LinkResetFlag 字段设置为 1,表明远端已经复位时,转移到 LinkInitialised 状态。

9.3.9.5 链路初始化状态(LinkInitialised)

链路初始化状态记为 LinkInitialised,应满足下列要求。

- a) 在 CheckFar-EndReset 状态下,当从信道子层或多信道子层接收到信道功能信息,其中 INIT3 的 LinkResetFlag 字段设置为 1,表明远端已经复位时,进入 LinkInitialised 状态。

- b) 当处于 LinkInitialised 状态时,链路复位状态机执行操作:向信道子层或多信道子层传送近端信道功能信息,将其中 INIT3 的 LinkResetFlag 字段设置为 0。
- c) 在下列条件之一发生时,链路复位状态机跳出 LinkInitialised 状态,按照以下条件给定的顺序进行判断:
 - 1) 当上电复位条件 PowerOnReset 触发时,转移到 ConfigurationReset 状态;
 - 2) 当设置了 InterfaceReset 管理参数时,转移到 ConfigurationReset 状态;
 - 3) 当设置了 LinkReset 管理参数时,转移到 Near-EndReset 状态;
 - 4) 当所有信道均未激活且从信道子层或多信道子层接收到信道功能信息,其中 INIT3 的 LinkResetFlag 字段设置为 1,表示远端已复位时,转移到 Near-EndReset 状态。

9.3.10 链路复位操作

链路复位操作包括下列内容。

- a) 当链路复位条件触发时,对于在链路上运行的所有虚拟信道,应执行以下操作:
 - 1) 正在向链路的输出虚拟信道写入的所有数据包停止写入;
 - 2) 清除输出虚拟信道缓冲区中的数据;
 - 3) 丢弃尚未写入输出虚拟信道的数据包的剩余部分;
 - 4) 正在从链路的输入虚拟信道读取的所有数据包停止读取;
 - 5) 清除输入虚拟信道缓冲区中的数据;
 - 6) 已从链路的每个虚拟信道读取的数据包部分采用 EEP 作为结束,表示未接收到数据包的剩余部分;
 - 7) 如果当链路中止时,用户从输入虚拟信道中读出的最后一个字符是 EOP、EEP 或 Fill,则不向该数据包添加 EEP。
- b) 当链路复位条件触发时,应执行以下操作:
 - 1) 停止当前正在向信道子层或多信道子层传送的数据帧或广播帧;
 - 2) 按照 9.3.5 d) 要求,将广播带宽信用计数器设置为 0;
 - 3) 按照 9.3.6.2.3 d) 和 9.3.6.2.3 e) 的要求,将 PRBS 生成器的初始种子值设置为 0xFFFF,并使用此值计算链路复位后的第一个空闲字;
 - 4) 按照 9.3.6.3.1 d) 的要求,将发送序列计数器的值清零;
 - 5) 按照 9.3.6.3.1 e) 的要求,将发送极性标志清零;
 - 6) 按照 9.3.6.3.2 e) 的要求,将接收序列计数器的值清零;
 - 7) 按照 9.3.6.3.2 f) 的要求,将接收极性标志清零;
 - 8) 按照 9.3.7.1 h) 的要求,将错误恢复缓冲区清空;
 - 9) 按照 9.3.8.2 a) 1) 的要求,将数据字识别状态机转移到 RxNothing 状态;
 - 10) 按照 9.3.9.3 a) 2) 的要求,将链路复位状态机转移到 Near-EndReset 状态。

10 网络层协议

10.1 网络层功能

SpaceFibre 网络层功能包含下列内容。

- a) SpaceFibre 网络层负责在 SpaceFibre 网络上传输 SpaceFibre 数据包和广播消息。网络层的输入输出相关接口如图 33 所示。
- b) 网络层应接收来自用户应用程序的数据包和广播信息,以便通过 SpaceFibre 网络发送。
- c) 网络层应将通过 SpaceFibre 网络接收到的数据包和广播消息传递给用户应用层。
- d) 网络层应向链路控制子层传送标准字符和填充字符,以便通过网络中链路的虚拟信道发送。

- e) 网络层应接收来自链路控制子层的标准字符和填充字符,这些字符由链路控制子层通过网络中链路的虚拟信道接收。
- f) 网络层应向链路控制子层传送广播消息,以便通过 SpaceFibre 网络发送。
- g) 网络层应从链路控制子层接收通过 SpaceFibre 网络传输的广播消息。
- h) 网络层应向链路控制子层传送当前时隙。
- i) 网络层应通过管理信息库中的以下管理参数进行控制:
 - 1) 路由交换机的虚拟网络到虚拟信道的映射关系;
 - 2) 路由交换机路由表。
- j) 网络层应向管理信息库提供以下状态信息:
 - 1) 路由交换机状态;
 - 2) 端点状态。

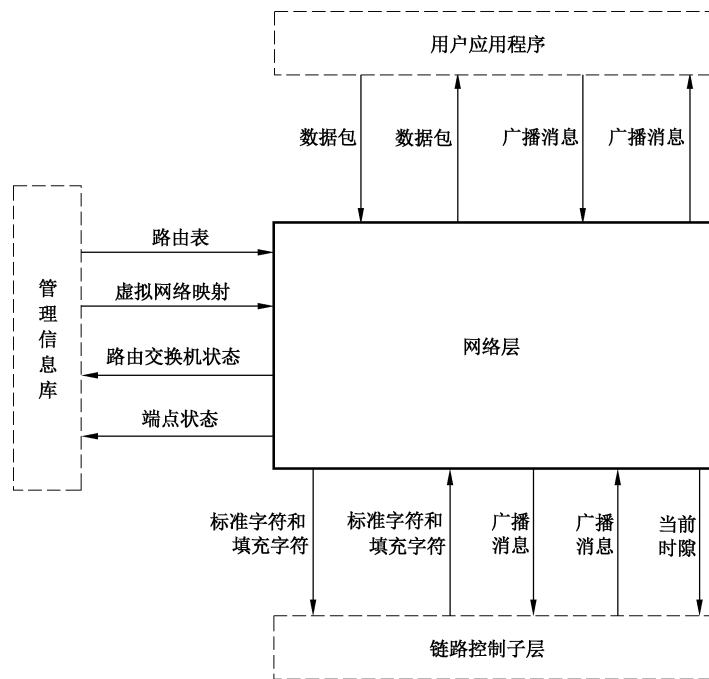


图 33 网络层接口关系

10.2 SpaceFibre 网络

10.2.1 SpaceFibre 网络构成

SpaceFibre 网络具体包括下列内容。

- a) SpaceFibre 网络应包括一个或多个节点和零个或多个路由交换机,相互之间由 SpaceFibre 链路相连。SpaceFibre 网络各组成部分的 UML 图如图 34 所示。
- b) SpaceFibre 网络中的节点和路由交换机的端口采用链路进行互联。

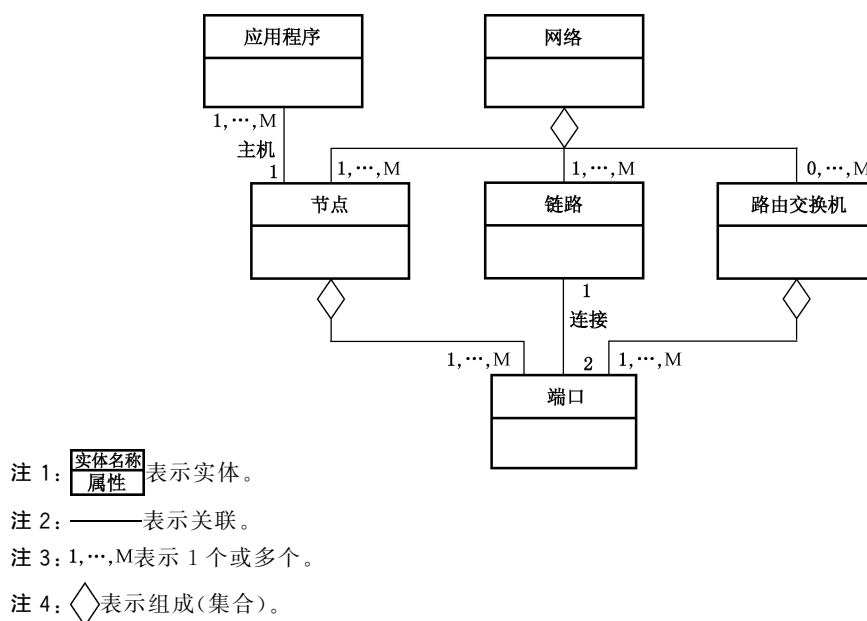


图 34 SpaceFibre 网络构成

10.2.2 链路

链路负责将相同或不同的 SpaceFibre 设备上的两个端口连接在一起。

10.2.3 节点

SpaceFibre 节点功能为：

- 节点应向承载的应用程序提供 SpaceFibre 网络各类服务；
- 节点应通过一个或多个 SpaceFibre 端口传输来自一个或多个应用程序的数据包和广播消息；
- 端点和广播接口应提供用户应用程序和 SpaceFibre 网络之间的接口。

10.2.4 路由交换机

SpaceFibre 路由交换机功能为：

- 路由交换机用于将多个节点互连在一起，以便它们可以相互通信，而无需从每个节点到它希望通信的各个其他节点之间设置专用的点到点链路；
- SpaceFibre 路由交换机应将数据包从其到达的输入端口传输到一个或多个输出端口，输出端口由数据包头部自带的地址和路由交换机中的路由表确定。

10.2.5 网络

SpaceFibre 网络功能为：

- SpaceFibre 网络应将数据包从源节点传输到目的节点；
- 来自源节点的数据包应通过 SpaceFibre 链路传输到路由交换机或目的节点；
- 来自路由交换机的数据包应通过 SpaceFibre 链路传输到其他路由交换机或目的节点；
- SpaceFibre 网络应支持通过网络广播消息。

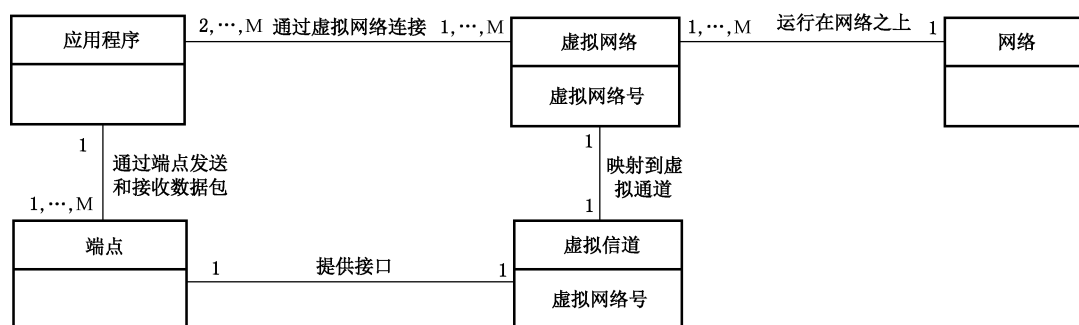
10.3 虚拟网络

SpaceFibre 网络中的虚拟网络包含以下功能。

- a) SpaceFibre 网络上应运行 1 个或多个虚拟网络。虚拟网络的关系如图 35 所示。
- b) 2 个或多个应用程序应通过虚拟网络实现互连通信。
- c) 一个应用程序应能连接到一个或多个虚拟网络。
- d) 应用程序应通过虚拟网络向与其互连的任何其他应用程序发送和接收数据包。
- e) 数据包只允许在单个虚拟网络中传输。
- f) 数据包应由应用程序通过端点发送并通过虚拟网络传输。
- g) 数据包应由虚拟网络上的应用程序通过端点进行接收。
- h) 每个端点应提供到一个虚拟信道的接口。
- i) 通过给虚拟信道分配一个虚拟网络号(VN_x),将其配置为属于某个虚拟网络。虚拟网络号将虚拟信道映射到虚拟网络。
- j) 虚拟网络应支持将数据包从该虚拟网络上的一个端点传输到该虚拟网络上的任何其他端点。
- k) 每个虚拟网络应具备一个从 VN0~VN63 的标识符。
- l) 虚拟网络标识符 VN64~VN255 为保留值,不应使用。
- m) 一个虚拟网络上发送的数据包只允许通过该虚拟网络从源端点到目标端点传输,不准许数据包通过不同的虚拟网络从源端点传输到目标端点。
- n) 每个虚拟网络应独立于其他虚拟网络运行。每个虚拟网络的运行类似一个单独的 SpaceWire 网络。
- o) 在虚拟网络中,来自一个包的标准字符不应与来自另一个包的标准字符交替传输。在不同虚拟网络上流动的数据包中的标准字符在链路控制子层上交错,从而为每个虚拟网络提供适当的 QoS。
- p) 虚拟网络应使用 SpaceFibre 网络中的部分或全部链路。
- q) 一个虚拟网络应包括其在 SpaceFibre 网络中使用的每个链路上的一个虚拟信道。虚拟网络使用的链路上的虚拟信道都是虚拟网络的一部分。
- r) 一个虚拟网络应在其使用的每个链路中使用一个且仅使用一个虚拟信道。
- s) 对于节点或路由交换机中连接了虚拟网络所用链路的每个输出端口,虚拟网络应映射到这些输出端口上的一个虚拟信道。例如,虚拟网络 VN1 可以映射到路由交换机端口 1 的 VC3、端口 2 的 VC3 和端口 4 的 VC2,而不映射到任何其他端口。
- t) 虚拟网络应仅通过作为虚拟网络一部分的链路上的虚拟信道发送数据包。继续上面的例子,虚拟网络 VN1 可以通过端口 1、端口 2 和端口 4 发送数据包,但不准许通过端口 3。
- u) 虚拟网络不应通过不属于该虚拟网络的虚拟信道发送数据包。
- v) 虚拟网络不应通过不属于该虚拟网络的链路发送数据包。
- w) 允许虚拟网络被映射到其使用的不同 SpaceFibre 链路上的不同虚拟信道。例如,虚拟网络 VN1 可以映射到一个链路的 VC3 和另一个链路的 VC6。在路由交换机中,每个输出端口都有一个虚拟网络到虚拟信道的映射关系。到达输入端口的特定虚拟网络的数据包可以路由传输给映射到该虚拟网络的任何输出端口(见 10.7.3)。例如,一个路由交换机配置为 VN1 映射到端口 2 上的 VC1、VN1 映射到端口 3 上的 VC4 和 VN1 映射到端口 4 上的 VC2,该交换机能够将到达端口 2 上的 VN1 的数据包路由到端口 3(VC4)和端口 4(VC2)。
- x) 网络中特定链路上的虚拟信道的 QoS 应定义为网络中该点对应的虚拟网络的 QoS。
- y) 虚拟网络在一个链路上使用的虚拟信道的 QoS 可不同于该虚拟网络在其他链路上使用的其他虚拟信道的 QoS。
- z) 虚拟网络 VN0 应用于向 SpaceFibre 节点和路由交换机发送或接收网络控制、配置和内务管理信息。
- aa) 当一个节点的可用虚拟信道数量有限时,虚拟网络 VN0 可用于传输连接到该节点的其他设备

的控制、配置和内务管理信息。

bb) 虚拟网络 VN0 应映射到虚拟信道 VC0。不允许将虚拟网络 VN0 映射到任何其他虚拟信道。



注 1:

实体名称
属性

 表示实体。

注 2: —— 表示关联。

注 3: $1, \dots, M$ 表示 1 个或多个。

图 35 虚拟网络的关系

10.4 链路

SpaceFibre 网络链路设计包含以下内容。

- 链路将同一类型的两个端口连接在一起。
- 一条链路应包括一条或多条信道。
- 一条链路应包含两个或多个虚拟信道。
- 当链路用于简单的点到点连接场景或仅用于配置、控制和监视目的时,可包含一个虚拟信道。
- 虚拟信道应在链路的两端具有相同的虚拟信道号。虚拟信道具有由链路控制子层管理参数定义的 QoS。

10.5 发送数据包

SpaceFibre 网络发送数据包功能包含:

- 若要通过虚拟网络发送 SpaceFibre 数据包,网络层应将构成 SpaceFibre 数据包的标准字符写入该虚拟网络上的一个端点,从 SpaceFibre 数据包的第一个标准字符开始;
- 如果虚拟网络上的端点暂时无法接收更多的标准字符,则网络层应等待直到端点能够再接收更多的标准字符;
- 在将一个 SpaceFibre 数据包写入虚拟网络的端点后,只要该端点能够接收更多的标准字符,则应开始写入通过该虚拟网络发送的下一个 SpaceFibre 数据包。

10.6 接收数据包

SpaceFibre 网络接收数据包功能包含:

- 当在虚拟网络的某个端点接收到标准字符时,应通知网络层有数据可从该端点读取;
- 网络层可在任何时间从一个端点读取数据,只要该端点有可用的数据;
- 当 LinkReset 条件被触发并且从端点读取的最后一个字符不是 EOP、EEP 或填充字符时,从该端点读取的下一个字符应为 EEP。

10.7 路由交换机

10.7.1 一般要求

SpaceFibre 路由交换机设计应满足下列要求。

- a) SpaceFibre 路由交换机将到达一个端口的数据包通过另一个端口转发到其所需的目的地,或在自寻址模式使能时通过同一个端口返回,转发端口由包头的第一个数据字符和路由表的内容确定。在使用包多播功能时,数据包通过两个或多个端口转发,见 10.10。
- b) SpaceFibre 路由交换机始终在数据包到达路由交换机的同一个虚拟网络上转发数据包。
- c) SpaceFibre 路由交换机包括以下内容。
 - 1) 3 个~32 个端口,包括连接到 SpaceFibre 网络的 SpaceFibre 端口以及为路由交换机提供并行接口的并行端口。最小 3 个端口包含了 2 个端口和 1 个配置端口。并行端口是将各种形式的并行接口连接到路由器的一种方式,包括 FIFO 接口、DMA 接口和并行总线等。
 - 2) 一个交换矩阵,负责将输入端口中的虚拟信道连接到输出端口中的虚拟信道。
 - 3) 一个路由表,用于和数据包的首字节(即目的地址)共同确定数据包被转发的端口。
 - 4) 一个配置节点,可通过路由交换机并使用端口地址 0 来进行访问,配置节点用于配置路由交换机,包括路由表和每个 SpaceFibre 端口的参数。
 - 5) 一种广播机制,用于验证和广播消息。
- d) 路由交换机中的端口为双向,包含一个输入端口、一个输出端口和一个或多个虚拟信道。
- e) 一个 SpaceFibre 端口由一条数据链路组成,包含 1 条~16 条信道。
- f) 每个虚拟信道通过分配一个虚拟网络号,归属于对应的虚拟网络。虚拟网络号将虚拟信道映射到虚拟网络。
- g) 虚拟信道将从虚拟网络接收到的与该虚拟信道相关联的数据包传递给交换矩阵。
- h) 交换矩阵将数据包转发到与其相连的同一端口或另一端口中的虚拟信道。
- i) 交换矩阵只允许在属于同一虚拟网络的虚拟信道之间传递数据包。属于同一虚拟网络的虚拟信道具有相同的虚拟网络号。
- j) 虚拟信道接收来自交换矩阵与该虚拟信道相关联的虚拟网络发送的数据包。
- k) 除配置端口外,所有端口至少包含 2 个虚拟信道。
- l) 一个端口最多包含 32 个虚拟信道。
- m) 一个端口中的虚拟信道数量不同于另一个端口中的虚拟信道数量。
- n) 路由交换机中的配置节点用于配置、控制和监视路由交换机的状态。
- o) 当路由交换机嵌入单机中时,路由交换机中的配置节点用于配置、控制和监视与路由交换机相关联的其他设备的状态。允许将嵌入某个单机中的路由交换机的配置端口用于配置、控制和监视该单机,同时配置、控制和监视该路由交换机。
- p) 路由交换机中的配置节点通过连接到交换矩阵的配置端口 0 进行访问。
- q) 配置端口只有一个虚拟信道,该信道的虚拟网络号为 VN0。
- r) 路由交换机配置端口只能使用路径寻址进行访问。
- s) 广播机制包含一个或多个广播通道。

图 36 中的 UML 图给出了 SpaceFibre 路由交换机的组成。

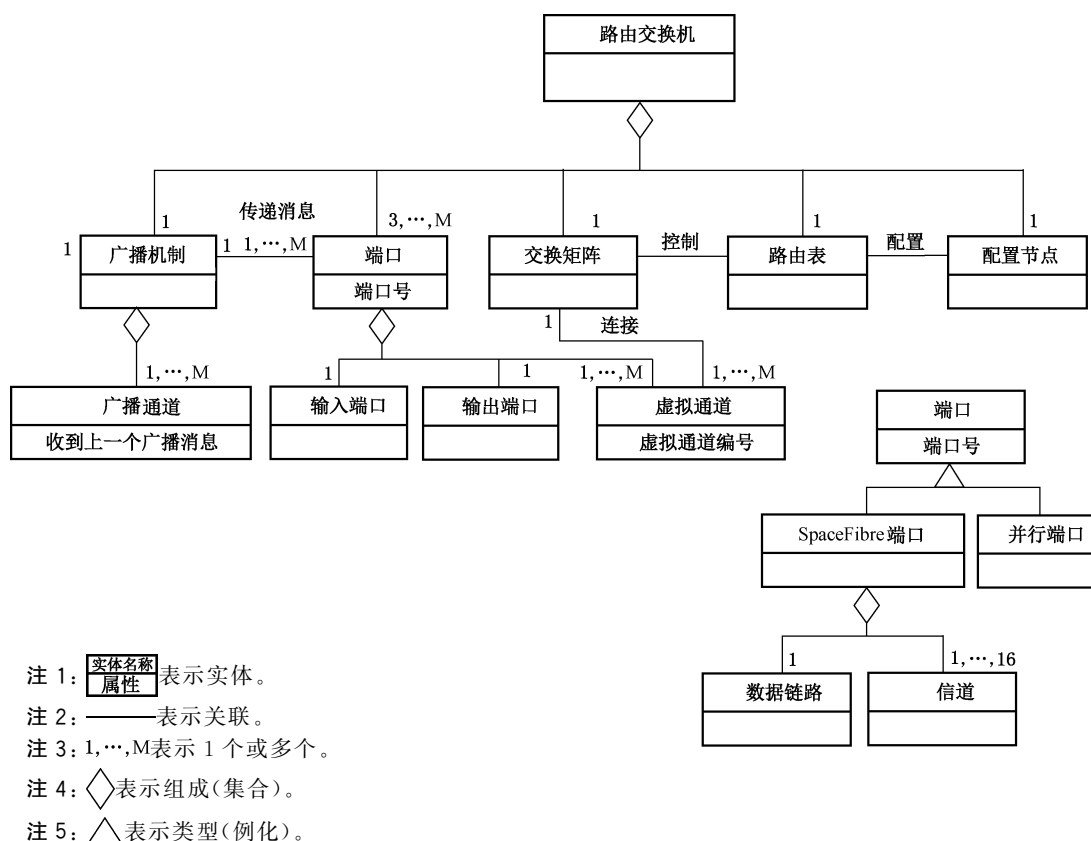


图 36 SpaceFibre 路由交换机的组成

10.7.2 路由表

路由交换机内部设置路由表,其具体设计要求包含下列内容。

- a) 路由交换机应使用数据包的包头首个数据字符来确定通过哪个输出端口转发数据包。
- b) 路由表应按照表 14 中的规则解析 SpaceFibre 数据包包头的的数据字符。包头数据字符值为 0 时,数据包被路由到路由交换机配置端口。包头数据字符值为 6 时,数据包被路由到输出端口 6。包头数据字符值为 49 时,数据包被路由到路由交换机中路由表的地址 49 所引用的输出端口。
- c) 配置端口应分配端口地址为 0。
- d) SpaceFibre 端口和并行端口应分配端口地址 1~31,即路由交换机上最多支持 31 个外部端口。

注 1: 路由交换机内部的路由表用于指示包头数据字符到输出端口的映射关系,以及在包交换到输出端口时是否删除包头的的数据字符。

注 2: 未定义或尚未配置的路由表条目为无效条目。

注 3: 地址 255 为预留的逻辑地址。

表 14 路由交换机地址

包头数据字符	地址类型	数据包路由目的端口	包头数据字符是否删除
0 0x00	路径地址	内部配置端口	是
1~31 0x01~0x1F	路径地址	分别对应物理输出端口 1~31	是

表 14 路由交换机地址 (续)

包头数据字符	地址类型	数据包路由目的端口	包头数据字符是否删除
32~254 0x20~0xFE	逻辑地址	由查找表指定从包头数据字符,即逻辑地址到转发数据包所通过的一个或多个输出端口之间的映射关系。对于逻辑地址 32~255 的每个值,在查找表中对应一个条目。每个条目通过配置可指定对应每个可能的逻辑地址的输出端口(输出端口可以为多个)	逻辑地址一般不删除,除非它是区域逻辑地址的一部分,见 10.8.3。如果物理输出端口是不同区域网络之间的网关时,则需要删除包头数据字符。包头数据字符也可以在节点相连的最后一条链路上删除
255 0xFF	逻辑地址 保留	保留的逻辑地址,其处理方式与其他逻辑地址相同	与逻辑地址相同的方式处理

10.7.3 路由交换机操作

路由交换机具体操作流程满足下列要求。

- a) 当数据包到达路由交换机时,其转发通过的输出端口应根据数据包的包头数据字符和路由表来确定。
- b) 数据包应路由到输出端口中的特定虚拟信道,该虚拟信道与数据包到达路由交换机输入端口时的虚拟信道具有相同的虚拟网络号。因此,数据包仍在同一虚拟网络中。
- c) 如果输出端口中的对应虚拟信道当前没有正在发送的数据包,则应分配它来发送新到达的数据包。将数据包分配到输出端口实际相当于将输入虚拟信道连接到输出虚拟信道。
- d) 一旦在输入端口虚拟信道和输出端口虚拟信道之间建立了连接,只要输出虚拟信道有能力接收,则标准字符和填充字符在到达时应从输入虚拟信道转发到输出虚拟信道,填充字符的删除操作也要考虑在内。填充字符的删除操作见 7.3.2。
- e) 如果输出虚拟信道无法接收更多的标准字符和填充字符,则输入虚拟信道应缓存这些字符,直到输出虚拟信道准备好接收更多的标准字符和填充字符。
- f) 在当前正在传输的数据包发送结束或由于发生错误而被中止前,输入端口中的虚拟信道和输出端口中的虚拟信道之间的连接不应改变。
- g) 如果输入端口中的虚拟信道在等待数据包字符到来时,则其所连接的输出端口中的虚拟信道也应等待。
- h) 如果所确定的输出端口中的虚拟信道正在发送来自另一个输入端口的数据包,则新到达的数据包应在输入端口等待,直到分配的输出端口空闲出来能够传输新到的数据包。
- i) 如果有两个或多个输入端口同时等待向输出端口中的同一虚拟信道发送数据包,则应通过仲裁来确定允许哪个输入端口向该输出虚拟信道发送下一个数据包。
- j) 输出端口中的虚拟信道在接收到数据包末尾的 EOP 或 EEP 之后,该虚拟信道输出端口即可用于接收来自另一个输入端口的数据包。
- k) 如果指定的输出端口中没有与数据包到达输入端口时的虚拟网络号相同的虚拟信道,则应丢弃该数据包,并由路由交换机记录无效的输出口错误。
- l) 路由交换机接收到空包时,应丢弃空包,即删除第 2 个 EOP 或 EEP。在 EOP 或 EEP 之后立即接收到的 EOP 或 EEP 表示没有目标地址的空数据包。

10.7.4 虚拟信道超时

针对虚拟信道超时的情况,应包含下列处理措施。

- a) 所有虚拟信道应使用可配置的虚拟信道超时机制来检测陷入死锁状态的数据包。
- b) 在可用逻辑资源允许时,可为每个虚拟信道单独设置可配置的虚拟信道超时检测功能。
- c) 当满足以下条件时,虚拟信道判定数据包陷入死锁状态:
 - 1) 数据包的第一个数据字符已传递到输出虚拟信道;
 - 2) 该数据包的 EOP 或 EEP 尚未传递到输出虚拟信道;
 - 3) 自上一个数据字符从输入虚拟信道发送到输出虚拟信道的时间已经超过了虚拟信道超时时间。
- d) 当数据包在路由交换机中陷入死锁时,应采取以下措施清除该死锁包:
 - 1) 丢弃输入虚拟信道中当前正在传输的数据包;
 - 2) 在输出虚拟信道中置入一个 EEP。
- e) 当路由交换机启用了虚拟信道超时机制,并且发生了数据包死锁时,应记录死锁数据包错误情况。发生此错误的情况可通过路由交换机配置端口读取。
- f) 虚拟信道超时机制应能被锁定,以便支持在数据包发生死锁时不会触发超时。

10.7.5 路由交换机复位

路由交换机复位时,应进行以下操作。

- a) 所有端口复位。
- b) 路由表中所有逻辑地址对应的表项设置为无效,从而保证带有逻辑地址的数据包被丢弃,直到逻辑地址在路由表中的对应表项被重新配置。
- c) 虚拟网络到虚拟信道的映射关系设置为默认值。10.3 规定了虚拟网络映射。
- d) 所有配置参数均设置为默认值。默认配置参数见 11.3。
- e) 禁用区域逻辑寻址的包头删除功能。
- f) 禁用组自适应路由。组自适应路由见 10.9。
- g) 禁用数据包多播功能。数据包多播见 10.10。

10.8 数据包寻址

10.8.1 路径寻址

数据包路径寻址功能具体包含下列内容。

- a) 路径地址用于表示数据包通过 SpaceFibre 网络从源端到目的端的路径。表 35 总结了每类地址的功能。
- b) 路径地址由数据包头的一个或多个数据字符组成,每个数据字符在 0~31 范围内。第 1 数据字符指定数据包遇到的第 1 路由交换机的输出端口,第 2 数据字符指定第 2 路由交换机的输出端口,依此类推,用于指定数据包通过网络从源端到目的端的路径上的所有路由交换机的输出端口。
- c) 当数据包的包头数据字符值为 0 时,应将该数据包路由到路由交换机的配置端口。
- d) 当一个 SpaceFibre 数据包到达路由交换机,并且包头数据字符在 0~31 范围内时,应将包头的数字字符删除并替换为一个 FILL 填充字符,然后将数据包路由到该数字字符指示的端口输出。例如,包头数据字符值为 6,则数据包会被路由到端口 6。在包头路径地址字符被使用后对其删除,从而露出下一个路径地址字符,供传输路径上的下一个路由器使用。

- e) 如果在删除包头的数据字符并用填充字符替换后,数据包的第一个字只包含填充字符,则该数据包应被删除。
- f) 完整的路径地址应包括一个数据字符序列,其中每个数据字符对应数据包从源端传输到目的端需要经过的一个路由器。
- g) SpaceFibre 路由交换机应支持路径寻址。

10.8.2 逻辑寻址

数据包逻辑寻址功能包含下列内容。

- a) 逻辑地址由数据包起始的第一个数据字符构成,取值范围在 32~255。
- b) 逻辑地址由从源端到目的端的路径上的所有路由交换机使用,支持在其路由表中查找所需的输出端口号。表 35 总结了每类地址的功能。
- c) 当到达路由交换机的 SpaceFibre 数据包包头数据字符在 32~255 内时,包头数据字符应作为查询路由交换机中路由表的索引,用于确定数据包通过哪个端口转发。例如,包头数据字符的值为 49,则路由表的表项 49 指定该数据包被转发的输出端口。如果表项 49 中包含值 7,则数据包通过端口 7 转发。
- d) 地址 255 作为保留,不应使用。
- e) 当数据包被转发时,逻辑地址不应从数据包中删除。如果使用了区域逻辑地址删除功能,见 10.8.3,在一个数据包的开头可能有多个逻辑地址。
- f) SpaceFibre 路由交换机应支持逻辑寻址。

10.8.3 区域逻辑寻址

数据包区域逻辑寻址功能具体包含下列内容。

- a) SpaceFibre 应支持区域逻辑寻址,该寻址方式是逻辑寻址的一种特殊情况。
- b) 路由交换机应配置为在转发数据包时,删除数据包开头的逻辑地址字符,并采用 FILL 填充字符替代。删除逻辑地址的功能用于扩展可使用逻辑寻址访问的节点数。一个大型网络可以被划分由逻辑地址区分的多个区域。当数据包跨越区域之间的边界时,包头的逻辑地址将被删除,从而露出应用于下一个区域的新逻辑地址。使用逻辑寻址的区域可连接到使用路径寻址的区域。这种机制允许使用一系列逻辑地址访问超过 223 个节点。
- c) 在路由交换机删除包头字符时,该路由交换机只允许删除一个数据字符。

10.8.4 寻址错误

数据包寻址错误识别情况包含下列内容。

- a) 如果具有某个特定编号的端口在路由交换机中不存在,则当新到数据包的包头数据字符请求该不存在端口时,应丢弃数据包。
- b) 如果一个数据包的包头数据字符引用了一个不存在的端口,则应记录一个无效地址错误。
- c) 如果包头数据字符是一个逻辑地址,该地址引用了路由表中尚未配置的表项,或者该表项已经配置为路由交换机中不存在的端口,则当路由交换机接收到数据包中的所有 N 个字符时,应丢弃处理。
- d) 如果一个数据包的包头数据字符请求了路由表中不含有效端口号的表项,则应记录无效地址错误。逻辑地址 255 的缺省操作与其他逻辑地址相同。
- e) 如果数据包的包头数据字符请求的输出端口中,没有配置与数据包到达端口中相同的虚拟网络的虚拟信道,则应丢弃该数据包,并记录无效地址错误和无效虚拟网络错误。

10.9 组自适应路由

路由交换机中的组自适应路由功能具体包含下列内容。

- a) 在路由交换机中,组自适应路由为可选的功能。
- b) 支持组自适应路由的路由交换机应能够将具有相同逻辑地址的数据包路由到多个端口中的一个,即组自适应路由。
- c) 支持组自适应路由的路由交换机应:
 - 1) 在路由表中为每个逻辑地址设置一个表项,该表项指示了具有该逻辑地址的数据包可以路由到的一个或多个输出端口;
 - 2) 当到达的数据包包头数据字符为逻辑地址时,从路由表的对应表项所指示的一组输出端口中,查找哪个端口已经准备好发送数据包,其中与数据包到达时的虚拟信道具有相同虚拟网络号的虚拟信道当前应未被用于发送其他数据包,则将数据包路由至该端口;
 - 3) 当为一个逻辑地址指定的所有输出端口已经开始通过其虚拟信道发送数据包,并其这些虚拟信道的虚拟网络号与数据包到达的虚拟网络号相同,则当输出端口中的每个虚拟信道变为空闲时,在等待使用这些指定的输出端口的所有输入端口之间进行仲裁;
 - 4) 当某个输入端口赢得仲裁时,将其输入虚拟信道连接到竞争所得的输出端口中的输出虚拟信道。
- d) 路由交换机不应支持路径地址的组自适应路由。

10.10 数据包多播

数据包多播功能具体包含下列内容。

- a) 在源节点中,将特定包发送到多个目的节点的包多播功能为可选的功能。需注意包多播功能引入了许多新的模式,有可能会造成虚拟网络部分阻塞或死锁。
- b) 路由交换机中的包多播功能为可选的功能。
- c) 支持包多播的路由交换机应提供如下支持:
 - 1) 路由交换机中的路由表指定了一组端口,即多播端口组,具有特定逻辑地址的数据包通过这组端口同时并行发送;
 - 2) 当到达的数据包带有多播配置的逻辑地址时,该数据包被发送到多播端口组中的每个输出端口;
 - 3) 只有当所有端口都准备好接收一个新的数据包时,才将要进行多播的数据包发送到指定的各输出端口;
 - 4) 如果多播组中的一个或多个输出端口未就绪,则所有输出端口都将等待,并且在它们全部就绪之前不应将数据包发送到任何多播输出端口。
- d) 当多播组中的一个或多个端口被停止时,路由交换机应继续将数据包转发到该多播组中的其他端口。
- e) 包多播只能使用同一虚拟网络上的虚拟信道。配置使用相同的虚拟网络号的虚拟信道位于同一虚拟网络上。

10.11 广播消息

10.11.1 广播通道

SpaceFibre 路由器广播通道设计应满足下列要求。

- a) 每个 SpaceFibre 路由器支持 256 个广播通道。

- b) 每个广播通道通过广播通道编号进行标识。
- c) 广播消息只能出现在其进入网络时的广播通道中。
- d) 一个广播通道只能与一个节点或一个路由交换机配置节点相关联。
- e) 与广播通道相关联的节点或路由交换机配置节点,是该广播通道上广播消息的唯一来源。这表明共有 256 个节点或路由交换机可以作为广播消息的源。网络中可包括不是广播消息源的其他节点。广播通道号指示广播消息的来源。
- f) 节点可不关联广播通道,此时该节点不能发送广播消息,但能够接收广播消息。

10.11.2 广播机制

SpaceFibre 路由器广播机制具体包含下列要求。

- a) 当广播消息到达路由交换机时,应将其到达的端口(到达端口)与同一广播通道的上一广播消息到达的端口(前一到达端口)进行比较。
- b) 在下列任何情况下,应接收广播信息并进行广播。
 - 1) 此消息是路由交换机复位后该广播通道上的第一条广播消息。
 - 2) 到达端口与上一次接收广播的前一到达端口相同。
 - 3) 从接收同一广播通道的上一条广播消息之后,已超过广播超时间隔,且该广播消息的 LATE 标志为清除状态,表明该广播消息未被延迟。此方法保证同一广播消息不被同一节点多次接收。同时不限制同一通道上广播消息的生成速率,除非在发生永久链路错误或网络拓扑改变的情况下,在这种情况下,节点在发送新广播消息之前应等待广播超时间隔的持续时间,以确保广播不被丢弃。
- c) 当网络中的所有链路都在运行时,广播超时间隔应设置为略长于广播消息通过网络最长路径所需的时间。
- d) 广播消息应通过路由交换机的所有其他端口进行广播,除了广播消息到达的端口。
- e) 广播消息只能通过路由交换机的所有活动端口中使能消息广播功能的端口进行广播。

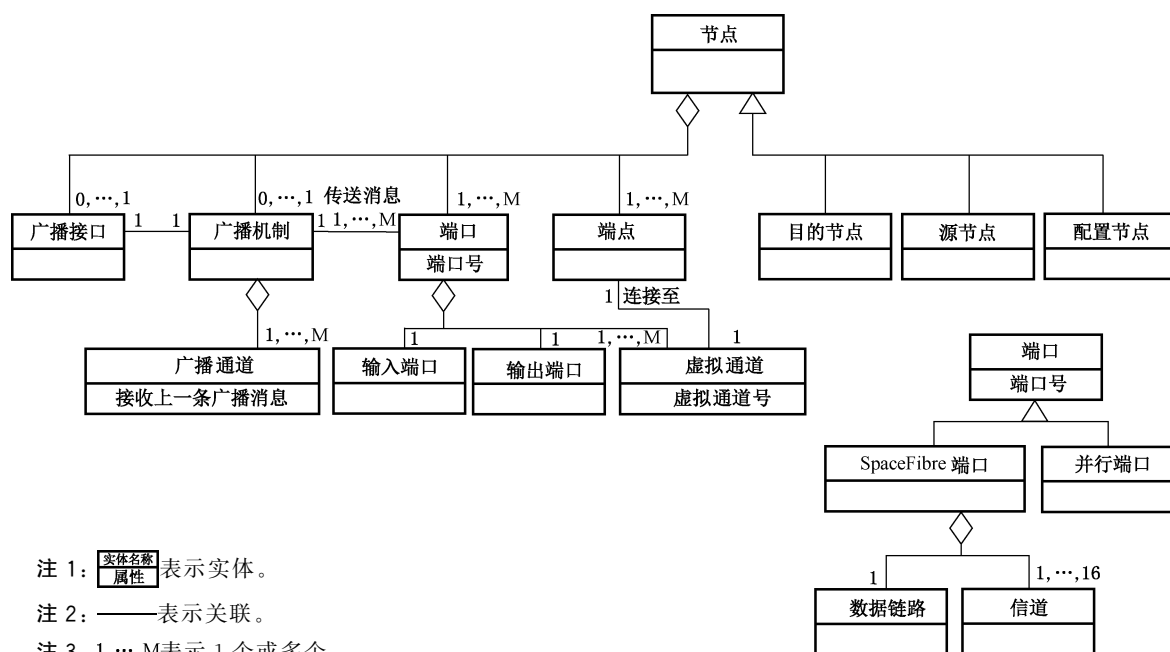
10.12 SpaceFibre 节点

SpaceFibre 节点的功能、结构以及相关设计要求包含下列内容。

- a) 节点应具有以下任何一种功能:
 - 1) 作为在 SpaceFibre 网络上发送数据包和广播消息的源;
 - 2) 作为在 SpaceFibre 网络上接收数据包和广播消息的目的;
 - 3) 同时作为数据包和广播消息的源和目的。
- b) SpaceFibre 节点应包括:
 - 1) 一个或多个 SpaceFibre 端口或并行端口,每个端口包含一个或多个虚拟信道;
 - 2) 一个或多个端点,每个端点为端口的虚拟信道和主机系统之间提供接口;
 - 3) 零或一个广播模块,在节点的端口和广播接口上广播广播消息;
 - 4) 零或一个广播接口,为节点上运行的应用程序提供到广播模块的接口。
- c) 端口应是双向的,并包含一个输出端口、一个输入端口和一个或多个虚拟信道。注意非对称多信道链路(一个方向上的信道数多于另一个方向上的信道数)也属于双向链路,即每一端的端口都是双向端口。
- d) 端点应提供一种方式,使应用程序能够连接到端口中的虚拟信道,并通过网络发送和接收 SpaceFibre 数据包。
- e) 端点与它所关联的虚拟信道属于同一虚拟网络。
- f) 当要通过端口在特定虚拟网络上发送数据包时,主机系统应将数据包传递到端口的端点,该端

点的虚拟信道对应指定的虚拟网络。

- g) 当要通过端口接收特定虚拟网络上发送的数据包时,主机系统应从端口的端点读取数据包,该端点的虚拟信道对应指定的虚拟网络。
 - h) SpaceFibre 节点应支持虚拟网络号 VN0 和至少一个其他虚拟网络。
 - i) 当逻辑资源极其有限时,SpaceFibre 节点可以仅支持一个虚拟网络。一般不建议使用只有一个虚拟网络的节点,因为当只支持一个虚拟网络时,SpaceFibre 的许多优点都会丢失。
 - j) 一个配置节点只能有一个虚拟信道,该信道分配虚拟网络号 VN0。
 - k) 广播接口应接收来自应用程序的广播消息,以通过广播信道在 SpaceFibre 网络上广播。
 - l) 广播接口应将通过广播信道从 SpaceFibre 网络接收到的广播消息传递给节点上的应用程序。
- 图 37 的 UML 图给出了 SpaceFibre 节点的组成构件和 SpaceFibre 节点的例化。



- 注 1: 表示实体。
- 注 2: —— 表示关联。
- 注 3: 1, ..., M 表示 1 个或多个。
- 注 4: 表示组成(集合)。
- 注 5: 表示类型(例化)。

图 37 SpaceFibre 节点组件和节点例化

10.13 SpaceFibre 单元



SpaceFibre 单元结构为:

- a) SpaceFibre 单元应包括 0 个或多个节点和 0 个或多个路由交换机;
- b) 一个 SpaceFibre 单元应至少包括一个节点或路由交换机;
- c) SpaceFibre 单元应包含 1 个或多个使用 SpaceFibre 网络服务的应用程序。

SpaceFibre 单元的例子包括路由交换机、带有 SpaceFibre 接口的仪器、具有 SpaceFibre 接口的处理器和带有内部 SpaceFibre 网络连接内存模块或带有外部 SpaceFibre 接口的大容量存储器。

SpaceFibre 单元的组件如图 38 的 UML 图所示。

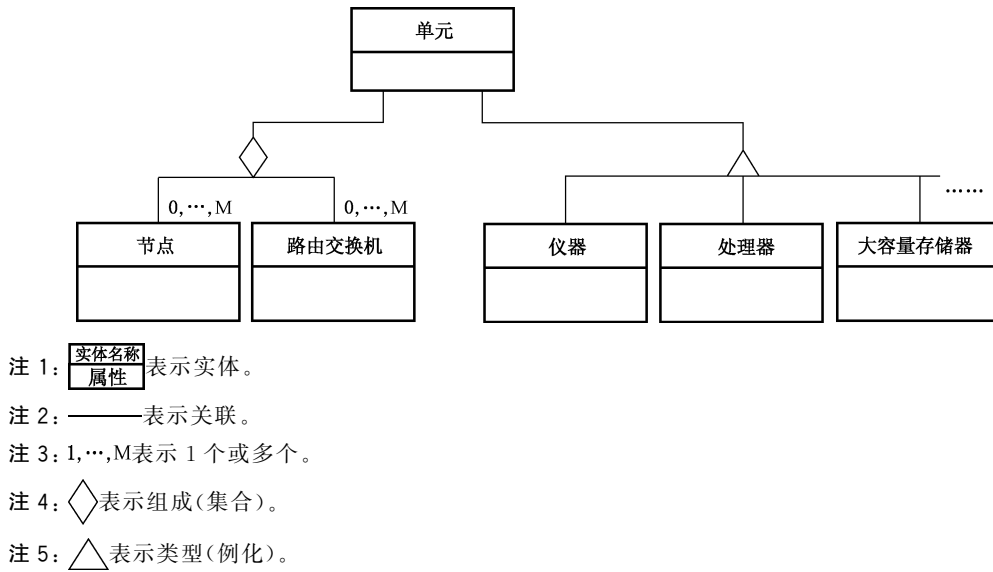


图 38 SpaceFibre 单元的组件和例化

11 管理信息库

11.1 管理信息库功能

SpaceFibre 管理信息库负责配置、控制和监控其他 SpaceFibre 层的操作。

11.2 网络管理

SpaceFibre 网络管理设计应包含下列内容。

- a) 采用 RMAP 协议实现 SpaceFibre 网络的远程配置、控制和监控。
- b) 网络配置、控制和监控只能使用虚拟网络 VN0 进行。
- c) 网络配置、控制和监控只能由网络管理员进行。
- d) 在虚拟网络 VN0 上,仅允许网络管理员作为 RMAP 发起端。由于只有 VN0 用于网络配置、控制和监视,并且只有网络管理器可以作为 VN0 上的 RMAP 发起端,这可以防止任何其他节点意外地访问 SpaceFibre 网络中路由交换机和节点的配置、控制和监视空间。

11.3 配置参数

SpaceFibre 网络的配置参数应按照以下要求设计:

- a) 配置参数通过管理接口读写;
- b) 网络提供表 15 中列出的配置参数;
- c) 上电或接口复位后,配置参数设置为表 15 中提供的值;
- d) 当应用程序需要特定的默认值时,在接口复位时,将配置参数设置为与表 15 中规定的值不同的值。

表 15 SpaceFibre 配置参数

协议层	参数	描述	初始值
网络层	路由表	路由交换机为每个逻辑地址指定数据包转发所通过的一个或多个端口	所有端口映射为“无效”状态,表示逻辑地址尚未编程,带有该逻辑地址的数据包到达时被丢弃
	路由器虚拟网络映射	路由交换机每个端口的虚拟网络到虚拟信道的映射关系	VN ₀ 映射到 VC ₀ , VN ₁ 映射到 VC ₁ , 依此类推, VN _y 映射到 VC _y
	优先级(VC)	分配给特定虚拟信道的优先级	设计中所支持的具有最低优先级的优先级,例如,如果有 4 个优先级,则为 4
	归一化预期带宽(VC)	总链路带宽中分配给特定虚拟信道 VC 的部分	见 9.3.4.4.5 r)
	分配的时隙(VC)	允许特定虚拟信道发送数据帧的时隙。 该参数是一个 64 位的向量,其中 64 是规划的总时隙数,某一位设置为 1,表示虚拟信道可以在对应的时隙中发送数据	全为 1
	虚拟信道空闲时间限制	确定一个通道在不发送数据的情况下可以空闲的最长时间,达到该时间则产生过低利用指示信号。时间长度可以硬编码,也可以由可选的配置参数为所有虚拟信道或每个虚拟信道单独提供	1 ms
	带宽信用限制	确定虚拟信道可以累积的最大信用。当达到最大信用时,带宽信用计数器饱和,并开始忘记链路先前的带宽利用率。因此带宽信用限制决定了带宽信用计数器记住多久之前的带宽使用情况。此参数通常是硬连接的。如果在设计中将其作为管理参数,则将同一个值用于所有虚拟信道	取决于设计实现
	归一化预期广播带宽	总链路带宽中分配给广播消息的部分	10%
	连续模式(VC)	指示虚拟信道是否设置为连续模式,见 9.3.2.2 h)	非连续模式
	数据加扰	确定在 SpaceFibre 链路上传输的数据帧是否被加扰	加扰
数据链路层	FCT 倍数(M)	FCT 倍数(M)是 1~8 范围内的整数,用于确定每个 FCT 的值。此参数通常是与硬连接状态关联的。如果设计实现时将其作为管理参数,则只有在链路复位时,即链路复位状态机未处于链路初始化状态时,才可对其进行更新	当未实现多信量子层时,设置为 1。否则设置为最大数据发送信道数

表 15 SpaceFibre 配置参数 (续)

协议层	参数	描述	初始值
数据链路层	数据段倍数(N)	数据段倍数(N)是一个小于或等于链路中数据发送信道数的整数,包括活动信道和非活动信道。此参数通常是与硬连接状态关联的。如果一个设计实现将其作为管理参数,则只有在链路复位时,即链路复位状态机未处于链路初始化状态时,才可对其进行更新	当未实现多信道子层时,设置为 1。否则设置为最大数据发送信道数
	链路复位	执行链路复位操作,例如,当链路与一个设备断开连接,然后连接到另一个设备时	非执行
	接口复位	复位链路和所有配置参数	不适用
多信道子层	最大数据发送信道数	链路中允许的最大数据发送信道数。该参数仅在链路复位完成后起作用	由设计实现决定, ≤16 路
	信道接收使能(lane)	能够接收的信道	对所有能够接收的信道进行声明
	信道发送使能(lane)	能够发送的信道	对所有能够发送的信道进行声明
	启动模式(lane)	对相应的信道 lane 声明 LaneStart 或取消声明 LaneStart	取消声明
	自启动(lane)	对相应的信道 lane 声明 Autostart 或取消声明 Autostart	声明有效
	信道复位(lane)	对相应的信道 lane 声明 LaneReset 或取消声明 LaneReset	取消声明
信道子层	并行环回(lane)	使能或禁用对应信道 lane 的并行环回功能	取消声明
	待机原因(lane)	设置信道 lane 待机的原因,对应 STANDBY 控制字中 StandbyReasonField 字段的第 4 位到第 7 位。使用的值取决于用户或设计实现结果	StandbyReasonField 字段的第 4 位到第 7 位设置为 0
物理层	近端串行环回(lane)	使能或禁用对应信道 lane 的近端串行环回功能	禁用
	远端串行环回(lane)	使能或禁用对应信道 lane 的远端串行环回功能	禁用

11.4 状态参数

SpaceFibre 网络的状态参数按照下列要求设计：

- a) 状态参数通过管理接口读取；
- b) 强制性状态参数见表 16；
- c) 具体设计实现根据调试目的增加状态信息；
- d) 清除状态参数的方式取决于具体设计；
- e) 收到链路复位命令时清除状态参数。

表 16 SpaceFibre 状态参数

协议层	参数	描述	
网络层	节点端点状态	节点中每个端点的状态信息	
	路由交换机状态	路由交换机的状态信息	
数据链路层	链路子层	带宽过使用(VC)	表明虚拟信道使用的带宽超过预期,并且已达到最小带宽信用值
		带宽欠使用(VC)	表明虚拟信道使用的带宽低于预期,并且带宽信用已经保持在其最大值一定时间(虚拟信道空闲时间上限)
		有信用空间(VC)	表明在链路另一端(即目的端)的虚拟信道输入缓冲区中有可用空间
		输入缓冲区溢出(VC)	表明虚拟信道的输入缓冲区已满时仍在接收数据,属于不符合协议的异常情况,若发生表明出现了严重的协议错误
		FCT 信用计数器溢出(VC)	表明特定虚拟信道的 FCT 信用计数器已溢出
		16 位 CRC 错误	发生 16 位 CRC 错误时置位,表明 1 个或多个信道接收到多比特错误,不符合正常操作的预期
		帧错误	当数据字识别状态机指示发生帧错误时置位
		8 位 CRC 错误	发生 8 位 CRC 错误时置位。此情况可能在正常操作时发生
		序列错误	发生序列错误时置位。此情况可能在正常操作时发生
		错误恢复缓冲区为空	错误恢复缓冲区为空时置位。表示已发送的所有数据帧、广播帧和 FCT 都已收到应答确认
		错误恢复尝试次数	SpaceFibre 端口尝试错误恢复的次数。每启动一次错误恢复尝试增加 1
		协议错误导致链路复位	当接收到序列计数不一致的 ACK 或 NACK 时置位
远端链路复位	当位于链路近端的链路复位状态机由于从信道子层或多信道子层接收到的信道功能信息中 INIT3LinkReset 标志字段为 1,使状态机从链路初始化(LinkInitialised)状态转移到近端复位(Near-EndReset)状态时,该参数置位		

表 16 SpaceFibre 状态参数 (续)

协议层		参数	描述
数据链路层	多信道子层	数据发送信道	指示哪些信道是数据发送信道
		数据接收信道	指示哪些信道是数据接收信道
		对齐状态	对齐状态机的状态
	信道子层	信道状态 (lane)	指示信道 lane 中信道初始化状态机的当前状态
		信道 RXERR 计数 (lane)	RXERR 控制字计数值, 可用来获得当前的误码率 BER
		信道 RXERR 溢出 (lane)	当 RXERR 控制字计数值在 Active 状态下溢出时置位
		远端待机 (lane)	从链路远端接收到 STANDBY 控制字时置位, 表明远端将进入待机状态。也可选择提供待机原因
		超时 (lane)	当连接超时置位
		远端丢失信号 (lane)	当从链路远端接收到 LOST_SIGNAL 控制字时置位, 表明远端已丢失来自近端的信号。可选择提供 LOST_SIGNAL 控制字的 Reason 字段的值
		远端功能 (lane)	报告上一个正确接收的 INIT3 控制字中 Capabilities 字段的值
	物理层	RX 极性 (lane)	当信道 lane 的接收器极性反相时置位
无信号 (lane)		在信道 lane 接收器没有检测到信号时声明	
	比特同步 (lane)	指示信道 lane 何时达到比特同步	

12 可靠性设计

12.1 服务质量保证机制

12.1.1 保证机制说明

SpaceFibre 提供优先级排序、带宽预留、时隙规划调度等 3 种服务 QoS 保证机制, 3 种机制可组合使用, 不同虚拟信道独立配置 QoS 保证机制。

12.1.2 优先级管理

SpaceFibre 网络中的每个虚拟信道支持按照应用需求设置优先级, 可保证控制命令、管理参数等安全关键类数据优先传输, 从而避免网络堵塞造成关键数据丢失。只有在具有更高优先级的虚拟信道都没有准备好数据时, 当前优先级虚拟信道方可发送数据。当一个虚拟信道的优先级设置为最低优先级时, 该虚拟信道按照最大努力方式进行通信。虚拟信道的优先级管理机制见 9.3.4.4。

12.1.3 带宽预留

SpaceFibre 网络中的每个虚拟信道可分配一定比例的网络带宽, 在通信时每个虚拟信道基于本通道的预留链路带宽和近期链路利用率计算出带宽信用, 确定虚拟信道的优先权值。拥有较大预留带宽和较低近期带宽利用率的虚拟信道具有高带宽信用。拥有相同预留带宽和较高近期带宽利用率的虚拟信道具有较低的带宽信用。在同一个优先权级别下, 各个虚拟信道基于当前带宽信用来竞争发送下一

个数据段。带宽预留机制保证虚拟信道能够在有限的延时边界内安全可靠的利用网络资源完成通信。虚拟信道的带宽预留管理机制见 9.3.4.4。

12.1.4 时隙规划

时隙规划 QoS 机制提供了一种保证 SpaceFibre 网络资源完全确定性分配的方案。网络通信时间被分割成一系列时隙,在每个时隙内可调度不同的虚拟信道发送数据。当一个时隙到来时如果虚拟信道被调度在该时隙发送数据,则它可以基于自身的优先权值发送数据。在其他时隙内,若虚拟信道没有被调度发送数据,则不准许其发送任何数据。时隙规划机制最大程度避免了不同虚拟信道之间的随机冲突,可满足时间敏感类业务的高实时性通信需求,见 9.3.4.3。

12.2 FDIR 机制

12.2.1 故障检测

SpaceFibre 通过检查每个 8B/10B 符号的游程值错误和无效 8B/10B 编码值实现自动故障检测。SpaceFibre 所选择 8B/10B 中的 K 码相对数据码具有更大的汉明距离,这样保证数据码中发生单比特错误时不会误判为有效 K 码。此外,每个数据帧、广播帧、流控制令牌(FCT)、确认控制字(ACK)和否认控制字(NACK)均采用 CRC 校验进行保护。FCT 可用于管理链路上的数据流,ACK 和 NACK 可用于支持链路错误恢复。

12.2.2 故障隔离

SpaceFibre 在不同层级设计了多种故障隔离措施。

- a) 在物理层采用交流耦合方式或光纤传输方式进行电气隔离,能够有效防止接口上的直流电压超过发送器输出或接收器输入所允许的最大值,从而造成硬件故障。
- b) 在通信管理方面,SpaceFibre 提供了时间维度隔离和空间维度隔离机制,时间维度隔离能够将错误限制在其发生的数据帧内部,不会影响其他数据帧;空间维度隔离将故障限制在其发生的虚拟信道内部,一个虚拟信道中的错误不会影响其他虚拟信道中的数据流。对于因内部故障原因可能对外乱发数据的节点,通过优先级、带宽分配、时隙规划等 QoS 保证机制可有效隔离其故障对网络的影响。

12.2.3 故障恢复

SpaceFibre 在数据链路上使用重传机制实现自动故障恢复,结合故障检测措施,支持自动重传数据帧、广播帧和 FCT,重传处理过程仅和线缆传输延时有关系,可达到极高重试速度和较小的缓冲存储量,支持自动适应不同的链路长度。

SpaceFibre 设计多信道子层,实现链路带宽扩容和信道冗余容错,支持单信道故障后逐个隔离的平滑降级机制,保证整个链路的高可用性。当多信道链路中的一条信道发生常驻故障时,通过重试或重新初始化无法恢复运行,此时多信道子层可自动切换为使用剩余的可用信道,减少可用带宽,但不会停止链路运行。对于关键传输链路,还可增加扩展信道,当发生常驻信道故障时,多信道子层可利用扩展信道自动替换故障信道,从而保证链路带宽不变。SpaceFibre 提供了信道误码率监测功能,当误码率过高导致无法有效利用链路带宽时,则将信道状态报告为故障,并可对故障信道采取隔离或替代措施。

附录 A

(资料性)

SpaceFibre 总线物理层设计参考

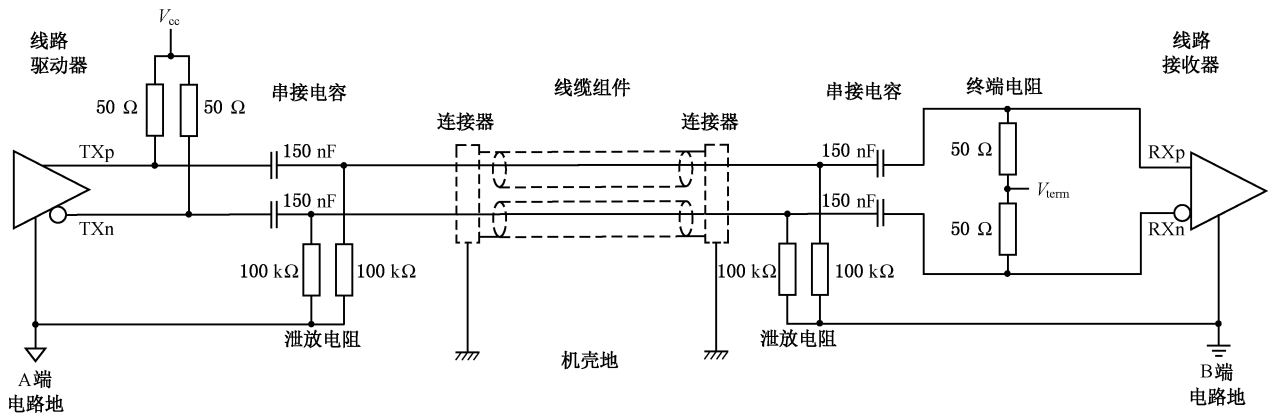
A.1 总则

本附录给出 SpaceFibre 总线通信所采用的物理层设计参考,包括电物理层和电传输介质设计,光纤物理层和光纤介质设计。

A.2 电物理层

A.2.1 基本属性

电物理层包括一个线路驱动器、电缆组件或者 PCB 走线和一个线路接收器。如图 A.1 所示。



注 1: 图中串接电容取值为示意,一般取值为 100 nF~200 nF。

注 2: 机壳地连接方式取决于航天器系统接地方案和任务的具体要求。

图 A.1 电物理层单方向结构示意图

A.2.2 串行输出

电物理层串行输出设置包含下列内容。

- a) 串行输出产生如表 A.1 所示的差分信号。
- b) 串行输出使用 100 nF~200 nF 串联电容在两个发送信号 TXp 和 TXn 上实现交流耦合。交流耦合可在发生故障导致信号线上的直流电压过高时保护驱动器和接收器,有助于防止故障传播,同时对直流接地回路进行隔离。
- c) 如果特定的串行器/解串器需要不同的交流耦合电容,可使用 100 nF~200 nF 范围以外的值。
- d) (100±10) kΩ 泄放电阻从串联耦合电容的连接器侧连接到发送信号 TXp 和 TXn 上的本地电路地。串联电容和泄放电阻如图 A.1 中所示。
- e) 串行输出线驱动器使用 CML。差分 CML 输出信号如图 A.2 所示。可使用电阻网络将 VML 转换为 CML。
- f) 当 FPGA 或 ASIC 中的串行器/解串器串行接口使用与 CML 不同类型的驱动器技术时,串行输出线驱动器可使用除 CML 之外的其他技术,前提是满足 g)~k) 的信号要求。
- g) 当终端用一对(50±1) Ω 终端电阻端接时,如图 A.3 所示,并使用组合带宽至少为比特率 3 倍

的高带宽示波器进行测量,输出信号特征包括以下内容。

- 1) 每个信号的幅度, V_{TXp-PK} 和 V_{TXn-PK} 分别在 0.2 V~0.4 V 之间。
 - 2) 差分峰峰值幅度 $V_{DIFF-PK-PK}$ 为 TXp 减去 TXn 的最大绝对值的 2 倍,在 0.8 V~1.6 V 之间。
 - 3) 抖动小于比特位时间的 35%,即抖动小于或等于 $\pm 0.175UI$ 。近端差分信号对应的眼图样板如图 A.4 所示。
- h) 数据信号速率在 1 Gbit/s~3.125 Gbit/s 范围内时,串行眼图见表 A.2 中所述的时间间距。近端值是在发送器输出端测量,远端值是在接收器输入端测量。
 - i) 数据信号速率在 3.125 Gbit/s~6.25 Gbit/s 范围内时,串行眼图见表 A.3 中所述的时间间距。
 - j) 当工作在 3.125 Gbit/s~6.25 Gbit/s 之间且接收器具有较低的输入阈值电压时,A1 的远端值可为 50 mV,这样当接收器能够检测到较小的信号时,能够支持使用电传输介质覆盖更远的距离。
 - k) 驱动器特性见表 A.4 和表 A.5 中列出的值。对于抖动按照总抖动值(TJ)和确定性抖动值(DJ)可用公式(A.1)表达。

$$TJ_{p-p} \leq DJ_{p-p} - RJ_{p-p} \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

p-p —— 抖动峰-峰值;

RJ —— 满足高斯分布的随机抖动,可根据误码率确定。

- l) 在发送器支持的情况下,可采用差分信号的预加重或去加重措施。预加重可补偿发送器线缆的“RC”效应,有助于扩宽接收端眼图。在后续位的值与当前位相同时,去加重会降低后续位的信号电平,从而减少了符号间干扰。
- m) 线路驱动器输出端的正值差分信号($V_{TXp} > V_{TXn}$)用来传输逻辑“1”。
- n) 线路驱动器输出端的负值差分信号($V_{TXp} < V_{TXn}$)用来传输逻辑“0”。
- o) 当线路驱动器使能信号有效时,线路驱动器正常工作。
- p) 当线路驱动器支持低功耗非工作状态时,线路驱动器在线路驱动器使能信号无效时进入低功耗非工作状态。

表 A.1 控制符号汇总表

信号	功能
TXp	差分串行输出的正端
TXn	差分串行输出的负端

表 A.2 1 Gbit/s~3.125 Gbit/s 串行眼图模板间距

符号	近端取值	远端取值	单位
X1	0.175	0.275	UI
X2	0.390	0.400	UI
A1	400	100	mV
A2	800	800	mV



表 A.3 3.125 Gbit/s~6.25 Gbit/s 串行眼图模板间距

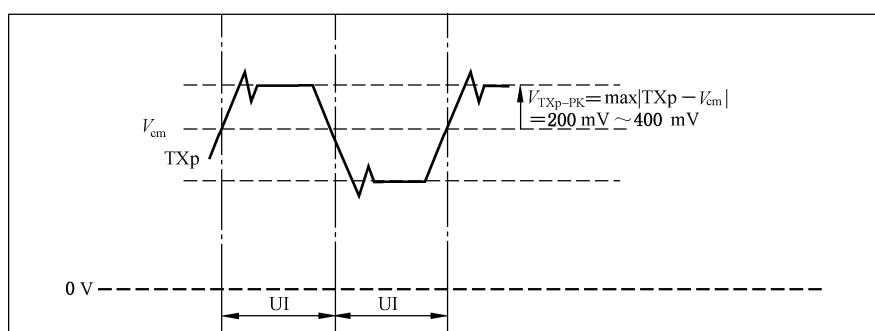
符号	近端取值	远端取值	单位
X1	0.165	0.3	UI
X2	0.4	0.5	UI
A1	400	100	mV
A2	800	800	mV

表 A.4 1 Gbit/s~3.125 Gbit/s 的驱动器和接收器特性

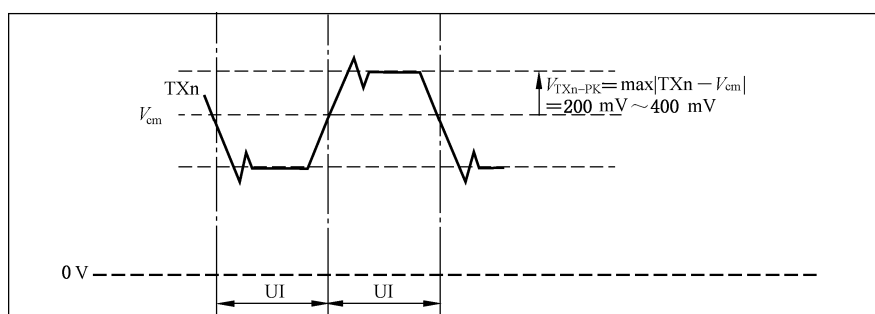
参数	取值	说明
比特率	(1 ± 0.000 1) Gbit/s (1.25 ± 0.000 125) Gbit/s (2 ± 0.000 2) Gbit/s (2.5 ± 0.000 25) Gbit/s (3.125 ± 0.000 312 5) Gbit/s	标准比特率。也可使用 1 Gbit/s~3.125 Gbit/s 范围内的其他比特率
码元周期(标称值)	1 000 ps	1 Gbit/s
	800 ps	1.25 Gbit/s
	500 ps	2 Gbit/s
	400 ps	2.5 Gbit/s
	320 ps	3.125 Gbit/s
输出幅值 差分峰峰值	1 600 mV max 800 mV min	—
输入阈值(差分值)	±100 mV max	具体阈值取决于所使用的串行器/解串器
负载	80 Ω~120 Ω	标称值 100 Ω
近端抖动值	总量	≤ ±0.175 UI (均值到峰值)
	确定性分量	≤ ±0.085 UI (均值到峰值)
远端抖动值	总量	≤ ±0.275 UI (均值到峰值)
	确定性分量	≤ ±0.185 UI (均值到峰值)
信号耦合	AC	近端和远端放置 100 nF ~ 200 nF 电容
差模输入回波损耗	≥ 10 dB	100 Ω 参考值 100 MHz~0.5 倍比特率
共模输入回波损耗	≥ 6 dB	25 Ω 参考值

表 A.5 3.125 Gbit/s~6.25 Gbit/s 的驱动器和接收器特性

参数		取值	说明
比特率		(4 ± 0.000 4) Gbit/s (5 ± 0.000 5) Gbit/s (6.25 ± 0.000 625) Gbit/s	标准比特率, 也可使用其他比特率
码元周期(标称值)		250 ps	4 Gbit/s
		200 ps	5 Gbit/s
		160 ps	6.25 Gbit/s
输出幅值 差分峰峰值		1 600 mV max 800 mV min	—
输入阈值(差分值)		±100 mV max	具体阈值取决于所使用的串行器/解串器
负载		80 Ω~120 Ω	100Ω 标称值
输出近端 抖动值	总值	≤ ±0.165 UI (均值到峰值)	总抖动值是针对 10 ⁻¹² 的误码率水平, 即在该抖动水平下, 预期误码率为 10 ⁻¹²
	确定性分量	≤ ±0.085 UI (均值到峰值)	
输出远端 抖动值	总值	≤ ±0.3 UI (均值到峰值)	
	确定性分量	≤ ±0.23 UI (均值到峰值)	
信号耦合		AC	近端和远端放置 100 nF ~ 200 nF 电容
差模输入回波损耗		≥ 8 dB	100 Ω 参考值 100 MHz ~ 0.5倍比特率
共模输入回波损耗		≥ 6 dB	25 Ω 参考值

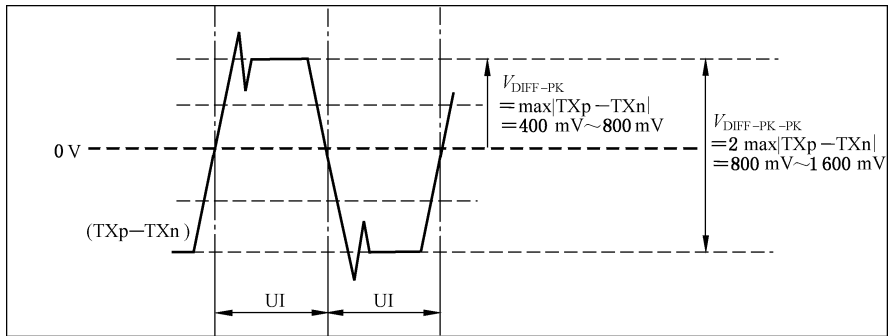


a) CML 信号的正端 (TXp)



b) CML 信号的负端 (TXn)

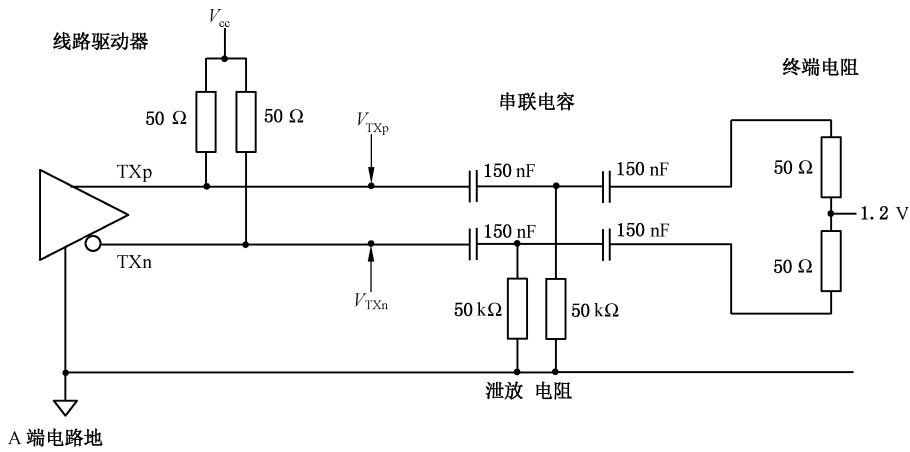
图 A.2 串行输出信号



c) 差分 CML 信号 (TXp-TXn)

注: V_{cm} 为共模电压。

图 A.2 串行输出信号 (续)



注: 图中电容的取值为示意, 一般为 100 nF~200 nF。

图 A.3 串行输出测试电路

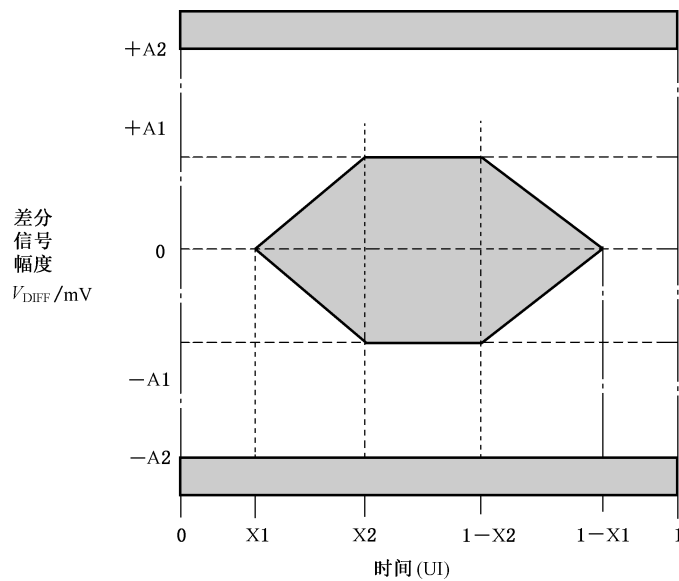
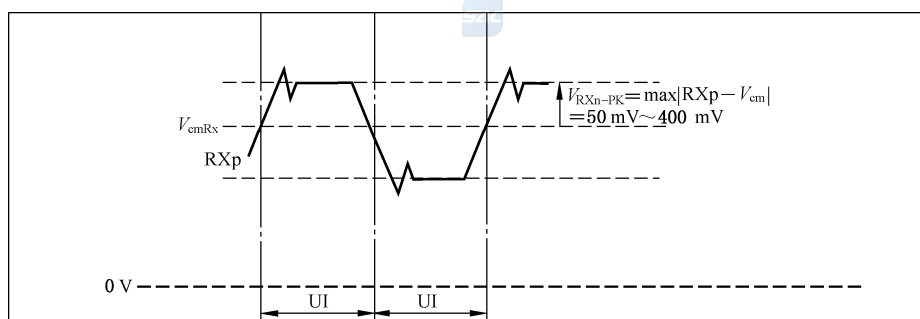


图 A.4 串行眼图模板

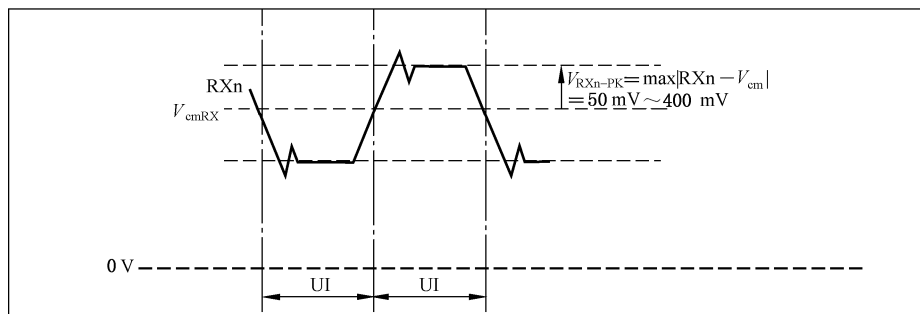
A.2.3 串行输入

电物理层串行输入设置包含下列内容。

- a) 串行输入为差分信号,其中 RX_p 为差分串行输入的正端, RX_n 为差分串行输入的负端。
- b) 接收器特性见表 A.4 和表 A.5 中列出的值。
- c) 串行输入在接收信号 RX_p 和 RX_n 上使用 $100\text{nF}\sim 200\text{nF}$ 的串联电容进行交流耦合。交流耦合可在发生故障导致信号线上的直流电压过高时保护驱动器和接收器,有助于防止故障传播,还可以防止直流接地回路。
- d) 如果特定的串行器/解串器需要不同的交流耦合电容,则可以使用 $100\text{ nF}\sim 200\text{ nF}$ 范围之外的值。
- e) 在接收信号 RX_p 和 RX_n 上, $(100\pm 10)\text{ k}\Omega$ 的下拉电阻从串联耦合电容的连接器侧连接到本地电路地。
- f) 串行输入差分信号的每一半边并一个 $(50\pm 10)\ \Omega$ 的终端电阻,从而维持一个 $0\text{ V}\sim 2.5\text{ V}$ 的终端电压,如图 A.5 所示。限制终端电压是为了防止在打开/关闭设备时线路上出现高电压尖峰。实际的终端电压由接收器电路确定。
- g) 当需要特定接收器设备时,可使用输入信号终端的等效形式。
- h) 当接收器支持后加重时,可使用差分接收信号的后加重处理。后加重可补偿接收器中电缆的低通特性,从而在接收器处扩张眼图。
- i) 大于 $+100\text{ mV}$ 的差分信号 $(RX_p - RX_n)$ 在线路接收器输出端产生逻辑 1。差分接收信号及其组成如图 A.5 所示。
- j) 小于 -100 mV 的差分信号 $(RX_p - RX_n)$ 在接收器输出端产生逻辑 0。

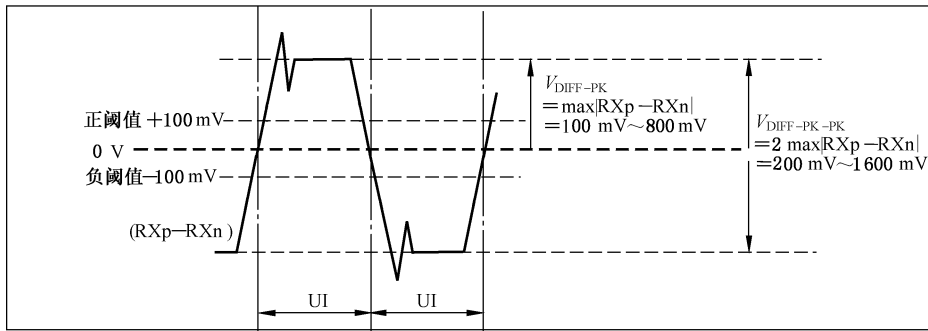


a) CML 信号的正端 (RX_p)



b) CML 信号的负端 (RX_n)

图 A.5 串行输入信号



c) 差分 CML 信号 (RXp - RXn)

注: V_{cm} 为共模电压。

图 A.5 串行输入信号 (续)

- k) 只要接收的差分电压对于接收器是足够的,或者接收器处的最大信号电平不大于接收器的容限,则不满足最小 ± 100 mV 差分输入电压要求的信号也可使用。如 TLK2711-SP 的最小差分信号为 220 mV,最大为 1 600 mV,相当于有 ± 220 mV 的阈值和 $\pm 1 600$ mV 的最大信号电平。
- l) 当使用带有差分探头和至少 3 倍于比特率的组合带宽的高带宽示波器在线路接收器的输入端进行测量时,接收器在表 A.6 和表 A.7 中列出的远端条件下正确运行。接收器的差分信号要求在图 A.4 的眼图模板中说明。
- m) 当对线路接收器输入信号的测量受到限制时,可在接收器电路芯片上接收器引脚的 1 cm 内测量接收信号眼图,或者只要对测量点和接收器输入之间的信号差异进行补偿,也可在接收器引脚更远处测量接收眼图。
- n) 接收器的差分回波损耗在从 100 MHz 到链路的最大工作频率大于 10 dB。链路的最大工作频率是比特率的一半,即 3.125 Gbit/s 链路的最大工作频率为 1.562 5 GHz。
- o) 接收器的共模回波损耗在从 100 MHz 到链路的最大工作频率大于 6 dB。
- p) 当线路接收器使能信号有效时,线路接收器正常工作。
- q) 当线路接收器支持低功耗非工作模式时,线路接收器在线路接收器使能信号设置为无效时进入低功耗非工作模式。

A.2.4 串行信道预算

电物理层串行信道预算包含下列内容。

- a) 从线路驱动器到线路接收器的 SpaceFibre 电连接(包括 PCB 走线、连接器和电缆组件),在最大额定工作比特率相对应的 3 倍信号频率条件下,插入损耗小于 12 dB。该要求对应于 ± 400 mV 的最小发射信号电平降低到接收器的最小可接受信号电平 ± 100 mV。对应于最大指定比特率为 5 Gbit/s 的信号频率为 2.5 GHz。当使用 A.3.4 中给出的 B 型连接器和电缆组件时,插入损耗 12 dB 对应的最大电缆长度为 3.6 m。
- b) 当线路驱动器提供更高的信号电平时,可接受的插入损耗可以高于 12 dB。

A.3 电传输介质

A.3.1 基本属性

在从 100 MHz 到最大比特率对应频率的两倍信号频率范围内,电介质的差分特性阻抗为 $(100 \pm 10) \Omega$ 。

注: 如果比特率为 3.125 Gbit/s,则对应的信号频率为 1.562 5 GHz,此频率的 2 倍为 3.125 GHz。

A.3.2 PCB 布线

SpaceFibre 链路的 PCB 布线的设计包含下列内容：

- a) 采用电信号传输的 SpaceFibre 链路的 PCB 走线差分阻抗为 $(100 \pm 10) \Omega$ ；
- b) 双向 SpaceFibre 信道采用两对差分 PCB 走线，每个方向使用一对差分线。

A.3.3 飞行用电传输介质

A.3.3.1 基本属性

飞行用电传输介质基本属性包含下列内容。

- a) 飞行用电传输介质包含了从信道一端的连接器到另一端连接器的所有部分，并且满足：
 - 1) 信号路径保持 $(50 \pm 5) \Omega$ 单端阻抗或 $(100 \pm 10) \Omega$ 差分阻抗；
 - 2) 在 SpaceFibre 规定的电介质最大传输比特速率下，插入损耗小于 2.2 dB/m 加上每对连接器的 2 dB 插入损耗；
 - 3) 回波损耗大于 10 dB；
 - 4) 近端串扰隔离优于 35 dB；
 - 5) 远端串扰隔离优于 35 dB；
 - 6) 在信道的接收端测量的 TX_p 和 TX_n 之间的信号偏差小于以下值中的较大值： ± 20 ps 或所采用的介质中最短比特位周期的 $\pm 10\%$ 。

注： ± 20 ps 对应于路径长度差异约 ± 2 mm。10 Gbit/s= 100 ps 位时间，信号长度约为 15 mm，该长度的 10%是 1.5 mm，已经接近实际可生产能力的上限。

- b) 飞行用电传输介质根据使用的连接器类型按照以下格式以唯一的描述性名称进行引用：SpFi-Connector，其中 Connector 是连接器的名称或类型。例如使用 SMA 连接器的飞行用电传输介质名称为 SpFi-SMA。

A.3.3.2 飞行用电连接器

飞行用电连接器包含下列内容。

- a) 飞行用电连接器的阻抗和以下任一种阻抗进行匹配：
 - 1) 对于单信号触点具有 $(50 \pm 5) \Omega$ 单端阻抗；
 - 2) 对于差分信号触点具有 $(100 \pm 10) \Omega$ 差分阻抗。
- b) 电缆组件使用针形连接器。
- c) EGSE 至飞行适配器的电缆组件，宜使用孔型连接器。
- d) 与 PCB 连接宜使用孔型的 PCB 面板安装连接器或孔型的 PCB 安装连接器。

A.3.3.3 飞行电缆

飞行电缆设计包含下列内容。

- a) 飞行电缆采用以下中的一种。
 - 1) 具有 $(50 \pm 5) \Omega$ 单端阻抗。单端阻抗电缆是带有单个信号导体和屏蔽的电缆，例如同轴电缆，其中两根电缆构成差分对。
 - 2) 具有 $(100 \pm 10) \Omega$ 差分阻抗。具有差分阻抗的电缆是包含成对布置的信号线的电缆，例如双绞线或双轴电缆。
- b) 飞行电缆包含一根或多根信号线或信号线对，分别带有单独的屏蔽或带有整体屏蔽，或者单独屏蔽和整体屏蔽均包含。

A.3.3.4 飞行电缆组件

飞行电缆组件设计包含下列内容。

- a) 飞行电缆组件对其支持的每个信道包括 4 个信号:TXp、TXn、RXp、RXn。如图 A.6 所示。
- b) 飞行电缆组件提供一个或多个信道。
- c) 飞行电缆组件使用 A.3.3.2 给出的针形连接器。
- d) 当飞行电缆组件在每端具有相同类型的连接器时,该电缆组件使用以下格式的唯一名称:SpFi-Connector,其中 Connector 是电缆组件各端使用的连接器的类型。如使用 SMA 连接器的电缆组件称为 SpFi-SMA。
- e) 飞行电缆组件可以在电缆组件的每个端部使用不同种类的连接器的。当飞行电缆组件的两端分别采用不同种类的连接器的时,该电缆组件采用以下格式的唯一名称标识:SpFi-ConnectorA-ConnectorB,其中 ConnectorA 是电缆组件一端使用的连接器类型而 ConnectorB 是在电缆组件另一端使用的连接器类型。如一端使用 SMA 连接器,另一端使用 38999 连接器的电缆组件名称为 SpFi-SMA-38999。
- f) 飞行电缆组件使用 A.3.3.3 给出的电缆。
- g) 飞行电缆组件每个信道的连接器触点终端连接关系见表 A.6。
- h) 飞行电缆组件中使用的同轴电缆长度相同,误差在±2 mm 内。

表 A.6 飞行电缆组件连接器触点终端连接关系

A 端信号	连接	B 端信号
A-TXp	信号线(i)	B-RXp
A-TXn	信号线(ii)	B-RXn
A-RXp	信号线(iii)	B-TXp
A-RXn	信号线(iv)	B-TXn
连接器壳	屏蔽层	连接器壳

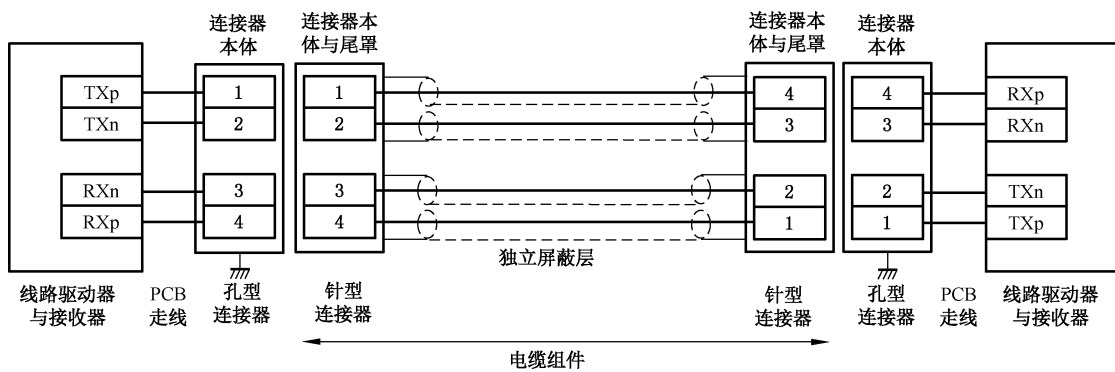


图 A.6 飞行电缆组件单个信道示意图

A.3.3.5 飞行连接器转接保护器

在航天器研制及测试过程中为避免频繁插拔可能对飞行连接器造成的损伤或性能下降,可采用转接保护器对飞行连接器进行保护,包含下列内容。

- a) 飞行连接器转接保护器使用 A.3.4.2 给出的一个针形双向连接器和一个孔型双向连接器。

- b) 飞行连接器转接保护器的两个连接器之间的使用 A.3.4.3 给出的同轴电缆。
- c) 飞行连接器转接保护器中对应单个信道的连接器触点见表 A.7 所示进行连接,如图 A.7。
- d) 飞行连接器转接保护器中使用的同轴电缆长度相同,误差小于 ± 1 mm,并且最大长度为100 mm。

表 A.7 飞行连接器转接保护器连接器触点端接

A 端信号	A 端管脚	连接关系	B 端管脚	B 端信号
A-TX _p	1	同轴(i)信号线	1	B-TX _p
A-TX _n	2	同轴(ii)信号线	2	B-TX _n
A-RX _n	3	同轴(iii)信号线	3	B-RX _n
A-RX _p	4	同轴(iv)信号线	4	B-RX _p
A 编织线,4 根信号线的屏蔽层	壳	同轴屏蔽	壳	B 编织线,4 根信号线的屏蔽层

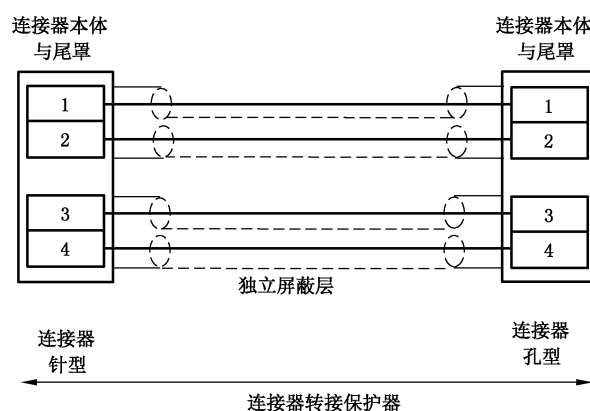


图 A.7 飞行连接器转接保护器

A.3.4 EGSE 用电传输介质

A.3.4.1 基本属性

EGSE 用电传输介质基本属性包含下列内容。

- a) EGSE 用电传输介质主要用于 EGSE 或系统中,其包含了从信道一端的连接器到信道另一端连接器的所有部分,并且满足:
- 1) 信号路径保持 $(50 \pm 5) \Omega$ 单端阻抗或 $(100 \pm 10) \Omega$ 差分阻抗的;
 - 2) 在 SpaceFibre 规定的电介质最大传输比特率下,插入损耗小于 2.2 dB/m 加上每对连接器的 2 dB 插入损耗;
 - 3) 回波损耗超过 9 dB;
 - 4) 近端串扰隔离优于 30 dB;
 - 5) 远端串扰隔离优于 30 dB;
 - 6) 在信道的接收端测量的 TX_p 和 TX_n 之间的信号偏差小于以下值中的较大值: ± 20 ps 或所采用的介质中最短比特位周期的 $\pm 10\%$ 。
- b) EGSE 用电传输介质根据使用的连接器类型按照以下格式以唯一的描述性名称进行引用:

SpFi-Connector,其中 Connector 是连接器的名称或类型。例如使用 SMA 连接器的 EGSE 电传输介质名称为 SpFi-SMA。

A.3.4.2 EGSE 用电连接器

EGSE 用电连接器设计包含下列内容。

- a) EGSE 用电连接器的阻抗和以下任一种阻抗进行匹配:
 - 1) 对于单信号触点具有 $(50 \pm 5) \Omega$ 单端阻抗;
 - 2) 对于差分信号触点具有 $(100 \pm 10) \Omega$ 差分阻抗。
- b) EGSE 电缆组件使用针形连接器。
- c) EGSE 至飞行适配器电缆组件,使用孔型连接器。
- d) 与 PCB 连接使用孔型的 PCB 面板安装连接器或孔型的 PCB 安装连接器。

A.3.4.3 EGSE 电缆

EGSE 电缆设计包含下列内容。

- a) EGSE 电缆采用以下中的一种。
 - 1) 具有 $(50 \pm 5) \Omega$ 单端阻抗。单端阻抗电缆是带有单个信号导体和屏蔽的电缆,例如同轴电缆。其中两根电缆构成差分对。
 - 2) 具有 $(100 \pm 10) \Omega$ 差分阻抗。具有差分阻抗的电缆是具有成对布置的信号线的电缆,例如双绞线或双轴电缆。
- b) EGSE 电缆包含一根或多根信号线或信号线对,分别带有单独的屏蔽或带有整体屏蔽,或者单独的屏蔽和整体屏蔽都包含。

A.3.4.4 EGSE 电缆组件

EGSE 电缆组件设计包含下列内容。

- a) EGSE 电缆组件对其支持的每个信道包含以下 4 个信号:TX_p、TX_n、RX_p、RX_n。
- b) EGSE 电缆组件包含 1 个或多个信道。
- c) EGSE 电缆组件使用 A.3.4.2 给出的针形连接器。
- d) 当 EGSE 电缆组件在两端采用相同类型的连接器时,该电缆组件使用以下格式的唯一名称:SpFi-Connector,其中 Connector 是电缆组件各端使用的连接器的类型。如使用 SMA 连接器的电缆组件称为 SpFi-SMA。
- e) EGSE 电缆组件可以在电缆组件的每个端部使用不同种类的连接器。当 EGSE 电缆组件的两端分别采用不同类型的连接器时,该电缆组件采用以下格式的唯一名称标识:SpFi-ConnectorA-ConnectorB,其中 ConnectorA 是电缆组件一端使用的连接器类型,而 ConnectorB 是在电缆组件另一端使用的连接器类型。如一端使用 SMA 连接器,另一端使用 38999 连接器的电缆组件名称为 SpFi-SMA-38999。
- f) EGSE 电缆组件使用 A.3.4.3 中给出的电缆。
- g) EGSE 电缆组件每个信道的连接器触点见表 A.8 所示进行连接,如图 A.8 所示。
- h) EGSE 电缆组件中使用的信号线长度相同,误差在 ± 2 mm 内。

表 A.8 EGSE 电缆组件连接器触点终端连接关系

A 端信号	连接关系	B 端信号
A-TX _p	信号线(i)	B-RX _p
A-TX _n	信号线(ii)	B-RX _n
A-RX _p	信号线(iii)	B-TX _p
A-RX _n	信号线(iv)	B-TX _n
连接器外壳	屏蔽层	连接器外壳

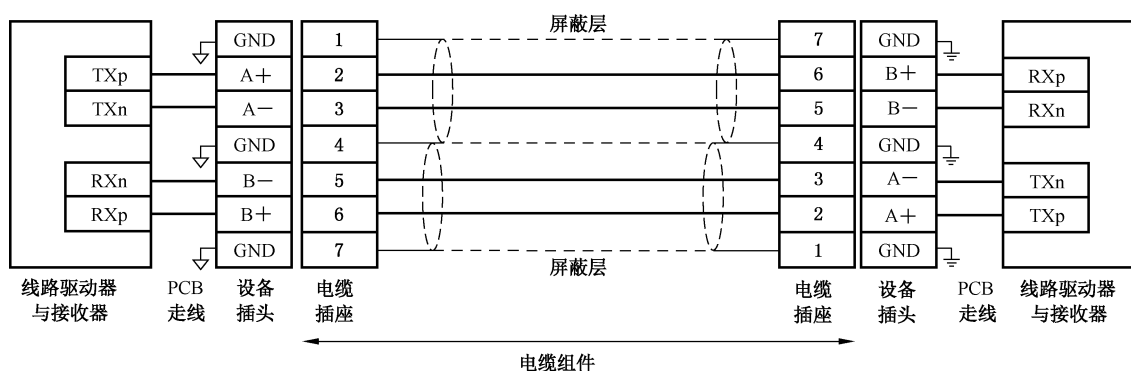


图 A.8 EGSE 电缆组件单个信道连接示意

A.3.4.5 EGSE 至飞行适配器电缆组件

EGSE 至飞行适配器电缆组件用于支持 SpaceFibre EGSE 设备连接到飞行电缆组件,包含下列内容。

- EGSE 至飞行适配器电缆组件的一端使用 A.3.4.2 给出的孔型连接器进行端接。
- EGSE 至飞行适配器电缆组件的另一端使用 A.3.3.2 给出的孔型连接器进行端接。
- EGSE 至飞行适配器电缆组件使用 A.3.4.3 中给出的电缆。
- EGSE 至飞行适配器电缆组件的连接器触点终端连接关系见表 A.9,EGSE 至飞行适配器电缆组件示意如图 A.9 所示。

表 A.9 EGSE 至飞行适配器电缆组件连接器触点终端连接关系

A 端信号	A 端管脚	连接关系	B 端管脚	B 端信号
GND	1	同轴(i)屏蔽层	壳	—
A-TX _p	2	同轴(i)信号线	1	B-RX _p
A-TX _n	3	同轴(ii)信号线	2	B-RX _n
GND	4	同轴(ii)和(iii)屏蔽层	壳	—
A-RX _n	5	同轴(iii)信号线	3	B-TX _n
A-RX _p	6	同轴(iv)信号线	4	B-TX _p
GND	7	同轴(iv)屏蔽层	壳	—

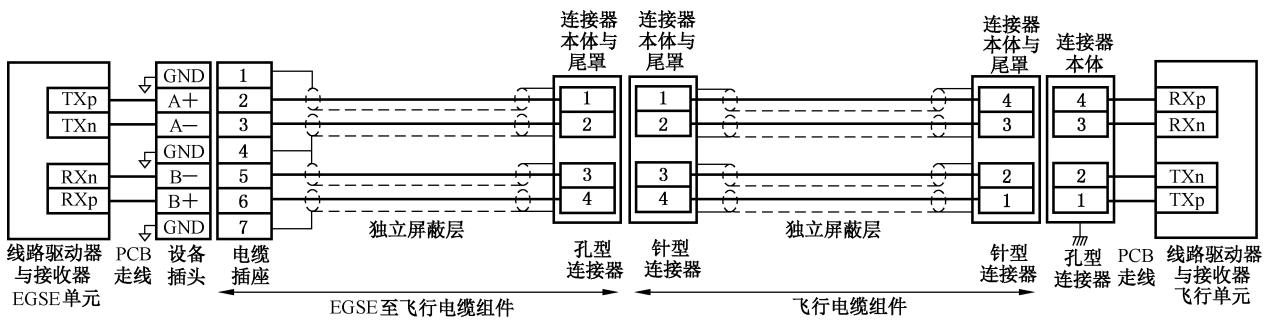


图 A.9 EGSE 至飞行适配器电缆组件示意

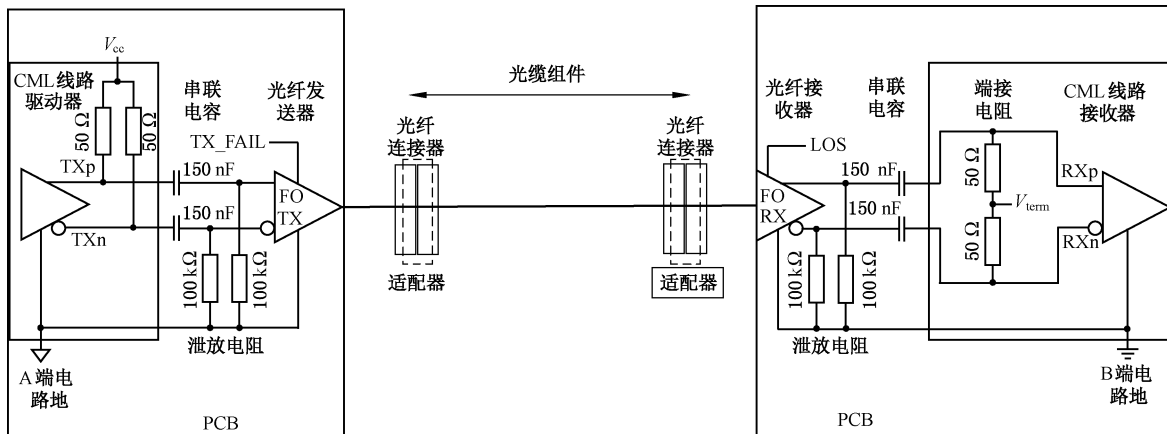
A.4 光纤物理层

A.4.1 基本属性

光纤物理层包括以下系列部件之一：

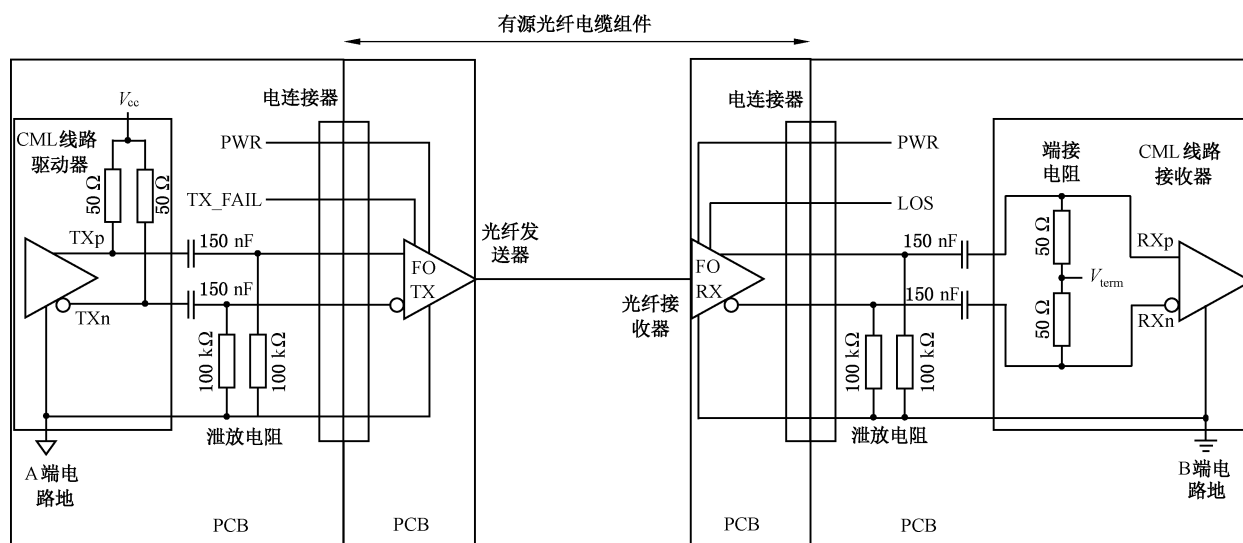
- a) 光纤发送器、光纤连接器、光缆组件、光纤连接器、光纤接收器；
- b) 带有电连接器的有源光缆、光纤发送器、光纤电缆、光纤接收器和电连接器。

图 A.10 和图 A.11 分别给出了上述两种光纤物理层的单方向结构组成。



注：图中电容器的值为示意，取值范围为 100 nF~200 nF。

图 A.10 单向光纤物理层结构组成



注：图中电容器的取值为示意，电容的取值范围为 100 nF~200 nF。

图 A.11 采用有源光纤的单向光纤物理层结构组成

A.4.2 光纤串行输出

光纤串行输出设计包含下列内容。

- 光纤发射器具有 CML 输入信号 TXp 和 TXn，用于通过光纤信道传输串行数据，如 A.2.3 所述。
- 光纤发送器可提供发送失败指示，当检测到发射器故障时，该指示信号被触发。此信号可用于诊断功能，对于 SpaceFibre 协议的操作不是必需的，因为在链路的远端接收器可以检测到发送器失败，由于 SpaceFibre 链路是双向的，所以 LOST_SIGNAL 控制字会被发回近端。发送器失败指示可以使用 LVTTTL、LVCMOS、漏极开路信号、I²C 或类似的串行控制和监视状态接口来实现。
- 当光纤发送器具有 I²C 或类似的串行控制和状态监视接口时，该接口可用于提供发送器失败指示，代替专用信号。
- 光纤发送器支持标称工作波长为 830 nm~860 nm，标称值为 850 nm。通常光纤发送器使用 VCSEL，它能够通过 OM3 光纤达到所需带宽。根据行业惯例，“驱动器”表示用于驱动 VCSEL 的电子放大器，而“发送器”包括“驱动器”以及 VCSEL 激光二极管。
- 光纤发送器的平均输出功率在 0.25 mW~2 mW，-6 dBm~3 dBm。平均输出功率针对 SpaceFibre 中使用的 8B/10B 编码。
注：0.25 mW~2 mW，-6 dBm~3 dBm 的范围是基于行业内 VCSEL 收发器的发展情况设置的。
- 光纤发送器能够支持链路上运行的数据信号速率。
- 光纤发送器的带宽满足以工作数据信号速率发送 8B/10B 编码信号。例如，3.125 Gbit/s 的数据信号速率要求最大频率大于数据速率的 0.7 倍，即 2.2 GHz，最小频率小于 312.5 MHz。工作频率能够降低一些是因为在 8B/10B 编码数据流中最多有 5 个连续“1”或 5 个连续“0”的情况，允许此类连续相同的比特通过光纤收发器。
- 光纤发送器能够容忍 12 dB 的光回波损耗，而不会降低抖动性能。
- 根据运行数据速率，光纤发送器满足表 A.10 或表 A.11 中规定的特性。对应的眼图如图 A.12 和图 A.13 所示。光纤发送器的差分输入在 A.2.3 中进行了说明。

- j) 工作在 1 Gbit/s~10 Gbit/s 范围内的发送器与 IEEE Std 802.3-2022 中 52.5 在 10.312 5 Gbit/s 下的 10GBASE-SR 抖动和眼图模板余量相符。
- k) 工作在 1 Gbit/s~10 Gbit/s 范围内的多速率发送器与 10 Gbit/s 发送器的规范保持一致。

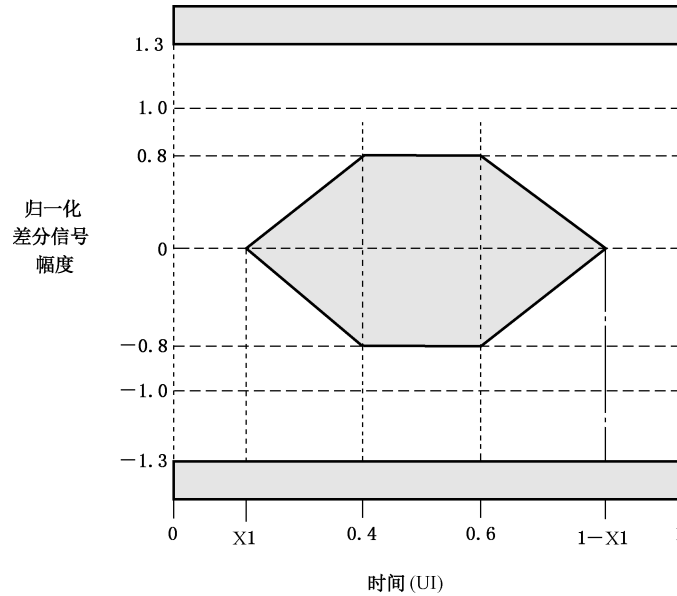


图 A.12 1 Gbit/s~5 Gbit/s 发送器的电-光眼图模板

表 A.10 1 Gbit/s~5 Gbit/s 发射器的电-光特性

参数	符号	最小	典型	最大	单位	说明
光输出功率	P_{OUT}	-6.5	-5	+3	dBm	850 nm VCSEL
(1 Gbit/s 和 1.25 Gbit/s) 消光比	ER	7	10	—	dB	超过用于 GbE, 1FC 的 OMA
(2 Gbit/s、2.5 Gbit/s 和 3.125 Gbit/s) 消光比	ER	5	—	—	dB	超过用于 2FC 的 OMA
(5 Gbit/s) 消光比	ER	5	—	—	dB	超过用于 4FC 的 OMA
光波长	λ_{OUT}	830	850	860	nm	—
光谱宽度, 均方根值	$\Delta\lambda$	—	—	0.85	nm	—
相对强度噪声	RIN	—	—	-117	dB/Hz	1000BASE-SX 标准, 见 IEEE Std 802.3-2022 中的 38.3
发射器差分输入阻抗	Z_{in}	90	100	110	Ω	内部交流耦合
差模输入电压	$V_{in,d}$	250	—	2 200	mV _{p-p}	CML, 100 Ω
(1 Gbit/s 和 1.25 Gbit/s) 眼图模板抖动定义	X1	—	—	0.135	UI _{p-p}	$J_{p-p} = 2 \times$ 在发射器掩模图中的 X1
(2 Gbit/s、2.5 Gbit/s 和 3.125 Gbit/s) 眼图模板抖动定义	X1	—	—	0.15	UI _{p-p}	$J_{p-p} = 2 \times$ 在发射器掩模图中的 X1
(5 Gbit/s) 眼图模板抖动定义	X1	—	—	0.175	UI _{p-p}	$J_{p-p} = 2 \times$ 在发射器掩模图中的 X1

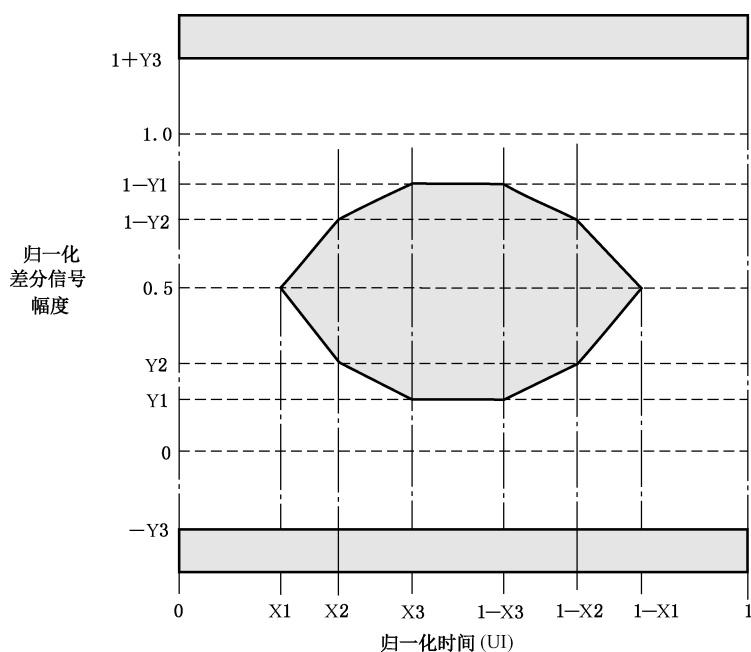


图 A.13 1 Gbit/s~10 Gbit/s 发射器的电-光眼图模板

表 A.11 1 Gbit/s~10 Gbit/s 发射器的电-光特性

参数	符号	最小	典型	最大	单位	说明
光输出功率平均值	P_{OUT}	-5	—	+3	dBm	850 nm VCSEL, 10GBASE-SR @ 10.3125 Gbit/s
光输出功率-关闭状态	$P_{OUT-OFF}$	—	—	-30	dBm	见 IEEE Std 802.3-2022 中的 52.5
光回波损耗容限	—	—	—	12	dB	见 IEEE Std 802.3-2022 中的 52.5
消光比	ER	3	5	—	dB	见 IEEE Std 802.3-2022 中的 52.5
光波长	λ_{OUT}	840	850	860	nm	见 IEEE Std 802.3-2022 中的 52.5
光谱宽度, 均方根值	$\Delta\lambda$	—	—	0.4	nm	—
相对强度噪声	RIN	—	—	-128	dB/Hz	见 IEEE Std 802.3-2022 中的 52.5
发射器差模输入阻抗	Z_{IN}	90	100	110	Ω	内部交流耦合
差模输入电压	$V_{in,d}$	180	—	800	mV _{pp}	CML, 100 Ω
发射器眼图模板定义	(X1, X2, X3, Y1, Y2, Y3)	—	—	(0.25, 0.40, 0.45, 0.25, 0.28, 0.40)	—	实际掩码值, 非最大值

A.4.3 光纤串行输入

光纤串行输入设计包含下列内容。

- a) 光纤接收器具有 CML 输出信号:RX_p 和 RX_n,以便用于通过光纤信道接收串行数据,如A.2.2 所述。
- b) 光纤接收器提供 NoSignal 指示,当接收器处的光信号处于低于可靠检测光信号所需的最小指定接收器灵敏度水平的指定电平时,该指示被触发。
- c) 当光输入信号电平高于接收器的指定灵敏度电平时,可撤销置位 NoSignal 指示。NoSignal 指示可以使用 LVTTTL、LVCMOS 或开漏信号,或使用 I2C 以及类似的串行控制和状态监视接口来实现。
- d) 当声明 NoSignal 时,光纤接收器的 CML 输出保持固定在表示逻辑“1”或逻辑“0”的值,见 A.2.2 m)和 A.2.2 n)。
- e) 光纤接收器支持标称工作波长为 840 nm~860 nm,标称值为 850 nm,见 IEEE Std 802.3-2022 中的 52.5。
- f) 光纤接收器支持链路的工作数据信号速率。
- g) 光纤接收器的带宽满足以工作数据信号速率接收 8B/10B 编码信号。
- h) 光纤接收器可根据其工作数据速率满足表 A.12 或表 A.13 中规定的灵敏度。由于在一种设计中难以针对各种数据速率都实现优化,表 A.12 提供了分别优化的接收器单元的参数值。光纤接收器的电差分输出在 A.2.2 中进行了说明。

表 A.12 1 Gbit/s~5 Gbit/s 接收器的电-光特性

参数	符号	最小	典型	最大	单位	说明
(BER = 10 ⁻¹² , PRBS = 2 ⁻⁷ - 1, ER=10 dB)灵敏度	P _{IN}	—	-22.5	-19	dBm	P _{IN} PD @ 1.25 Gbit/s
		—	-22.5	—	dBm	P _{IN} PD @ 2.5 Gbit/s
		—	-18.5	—	dBm	P _{IN} PD @ 3.2 Gbit/s
		—	-18	—	dBm	P _{IN} PD @ 4.25 Gbit/s
		—	-17.5	-16	dBm	P _{IN} PD @ 5 Gbit/s
(BER=10 ⁻¹² , PRBS = 2 ⁻⁷ - 1)过载	P _{IN}	-1	—	—	dBm	@1.25 Gbit/s 或 @ 5 Gbit/s
光波长	λ _{IN}	770		860	nm	见 IEEE Std 802.3-2022 中的 38.3
接收器差分输出阻抗	Z _{out}	—	100	—	Ω	内部交流耦合
差分输出电压摆幅	V _{out,d}	600	—	1200	mV _{P-P}	CML, 100 Ω
NoSignal 触发阈值	NOSIG	-30	-24	—	dBm	@ 1.25 Gbit/s
NoSignal 滞回	NOSIG _{HYS}	1.25	2.3	—	dB	@ 1.25 Gbit/s

表 A.13 1 Gbit/s~10 Gbit/s 接收器的电-光特性

参数	符号	最小	典型	最大	单位	说明
(BER = 10^{-12} , PRBS = $2^{-7} - 1$, ER = 5 dB) 灵敏度	P_{IN}	—	-14	-11	dBm	P_{IN} PD @ 10.3 Gbit/s
(BER = 10^{-12} , PRBS = $2^{-7} - 1$) 过载	P_{IN}	0	—	—	dBm	—
光波长	λ_{IN}	830	—	860	nm	—
接收器差分输出阻抗	Z_{out}	—	100	—	Ω	内部交流耦合
差分输出电压摆幅	V_{out_d}	300	—	850	mV _{P-P}	CML, 100 Ω
NoSignal 触发阈值	NOSIG	-30	-19	—	dBm	@ 10.3 Gbit/s
NoSignal 滞回	NOSIG _{HYS}	0.5	2.0	—	dB	—

A.4.4 光损耗预算

光链路损耗预算包含下列内容。

- 在 SpaceFibre 链路规定数据速率下, 光链路从发送器至接收器的光损耗, 小于发射器最坏情况的输出减去接收器最坏情况的灵敏度, 再减去寿命末期时的 3 dB 余量。光损耗预算包括: 每个连接器对的连接损耗、线缆损耗和线缆安装损耗, 即由于挤压和布线导致的劣化。同时需考虑温度, 老化和辐射引起的劣化。
- 寿命初期的总回波损耗大于 12 dB。

A.5 光纤介质

A.5.1 光纤光缆

A.5.1.1 基本属性

飞行光纤光缆根据采用的插入件和连接器的类型, 按照以下的格式用唯一的描述性名称进行引用: SpFi-Insert-Connector, 其中 Insert 是插入件的类型, Connector 是连接器类型及其特有触点分配状态的唯一标识名称。例如, 在具有特定触点分配(D)的 38999 连接器中使用 MT 插入件的飞行光纤介质的名称为 SpFi-MT-38999D。此要求的目的是作为光缆组件的通用规范, 而不是定义要使用的插入件或连接器主体。

A.5.1.2 光纤连接器

光纤连接器设计包含下列内容。

- 光纤连接器使用加固型光纤连接器。
- 光纤连接器采用扩束连接器, 以利用扩束技术提供更好的性能。
- 当光纤连接器使用一个或多个 MT 套圈触点时, 见 IEC 61754-5:2005 和 IEC 61755-3-31:2015 或 IEC 61755-3-32:2015, 其中给出了最坏情况下的性能, 后两者涵盖了两种不同材料。

A.5.1.3 光纤

光纤设计包含下列内容。

- 光缆包含两条或多条多模、渐变折射率、50/125 μm 光纤。
- 最低质量等级见 IEC 60793-2-10:2019+AMD1:2022 CSV。对应于 OM3 在商业级光缆组件

中可以实现 300 m 长度链路上速率达到 10 Gbit/s,见 IEEE Std 802.3-2022 中的 52.5。

- c) 光纤的衰减小于 5 dB/km,保证在寿命末期时 100 m 长度的链路工作正常,已考虑了辐射和温度的影响在内。
- d) 光缆的缓冲器和护套选用适合空间应用的材料。

A.5.1.4 光缆组件

光缆组件设计包含下列内容。

- a) 飞行光缆组件上使用 A.5.1.2 给出的针形连接器。
- b) 飞行光缆组件使用 A.5.1.3 给出的光纤。
- c) 光缆组件包含一对或多对光纤,每对光纤按表 A.14 中的规定进行连接。图 A.14 中给出了包含两根光纤的光缆组件示例。
- d) 包括若干对光纤的光缆组件将发射信号分配在光缆组件的一侧,而将接收信号分配在另一侧。图 A.15 中给出示例。
- e) 包括若干对光纤的光缆组件,当只使用了其中部分光纤时,将未使用的光纤放置在发射光纤和接收光纤之间。
- f) 用于非对称多信道 SpaceFibre 接口的光缆组件为非对称结构,其中工作在一个方向上的光纤多于另一个方向。图 A.16 中给出了示例。
- g) 光缆组件参照光缆组件评估测试程序开展测试。
- h) 光缆组件的最小弯曲半径小于 25 mm。

表 A.14 飞行光缆组件中每条 SpaceFibre 信道的连接器触点连接关系

A 端信号	连接	B 端信号
A-TX1	-连接-	B-RX1
A-TX2	-连接-	B-RX2
...
A-TX _y	-连接-	B-RX _y
...
A-RX _y	-连接-	B-TX _y
...
A-RX2	-连接-	B-TX2
A-RX1	-连接-	B-TX1

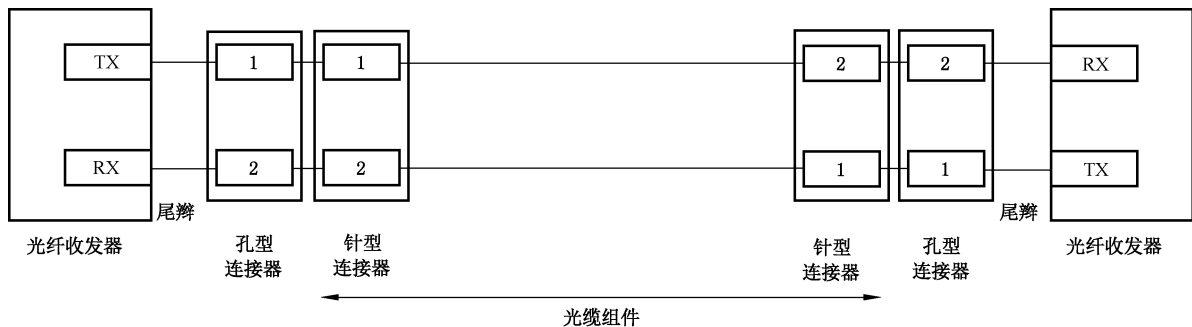


图 A.14 包含一个信道的飞行光缆组件

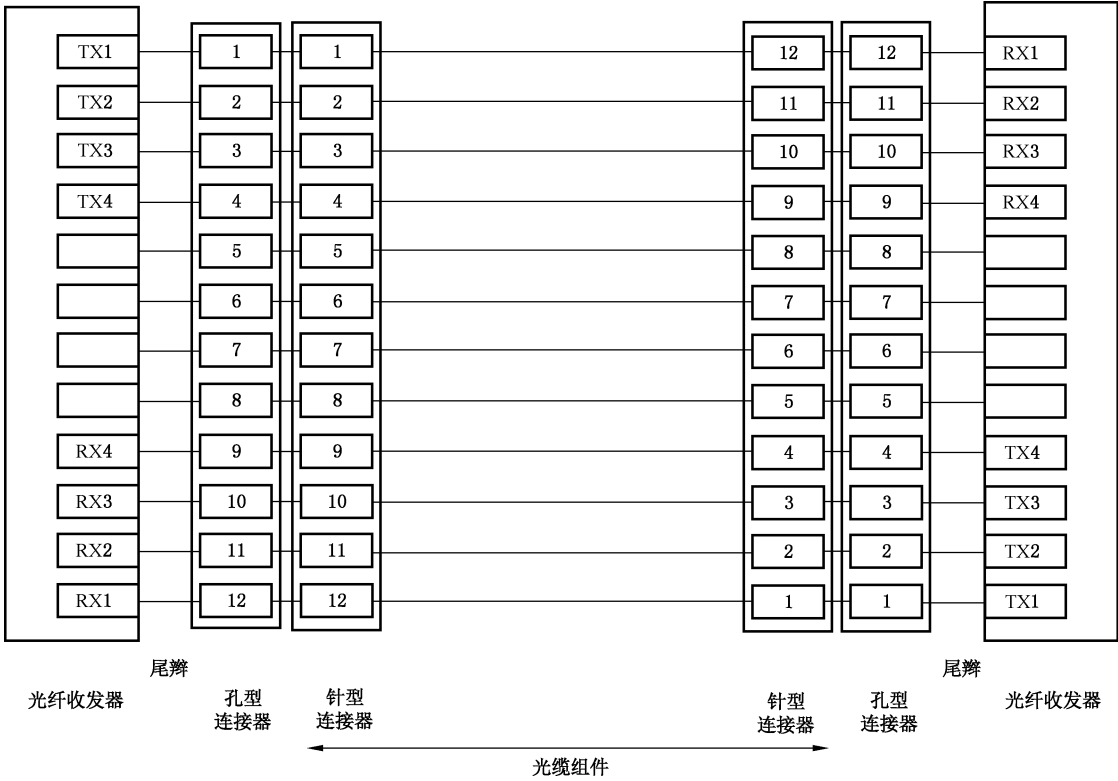


图 A.15 包含多个信道的飞行光缆组件

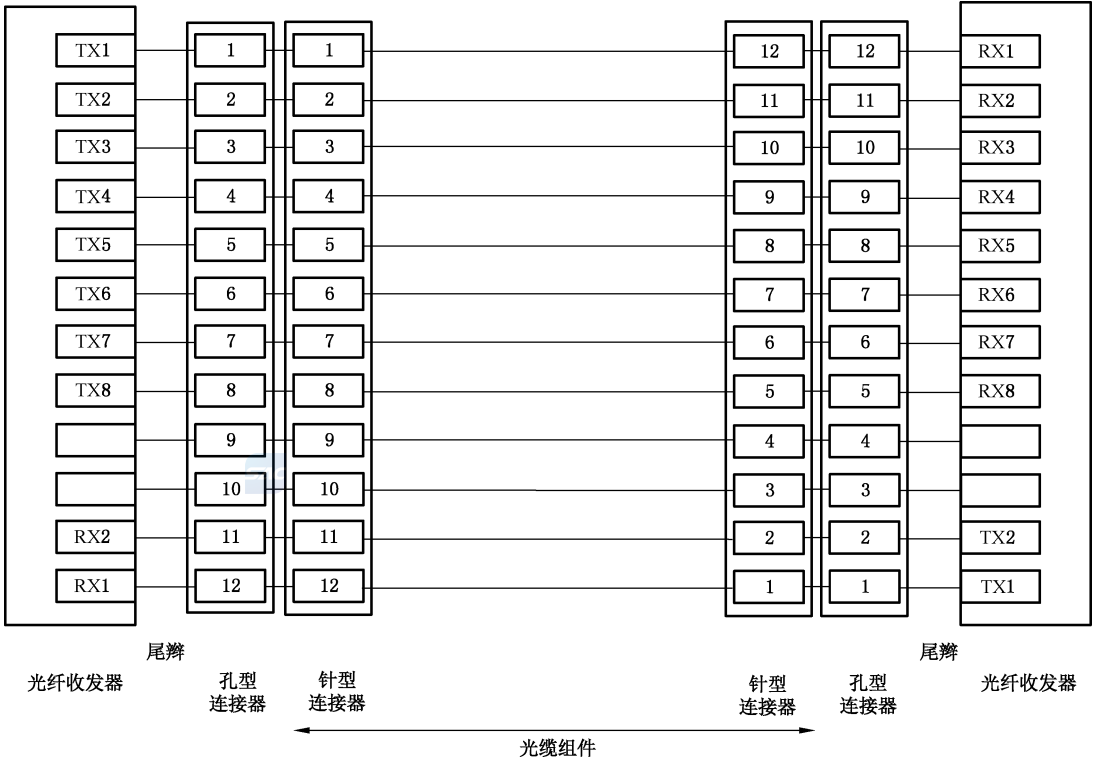


图 A.16 非对称链路的飞行光缆组件

A.5.2 有源光缆

A.5.2.1 基本属性

有源光缆在光缆组件的针形连接器中包含光纤收发器。这种情况下连接器是电连接器,所有光纤组件都集成在光缆组件中,可使系统组装,集成和测试变得更加简单。

A.5.2.2 光纤连接器

光纤连接器设计包含下列内容。

- a) 光纤连接器提供表 A.15 中所列的电信号。光缆组件是有源光缆组件,其中光纤收发器装配在光缆组件的连接器壳体中。
- b) 当在有源光缆组件中提供多于一个信道时,可为每个信道提供表 A.15 中所列出的一组信号。
- c) 当在有源光缆组件中提供多于一个信道时,可通过共享接口访问 NOSIG 和 TX FAIL 指示信号。如使用 I²C 或类似的串行接口。
- d) 当在有源光缆组件中提供多于一个信道时,可共享电源连接,只要能够为所有收发器提供足够的功率。
- e) 设备端的 C 类连接器为孔型连接器。

表 A.15 飞行有源光缆组件连接器中每条 SpaceFibre 信道的信号

信号名称	信号类型	信号功能
TXp	CML+	串行数据发送正端
TXn	CML-	串行数据发送负端
RXp	CML+	串行数据接收正端
RXn	CML-	串行数据接收负端
NOSIG	LVTTL/LVCMOS	NoSignal 指示
TX FAIL	LVTTL/LVCMOS	发射器故障指示
TX_EN	LVTTL/LVCMOS	发射器使能
RX_EN	LVTTL/LVCMOS	接收器使能
PWR	3.3 V 电源	(3.3±0.33) V, 提供 1 W 功率
GND	地	地

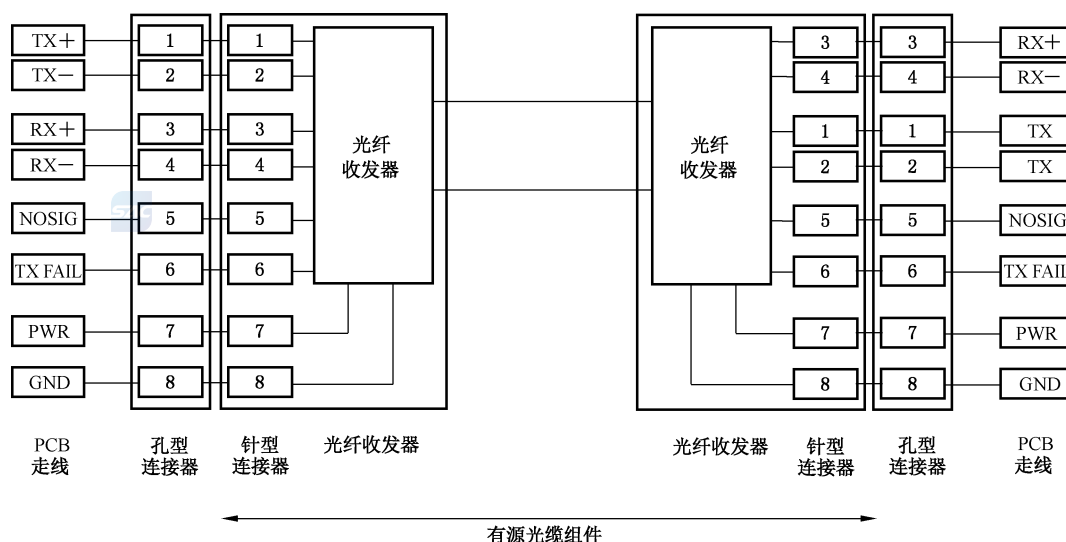
A.5.2.3 有源光缆组件

有源光缆组件设计包含下列内容。

- a) 飞行有源光缆组件使用 A.5.2.2 给出的针型连接器。
- b) 光缆组件包含一对或多对光纤,每对光纤的触点连接关系见表 A.16。图 A.17 中给出了包含两根光纤的 C 类光缆组件示例。
- c) 当在有源光缆组件中提供多于一个信道时,为每个信道提供表 30 中列出的一组连接。
- d) 有源光缆组件的最小弯曲半径小于 25 mm。
- e) 有源光缆组件选用适合空间应用的材料。
- f) 光缆的具体形式不做限制,满足有源光缆组件要求的任何光缆都可使用。

表 A.16 飞行有源光缆组件中每条 SpaceFibre 信道的连接器触点连接关系

A 端信号	连接关系	B 端信号
TX _p	-连接-	RX _p
TX _n	-连接-	RX _n
RX _p	-连接-	TX _p
RX _n	-连接-	TX _n
A 端 NOSIG	无连接	B 端 NOSIG
A 端 TX FAIL	无连接	B 端 TX FAIL
A 端 PWR	无连接	B 端 PWR
A 端 GND	无连接	B 端 GND



注：图中的管脚号为示意性质，仅用于表示所需实现的连接。

图 A.17 飞行用有源光缆组件

附录 B

(规范性)

SpaceFibre 总线通信协议业务接口

B.1 总则

本附录给出 SpaceFibre 总线通信协议中对应 OSI 层的业务接口,即网络层、数据链路层和物理层,并提供了管理信息库的业务接口。

注:多信道子层和信道子层在 OSI 模型中是数据链路层的子层,因此无单独的业务接口。

B.2 网络层业务接口

B.2.1 网络层业务

网络层相关的业务包括:

- a) 数据包传输业务;
- b) 广播消息业务。

B.2.2 包传输业务

B.2.2.1 业务原语

数据包传输业务相关的业务原语包括:

- a) SEND_PACKET.request;
- b) READ_PACKET.indication。

B.2.2.2 SEND_PACKET.request

B.2.2.2.1 功能

SEND_PACKET.request 原语用于通过某个虚拟网络在 SpaceFibre 网络上发送 SpaceFibre 数据包。

B.2.2.2.2 语义

SEND_PACKET.request 原语应提供以下参数:

SEND_PACKET.request(Virtual Network,SpaceFibre Packet)。

B.2.2.2.3 生成时机

当用户有数据包通过 SpaceFibre 网络发送时,将生成一个 SEND_PACKET.request 原语,请求使用特定虚拟网络来通过 SpaceFibre 网络发送 SpaceFibre 数据包。

B.2.2.2.4 接收效果

在收到 SEND_PACKET.request 原语后,接收该请求原语的 SpaceFibre 节点应使用指定的虚拟网络通过 SpaceFibre 网络发送 SpaceFibre 数据包。

B.2.2.3 READ_PACKET.indication

B.2.2.3.1 功能

接收 SpaceFibre 数据包的 SpaceFibre 节点应向“读取 SpaceFibre 数据包传输业务”的用户传送一个 READ_PACKET.indication 原语,用于指示有一个 SpaceFibre 数据包已通过特定虚拟网络到达并正在等待读取。

B.2.2.3.2 语义

READ_PACKET.indication 原语应提供以下参数:

READ_PACKET.indication(Virtual Network,SpaceFibre Packet,Terminated by EEP)。

B.2.2.3.3 生成时机

READ_PACKET.indication 原语在接收到 SpaceFibre 数据包时,传递给“读取 SpaceFibre 数据包传输业务”的用户。

B.2.2.3.4 接收效果

“读取 SpaceFibre 数据包传输业务”的用户接收到 RX_PACKET.indication 原语后,读取 SpaceFibre 数据包。

B.2.3 广播消息业务

B.2.3.1 业务原语

与广播消息业务相关联的业务原语包括:

- a) BROADCAST_MESSAGE.request;
- b) BROADCAST_MESSAGE.indication。

B.2.3.2 BROADCAST_MESSAGE.request

B.2.3.2.1 功能

SpaceFibre 网络层使用 BROADCAST_MESSAGE.request 原语请求 SpaceFibre 节点通过 SpaceFibre 网络发送广播消息。

B.2.3.2.2 语义

BROADCAST_MESSAGE.request 原语应提供以下参数:

BROADCAST_MESSAGE.request (Broadcast Channel,Broadcast Type,Message)。

B.2.3.2.3 生成时机

当 SpaceFibre 用户有广播消息要发送时,生成 BROADCAST_MESSAGE.request 原语,用于请求 SpaceFibre 节点通过特定广播通道发送特定类型的广播消息。

B.2.3.2.4 接收效果

收到 BROADCAST_MESSAGE.request 原语后,SpaceFibre 节点根据链路优先级规则,立即通过指定的广播通道发送广播消息。

B.2.3.3 BROADCAST_MESSAGE.indication

B.2.3.3.1 功能

BROADCAST_MESSAGE.indication 原语的功能是向 SpaceFibre 用户指示广播消息已通过特定广播信道到达,并将该消息传递给 SpaceFibre 用户。

B.2.3.3.2 语义

BROADCAST_MESSAGE.indication 原语应提供以下参数:

BROADCAST_MESSAGE.indication (Broadcast Channel, Broadcast Type, STATUS, Message)。

B.2.3.3.3 生成时机

当收到有效的广播消息时, BROADCAST_MESSAGE.indication 原语传递给 SpaceFibre 用户。

B.2.3.3.4 接收效果

SpaceFibre 用户接收到 BROADCAST_MESSAGE.indication 原语后,读取广播消息。

B.3 数据链路层业务接口

B.3.1 数据链路层业务

与数据链路层相关的业务包括:

- a) 虚拟信道业务;
- b) 广播信息业务;
- c) 时隙规划同步业务。

B.3.2 虚拟信道业务

B.3.2.1 业务原语

与虚拟信道业务关联的业务原语包括:

- a) TX_N-CHAR.request;
- b) RX_N-CHAR.indication。

B.3.2.2 TX_N-CHAR.request

B.3.2.2.1 功能

The TX_N-CHAR.request 原语用于通过 SpaceFibre 链路的一个虚拟信道发送标准字符 N-Char 或填充字符 Fill。

B.3.2.2.2 语义

TX_N-CHAR.request 原语应提供以下参数:

TX_N-CHAR.request(Virtual Channel, N-Char/Fill)。

B.3.2.2.3 生成时机

当用户有一个标准字符 N-Char 或填充字符 Fill 要通过 SpaceFibre 链路的特定虚拟信道发送时,它将生成一个 TX_N-CHAR.request 原语请求通过该虚拟信道发送标准字符或填充字。

B.3.2.2.4 接收效果

收到 TX_N-CHAR.request 原语后,SpaceFibre 接口在 SpaceFibre 介质访问控制器允许的情况下尽快通过指定的虚拟信道发送标准字符 N-Char 或填充字符 Fill。

B.3.2.3 RX_N-CHAR.indication

B.3.2.3.1 功能

SpaceFibre 接口向 SpaceFibre 网络层传送 RX_N-CHAR.indication 原语,表示已通过某个特定的虚拟信道接收到标准字符 N-Char 或填充字符 Fill。

B.3.2.3.2 语义

RX_N-CHAR.indication 原语应提供以下参数:
RX_N-CHAR.indication(Virtual Channel,N-Char/Fill)。

B.3.2.3.3 生成时机

当接收到标准字符 N-Char 或填充字符 Fill 时,传递 RX_N-CHAR.indication 原语给 SpaceFibre 网络层。

B.3.2.3.4 接收效果

SpaceFibre 网络层接收到 RX_N-CHAR.indication 原语后,SpaceFibre 网络层从指定虚拟信道读取接收到的标准字符 N-Char 或填充字符 Fill。

B.3.3 广播消息业务

B.3.3.1 业务原语

广播通道业务相关联的业务原语包括:

- a) TX_BROADCAST.request;
- b) RX_BROADCAST.indication。

B.3.3.2 TX_BROADCAST.request

B.3.3.2.1 功能

SpaceFibre 网络层使用 TX_BROADCAST.request 原语请求 SpaceFibre 接口通过一个 SpaceFibre 广播通道发送广播消息。

B.3.3.2.2 语义

TX_BROADCAST.request 原语应提供以下参数:
TX_BROADCAST.request(Broadcast Channel,Broadcast Type,STATUS,Message)。

B.3.3.2.3 生成时机

当 SpaceFibre 网络层有广播消息要发送时,它将生成一个 TX_BROADCAST.request 原语请求 SpaceFibre 接口通过特定广播通道发送广播消息。

B.3.3.2.4 接收效果

SpaceFibre 接口在收到 TX_BROADCAST.request 原语后,在完成当前字发送后,或者当有广播帧已经被发送时,在该广播帧发送完成后,立即通过指定的广播信道发送广播消息。

B.3.3.3 RX_BROADCAST.indication

B.3.3.3.1 功能

RX_BROADCAST.indication 原语的功能是向 SpaceFibre 网络层指示广播消息已通过特定广播信道到达,并将该消息传递给 SpaceFibre 网络层。

B.3.3.3.2 语义

RX_BROADCAST.indication 原语应提供以下参数:

RX_BROADCAST.indication(Broadcast Channel,Broadcast Type,STATUS,Message)。

B.3.3.3.3 生成时机

当接收到有效的广播消息时,传递 RX_BROADCAST.indication 原语给 SpaceFibre 网络层。

B.3.3.3.4 接收效果

SpaceFibre 网络层接收到 RX_BROADCAST.indication 原语后,验证广播消息的有效性并转发有效的广播消息。

B.3.4 时隙同步业务

B.3.4.1 业务原语

与时间同步业务相关联的业务原语包括:SCHEDULE.request。

B.3.4.2 SCHEDULE.request

B.3.4.2.1 功能

SpaceFibre 网络层使用 SCHEDULE.request 原语将当前时隙信息传递给数据链路层,以便在网络的每个数据链路中对时隙规划机制的 QoS 措施进行同步。

B.3.4.2.2 语义

SCHEDULE.request 原语应提供以下参数:

SCHEDULE.request(Time-Slot)。

B.3.4.2.3 生成时机

当路由交换机或节点接收到广播消息中的新时隙信息时,SpaceFibre 网络层生成 SCHEDULE.request 原语,将新时隙的值通知数据链路层。

B.3.4.2.4 接收效果

在收到 SCHEDULE.request 原语后,数据链路层使用时隙信息结束前一个时隙并开始下一个时隙。

B.4 物理层业务接口

B.4.1 物理层业务

物理层相关的业务包括：

- a) 传输符号业务；
- b) 控制业务。

B.4.2 传输符号业务

B.4.2.1 业务原语

传输符号业务相关的业务原语包括：

- a) TX_SYMBOL.request；
- b) RX_10BITS.indication。

B.4.2.2 TX_SYMBOL.request

B.4.2.2.1 功能

信道子层应传送一个 TX_SYMBOL.request 原语到物理层，以便通过 SpaceFibre 链路发送信息符号。

B.4.2.2.2 语义

TX_SYMBOL.request 原语应提供以下参数：

TX_SYMBOL.request(Symbol)。

B.4.2.2.3 生成时机

当信道子层有符号要通过 SpaceFibre 链路发送时，传递 TX_SYMBOL.request 原语给物理层。

B.4.2.2.4 接收效果

收到 TX_SYMBOL.request 原语后，物理层将符号串行化并通过 SpaceFibre 链路发送。

B.4.2.3 RX_10BITS.indication

B.4.2.3.1 功能

物理层通过向信道子层传送一个 RX_10BITS.indication 原语，指示已接收到一个信息符号并完成了串并转换。

B.4.2.3.2 语义

RX_10BITS.indication 原语应提供以下参数：

RX_10BITS.indication(10-bits)。

B.4.2.3.3 生成时机

当通过 SpaceFibre 链路接收到符号并完成串并转换时，传递 RX_10BITS.indication 原语给信道子层。

B.4.2.3.4 接收效果

当接收到物理层的 RX_10BITS.indication 原语时,将信息符号传送给信道子层。

B.4.3 控制业务

B.4.3.1 业务原语

控制业务相关联的业务原语包括:

- a) PHYSICAL_CONTROL.request;
- b) PHYSICAL_STATUS.indication。

B.4.3.2 PHYSICAL_CONTROL.request

B.4.3.2.1 功能

信道子层通过向物理层传送 PHYSICAL_CONTROL.request 原语来控制物理层的操作。

B.4.3.2.2 语义

PHYSICAL_CONTROL.request 原语应提供以下参数:

PHYSICAL_CONTROL.request(Enable TX,Enable RX,Invert RX Polarity)。

B.4.3.2.3 生成时机

当信道子层需要控制物理层的操作时,传递 PHYSICAL_CONTROL.request 原语给物理层。

B.4.3.2.4 接收效果

物理层收到 PHYSICAL_CONTROL.request 原语后,根据原语传入的控制参数设置物理层的工作模式。

B.4.3.3 PHYSICAL_STATUS.indication

B.4.3.3.1 功能

物理层通过向信道子层传送 PHYSICAL_STATUS.indication 原语指示物理层的状态已更改。

B.4.3.3.2 语义

PHYSICAL_STATUS.indication 原语应提供以下参数:

PHYSICAL_STATUS.indication (LossOfSignal)。

B.4.3.3.3 生成时机

当物理层状态已改变时,传递 PHYSICAL_STATUS.indication 原语给信道子层。

B.4.3.3.4 接收效果

信道子层收到 PHYSICAL_STATUS.indication 原语后,根据物理层的状态做出反应。



B.5 管理信息库业务接口

B.5.1 管理信息库业务

管理信息库相关的业务包括：链路管理业务。

B.5.2 链路管理业务

B.5.2.1 业务原语

链路管理业务相关的业务原语包括：

- a) SET_MANAGEMENT_PARAMETER.request；
- b) GET_MANAGEMENT_PARAMETER.request。

B.5.2.2 SET_MANAGEMENT_PARAMETER.request

B.5.2.2.1 功能

SET_MANAGEMENT_PARAMETER.request 原语的功能是设置 SpaceFibre 网络上一个 SpaceFibre 节点或路由交换机的管理参数。

B.5.2.2.2 语义

SET_MANAGEMENT_PARAMETER.request 原语应提供以下参数：

SET_MANAGEMENT_PARAMETER.request(Parameter Identifier, New Parameter Value)。

B.5.2.2.3 生成时机

当需要更改 SpaceFibre 端口中的管理参数时生成 SET_MANAGEMENT_PARAMETER.request 原语。

B.5.2.2.4 接收效果

接收到 SET_MANAGEMENT_PARAMETER.request 原语后使用原语中提供的新值更新指定的管理参数。

B.5.2.3 GET_MANAGEMENT_PARAMETER.request

B.5.2.3.1 功能

GET_MANAGEMENT_PARAMETER.request 原语的功能是从 SpaceFibre 接口获取一个管理参数的值。

B.5.2.3.2 语义

GET_MANAGEMENT_PARAMETER.request 原语应提供以下参数：

GET_MANAGEMENT_PARAMETER.request(Parameter Identifier)。

B.5.2.3.3 生成时机

当需要读取 SpaceFibre 接口中管理参数的值时生成 GET_MANAGEMENT_PARAMETER.request 原语。

B.5.2.3.4 接收效果

SpaceFibre 接口接收到 GET_MANAGEMENT_PARAMETER.request 原语时,提供指定的管理参数的值。



附录 C

(资料性)

SpaceFibre 总线通信协议 CRC 校验码计算

C.1 总则

本附录给出 SpaceFibre 总线通信协议中数据帧、广播帧以及 FCT、ACK、NACK、SIF 等控制字中所采用的 CRC 校验码的计算示例。

C.2 数据帧 CRC 校验码计算示例

SpaceFibre 总线数据链路层传输的数据帧中采用 16 位 CRC 校验码, CRC 生成多项式为 $X^{16} + X^{12} + X^5 + 1$, 初始值为 0xFFFF。图 C.1 中给出了一些短数据帧及其 CRC 校验值。每个字包含 8 位的 D/K 码加上 K 标志位, K 标志位不包括在 CRC 的计算中。首先计算最左边的 D/K 码, 即逗号码 K28.7。CRC 的计算从 bit0 开始。对于每个数据或 CRC 值, 最左侧十六进制字符包含最高有效位, 第一个例子中的 CRC 值为 0x978A。

在实际通信时时数据会进行加扰, 本例中为了便于理解没有进行数据加扰。

0	7	8	15	16	23	24	31
COMMA	SDF	0x02	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00
0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00
EOP	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill
EDF	0x41	0x8A	0x97	0x00	0x00	0x00	0x00
0	7	8	15	16	23	24	31
COMMA	SDF	0x01	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00
0x00	EOP	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill
EDF	0x7D	0x3D	0x35	0x00	0x00	0x00	0x00
0	7	8	15	16	23	24	31
COMMA	SDF	0x01	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00
0x00	0x01	0x02	EOP	0x00	0x00	0x00	0x00
EDF	0x7E	0xA1	0xB7	0x00	0x00	0x00	0x00

图 C.1 数据帧的 CRC 校验码计算示例

C.3 广播帧与 FCT/ACK/NACK/SIF 的 CRC 校验码计算示例

C.3.1 SpaceFibre 总线数据链路层传输的广播帧、SIF、FCT、FULL、ACK 和 NACK 采用 8 位 CRC 校验码, 8 位 CRC 计算规程如下。

- 多项式系数采用模 2 运算, 生成多项式为 $X^8 + X^2 + X + 1$, 初始值为 0x00。
- 采用系统二进制 $(n+16, n)$ 分组码, 其中 $(n+8)$ 是码字 $c(x)$ 的位数, n 可被 8 整除。 n 代表 CRC 覆盖的位数。
- 输入与输出使用字节格式, 字节各比特位表示如下: $b_7b_6b_5b_4b_3b_2b_1b_0$, 其中 b_7 为最高有效位, b_0 为最低有效位。

C.3.2 8 位 CRC 计算执行流程如下。

- 接收 n bit 输入数据构成 $m(x)$, 其中:

- 1) n bit 数据按字节分组为 $n/8$ 个子集, 记为 $B_{i,j}$, i 和 j 为各比特的索引, $i = \{0, 0, \dots, n/8-1\}$, $j = \{7, 6, \dots, 0\}$;
- 2) $n/8$ 个输入字节即为除去 CRC 码本身以外 CRC 编码所覆盖的内容, 第一个发送字节索引号 $i=0$, 最后发送的字节索引号为 $i=n/8-1$;
- 3) $m(x)$ 为具有二进制系数 m_i 的多项式: $m_{n-1}x^{n-1} + m_{n-2}x^{n-2} + \dots + m_0x^0$;
- 4) $m(x)$ 可表示为一个 n 比特的二进制向量, x 最高次幂的系数 m_{n-1} 作为最高位, x 最低次幂的系数 m_0 作为最低位;
- 5) 表示 $m(x)$ 的比特向量由 $n/8$ 字节的输入按传输顺序拼接构成, 每一字节的最低位 b_0 排在最前, 而最高位 b_7 排在最后:

$$m_{n-1} = B_{0,0}, m_{n-2} = B_{0,1}, m_{n-3} = B_{0,2}, \dots, m_{n-7} = B_{0,6}, m_{n-8} = B_{0,7},$$

$$m_{n-9} = B_{1,0}, m_{n-10} = B_{1,1}, m_{n-11} = B_{1,2}, \dots, m_{n-15} = B_{1,6}, m_{n-16} = B_{1,7}, \dots$$

$$m_7 = B_{n/8-1,0}, m_6 = B_{n/8-1,1}, m_5 = B_{n/8-1,2}, \dots, m_1 = B_{n/8-1,6}, m_0 = B_{n/8-1,7}$$

b) 剩余多项式 $r(x)$ 按公式(C.1)生成:

$$r(x) = [m(x) \cdot x^8] \text{ modulo } g(x) \quad \dots\dots\dots (C.1)$$

c) CRC 值由表示 $r(x)$ 的 8 bit 向量构成, CRC 码的最低位 b_0 对应 x 最高次幂的系数 r_7 , CRC 码的最高位 b_7 对应 x 最低次幂的系数 r_0 :

$$b_7 = r_0, b_6 = r_1, b_5 = r_2, b_4 = r_3, b_3 = r_4, b_2 = r_5, b_1 = r_6, b_0 = r_7$$

1) 编码字 $c(x)$ 由多项式 $m(x)$ 和 $r(x)$ 的比特向量拼接构成, 见公式(C.2):

$$c(x) = m(x) \cdot x^8 + r(x) \quad \dots\dots\dots (C.2)$$

2) 当采用伽罗华域的 LFSR 生成 CRC 码时, 其初始值设置为 0。

d) 当编码字 $c^*(x)$ 输入 CRC 编码器中, 剩余项 $s(x)$ 为 CRC 编码覆盖的内容 $c^*(x)$ 与 CRC 码拼接的结果, 见公式(C.3):

$$s(x) = [c^*(x) \cdot x^8] \text{ modulo } g(x) \quad \dots\dots\dots (C.3)$$

图 C.2 给出了一个广播帧及其 CRC 校验值。每个字包括 8 bit 加上 K 标志位组成的 D/K 码, 在计算 CRC 时不包括 K 标志位。最左边的 D/K 码最先计算, 即逗号码 K28.7。CRC 计算从 bit0 开始, 每个数据或 CRC 值中 16 进制字符的最左边为最高位。

0	7	8	15	16	23	24	31
COMMA	SBF			0x00		0x00	
0x00	0x00			0x00		0x00	
0x01	0x01			0x01		0x01	
EBF	0x00			0x41		0x29	
0	7	8	15	16	23	24	31
FCT	0x01			0x01		0x4F	

图 C.2 广播帧和 FCT 的 CRC 校验码计算示例

参 考 文 献

- [1] IEC 60793-2-10:2019 + AMD1:2022 CSV Optical fibres—Part 2-10: Product specifications—Sectional specification for category A1 multimode fibres
- [2] IEC 61754-5:2005 Fibre optic connector interfaces—Part 5: Type MT connector family
- [3] IEC 61755-3-31:2015 Fibre optic interconnecting devices and passive components—Connector optical interfaces—Part 3-31: Connector parameters of non-dispersion shifted single mode physically contacting fibres—Angled polyphenylene sulphide rectangular ferrules
- [4] IEC 61755-3-32:2015 Fibre optic interconnecting devices and passive components—Connector optical interfaces—Part 3-32: Connector parameters of non-dispersion shifted single mode physically contacting fibres—Angled thermoset epoxy rectangular ferrules
- [5] IEEE Std 802.3-2022 IEEE Standard for Ethernet
-