

100BASE-T1

任家材

北京交通大学



2024 年 11 月 24 日



文件修订记录

文档名称	Gaussian、Rayleigh、Rice 分布		
所属部门	任家材		
密级程度	<input type="checkbox"/> 绝密 <input checked="" type="checkbox"/> 对内 <input type="checkbox"/> 可公开		
修订日期	修订描述	修订人	版本号
2024-11-24	初稿	任家材	0.1



目录

1. 引言	6
2. 100BASE-T1 概述	6
2.1. 物理编码子层 (PCS)	7
2.2. 物理介质附件子层 (PMA)	7
2.3. 信令	7
3. 100BASE-T1 服务原语和接口	9
4. 100BASE-T1 物理编码子层(PCS)功能	10
4.1. PCS 复位功能	11
4.2. PCS 数据传输使能	12
4.3. PCS 传输	13
4.3.1. 4B/3B 转换	14
4.3.2. PCS 传输状态图	16
4.3.3. PCS 传输符号生成	18
4.4. PCS 接收	22
4.4.1. PCS 接收状态图	22
4.4.2. PCS 接收符号解码	25
4.4.3. PCS 接收解扰器多项式	25
4.4.4. PCS 接收自动极性检测 (可选)	25
4.4.5. PCS 接收 MII 信号 3B/4B 转换	26
4.5. PCS 本地回环	27
5. 介质附件子层 (PMA)	27
5.1 PMA 复位功能	28
5.2. PMA 传输功能	28
5.3. PMA 接收功能	29
5.4 PHY 控制功能	30
5.5. 连接监控功能	31
5.6. PMA 时钟恢复	31
6. PMA 电气规范	32
6.1. 电磁兼容 (EMC) 测试	32
6.1.1. 抗干扰性—DPI 测试	32
6.1.2. 发射—传导发射测试	32



6.2. 测试模式	32
6.3. 测试夹具	33
6.4. 发射机电气规范	35
6.4.1. 发射机输出压降	35
6.4.2. 发射机失真	35
6.4.3. 发射机时序抖动	37
6.4.4. 发射机功率谱密度	38
6.4.5. 发射机时钟频率	39
6.5. 接收器电器规范	39
6.5.1. 接收器差分输入信号	39
6.5.2. 接收器频率容差	39
6.5.3. 外部串扰噪声抑制	39
6.6. 发射器差分输出峰值	40
6.7. PMA 本地回环	40
7. 物理层一致性测试规范	40
7.1. 发射机输出正/负压降	41
7.2. 发射机失真	42
7.3. 发射机时序抖动（主和从）	43
7.4. 发射机功率谱密度（PSD）	45
7.5. 发射机时钟频率（主和从）	46
7.6. 发射机差分输出峰值	47
7.7. MDI 回波损耗	48
7.8. MDI 模式转换损耗	49
7.9. MDI 共模发射	51
8. 总结	52
9. 附录 A-100BASE-T1 发射机测试夹具	52
9.1. 目的	52
9.2. 参考文献	53
9.3. 资源需求	53
9.4. 讨论	53
9.4.1. 引言	53
9.4.2. 布线和适配器	54
9.4.3. 测试夹具 1	54
9.4.4. 测试夹具 2	55



9.4.5. 测试夹具 3	57
9.4.6. MDI 回波损耗和 MDI 模式转换损耗设置	57
10. 附录 D - (信息性) 测试电子控制单元 (ECU) MDI 射频共模发射的方法	58
10.1. 测试设置	58
10.2. 推荐限值	60



1. 引言

本报告旨在阐述 100BASE-T1 物理层基带信号的处理流程。在 100BASE-T1 标准中，物理层负责将上层协议的数据通过物理介质进行传输，而基带信号的处理过程则确保信号在传输过程中的稳定性和可靠性。

报告将详细描述 PCS Transmit 在数据处理中的各个环节，重点阐述如何通过 4B/3B 转换，3B/2T 映射和 2D/1D 转换等技术，完成上层协议的数据在物理编码子层（PCS）的传输。此外，报告还将分析 PMA（物理介质附件）层如何与 PCS（物理编码子层）协同工作，确保信号能够在物理介质上传输并在接收端正确恢复。通过这份报告，可以更深入地理解 100BASE-T1 物理层的信号处理机制。

2. 100BASE-T1 概述

100BASE-T1 物理层通过介质独立接口（MII）支持标准媒体访问控制器（MAC）接口。100BASE-T1 管理功能可通过管理接口选择性访问。每个铜端口支持单对最长 15 米的平衡双绞线链路连接。100BASE-T1 在 MAC 接口上通过单对平衡双绞线电缆提供 100 Mb/s 的数据速率。100BASE-T1 物理层的架构定位如图 2-1 所示。

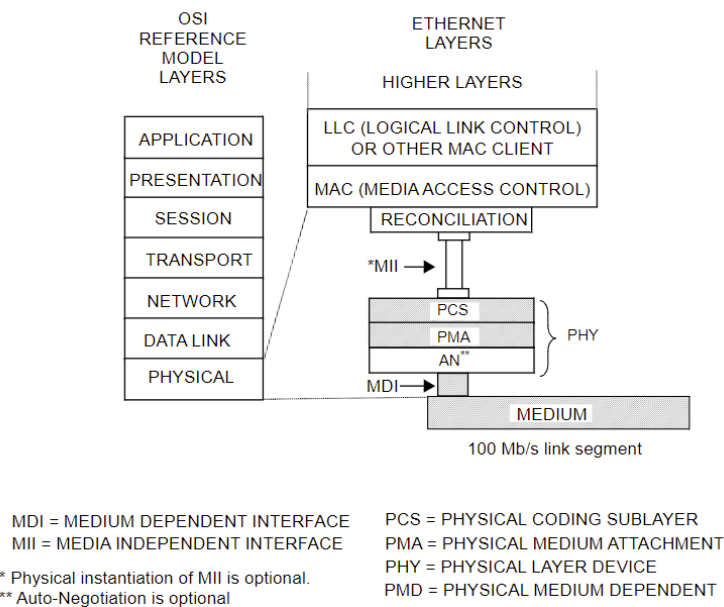


图 2-1 100BASE-T1 在以太网体系结构中的位置

在图 2-1 中，链接 MAC 和 PCS 层的接口叫做 MII，它的定义和最终使用什么介质无关，起到分离 MAC 逻辑功能和实际物理编解码的作用。与之对应的是 PMA 和物理介质之间的接口 MDI（介质依赖接口），它会根据使用介质的不同而不同，在 100BASE-



T1 中, MDI 有两个接口 BI_DA+和 BI_DA-, 分别为差分信号的正负端。PMA 通过一根长达 15 m 的平衡双绞线电缆提供 66.666 MBd 的全双工通信。

100BASE-T1 物理层 (PHY) 使用全双工通信 (采用回声消除技术) 通过单对平衡双绞线进行操作。该 PHY 使用三进制信号, 并与 MII 接口相连。

100BASE-T1 PHY 在以 100 Mb/s 的速率运行时利用了 100BASE-T 和 100BASE-TX PHY 技术, 并引入了新的 PCS、PMA 及其他修改以支持 100BASE-T1 PHY。

该规范中实现通过单对平衡双绞线操作的特性如下:

- a) 具有以太网 MAC 兼容性的全双工通信。
- b) 采用脉冲幅度调制 3 (PAM3) 以在带宽和 EMI 性能之间进行权衡。

自动协商 (AN) 可由 100BASE-T1 设备选择性使用, 用来检测链路另一端设备所支持的能力 (操作模式), 确定共同能力并配置为正常操作。自动协商在链路启动时通过使用半双工差分曼彻斯特编码来执行。自动协商功能的实现是可选的。

2.1. 物理编码子层 (PCS)

100BASE-T1 PCS 向 MII 发送信号或从 MII 接收信号, 向 100BASE-T1 PMA 上的信号发送或从 100BASE-T1 PMA 上接收信号, 100BASE-T1 PMA 支持单对平衡双绞线介质。

2.2. 物理介质附件子层 (PMA)

100BASE-T1 PMA 在单对平衡双绞线电缆介质上向 PCS 传输信号或从 PCS 接收信号, 并支持链路管理和 100BASE-T1 PHY 控制功能。PMA 在最长 15 米的单对平衡双绞线上以 66.666 MBd 的速率提供全双工通信。

2.3. 信令

100BASE-T1 信令由 PCS 生成连续的码组序列, PMA 通过单对平衡双绞线传输这些码组序列。该信令方案实现了多个目标, 包括以下内容:

- a) 实现从四位字节数据到三进制符号以及反向的算法映射和逆映射。
- b) 使传输的符号流中的符号不相关。
- c) 使双向传输的符号流之间不存在相关性。
- d) 能够快速或立即确定符号流是否代表数据或空闲。
- e) 为起始流定界符 (SSD)、结束流定界符 (ESD) 和其他控制信号提供强大的定界符。



f) 能够向远程 PHY 发送本地接收器的状态信号，以表明本地接收器工作不可靠并需要重新训练。

其中，PCS 子层的主要作用是编解码，对于发送数据来说，PCS 将 MAC 层传递来的数据通过编码转化为可用于单对双绞线传输的数字信号形成传输序列传递至 PMA，并且在此过程中同步进行了频率转换，确定了数据传输的频率，也即确定了传输的速率。对于接收数据则相反，此外 PCS 还提供启动和通信控制等功能。

PMA 子层接收到 PCS 的数据序列后转换为对应编码的电信号进行传输，或将接收到的电信号转换为数字编码传递至 PCS 进行解码。PMA 同时提供连接状态检测，链路控制，时钟恢复等功能。图 2-2 是 PCS 和 PMA 的功能框图：

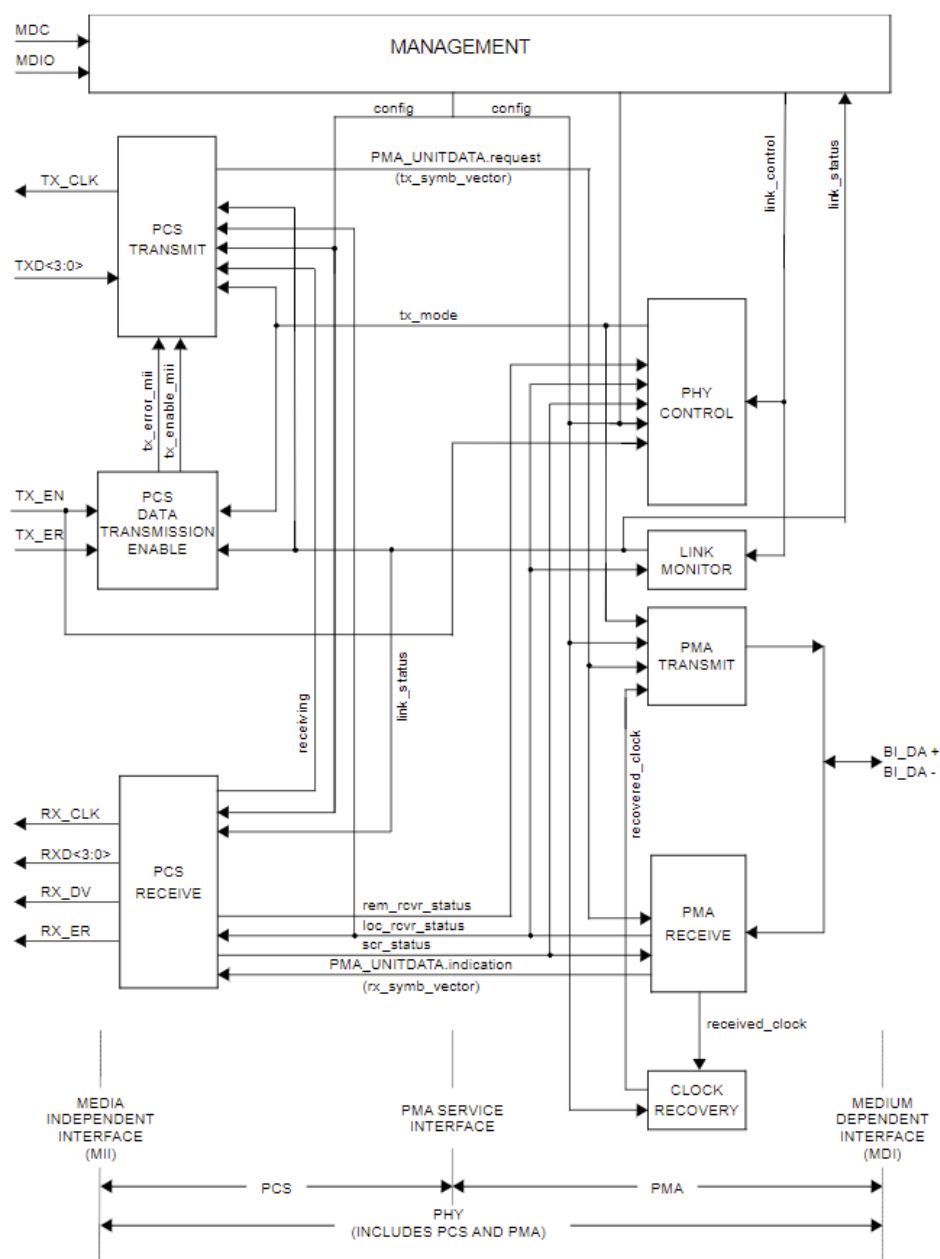


图 2-2 PCS 和 PMA 的功能框图



3. 100BASE-T1 服务原语和接口

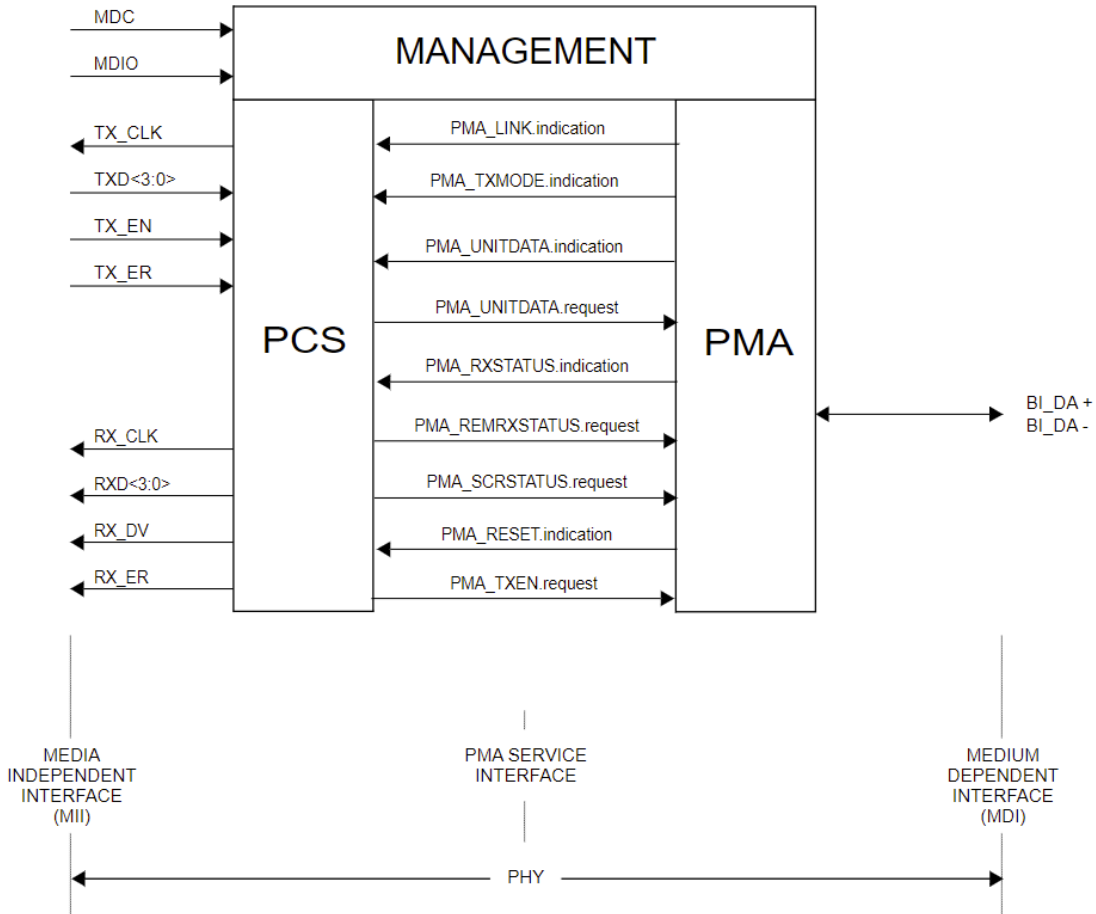


图 3-1 100BASE-T1 PHY 接口

如图 3-1 所示,100BASE-T1 使用以下服务原语通过 PMA 服务接口交换符号向量、状态指示和控制信号:

(1) PMA_LINK.indication

作用: PMA 向 PCS 提供链路状态 (link_status) 的指示。

参数: link_status: 可能取值为 FAIL (链路失败) 或 OK (链路正常)。

用途: 通知 PCS 当前物理链路的状态。

(2) PMA_TXMODE.indication

作用: 指示 PCS 发送路径的操作模式。

参数: tx_mode: 发送模式, 包括 SEND_N (正常发送)、SEND_I (空闲模式发送) 或 SEND_Z (发送全零)。

用途: 控制 PCS 的数据传输行为。

(3) PMA_UNITDATA.request



作用：PCS 向 PMA 请求发送符号向量 (tx_symb_vector)。

参数：tx_symb_vector：要传输的符号数据，表示物理层发送的数据。

用途：用于将 PCS 编码后的符号发送到物理介质。

(4) PMA_UNITDATA.indication

作用：PMA 向 PCS 提供接收到的符号向量 (rx_symb_vector)。

参数：rx_symb_vector：接收到的符号数据。

用途：将物理介质接收到的信号传递给 PCS 进行解码。

(5) PMA_RXSTATUS.indication

作用：指示本地接收器的运行状态。

参数：loc_rcvr_status：接收器状态，取值为 OK 或 NOT_OK。

用途：告知 PCS 当前接收是否可靠。

(6) PMA_REMRXSTATUS.request

作用：PCS 请求远端设备的接收器状态。

参数：rem_rcvr_status：远端接收器状态，取值为 OK 或 NOT_OK。

用途：用于检查远端设备的运行状况。

(7) PMA_SCRSTATUS.request

作用：PCS 通知 PMA 描述符 (descrambler) 的状态。

参数：scr_status：描述符是否同步，取值为 OK 或 NOT_OK。

用途：确保数据流的同步和可靠性。

(8) PMA_RESET.indication

作用：指示 PMA 的复位 (Reset) 状态。

参数：TRUE：复位已启动。FALSE：复位未启动。

用途：通知 PCS 执行复位操作。

(9) PMA_TXEN.request

作用：PCS 向 PMA 请求启用数据发送。

参数：TX_EN：启用发送信号，取值为 TRUE 或 FALSE。

用途：用于数据的启停控制。

4. 100BASE-T1 物理编码子层(PCS)功能

图 4-1 详细说明了 PCS 各模块及其与上层和下层之间的信号流。物理编码子层(PCS)由 PCS 复位、PCS 数据传输使能、PCS 发送和 PCS 接收功能组成。



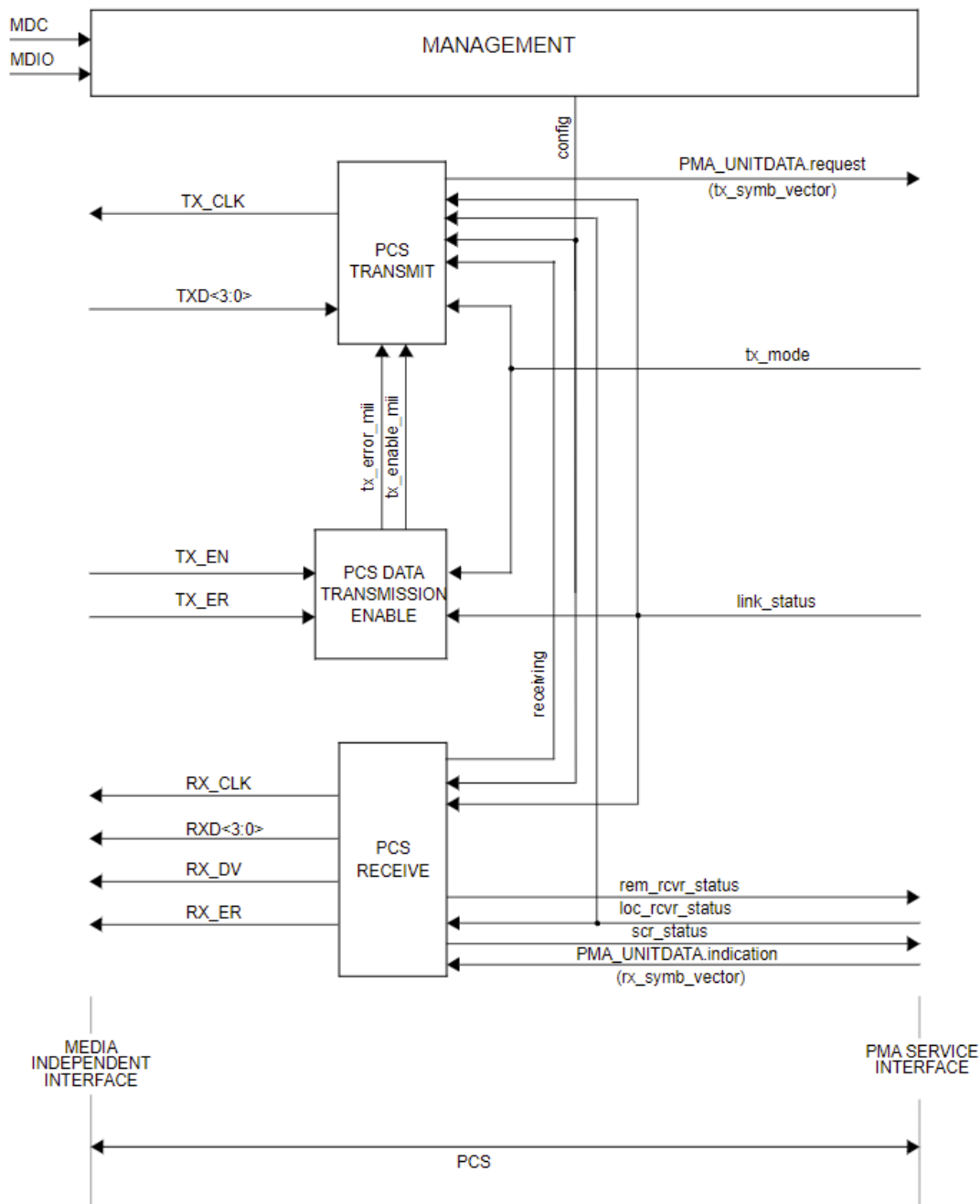


图 4-1 PCS 功能图

4.1. PCS 复位功能

PCS Reset 负责初始化所有 PCS 的功能，当控制器满足下列条件时调用 Reset:

- a) 上电
- b) 接收到控制端的重启信号

当上述任何复位条件成立时，PCS 复位设置 `pcs_reset=ON`。所有状态图在执行 PCS 复位时采用开放式 `pcs_reset` 分支。



4.2. PCS 数据传输使能

PCS 数据传输启用功能应符合图 4-2 中的 PCS 数据传输启用状态图。

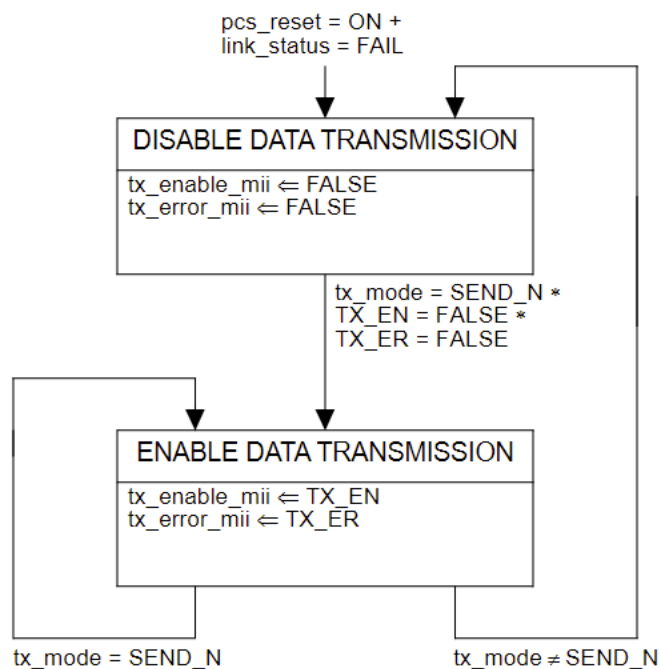


图 4-2 PCS 数据传输启用状态图

在图 4-2 中的变量如下所示：

(1) link_status

作用：由 PMA 链路监测器设置，用于向 PCS 传递链路状态信息。

参数：可取 OK 或 FAIL 两个值。

用途：PCS 根据此参数判断链路是否有效，以决定是否进行数据传输等操作。例如，当 link_status 为 OK 时，PCS 可能允许数据传输；当为 FAIL 时，可能暂停或禁止数据传输。

(2) pcs_reset

作用：由 PCS 复位功能设置，用于指示 PCS 是否处于复位状态。

参数：取值为 ON 或 OFF。

用途：在 PCS 复位操作中，控制其他功能模块的行为。当 pcs_reset 为 ON 时，可能触发相关状态机进入特定的复位分支，初始化 PCS 的各项参数和状态。

(3) tx_enable_mii

作用：在 PCS 数据传输使能状态图中生成，用于控制数据传输的使能状态。

参数：为布尔值，取值 TRUE 或 FALSE。

用途：当 tx_enable_mii 为 TRUE 时，允许数据传输；为 FALSE 时，禁止数据传



输，从而实现对数据传输的精确控制。

(4) tx_error_mii

作用：在 PCS 数据传输使能状态图中生成，用于指示数据传输是否出错。

参数：布尔值，取值 TRUE 或 FALSE。

用途：如果 tx_error_mii 为 TRUE，表示传输过程中发生错误，接收方可能据此进行重传或纠错操作；为 FALSE 则表示传输正常。

(5) TX_EN

作用：MII 接口中的信号，用于指示 MII 上的数据传输是否启用。

参数：布尔值，取值 TRUE 或 FALSE。

用途：PCS 根据 TX_EN 的值来确定是否进行数据发送操作，与 tx_enable_mii 等参数共同协作，确保数据传输的正确性和有效性。

(6) TX_ER

作用：MII 接口中的信号，用于指示数据传输是否发生错误。

参数：布尔值，取值 TRUE 或 FALSE。

用途：当 TX_ER 为 TRUE 时，PCS 可能会采取相应的错误处理措施，如通知发送方重传数据等。

(7) tx_mode

作用：由 PMA PHY 控制功能设置，用于指定 PCS 应传输的码组序列类型。

参数：可取 SEND_Z、SEND_N 或 SEND_I 三个值。

用途：PCS 根据 tx_mode 的值确定如何处理数据，例如当 tx_mode 为 SEND_N 时，进行正常数据或空闲模式的传输；为 SEND_I 时，传输空闲模式码组；为 SEND_Z 时，传输零码组。这有助于实现多种传输模式的切换和控制。

图 4-2 中，当完成重启后 PCS 会将 pcs_reset 置位，作为所有通信状态机的起始状态，在 PCS Reset 运行后启动状态机，当 tx_mode 等于 SEND_N 时，信号 tx_enable_mii 和 tx_error_mii 分别等于 MII 信号 TX_EN 和 TX_ER 的值，否则 tx_enable_mii 和 tx_error_mii 被设置为值 FALSE。

4.3. PCS 传输

物理编码子层 (PCS) 对从介质独立接口 (MII) 接收到的 4 位数据进行 4B/3B 转换，生成三值符号，然后将这些符号发送到物理介质附加子层 (PMA) 以进行进一步处理。具体流程为：

PCS 使用 TX_CLK 在 MII 接收 4 位数据块，并将以 25 MBd 速率的 4 位数据流转换为以 33.333MBd 速率的 3 位数据流。这些位随后经过扰码和 PCS 编码，被转换为



一组编码组（即成对的三值符号）。这些三值符号对随后被复用为以 66.666 MBd 速率的串行三值符号流。

图 4-3 为 PCS 传输中符号生成的框图，图 4-4 为图 4-3 简化后的过程。可以看到整个流程是将从 MAC 传递过来的并行数据转化为了串行数据向量发送到双绞线上，所以这个过程中随着并行数据逐步转换为串行，数据的传输频率也对应升高。

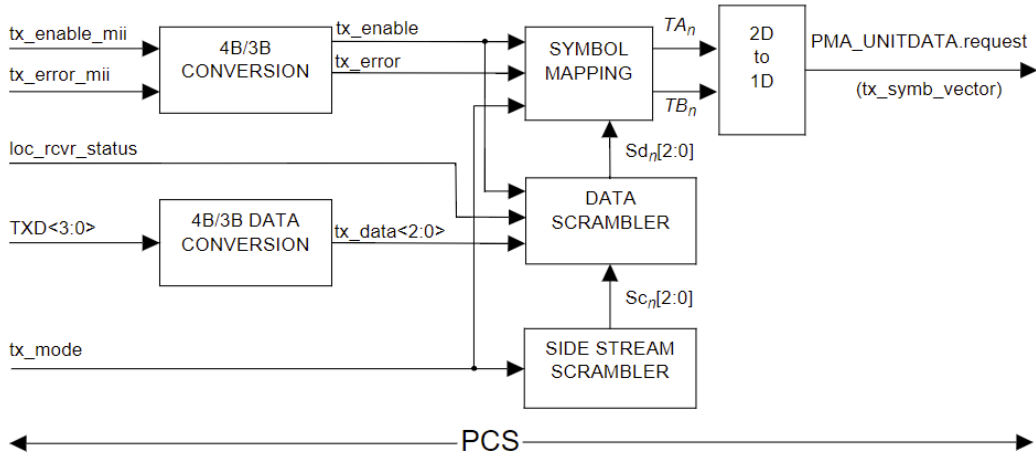


图 4-3 PCS 传输符号生成

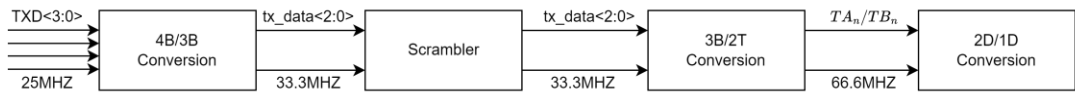


图 4-4 PCS 传输符号生成的简化

4.3.1. 4B/3B 转换

输入：信号 tx_enable_mii、tx_error_mii 和 TXD<3:0>同步于 MII 的 TX_CLK。

输出：信号 tx_data<2:0>、tx_enable 和 tx_error 应与物理编码子层（PCS）的发送时钟 pcs_txclk 同步。

其中，MII TX_CLK 和 pcs_txclk 的频率分别为 25 MHz 和 33.333MHz，以保持 4B/3B 转换后的位流吞吐率一致。若节点 Master，初始的时钟来源于本地时钟，若节点为 Slave，初始的时钟为从对端接收并恢复后的时钟。

II 处的发送数据（TXD<3:0>）首先应转换为一组 3 位（tx_data<2:0>）。当数据包的位数是 3 的倍数时，无需填充，如图 4-5 所示。当数据包的位数不是 3 的倍数时，如图 4-6 和图 4-7 所示，在转换时当源数据末段不足 3bit 时需进行填充，具体填充内容可由开发者定义。（一个完整的传输数据包括：流起始界定符 SSD-Start of Stream Delimeter，数据 tx<2:0>，流结束界定符 ESD - End of Stream Delimeter）。



相应地，tx_enable 信号保持 TRUE，直到数据包中的所有位（如果适用，附加填充位）都进行速率转换。当 tx_error_mii 有效时，PCS 层 tx_error 将持续有效直至传输完所有数据，用以记录错误，当检测到 tx_error 有效后，将发送 ERR_ESD，后续接收端收到后将得知该错误，以进行相应的处理。

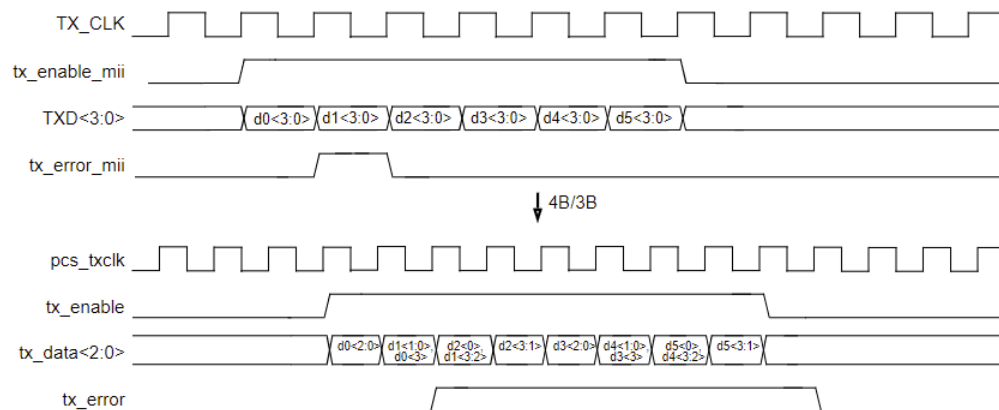


图 4-5 4B/3B MII 信号转换（3nbit 数据，无附加填充位）

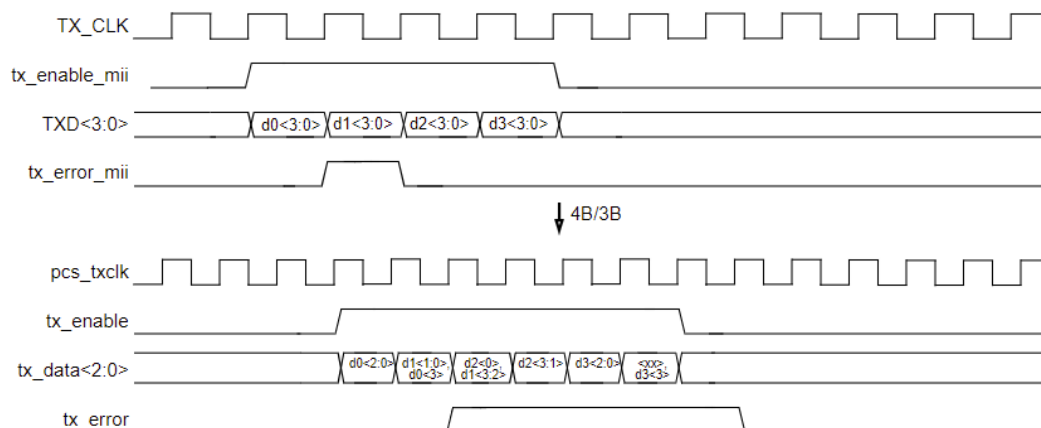


图 4-6 4B/3B MII 信号转换（(3n+1) bit 数据，2 附加填充位）

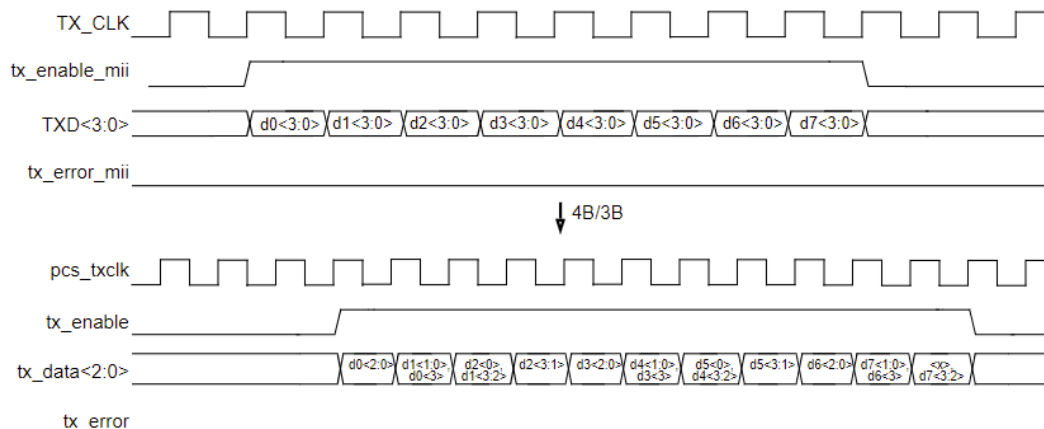


图 4-7 4B/3B MII 信号转换（(3n+2) bit 数据，1 附加填充位）



4.3.2. PCS 传输状态图

PCS 传输功能应符合图 4-8 中的 PCS 传输状态图，以及相关的状态变量、函数、定时器和消息的定义。

(1) 状态变量：

DATA：一个由两个三值符号组成的向量，对应于表示有效数据的编码组。

ERR_ESD3：在发生传输错误时，表示 ESD 的第三编码组的两个三值符号向量，值为 (-1, -1)。

ESD1 和 ESD2 的值均为 (0, 0)，分别表示 ESD 的第一和第二编码组。ESD3 的值为 (1, 1)，表示 ESD 的第三编码组。这些值用于标记数据帧的结束。

IDLE：一个由三值符号组成的向量序列，表示空闲模式下生成的特殊编码组。

link_status 由 PMA 链路监控功能设置，用于表示物理链路的状态。该参数通过 PMA_LINK.indication 原语传递给 PCS。它可以取值为 "OK" (链路正常) 或 "FAIL" (链路失败)。

loc_rcvr_status 表示本地接收器的状态，由 PMA 接收功能设置。通过 PMA_RXSTATUS.indication 原语传递给 PCS。取值为 "OK" (接收器状态正常) 或 "NOT_OK" (接收器状态异常)。

pcs_reset 由 PCS 复位功能设置，用于控制 PCS 是否处于复位状态。取值为 "ON" (复位状态开启) 或 "OFF" (复位状态关闭)。

SSD1、SSD2 和 SSD3 均为两个三值符号组成的向量。它们分别表示起始流分隔符 (SSD) 的第一、第二和第三编码组，值均为 (0, 0)。

TXD<3:0> 是媒体独立接口 (MII) 中的信号，用于传输数据。

tx_enable 是由 PCS 传输模块生成的参数，用于指示是否启用数据传输。当值为 TRUE 时，表示数据传输启用；当值为 FALSE 时，表示数据传输禁用。

tx_data<2:0> 是由 PCS 传输模块生成的传输数据。该数据与 PCS 传输时钟 (pcs_txclk, 33.333 MHz) 同步。

tx_error 是由 PCS 传输模块生成的参数，用于指示是否发生传输错误。当值为 TRUE 时，表示发生错误；当值为 FALSE 时，表示传输正常。

TX_EN 是 MII 中的信号，用于指示传输是否启用。

TX_ER 是 MII 中的信号，用于指示是否发生了传输错误。

tx_mode 是由 PMA 物理层控制功能设置的参数，并通过 PMA_TXMODE.indication 原语传递给 PCS。它有三种可能的取值：SEND_Z：表示发送全零符号；SEND_N：表示发送正常模式下的符号 (如数据、控制符号或空闲符号)；SEND_I：表示发送训练模式下的符号。



Tx_n 是 tx_symb_vector 在时间点 n 的别名。它代表当前时间点生成的符号向量。

tx_symb_pair 是 PCS 传输功能在三值对编码后生成的一对三值符号。每个符号的可能取值为 -1、0 或 +1。

(2) 函数:

ENCODE 是 PCS 传输过程中的一个关键函数,用于将输入参数 tx_data<2:0> 转换为对应的三值符号对 (tx_symb_pair)。

(3) 定时器

symb_timer 是一个与 TX_TCLK (传输时钟) 同步生成的定时器。在 PCS 传输状态图中,消息 PMA_UNITDATA.request 会与定时器 symb_timer_done 的触发同时发生。symb_timer 是一个连续定时器:当定时器到期时,symb_timer_done 条件变为真。定时器到期后立即重启,同时重置 symb_timer_done 条件。定时器的名义周期为 15 纳秒。

symb_pair_timer 是一个与 PCS 传输时钟 (pcs_txclk) 同步生成的定时器。定时器是连续的:当定时器到期时,条件 symb_pair_timer_done 变为真。定时器到期后立即重启,同时重置 symb_pair_timer_done 条件。该定时器的名义周期为 30 纳秒。

(4) 消息

STD 是 symb_pair_timer_done 的别名。

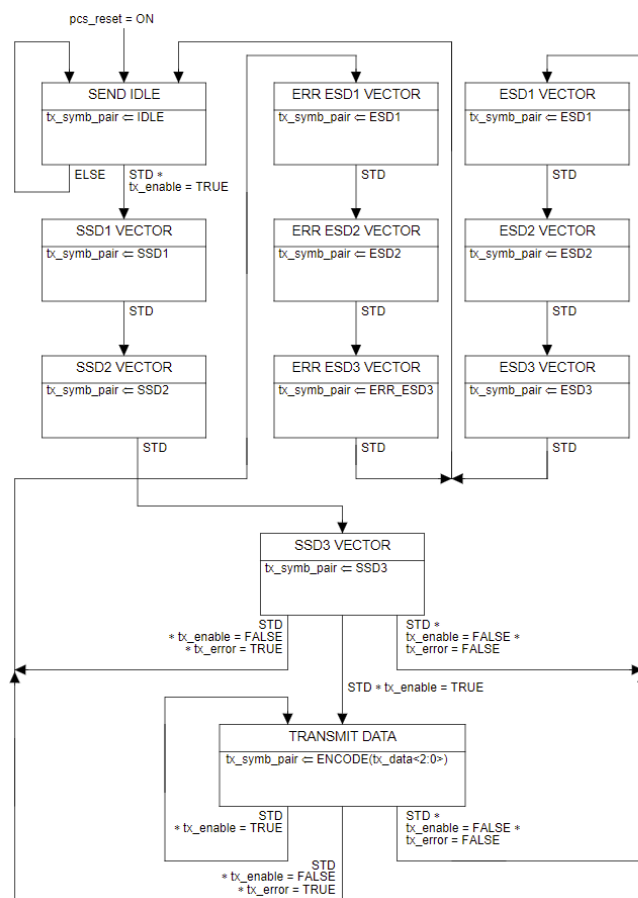


图 4-8 PCS 传输状态图



在每个符号周期内，PCS 传输功能会生成一个符号序列 A_n 并传递给 PMA，操作模式由三种可能的 tx_mode 之一决定，其中符号 A_n 是三值编码（取值为-1、0 或+1）。PMA 将符号 A_n 通过 BI_DA 线对传输。整数 n 是一个时间索引，用于建立不同符号周期之间的时间关系。符号周期 T 的名义值为 15 纳秒。

在正常操作模式下，PCS 传输功能根据 4.3.3 (7) 和 4.3.3 (8) 中定义的 SEND_N 的编码规则生成向量序列。当 tx_enable 被声明时，PCS 传输功能会生成一个由 6 个连续符号组成的起始流分隔符 (SSD)，并传递给 PMA，用以替换前导序列的前 9 位。在 SSD 之后，tx_data<2:0>会按照 4.3.3 中的规定被编码为三值符号，直到 tx_enable 被取消。在 tx_enable 被取消后，会生成一个由 6 个连续符号组成的特殊代码 ESD（在传输错误时生成 ERR_ESD），随后恢复到空闲模式的传输。如图 4-5 和 4-6 所示，如果在数据帧期间 tx_error_mii 因 MII_TX_ER 被声明而被激活，则 tx_error 会被设置为 TRUE 并保持到帧结束以记录此事件。在帧结束时，会检查 tx_error 以确定在 ESD1 和 ESD2 之后传输 ESD3 还是 ERR_ESD3。

100BASE-T1 的 PHY 支持正常操作模式和链路训练操作。在训练模式下，PCS 会忽略 MII 的信号，仅向 PMA 发送空闲信号，直到训练过程完成（由链路伙伴信号指示完成）。训练过程通常包括解扰器锁定、时序获取、回波消除和均衡器收敛等步骤。

如果 tx_mode 的值为 SEND_Z，PCS 在每个符号周期向 PMA 传递一个零向量。

如果 tx_mode 的值为 SEND_I，PCS 传输功能会根据 4.3.3 (6) 中描述的训练模式编码规则生成符号序列。

如果 tx_mode 的值为 SEND_N，PCS 传输功能会在每个符号周期生成符号 A_n ，这些符号可以是数据符号、特殊控制符号（如 SSD 或 ESD），或者空闲符号 (IDLE)，具体定义见 4.3.3 (5)。从空闲模式到数据模式的切换由 SSD 标记，而数据传输的结束由 ESD 标记。

在训练操作期间（当 tx_mode 为 SEND_I 时），接收端可以利用已知的传输符号信息执行信号调节操作，以满足正常操作所需的性能要求。当链路建立后，PHY 进入 SEND_N 模式，发送的 PAM3 符号被接收端 PHY 用于持续的时钟频率和相位跟踪。

4.3.3. PCS 传输符号生成

PCS 传输符号的参考框图如图 4-3 所示（前面已展示此图，这里重新展示此图以方便分析）。



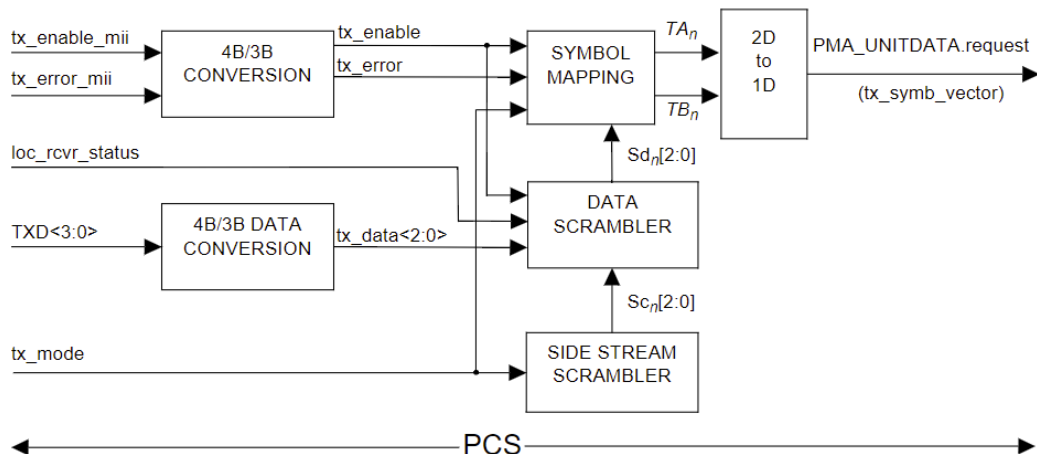


图 4-3 PCS 传输符号生成

(1) 侧流扰码器多项式 (Side-stream scrambler polynomial)

扰码器的作用：

- ① 减少符号相关性：避免传输数据之间的直接相关性，提高数据的抗干扰性。
- ② 功率频谱平衡：通过扰码减少低频成分，提高信号的频谱效率。
- ③ 降低串扰：确保符号的随机分布，以降低电磁干扰 (EMI) 和串扰的风险。

侧流扰码器用于处理侧流数据（如训练信号），输出扰码后的符号流 $Sc_n[2:0]$ 。

(2) $Sy_n[2:0]$ 的生成

$Sy_n[2:0]$ 和 $Sc_n[2:0]$ 的生成应符合并依照 40.3.1.3.2 和 40.3.1.3.3 中定义的编码规则生成。在本规范中， $Sy_n[2:0]$ 向量为 3 位，而 40.3.1.3.2 中的向量为 4 位。PCS 传输层在时间点 n 对 $Sy_n[2:0]$ 和 $Sc_n[2:0]$ 进行编码，以消除传输数据 $tx_data<2:0>$ 的相关性，并生成空闲和训练符号。定义中未使用 $Sy_n[3]$ 。

(3) $Sc_n[2:0]$ 的生成

$$Sc_n[2:0] = \begin{cases} [0\ 0\ 0] & \text{if (tx mode = SEND_Z)} \\ Sy_n[2:0] & \text{else} \end{cases}$$

SEND_Z 模式（全零传输模式）：

在该模式下，系统将 $Sc_n[2:0]$ 固定为 $[0\ 0\ 0]$ ，表示系统处于零信号状态。这通常用于特定的测试或故障处理。

其他模式：

在正常模式下， $Sc_n[2:0]$ 的值等于 $Sy_n[2:0]$ 。

(4) 扰码位 $Sd_n[2:0]$ 的生成

$tx_data_n<2:0>$ 是经过 4B/3B 转换后的 3 位矢量。

扰码位 $Sd_n[2:0]$ 根据侧流扰码器输出的 $Sc_n[2:0]$ 和数据位 $tx_data_n<2:0>$ 按以下规则生成（公式中的 \wedge 表示异或操作）：



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

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

(5) 三值符号对(TA_n , TB_n)的生成

$Sd_n[2:0]$ 用于生成三值符号对(TA_n , TB_n), 三值符号对(0,0) 在 SSD (起始流分隔符)、ESD (结束流分隔符) 以及包含 tx_error 的 ESD 特殊编码中使用。符号序列(0,0) (0,0)(0,0) 表示 SSD, (0,0) (0,0)(1,1) 表示 ESD, 而(0,0) (0,0)(-1,-1)表示包含 tx_error 的 ESD。

(6) 在 tx_mode = SEND_I 模式下(TA_n , TB_n)的生成

对于三值符号对(TA_n , TB_n)的九种可能取值, 仅使用了其中六种值进行训练, 如表 4-1 所示。用于编码 SSD 和 ESD 的三值符号对在训练过程中不会使用。

表 4-1 训练模式下的空闲符号映射

$Sd_n[2:0]$	TA_n	TB_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

(7) 当 tx_mode = SEND_N 且 tx_enable = 1 时的(TA_n , TB_n)的生成

在数据模式下, $Sd_n[2:0]$ 到三值符号对的映射如表 4-2 所示。

表 4-2 tx_mode=SEND_N 时的数据符号

$Sd_n[2:0]$	TA_n	TB_n
000	-1	-1
001	-1	0
010	-1	1
011	0	-1
Used for SSD/ESD	0	0
100	0	1
101	1	-1
110	1	0



111	1	1
-----	---	---

(8) 当 tx_mode=SEND_N 时空闲序列(TA_n , TB_n)的生成

为了平衡三值符号对(TA_n , TB_n)的功率密度,引入了额外的扰码位 Sx_n 。 Sx_n 的生成规则如下:

$$Sx_n = Scr_n[7] \wedge Scr_n[9] \wedge Scr_n[12] \wedge Scr_n[14]$$

三值符号对(TA_n , TB_n)按照表 4-3 的规则生成。

表 4-3 tx_mode=SEND_N 时的空闲符号

Sd _n [2:0]	tx_mode=SEND_N			
	$Sx_n = 0$		$Sx_n = 1$	
	TA_n	TB_n	TA_n	TB_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

(9) 在 tx_mode=SEND_Z 模式下(TA_n , TB_n)的生成

三值符号对(TA_n , TB_n)为零向量(0, 0)。

(10) 符号序列的生成 (2D/1D 转换)

符号按照交错 (interleave) 的形式从右到左发送到序列中。AB_SEL 信号用于定义码组的交错选择。串行数据流可以通过交错(TA_n , TB_n) (先传输 TA_n , 后传输 TB_n) 或交错(TB_n , TA_n) (先传输 TB_n , 后传输 TA_n) 创建。在数据包结束后,传输 ESD,接着是 IDLE 符号,然后是 SSD,再之后是数据 (DATA)。符号速率是 pcs_txclk 的两倍,也就是完成 3B/2T 的数据到数字电平符号的对应后,最终到达传输线上还需要做最后的数据串行化,将 TA_n / TB_n 交叉排列成一串符号通过双绞线发送出去,最终在线端的频率提高到 66.66MHz。

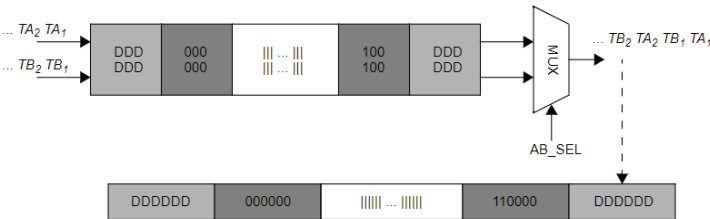


图 4-9 2D/1D 转换



4.4. PCS 接收

4.4.1. PCS 接收状态图

PCS 接收功能应符合图 4-10 和图 4-11 中的 PCS 接收状态图以及相关的状态变量。

DECODE 即通过解析接收到的符号向量识别当前是 IDLE 还是有效数据，当检测到有效数据后按照数据的传输序列分别对 SSD, DATA, ESD 进行解析和检查，识别可能的数据错误。为了避免识别 ESD 出现错误导致接收函数卡在接收数据阶段，定义了一个 rcv_max_timer 用于检测接收数据的时长，当超时后自动重启接收状态机，转为接收 IDLE 状态。图 4-10, 4-11 都是 PCS 接收状态图。

在图 4-10 中，在检测到 SSD3 之后到 DATA 状态之前共有四个状态；同时，在 IDLE 状态（包括 DATA 状态）之前也有四个状态执行数据解码。因此，数据冲刷入延迟线的深度与冲刷出延迟线的深度相同，以确保在 MII 正确接收数据包。

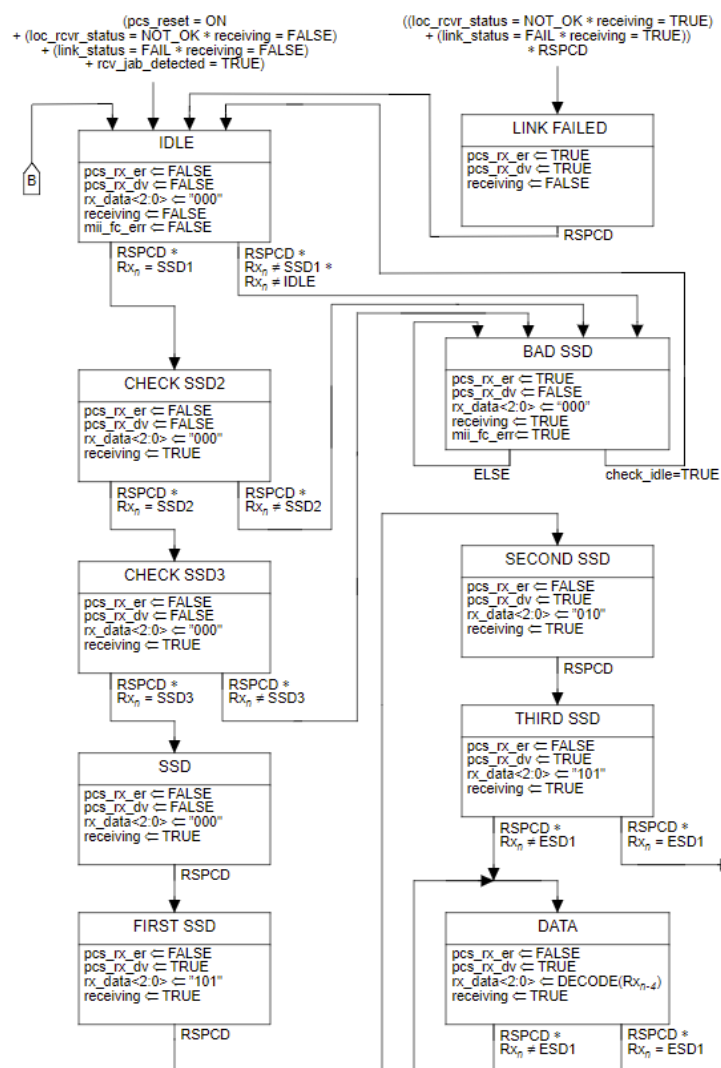


图 4-10 PCS 数据接收状态图



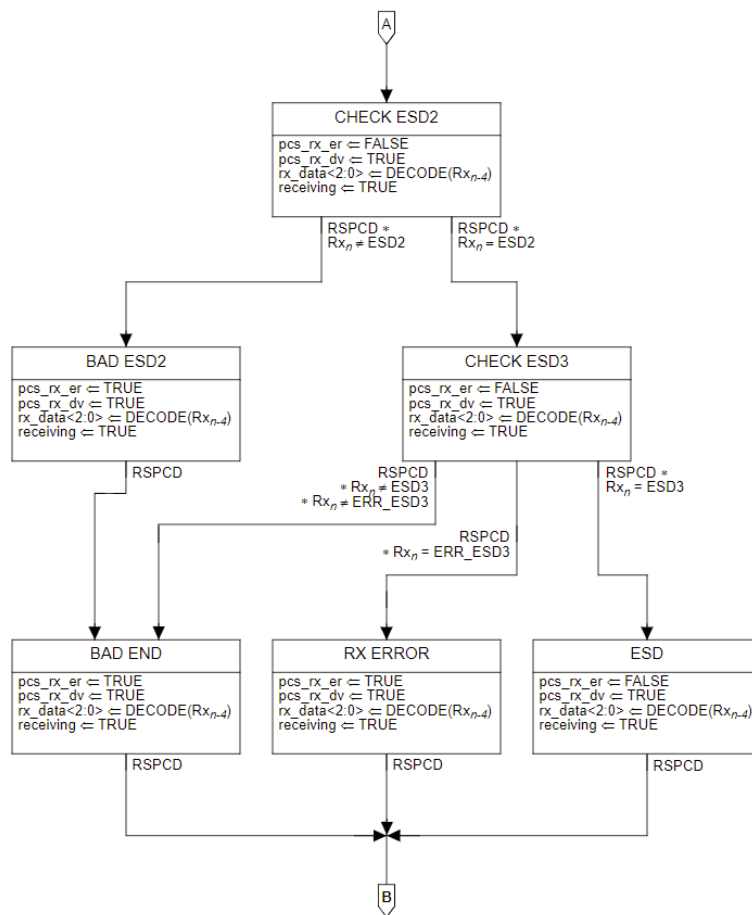


图 4-11 PCS 数据接收状态图

实施了如图 4-12 所示的 JAB 状态机，以防止对 ESD1 和 ESD2 的任何错误检测，否则会使 PCS 接收状态机锁定在 DATA 状态。在 DATA 状态的最大停留时间应小于为 rcv_max_timer 指定的周期。当 rcv_max_timer 到期时，PCS 接收状态机被重置并强制转换到 IDLE 状态。

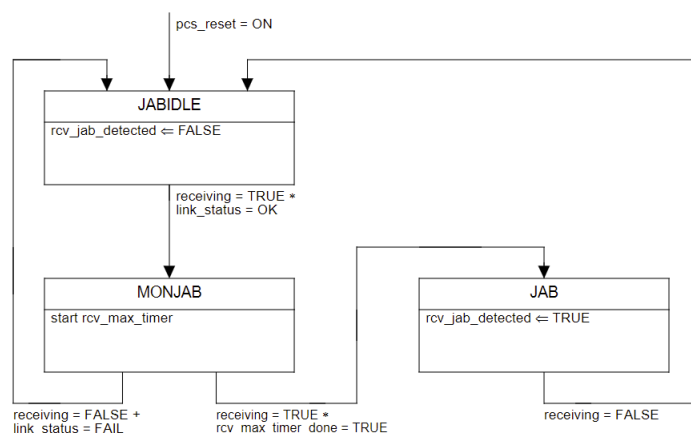


图 4-12 JAB 状态图

图 4-10、图 4-11 和图 4-12 中使用的变量、函数和定时器定义如下：



(1) 变量:

link_status: 由 PMA 链路监测器设置, 取值为 OK 或 FAIL, 用于向 PCS 传递链路状态信息, PCS 据此判断链路状况以决定接收功能的执行方式。

loc_rcvr_status: 由 PMA 接收功能设置, 取值为 OK 或 NOT_OK, 用于告知 PCS 本地接收功能的运行状态, PCS 据此判断本地接收是否可靠以影响数据处理和状态指示。

mii_fc_err: 为布尔值, 取值 TRUE 或 FALSE, 用于指示是否发生错误的载波错误, 在接收数据时辅助判断数据是否因载波错误而受损。

pcs_reset: 由 PCS 复位功能设置, 取值为 ON 或 OFF, 用于控制 PCS 的复位操作, 当为 ON 时触发 PCS 复位以初始化相关参数和状态。

pcs_rx_er: 为布尔值, 取值 TRUE 或 FALSE, 是 PCS 接收错误指示信号, 用于在接收数据时指示接收过程中是否发生错误, 以便接收方采取相应错误处理措施。

pcs_rx_dv: 为布尔值, 取值 TRUE 或 FALSE, 是 PCS 接收数据链路指示信号, 用于指示数据链路状态, 为 TRUE 时表示数据链路有效可进行数据接收和处理。

receiving: 由 PCS 接收功能生成, 取值为 TRUE 或 FALSE, 用于指示 PCS 是否处于数据接收模式, 以确定 PCS 在不同模式下的工作操作。

rcv_jab_detected: 为布尔值, 取值 TRUE 或 FALSE, 根据 JAB 状态机状态设置, 用于记录是否处于 JAB 状态, 在防止 ESD1 和 ESD2 错误检测机制中起作用。

Rx_n: 由 PCS 接收功能在时间 n 生成, 无特定参数, 用于表示接收到的符号对, 在接收数据处理中传递和处理接收到的符号信息。

rx_data<2:0>: 是 PCS 解码后的数据, 为三位数据向量, 用于存储接收并解码后的有效数据, 可后续处理或传递给上层协议。

rx_symb_pair: 由 PCS 接收功能在三元组解码前生成, 是一对三进制符号, 用于表示接收到的符号信息, 作为接收数据处理流程中的中间数据参与转换和还原。

rx_symb_vector: 由 PMA 接收并传递给 PCS, 格式为 SYMB_1D, 是包含三进制符号的向量, 是 PCS 接收功能进行解交织等操作的原始数据来源。

(2) 函数

check_idle: check_idle 函数用于检查解交织后的接收码组是否符合空闲模式编码规则, 返回表示其有效性的布尔值。

DECODE: DECODE 函数依据特定规则将 rx_symb_pair 解码为 rx_data<2:0>, 是 PCS 接收数据解码的关键函数。

(3) 定时器

RSPCD: RSPCD 是与 pcs_rxclk 同步的信号, 用于表明接收符号对转换已完成。

rcv_max_timer: rcv_max_timer 用于限制接收状态机在 DATA 状态的最长停留时间,



到期后触发状态机重置为 IDLE 状态。

4.4.2. PCS 接收符号解码

PCS 接收过程可以看作 PCS 发送过程的倒序，如图 4-13 所示。

首先当 PMA 接收指示正常操作并设置 $loc_rcvr_status = OK$ 时，PCS 接收功能检查符号序列并搜索 SSD 或接收错误指示符。接收器相应地将 rx_symb_vector 的序列解交织为 rx_symb_pair 。

接收到的符号 rx_symb_vector 被解交织以生成 $rx_symb_pair (RA_n, RB_n)$ 。为了实现正确操作，PCS 接收使用空闲模式中采用的编码规则知识。PCS 接收生成符号序列，并通过将参数 scr_status 设置为 OK 来指示解扰器状态的可靠获取。接收到的三进制对 (RA_n, RB_n) 被解码以生成信号 $rx_data<2:0>$ 、 pcs_rx_dv 和 pcs_rx_error 。这些信号通过 3B/4B 转换处理，以在 MII 生成信号 $RXD<3:0>$ 、 RX_DV 和 RX_ER 。

PCS 接收在接收到 SSD 时设置 $pcs_rx_dv = TRUE$ ，在接收到 ESD 或带有错误的 ESD 时设置 $pcs_rx_dv = FALSE$ 。在一个数据包中接收到的位数始终是 3 的倍数，应经过 3B/4B 转换过程，丢弃剩余的 1 位或 2 位数据。

PCS 接收在接收到错误的 ESD、ERR_ESD 或错误的 SSD 时应设置 $pcs_rx_er = TRUE$ 。当状态机到达 IDLE 状态时， pcs_rx_er 被重置为 FALSE。

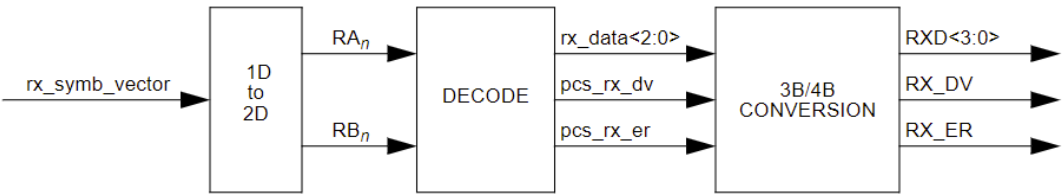


图 4-13 PCS 数据接收符号解码

4.4.3. PCS 接收解扰器多项式

通过对 $rx_data<2:0>$ 应用相关的解扰规则，恢复数据的原始状态，以便后续进行正确的解码和处理。

4.4.4. PCS 接收自动极性检测（可选）

在训练期间，PCS 接收可以通过适当的解码过程进行自动极性检测。在空闲模式下， $Sd_n[2:0]$ 由侧流扰码器生成，其中 $Sd_n[0] = Src_n[0]$ 。根据表 4-1，当为 $Sd_n[0]$ 为 0 时， TA_n 为+1 或- 1；否则， TA_n 为 0。基于此规则， $Src_n[0]$ 应仅根据 RA_n 的值进行解码，然后反馈到侧流解扰器的移位寄存器以实现可靠的状态获取。此后，在每个符号周期，应



将 $Src_n[0]$ 与处理后的 RA_n 值进行比较。在一定时期内的连续一致性意味着扰码器已成功锁定。

极性也可以通过类似的技术在递归过程中自动检测：首先做出极性假设，然后在一定时期内监测解扰器同步，以确定该假设是否正确；如果不正确，则使用不同的极性假设重复相同的过程。

极性检测和校正可以在最早的链路建立阶段同时进行。链路建立从 MASTER PHY 向 SLAVE PHY 发送符号开始。在此初始阶段，所有握手信号状态（如 `rem_rcvr_status`）都已知为 FALSE。利用此先验知识，从设备应准确检测极性。如果检测到极性翻转，从设备应改变其接收信号（ RA_n ， RB_n ）的符号以校正极性。此外，它应反转其发送信号（ TA_n ， TB_n ）。由于 SLAVE PHY 已经处理了极性校正，MASTER PHY 将始终观察到正确的极性。

4.4.5. PCS 接收 MII 信号 3B/4B 转换

和 4B/3B 转化类似，接收时将其反向。MII 接收信号 $RXD<3:0>$ 、 RX_DV 和 RX_ER 与时钟 RX_CLK 同步；而 PCS 接收生成的信号 $rx_data<2:0>$ 、 rx_dv 和 rx_error 应与 pcs_rxclk 同步，以在 3B/4B 转换后保持相同的位吞吐量。 pcs_rxclk 的生成取决于实现。所用时钟根据节点的属性确定，Master 对应自身时钟，Slave 对应经接收信号恢复后的时钟。

接收时如果数据位数不是 4 的倍数，则剩余的位时发送时的填充位，忽略即可。

如果在图 4-10 的 PCS 接收状态图中出现 BAD SSD 状态，则应在转换后在 MII 上指示错误的载波错误。从 pcs_rxclk 域信号到 MII 信号的转换如图 4-14 所示。

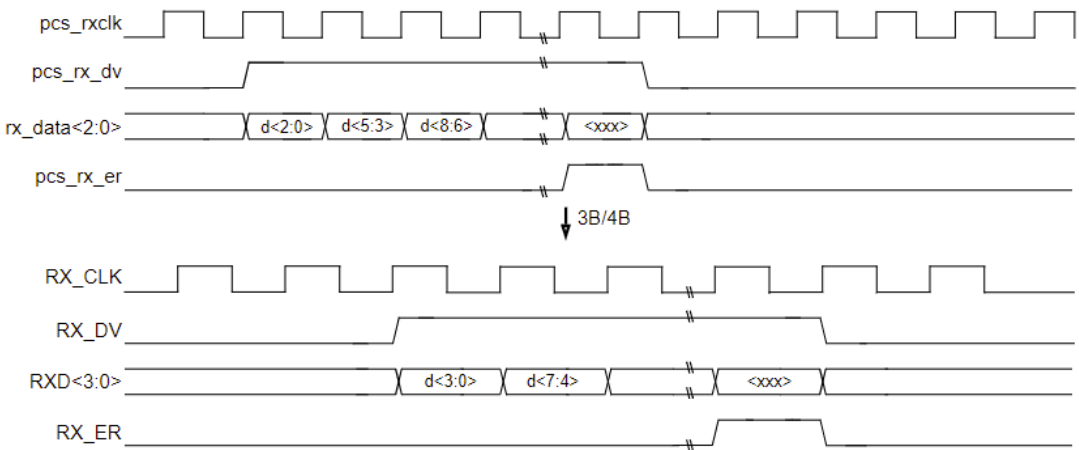


图 4-14 3B/4B 转换



4.5. PCS 本地回环

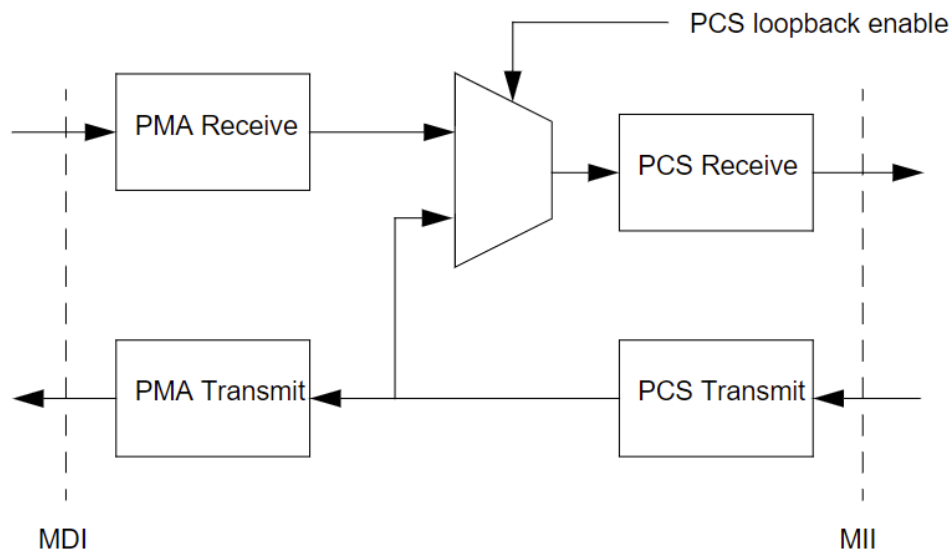


图 4-15 PCS 本地回环数据流

如图 4-15 所示，当 MDIO 中的 loopback 位置为有效时，PCS loopback 功能开启，经 PCS 发送的数据会直接送至 PCS 接收端形成环路，用来验证 PCS 的功能是否正常。

5. 介质附件子层 (PMA)

PMA 将服务接口的消息耦合到 100BASE-T1 物理介质上，并提供链路管理和 PHY 控制功能。PMA 使用 3 级脉冲幅度调制 (PAM3) 实现与介质的全双工通信。PMA 与基带介质之间的接口是介质依赖接口 (MDI)。

PMA 功能如图 5-1 所示。



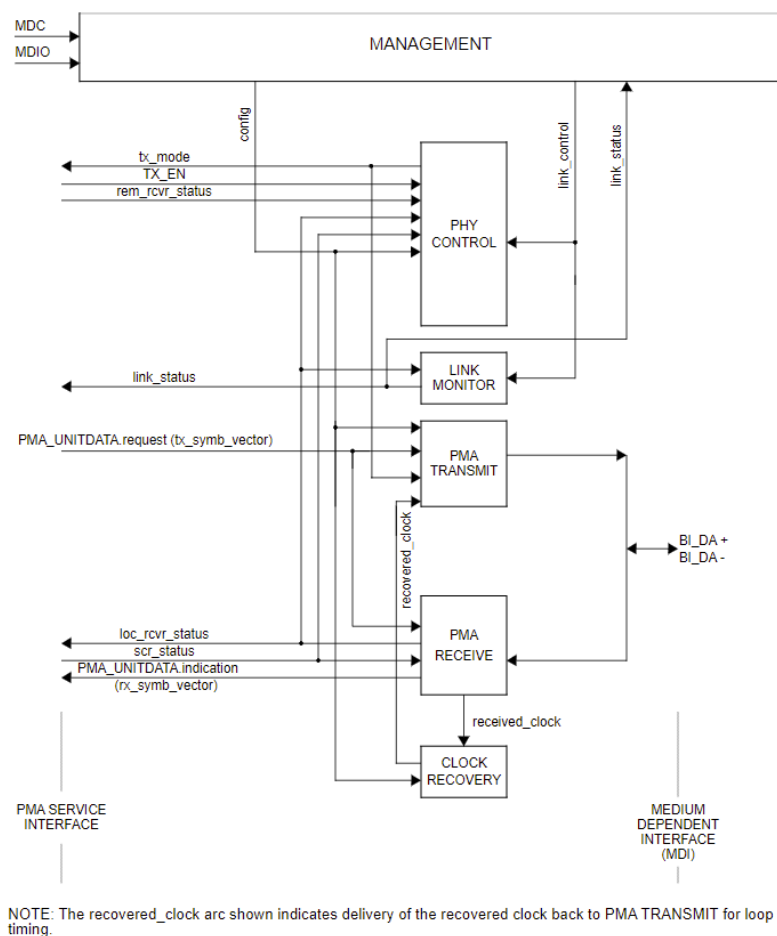


图 5-1 PMA 功能框图

5.1 PMA 复位功能

该功能用于将 PMA 的所有功能重置为初始状态，确保系统在需要时能够重新开始正常工作，并且在复位过程中不涉及低功耗模式相关操作。

5.2. PMA 传输功能

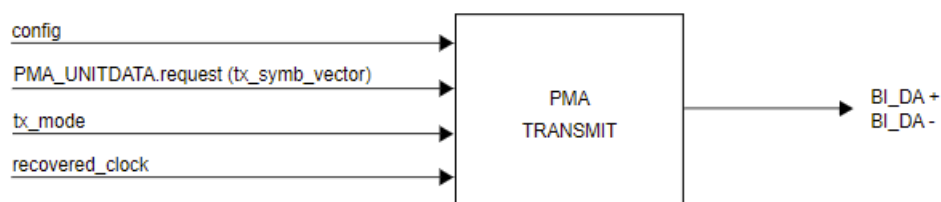


图 5-2 PMA 数据传输

图 5-2 展示了 100BASE-T1 PMA 发送功能的信号流。在传输期间 PMA_UNITDATA.request 使用 tx_symb_vector 向 PMA 传达要通过单个发送对线发送



的符号值。

使用单个发送器在导线上生成 PAM3 信号 BI_DA，使用 66.666MHz 的发送时钟 TX_TCLK，该时钟是主设备的参考时钟。当 config 参数设置为 MASTER 时，PMA 发送功能从本地时钟源获取 TX_TCLK。当 config 参数设置为 SLAVE 时，PMA 发送功能从恢复的时钟获取 TX_TCLK。

PMA 发送故障功能是可选的。此功能检测到的故障是特定于实现的。如果实现了 MDIO 接口，则此功能应映射到规定的发送故障位。

5.3. PMA 接收功能

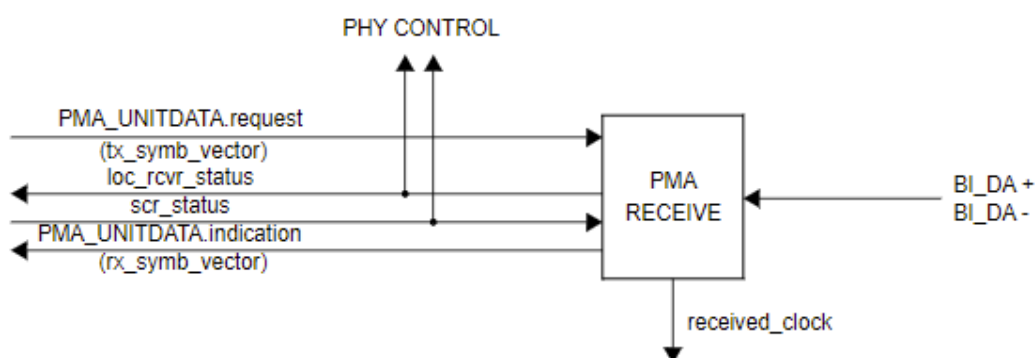


图 5-3 PMA 数据接收

图 5-3 展示了 100BASE-T1 PMA 接收功能的信号流。100BASE-T1 PMA 接收功能主要有三个特性：接收器、能力和子功能。

100BASE-T1 PMA 接收功能包括一个用于接收单对平衡双绞线上的 PAM3 调制信号 (BI_DA) 的单一接收器 (PMA 接收)。PMA 接收具有将单对上接收到的信号转换为 PMA_UNITDATA.indication 参数 rx_symb_vector 的能力。它从 MDI 上通过一个通道接收到的信号中检测三进制符号序列，并将这些序列呈现给 PCS 接收功能。PMA 接收具有信号均衡和回声消除子功能。这些子功能用于确定接收器性能并生成 loc_rcvr_status。loc_rcvr_status 参数由 PMA 接收生成，用于指示本地 PHY 的接收链路状态。此变量向 PCS 发送器、PCS 接收器、PMA PHY 控制功能和链路监视器指示整体接收链路的状态是否正常。scr_status 由 PCS 接收器生成，用于向本地 PHY 指示解扰器的状态。它向 PMA 接收功能传达解扰器是否已实现同步的信息。

PMA 接收故障功能是可选的。PMA 接收故障功能是 link_status=Fail 与任何实现中特定的故障进行逻辑或。如果实现了 MDIO 接口，则此功能应映射到规定的接收故障位。



5.4 PHY 控制功能

从图中可以看到 PHY Control 模块参与以下信号的接收发送：

(1) 发送：tx_mode 发送模式，包含 SEND_I, SEND_N, SEND_Z。

(2) 接收：

TX_EN 来自 PCS 的发送使能信号；

rem_rcvr_status 远端接收状态，由 PCS Receive 确定的用于描述对端节点接收功能正确与否；

loc_rcvr_status 本地接收状态，由 PMA Receive 确定的本地接收功能的正确与否；

scr_status 串扰状态，指示减扰器（descrambler）是否同步；

config，来自管理模块的配置项，包含如 Master/Slave 配置信息。

PHY Control 模块通过接收到的状态信息确定发送模式 tx_mode 到 PCS，从而控制 PHY 进行数据发送或特殊符号（idle）发送，过程如图 5-4 所示。

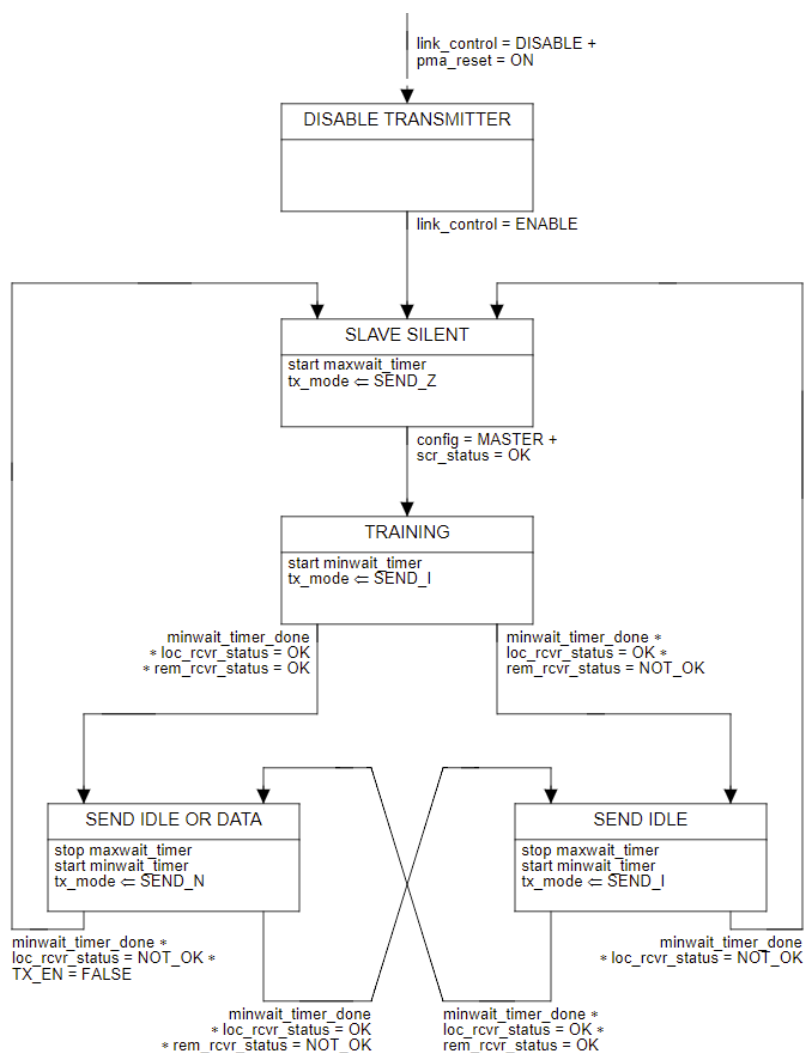


图 5-4 PHY 控制状态图



首先两个相连的节点通过强制模式 Force mode 来初始化链路，根据管理模块的配置信息或硬件设置来确定 Master/Slave 极性。初始化并完成连接并且 scr_status=OK 时进入 training mode，发送 idle 信号与对端进行匹配（包含解扰器（descrambler）锁定，时间参数获取，回声消除，均衡器收敛等），而后根据 local_rcvr_status, rem_rcvr_status 确定发送模式。

5.5. 连接监控功能

应提供链路监控操作（如图 5-5 的状态图所示）以支持 PHY 控制。link_control 变量在 PHY 初始化期间由管理层控制。基于 loc_rcvr_status 的状态在一定时间内保持 OK 来确定链路状态 OK。在所有情况下，从 power_on=FALSE、转换到 power_on=TRUE、到 link_status=OK 的时间应小于 100 ms。

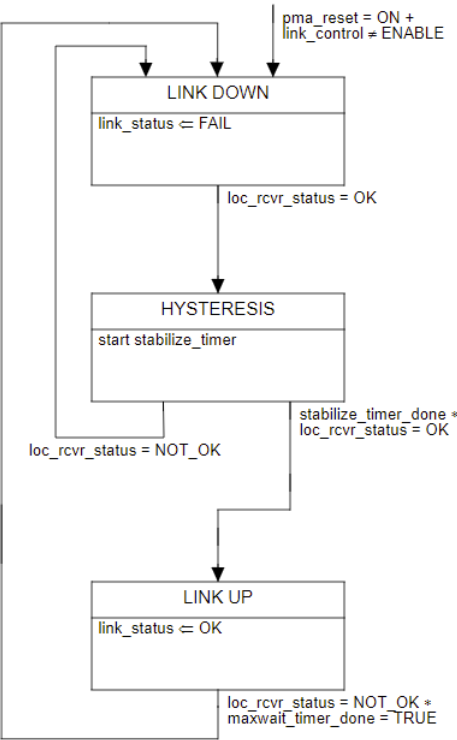


图 5-5 连接监控状态图

5.6. PMA 时钟恢复

以太网的时钟信息包含在信号中，对于 Slave 节点来说，通过从接收到的信号中恢复的时钟达到最佳采样，从而解析信号内容，同时利用该时钟发送信号。



6. PMA 电气规范

本小结定义了 100BASE-T1 以太网 PHY 的 PMA 的电气特性。

6.1. 电磁兼容 (EMC) 测试

直接功率注入(DPI)和 150Ω 发射测试, 可用于建立物理层 EMC 性能的基准。这些测试具有高重复性, 并且在抗干扰能力和发射测量方面具有良好的相关性。需要进行额外的测试来验证各种配置、应用和条件下的 EMC 性能。

6.1.1. 抗干扰性—DPI 测试

在实际应用中, PHY 处的射频(RF)共模(CM)噪声是由电磁干扰耦合到布线系统所产生的。此外, 布线系统和 MDI 的所有部分通过模式转换将共模噪声转化为差模(DM)噪声, 进而在 PHY 中产生额外的差模噪声。PMA 接收器对射频共模噪声的敏感性可以依据 IEC 62132-4 的 DPI 方法进行测试, 并可能需要满足客户与供应商之间商定的更严格的要求。

6.1.2. 发射—传导发射测试

PMA 发射器对其电气环境的发射可以根据 IEC 61967-4 的 150Ω 直接耦合法进行测试, 并且可能需要符合客户和供应商之间协商的更严格的要求

6.2. 测试模式

本子条款中描述的测试模式用于测试发射器波形、发射器失真、发射器抖动以及发射器压降。可以通过设置 PHY 管理寄存器集中的 1.2102.15:13 位 (100BASE-T1 PMA/PMD 测试控制寄存器) 启用这些测试模式。这些测试模式只会改变提供给发射电路的数据符号, 并且不改变发射机和接收机正常(非测试模式)操作的电气和抖动特性。

- a) 测试模式 1——发射机压降测试模式
- b) 测试模式 2——主机模式下的发射机抖动测试
- c) 测试模式 4——发射机失真测试
- d) 测试模式 5——全功率正常操作 (用于 PSD 掩码)

当启用测试模式 1 时, PHY 应传输 N 个“+1”符号, 随后传输 N 个“-1”符号。N 的值应至少为 34 个符号周期, 以确保符号周期大于 500ns。此序列将不断重复。例如, 一



个启用了测试模式 1 且 N 为 40 符号（符号周期为 600ns）的 PHY 将传输一个足够长的模式以进行 500ns 的压降测量。

当启用测试模式 2 时，PHY 应在其通道上重复传输数据符号序列 $\{+1, -1\}$ 。发射器应以 MASTER 时钟模式下的 $66.666 \text{ MHz} \pm 100 \text{ ppm}$ 时钟为基准计时发射符号。

当启用测试模式 4 时，PHY 应传输由以下扰码生成多项式、比特生成和电平映射产生的符号序列：

$$g(x) = 1 + x^9 + x^{11}$$

用于生成此多项式定义的序列的最大长度移位寄存器应在每个符号间隔（15ns）更新一次。在特定时间点 n 存储在移位寄存器延迟线中的位用 $Scr_n[10:0]$ 表示。在每个符号周期中，移位寄存器前进一个位，并生成一个新位，该新位由 $Scr_n[0]$ 表示。位 $Scr_n[8]$ 和 $Scr_n[10]$ 通过异或操作生成下一个 $Scr_n[0]$ 位。位序列 $x0_n$ 和 $x1_n$ 是通过扰码器位的组合生成的，如下方方程所示，并将用于生成三进制符号 s_n ，具体如表 6-1 所示。发送器应以 MASTER 定时模式下的 $66.666 \text{ MHz} \pm 100 \text{ ppm}$ 时钟对发送的符号进行计时。

$$x0_n = Scr_n[0]$$

$$x1_n = Scr_n[1] \wedge Scr_n[4]$$

表 6-1

$x1_n$	$x0_n$	发送的 PAM3 符号
0	0	0
0	1	1
1	0	0
1	1	-1

测试模式 5 用于检查发射器是否符合传输功率谱密度（PSD）掩模的要求。当启用测试模式 5 时，PHY 应发送扰码功能生成的伪随机 PAM3 符号序列。

6.3. 测试夹具

图 6-1、图 6-2 和图 6-3 所示的夹具，或其等效装置，用于测量发射器规格的相关测试。电阻器的容差应为 $\pm 0.1\%$ 。所有的发射器测试均在 MDI 处进行。



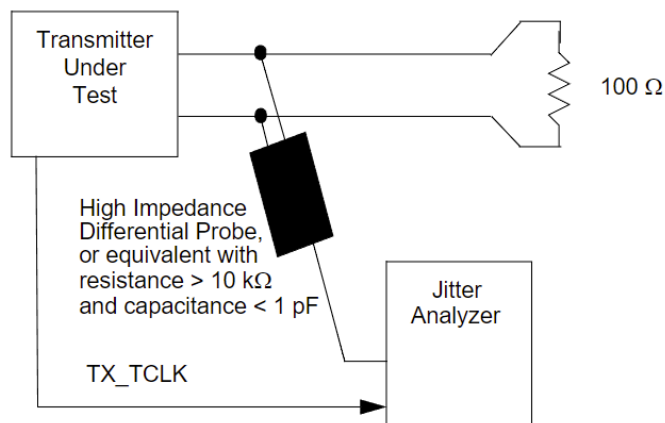


图 6-1 发射机测试夹具 1：压降、抖动

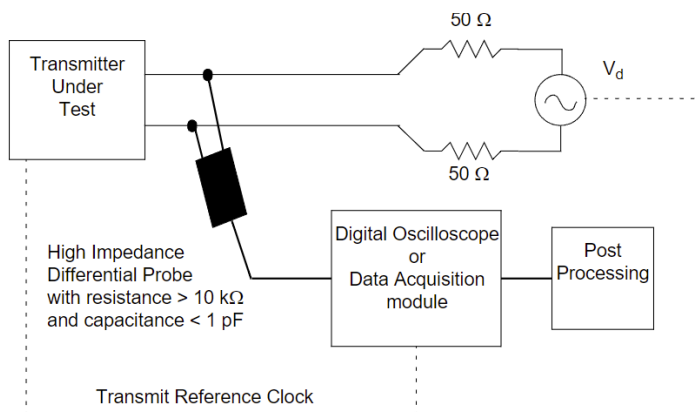


图 6-2 发射机测试夹具 2：失真

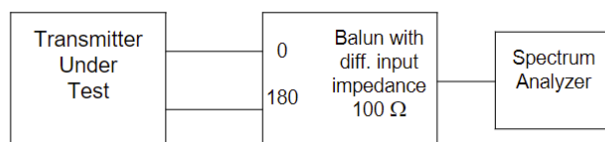


图 6-3 发射机测试夹具 3：PSD 掩码

为了在从机模式下测量发射机抖动, PHY 应提供访问符号速率时钟(频率为 66.666 MHz)的手段, 该时钟用于为发送的符号计时。如果默认情况下未启用此时钟输出, PHY 应提供一种启用此时钟输出的方法。

在图 6-2 中, 干扰信号 V_d 应为正弦波, 与发送参考时钟同步, 其频率为符号速率的六分之一, 差分峰峰值电压为 5.4 V。

干扰信号的生成器应具有足够的线性和范围, 确保在连接到发射器输出时不会引入显著的失真。



6.4. 发射机电气规范

PMA 应通过与 MDI 的交流耦合进行操作。当未指定负载时，发射器应满足本节的要求，连接一个 $100\ \Omega$ 的电阻差分负载（允许的误差范围为 $\pm 1\%$ ）到发射器输出端。

6.4.1. 发射机输出压降

测试模式 1 的输出压降如图 6-4 所示。在发射器处于测试模式 1 并使用发射器测试夹具 1 时，相对于零交叉后的初始峰值和初始峰值后 500 ns 的值测得的正压降和负压降的幅度应小于 45%。

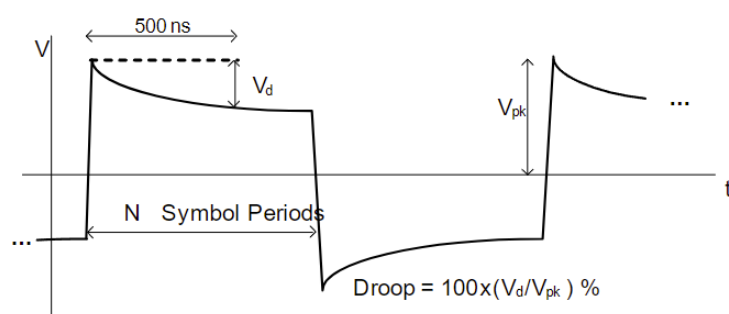


图 6-4 测试模式 1 输出（未按比例）

当 Type A 或 Type C PI 包含在 MDI 内时，相对于零交叉后的初始峰值和初始峰值后 500 ns 的值测得的正压降和负压降的幅度应小于 60%。

6.4.2. 发射机失真

发射器失真通过使用发射器测试夹具 2 捕获测试模式 4 的波形来测量。峰值失真通过以符号速率时钟在任意相位对差分信号输出进行采样，并使用以下代码处理一组连续样本来确定。在一个符号周期的至少 10 个等间隔相位处测得的峰值失真值应小于 15mV。

代码从测量数据中去除干扰信号并计算峰值失真。代码假定干扰信号与数据采集时钟与被测试设备（DUT）的传输时钟是频率锁定的。

```
% 100BASE-T1 100 Mb/s single pair Ethernet PHY
% Test mode4: TX Distortion Post Processing
% Assumes frequency lock for PHY, data capturing clock and disturber

clear
Ns=2047; % Scrambler length
Nc=70; % Canceller length
```



```

% Generate scrambler sequence
scr=ones(Ns,1);
for i=12:Ns
    scr(i)=mod(scr(i-11) + scr(i-9),2);
end

% PAM3 assignment
tm4=scr.*(1-2*mod(circshift(scr,1) + circshift(scr,4),2));

% Test mode4 matrix
for i=1:Nc
    X0(i,:)=circshift(tm4,1-i);
end

% Read captured data file
% 200us long, 2GSample/sec, 8bits or more accuracy
fid=fopen('RawData.bin','r');
tx = fread(fid,inf,'int16');
fclose(fid);

% LPF 33 1/3 MHz, not required if data capture accuracy is 10 bits or more
[A,B]=butter(3,1/30,'low');
tx=filter(A,B,tx);
tx=tx(1:3:end); % decimate to 10x oversampling

% HPF 1.07 MHz tx = filter([1,-1],[1,-exp(-2*pi/625)],tx);

% Select six periods, 10x oversampling, a row vector
tx=tx((1:6*Ns*10)+2e3)'; % removes HPF transient

% Disturber removal and integration (average) of six periods
TX=fft(tx);
tx=ifft(TX(1:6:end)); % averaged and disturber frequency rejected

```



```

% Level normalization
tx=(tx-(max(tx)-min(tx))/2);

% Compute distortion for 10 phases
for n=1:10
    tx1=tx(n:10:end);
    % Align data and test pattern
    temp=xcorr(tx1,tm4);
    index=find(abs(temp)==max(abs(temp)));
    X=circshift(X0, [0, mod(index(1)+Nc-10,Ns)]);

    % Compute coefficients that minimize squared error in cyclic block
    coef=tx1/X;

    % Linear canceller
    err=tx1-coef*X;

    % Peak distortion dist(n) = max(abs(err));
end

% Print results in mV for 10 sampling phases
format bank
peakDistortion_mV = 1000*dist'
```

6.4.3. 发射机时序抖动

在测试模式 2 中, 相对于无抖动参考的 MDI 输出抖动 (J_{TXOUT}) 的均方根值 (RMS) 应小于 50ps。此处未定义高通滤波器用于抖动测量。非常低频的成分预计通过示波器内存大小在测试设置中被过滤。例如, 采样速率为 20GSample/s 且内存大小为 20 Mbytes 的数字采样示波器只能捕获频率低至 1 kHz 的信号。

在正常操作模式下作为 SLAVE 时, 接收信号上的抖动会反映在 SLAVE 的 TX_TCLK 上。当从符合规范的 MASTER 操作的 PHY 接收有效信号并将测试端口连接到 SLAVE 时, SLAVE TX_TCLK 的均方根抖动值相对于无抖动参考应小于 0.01 UI (单位间隔), 此要求在接收器正确接收数据后生效。测试设置如图 6-5 所示。



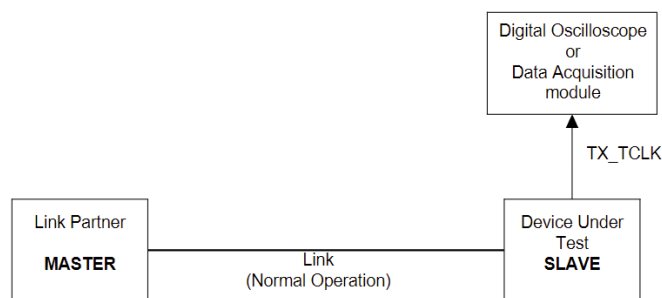


图 6-5 正常模式下从机发射机时序抖动的设置

抖动的均方根值定义为不小于 1 ms 的间隔内计算得出的值，无抖动参考是从每条捕获的周期性波形记录中提取的恒定时钟频率。这基于对频率和相位的线性回归，产生的最小时间间隔误差。

6.4.4. 发射机功率谱密度

当启用测试模式 5 时，PHY 被强制设置为主机模式。在此模式下，将传输一个伪随机的三进制码序列 $\{-1, 0, +1\}$ ，这些码序列映射到 3 个离散的差分信号电平。

在测试模式 5 中，使用图 6-3 所示的测试夹具，发射器的功率谱密度（PSD）应位于下表中指定的上下限之间。上下限分别由下面公式给出，并显示在图 6-6 中。用于 PSD 测量的频谱分析仪设置应为：分辨率带宽=10 kHz，视频带宽=30 kHz，扫描时间 > 60s，且使用 RMS 检测器。

$$\text{Upper PSD}(f) = \begin{cases} -63.3 - 1.5 \times \frac{f-1}{19} \frac{\text{dBm}}{\text{Hz}} & 1\text{MHz} \leq f < 20\text{MHz} \\ -64.8 - 3.7 \times \frac{f-20}{20} \frac{\text{dBm}}{\text{Hz}} & 20\text{MHz} \leq f < 40\text{MHz} \\ -68.5 - 8.0 \times \frac{f-40}{17} \frac{\text{dBm}}{\text{Hz}} & 40\text{MHz} \leq f < 57\text{MHz} \\ -76.5 \frac{\text{dBm}}{\text{Hz}} & 57\text{MHz} \leq f \leq 200\text{MHz} \end{cases}$$

$$\text{Lower PSD}(f) = \begin{cases} -70.9 - 4.9 \times \frac{f-1}{19} \frac{\text{dBm}}{\text{Hz}} & 1\text{MHz} \leq f < 20\text{MHz} \\ -75.8 - 13.4 \times \frac{f-20}{20} \frac{\text{dBm}}{\text{Hz}} & 20\text{MHz} \leq f < 40\text{MHz} \end{cases}$$



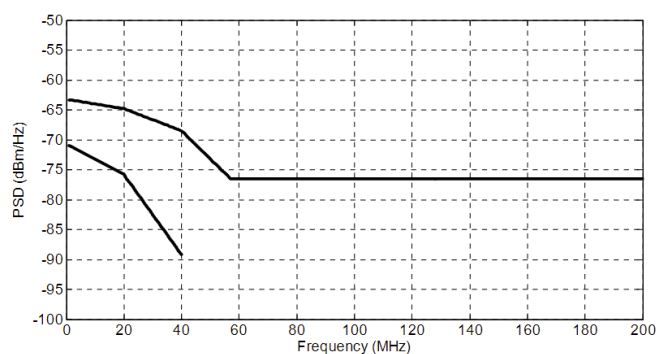


图 6-6 PSD 的上限和下限

6.4.5. 发射机时钟频率

主机 PHY 的符号传输速率应在 $66.666 \text{ MBd} \pm 100 \text{ ppm}$ 范围内。

6.5. 接收器电器规范

PMA 应符合 PMA 接收功能的规定，并满足本节的电气规范。

6.5.1. 接收器差分输入信号

从远程发射器传输并符合发射器电气规范的差分信号，通过链路传输后，接收器应以小于 10^{-10} 的比特错误率接收这些信号。

6.5.2. 接收器频率容差

接收器应能够正确接收符号速率在 $66.666 \text{ MBd} \pm 100 \text{ ppm}$ 范围内的输入数据。

6.5.3. 外部串扰噪声抑制

此规范用于通过两种独立的测试验证被测设备对外部串扰噪声的容忍度。第一项测试使用一个符合 100BASE-T1 标准的发射器作为噪声源，发送空闲符号。噪声在 MDI 处的电平为标称 100 mV 峰峰值。第二项测试使用一个高斯分布的信号发生器作为噪声源，带宽为 50 MHz，幅度为 -85 dBm/Hz 。接收的 DUT 通过一个电阻网络与这些噪声源连接，如图 6-7 所示，并通过链路段传输。噪声在 DUT 的 MDI 处加入。比特错误率 (BER) 应小于 10^{-10} ，且为了满足此规范，在 MAC/PLS 服务接口测量的 125 个八位字节数据包的帧错误率小于 10^{-7} 。



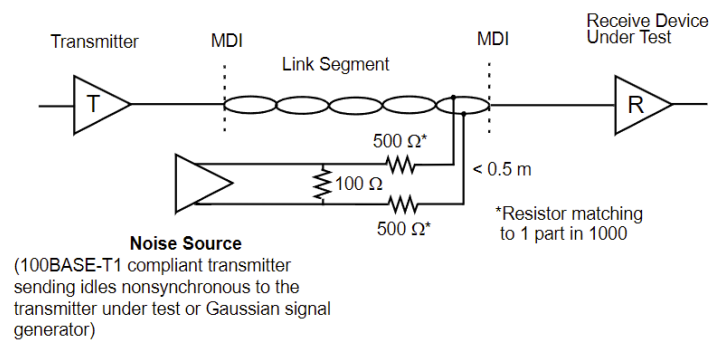


图 6-7 外部串扰噪声抑制测试装置

6.6. 发射器差分输出峰值

在使用 100 Ω 终端测量时，MDI 处的发射差分信号应小于 2.2 V 峰峰值。该限制适用于所有发射模式，包括 SEND_I 和 SEND_N 模式。

6.7. PMA 本地回环

PMA 本地回环功能是可选的。如果支持该功能，当 MDIO 寄存器 1.0.0 中的 PMA 本地回环位被设置为 1 时，PMA 将进入本地回环模式。当 PHY 处于 PMA 本地回环模式时，PMA 接收功能利用来自未终止 MDI 的回声信号，并解码这些信号，将数据传回 MII 接收接口。外部回环的数据流如图 6-8 所示。

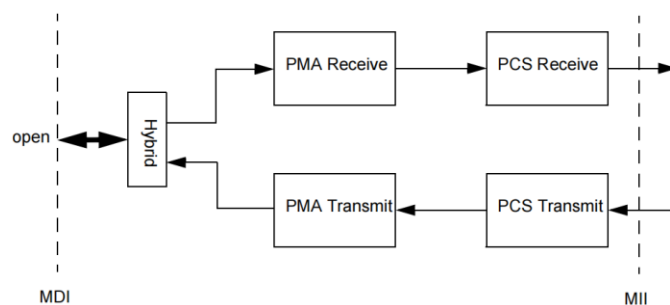


图 6-8 PMA 回边数据流

MAC 客户端可以将通过 MII 传输功能发送的报文与通过 MII 接收功能接收到的报文进行比较，以验证 100BASE-T1 PCS 和 PMA 功能。

7. 物理层一致性测试规范

100BASE-T1 收发信机规范 IEEE802.3bw 规范、OPEN 联盟 TC1*和 TC8 规范。



标准测试编号			详见	描述
IEEE802.3bw	OPEN 联盟 TC1*	OPEN 联盟 TC8		
96.5.4.1	5.1.1	2.2OABR_PMA_TX_01	7.1	发射机输出正/负压降
96.5.4.2	5.1.2	2.2OABR_PMA_TX_08	7.2	发射机失真
96.5.4.3	5.1.3	2.2OABR_PMA_TX_02	7.3	发射机时序抖动（主和从）
96.5.4.4	5.1.4	2.2OABR_PMA_TX_04	7.4	发射机功率谱密度（PSD）
96.5.4.5	5.1.5	2.2OABR_PMA_TX_03	7.5	发射机时钟频率（主和从）
96.5.6	5.1.8		7.6	发射机差分输出峰值
96.8.2.1	5.1.6	2.2OABR_PMA_TX_05	7.7	MDI 回波损耗
	5.1.7	2.2OABR_PMA_TX_06	7.8	MDI 模式转换
		2.2OABR_PMA_TX_07	7.9	MDI 共模发射

7.1. 发射机输出正/负压降

发射机输出正/负压降的规范应符合 6.4.1 中发射机输出压降所述。表 7-1 是测试最大输出压降的过程：

表 7-1

目的	验证发射机输出电平的下降幅度不超过规定的最大值
参考文献	[1] IEEE 标准 802.3bw，子条款 96.5.2 —— 测试模式 （见 6.2） [2] 同上，子条款 96.5.3 —— 测试夹具 （见 6.3） [3] 同上，子条款 96.5.4.1 —— 发射机输出压降（见 6.4.1）
资源要求	实时数字存储示波器（DSO） 差分探头，或带有匹配长度 50Ω 同轴电缆的 2 针转 SMA 适配器 短汽车电缆
讨论	参考资料[1]指出，100BASE-T1 设备应实现 4 种测试模式。这些



	<p>测试模式用于测量电气特性和验证合规性。参考资料[2]定义了用于执行测试的测试夹具，参考资料[1]定义了设备在测试模式 1 下的操作，参考资料[3]提供了发射机最大允许电压降的规范。</p> <p>此测试要求被测设备（DUT）在发射机测试模式 1 下运行。在测试模式 1 下，DUT 应持续发送至少 34 个“+1”符号，然后紧接着发送至少 34 个“-1”符号。</p> <p>电压跌落的计算方法是：先测量峰值电压（V_{pk}）和峰值后 500ns 的电压（V_{delay}），然后计算差值 $V_d = V_{pk} - V_{delay}$，电压降 = $\frac{V_d}{V_{pk}} \times 100\%$。这个计算过程分别在测试模式 1 发送的波形的正负峰值上进行。电压降的幅度应小于 45.0%。</p>
测试设置	请参阅 9 附录 A 9.4.3
测试流程	<ol style="list-style-type: none"> 1. 配置 DUT，使其在发射机测试模式 1 下运行。 2. 将 MDI 的 BI_DA 连接到测试夹具 1。 3. 在波形中找到上升沿初始峰值电压（V_{pk}）。 4. 测量初始峰值后 500ns 处的波形幅度（V_{delay}），以找到下降电压（V_d）。 5. 计算 V_{pk} 和 V_d 之间的电压降。 6. 为提高精度，多次重复步骤 3–5。 7. 使用下降沿参考重复上述步骤。
预期观察结果	正负电压降的最大幅度均应小于 45.0%
潜在的问题	无

7.2. 发射机失真

发射机失真的规范应符合 6.4.2 中发射机失真所述。表 7-2 是测试发射机失真的过程：

表 7-2

目的	验证发射机的失真是否在一致性限制范围内
参考文献	<p>[1] IEEE 标准 802.3bw，子条款 96.5.2 —— 测试模式（见 6.2）</p> <p>[2] 同上，子条款 96.5.3 —— 测试夹具（见 6.3）</p> <p>[3] 同上，子条款 96.5.4.2 —— 发射机失真（见 6.4.2）</p>
资源要求	<p>实时数字存储示波器（DSO）</p> <p>高阻抗差分探头</p> <p>短汽车电缆</p>



	发射机失真适配器
讨论	<p>参考资料[1]指出, 100BASE-T1 设备应实现 4 种测试模式。这些测试模式用于测量电气特性和验证合规性。参考资料[2]定义了用于执行测试的测试夹具以及干扰信号特性。参考资料[1]定义了设备在测试模式 4 下的操作, 参考资料[3]提供了发射机最大允许失真的规范。</p> <p>在本测试中, 通过捕获测试模式 4 波形并找到最小均方误差来测量峰值失真。理想参考信号与观察到的符号之间的峰值误差即为峰值发射机失真。参考资料[3]提供了用于确定峰值失真的 Matlab 代码, 请注意, 此代码假设干扰信号和示波器的数据采集时钟与 DUT 的 TX_TCLK 频率锁定。</p>
测试设置	请参阅 9 附录 A 9.4.4
测试流程	<ol style="list-style-type: none"> 1. 配置 DUT, 使其输出发射机测试模式 4 波形。 2. 按照[2]中所述配置干扰源。 3. 将 MDI 的 BI_DA 连接到测试夹具 2。 4. 捕获测试模式 4 波形中连续 2ms 的符号。 5. 使用[3]中提供的代码, 在 Matlab 中处理 2ms 的捕获数据, 以计算在 1 个单位间隔内 10 个或更多均匀间隔相位偏移处的峰值失真。
预期观察结果	在 1 个单位间隔内所有采样相位偏移处, 峰值发射机失真应小于 15mV
潜在的问题	<p>a. 如果示波器的垂直分辨率小于 10 位, 则在后处理过程中必须使用低通滤波器。[3]中提供的 Matlab 代码包含这样一个低通滤波器。</p> <p>b. 如果 DUT 的 TX_TCLK 无法访问或 DUT 没有外部时钟输入, 测试设备将无法同步内部采样时钟。因此, 测试设备中会出现相位偏移, 测量的失真值很可能比 DUT 的 TX_TCLK 有效时更差。</p>

7.3. 发射机时序抖动（主和从）

发射机时序抖动的规范应符合 6.4.3 中发射机时序抖动所述。表 7-3 是测试发射机时序抖动的过程：

表 7-3

目的	验证 PMA 的发射机时序抖动处于一致性限制范围内
----	---------------------------



参考文献	<p>[1] IEEE 标准 802.3bw, 子条款 96.5.2 —— 测试模式 (见 6.2)</p> <p>[2] 同上, 子条款 96.5.3 —— 测试夹具 (见 6.3)</p> <p>[3] 同上, 子条款 96.5.4.3 —— 发射机时序抖动 (见 6.4.3)</p>
资源要求	<p>实时数字存储示波器 (DSO)</p> <p>差分探头, 或带有匹配长度 50Ω 同轴电缆的 2 针转 SMA 适配器</p> <p>短汽车电缆</p>
讨论	<p>参考资料[1]指出, 100BASE-T1 设备应实现 4 种测试模式。这些测试模式用于测量电气特性和验证合规性。参考资料[2]定义了用于执行测试的测试夹具, 参考资料[3]提供了发射机最大允许时序抖动的规范。</p> <p>情况 1 —— 主发射机时序抖动:</p> <p>当处于测试模式 2 时, PHY 连续发送 “+1” 符号和 “-1” 符号。在此模式下, 发射机输出应为 33.33MHz 信号, 并且在 PHY MDI 输出处测量的均方根时间间隔误差抖动应小于 50ps。均方根时间间隔误差抖动在至少 1ms 的积分时间间隔内测量。</p> <p>情况 2 —— 从发射机时序抖动:</p> <p>从发射机时序抖动仅在 DUT 的 TX_TCLK 暴露且可访问时才能进行测试。对于作为从机的正常操作, DUT 的参考时钟从作为主机的兼容链路伙伴 (LP) PHY 中恢复。从机 TX_TCLK 的均方根时间间隔误差抖动不应超过 0.01 单位间隔 (150ps)。</p>
测试设置	请参阅 9 附录 A 9.4.3
测试流程	<p>(一) 主发射机时序抖动</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 配置 DUT, 使其在发射机测试模式 2 下运行。 2. 将 MDI 的 BI_DA 连接到测试夹具 1。 3. 捕获至少 1ms 并处理捕获数据以确定均方根时间间隔误差抖动。 4. 为提高精度, 多次重复步骤 3。 <p>(二) 从发射机时序抖动</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 配置 DUT, 使其在正常模式下强制为从机。 2. 配置 LP, 使其在正常模式下强制为主机。 3. 将 DUT 的 TX_TCLK 连接到 DSO。 4. 使用短汽车电缆实现 DUT 和 LP 之间的链路连接。 5. 捕获至少 1ms 并处理 TX_TCLK 的捕获数据以确定均方根时间间隔误差抖动。 6. 为提高精度, 多次重复步骤 5。



预期观察结果	<p>(一) 主发射机时序抖动</p> <p>在 MDI 输出处测量的均方根时间间隔误差抖动不应超过 50ps</p> <p>(二) 从发射机时序抖动</p> <p>从机 TX_TCLK 的均方根时间间隔误差抖动不应超过 0.01 单位间隔 (150ps)</p>
潜在的问题	如果 DUT 不提供对 TX_TCLK 的访问，如[3]中所述，从机抖动（情况 2）测试无法进行

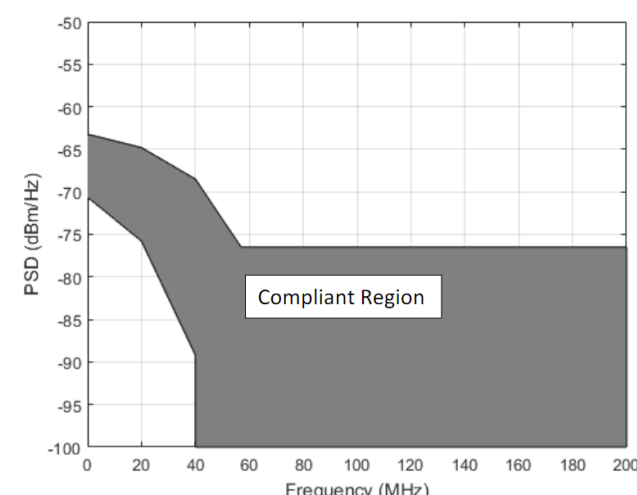
7.4. 发射机功率谱密度 (PSD)

发射机功率谱密度的规范应符合 6.4.4 中发射机功率谱密度所述。表 7-4 是测试发射机功率谱密度的过程：

表 7-4

目的	验证发射机功率谱密度处于一致性限制范围内
参考文献	<p>[1] IEEE 标准 802.3bw, 子条款 96.5.2 —— 测试模式（见 6.2）</p> <p>[2] 同上, 子条款 96.5.3 —— 测试夹具 （见 6.3）</p> <p>[3] 同上, 章节 96.5.4.4 —— 发射机功率谱密度（见 6.4.4）</p>
资源要求	<p>频谱分析仪（SA），或具有频谱测量功能的实时数字存储示波器（DSO）</p> <p>巴伦（如果需要）</p> <p>差分探头，或带有匹配长度 50Ω 同轴电缆的 2 针转 SMA 适配器</p> <p>短汽车电缆</p>
讨论	参考资料[1]指出，100BASE-T1 设备应实现 4 种测试模式。这些测试模式用于测量电气特性和验证合规性。参考资料[2]定义了用于执行测试的测试夹具，参考资料[1]定义了设备在测试模式 5 下的操作，参考资料[3]提供了发射机 PSD 掩码。
测试设置	请参阅 9 附录 A 9.4.5
测试流程	<ol style="list-style-type: none"> 1. 配置 DUT，使其在发射机测试模式 5 下运行。 2. 将 MDI 的 BI_DA 连接到测试夹具 3。 3. 按如下方式配置频谱分析仪（SA）设置：分辨率带宽（RBW）= 10KHz，视频带宽（VBW）= 30KHz，扫描时间 > 60 秒，检波器 = 均方根（RMS）。如果使用 DSO，则执行等效设置。 4. 使用 SA（或 DSO）捕获传输测试模式波形的频谱。 5. 计算发射机的 PSD。



预期观察结果	<p>在测试模式 5 下运行时，发射机输出的 PSD 应符合[3]中定义的发射机 PSD 掩码，如图 7-1 所示。</p>  <p>图 7-1 PSD 范围</p>
潜在的问题	无

7.5. 发射机时钟频率（主和从）

发射机时钟频率的规范应符合 6.4.5 中发射机时钟频率所述。表 7-5 是测试发射机时钟频率的过程：

表 7-5

目的	验证发送时钟的频率处于一致性限制范围内
参考文献	[1] IEEE 标准 802.3bw, 章节 96.5.4.5 —— 发射机时钟频率(见 6.4.5)
资源要求	实时数字存储示波器（DSO） 差分探头，或带有匹配长度 50Ω 同轴电缆的 2 针转 SMA 适配器 短汽车电缆
讨论	<p>参考资料[1]指出，100BASE-T1 设备在主定时模式下运行时，其符号传输速率必须为 $66\frac{2}{3}\text{MHz} \pm 100\text{ppm}$。这对应于 66.6603MHz 至 66.6736MHz 的发送时钟频率。</p> <p>本测试中使用的参考时钟是在测试 6.3（发射机时序抖动 —— 情况 1）中获得的时钟。从传输的测试模式 2 波形中提取的该时钟频率，其基频应为 $66\frac{2}{3}\text{MHz} \pm 100\text{ppm}$。</p>
测试设置	请参阅 9 附录 A 9.4.3
测试流程	1. 配置 DUT，使其在发射机测试模式 2 下运行。



	2. 将 MDI 的 BI_DA 连接到测试夹具 1。 3. 使用窄带宽锁相环 (PLL) 从传输的符号中提取时钟频率。 4. 为提高精度，多次重复步骤 3。 5. 测量发送时钟的频率。
预期观察结果	DUT 生成的发送时钟频率应在 66.6603MHz 至 66.6736MHz 之间
潜在的问题	无

7.6. 发射机差分输出峰值

发射机差分输出峰值的规范应符合 6.6 中发射机差分输出峰值所述。表 7-6 是测试发射机差分输出峰值的过程：

表 7-6

目的	验证峰峰值差分幅度不超过规定值
参考文献	[1] IEEE 标准 802.3bw, 子条款 96.5.6 —— 发射机差分输出峰值（见 6.6） [2] 同上，子条款 96.5.2 —— 测试模式（见 6.2） [3] 同上，子条款 96.5.3 —— 测试夹具（见 6.3）
资源要求	实时数字存储示波器（DSO） 差分探头，或带有匹配长度 50Ω 同轴电缆的 2 针转 SMA 适配器 短汽车电缆
讨论	<p>参考资料[1]指出，任何 100BASE-T1 发射机的峰峰值差分幅度在使用 100Ω 终端测量时应小于 $2.2V_{pp}$。并且该要求适用于所有发射模式，包括 SEND_I 和 SEND_N 模式。</p> <p>此测试可以在 DUT 配置为主机且处于物理层（PHY）控制状态图的训练状态时进行；然而，如[2]中所述的测试模式 5，被标记为“全功率正常操作”，它是通过与 SEND_I 相同的加扰过程发送随机数据生成的。这两种操作模式对于本测试都应足够，并且应产生可比的结果。[3]中定义的测试夹具 1 应用于测量发射机峰值差分输出。</p>
测试设置	请参阅 9 附录 A 9.4.3
测试流程	1. 配置 DUT，使其作为主机运行或在发射机测试模式 5 下运行。 2. 将 MDI 的 BI_DA 连接到测试夹具 1。 3. 测量波形的峰峰值幅度。 4. 为提高精度，多次重复步骤 3。
预期观察结果	波形的最大差分峰峰值幅度应小于 $2.2V_{pp}$



潜在的问题	无
-------	---

7.7. MDI 回波损耗

在 1MHz 至 66MHz 的所有频率下（参考阻抗为 100 Ω），MDI 的回波损耗应满足或超过以下公式。

$$\text{MDI return loss } (f) \geq \begin{cases} 20 & \text{dB} & 1\text{MHz} \leq f \leq 30\text{MHz} \\ 20 - 20 \times \log_{10} \left(\frac{f}{30} \right) & \text{dB} & 30\text{MHz} \leq f \leq 66\text{MHz} \end{cases}$$

如果 Type A 或 Type C PI 包含在 MDI 内，当 PHY 在传输数据或控制符号时，在 1MHz 至 66MHz 的所有频率下（参考阻抗为 100 Ω），MDI 的回波损耗应满足或超过以下公式。

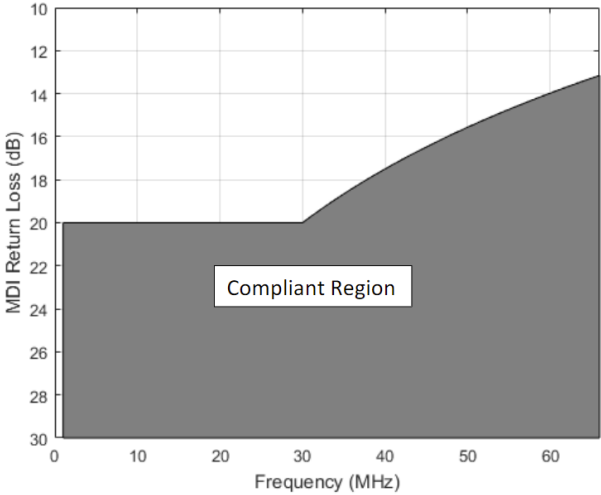
$$\text{MDI return loss}(f) \geq \left\{ \begin{array}{ll} 20 - 20 \times \log_{10} \left(\frac{2}{f} \right) & 1 \leq f < 2 \\ 20 & 2 \leq f < 30 \\ 20 - 20 \times \log_{10} \left(\frac{f}{30} \right) & 30 \leq f < 66 \end{array} \right\} \text{dB}$$

MDI 回拨损耗的规范应符合如上所述。表 7-7 是测试 MDI 回拨损耗的过程：

表 7-7

目的	测量 MDI 处的回波损耗
参考文献	[1] IEEE 标准 802.3bw, 子条款 96.8.2.1 —— MDI 回波损耗（如本节一开始所述）
资源要求	矢量网络分析仪（VNA）、具有频域功能的时域反射仪（TDR）或具有频域功能的实时数字存储示波器（DSO） 巴伦（如果需要） 差分探头，或带有匹配长度 50 Ω 同轴电缆的 2 针转 SMA 适配器 短汽车电缆
讨论	一个符合标准的 100BASE-T1 设备理想情况下应具有 100 Ω 的差分特性阻抗。这是为了与汽车布线的特性阻抗相匹配。这些阻抗之间的任何差异都将导致传输信号的部分反射。回波损耗是衡量由于阻抗不匹配而反射的信号功率的指标。参考资料[1]规定了在 MDI 处测量的反射功率的一致性限制。该规范指出，在传输数据或控制符号时必须保持回波损耗。
测试设置	请参阅 9 附录 A 9.4.6



测试流程	<ol style="list-style-type: none"> 1. 将 DUT 配置为从机模式操作。 2. 校准 VNA（或 TDR、DSO）以消除测试夹具和连接电缆的影响。 3. 将 MDI 的 BI_DA 连接到测试设备。 4. 测量以 100Ω 特性阻抗为参考的 MDI 处的反射。
预期观察结果	<p>以 100Ω 特性阻抗为参考，在 MDI 处测量的回波损耗在 1 至 30MHz 范围内应至少为 20dB，在 30 至 66MHz 范围内应至少为 $20 - 20 \times \log_{10}(f/30)dB$，如图 7-2 所示。</p>  <p style="text-align: center;">图 7-2 MDI 回波损耗范围</p>
潜在的问题	无

7.8. MDI 模式转换损耗

在 MDI 处测量的 PHY 的模式转换纵向转换损耗在 1MHz 至 200MHz 的所有频率下应满足或超过以下公式所规定的限值。

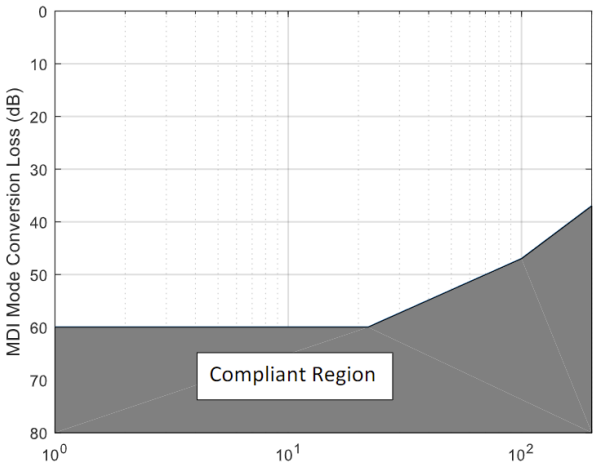
$$\text{MDI mode conversion loss}(f) \geq \begin{cases} 50 \text{ dB} & 1\text{MHz} \leq f \leq 33\text{MHz} \\ 50 - 20 \times \log_{10}\left(\frac{f}{33}\right) \text{ dB} & 33\text{MHz} \leq f \leq 200\text{MHz} \end{cases}$$

MDI 模式转换损耗的规范应符合如上所述。表 7-8 是测试 MDI 模式转换损耗的过程：

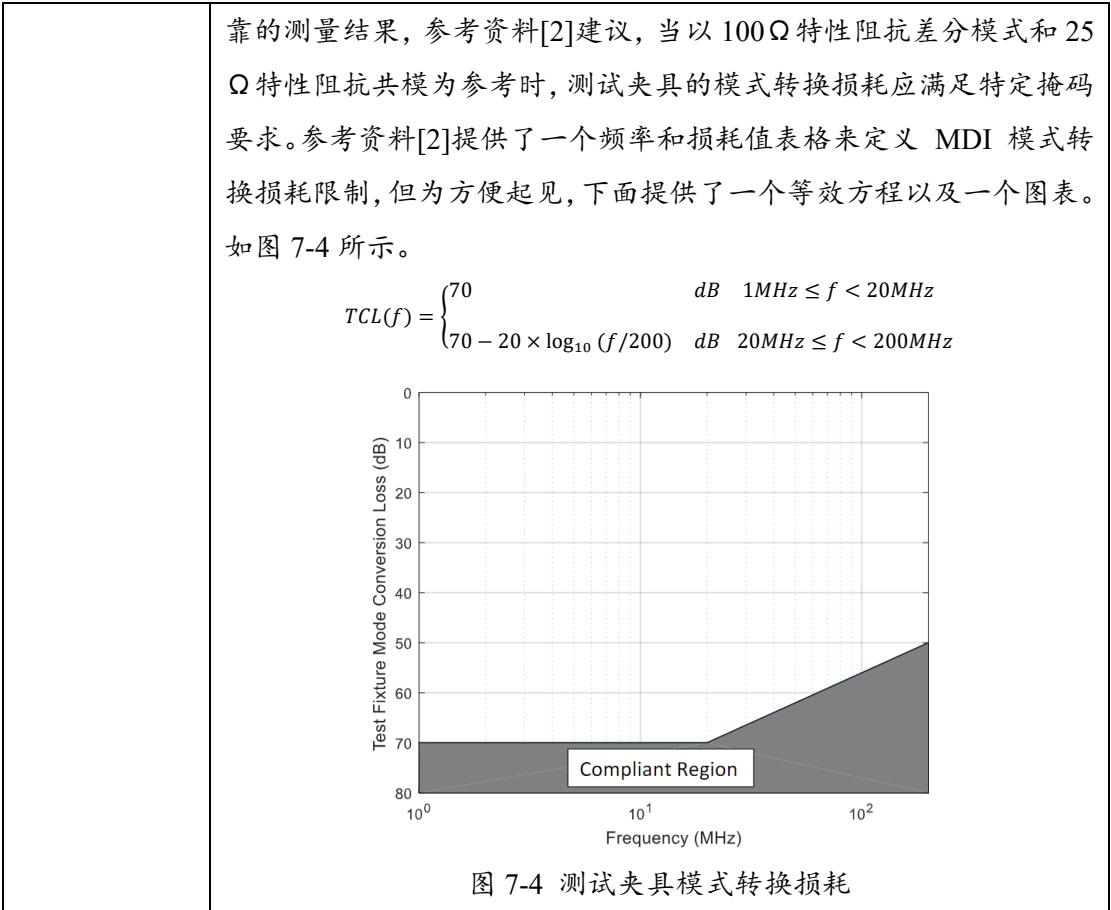
表 7-8

目的	测量 MDI 处的模式转换损耗
参考文献	<p>[1] IEEE 标准 802.3bw, 子条款 96.8.2.2 —— MDI 模式转换损耗（如本节一开始所述）</p> <p>[2] OPEN Alliance TC8 汽车以太网 ECU 测试规范</p>
资源要求	矢量网络分析仪（VNA）、具有频域功能的时域反射仪（TDR）或具



	<p>有频域功能的实时数字存储示波器（DSO）</p> <p>差分探头，或带有匹配长度 50Ω 同轴电缆的 2 针转 SMA 适配器</p> <p>短汽车电缆</p>
讨论	<p>一个符合标准的 100BASE-T1 设备理想情况下应具有 100Ω 的差分特性阻抗，然而，MDI 输出的正负极性不匹配将导致模式转换。参考资料[1]规定了在 MDI 处测量的模式转换的一致性限制。</p>
测试设置	<p>请参阅 9 附录 A 9.4.6</p>
测试流程	<ol style="list-style-type: none"> 1. 将 DUT 配置为从机模式操作。 2. 校准 VNA（或 TDR、DSO）以消除测试夹具和连接电缆的影响。 3. 将 MDI 的 BI_DA 连接到测试设备。 4. 以 100Ω 特性阻抗为参考，测量 MDI 处的模式转换。
预期观察结果	<p>以 100Ω 特性阻抗差分模式和 25Ω 特性阻抗共模为参考，在 MDI 处测量的模式转换损耗应符合[2]中定义的掩码。</p> <p>预期观察结果中描述的限制是在[2]中推导得出的，并根据[1]中提供的 IEEE 定义进行了修改。参考资料[2]提供了一个频率和损耗值表格来定义 MDI 模式转换损耗限制，但为方便起见，下面提供了一个等效方程以及一个图表。如图 7-3 所示。</p> $TCL(f) = \begin{cases} 60 & \text{dB } 1\text{MHz} \leq f < 22\text{MHz} \\ 60 - \left(\frac{13}{\log_{10}(100/22)} \right) \times \log_{10}(f/22) & \text{dB } 22\text{MHz} \leq f < 100\text{MHz} \\ 47 - \left(\frac{10}{\log_{10}(200/100)} \right) \times \log_{10}(f/100) & \text{dB } 100\text{MHz} \leq f < 200\text{MHz} \end{cases}$ 
潜在的问题	<p>在测量模式转换损耗时，测试设置中的布线和测试夹具的阻抗平衡至关重要。用于将被测设备的 MDI 连接到测试设备的任何夹具，相对于 MDI 要求应具有足够的模式转换损耗余量。为了实现高度可</p>





7.9. MDI 共模发射

MDI 共模发射测试用例应按照 10 附录 D 中定义的测试方法执行，从而测量 ECUs MDI 射频共模发射，如表 7-9 所述：

表 7-9

概述	对 DUT 的 MDI 端口射频共模发射进行测量。
前提	<div>1. DUT 被连接到一个稳定的电源上。</div> <div>2. 使用链路伙伴或接口将 DUT 的 PHY 设置为测试模式操作(通过 100BASE-T1、标准以太网、CAN、FlexRay 等)</div> <div>3. DUT 必须能够将其 PHY 设置为测试模式 5。</div>
测试设置	参阅 10 附录 D
测试流程	参阅 10 附录 D
通过标准	如果 MDI 共模发射的值满足 10 附录 D 10.2 图 10-2 中定义的极限，则测试应被归类为通过
测试迭代	参阅 10 附录 D (查看表 10-1 中 Numbers of pass)
注释	如果 DUT 内部有开关，则应对每个端口执行测试。共模发射将在符



	合 10 附录 D 中定义的频率范围内进行测量——表 10-1 MDI 射频共模发射测量装置设置。绝对通过标准在图 10-2 MDI 射频共模发射的推荐限值中给出。如果在超过 70 MHz 的频率范围内违反了限制，则应在测试报告中添加警告或备注。
--	---

8. 总结

本报告总结了 100BASE-T1 以太网物理层标准的实现与关键技术，说明了其服务原语和接口、物理编码子层（PCS）的功能、介质附件子层（PMA）的实现，以及关键模块间的协作关系。在研究过程中，重点分析了 PCS 中的数据传输和接收的流程，以及 PMA 的链路监控、时钟恢复和信号收发机制。

通过上述信号处理流程，100BASE-T1 实现了从数据链路层到物理层以及从物理层到数据链路层的完整数据传输。

在发送端，数据从 MAC 层传输至 PCS（物理编码子层），首先进行 4B/3B 转换、3B/2T 映射、2D/1D 转换，期间通过扰码处理，如侧流扰码器等，最终将数据转换为符号流传递给 PMA（物理介质附件子层），以确保每个数据块具有足够的电平变化，便于接收端同步时钟。然后，符号流经过 PAM3 调制转换为电信号，发送到物理介质中进行传输。

在接收端，接收到的信号首先由 PMA 层进行解调，恢复为原始的符号流，并将其传递至 PCS 层。PCS 层对符号进行解扰，去除扰码的影响，随后进行解码恢复出原始数据流。最后，解码后的数据通过 MAC 层进行处理，完成数据的接收和传输过程。

在学习 100BASE-T1 物理层基带信号处理的过程中，我们深入了解了数据从发送端到接收端的完整传输流程。通过分析 PCS 和 PMA 子层的功能，明白了数据如何在物理层经过编码、扰码、调制、解调、解扰和解码等多个步骤，确保在复杂的网络环境中保持数据的完整性和可靠性。通过这些学习，掌握了 100BASE-T1 物理层的技术细节，对以太网物理层的信号传输机制有了更深的理解。

9. 附录 A-100BASE-T1 发射机测试夹具

9.1. 目的

提供测试夹具 1 到 3 的参考实现，以及其他发送和接收测试设置。



9.2.参考文献

- [1] IEEE 标准 802.3bw, 第 96.5.3 小节 —— 测试夹具
- [2] 同上, 第 96.7 小节 —— 链路段特性
- [3] 同上, 第 96.8 小节 —— MDI 规范
- [4] 同上, 第 96.5.5.3 小节 —— 外部串扰噪声抑制
- [5] 同上, 第 96.5.4.3 小节 —— 发送端时序抖动
- [6] 附录 5.B —— 100BASE-T1 接收测试布线
- [7] OPEN Alliance TC8 汽车以太网 ECU 测试规范

9.3.资源需求

数字存储示波器 (DSO): 支持 1 GHz 带宽, 采样率 2 GS/s 或更高

频谱分析仪 (SA): 支持 200 MHz 以上操作, 动态范围 50 dBm 以上; 或具备频谱测量功能的数字示波器

矢量网络分析仪 (VNA): 支持 200 MHz 以上测量; 或具备频域功能的时域反射仪 (TDR)

包发送/监控系统

差分探头或 2 针转 SMA 适配器, 匹配长度的 50 Ω 同轴电缆

发送失真适配器

高阻抗差分探头: 支持 1 GHz 以上操作

平衡器: 支持 200 MHz 以上操作

干扰信号发生器: 产生 5.4 V 峰峰值, 频率为 11.111 MHz 的正弦波

汽车布线: 多种长度

最差情况下的汽车串扰噪声注入电缆

IEEE 100BASE-T1 100 Mbps 空闲符号噪声源

9.4. 讨论

9.4.1. 引言

[1]定义了用于验证 100BASE-T1 发送端规范的三种测试夹具。本附录提供这些测试夹具的参考实现, 但文中描述的方法不是执行测试的唯一接受方法。此附录描述了可用作测试夹具 1 至 3 的设置, 以及用于 MDI 回波损耗、MDI 模式转换损耗和 PMA 接收测试测量的设置。



9.4.2. 布线和适配器

[2]指出, 100BASE-T1 设计用于 $100\ \Omega$ 单对线缆 (即汽车布线), 而[3]定义了 MDI 连接器可以是汽车行业中任何不劣化信号超 15 米 $100\ \Omega$ 单对线缆的连接器。由于 DUT 制造商可以选择特定的布线和 MDI 连接器, 测试设置需要具有灵活性。因此, 本附录中使用了一种 SMA 适配器板及短汽车布线, 将 DUT 与测试设备连接起来。以下是 2 针转 SMA 适配器的示意图 (见图 9-1)。

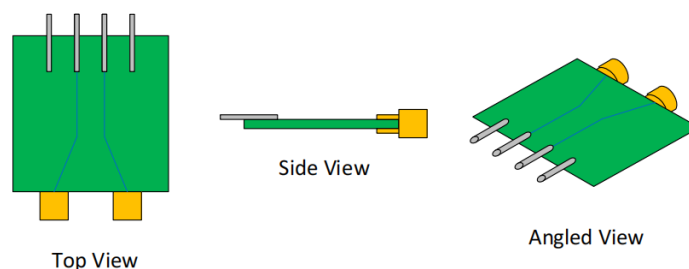


图 9-1 2 针转 SMA 适配器

考虑到可能测试的连接器种类多样, 单一线缆无法连接所有 DUT 至 SMA 适配器。因此, 将使用一根短汽车布线, 一端与 DUT 的 MDI 接口相连, 另一端与上述 SMA 适配器的 2 针接口连接。通过这种方法, 可以为每个 DUT 使用不同的线缆, 并校准线缆和适配器的损耗, 确保测试点位于 DUT 的 MDI。

此外, 为测量发送失真, 开发了一种额外的适配器, 如图 9-2 所示。这种适配器为干扰正弦波提供一个附加的探测点, 同时利用高阻抗差分探头测量测试模式 4 信号和干扰电压的叠加值。

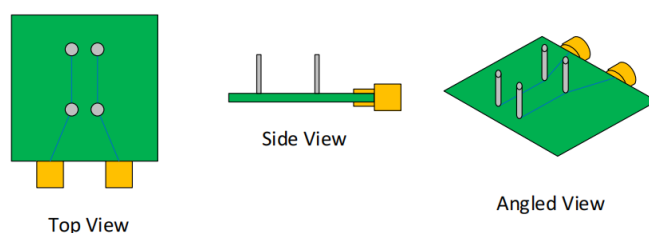


图 9-2 发射机失真适配器

9.4.3. 测试夹具 1

参考资料[1]中描述的测试夹具 1 将用于最大发射机输出电压降和发射机时序抖动 (情况 1: 主发射机时序抖动) 测试。图 9-3 展示了测试夹具 1 的设置示意图。



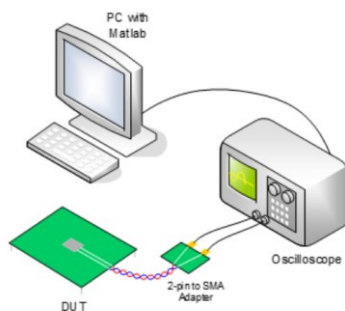


图 9-3 压降，抖动（主机）测试设置（测试夹具 1）

被测设备（DUT）连接到短汽车电缆和 2 针转 SMA 适配器，然后使用匹配长度的 SMA 电缆连接到数字存储示波器(DSO)。测试模式波形被下载到个人电脑上,由 Matlab 脚本对数据进行后处理。或者，也可以使用差分探头和 100Ω 终端来代替 2 针转 SMA 夹具和 50Ω 电缆。

在测试从机抖动时，必须对测试夹具 1 进行修改，从而包括使用 100BASE-T1 链路伙伴。被测设备（DUT）被强制以从机模式连接，并且使用短汽车电缆将介质相关接口（MDI）连接到链路伙伴（LP）的 MDI（链路伙伴被强制以主机模式连接）。然后将 DUT 的发送时钟（TX_TCLK）连接到 DSO。此设置见图 9-4。如果 DUT 的 TX_TCLK 无法访问，则无法按照 6.5 中所述进行从机抖动测试。

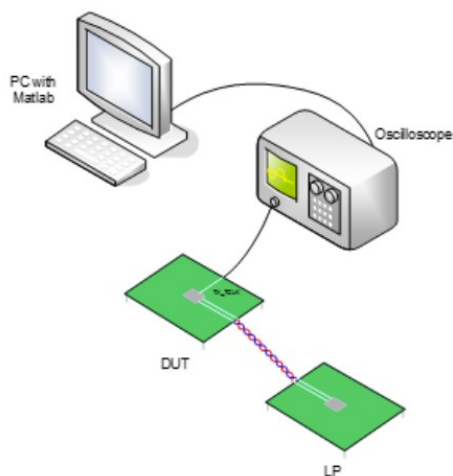


图 9-4 抖动（从机）设置

9.4.4. 测试夹具 2

在测试夹具 2 中，被测设备（DUT）直接连接到一个 100Ω 差分电压发生器。电压发生器发送特定频率和幅度的正弦波，该正弦波被称为干扰信号 V_d 。示波器通过高阻抗差分探头监测 DUT 的输出。干扰正弦波的特性在表 9-1 中给出。

表 9-1 干扰波形的特性



V_d 幅度	V_d 频率
5.4 V 峰峰值	11.111MHz

V_d 的目的是模拟远程发射机的存在。如果 DUT 的线性度不够, 干扰信号将导致 DUT 输出中出现明显的失真产物。请注意, 虽然示波器看到的是 V_d 和 DUT 输出的总和, 但只有 DUT 输出是我们感兴趣的。因此, 需要进行后处理或硬件滤波, 以从测量波形中去除干扰信号。如果使用硬件滤波器从测量波形中去除 V_d , 其位置必须确保 DUT 的 MDI 接收到 V_d , 同时在差分探头路径中被去除。

查看[1]中所示的测试夹具 3 的定义时, 需要注意 V_d 被定义为 50 Ω 电阻之前的电压。因此, 被测发射机看到的电压量是原始幅度的 50%。

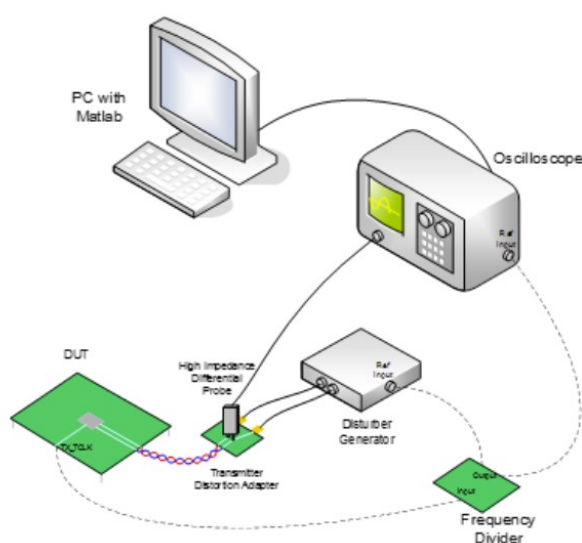


图 9-5 失真测试设置 (测试夹具 2)

IEEE 802.3bw 规范要求用于发射机失真测量的测试设备与 DUT 的 TX_TCLK 同步, 这确保了每个设备的内部采样时钟共享一个公共时钟源并且相位锁定。如何从 TX_TCLK 生成参考时钟未定义, 但可以通过几种方式实现。使用分频器从 $66\frac{2}{3}$ MHz 的 TX_CLK 生成 10 MHz 时钟就是这样一种技术, 在图 9-5 中用虚线表示。然而, 根据 DUT 的设计和外形因素, TX_TCLK 可能无法暴露或引出到可探测引脚。当 TX_TCLK 无法访问时, 失真测试将需要在测试设备不同步的情况下进行。因此, 每个测试设备的时钟源之间会出现相位偏移, 测量的失真值很可能比 DUT 的 TX_TCLK 有效时更差。

IEEE 802.3bw 规范中提供了一个 Matlab 脚本来计算发射机失真。脚本中嵌入了硬件要求的用于捕获测试模式 4 波形的示波器, 包括 2GS/s 的采样率和 8 位或更高的模数转换器 (ADC) 垂直分辨率。它还指出, 如果 ADC 分辨率小于 10 位, 则数据将通过包含一个 3 MHz 低通滤波器的可选代码部分进行处理。然而, 由于示波器采样率和 ADC 分辨率在 Matlab 代码之外未被讨论, 这使得可选代码的实现具有主观性, 取决于测试人员的解释。此外, 用户可用的 ADC 垂直分辨率设置因设备供应商而异。市场上有一



些数字存储示波器（DSO）提供高于 8 位的原生 ADC 垂直分辨率，但大多数 DSO 的原生 ADC 垂直分辨率为 8 位。根据 DSO 的不同，ADC 分辨率可以通过应用数字信号处理（DSP）技术提高到原生设置以上。用于提高 ADC 分辨率的 DSP 的具体细节是专有的，由设备供应商决定是否透露。由于用于提高 ADC 分辨率的 DSP 技术并非完全对用户可用，未指定的滤波可能会人为地降低失真值。测量的失真值将根据 ADC 设置有很大差异，选择 ADC 设置时应小心。在测试发射机失真时，采样率应精确为 2GS/s，并且只有当原生 ADC 分辨率小于 10 位时才使用 Matlab 低通滤波器。

9.4.5. 测试夹具 3

参考资料[1]中描述的测试夹具 3 将用于发射机功率谱密度（PSD）测量。PSD 曲线从频谱分析仪（SA）下载并在 Matlab 中进行后处理。图 9-6 展示了测试夹具 3 的设置示意图。需要一个巴伦将被测设备（DUT）的差分传输转换为 SA 的单端输入。或者，也可以使用数字存储示波器（DSO）来测量 PSD，测试夹具 1（9.4.3）中展示了这样的设置。

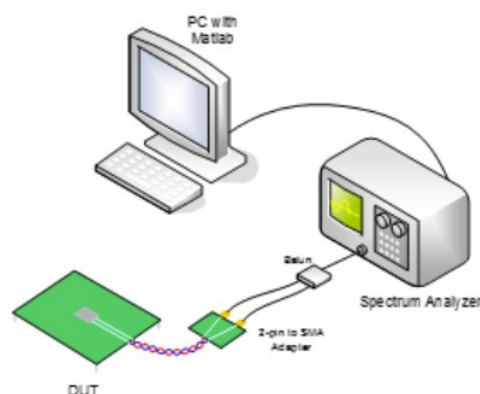


图 9-6 PSD 测试设置（测试夹具 3）

9.4.6. MDI 回波损耗和 MDI 模式转换损耗设置

MDI 回波损耗和模式转换损耗测量通常使用矢量网络分析仪（VNA）进行。根据 VNA 的设计，可能只有一个输入端口，如果是这种情况，则需要使用巴伦将被测设备（DUT）的差分传输转换为 VNA 的单端输入，见图 9-7。然而，如果 VNA 有两个或更多输入端口，则不需要巴伦，见图 9-8。

使用 VNA 时，MDI 模式转换损耗测量必须在多端口网络分析仪上进行。在测量模式转换损耗时，测试设置中布线和测试夹具的阻抗平衡至关重要。除了使用的测试夹具外，强烈建议在测试设置下方放置一个参考接地平面，并牢固地连接到测试夹具以实现充分接地。用于将 DUT 的 MDI 连接到测试设备的任何夹具相对于 MDI 要求应具有足



够的模式转换损耗余量。

或者，也可以使用数字存储示波器（DSO）进行 MDI 测量，本文档中未展示此类设置。为了获得准确的结果，DSO 应具有足够的动态范围以验证合规性。

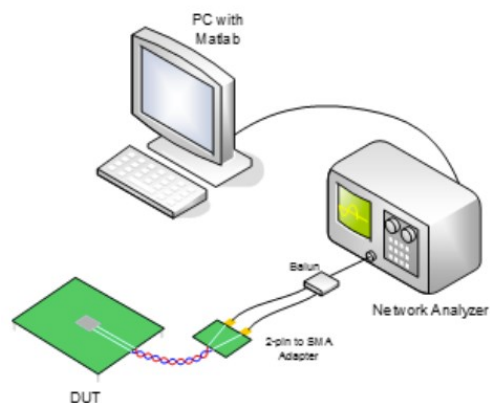


图 9-7 单输入 VNA 的 MDI 回波损耗

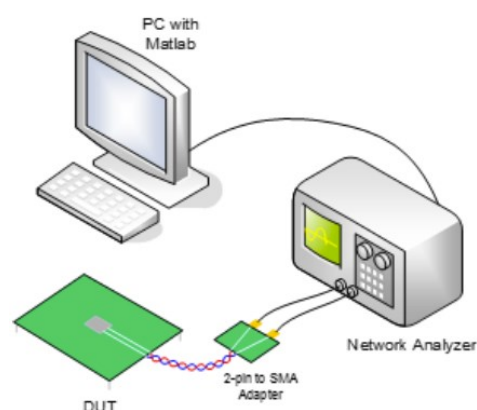


图 9-8 具有两个输入 VNA 的 MDI 回波损耗和 MDI 模式转换损耗

10. 附录 D – (信息性) 测试电子控制单元（ECU）MDI 射频共模发射的方法

这份信息性附录描述了一个测量实际电子控制单元（ECU）MDI 端口射频共模发射的测试方法。该方法可用于评估测试 ECU 中 MDI 接口的正确布局 and 组件实施情况。为此，射频共模发射将直接在 ECU 连接器处进行测量。

10.1. 测试设置

为了确保测量结果的高可靠性，必须使用特定的测试夹具来连接到 ECU 连接器的 MDI 引脚。建议使用符合图 10-1 所示的测试夹具，并遵循 OPEN ALLIANCE: IEEE 100BASE-T1 Definitions for Communication Channel 中的定义。



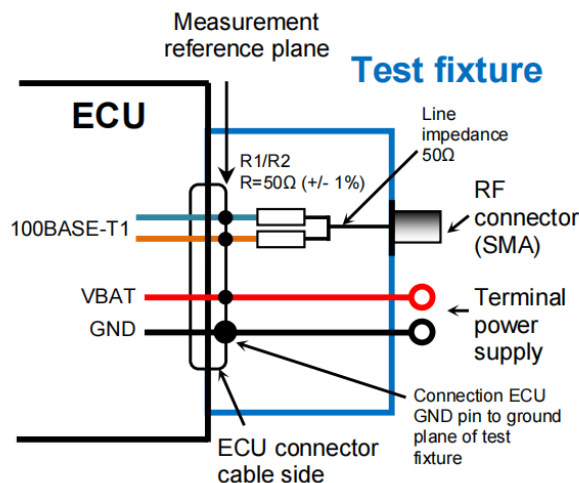


图 10-1 在 MDI 处进行射频共模发射测量的 ECU 测试装置的示例

测试 ECU 的接地引脚应直接连接到测试夹具的接地平面。如果可能，应该将原始的线束连接器作为测试夹具的固定部分。

为了实现高对称性的测试夹具，应将其构建为具有扩展接地平面的 PCB。测试夹具中 MDI 测量路径上的信号走线应尽可能短。测量参考平面与电阻 R1 和 R2 之间的走线应具有 $100\ \Omega \pm 10\%$ 的差分线阻抗，并且长度匹配误差应不超过 0.05 mm。电阻 R1 和 R2 的值应匹配至 0.1% 或更高精度。

表 10-1 MDI 射频共模发射测量装置设置

Measuring equipment	Spectrum analyzer	EMI measuring receiver	Oscilloscope with spectrum analyzer functionality
Measurement unit	dBμV		
Detector	Peak	-	-
Frequency range	1 MHz to 200 MHz		
Resolution bandwidth (RBW)	10 kHz	9 kHz	10 kHz
Video bandwidth (VBW)	> 3 x RBW	-	-
Numbers of passes	10 (max hold)	1	in minimum 10 (max hold)
Measurement time per step	-	≥ 1 ms	-
Frequency sweep time	≥ 20 s	-	-
Frequency step width	-	≤ 0.4 x RBW	-
Time Base	-	-	50 μs/div 500 kS in minimum 1 GSa/s
Amplitude	-	-	≤ 2 mV/div
Input	DC 50 Ω		

ECU 应处于激活供电状态。100BASE-T1 收发器配置为工作模式，并根据 IEEE Std. 802.3bw 设置为测试模式 5。测试夹具的射频连接器应连接到射频频谱测量设备（如 EMI 测量接收器、频谱分析仪或具有频谱分析功能的示波器）。射频测量的设置见表 10-1。

要求所使用的射频频谱测量设备的灵敏度以及测试设置中测量到的外部干扰，应至



少比定义的限制低 6 dB。此项应通过参考测量进行验证，并在测试报告中记录。不得通过数学方法消除噪声底噪（如减去噪声测量值）。为了获得足够的噪声底噪，建议使用屏蔽外壳进行 MDI 射频共模发射测量。

10.2.推荐限值

为了评估 MDI 模式转换测量,要求在 1 MHz 到 200 MHz 的频率范围内进行测量。
图 10-2 中给出了推荐的限制。

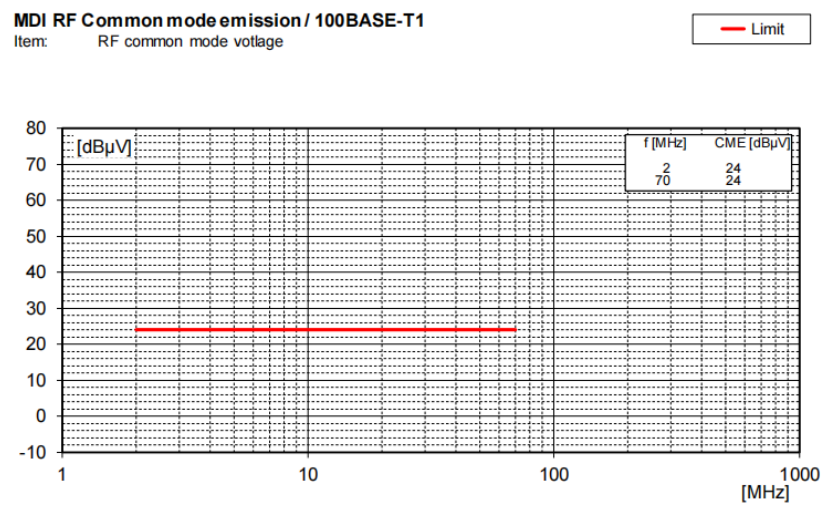


图 10-2 MDI 射频共模发射的推荐限值

