

ICS 35.100.10

M 30



中华人民共和国通信行业标准

YD/T 1947-2009

基于 2D-PAM3 和 4D-PAM5 编码方法的 距离增强型以太网物理层技术要求

Technical Requirement of Physical Layer for Extended Reach Ethernet
based on 2D-PAM3 and 4D-PAM5

2009-06-15 发布

2009-09-01 实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

目 次

前 言.....II

1 范围.....1

2 规范性引用文件.....1

3 缩略语.....1

4 物理层总体要求.....2

5 物理编码子层（Physical Coding Sublayer）8

6 物理介质连接子层（Physical Medium Attachment Sublayer）22

7 管理功能与链路协商功能.....29

8 PMA电气特性.....35

9 链路特性.....40

10 介质相关接口（MDI）规范.....41

11 环境要求.....41

附录A（规范性附录） LDS管理寄存器定义.....43

附录B（规范性附录） 发送器失真测试峰谱畸变指标测试中算法代码.....52

前 言

本标准在制定过程参考了IEEE Std 802.3-2002的内容组织结构、测试方法等。标准的有些内容直接引用IEEE 802.3-2002，如：MII接口、TDI接口、一些状态图变量定义、RJ45连接器的触点分布等，特别是4D-PAM5编码方法基本等同于IEEE Std 802.3-2002中的第40章。同时通过链路协商保持了与现有IEEE以太网标准的兼容。

本标准的附录A和附录B均为规范性附录。

本标准由中国通信标准协会提出并归口。

本标准由工业和信息化部电信研究院、杭州华三通信技术有限公司负责起草，华为技术有限公司参加起草。

本标准主要起草人：卜 哲、王明辉、于 洋、魏初舜

本标准为首次发布。

基于2D-PAM3和4D-PAM5编码方法的 距离增强型以太网物理层技术要求

1 范围

本标准规定了基于2D-PAM3和4D-PAM5编码方法的距离增强型以太网物理层接口的技术要求，包括功能要求、性能指标、电气特性、机械特性和环境要求等。

本标准仅适用于在1对或2对三类/五类双绞线上，采用2D-PAM3编码方法；在4对五类双绞线上，采用4D-PAM5编码方法，以10Mbit/s/100Mbit/s速率传输数据的距离增强型以太网接口。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准。然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

ANSI T1.417-2003	环路传输系统的频谱管理
EN 61000-4-3-2002	电磁兼容性（EMC）第4部分：试验和测量技术 第3节：辐射，辐射频率和电磁场抗扰试验
EN 61000-4-6-2001	电磁兼容性（EMC）第4-6部分：试验和测量技术 射频场引起的抗来自电源的干扰
FCC Docket 20780-1980 (Part 15)	计算设备的技术标准 第15部分：重新界定和澄清了限制辐射设备以及低功率通信设备的管理规则
IEC 60060-1994	高压测试技术
IEC 60603-7-4-2005	电子设备连接器 第4~7部分：数据传输频率250 MHz及以下的无屏蔽、活动和固定式8路连接器的详细规范
IEC 60950-1-2001	信息技术设备的安全性 第1部分：一般要求
IEC/CISPR 22-2006	信息技术设备射频骚扰特性限值和测量方法
IEEE Std 802.3-2002	带碰撞检测的载波监听多重访问方式及物理层定义
ISO/IEC 11801-2002	信息技术 用户建筑群的通用布缆

3 缩略语

下列缩略语适用于本标准。

BER	Bit Error Ratio	比特错误率
ESD	End of Stream Delimiter	数据流结束标示符
FLP	Fast Link Pulse	快速连接脉冲
GMII	Gigabit Media Independent Interface	千兆比特介质无关接口
LDS	Link Discover Signalling	链路发现信令
LFSR	Linear Feedback Shift Register	线性反馈位移寄存器
LLC	Logical Link Control	逻辑链路控制

LRE	Long Reach Ethernet	长距离以太网
MAC	Media Access Control	介质访问控制
MDI	Medium Dependent Interface	介质相关接口
MII	Medium Independent Interface	介质无关接口
NEXT	Near-End Crosstalk	近端串扰
PAM	Pulse Amplitude Modulation	脉冲幅度调制
PCS	Physical Coding Sublayer	物理编码子层
PHY	Physical Layer	物理层
PMA	Physical Medium Attachment	物理介质连接子层
PMD	Physical Medium Dependent	物理介质相关子层
PSD	Power Spectral Density	功率谱密度
RMS	Root Mean Square	均方根
SFD	Start Frame Delimiter	帧开始定界符
SSD	Start of Stream Delimiter	数据流开始标示符

4 物理层总体要求

4.1 在 OSI 分层参考模型中的位置

距离增强型以太网物理层位于OSI参考模型的最底层，实现设备之间的物理接口。它为建立、维护和释放数据链路实体之间的二进制比特传输的物理连接提供机械的、电气的、功能的和规程的特性。其功能包括建立、维护和拆除物理电路，实现物理层比特（bit）流的透明传输等。物理层包括3个功能层和2个层接口。2个层接口为物理介质无关层接口（MII）和物理介质相关层接口（MDI），在MII的上层是逻辑数据链路层，而MDI的下层则直接与传输介质相连，如图1所示。

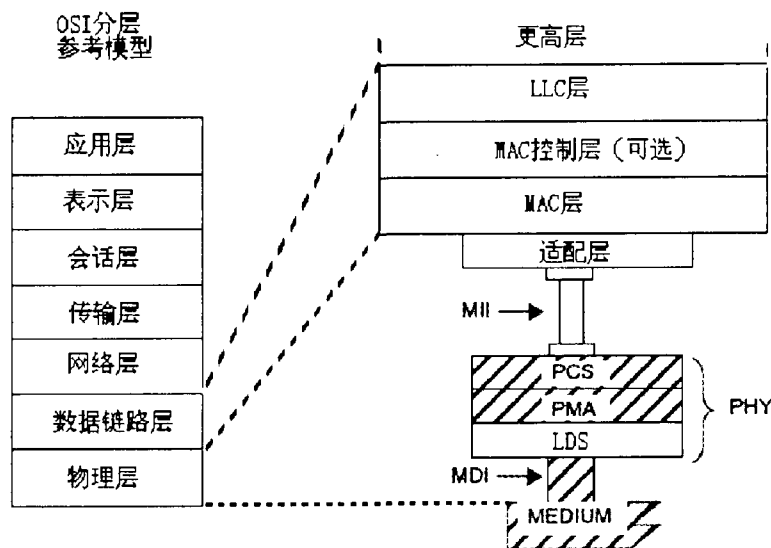


图1 距离增强型以太网物理层与OSI参考模型的关系

4.2 总体要求

4.2.1 概述

本标准规定了两种不同的距离增强型以太网物理层接口，一种采用3B2T变换编码与2D-PAM3线路编码方法，在1对/2对双绞线基带介质上，以10Mbit/s/100Mbit/s速率传输。另一种采用8B1Q4变换编码与4D-PAM5线路编码方法，在4对双绞线基带介质上，以100Mbit/s速率传输。这两种物理层接口应支持CSMA/CD的MAC层，符合介质无关接口（MII）要求，支持链路协商，支持全双工模式，传输的误码率（BER）应小于 10^{-8} ，传输距离达500m。

这两种物理层接口在每一对双绞线上都应使用混合器（hybrid）与抵消器（canceller）来实现信号的全双工基带传输，如图2所示。在多对双绞线的情况下，分别采用二维三级信号向量或四维五级信号向量的方式同时收发信号。物理层接口应采用连续信号方式，当没有数据发送时，就传送空闲（IDLE）信号，该信号传递了本地物理层的可靠性信息，有利于对端设备同步其接收解扰器。

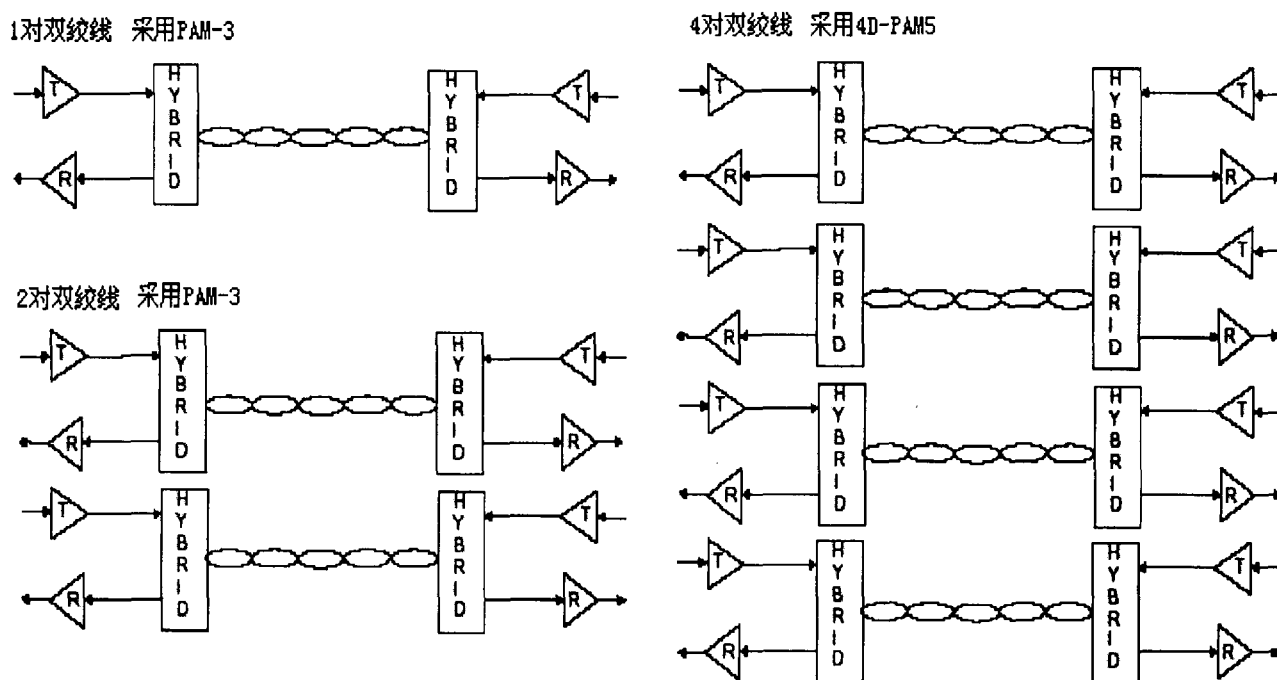


图2 不同线对的拓扑情况

这两种物理层接口应可以配置成Master或Slave两种模式，链路两侧的master-slave关系通过链路发现（LSD）过程建立。作为Master的一方应使用本地时钟来进行数据发送，作为Slave的一方应从接收信号中恢复时钟，并将它作为发送数据的时钟。

PCS子层与PMA子层将在以下各节详细描述，图3所示是物理层的整体功能示意。

4.2.2 适配子层（Reconciliation RS）和介质无关接口（Medium Independent interface MII）

介质无关接口（MII）提供MAC子层与物理层（PHY）之间，站管理实体与物理层（PHY）之间的接口。它以4比特（nibble）为单位，可以提供10Mbit/s和100Mbit/s的数据传输速率。适配子层则提供了MII与MAC子层的信号映射关系。

4.2.3 物理编码子层（Physical Coding Sublayer PCS）

距离增强型以太网物理编码子层连接介质无关接口（MII）与物理介质连接子层（PMA），其功能主要是产生要发送的连续码组（code-group），并处理收到的码组。这种从数据比特到码组的转换分别称为

2D-PAM3或4D-PAM5，即二维三级脉冲幅度调制技术或四维五级脉冲幅度调制技术。前者将3个比特转换为2个3级符号，后者将8个比特转换为4个5级符号。

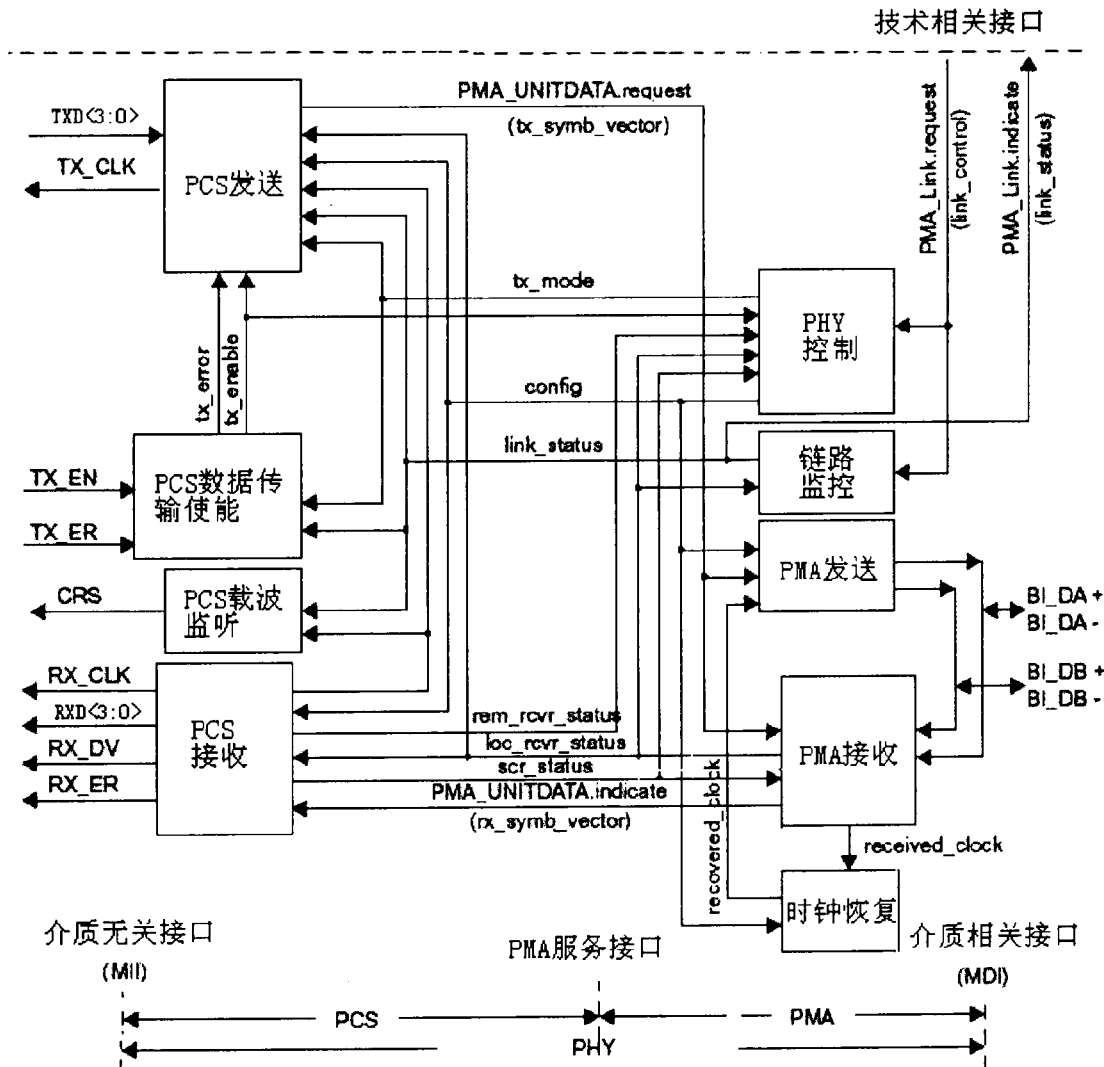


图3 物理层功能框示意

在开始发送每一帧时，MII设置TX_EN=TRUE，PCS应在帧前插入表示数据流初始标示符（start-of-stream delimiter）的码组；在每一帧结束时，MII设置TX_EN = FALSE，PCS应在帧后插入表示数据流结束标示符（end-of-stream delimiter）的码组。帧与帧之间，应将发送一个特殊码组子集中的符号称为空闲模式（IDLE mode）码组。空闲模式编码蕴含着本地PHY的可靠性信息，可以向远端设备通告本地PHY的工作状态。此外，还有一些特殊的码组用来表示传输错误或其他控制功能。

PCS接收功能处理从PMA提供的码组，检测数据帧的初始标示符和结束标示符，解码并解扰，将码组符号转换为4比特（nibble）数据传送给MII。这种从码组到4比特（nibble）数据的转换，分别称为3B1T2或8B1Q4。PCS接收功能还从接收序列中检测错误并通告给MII。

此外，PCS还包含载波监听（carrier sense）功能以及一个管理接口。

PCS功能和状态图见图5，MII的定义与描述见IEEE std 802.3-2003中第22章。

4.2.4 物理介质连接子层（Physical Medium Attachment Sublayer PMA）

物理介质连接子层将PMA服务接口的消息映射到双绞线物理介质上，并提供链路管理和PHY控制功能。PMA可以支持数据在每一个双绞线对上的全双工传输。

PMA发送功能应在每一个双绞线对上包含一个独立的发送器（transmitter），接收功能应在每一个双绞线对上包含一个独立的接收器（receiver）。接收功能应获取时钟，并将接收的码组通过PMA_UINTDATA.indicate消息传送给PCS子层。此外，PMA还可以包括链路监控功能（link monitor）。

PMA的PHY控制功能应产生PCS和PMA子层的控制信号，它在链路协商完成时开始，并启动正常的数据传输操作。PHY控制功能应决定PHY是工作在正常状态（normal state）下，使能链路上的数据传输，还是在链路一端PHY工作不可靠时发送空闲模式（idle mode）码组。

PMA功能与状态图在第6章中描述，电气特性在第8章中描述。

4.2.5 各物理子层间接口（Inter-sublayer Interfaces）

所有的实现都应与MDI兼容，在满足MDI与MII（如果实现了MII）的前提下，设计者可以自由实现PCS与PMA的电路。实际上当PHY使用在单端口或多端口设备上时，MII也是可选的。

4.2.6 标准中的一些约定

本标准包含了状态图以及变量、常量和函数的定义。在两者发生冲突的情况下，应以状态图为准。

状态图所使用的各种记号和标记遵照IEEE std 802.3-2002中1.2的规定。

4.3 服务原语与服务接口

4.3.1 服务原语与服务接口概述

距离增强型以太网物理层通过以下4个服务接口传送数据和控制信息：

- （1）介质无关接口（MII），IEEE Std 802.3-2002中第22章定义；
- （2）PMA服务接口，在下面4.3.3中定义；
- （3）介质相关接口（MDI）；
- （4）技术相关接口（TDI），IEEE Std 802.3-2002中第28章定义。

4.3.2 技术相关接口（Technology-Dependent Interface）

4.3.2.1 技术相关接口概述

使用如下两个原语在链路协商与PMA之间交换状态和控制信息：

- （1）PMA_LINK.request（link-control）；
- （2）PMA_LINK.indicate（link-status）。

4.3.2.2 PMA_LINK.request

链路协商算法应使用该原语使能或禁止PMA操作。其语义如下：

- （1）PMA_LINK.request（link-control），其中link-control参数可以取值SCAN_FOR_CARRIER、DISABLE或ENABLE；
- （2）SCAN_FOR_CARRIER，应在链路协商接收到连接信号之前使用，这种模式下，PMA应通告link_status = FALSE，并禁止PHY操作；
- （3）DISABLE，在链路协商检测到连接信号时设置，这种模式下，应禁止PHY操作，但允许链路协商功能确定如何配置链路；
- （4）ENABLE，自协商应将控制转到PHY，开始正常数据传输过程。

4.3.2.3 PMA_LINK.indicate

PMA应使用该原语向PCS、PMA PHY控制功能以及链路协商算法指示下面物理介质的状态变化。其语义如下：

- (1) PMA_LINK.indicate (link-status)，其中link-status参数可以取值FAIL、READY或OK；
- (2) FAIL，表示还没有建立起有效的链路；
- (3) READY，表示链路监控功能指示链路是完整的，准备建立链路；
- (4) OK，表示链路监控功能指示已经建立有效链路，有可能从远端PHY接收可靠信号；
- (5) PMA，应按照图19所示的连续生成该原语，指示链路状态。

4.3.3 PMA 服务接口

4.3.3.1 PMA 服务接口概述

可以使用如下原语在服务接口交换符号向量、状态指示和控制信息：

- (1) PMA_TXMODE.indicate (tx_mode)；
- (2) PMA_CONFIG.indicate (config)；
- (3) PMA_UNITDATA.request (tx_symb_vector)；
- (4) PMA_UNITDATA.indicate (rx_symb_vector)；
- (5) PMA_SCRSTATUS.request (scr_status)；
- (6) PMA_RXSTATUS.indicate (loc_rcvr_status)；
- (7) PMA_REMRXSTATUS.request (rem_rcvr_status)。

图4说明了上述原语的使用方式。

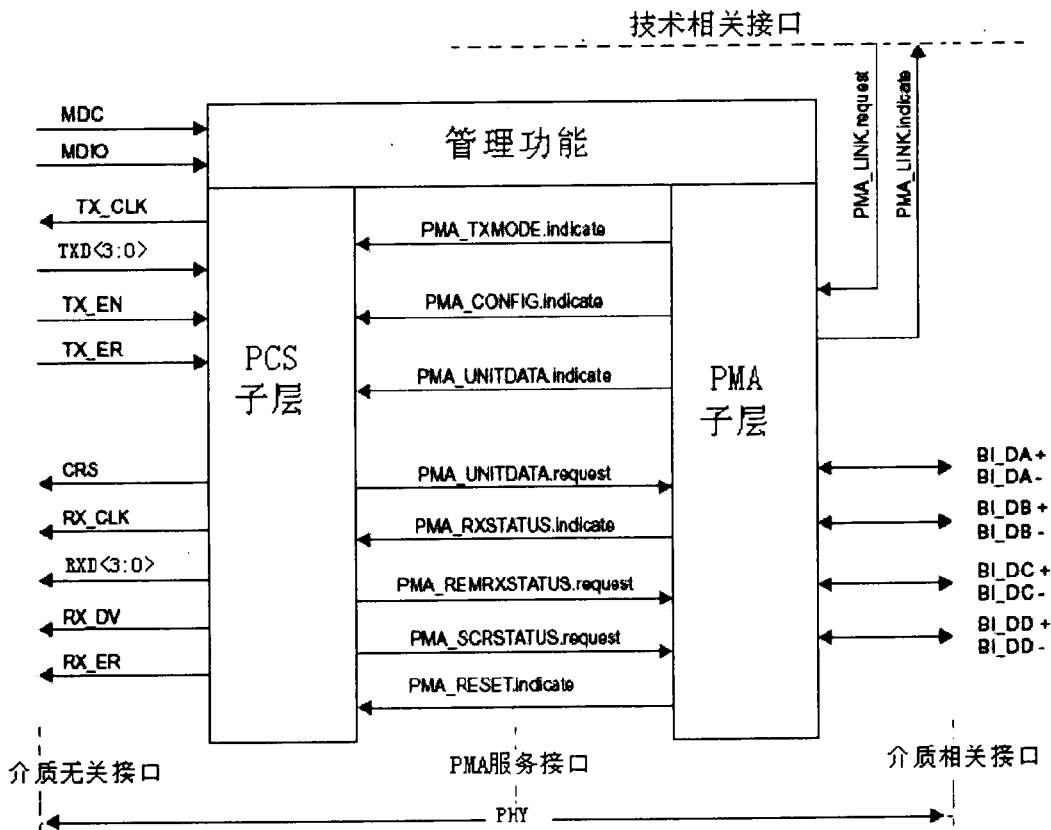


图4 物理层服务接口

4.3.3.2 PMA_TXMODE.indicate

PMA PHY控制功能应使用该原语连续产生PMA_TXMODE.indicate消息，指示PCS需要发送什么样的码组序列。其语义为：

PMA_TXMODE.indicate (tx_mode)。

其中tx_mode参数可以取以下3种值：

- (1) SEND_N，指示PCS可以进行正常的的数据发送；
- (2) SEND_I，PCS只能发送空闲模式下的码组序列；
- (3) SEND_Z，PCS只能发送零序列。

4.3.3.3 PMA_CONFIG.indicate

在自协商过程完成PHY的MASTER-SLAVE配置之后，PMA应使用该原语连续产生PMA_CONFIG.indicate消息，指示PCS当前PHY的工作模式。其语义为：

PMA_CONFIG.indicate (config)。

其中config参数可以取以下两个值之一：

- (1) MASTER，表示PHY工作在MASTER模式下；
- (2) SLAVE，表示PHY工作在SLAVE模式下。

MASTER\SLAVE模式与PCS和PMA时钟恢复功能有密切关系。

4.3.3.4 PMA_UNITDATA.request

PCS发送功能应使用该原语，将变换得到的码组以tx_symbol_vector参数的形式传递给PMA。其语义如下：

PMA_UNITDATA.request (tx_symb_vector)。

在发送过程中，参数tx_symb_vector所代表的符号，在多个发送双绞线对上同时传输。其中tx_symb_vector参数可以取以下两种形式：

- (1) SYMB_2D表示三级符号的二维向量，可以在一个或两个双绞线对上同时发送。每一个三级符号可以取值-1、0或1，在基于2D-PAM3线路编码的情况使用；
- (2) SYMB_4D表示五级符号的四维向量，可以在线对BI_DA、BI_DB、BI_DC、BI_DD上同时发送。每一个五级符号可以取值-2、-1、0、1、+1或+2，在基于4D-PAM5线路编码的情况使用。

PCS在每一个时钟发送周期，应同步产生一个PMA_UNITDATA.request消息，PMA接收之后应将与符号对应的信号发送到MDI上去。

4.3.3.5 PMA_UNITDATA.indicate

PMA应使用该原语，将从介质上接收到的码组以rx_symbol_vector参数的形式传递给PCS。其语义如下：

PMA_UNITDATA.indicate (rx_symb_vector)。

在接收过程中，把多个接收双绞线对上得到的符号，以参数rx_symb_vector的形式传递给PCS。其中rx_symb_vector参数可以取以下两种形式。

- (1) SYMB_2D表示一个三级符号的二维向量，在一个或两个双绞线对上同时接收。每一个三级符号可以取值-1、0或1。在基于2D-PAM3线路编码的情况使用。

(2) SYMB_4D表示一个五级符号的四维向量,在线对BI_DA、BI_DB、BI_DC、BI_DD上同时接收。每一个五级符号可以取值-2、-1、0、1、+1或+2。在基于4D-PAM5线路编码的情况使用。

PMA接收功能应从接收信号中恢复时钟;每一个时钟周期,在从MDI接收信号的同时,应同步产生一个PMA_UNITDATA.indicate消息传送给PCS。

4.3.3.6 PMA_SCRSTATUS.request

PCS接收功能应使用该原语来传递本地PHY解扰器的同步状态,参数scr_status表示本地解扰器的状态。其语义如下:

PMA_SCRSTATUS.request (scr_status)。

其中scr_status参数可以取以下两种形式:

- (1) OK,表示本地解扰器已经达到同步状态;
- (2) NOT_OK,表示本地解扰器还没有同步。

4.3.3.7 PMA_RXSTATUS.indicate

PMA接收功能应根据从MDI接收的信号,使用该原语来指示本地PHY接收链路的状态情况。其中参数loc_rcvr_status传递了整个接收链路状态好坏的信息。loc_rcvr_status的判别标准由实现者自行规定。该原语的语义如下:

PMA_RXSTATUS.indicate (loc_rcvr_status)。

其中loc_rcvr_status参数可以取以下两种形式:

- (1) OK表示本地PHY的接收链路是可靠的;
- (2) NOT_OK表示本地PHY的接收链路不可靠。

4.3.3.8 PMA_REMRXSTATUS.request

PCS接收功能应使用该原语来指示远端PHY接收链路的状态情况。其中参数rem_rcvr_status向PMA的PHY控制功能传递了远端PHY的可靠性信息。rem_rcvr_status的判别标准由实现者自行规定。该原语的语义如下:

PMA_REMRXSTATUS.request (rem_rcvr_status)。

其中rem_rcvr_status参数可以取以下两种形式:

- (1) OK表示远端PHY的接收链路是可靠的;
- (2) NOT_OK表示远端PHY的接收链路不可靠。

4.3.3.9 PMA_RESET.indicate

当允许复位时,PMA应使用该原语通知PCS复位。PMA_RESET.indicate原语可以取以下两个值:

- (1) TRUE使能复位功能时;
- (2) FALSE禁止复位功能时。

5 物理编码子层 (Physical Coding Sublayer)

5.1 基于 2D-PAM3 编码物理层接口的物理编码子层

PCS应包括一个复位功能和四个同步、异步操作功能,这几个操作功能分别是PCS传送使能功能、PCS发送功能、PCS载波监听和PCS接收功能。这些操作功能应在PCS成功复位后立即开始工作。

PCS参考图如图5所示,显示了上述操作功能与PCS-PMA接口消息的相互关系。

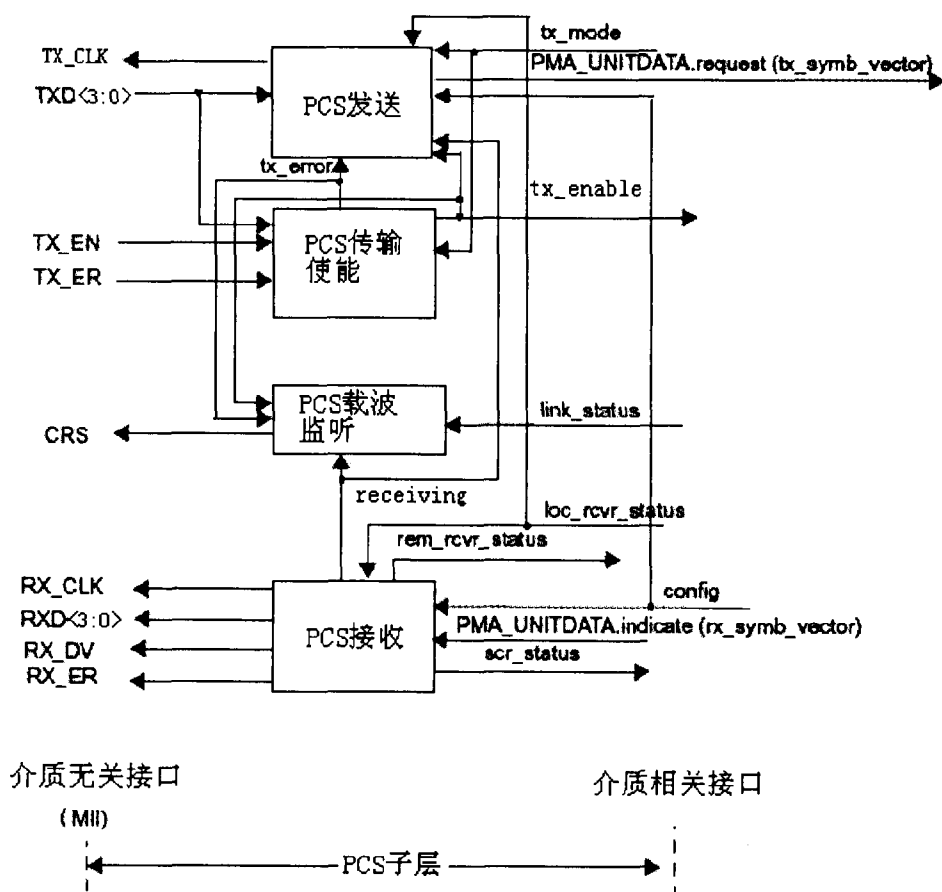


图5 PCS参考图

5.1.1 PCS 功能

5.1.1.1 PCS 复位功能

在满足下列条件之一时，应执行PCS复位功能：

- (1) 上电；
- (2) 接收到管理实体的复位需求。

此时，PCS复位功能应设置pcs_reset = ON，并初始化PCS所有操作功能。

5.1.1.2 PCS 数据传输使能功能

PCS数据传输使能功能产生tx_enable和tx_error信号，指示PCS发送功能进行数据编码。该过程涉及对tx_mode、TX_ER、TX_EN、TXD<3:0>进行逻辑操作，如图13所示，相关的状态变量在5.1.2中定义。

5.1.1.3 PCS 发送功能

5.1.1.3.1 PCS发送功能概述

PCS发送功能状态图如图14所示。

从MII接收的数据以4比特（nibble）为单位，首先做4B3B转换，变为以3比特为单位的数据；经过旁流扰码，最后映射为三级符号的二维向量。在每一个符号周期，PCS发送功能应产生一个码组（An、Bn），并通过原语PMA_UNITDATA.request传递给PMA。PMA应把符号An、Bn分别在双绞线对BI_DA、BI_DB上发送。这里整数n作为时间索引，表示不同符号周期的时间次序。当tx_enable = TRUE时，PCS应将前导码前9个比特对应的3个符号向量用数据流初始标示符（SSD）码组代替；并对随后的3比特数据流进行编

码；当 $tx_enable = FALSE$ 时，应在帧后插入数据流结束标示符（ESD）码组。当 $tx_error = TRUE$ 且 $tx_enable = TRUE$ 时，PCS发送功能应在这一帧的结尾插入表示传输错误的符号向量。

当PMA_TXMODE.indicate消息取值SEND_Z时，PCS发送功能应每次通过PMA_UNITDATA.request原语向PMA发送向量零。

当PMA_TXMODE.indicate消息取值SEND_I时，PCS发送功能应发送训练模式（training mode）码组。该编码方式包含了参数loc_rcvr_status的取值信息，通过这种机制，可以向远端设备通告本地PHY接收链路的状态。

当PMA_TXMODE.indicate消息取值SEND_N时，PCS发送功能应使用3B2T编码方法进行正常的数据发送。经过4B3B转换的数据，再经旁流扰码器去除相关性之后，映射为三级符号的二维向量，并传递给PMA处理。

PCS数据发送参考图如图6所示。

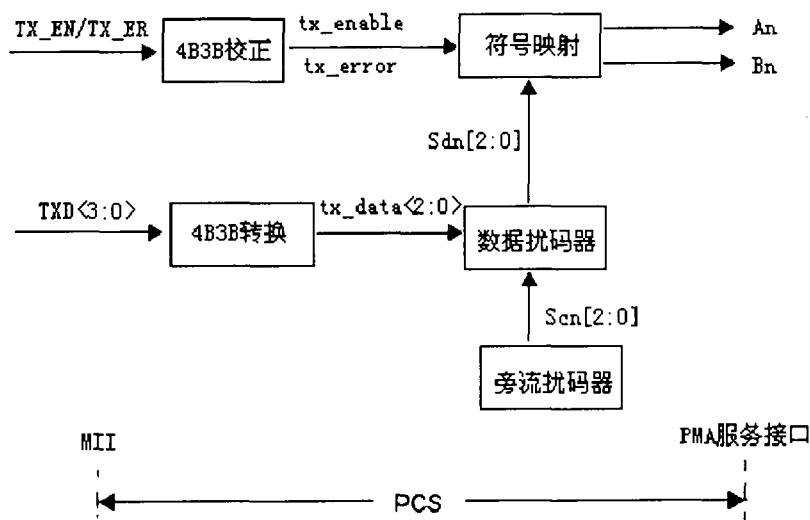


图6 PCS数据发送参考图

5.1.1.3.2 4B3B转换

5.1.1.3.2.1 对数据部分的4B3B转换

从MII接收的数据以4比特（nibble）TXD<3:0>为单位，首先应转换为以3比特为单位的数据tx_data<2:0>，这称为4B3B转换。当从MII接收的数据帧大小（包括7个字节的前导码和一个字节的帧开始定界符（SFD））不是3比特的倍数时，在帧结束时还应插入1个或2个比特，这些比特可以任意取值；对应地，在接收端应丢弃这些多余的比特。

图7是一个8比特数据流4B3B转换的示意图。如图7所示，MII发送了两组4比特数据，经4B3B转换后变为3组三比特数据。由于8不是3的倍数，在形成最后一个3比特数据时，应填充一个比特。

5.1.1.3.2.2 对发送控制信号的4B3B转换

所有MII发送信号与时钟TX_CLK同步，经过4B3B转换后，PCS发送功能使用的各种信号tx_enable、tx_error和tx_data<2:0>应与时钟PCS_TXCLK同步，该时钟信号的频率应为TX_CLK频率的4/3倍。不同工作模式下的发送时钟频率TX_CLK的取值见8.4.6中的表11。

当TX_EN=TRUE时，表示将开始发送新的一帧；此时应设置tx_enable=TRUE，PCS发送功能把从MII接收的数据经4B3B转换为tx_data<2:0>数据流，在完成最后一组3比特转换后，应设置tx_enable=FALSE。

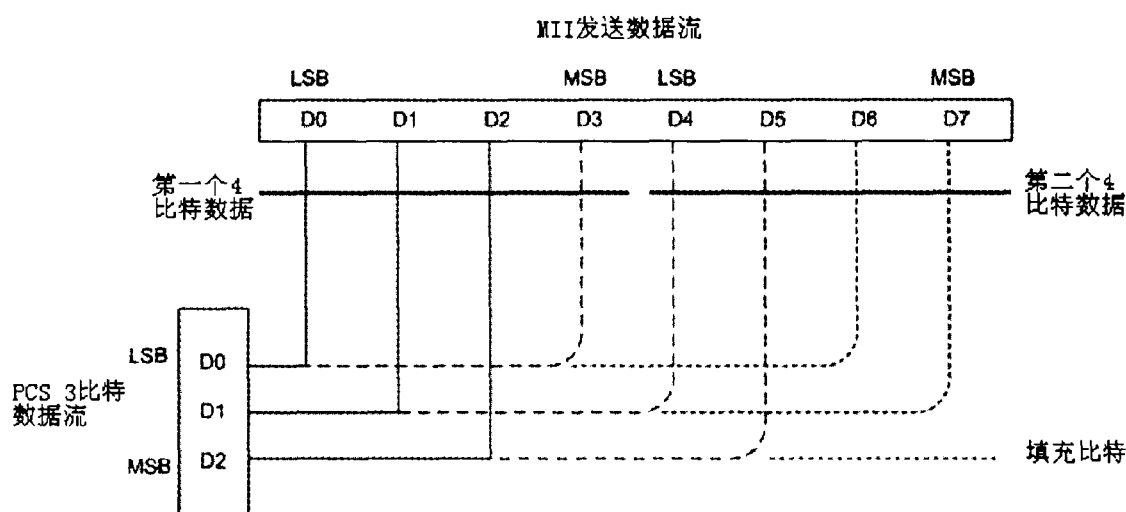


图7 PCS 4B3B转换—数据部分

在发送数据 (tx_enable=TRUE) 的过程中, 如果发生TX_ER=TRUE, 表示有发送错误, 此时应设置tx_error=TRUE, 直到这一帧结束后才重新设置tx_error=FALSE。在一帧结束时如果有tx_error=TRUE, PCS发送功能应插入传输错误码组, 其定义见5.1.1.3.6。由于tx_error=TRUE将一直保持到当前帧结束, 其相对位置对PCS发送功能没有影响, 所以可以由实现者自行规定。

图8为有传输错误的的数据发送图。经过4B3B转换后, 各种信号的时钟发生变化, 应与时钟PCS_TXCLK同步。时钟信号PCS_TXCLK与时钟信号TX_CLK的相位关系由实现者自行规定。

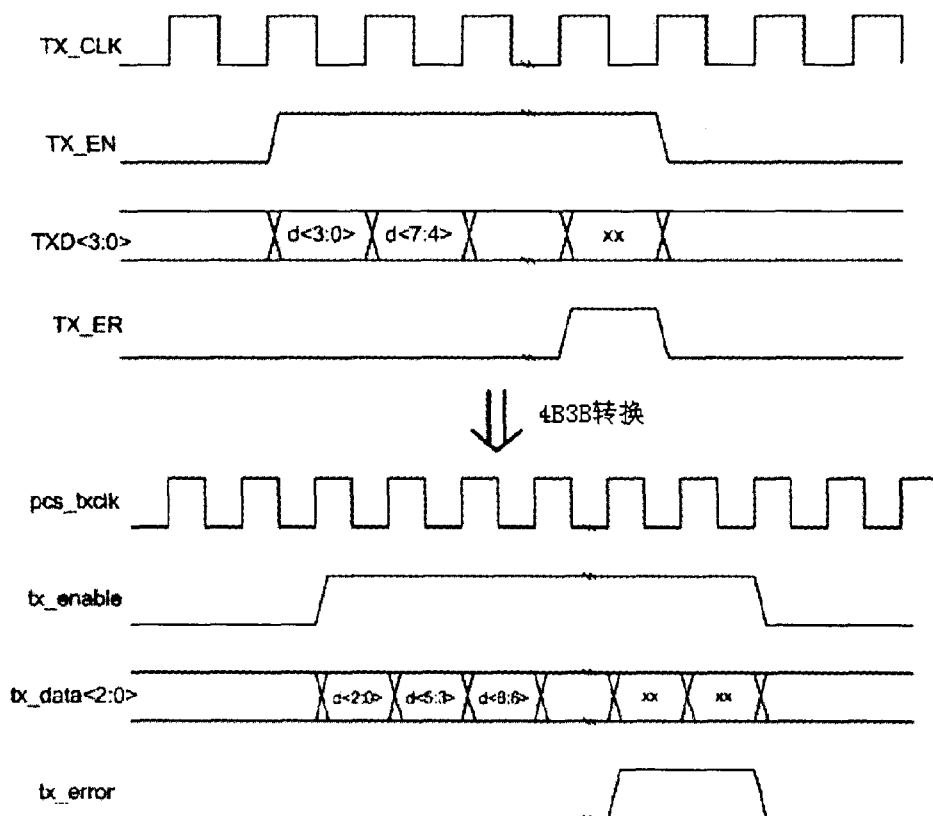


图8 PCS 4B3B转换—发送控制信号部分

5.1.1.3.3 旁流扰码器多项式

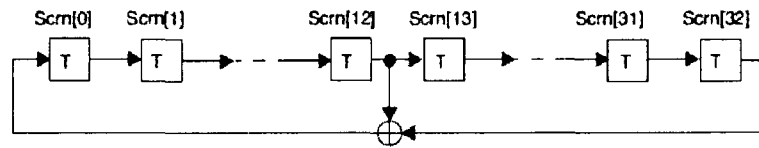
PCS发送功能应使用旁流扰码器来去除数据中的相关性；当本地PHY工作在MASTER模式下时，应使用如下扰码器多项式

$$g_M(x) = 1 + x^{13} + x^{33}$$

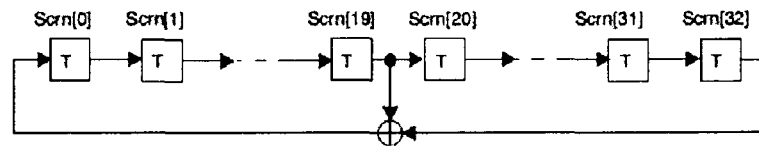
否则，应使用如下扰码器多项式

$$g_S(x) = 1 + x^{20} + x^{33}$$

扰码器多项式生成了一个伪随机序列，其周期为 $2^{33}-1$ 。图9显示了如何通过线性反馈位移寄存器来实现旁流扰码器，其中位移寄存器中时间 n 对应的各比特用Scrn[32:0]表示。在每一个符号周期，位移寄存器应前进一个比特，并生成一个新比特Scrn[0]。当PCS复位时，代表旁流扰码器状态的这33个比特应被随机设置，但是不能初始化为全零。



MASTER模式下的旁流扰码器



SLAVE模式下的旁流扰码器

图9 使用线性反馈位移寄存器实现旁流扰码器

5.1.1.3.4 生成比特Syn[2:0]和Scn[2:0]

PCS发送编码规则应基于3比特Syn[2:0]来生成扰码器比特Scn[2:0]，用来去除数据tx_data[2:0]的相关性以及生成空闲和训练符号。通过使用Scrn[0]以及辅助多项式 $g(x) = x^3 \wedge x^8$ ，比特Syn[2:0]应按照如下公式生成：

$$Sy_n[0] = Scr_n[0]$$

$$Sy_n[1] = g(Scr_n[0]) = Scr_n[3] \wedge Scr_n[8]$$

$$Sy_n[2] = g^2(Scr_n[0]) = Scr_n[6] \wedge Scr_n[16]$$

这里 \wedge 代表异或（XOR）逻辑操作。

进而，扰码器比特Scn[2:0]应按照如下公式生成：

$$Sc_n[2:1] = \begin{cases} [0 \ 0] & \text{if } (tx_mode = SEND_Z) \\ Sy_n[2:1] & \text{else if } (n - n_0) = 0 \pmod{2} \\ (Sy_{n-1}[2:1] \wedge [1 \ 1]) & \text{else} \end{cases}$$

$$Sc_n[0] = \begin{cases} 0 & \text{if } (tx_mode = SEND_Z) \\ Sy_n[0] & \text{else} \end{cases}$$

这里 n_0 代表上次发送旁流扰码器复位时的时间索引。

5.1.1.3.5 生成扰码比特Sdn[2:0]

PCS发送功能应使用扰码器比特Scn[2:0]对经过4B3B转换的tx_data[2:0]做扰码，得到扰码比特Sdn[2:0]。相应计算公式如下所示：

$$Sd_n[2] = \begin{cases} Sc_n[2] \wedge tx_data_n[2] & \text{if } (tx_enable_{n-3} = 1) \\ Sc_n[2] \wedge 1 & \text{else if } (loc_recv_status = OK) \\ Sc_n[2] & \text{else} \end{cases}$$

$$Sd_n[1:0] = \begin{cases} Sc_n[1:0] \wedge tx_data_n[1:0] & \text{if } (tx_enable_{n-3} = 1) \\ Sc_n[1:0] & \text{else} \end{cases}$$

5.1.1.3.6 生成三级符号 A_n , B_n

3比特字 $Sdn[2:0]$ 需要映射到三级符号向量(A_n 、 B_n)。当PCS正常发送数据时,应根据表1完成 $Sdn[2:0]$ 到三级符号 A_n 、 B_n 的映射;在空闲模式下,应根据表2和表3来完成 $Sdn[2:0]$ 到三级符号 A_n 、 B_n 的映射。

表1 数据发送模式下比特字到三级符号的映射表

$Sdn[2:0]$	A_n	B_n
000	-1	-1
001	-1	0
010	-1	1
011	0	-1
未定义	0	0
100	0	1
101	1	-1
110	1	0
111	1	1

表2 当 $tx_mode=SEND_I$ 时,空闲模式下比特字到三级符号的映射表

$Sdn[2:0]$	A_n	B_n
000	-1	0
001	0	1
010	-1	1
011	0	1
100	1	0
101	0	-1
110	1	-1
111	0	-1

表3 当 $tx_mode=SEND_N$ 时,空闲模式下比特字到三级符号的映射表

$Sdn[2:0]$	$SXn[1]=0$		$SXn[1]=1$	
	A_n	B_n	A_n	B_n
000	-1	0	-1	0
001	0	1	1	1
010	-1	1	-1	1
011	0	1	1	1
100	1	0	1	0
101	0	-1	-1	-1
110	1	-1	1	-1
111	0	-1	-1	-1

当tx_mode=SEND_N时，数据符号和空闲符号交替发送：由于数据和空闲符号的概率分布不同，为了进一步去除之间的相关性，应按照表3来完成空闲模式下Sdn[2:0]到三级符号An、Bn的映射。

$$SX_n[0] = X_n = Scr_n[4] \wedge Scr_n[6]$$

$$SX_n[2] = g(X_n) = Scr_n[7] \wedge Scr_n[9] \wedge Scr_n[12] \wedge Scr_n[14]$$

三级符号向量{0, 0}只出现在表示控制码组中，用来编码数据流初始标示符（SSD），数据流结束标示符（ESD）以及传输错误。具体地，应使用{0, 0}{0, 0}{0, 0}码组序列来表示数据流初始标示符，应使用{0, 0}{0, 0}{1, 1}码组序列来表示数据流结束标示符，应使用{0, 0}{0, 0}{-1, -1}码组序列来表示传输错误。当发生传输错误（TX_EN=TRUE且TX_ER=TRUE）时，在这一帧的结尾应使用{0, 0}{0, 0}{-1, -1}码组序列替代ESD，表明所接受的当前帧发生传输错误。当接收端检测到传输错误码组时，应在RX_DV=FALSE之前设置RX_ER=TRUE，以提示有传输错误发生。图10说明了这几种控制码组的使用情况。

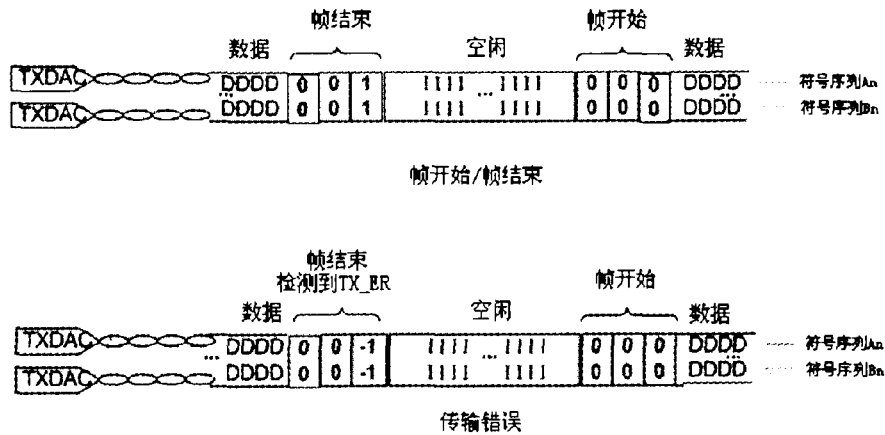


图10 控制码组使用说明

5.1.1.4 PCS 接收功能

5.1.1.4.1 PCS接收功能概述

PCS接收状态图如图16所示。

PCS接收功能应以参数rx_symb_vector的形式接收由PMA提供的码组。为了正确处理，PCS接收功能应首先利用空闲模式的编码规则同步旁流扰码器，并设置scr_status=OK。码组序列（An、Bn）被处理后应产生信号RXD<3:0>、RX_DV、RX_ER，并传递给MII。

5.1.1.4.2 对接收控制信号的3B4B转换

所有MII接收信号与时钟RX_CLK同步，而PCS接收功能的各种信号pcs_rx_dv，pcs_rx_er和rx_data<2:0>应与时钟PCS_RXCLK同步，该时钟信号的频率应为RX_CLK频率的4/3倍。不同工作模式下的接收时钟频率RX_CLK的取值见8.5.2中的表12。

当pcs_rx_dv=TRUE时，表示将开始接受新的一帧，此时应设置RX_DV=TRUE，PCS接收功能通过4B3B反变换把rx_data<2:0>数据流转换为MI的RXD<3:0>数据流，在向MII发送完最后一组RXD<3:0>后，应设置RX_DV=FALSE。

在接收数据（pcs_rx_dv=TRUE）的过程中，如果发生pcs_rx_er=TRUE，表示检测到传输错误码组或者接收到其他错误符号，此时应设置RX_ER=TRUE，直到pcs_rx_er=FALSE才重新设置RX_ER=FALSE。

图11为有传输错误的接收图。经过4B3B反变换后，各种信号的时钟发生变化，时钟信号PCS_RXCLK与时钟信号RX_CLK的相位关系由实现者自行规定。

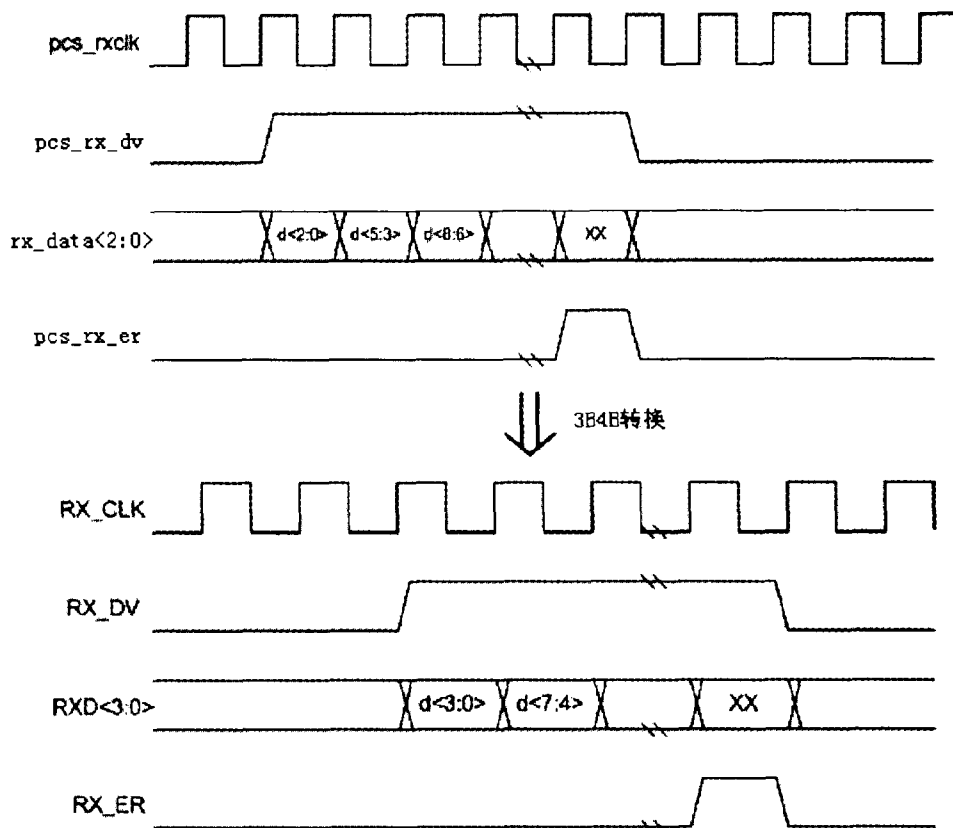


图11 PCS 4B3B转换—接收控制信号部分

5.1.1.4.3 解码码组

当PMA指示接收过程正常，并设置loc_rcvr_status = OK时，PCS接收功能应使用空闲模式编码规则检查收到的码组序列，直到检测接收到数据流初始标示符（SSD）或接收错误。

当PCS接收功能检测到数据流初始标示符（SSD），应设置pcs_rx_dv=TRUE，并一直保持到这一帧结束；当检测到数据流结束标示符（ESD）时，应设置pcs_rx_dv=FALSE。经过解码的数据总是3比特的倍数，经过4B3B反变换后，多余的1个或2个比特应被丢弃，最终生成MII所需要的RXD<3:0>数据。

当在接收数据的过程中检测到传输错误码组或者其他错误符号，应设置pcs_rx_er=TRUE，以通知所接收的这一帧数据是无效的。当重新检测到连续4个正确的空闲模式编码码组时，应设置pcs_rx_dv=FALSE及pcs_rx_er=FALSE，并回到空闲（IDLE）状态，如PCS接收状态图16所示。

5.1.1.4.4 接收扰码多项式

PHY应解扰接收数据流，以最终得到MII所需要的RXD<3:0>。对于旁流解扰，在MASTER模式下，PHY使用的接收解扰生成多项式应为 $g_M(x) = 1 + x^{20} + x^{33}$ ；在SLAVE模式下，PHY使用的接收解扰生成多项式应为 $g_S(x) = 1 + x^{13} + x^{33}$ 。

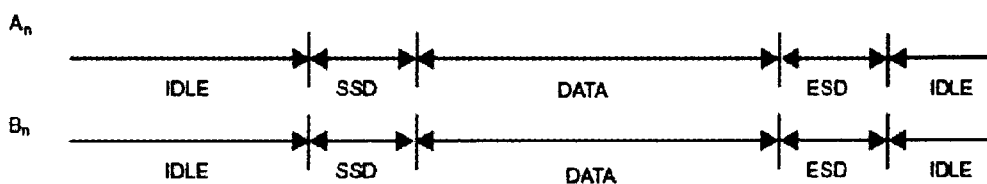
5.1.1.5 PCS 载波监听功能

PCS载波监听功能应可以产生MII信号CRS。图17显示了相关的处理流程，相关状态变量在5.1.2中定义。

5.1.1.6 数据流结构

图12显示了向量tx_symb_vector与rx_symb_vector在一对或两对双绞线上传输的示意图，其中一对双绞线上数据传输的情况在6.1.2.2和6.1.2.3中说明。

两对双绞线传输



一对双绞线传输



图12 向量tx_symb_vector与rx_symb_vector的传输示意

5.1.2 状态变量

5.1.2.1 变量

5.1.2.1.1 config

PMA_CONFIG.indicate原语中的config参数，可以取值MASTER或SLAVE。

5.1.2.1.2 IDLE

空闲模式下使用的特殊码组。

5.1.2.1.3 JAB

Jabber状态，表示检测到超长帧，应复位PCS接收状态机。

5.1.2.1.4 JBState

指示当前的Jabber状态的变量。

5.1.2.1.5 rcv_jab_detected

当处于JAB状态，应设置该变量为TRUE。

5.1.2.1.6 link_status

PMA_LINK.indicate原语中的link_status参数，可以取值OK或FAIL，由PMA链路监控功能传递给PCS。

5.1.2.1.7 loc_rcvr_status

PMA_RXSTATUS.indicate原语中的loc_rcvr_status参数，可以取值OK或NOT_OK，由PMA接收功能传递给PCS。

5.1.2.1.8 pcs_reset

由PCS复位功能使用的pcs_reset参数，可以取值ON或OFF。

5.1.2.1.9 receiving

由PCS接收功能生成的接收参数，可以取值TRUE或FAIL。

5.1.2.1.10 rem_rcvr_status

由PCS接收功能生成的rem_rcvr_status参数，可以取值OK或NOT_OK。

5.1.2.1.11 Rxn

时间索引= n 时rx_symb_vector的别称。

5.1.2.1.12 rxerror_status

由PCS接收功能设置的rxerror_status参数，可以取值ERROR或NO_ERROR。

5.1.2.1.13 RX_DV

MII的RX_DV信号。

5.1.2.1.14 RX_ER

MII的RX_ER信号。

5.1.2.1.15 rx_symb_vector

PMA_UNITDATA.indicate原语中的向量参数，取值形式为SYMB_2D，由PMA传递给PCS。

5.1.2.1.16 RXD<3:0>

MII的RXD<3:0>信号。

5.1.2.1.17 SSD1

两维三级符号向量{0, 0}，数据流初始标示符(SSD)的第一个码组。

5.1.2.1.18 SSD2

两维三级符号向量{0, 0}，数据流初始标示符(SSD)的第二个码组。

5.1.2.1.19 SSD3

两维三级符号向量{0, 0}，数据流初始标示符(SSD)的第三个码组。

5.1.2.1.20 ESD1

两维三级符号向量{0, 0}，数据流结束标示符(ESD)的第一个码组。

5.1.2.1.21 ESD2

两维三级符号向量{0, 0}，数据流结束标示符(ESD)的第二个码组。

5.1.2.1.22 ESD3

两维三级符号向量{1, 1}，数据流结束标示符(ESD)的第三个码组。

5.1.2.1.23 ERR_ESD3

两维三级符号向量{-1, -1}，数据流结束标示符(ESD)的第三个码组，表示当前帧存在发送错误。

5.1.2.1.24 pcs_rx_dv

PCS接收功能生成的pcs_rx_dv参数，可以取值TRUE或FALSE。

5.1.2.1.25 pcs_rx_er

PCS接收功能生成的pcs_rx_er参数，可以取值TRUE或FALSE。

5.1.2.1.26 tx_data<2:0>

经4B3B变换后得到的3比特数据。

5.1.2.1.27 rx_data<2:0>

经2T3B变换后得到的3比特数据。

5.1.2.1.28 TXD<3:0>

MII的TXD<3:0>信号。

5.1.2.1.29 tx_enable

由PCS发送功能生成的tx_enable参数，可以取值TRUE或FALSE。

5.1.2.1.30 tx_error

由PCS发送功能生成的tx_error参数，可以取值TRUE或FALSE。

5.1.2.1.31 TX_DV

MII的TX_DV信号。

5.1.2.1.32 TX_ER

MII的TX_ER信号。

5.1.2.1.33 tx_mode

PMA_TXMODE.indicate原语中的tx_mode参数，可以取值SEND_Z、SEND_I或SEND_N，由PMA的PHY控制功能传递给PCS。

5.1.2.1.34 tx_symb_vector

PMA_UNITDATA.request原语中的向量参数，取值形式为SYMB_2D，由PCS发送功能传递给PMA。

5.1.2.1.35 mii_fc_err

指示是否有False Carrier发生，即在未检测到有效SSD的情况下，接收到了非IDLE码组。

5.1.2.1.36 bit_time

发送每一个比特的持续时间。

5.1.2.1.37 symbol_time

PCS向PMA发送一个二维符号的持续时间，等于3×bit_time，例如在100Mbit/s情况下为30ns，在10Mbit/s情况下为300ns。

5.1.2.2 函数

5.1.2.2.1 check_end

在PCS接收过程中调用的函数，用来检测是否接受到ESD符号。该函数检查由PMA_UNITDATA.indicate得到的下3个rx_symb_vector、Rxn、Rxn+1、Rxn+2，根据是否为有效的ESD符号，返回一个布尔值。

5.1.2.2.2 check_idle

在PCS接收过程中调用的函数，用来检测错误条件下（RX_ER = OK）是否接受到有效的空闲码组。该函数检查由PMA_UNITDATA.indicate得到的当前以及下3个rx_symb_vector，根据是否为连续4个有效的空闲码组，返回一个布尔值。

5.1.2.2.3 Align

4B3B转换中，MII信号TX_EN，TX_ER要调整为3比特域中的信号，通过此函数完成这种校正功能。

5.1.2.2.4 DECODE。

在PCS接收过程中调用的函数，以rx_symb_vector为参数，返回经2T3B变换后得到的3比特数据rx_data<2:0>。

5.1.2.2.5 ENCODE

在PCS发送过程中调用的函数，以tx_data<2:0>为参数，输出向量符号tx_symb_vector。

5.1.2.3 定时器

5.1.2.3.1 symb_timer

5.1.2.3.1.1 连续定时器

定时器超时，设置条件symb_timer_done=TRUE。

5.1.2.3.1.2 重启动时间

超时后立刻重起，其复位条件为symb_timer_done。

5.1.2.3.1.3 持续时间

等于symbol_time。

5.1.2.3.2 rcv_max_timer

在JABBER状态图中出现，用来规定每次接收数据的最长时间。其持续时间为 $10\text{ms}\pm 2\text{ms}$ 。当定时器超时，应设置条件rcv_max_timer_done=TRUE。

5.1.2.4 消息

5.1.2.4.1 PMA_UNITDATA.indicate (rx_symb_vector)

PMA接收功能发出的信号，指示收到一个有效的向量符号。

5.1.2.4.2 PMA_UNITDATA.request (tx_symb_vector)

向PMA发送功能发出的信号，指示将发送一个向量符号。

5.1.2.4.3 PUDI

PMA_UNITDATA.indicate (rx_symb_vector) 消息的别称。

5.1.2.4.4 PUDR

PMA_UNITDATA.request (tx_symb_vector) 消息的别称。

5.1.2.4.5 STD

symb_timer_done的别称。

5.1.2.5 状态图

各种状态图见图13、14、15、16、17。

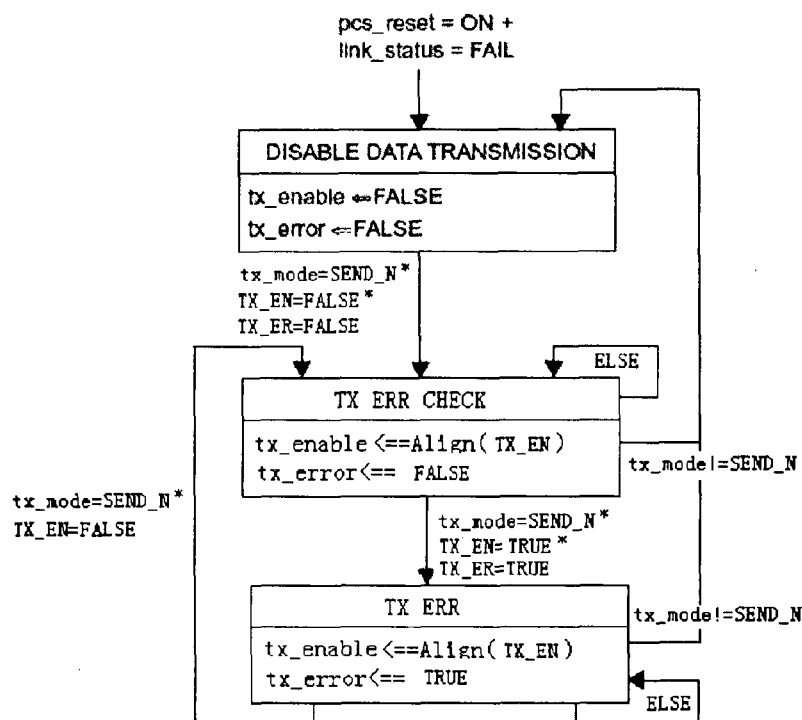


图13 PCS数据发送使能状态图

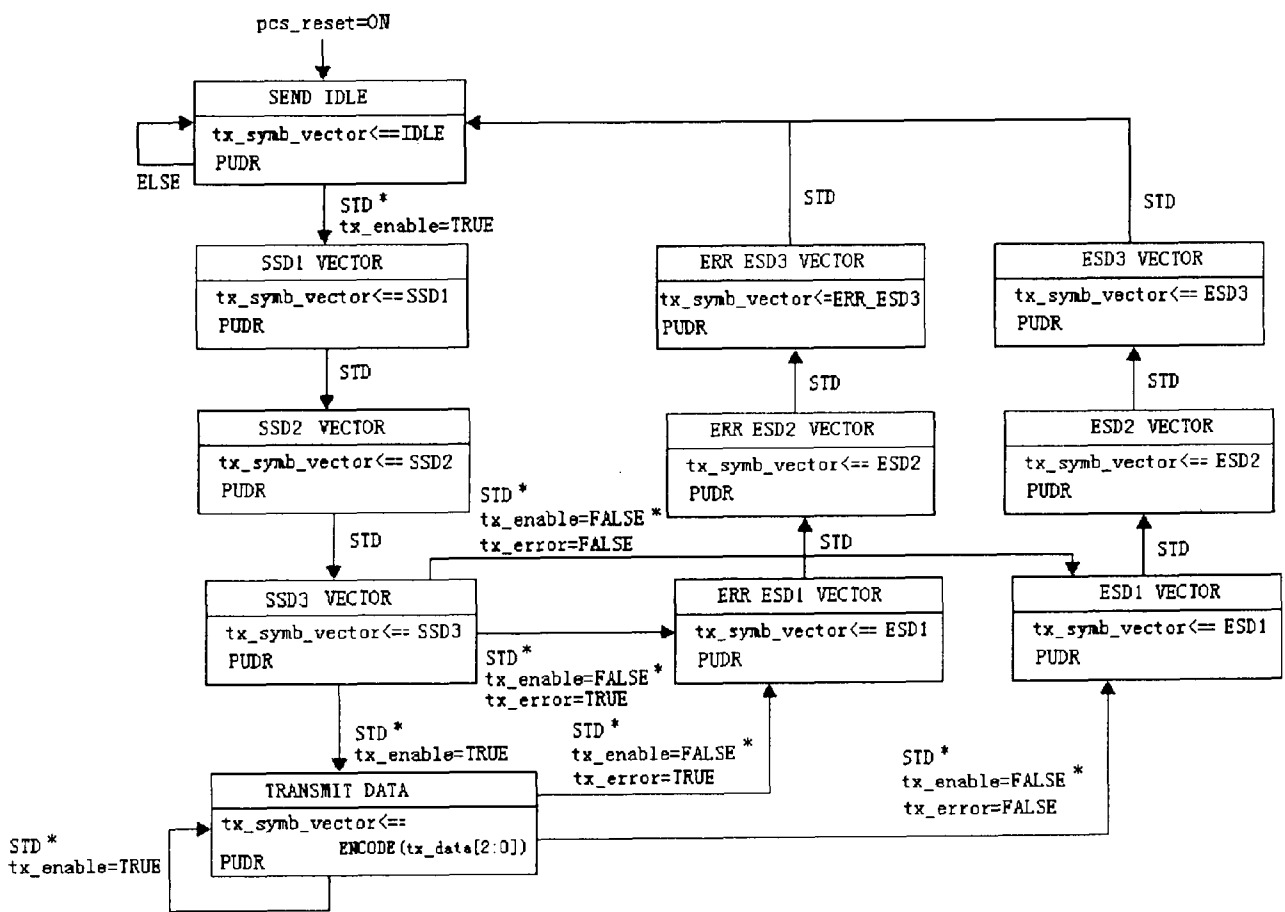


图14 PCS发送功能状态图

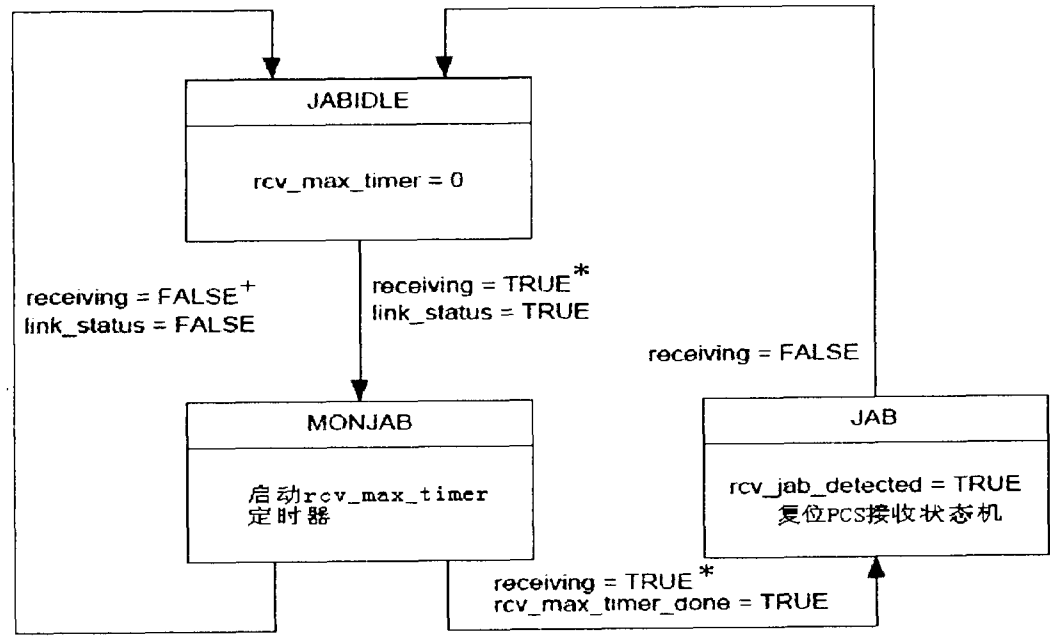


图15 Jabber状态图

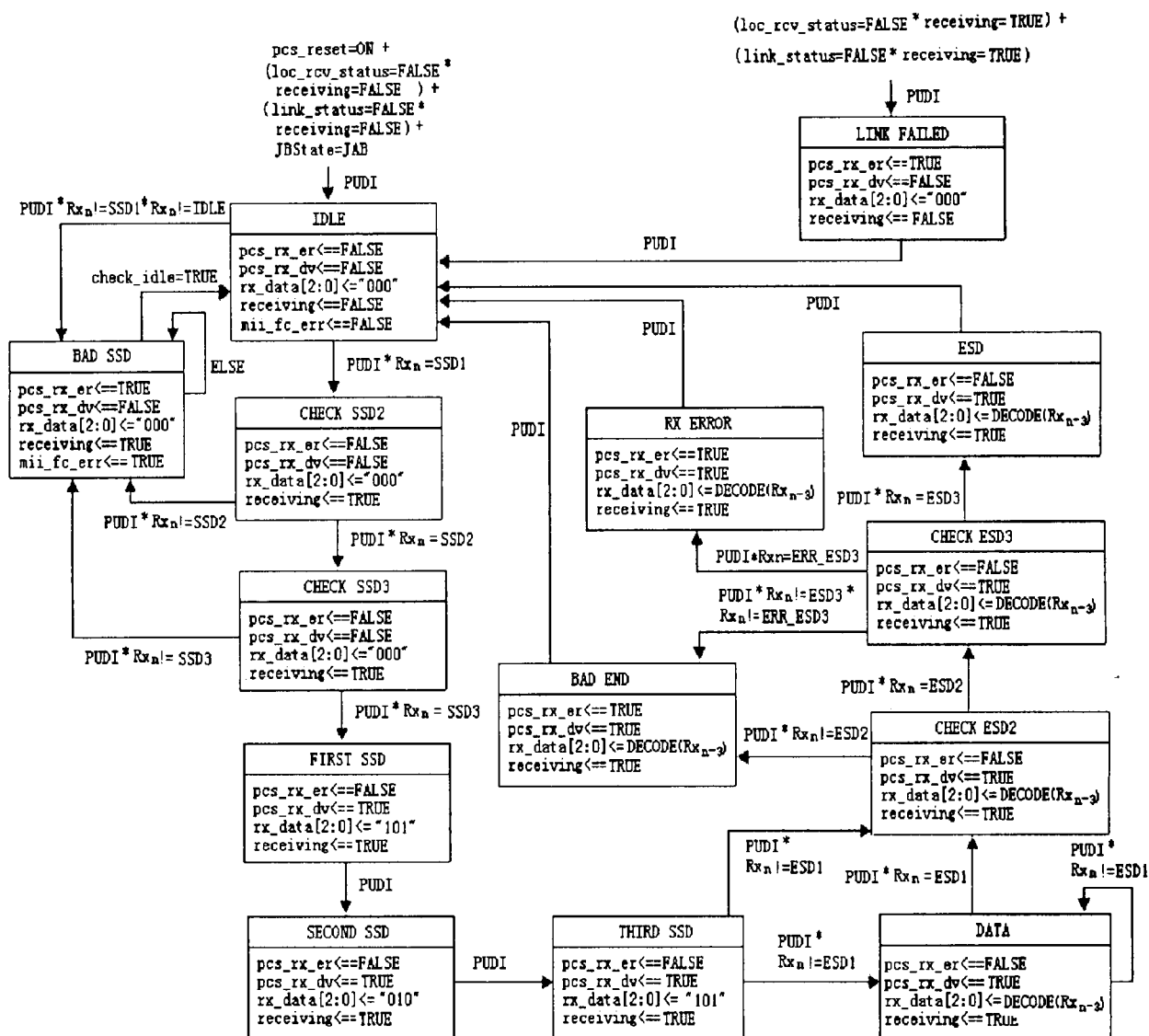


图16 PCS接收功能状态图

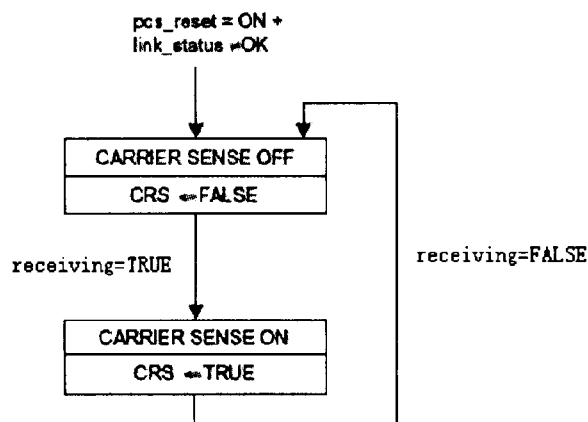


图17 PCS载波监听状态图

5.1.2.6 一些补充说明

图18提供了PCS子层与PMA时间同步关系的资料性说明，时间关系按从左到右的次序。

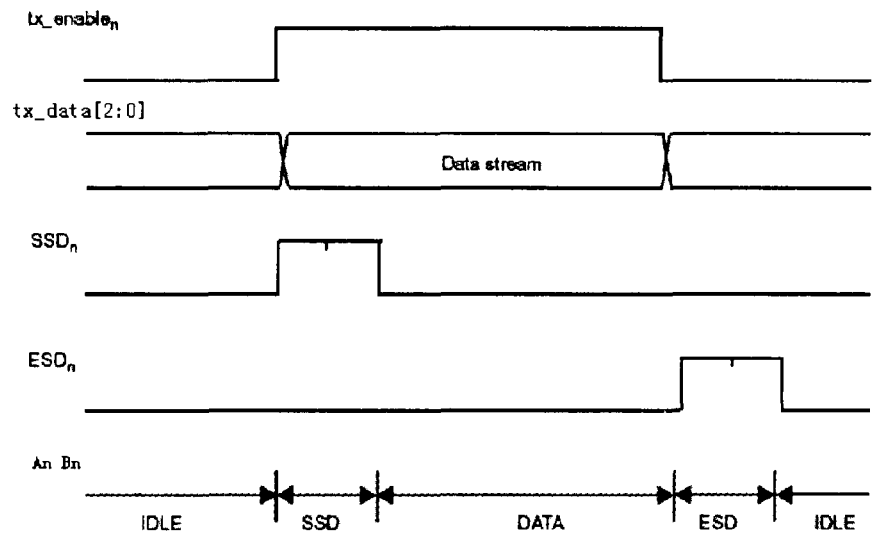


图18 PCS子层与PMA的时间同步关系

5.2 基于 4D-PAM5 编码物理层接口的物理编码子层

基于4D-PAM5编码物理层接口的物理编码子层与1000BASE-T的物理编码子层非常类似, 差别只在于参考时钟不同, 将GMII改为MII, 且不需要考虑载波扩展。具体请见IEEE Std 802.3-2002中的第40章。

6 物理介质连接子层 (Physical Medium Attachment Sublayer)

6.1 基于 2D-PAM3 编码的物理介质连接子层

6.1.1 基于 2D-PAM3 编码的物理介质连接子层概述

PMA通过MDI, 将PMA服务接口的消息映射到双绞线基带介质上去。PMA应包括一个复位功能和5个同步、异步操作功能, 这几个操作功能分别是PMA PHY控制功能、PMA发送功能、PMA接收功能、链路监控功能和时钟恢复功能。这些操作功能应在PMA成功复位后立即开始工作。

图19显示了这几个操作功能与PMA服务接口、MDI的相互关系。

6.1.2 PMA 功能

6.1.2.1 PMA 复位功能

在满足下列条件之一时, 应执行PMA复位功能:

- (1) 上电;
- (2) 接收到管理实体的复位需求。

此时, PMA复位功能应设置 $pcs_reset = ON$ 。

6.1.2.2 PMA 发送功能

PMA发送功能在每一对双绞线上应包括一个独立的产生三级脉幅调制信号(PAM3)的发送器, 在双绞线对BI_DA、BI_DB上同步传送信号。这两个发送器应参考同样的发送时钟PCS_TXCLK。当PMA_CONFIG.indicate指示本地PHY为MASTER, 应使用本地时钟作为发送时钟PCS_TXCLK; 当PMA_CONFIG.indicate指示本地PHY为SLAVE, 应使用恢复时钟作为发送时钟PCS_TXCLK。

PMA发送功能应包括一个复用器, 在使用一对双绞线发送信号时, 将PMA_UNITDATA.request收到的二维向量 tx_symb_vector 转换为两个一维符号, 复用到同一个双绞线对上。如图20所示。

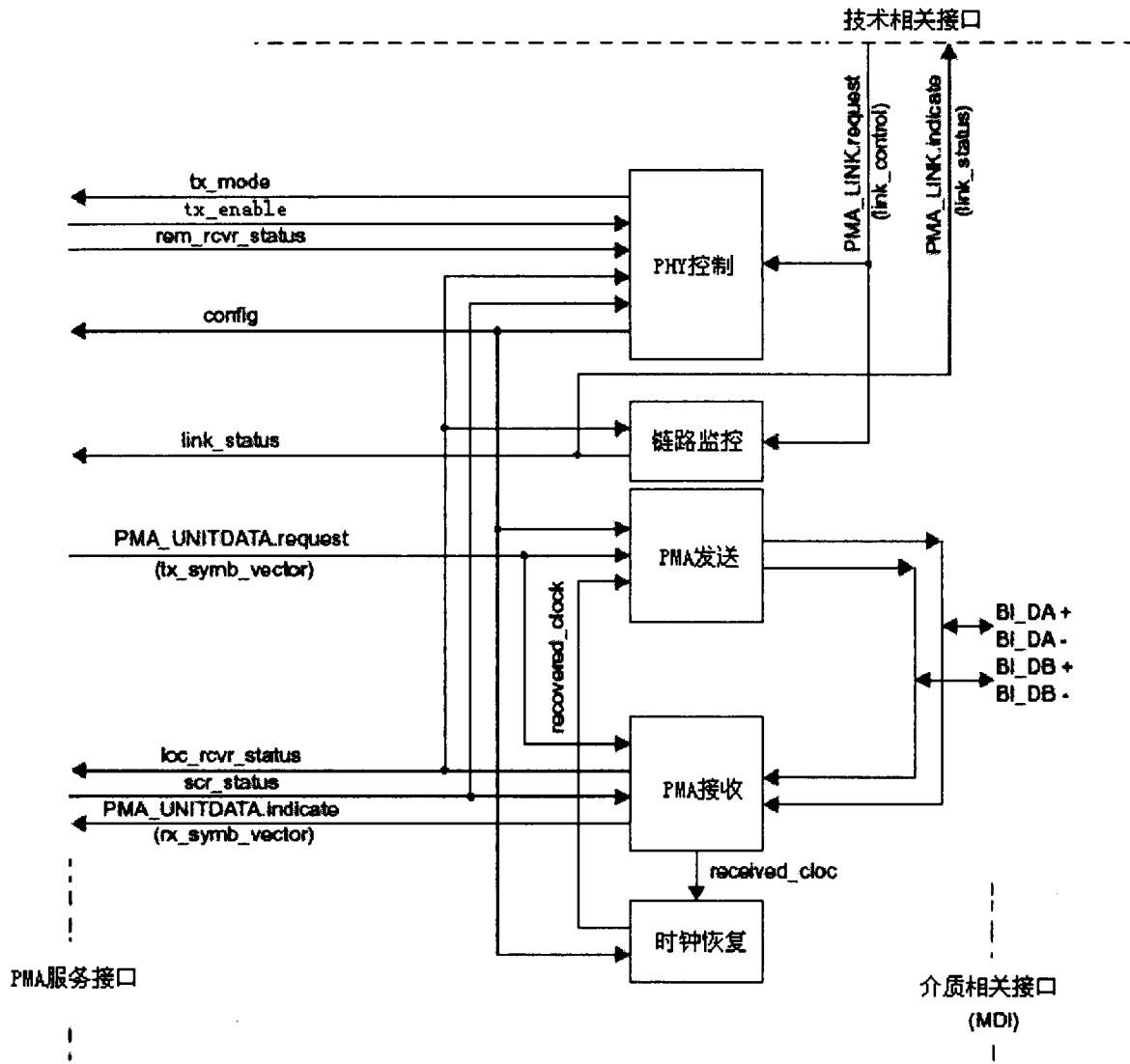


图19 PMA参考图

复用到一对双绞线上

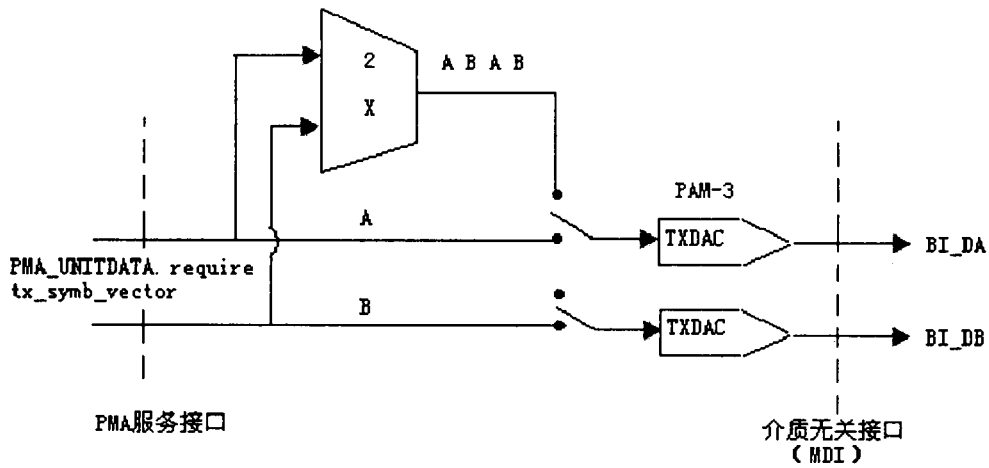


图20 PMA发送功能中的复用器

6.1.2.3 PMA 接收功能

PMA接收功能在每一对双绞线上应包括一个独立的接收器，分别从双绞线对BI_DA、BI_DB上接收三级脉幅调制信号。当PMA电路检测MDI收到三级符号序列，应把它们转换为参数rx_symb_vector (SYMB_2D) 的形式，并通过原语PMA_UNITDATA.indicate传送给PCS子层。

PMA接收的符号错误率应小于 10^{-8} 。为了达到此要求，建议在PMA接收功能实现信号均衡、回波和串扰消除、序列估计等功能。PMA接收功能应根据参数scr_status以及均衡、消除和估计的结果决定接收信号的质量好坏，并以此来设置变量loc_rcvr_status的值。具体的实现方法由实现者自己决定。

PMA接收功能还应包括一个分离器，当只使用一对双绞线接收信号时，将收到的一维符号序列转换为PMA_UNITDATA.indicate原语所要求的二维向量tx_symb_vector形式，再传送给PCS接收功能。如图21所示。

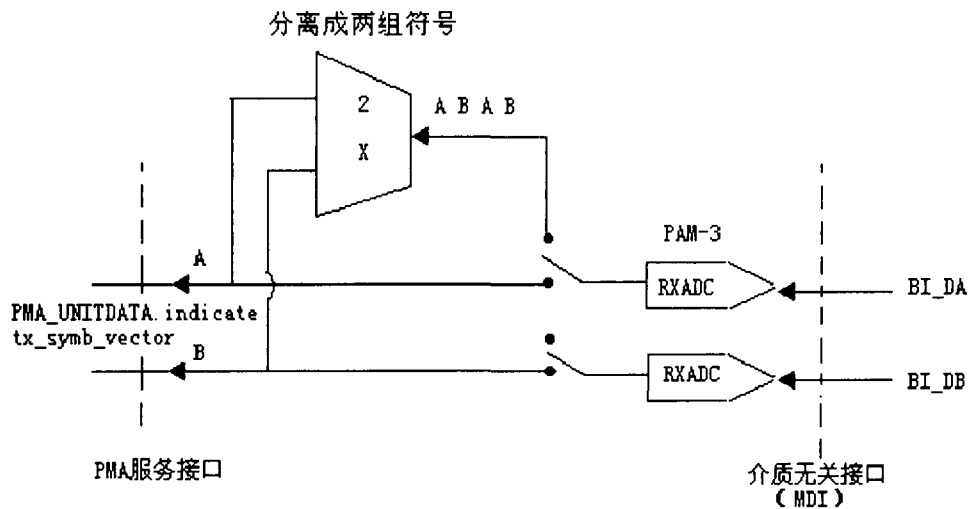


图21 PMA接收功能中的分离器

6.1.2.4 PHY 控制功能

PHY控制功能应能够控制PHY按不同模式操作，与链路对端设备交互信息。如图23所示。

在自协商中，PHY控制初始应处于DISABLE TRANSMITTER状态，此时发送器是禁止的。当自协商过程设置link_control = ENABLE时，PHY控制应进入SLAVE SILENT状态，并启动maxwait定时器，设置tx_mode = SEND_Z来强制发送零序列。在MASTER模式下，PHY控制应立刻进入TRAINING状态；在SLAVE模式下，只有在PHY获取时间、同步解扰器并设置scr_status = OK后，PHY控制才可进入TRAINING状态。

在TRAINING状态下，应启动minwait定时器，并通过设置tx_mode = SEND_I，强制发送空闲模式序列。在成功完成训练后，PCS发送功能应通过传送参数loc_rcvr_status的值知会链路对端设备，同时在本地变量rem_status中保存对端设备参数loc_rcvr_status的值。当minwait定时器超时且loc_rcvr_status = OK时，如果rem_rcvr_status = OK，PHY控制应进入SEND IDLE OR DATA状态，否则应进入SEND IDLE状态。上述两种情况，应禁止maxwait定时器，同时重新启动minwait定时器。

在SEND IDLE OR DATA状态下，PHY控制应设置tx_mode = SEND_N，在有数据发送时正常发送数据；在没有数据发送时发送空闲模式码组。

在SEND IDLE OR DATA或SEND IDLE状态下, 如果接收器检测信号质量不好(设置loc_rcvr_status = NOT_OK), 且minwait定时器超时, PHY控制应进入SLAVE SILENT状态。在SEND IDLE OR DATA状态下, 如果检测到远端PHY出现故障(rem_rcvr_status = NOT_OK), 则PHY控制应进入SEND IDLE状态, 并设置tx_mode = SEND_I, 强制发送空闲模式码组。当远端PHY可以正常操作(rem_rcvr_status = OK), 且minwait定时器超时, PHY控制应重新进入SEND IDLE OR DATA状态。

6.1.2.5 链路监控功能

链路监控功能应监控接收链路的状态, 并通过变量link_status传递相关信息。接收链路故障通常会导致PCS中止正常数据发送过程。图24是链路监控功能的状态图。

当上电或复位时, 自协商应设置link_control = SCAN_FOR_CARRIER, 并向对端发送协商信号。如果接受到对端的协商信号, 自协商应设置link_control = DISABLE, link_status = FAIL, 并与远端设备交换自协商信息。当自协商过程完成时, 应设置link_control = ENABLE; 当双方能够可靠传输时, 应设置link_status = OK, 可以开始正常的数据收发。

6.1.2.6 时钟恢复功能

时钟恢复功能应与每个双绞线对都相连接, 为每一个线对的采样信号提供独立的时钟相位。当训练结束后(loc_rcvr_status = OK), 所得的接收时钟信号应是稳定的、可用的, 并满足符号错误率的要求。接收时钟信号应通过received_clock提供给PMA发送功能。

6.1.3 MDI

6.1.3.1 PHY 发送的 MDI 信号

PMA应把三级符号tx_symb_vector[B1_DA]、tx_symb_vector[B1_DB]分别在双绞线对B1_DA和B1_DB上传输。使用2D-PAM3线路编码方法, PMA发送功能在每个双绞线对上生成如下形式的脉幅调制信号:

$$s(t) = \sum_k a_k h_1(t - kT)$$

其中 a_k 表示在 kT 时刻发送的取值为 $\{-1, 0, 1\}$ 的三级符号, $h_1(t)$ 表示在MDI上的符号响应信号。

当使用一个双绞线对时, 复用器MUX把三级符号tx_symb_vector[B1_DA]和tx_symb_vector[B1_DB]复用到同一个线对上, 对应的脉幅调制信号有如下形式:

$$s(t) = \sum_k a_k h_1(t - k \frac{T}{2})$$

其中 a_k 表示在 $kT/2$ 时刻发送的取值为 $\{-1, 0, 1\}$ 的三级符号, $h_1(t)$ 表示在MDI上的符号响应信号。

6.1.3.2 从 MDI 接收的信号

从MDI接收的每一个线对上的信号可以表示成脉幅调制加噪声干扰的形式, 如下所示:

$$r(t) = \sum_k a_k h_2(t - kT) + w(t)$$

其中 $h_2(t)$ 是整个信道的脉冲响应, $w(t)$ 表示各种噪声源的干扰。PMA接收功能处理双绞线对B1_DA和B1_DB所接收的信号, 分别得到三级符号tx_symb_vector[B1_DA]和tx_symb_vector[B1_DB]。

当使用一个双绞线对时, 发送端把三级符号tx_symb_vector[B1_DA]和tx_symb_vector[B1_DB]复用到同一个线对上, 从MDI接收的信号可以表示成如下形式:

$$r(t) = \sum_k a_k h_2(t - k \frac{T}{2}) + w(t)$$

PMA接收功能应处理在该双绞线对所接收的信号，得到对应的三级符号tx_symb_vector[BI_DA]和tx_symb_vector[BI_DB]。

6.1.4 对符号 A_n 的自动识别

PCS发送功能应将每3个比特映射为二维三级符号向量 (A_n 和 B_n)。当在两对双绞线上传输时，BI_DA和BI_DB同步发送符号 A_n 和 B_n ，接收时应区分出哪个线对传输 A_n 信号；在一对双绞线上传输时， A_n 和 B_n 符号被复用到一根线对上交替传输，在接收时应区分出哪个符号是 A_n 。

在空闲 (IDLE) 模式下，对应的3比特数据流由旁流扰码器生成，此时 $Sdn[0]=Scrn[0]$ 。按照表2的空闲模式编码规则，当 $Sdn[2:0]$ 最右边的比特 $Sdn[0]$ 为0时，符号A取值1或-1；否则，A取值0。这种规则下，在接收端通过符号 A_n 应可以得到比特 $Sdn[0]$ 的值，进而得到 $Scrn[0]$ 的值，反馈到接收解扰器位移寄存器中，就可以同步接收端解扰器了。如图22所示。

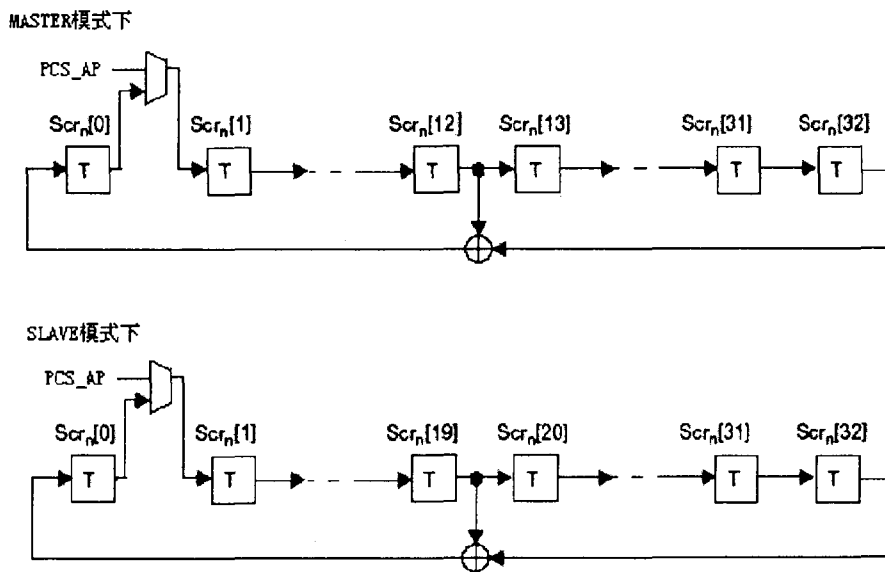


图22 在接收端同步解扰器

其中，PCS_AP的定义如下：

$$PCS_AP = \begin{cases} 1 & \text{符号取值0} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

每个符号周期，应把 $Scrn[0]$ 与PCS_AP作比较。如果在指定的时间范围内都相同，就说明解扰器已经同步了。当两者不相同，令 $Scrn[0]=PCS_AP$ ，这样经过一段时间后将达到同步状态。

基于同样的规则，使用试错法就可以在接收信号中把符号序列 A_n 区分出来。在两对双绞线传输的情况下，首先假设 A_n 信号在线对BI_DA上接收，如果在规定的足够长的时间内解扰器同步了，说明判断是正确的， A_n 信号是在线对BI_DA上接收的；否则， A_n 信号一定是在BI_DB上接收的。在一对双绞线传输的情况下，首先假设信号在线对上按A、B、A、B、……次序接收，如果在一段时间内解扰器同步了，说明判断是正确的，信号在线对上是按A、B、A、B、……次序接收的；否则，信号一定是按照相反次序接收的。

6.1.5 状态变量

6.1.5.1 状态图变量

6.1.5.1.1 config

PMA_CONFIG.indicate原语中的config参数，可以取值MASTER或SLAVE。

6.1.5.1.2 link_control

PMA_LINK.request原语中的link_control参数，具体定义见IEEE Std 802.3-2002中的28.2.6.2。

6.1.5.1.3 link_status

具体定义见IEEE Std 802.3-2002中的28.2.6.1。

6.1.5.1.4 loc_rcvr_status

PMA_RXSTATUS.indicate原语中的loc_rcvr_status参数，指示本地接收链路是否工作正常。可以取值OK或NOT_OK，由PMA接收功能传递给PCS。

6.1.5.1.5 pma_reset

由PMA复位功能使用，允许复位PMA所有功能，可以取值ON或OFF。

6.1.5.1.6 rem_rcvr_status

由PCS接收功能生成的rem_rcvr_status参数，指示远端PHY的接收链路是否正常工作，可以取值OK或NOT_OK。

6.1.5.1.7 scr_status

PMA_SCRSTATUS.request原语中的scr_status参数，指示解扰器是否同步，可以取值OK或NOT_OK。

6.1.5.1.8 tx_enable

由PCS发送功能生成的tx_enable参数，可以取值TRUE或FALSE。

6.1.5.1.9 tx_mode

PMA_TXMODE.indicate原语中的tx_mode参数，可以取值SEND_Z、SEND_I或SEND_N，由PMA PHY控制功能传递给PCS。

6.1.5.1.10 bit_time

发送每一个比特的持续时间。

6.1.5.1.11 symbol_time

PCS向PMA发送一个二维符号的持续时间，等于 $3 \times \text{bit_time}$ ，例如在100Mbit/s情况下为30ns，在10Mbit/s情况下为300ns。

6.1.5.2 定时器

6.1.5.2.1 maxwait_timer

用来限制接收器在SLAVE SILENT和TRAINING状态停留时间的定时器。当config=MASTER时，其超时时间为 $(93.75 \pm 1.25) \times 106 \times \text{symbol_time}$ ；当config=SLAVE时，其超时时间为 $(43.75 \pm 0.625) \times 106 \times \text{symbol_time}$ ；该定时器被PHY控制状态和链路监控状态共同使用，当它超时且loc_rcvr_status为NOT_OK时，链路监控将链路状态(link_status)设置为FAIL。

6.1.5.2.2 minwait_timer

用来规定PHY控制在TRAINING、SEND IDLE或SEND DATA等状态需要停留的最短时间的定时器。该定时器在重起后 $(125 \pm 12.5) \times \text{symbol_time}$ 超时。

6.1.5.2.3 stabilize_timer

用来规定在设置loc_rcvr_status = OK多少时间后，链路才会UP的定时器。该定时器在重起后 $(125 \pm 12.5) \times \text{symbol_time}$ 超时。

6.1.6 状态图

PHY控制状态图和链路监控状态图如图23和24所示。

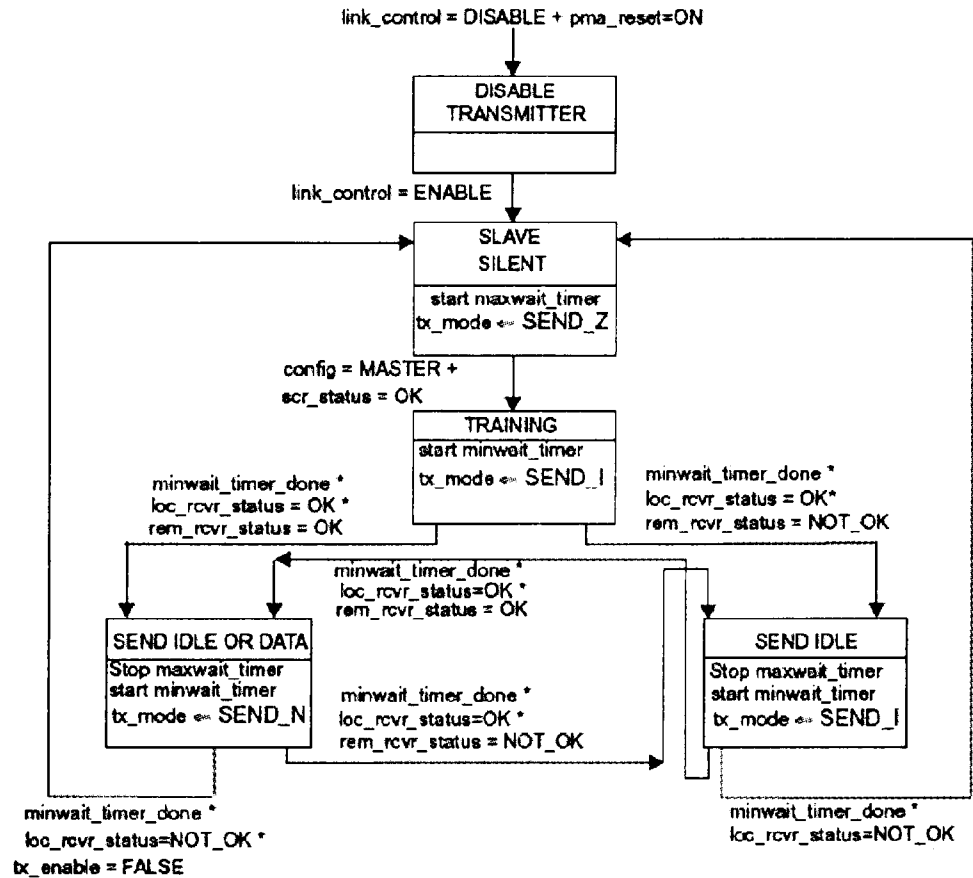


图23 PHY控制状态图

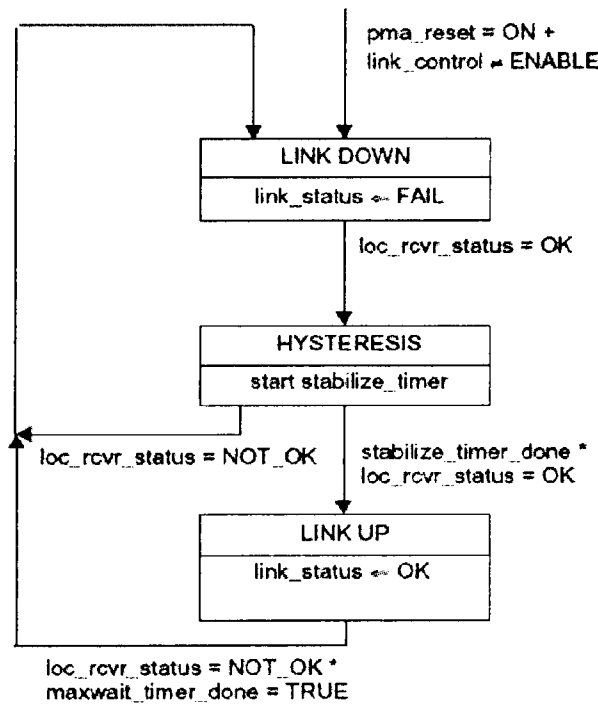


图24 链路监控状态图

6.2 基于 4D-PAM5 编码的物理介质连接子层

基于4D-PAM5编码物理层接口的物理介质连接子层与1000BASE-T的物理介质连接子层非常类似，主要差别在于参考时钟不同。具体请见IEEE Std 802.3-2002中的40.4。

7 管理功能与链路协商功能

7.1 链路发现信令（Link Discovery Signaling, LDS）

7.1.1 概述

距离增强型以太网收发器（PHY）支持在1、2或4对500m双绞线上以10Mbit/s/100Mbit/s的速率全双工传输数据。当上电、复位或用户干预时，同一链路上的两台设备应进行链路协商，交换信息并自动配置，最大程度地利用各自的能力。不同于IEEE 802.3-2002第28章所使用的快速连接脉冲（Fast Link Pulse, FLP），距离增强型以太网使用链路发现信令（LDS）来完成链路协商的功能。它应完成以下功能：

- （1）MASTER/SLAVE关系的确定；
- （2）估计线缆长度；
- （3）确定有效双绞线对数以及线对次序；
- （4）确定链路两端都支持的最大工作能力。

7.1.2 信号

LDS信令方案使用1.25MHz信号来传递信息。在初始阶段，应发送频率为1.25MHz的单音脉冲，如图25所示，每组单音脉冲的持续时间为1.6376ms，两组脉冲之间的静音时间为14.3624ms，信号的占空比约为10%。对仅支持IEEE 802.3自协商技术的设备，根据IEEE 802.3-2003中14.3.1.3.2的规定，当收到这种频率小于2MHz的信号，应直接丢弃。如果设备支持LDS信令，在接收到单音脉冲之后，应进入随后的信号交换阶段。如图26所示，此时LDS信令的每组信号包含2047个脉冲，由前面的1023个单音脉冲以及随后的1024个数据脉冲组成，单音脉冲用于接收到同步信号，而每一个数据脉冲用来编码一个比特，其持续时间为800ns，上升沿与下降沿的时间都为5ns。这2047个脉冲的持续时间总共是1.6376ms，两组脉冲之间的静音时间为14.3624ms，信号的占空比约为10%。LDS信号应连续发送，接收端可以确定每一个脉冲位置以及两端信号的频率偏差，从而得到编码数据。

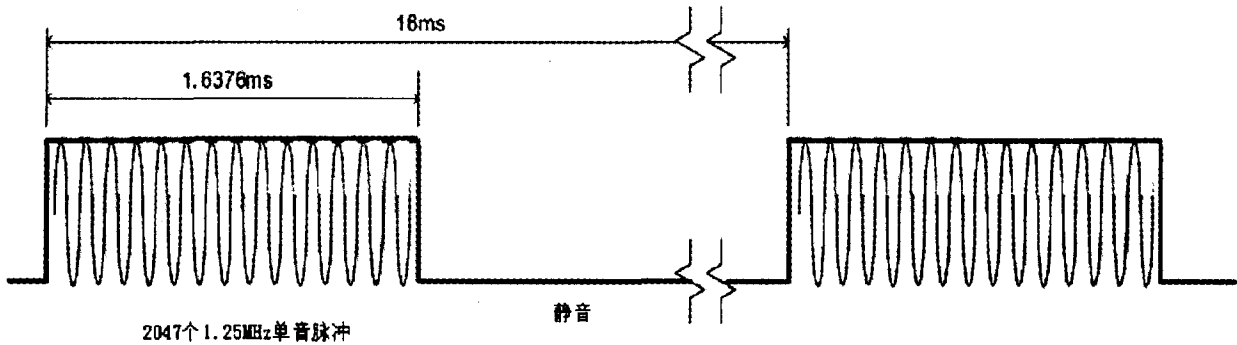


图25 LDS信号—单音脉冲

7.1.3 LDS 协议

当上电或复位时，应随机选择一对双绞线上的发送器连续发送1.25MHz的单音脉冲信号，该线对只发不收，而其他线对不发送信号，只是监听对端的连接脉冲信号。同时启动定时器scan_timer，当定时器超时且没有接收到1.25MHz信号时，应切换到另一个双绞线上发送单音脉冲信号，监听其他线对。这样循环

下去,直到某个线对接收到对端的连接脉冲信号为止,进入下一状态。当接收到IEEE std 802.3中规定的FLP脉冲、NLP脉冲、MLT-3 IDLE信号或100BASE-T4信号时,应将链路协商控制传递给IEEE 802.3自协商功能。

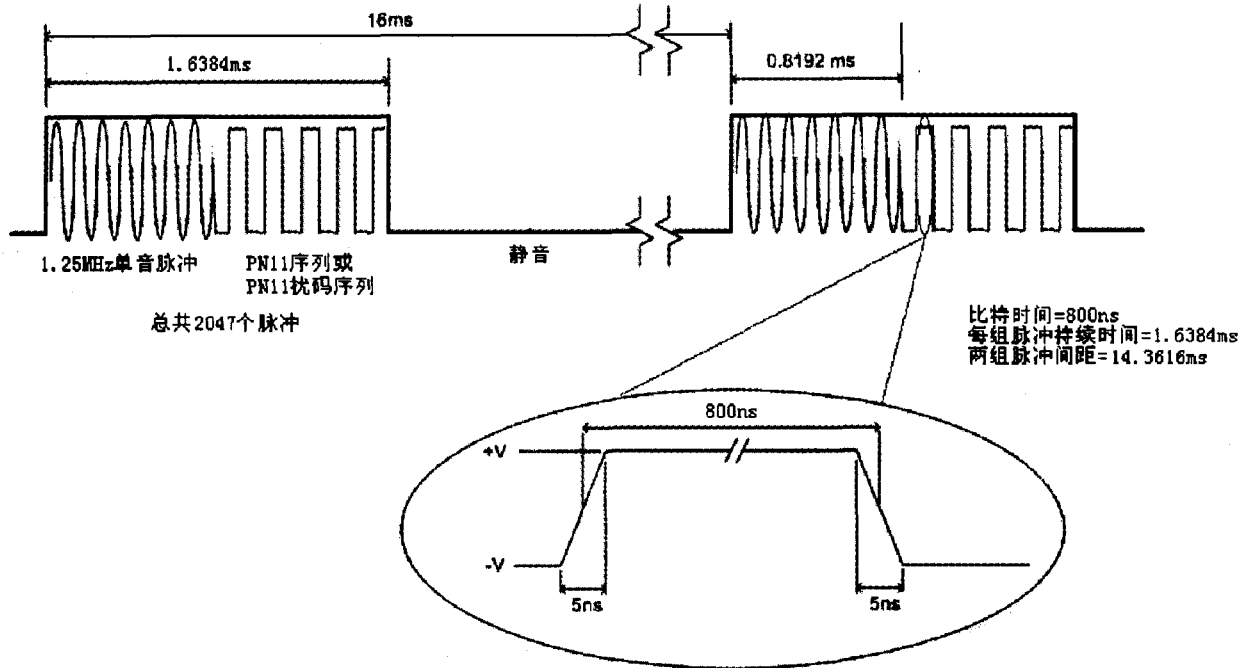


图26 LDS信号—PN11序列或PN11扰码序列

当一端首先检测到远端的1.25MHz单音脉冲信号时,应将本端设为MASTER,所有双绞线对上的发送器开始发送伪随机噪音序列MASTER PN-11。这个序列由一个11位寄存器的扰码器实现,如图27所示。

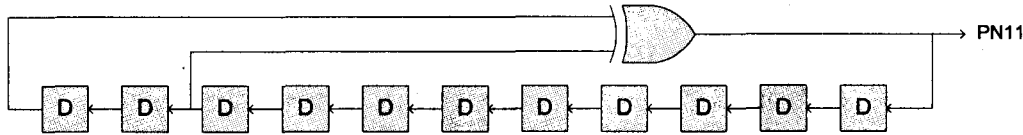


图27 MASTER PN-11序列生成器

另一端如果收到对端的MASTER PN-11脉冲信号,应将自身设为SLAVE。所有双绞线对上的发送器开始发送伪随机噪音序列SLAVE PN-11。这个序列由一个11位寄存器的扰码器实现,如图28所示。

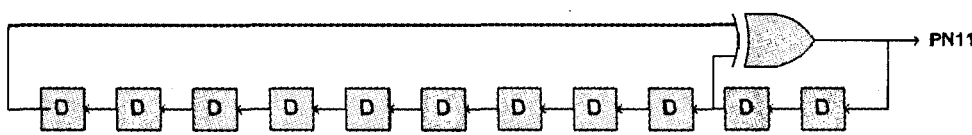


图28 SLAVE PN-11序列生成器

如图29所示,MASTER PN-11序列生成器与SLAVE PN-11序列生成器被配制成自同步扰码器/解扰器,其特点是解扰器当前寄存器的前几位取值恰好是扰码器最近发送的比特,因此在成功接收到任意11个比特数据后,就可以达到同步状态。此时对于输入序列X,在发送端经扰码后发送,在接收端解扰后可得到同一个序列。

当检测到对端的SLAVE PN-11脉冲信号后,MASTER应估计线缆长度,不要求非常精确,满足误差在范围 $\pm 20\%$ 内即可;并将所估计的长度以64-bit长度帧的重复模式经MASTER PN-11序列生成器扰码后发给SLAVE。长度帧模式如图30所示,其中长度字段的12个无符号比特代表线缆长度,parity是这12个比特的偶数校验位。当长度字段中比特1的个数为奇数时,parity取值为1;否则parity取值为0。

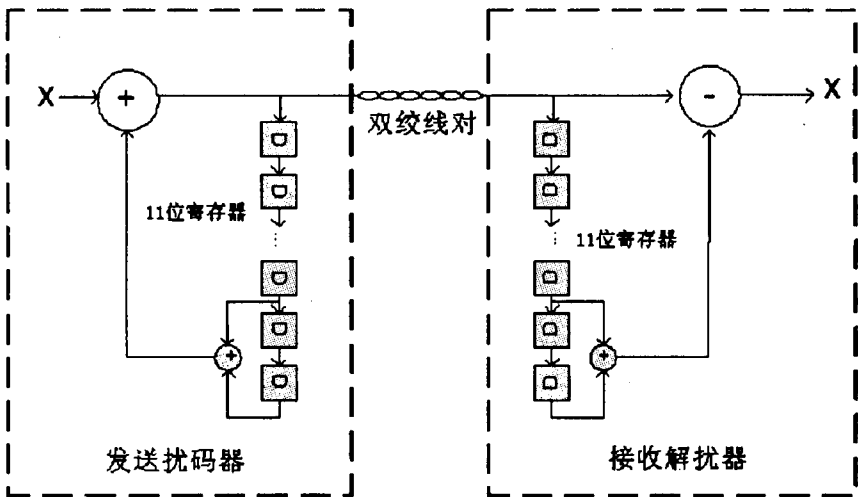


图29 自同步扰码/解扰器

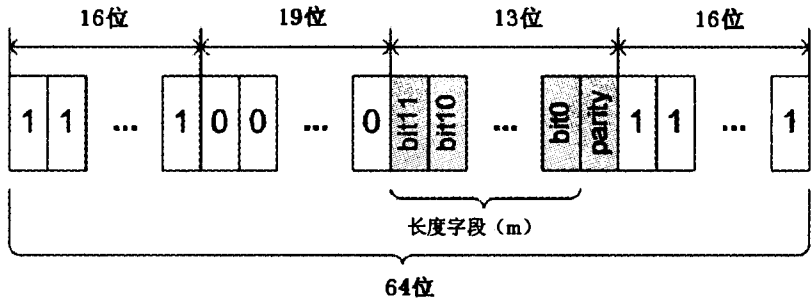


图30 64比特长度帧模式

SLAVE检测到MASTER发出长度帧后，应在每个双绞线对上编码各自的线序信息，并以重复模式连续发送。线对A、B、C和D的线序信息分别为0001、0011、0111和1111，对应的重复数据模式如图31所示。这种重复数据应由SLAVE PN-11序列生成器扰码后发出，用于指示SLAVE的线对次序。MASTER由此就可以确定有效线对个数并调整线对次序。

```
0001000100010001 ..... 线对A
0011001100110011 ..... 线对B
0111011101110111 ..... 线对C
1111111111111111 ..... 线对D
```

图31 不同线对上的线序编码序列

链路两端还应通告各自的工作能力，能力帧的模式如图32所示。能力帧长度为83bit，其中能力域包含16个比特，后跟一个偶数校验位。当能力域字段中比特1的个数为奇数时，parity取值为1；否则parity取值为0。本端能力域编号和远端能力域编号各包含8个比特，其中255表示无效编号，所以最多可以有255个不同的工作能力。能力域编号0代表缺省能力，其定义如表4所示。能力域编号1~255是可选的，可以为用户所定义。ACQ位指示是否成功接收到了远端能力域编号所代表的对端的工作能力，其中成功接收的含义是在所接收能力帧的重复模式中，至少有3个帧是相同的且无奇偶校验错。能力帧经MASTER PN-11或SLAVE PN-11序列生成器扰码后发出。

如果一端具有多个能力域，应首先发送编号大的能力帧，再依次发送编号小的能力帧，最后发送编号0的能力帧。当本端确定成功接收了远端的编号0能力帧，并检测到远端也成功接收了本端发送的编号0能力帧时，应禁止本端的发送器，并将控制权交给启动阶段。

表4 能力域0的定义

位表示	技术能力 (1=enable, 0=disable)
0	保留
1	1 Pair, 10 Mbit/s
2	2 Pair, 10 Mbit/s
3	2 Pair, 100Mbit/s
4	4 Pair, 100Mbit/s
5	1 Pair, 100Mbit/s
6~15	保留

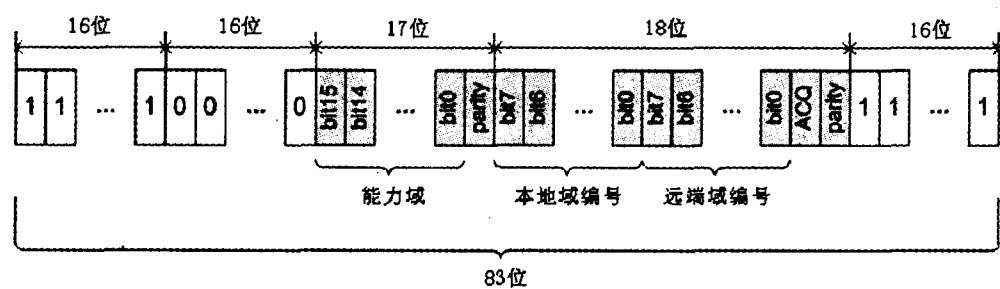


图32 83比特能力帧数据模式

如果本端不支持LDS，应丢弃收到的LDS信号。如果本端既支持LDS也支持IEEE std 802.3-2002的自协商方式，当收到FLP脉冲、NLP脉冲、MLT-3 IDLE信号或100BASE-T4信号时，应将链路协商控制传递给IEEE 802.3自协商功能。

详细的操作流程请参考7.1.4，LDS协议状态转换。

7.1.4 LDS 协议状态转换

7.1.4.1 定时器

7.1.4.1.1 scan_timer

在BEACON状态下，用来切换线对发送1.25MHz单音信号的定时器，在超时后立刻重起；该定时器的超时时间每次从集合{ 64ms, 80ms, 96ms, 112ms, 128ms}中随机选取。

7.1.4.1.2 tx_disable_timer

用来规定在TX DISABLE状态可以停留的最长时间，该定时器的超时时间每次从集合{ 200ms, 208ms, 216ms, 224ms, ..., 488ms, 496ms}中随机选取。

7.1.4.1.3 burst_wait_timer

用来规定在M/S RESOLUTION状态、LENGTH ESTIMATE状态、PAIR BURST状态以及ABILITY、EXCHANGE状态可以停留的最长时间，该定时器的超时时间为300ms。

7.1.4.1.4 link_check_timer

用来规定在LINK CHECK状态下LINK-UP信号的最长等待时间，该定时器的超时时间为3325ms±125ms。

7.1.4.2 LDS 状态描述

LDS协议状态转换关系见表5。

表5 LDS协议状态转换关系

状态名称	功能描述
I.IDLE状态	1) 当上电、复位或重新启动 LDS 时, 应进入此状态; 2) 当使能 LDS 时, 应切换至 TX DISABLE 状态
II.TX DISABLE状态	1) 启动定时器 tx_disable_timer, 关闭各线对的发送功能, 使能该线对接收功能; 2) 当检测到 1.25MHz 的单音脉冲信号, 应切换至 M/S RESOLUTION 状态; 3) 当定时器 tx_disable_timer 超时, 应切换至 BEACON 状态; 4) 当本端被强制设置为 MASTER 时, 应切换至 M/S RESOLUTION 状态
III.BEACON状态	1) 使能定时器 scan_timer, 并依次选择一个线对发送单音信号, 其他线对监听对端的连接信号; 2) 当线对检测到远端的单音脉冲信号, 应将本端所有线对发送器的发送时间调整至所接收单音脉冲信号结束后 6ms 的时刻, 并切换至 M/S RESOLUTION 状态; 3) 如果本端同时也支持 IEEE 802.3 自协商方式, 当收到远端的 FLP 脉冲、NLP 脉冲、MLT-3 IDLE 信号或 100BASE-T4 信号时, 应切换至 LRE DISABLE 状态
IV.M/S RESOLUTION状态	1) 当检测到远端的单音脉冲信号或本端被强制为 MASTER 时, 应设置本端 PHY 为 MASTER; 并开始发送 MASTER PN-11 伪随机噪声序列信号; 并启动定时器 burst_wait_timer; 2) 当检测到远端的 MASTER PN-11 伪随机噪声序列信号, 应设置本端 PHY 为 SLAVE; 并开始发送 SLAVE PN-11 伪随机噪声序列信号; 并启动定时器 burst_wait_timer; 3) 当 MASTER 检测到对端的 SLAVE PN-11 信号, 应切换至 LENGTH ESTIMATE 状态; 4) 当 MASTER 检测到对端的 MASTER PN-11 信号, 说明发生 M/S 冲突, 应切换至 TX DISABLE 状态; 5) 当 SLAVE 检测到 MASTER 发来的长度帧, 应切换到 PAIR BURST 状态; 6) 当 SLAVE 检测到对端的 SLAVE PN-11 信号, 说明发生 M/S 冲突, 应切换至 TX DISABLE 状态; 7) 当定时器 burst_wait_timer 超时, 切换至 TX DISABLE 状态
V.LENGTH ESTIMATE状态	1) 应估计线缆长度, 编码并发送经 PN-11 扰码的长度帧; 2) 重新启动定时器 burst_wait_timer; 3) 应监听 SLAVE 发送的线对重复模式信号, 从而确定线对个数并调整线对次序; 4) 当调整完线对次序后, 应切换至 ABILITY EXCHANGE 状态; 5) e) 当定时器 burst_wait_timer 超时, 应切换至 TX DISABLE 状态
VI.PAIR BURST状态	1) 每一个线对应生成本线对对应的重复模式, 经 PN-11 扰码后发送出去; 2) 重新启动定时器 burst_wait_timer; 3) 当收到 MASTER 发送的能力帧, 应切换至 ABILITY EXCHANGE 状态; 4) 当定时器 burst_wait_timer 超时, 应切换至 TX DISABLE 状态
VII.ABILITY EXCHANGE状态	1) 发送本端能力帧; 2) 接受对端的能力帧; 3) 确认收到的远端能力域编号; 4) 重新启动定时器 burst_wait_timer; 5) 如果本端的能力域编号 0 被确认, 且已收到了远端的能力帧, 应切换至 TX FINAL ACK 状态; 6) 如果本端与远端的能力域编号 0 都被确认, 应切换至 LINK CHECK 状态; 7) 当定时器 burst_wait_timer 超时, 应切换至 TX DISABLE 状态
VIII.TX FINAL ACK 状态	1) 向对端发送 3~6 个远端能力域编号 0 确认帧; 2) 发送完确认帧后, 应切换至 LINK CHECK 状态
IX.LINK CHECK状态	1) 应禁止本端的发送器, 并将控制权交给启动阶段; 2) 启动定时器 link_check_timer, 等待 link-up 信号; 3) 当检测到 link-up 信号, 应切换至 LINK GOOD 状态; 4) 当定时器 link_check_timer 超时, 应切换至 TX DISABLE 状态

表 5 (续)

状态名称	功能描述
X.LINK GOOD状态	1) LDS 结束, 开始正常数据收发; 2) 如果 link-down, 应切换至 TX DISABLE 状态
XI.LRE DISABLE状态	1) 应将链路协商控制传递给 IEEE 802.3 自协商功能; 2) 当链路协商成功, 应切换到 IEEE 802.3 自协商的 FLP LINK GOOD 状态; 3) 当 IEEE 802.3 自协商过程迁移到 TRANSMIT DISABLE 状态时, 应重新切换到 TX DISABLE 状态
XII.FLP LINK GOOD状态	当 IEEE 802.3 自协商过程迁移到 TRANSMIT DISABLE 状态时, 应重新切换到 TX DISABLE 状态

7.1.4.3 LDS 状态图

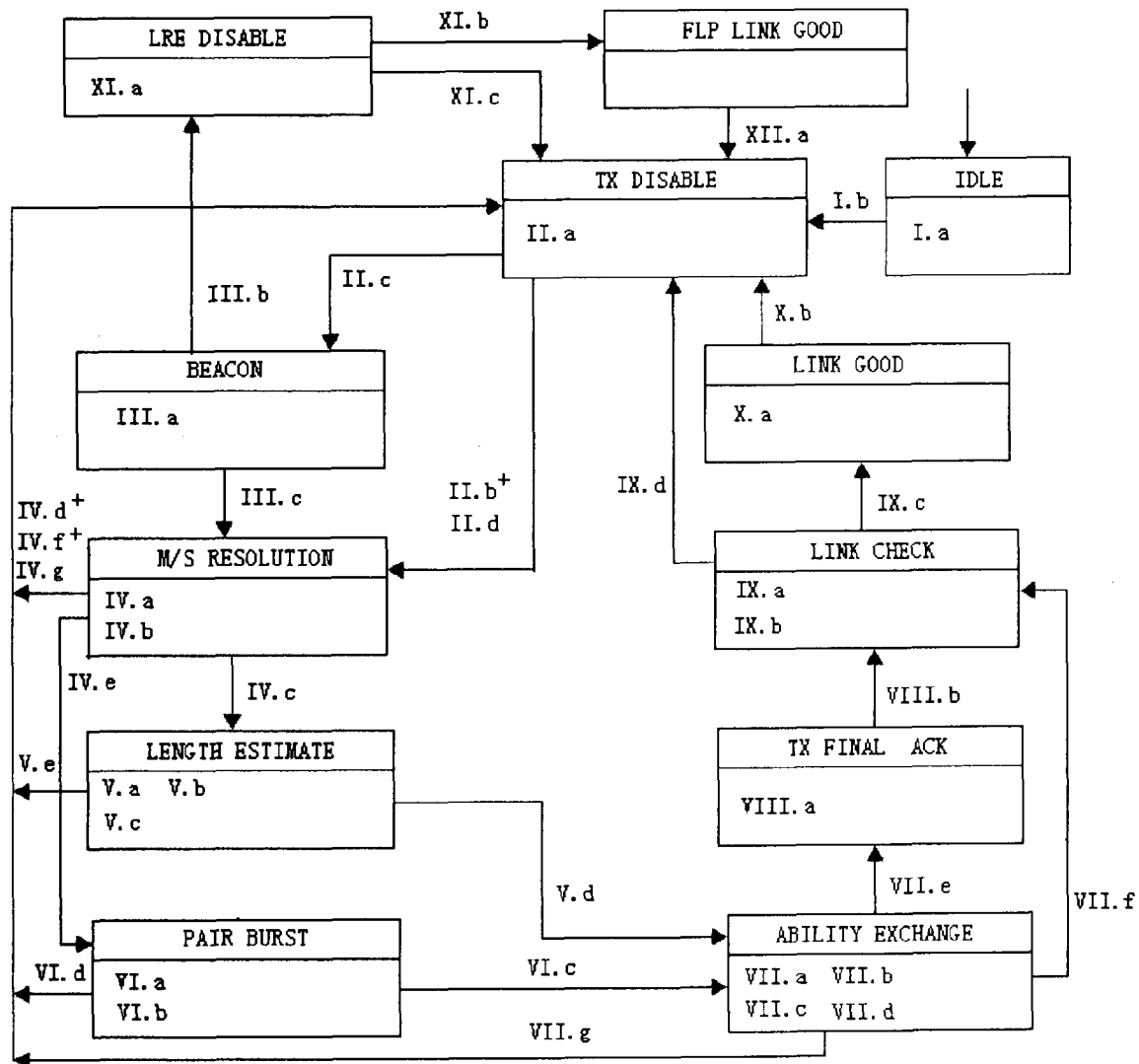


图33 LDS状态图

7.2 仲裁功能 (Arbitration Function)

7.2.1 重协商功能

重协商是指管理代理等其他实体可以指示仲裁功能禁止PMA工作, 暂停发送数据, 重新启动LDS的过程。

7.2.2 优先级解析功能

当本地与对端设备存在多个共同的技术能力时，LDS应使用优先级解析功能来选择一个工作模式。该功能预先指定一个所支持能力的优先级次序，通过寻找最大共同点（highest common denominator）的方法，得到本地与对端同时支持的最大技术能力。

LDS应将技术能力域0中指定的各种工作能力，按照从高到底的优先级次序排列，如下述列表所示：

- (1) 4对线，100Mbit/s；
- (2) 2对线，100Mbit/s；
- (3) 1对线，100Mbit/s；
- (4) 2对线，10Mbit/s；
- (5) 1对线，10Mbit/s。

在估计线缆长度、检测有效线对个数之后，LDS应按照如下的优先级解析表来确定最终的协商结果。

表6 LDS优先级解析表

有效线对个数 \ 线缆长度	< 100m	< 300m	300~500m	500~700m
4对线	4对线，100Mbit/s	4对线，100Mbit/s	4对线，100Mbit/s	不支持
2对线	2对线，100Mbit/s	2对线，100Mbit/s	2对线，10Mbit/s	2对线，10Mbit/s
1对线	1对线，100Mbit/s	1对线，10Mbit/s	1对线，10Mbit/s	不支持

如表6所示，当使用100Mbit/s速率时，选用5类电缆应可保证传输距离；当使用10Mbit/s速率时，选用5类或非5类电缆都应可保证传输距离。当确定工作能力，但链路不能UP时，应可以降低工作能力，继续检测link_up信号。具体地，能力4对线、100Mbit/s可以降低为能力2对线，10Mbit/s；能力2对线、100Mbit/s可以降低为能力2对线，10Mbit/s。

7.3 管理功能

仿照IEEE std 802.3-2002中28.2.4的相关规定，LDS也应定义相应的控制寄存器、状态寄存器、能力通告寄存器和对端能力寄存器。具体规定见附录A。

8 PMA 电气特性

8.1 电气隔离与电磁兼容性要求

物理层接口应保证端口设备电路与MDI引线间的电气隔离，要求至少满足如下的一种电气强度测试：

- (1) 1500 V rms/50~60Hz，60s，满足IEC 60950-1-2001中5.3.2的规定；
- (2) 2250 VDC/60s，满足IEC 60950-1-2001中5.2.2的规定；
- (3) 10个极性变化且间隔不少于1s的2400V脉冲序列，这些脉冲的宽度为1.2/50μs，满足IEC 60950-1-2001中附录N的规定。

测试过程中电气隔离应不被破坏。

包含距离增强型以太网物理层接口的系统应满足EN61000-4-6（不大于80MHz时）与EN61000-4-3中（大于80MHz时）电磁兼容性测试的要求，并满足CISPR/FCC所规定的A类辐射要求，分别见IEC/CISPR 22-2006和FCC Docket 20780-1980（Part 15）。

8.2 测试模式

本节定义的测试模式用于测试发送器波形、失真、抖动以及压降。这些测试模式应只向发送器电路提供数据符号，而不能改变发送器与接收器在正常操作时的电气和抖动特性。可通过设置一个3比特控制寄存器来使能相应测试模式，见表7。

表7 测试模式控制寄存器

寄存器			测试模式
0	0	0	正常模式
0	0	1	模式1 — 发送压降测试
0	1	0	模式2 — MASTER模式下的发送抖动测试
0	1	1	模式3 — SLAVE模式下的发送抖动测试
1	0	0	模式4 — 发送器失真测试
1	0	1	模式5 — 最大功率下的正常操作测试（用于PSD模板与功率电平测试）
1	1	0	保留，未定义
1	1	1	保留，未定义

当使能测试模式1时，PHY应发送由连续8个+1和连续8个-1组成的序列，并连续不断地发送。

当使能测试模式2时，PHY应按照MASTER模式下符号发送时钟，在每一个有效的双绞线对上连续发送符号序列{+1，-1}。

当使能测试模式3时，PHY应按照SLAVE模式下符号发送时钟，在每一个有效的双绞线对上连续发送符号序列{+1，-1}。

当使能测试模式4时，PHY应按照如下映射方式发送符号序列：

与扰码生成多项式 $g_{s1} = 1 + x^9 + x^{11}$ 对应的位移寄存器长度为11，时刻 n 时寄存器中的比特用Scrn[0:10]表示。每一个符号周期，位移寄存器右移一个比特，比特Scrn[8]与Scrn[10]做异或（XOR）产生新的Scrn[0]。比特序列X0n，X1n，X2n则通过如下公式产生：

$x_{0n} = \text{Scrn}[0];$

$x_{1n} = \text{Scrn}[1] \wedge \text{Scrn}[4];$

$x_{2n} = \text{Scrn}[2] \wedge \text{Scrn}[4].$

根据序列X0n、X1n、X2n的取值，按照表8可以完成到发送符号的映射。

表8 测试模式4的符号映射表

比特序列			发送符号	
x2n	x1n	x0n	2D-PAM3	4D-PAM5
0	0	0	0	0
0	0	1	1	1
0	1	0	0	2
0	1	1	-1	-1
1	0	0	0	0
1	0	1	1	1
1	1	0	0	-2
1	1	1	-1	-1

通过表8得到的符号序列在所有的发送器上同步发送，这些发送器应使用MASTER模式下的发送时钟。

当使能测试模式5时, PHY应发送一个2D-PAM3的随机符号序列, 用于检测发送器与发送功率谱密度模板以及发送功率电平的兼容性。

8.3 测试设备

应使用图34、图35中所示设备或与之功能相同的其他设备来测量发送器的性能指标。

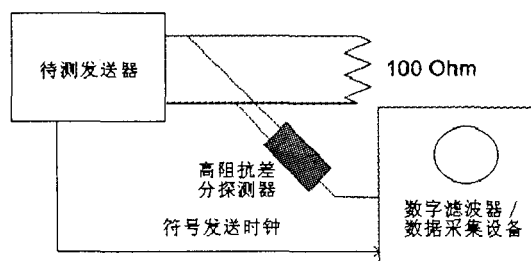


图34 测试设备1, 用于测试发送器压降、抖动和PSD模板

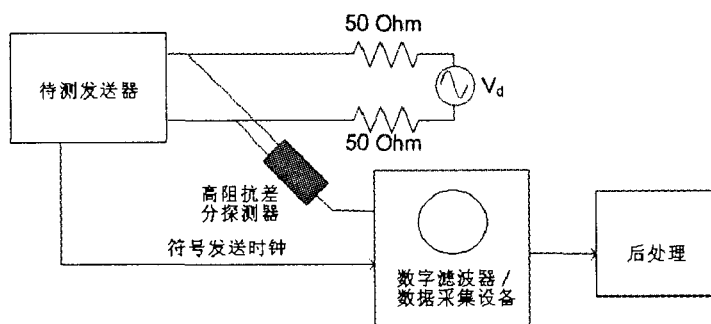


图35 测试设备2, 用于测试发送器失真

为了测量在MASTER和SLAVE模式下的发送抖动, PHY应能够对外提供发送时钟输出以测试符号发送。

在待测发送器上测量的干扰信号 V_d 的差分振幅为 $2V_{ppd}$, 其频率与测试信号的1/6采样率同步。干扰信号发生器应有足够的线性和界限, 在与发送器输出连接时不应引入可察觉的失真。

8.4 发送器电气特性

8.4.1 发送器电气特性概述

PMA应交流耦合到MDI。这里不规定负载, 但应满足每个发送器输出连接到 100Ω 差分阻抗的要求。

8.4.2 发送器输出压降

在测试模式1下, 使用测试设备1来测量发送器时, 根据相邻两个零交叉位置上初始电压峰值与结束时的电压值来计算压降, 如图36所示, 正负压降的幅度应小于表9所列的数值。

表9 不同工作模式下的压降允许值

工作模式	压降
10Mbit/s, 1对线	53%
10Mbit/s, 2对线	78%
100Mbit/s, 1对线	7%
100Mbit/s, 2对线	14%
100Mbit/s, 4对线	33%

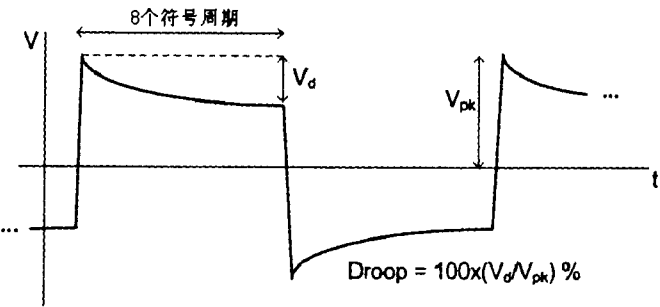


图36 测试模式1下的压降计算方法

8.4.3 发送器失真

使能测试模式4，在无电缆干扰情况下，对每一对双绞线使用发送器测试设备2测量在MDI发送的差分信号，其峰谱畸变应不超过表10所列数值。

表10 不同工作模式下的峰谱畸变允许值

工作模式	峰谱畸变 mV
10Mbit/s, 1对线	12
10Mbit/s, 2对线	12
100Mbit/s, 1对线	12
100Mbit/s, 2对线	12
100Mbit/s, 4对线	10

峰谱畸变应通过在任意相位上以符号发送频率采样差分输出信号，并通过以下的MATLAB代码对连续2047个样本计算得到。在计算过程中，MATLAB代码应从测量数据中去除干扰信号。代码假设差分信号是在发送器上获取的，而不包括接收滤波。

测试设备2中，后处理模块使用的MATLAB代码见附录B。

8.4.4 发送器定时抖动

在测试模式2和3中，PHY应连续发送符号{+1, -1}。RMS抖动是指在不少于1ms的时间内测量的各样本周期与平均周期之差的均方根。计算公式如下所示：

$$\tau_j = \sqrt{\frac{\sum (T - T_{avg})^2}{Sample\ Size}}$$

其中 T_{avg} 是平均周期， $Sample\ Size$ 指的是在测量时间内采集的样本个数。在这两种测试模式下，RMS周期抖动都应小于50ps。

8.4.5 发送器功率谱密度和功率电平

在测试模式5中，标称发送功率应在7.85~8.5dBm内（8.25dBm接近于2Vpp）。发送器的功率谱密度应包含在如下的模板中：

$$psd(f) \leq 10 \cdot \log_{10} \left[2T \left(\frac{\sin(\pi f T)}{\pi f T} \right)^2 \right] + 9 \text{dBm/Hz}$$

这里 T 表示由发送时钟频率决定的符号周期。

8.4.6 发送时钟频率

在MASTER模式下，符号发送频率由发送时钟决定，其频率满足表11所列的要求。

表11 不同工作模式下的发送时钟频率

工作模式	时钟频率
10Mbit/s, 1对线	$6\frac{2}{3}$ MHz \pm 50ppm
10Mbit/s, 2对线	$33\frac{1}{3}$ MHz \pm 50ppm
100Mbit/s, 1对线	$33\frac{1}{3}$ MHz \pm 50ppm
100Mbit/s, 2对线	$33\frac{1}{3}$ MHz \pm 50ppm
100Mbit/s, 4对线	12.5MHz \pm 50ppm

8.5 接收器电气特性

8.5.1 接收器差分输入信号

当信号由满足8.4测试要求的发送器发出,并经过满足9规定的链路传输后,在MDI接受的差分信号的符号错误率(BER)应小于 10^{-8} 。

8.5.2 接收频率容差

接收器应能够在如表12的符号频率范围正确接收数据。

表12 不同工作模式下的接收符号频率范围要求

工作模式	时钟频率
10Mbit/s, 1对线	$6\frac{2}{3}$ MHz \pm 50ppm
10Mbit/s, 2对线	$33\frac{1}{3}$ MHz \pm 50ppm
100Mbit/s, 1对线	$33\frac{1}{3}$ MHz \pm 50ppm
100Mbit/s, 2对线	$33\frac{1}{3}$ MHz \pm 50ppm
100Mbit/s, 4对线	12.5MHz \pm 50ppm

8.5.3 外部串扰噪声抑制

8.5.3.1 4对5类线中的串扰噪声

当在4对5类双绞线对上以100Mbit/s速率传输数据的情况下,其串扰噪声可参考IEEE std 802.3-2002中40.6.1.3.4的相关规定。

8.5.3.2 由其他技术造成的串扰噪声

在25对26AWG双绞线电缆中,使用1对26AWG电缆以10Mbit/s速率传输或使用2对26AWG电缆以100Mbit/s速率传输,如果其他线对上都不使用距离增强型以太网技术传输数据,其外部串扰可使用VDSL2干扰器来模拟。VDSL2比100BASE-TX、1000BASE-T技术的干扰大,在DSL技术中也是干扰最大的。

在26AWG大对数电缆中,每一个噪声源应具有扁平的噪声谱,在138kHz~30MHz范围中为3dB,超出这个范围则至少以18dB/Octave的斜率下降。应限定噪声生成器的振幅,使得当在连接器中直接注入噪声源时,在待测设备MDI所测量的功率谱密度不大于-60dBm/Hz。

噪声源还应被符合如下串扰转移函数的滤波器处理:

$$|H_{NEXT}|^2 = 8.536 \times 10^{-15} \cdot 24^{0.6} \cdot f^{1.5}$$

该滤波器的相位可以是任意的。测试方式如图37所示。

8.5.3.3 由距离增强型以太网技术造成的串扰噪声

在25对26AWG双绞线电缆中,使用1对26AWG电缆以10Mbit/s速率传输或在2对26AWG电缆以100Mbit/s速率传输,如果其他线对上同样使用距离增强型以太网技术传输数据,则在外部串扰测试中噪声生成器的功率谱密度可使用如下公式代替:

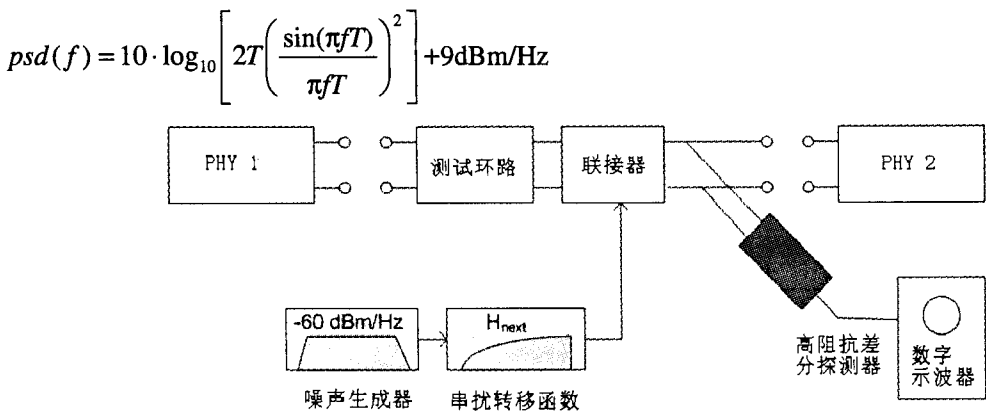


图37 其他技术造成外部串扰的测试方法

9 链路特性

9.1 布线系统特性

支持距离增强型以太网的布线系统可由1、2或4对平衡电缆组成，标称阻抗应为100Ω，应不低于ANSI T1.417-2003附录C的24-AWG PIC和26-AWG PIC以及ISO/IEC 11801规定的Class C（三类线）和Class D（五类线）所规定的性能指标。布线应使用点到点星型拓扑结构，不同编码方法下各种类型电缆所支持的速率与传输距离在7.2.2中定义。

9.1.1 链路传输参数

本节的传输参数用于保证在所要求的速率和传输距离条件下，使用的电缆可以提供可靠的物理介质连接。传输参数包括介入损耗、延迟参数、近端/远端串扰、回波损耗等，见表13。

表13 各种类型电缆的链路传输参数

电缆类型	介入损耗、延迟	近端/远端串绕	回波损耗	背景噪声
24-AWG PIC	见ANSI T1.417-2003表C.6	ANSI T1.417-2003 ¹	15 dB（1~20MHz）	-140 dBm/Hz
26-AWG PIC	见ANSI T1.417-2003表C.2	ANSI T1.417-2003 ¹	15 dB（1~20MHz）	-140 dBm/Hz
ISO/IEC 11801 Class C （三类线）	ISO/IEC 11801-2002 ²	ISO/IEC 11801-2002	ISO/IEC 11801-2002 ³	-140 dBm/Hz
ISO/IEC 11801 Class D （五类线）	ISO/IEC 11801-2002 ²	ISO/IEC 11801-2002	ISO/IEC 11801-2002	-140 dBm/Hz

注1：24-AWG的串扰累加功率在ANSI T1.417的C.4.1和C.4.2中描述，26-AWG的串扰累加功率等同或优于24-AWG的规定值；
注2：长度超过100m电缆的介入损耗见ISO/IEC 11801-1992的附录A；
注3：3类线只考虑1~20MHz范围的回波损耗

9.1.2 链路延迟

当在多个捆绑双工链路上同时进行数据收发时，不同双工通道上信号的传输延迟可能各不相同。应进行延时对齐，以消除这种不同接收信道上接收信号的传输时延差异。

9.1.3 噪音环境

距离增强型以太网的噪声环境包含许多噪声源，影响目标符号错误率（BER）的主要是回波干扰（echo interference）和近端串扰（NEXT）。

（1）由于使用混合器（Hybrid）在一对双绞线对上同时双向传输数据以及链路上的阻抗不一致，会造成回波干扰。为了达到目标符号错误率（BER），技术实现上应使用回波抵消技术来分离发送和接收

通道，即根据本地单对双绞线（差分线）接口获得的混合信号和本地发送器提供的本地信号还原出对端的信号。

（2）当在多个双绞线对上同时进行数据收发时，每一个线对接收器的接收信号还会受到来自其他线对发送器发送信号的近端串扰。此时应使用交叉干扰抵消技术，首先做干扰估算，根据其他双绞线对各自提供的本地发送信号来估算对本双绞线对接收信号的干扰；然后进行干扰抵消，即从本双绞线对的接收信号中抵消上述干扰信号。

10 介质相关接口（MDI）规范

10.1 MDI 连接器

距离增强型以太网使用8针的连接器RJ45，应遵循IEC 60603-7-4-2005的规定。作为平衡线缆的机械接口，RJ45插头、插座的形状如图38所示，该连接器各触点的信号分配方式见IEEE std 802.3-2002中的40.8.1。

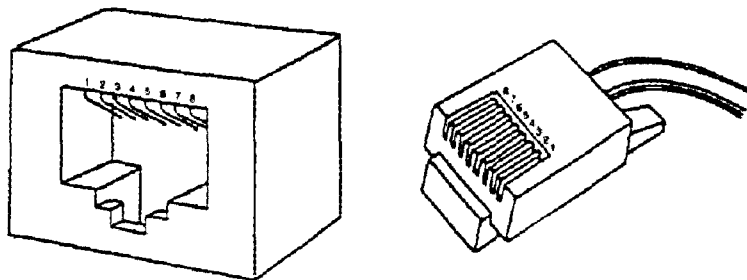


图38 连接器RJ45插头、插座的形状

标准也应允许使用满足本章电气规范的其他连接器类型，如RJ11/RJ12以及高密度连接器RJ21。但是这些连接器不在本标准的规定范围内。

10.2 MDI 自动线对交换

距离增强型以太网物理层接口可进行任意的信道分配，例如允许远端PHY的线对A与本地PHY的线对A、B、C或D相连，LDS中的MASTER应检测链路的连通性，并自动完成线对交换功能。

10.3 MDI 电气规范

10.3.1 MDI 回波损耗

在每一个所支持的信道上，MDI差分阻抗应满足：在阻抗为 $100 \times (1 \pm 15\%) \Omega$ 的平衡电缆上，100kHz~20MHz的差分信号在MDI上的反射衰减应至少为15dB。任何时间PHY所发送数据或控制信号，都应满足这种回波损耗特性。

10.3.2 MDI 共模特性

在100kHz~15MHz内，MDI的阻抗平衡应遵从IEEE std 802.3-2002中40.8.3.2的规定，其最大值为66.6dB。MDI的共模输出电压应遵从IEEE std 802.3-2002中40.8.3.3的规定。

10.3.3 MDI 容错特性

在任何操作条件下，MDI所支持的双绞线对在任意两个线对短路时应不会损坏，并在短路消除后可恢复正常的操作。每一个双绞线对应能够经受IEC 60060所规定的电气强度测试。

11 环境要求

11.1 通用安全

所有设备应满足IEC 60950-1-2001中的规定。

11.2 网络安全

本节提出的安全建议是不完全的，设计者应参照国际、国家以及本地的相关安全法规来进行网络施工和维护。

在安装及使用过程中，LAN线缆系统必须避免如下4种电气安全隐患：

- (1) 把LAN组件与电源、照明或通信电路直接相连；
- (2) LAN电缆和组件上静电积累；
- (3) LAN电缆系统上的高能瞬变；
- (4) 将安全地与各LAN组件直接相连。

这些电气安全隐患可以通过正确的网络施工和操作来避免，在新网络安装，旧网络整改、维护的过程中应使用特殊的测量手段来保障这些安全问题没有被忽略。

11.3 环境

11.3.1 电磁辐射

距离增强型以太网物理层接口应满足国家和地方关于电磁干扰的相关法规。

11.3.2 温度和湿度

距离增强型以太网设备应能够在一定范围的温度、湿度、振动等环境条件下正常工作，对这些参数的具体规定不在本标准的范围之内。

附 录 A

(规范性附录)

LDS 管理寄存器定义

A.1 总述

LDS仍使用MII管理寄存器，对它们作了重新定义。对控制寄存器、状态寄存器、PHY标识寄存器、能力通告寄存器、对端能力寄存器以及各扩展寄存器的详细规定，将在以下各节介绍。

A.2 控制寄存器

A.2.1 控制寄存器比特定义

LDS重新定义了MII控制寄存器（Register 0），其比特定义见表A.1。

表A.1 控制寄存器的比特定义

位	名 称	描 述	读/写
0.15	复位	1=复位PHY; 0=正常操作	读/写、自清零
0.14	回环	1=使能回环模式; 0=去使能回环模式	读/写
0.13	重协商	1=重新协商; 0=正常操作	读/写、自清零
0.12	使能LDS	1=使能LDS过程; 0=去使能LDS过程	读/写
0.11	下电	1=下电; 0=正常操作	读/写
0.10	隔离	1=将PHY与MII接口电气隔离; 0=正常操作	读/写
0.9: 6	速度选择	0.6 0.7 0.8 0.9 0 0 0 0 = 10Mbit/s 0 0 0 1 = 100Mbit/s 其他 = 保留	读/写
0.5: 4	线对选择	0.4 0.5 0 0 = 1对线 0 1 = 2对线 1 0 = 4对线 1 1 = 保留	读/写
0.3	Master/Slave选择	1=手工强制本地PHY为Master; 0=手工强制本地PHY为Slave	读/写
0.2:0	保留	应写为0，读时忽略	读/写

A.2.2 复位

当比特0.15被置为1时，应复位PHY，并将状态和控制寄存器置为初始值。该比特是自清零的，当复位过程结束后，应重新被置为零。在复位过程中应不接受对控制寄存器的写操作，复位操作应在该比特置1后0.5s内完成。比特0.15缺省值应为0。

A.2.3 回环

当比特0.14被置为1时，应将PHY接收电路与网络物理介质隔离，PHY从MII接收的发送数据被送回MII。清零该比特应能够恢复PHY的正常操作。比特0.14缺省值应为0。

A.2.4 重协商

当PHY不具有LDS功能或LDS功能被去使能时，比特0.13应总被置为0时，任何试图将其写1的操作应被忽略。当该比特被置为1时，应重启动LDS功能，并在协商结束后将该比特清零。比特0.13缺省值应为0。

A.2.5 使能LDS

当比特0.12被置为1时，比特0.3~9失去意义，对链路配置不起作用；当该比特被清零时，比特0.3~9决定链路配置。比特0.12缺省值应为1。

A.2.6 下电

当比特0.11被置为1时，PHY应处于低能耗状态，此时PHY的行为由实现者自行规定。清零该比特应能够恢复PHY的正常操作。比特0.11缺省值应为0。

A.2.7 隔离

当比特0.10被置为1时，应将PHY的数据通道与MII隔离，此时PHY不响应从MII接收的数据信号，同时也不向MII发送数据信号。清零该比特应能够恢复PHY的正常操作。比特0.10缺省值应为0。

A.2.8 速度选择

链路速度可以通过LDS过程协商选择，也可以通过手工方式选择。当使能LDS时，比特0.6~9失去意义，对链路配置不起作用；当去使能LDS时，比特0.6~9表示所选择的链路速度。如果PHY不支持某种速度，任何这种无效的设置应被忽略。

比特0.6~9的缺省值应为0000。

A.2.9 线对选择

传输线对可以通过LDS过程协商选择，也可以通过手工方式选择。当使能LDS时，比特0.4~5失去意义，对链路配置不起作用；当去使能LDS时，比特0.4~5表示所选择的传输线对。如果PHY不支持某种线对选择，任何这种无效的设置应被忽略。

比特0.4~5的缺省值应为00。

A.2.10 Master/Slave模式选择

PHY的工作模式Master或Slave可以通过LDS过程协商选择，也可以通过手工方式选择。当使能LDS时，比特0.3失去意义，对链路配置不起作用；当去使能LDS时，比特0.3取值1表示本地PHY工作在Master模式下，取值0表示本地PHY工作在Slave模式下。比特0.3的缺省值应为0。

A.3 状态寄存器

A.3.1 状态寄存器比特定义

LDS重新定义了MII状态寄存器（Register 1），其比特定义见表A.2。

表A.2 状态寄存器的比特定义

位	名称	描述	读/写
1.15: 14	保留	读时忽略	只读
1.13	1对线，100Mbit/s能力	1=PHY支持1对线，100Mbit/s; 0=PHY不支持1对线，100Mbit/s	只读
1.12	4对线，100Mbit/s能力	1=PHY支持4对线，100Mbit/s; 0=PHY不支持4对线，100Mbit/s	只读

表A.2 (续)

位	名 称	描 述	读/写
1.11	2对线, 100Mbit/s能力	1=PHY支持2对线, 100Mbit/s; 0=PHY不支持2对线, 100Mbit/s	只读
1.10	2对线, 10Mbit/s能力	1=PHY支持2对线, 10Mbit/s; 0=PHY不支持2对线, 10Mbit/s	只读
1.9	1对线, 10Mbit/s能力	1=PHY支持1对线, 10Mbit/s; 0=PHY不支持1对线, 10Mbit/s	只读
1.8	扩展状态	1=Register15保存扩展状态信息; 0= Register15不保存扩展状态信息	只读
1.7	保留	读时忽略	只读
1.6	前导符抑制	1=PHY接受不含前导符的管理帧; 0=PHY不接受不含前导符的管理帧	只读
1.5	LDS完成	1=LDS过程完成; 0=LDS过程未完成	只读
1.4	支持IEEE 802.3	1=本地PHY支持IEEE 802.3; 0=本地PHY不支持IEEE 802.3	只读
1.3	LDS能力	1=具有LDS能力 0=不具有LDS能力	只读
1.2	链路状态	1=链路up; 0=链路down	只读、低电平自锁
1.1	超长帧检测	1=检测到超长帧; 0=未检测到超长帧	只读、高电平自锁
1.0	扩展能力	1=具有扩展能力; 0=不具有扩展能力	只读

A.3.2 1对线、100Mbit/s能力

当比特1.13所读值为1时, 表示PHY具有以1对线、100Mbit/s方式工作的能力。当比特1.13所读值为0时, 表示PHY不具有以1对线、100Mbit/s方式工作的能力。

A.3.3 4对线、100Mbit/s能力

当比特1.12所读值为1时, 表示PHY具有以4对线、100Mbit/s方式工作的能力。当比特1.12所读值为0时, 表示PHY不具有以4对线、100Mbit/s方式工作的能力。

A.3.4 2对线、100Mbit/s能力

当比特1.11所读值为1时, 表示PHY具有以2对线、100Mbit/s方式工作的能力。当比特1.11所读值为0时, 表示PHY不具有以2对线、100Mbit/s方式工作的能力。

A.3.5 2对线、10Mbit/s能力

当比特1.10所读值为1时, 表示PHY具有以2对线、10Mbit/s方式工作的能力。当比特1.10所读值为0时, 表示PHY不具有以2对线、10Mbit/s方式工作的能力。

A.3.6 1对线、10Mbit/s能力

当比特1.9所读值为1时, 表示PHY具有以1对线、10Mbit/s方式工作的能力。当比特1.9所读值为0时, 表示PHY不具有以1对线、10Mbit/s方式工作的能力。

A.3.7 扩展状态

当比特1.8所读值为1时，表示在寄存器15中保存扩展状态信息；当比特1.8所读值为0时，表示寄存器15中没有保存扩展状态信息。

A.3.8 前导符抑制

当比特1.6所读值为1时，表示PHY能够接收在IEEE std 802.3-2002中22.2.4.5.2所规定的不带前导符的管理帧。当比特1.6所读值为0时，表示PHY只能够接收在IEEE std 802.3-2002中22.2.4.5.2所规定的带前导符的管理帧。

A.3.9 LDS完成

当比特1.5所读值为1时，表示LDS过程已经完成。当PHY去使能LDS功能时，比特1.5的返回值应为0。

A.3.10 支持IEEE 802.3

当比特1.4所读值为1时，表示本地PHY支持802.3协议，否则表示本地PHY不支持802.3协议。

A.3.11 LDS能力

当比特1.3所读值为1时，表示PHY具有LDS协商能力；否则表示不具有此能力。

A.3.12 链路状态

当比特1.2所读值为1时，表示PHY已经建立起有效的链路；否则表示链路曾经是无效的。链路有效性的判别标准由实现者自行规定。该比特是低电平自锁的，即当链路down时，将一直保持在低电平状态（取值为0），在读操作之后才重新反映当前的链路状态。

A.3.13 超长帧检测

当比特1.1所读值为1时，表示曾经检测到超长帧；否则表示未检测到超长帧。该比特是高电平自锁的，即当检测到超长帧时，将一直保持在高电平状态（取值为1），在读操作之后才重新反映当前的状态。

A.3.14 扩展能力

当比特1.0所读值为1时，表示具有支持扩展状态寄存器（register 15）的能力；否则表示不具有这种能力。

A.4 PHY标识寄存器

MII寄存器2和MII寄存器3提供了一个32位的数据，作为PHY类型的惟一标识。具体定义见IEEE std 802.3-2002中的22.2.4.3.1。

A.5 LDS能力通告寄存器

A.5.1 LDS能力通告寄存器比特定义

LDS使用寄存器4和寄存器6作为LDS能力通告寄存器，包含了本地PHY要通告的技术能力；寄存器5是相应的控制寄存器。比特定义见表A.3、表A.4、表A.5。

表A.3 LDS能力通告寄存器4的比特定义

位	名 称	描 述	读/写
4.15	非对称Pause操作	1=支持单向Pause帧收发； 0=不支持单向Pause帧收发	读/写
4.14	Pause操作	1=支持双向Pause帧收发； 0=不支持双向Pause帧收发	读/写
4.13: 6	保留	应写为0，读时忽略	读/写
4.5	1对线，100Mbit/s能力	1=PHY支持1对线，100Mbit/s； 0=PHY不支持1对线，100Mbit/s	读/写

表A.3 (续)

位	名 称	描 述	读/写
4.4	4对线, 100Mbit/s能力	1=PHY支持4对线, 100Mbit/s; 0=PHY不支持4对线, 100Mbit/s	读/写
4.3	2对线, 100Mbit/s能力	1=PHY支持2对线, 100Mbit/s; 0=PHY不支持2对线, 100Mbit/s	读/写
4.2	2对线, 10Mbit/s能力	1=PHY支持2对线, 10Mbit/s; 0=PHY不支持2对线, 10Mbit/s	读/写
4.1	1对线, 10Mbit/s能力	1=PHY支持1对线, 10Mbit/s; 0=PHY不支持1对线, 10Mbit/s	读/写
4.0	保留	应写为0, 读时忽略	读/写

表A.4 LDS能力通告控制寄存器5的比特定义

位	名 称	描 述	读/写
5.15: 13	测试模式	用来设置发送器的测试模式	读/写
5.12: 10	保留	应写为0, 读时忽略	读/写
5.9	端口类型	1=多端口设备; 0=单端口设备	读/写
5.8	下一页更新	1=寄存器6已被更新	读/写、自清零
5.7: 0	本地能力域编号	下一个要通告的能力域编号	读/写

表A.5 LDS能力通告寄存器6的比特定义

位	名 称	描 述	读/写
6.15: 0	下一页消息	本地要通告给对端的工作能力, 其能力域编号取值不应为零	读/写

A.5.2 1对线、100Mbit/s能力

当比特4.5被置为1时, 表示PHY具有以1对线、100Mbit/s方式工作的能力; 否则表示PHY不具有以1对线、100Mbit/s方式工作的能力。比特4.5的缺省值应为1。

A.5.3 4对线、100Mbit/s能力

当比特4.4被置为1时, 表示PHY具有以4对线、100Mbit/s方式工作的能力; 否则表示PHY不具有以4对线、100Mbit/s方式工作的能力。比特4.4的缺省值应为1。

A.5.4 2对线、100Mbit/s能力

当比特4.3被置为1时, 表示PHY具有以2对线、100Mbit/s方式工作的能力; 否则表示PHY不具有以2对线、100Mbit/s方式工作的能力。比特4.3的缺省值应为1。

A.5.5 2对线、10Mbit/s能力

当比特4.2被置为1时, 表示PHY具有以2对线、10Mbit/s方式工作的能力; 否则表示PHY不具有以2对线、10Mbit/s方式工作的能力。比特4.2的缺省值应为1。

A.5.6 1对线、10Mbit/s能力

当比特4.1被置为1时, 表示PHY具有以1对线、10Mbit/s方式工作的能力; 否则表示PHY不具有以1对线、10Mbit/s方式工作的能力。比特4.1的缺省值应为1。

A.5.7 Pause操作/非对称Pause操作

当比特4.14或比特4.15被置为1时, 表示本端支持MAC控制子层和PAUSE功能。这种能力只用于全双工链路, 与速率和介质无关。具体定义和规定见IEEE std 802.3-2002中的附录28B。

A.5.8 下一页消息

除了7.1.3中所规定的的能力域0的定义，用户也可以定义其他的能力域。通过能力通告寄存器6可以设置这些非零编号的能力域，从而控制发送能力帧的内容。只有本地PHY支持的能力才可以被设置，这些支持的能力也可以不被设置，使得管理功能更好地控制协商的结果。

A.5.9 本地能力域编号

比特5.7：0代表与下一个通告能力对应的本地能力域编号。当被设为0，表示将通告基本页的能力；否则表示将通告下一页的能力。本标准只定义了能力域0。

A.5.10 下一页更新

当比特5.8被设置为1时，表示寄存器6中的内容已被更新，可以发送下一个能力帧。该比特是自清零的，既本地开始发送新的能力帧时，就将该比特清零。

A.5.11 端口类型

当比特5.9被设置为1时，表示该设备为多端口类型；当使能LDS时，本端PHY宜作为MASTER进行协商；此时，在BEACON状态下，应设置本端PHY为MASTER，并直接发送MASTER PN-11伪随机噪声序列信号。否则，表示该设备为单端口类型，本端PHY宜作为SLAVE进行协商。比特5.9的缺省值应为0。

测试模式

比特5.10~12用来设置发送器的测试模式。在4对线连接时，这3个比特表示IEEE std 802.3的表30-7定义的发送器测试模式；在1对线、2对线连接时，表示在8.2节表7中定义的测试模式。

A.6 LDS对端能力寄存器

A.6.1 LDS对端能力寄存器比特定义

LDS使用寄存器7、寄存器8以及寄存器9作为LDS对端能力寄存器，包含了远端PHY所通告的技术能力。其比特定义见表A.6、表A.7、表A.8。

表A.6 LDS对端能力寄存器7的比特定义

位	名 称	描 述	读/写
7.15	非对称Pause操作	1=远端支持单向Pause帧收发； 0=远端不支持单向Pause帧收发	只读
7.14	Pause操作	1=远端支持双向Pause帧收发； 0=远端不支持双向Pause帧收发	只读
7.13: 6	保留	应写为0，读时忽略	只读
7.5	1对线，100Mbit/s能力	1=PHY支持1对线，100Mbit/s； 0=PHY不支持1对线，100Mbit/s	只读
7.4	4对线，100Mbit/s能力	1=PHY支持4对线，100Mbit/s； 0=PHY不支持4对线，100Mbit/s	只读
7.3	2对线，100Mbit/s能力	1=PHY支持2对线，100Mbit/s； 0=PHY不支持2对线，100Mbit/s	只读
7.2	2对线，10Mbit/s能力	1=PHY支持2对线，10Mbit/s； 0=PHY不支持2对线，10Mbit/s	只读
7.1	1对线，10Mbit/s能力	1=PHY支持1对线，10Mbit/s； 0=PHY不支持1对线，10Mbit/s	只读
7.0	保留	应写为0，读时忽略	只读

表A.7 LDS对端能力寄存器8的比特定义

位	名 称	描 述	读/写
8.15: 0	对端下一页消息	远端所通告的工作能力，其能力域编号取值不应为零	只读

表A.8 LDS对端能力寄存器9的比特定义

位	名 称	描 述	读/写
9.15	下一页已读	1=寄存器8中的内容已被读走； 0=寄存器8中的内容还未被读走	读/写
9.14: 9	保留	应写为0，读时忽略	只读
9.8	远端应答	1=远端成功接收了本地能力域； 0=远端还没有成功接收本地能力域	只读、读清零
9.7: 0	远端能力域编号	远端的能力域编号	只读

A.6.2 1对线、100Mbit/s能力

当比特7.5所读值为1时，表示PHY具有以1对线、100Mbit/s方式工作的能力。当比特7.5所读值为0时，表示PHY不具有以1对线、100Mbit/s方式工作的能力。

A.6.3 4对线、100Mbit/s能力

当比特7.4所读值为1时，表示PHY具有以4对线、100Mbit/s方式工作的能力。当比特7.4所读值为0时，表示PHY不具有以4对线、100Mbit/s方式工作的能力。

A.6.4 2对线、100Mbit/s能力

当比特7.3所读值为1时，表示PHY具有以2对线、100Mbit/s方式工作的能力。当比特7.3所读值为0时，表示PHY不具有以2对线、100Mbit/s方式工作的能力。

A.6.5 2对线、10Mbit/s能力

当比特7.2所读值为1时，表示PHY具有以2对线、10Mbit/s方式工作的能力。当比特7.2所读值为0时，表示PHY不具有以2对线、10Mbit/s方式工作的能力。

A.6.6 1对线、10Mbit/s能力

当比特7.1所读值为1时，表示PHY具有以1对线、10Mbit/s方式工作的能力。当比特7.1所读值为0时，表示PHY不具有以1对线、10Mbit/s方式工作的能力。

A.6.7 Pause操作/非对称Pause操作

当比特7.14或比特7.15所读值为1时，表示远端支持MAC控制子层和PAUSE功能。这种能力只用于全双工链路，与速率和介质无关。具体定义和规定见IEEE Std 802.3-2002中的附录28B。

A.6.8 对端下一页消息

比特8.15——0保存远端通告的非零编号的能力域内容。

A.6.9 远端能力域编号

比特9.7——0代表远端通告的能力域编号。当所读值为0时，表示远端通告的是基本页能力，内容应保存在寄存器7中；当所读值不为0时，表示远端通告的是下一页的能力，内容应保存在寄存器8中。该字段的内容变化指示本地接收到了新的远端能力通告。

比特9.7——0的缺省值应为11111111。

A.6.10 远端应答

当比特9.8所读值为1时，表示远端成功接收了本地发送的能力帧，本地PHY应更新能力通告寄存器以发送下一个能力帧。该比特是读清零的。

A.6.11 下一页已读

当比特9.15所读值为1时，表示本地已经成功读取了寄存器8中的内容。当本地成功接收到远端的能力，应更新寄存器8的内容，并将比特9.15清零。

A.7 LDS扩展寄存器

A.7.1 LDS扩展寄存器比特定义

LDS扩展寄存器（register 10）中所有比特都是只读的，它显示LDS过程中的一些必要信息。其比特定义见表A.9。

表A.9 LDS扩展寄存器的比特定义

位	名 称	描 述	读/写
10.15	降低工作能力	1=链路不能UP，降低工作能力，继续检测； 0=链路UP，不用降低工作能力，或无法降低工作能力	只读
10.14	MASTER/SLAVE	1=本地PHY为MASTER； 0=本地PHY为SLAVE	只读
10.13：12	有效线对个数	8.12 8.13 0 0 = 1对线 0 1 = 2对线 1 0 = 4对线 1 1 = 保留	只读
10.11：0	线缆长度	由MASTER所估计的线缆长度，单位为米	只读

A.7.2 线缆长度

在LDS过程中，由MASTER估计线缆长度，单位为米。

A.7.3 有效线对个数

在LDS过程所检测到的有效线对个数，距离增强型以太网物理层接口支持1对线、2对线和4对线3种情况。

A.7.4 MASTER/SLAVE

当比特 10.14 所读值为1时，表示本地 PHY 为 MASTER；否则，表示本地 PHY 为 SLAVE。MASTER/SLAVE的定义见7.1.3。

A.7.5 降低工作能力

当比特10.15所读值为1时，表示在协商工作能力下链路无法UP，应降低工作能力、继续监测；否则，表示不用降低工作能力。降低工作能力的具体规定见7.2.2。

A.8 LRE扩展寄存器

A.8.1 LRE扩展寄存器比特定义

LRE扩展寄存器（Register 14）用于区别LDS与IEEE自协商方式，使得MDIO可以正确访问MII寄存器地址空间。其比特定义见表A.10。

表A.10 LRE扩展寄存器的比特定义

位	名 称	描 述	读/写
14.15：3	保留	应写为0，读时忽略	只读
14.2	使能强制寄存器访问方式	1=使能寄存器14.1； 0=去使能寄存器14.1	读写

表A.10 (续)

位	名 称	描 述	读/写
14.1	强制寄存器访问方式	1=按照IEEE 802.3自协商方式访问MII寄存器00-FF; 0=按照LDS方式访问MII寄存器00-FF	读写
14.0	管理寄存器访问方式	反映链路LINK UP时的管理寄存器访问方式: 1=按照LDS方式访问MII寄存器00-FF; 0=按照IEEE 802.3自协商方式访问MII寄存器00-FF	只读

A.8.2 管理寄存器访问方式

比特14.0反映链路LINK UP时的管理寄存器访问方式。当比特14.0取值为1时，表示当前MII寄存器的访问方式为LDS；否则为IEEE 802.3自协商方式。

A.8.3 使能强制寄存器访问方式

比特14.2只在寄存器1.4所读值为1时有效，此时当比特14.2取值为1时，表示使能寄存器14.1；否则表示寄存器14.1无效。

A.8.4 强制寄存器访问方式

比特14.1只在寄存器1.4所读值为1且比特14.2被置为1时有效，此时当比特14.1取值1时，表示MDIO将按照IEEE 802.3自协商方式访问MII寄存器00-FF；否则表示按照LDS方式访问MII寄存器00-FF。

A.9 扩展状态寄存器

A.9.1 扩展状态寄存器比特定义

扩展状态寄存器（register 15）中所有比特都是只读的，用于显示LDS过程中的一些诊断和状态信息。其比特定义见表A.11。

表A.11 扩展状态寄存器的比特定义

位	名 称	描 述	读/写
15.15: 10	保留	应写为0，读时忽略	只读
15.9	本地接收器状态	1=本地接收器状态正常； 0=本地接收器状态不正常	只读
15.8	远端接收器状态	1=远端接收器状态正常； 0=远端接收器状态不正常	只读
15.7: 0	IDLE错误计数	本地PHY接收的IDLE错误次数，循环计数、读清零	只读、读清零

A.9.2 IDLE错误计数

比特15.7: 0统计本地PHY接收的IDLE符号错误次数，可用于诊断接收器及链路状态等，该字段应循环计数且读清零。

A.9.3 远端接收器状态

当比特15.8所读值为1时，表示链路对端的接收器状态正常；否则表示链路对端的接收器状态不正常。

A.9.4 本地接收器状态

当比特15.9所读值为1时，表示本地接收器状态正常；否则表示本地接收器状态不正常。

附 录 B
(规范性附录)

发送器失真测试峰谱畸变指标测试中算法代码

发送器失真测试中，使能测试模式4条件下，在无电缆干扰情况下，对每一对双绞线使用发送器测试设备2测量在MDI发送的差分信号，其峰谱畸变应通过在任意相位上以符号发送频率采样差分输出信号，并通过以下的MATLAB代码对连续2047个样本计算得到。在计算过程中，MATLAB代码应从测量数据中去除干扰信号。代码假设差分信号是在发送器上获取的，而不包括接收滤波。

```
%
% Distortion Specification Post Processing for Extended Reach Ethernet
%
% *****
% Define Operating Mode
% *****
%
DataRate = 10e6;          % data rate(10e6 or 100e6)
NumberPairs = 1;          % number of wire pairs(1,2,or 4)
% *****
% *****

%
% Check for valid mode
%
if((DataRate == 10e6 & NumberPairs == 1))
    symbolRate = DataRate/1.5;
elseif(DataRate == 100e6 & NumberPairs == 2)
    symbolRate = DataRate/3;
elseif(DataRate == 100e6 & NumberPairs == 4)
    symbolRate = DataRate/8;
else
    fprintf('\n***Error:Invalid Mode Requested\n')
    break
end

% Generate test pattern symbol sequence

scramblerSequence=ones(1,2047);
```

```

for i=12:2047
    scramblerSequence(i)=mod(scramblerSequence(i-11)+ scramblerSequence(i-9),2);
end

for i=1:2047
    temp=scramblerSequence(mod(i-1,2047)+1)+ ...
        2*mod(scramblerSequence(mod(i-2,2047)+1)+ scramblerSequence(mod(i-5,2047)+1),2)+ ...
        4*mod(scramblerSequence(mod(i-3,2047)+1)+ scramblerSequence(mod(i-5,2047)+1),2);
    switch temp
        case 0,
            testPattern(i)=0;
        case 1,
            testPattern(i)=1;
        case 2,
            if(NumberPairs == 4)testPattern(i)=2;
            else testPattern(i)=0;
            end
        case 3,
            testPattern(i)=-1;
        case 4,
            testPattern(i)=0;
        case 5,
            testPattern(i)=1;
        case 6,
            if(NumberPairs == 4)testPattern(i)=-2;
            else testPattern(i)=0;
            end
        case 7,
            testPattern(i)=-1;
    end
end
if(NumberPairs == 4)testPattern = testPattern/2; end

% Input data file
dataFile=input('Data file name:','s')

```

YD/T 1947-2009

```
fid=fopen(dataFile,'r');
rx=fscanf(fid,'%f');
fclose(fid);
Disturber = 2;          % disturber Vppd(0 if none)

rx1 = filter(0.5*[1 -1],1,rx);    % apply high pass filter
sampledData=rx1;

if(length(sampledData)< 2047)
    error('Must have 2047 consecutive samples for processing');
    break
elseif(length(sampledData)> 2047)
    fprintf(1,'\n Warning - only using first 2047 samples in data file');
    sampledData=sampledData(1:2047);
end

% Fit a sine wave to the data and temporarily remove it to yield processed data
if(Disturber > 0)
    options=foptions;
    options(1)=0;
    options(2)=1e-8;
    options(3)=1e-8;
    options(14)=2000;
    x0 = [2.0 0 symbolRate*1e-6/6];
    TolX = options(2); TolFun = options(3); MaxFunEvals = options(14);
    Options = optimset('TolX',TolX,'TolFun',TolFun,'MaxFunEvals',MaxFunEvals);
    [P,FVAL,EXITFLAG,OUTPUT] = fminsearch('sinefit',x0,Options,sampledData,symbolRate);
    options(8)=FVAL;
    options(10)=OUTPUT.funcCount;

    processedData=sampledData - ...
        P(1)*sin(2*pi*(P(3)*1e6*[0:2046]/symbolRate + P(2)*1e-9*symbolRate));
else
    processedData = sampledData;
end
```

% LMS Cancellor

numberCoeff=70; % Number of coefficients in canceller

coefficients=zeros(1,numberCoeff);

delayLine=testPattern;

% Align data in delayLine to sampled data pattern

temp=xcorr(processedData,delayLine);

index=find(abs(temp)==max(abs(temp)));

index=mod(mod(length(processedData)- index(1),2047)+numberCoeff¹⁰,2047);

delayLine=[delayLine((end-index):end)delayLine(1:(end-index-1))];

% Compute coefficients that minimize squared error in cyclic block

for i=1:2047

X(i,:)=delayLine(mod([0:(numberCoeff-1)]+i-1,2047)+1);

end

coefficients=(inv(X.' * X)*(processedData*X).')';

% Cancellor

for i=1:2047

err(i)=processedData(i)- sum(delayLine(1+mod((i-1):(i+numberCoeff-2),2047)).*coefficients);

end

% Add back temporarily removed sine wave

if(Disturber > 0)

err=err+P(1)*sin(2*pi*(P(3)*1e6*[0:2046]./symbolRate + P(2)*1e-9*symbolRate));

% Re-fit sine wave and do a final removal

options=foptions;

options(1)=0;

options(2)=1e-12;

options(3)=1e-12;

options(14)=10000;

x0 = [2.0 0 symbolRate*1e-6/6];

TolX = options(2); TolFun = options(3); MaxFunEvals = options(14);

Options = optimset('TolX',TolX,'TolFun',TolFun,'MaxFunEvals',MaxFunEvals);

```

[P,FVAL,EXITFLAG,OUTPUT] = fminsearch('sinefit',x0,Options,err,symbolRate);
options(8)=FVAL;
options(10)=OUTPUT.funcCount;

processedData=sampledData - ...
    P(1)*sin(2*pi*(P(3)*1e6*[0:2046]/symbolRate + P(2)*1e-9*symbolRate));

% Compute coefficients that minimize squared error in cyclic block
coefficients=(inv(X.' * X)*(processedData*X).')';
end

% Cancellation
for i=1:2047
    err(i)=processedData(i)- sum(delayLine(1+mod((i-1):(i+numberCoeff-2),2047))*coefficients);
end

% SNR Calculation
signal=0.5;
noise=mean(err.^2);
SNR=10*log10(signal./noise);

% Output Peak Distortion(avoid start-up transient)
peakDistortion=max(abs(err(50:end)))
%
% Function for fitting sine wave
function err=sinefit(parameters,data,symbolRate)
err=sum(((data- ...
    parameters(1)*sin(2*pi*(parameters(3)*1e6*[0:(length(data)-1)]/symbolRate + parameters(2)*1e-9*symbolRate))).^2);

```

中 华 人 民 共 和 国
通 信 行 业 标 准
基于 2D-PAM3 和 4D-PAM5 编码方法的
距离增强型以太网物理层技术要求

YD/T 1947-2009

*

人民邮电出版社出版发行
北京市崇文区夕照寺街 14 号 A 座
邮政编码：100061
北京新瑞铭印刷有限公司印刷
版权所有 不得翻印

*

开本：880 × 1230 1/16 2009 年 8 月第 1 版
印张：4 2009 年 8 月北京第 1 次印刷
字数：107 千字

ISBN 978 - 7 - 115 - 1847/09 - 89

定价：36 元

本书如有印装质量问题，请与本社联系 电话：(010)67114922