

AN12626

TPL 网络上的 MC33771x/MC33772x 变压器和导线指南

第 2 版 — 2023 年 4 月 18 日

应用笔记

文档信息

信息	内容
关键词	MC33771x、MC33772x、TPL、S 参数、变压器、双绞线
摘要	本应用笔记讲解了变压器和导线的性能，以及系统计算方法。所有推荐的变压器和导线都根据系统功能和电磁兼容性（EMC）进行了验证。



修订历史

版本号	日期	说明
第 2 版	2023 年 4 月 18 日	将安全状态从“公司机密”更新为“公开”。
第 1 版	2020 年 3 月 27 日	初始版本

1 介绍

度和电流而开发的带有变压器物理层 (TPL) 通信调制解调器的器件。目标应用是汽车和工业应用，如电池电动车 (BEV)、插电式混合动力车 (PHEV)、储能系统 (ESS)。MC33771A、MC33771B、MC33772A 和 MC33772B 带有第一代 TPL 通信调制解调器。MC33771C 带有第二代 TPL 通信调制解调器，以延长通信距离。它们的不同之处将在下一节中讲述。MC33771B 和 MC33772B 的数据手册给出了一般的外设设置和配置，但在汽车应用场景下，器件性能可能比预期的要差。因此，本应用笔记旨在解释不同变压器和双绞线配置下的 TPL 性能，以便逐案评估 TPL 通信。

2 TPL 调制解调器的性能

2.1 什么是 TPL

TPL 是一种利用脉冲变压器实现的高速差分隔离通信。要选择变压器通信模式，需要将 SPI_COM_EN 引脚接到 CGND 引脚上。

对于变压器通信，按图 1 所示进行配置。

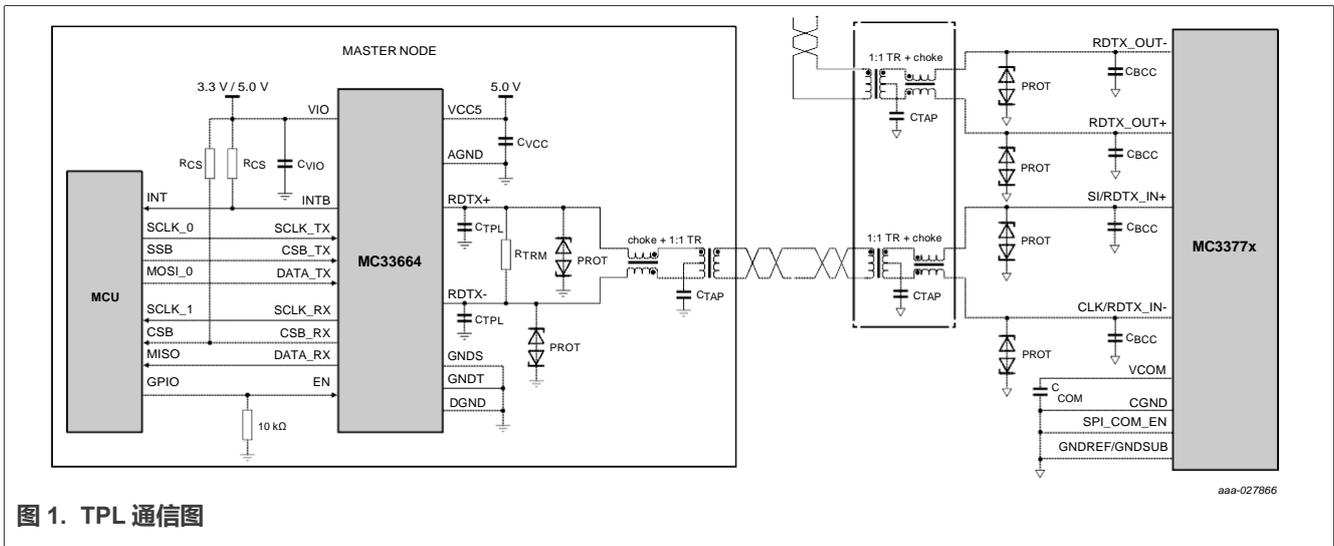


图 1. TPL 通信图

2.2 变压器通信格式

总线上的命令和响应主要在单个主节点和单个从节点之间进行交换，而其他从节点被动地或主动地转发帧。这种帧的一个例外情况是使用全局命令，使得帧可以从一个主节点传输到多个从节点。在这种情况下，没有从节点响应。图 2 显示了一般的通信格式。

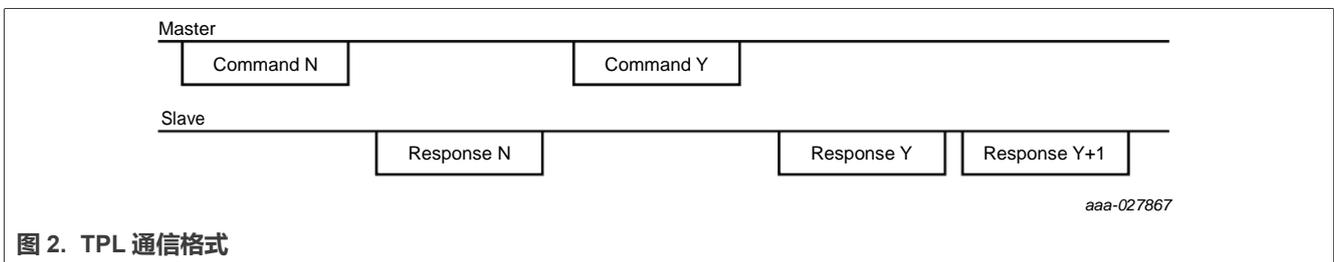


图 2. TPL 通信格式

MC33664、MC3377xA 和 MC3377xB 具有第一代 TPL 通信调制解调器，其中只有一个调制解调器在总线通信上传输命令或响应信号。其他调制解调器闭合总线开关，被动地将信号从上行链路转发到下行链路，如图 3 所示。

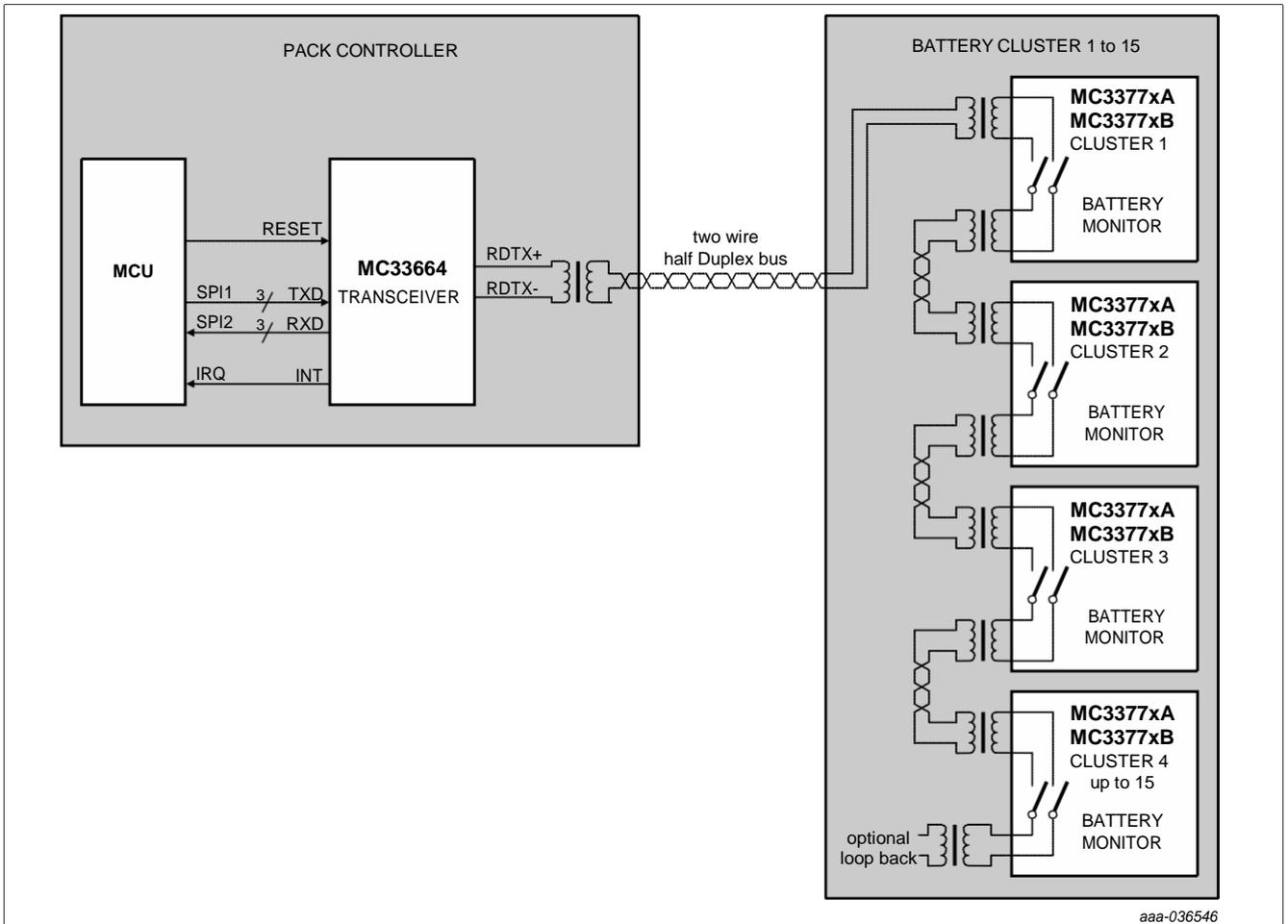


图 3. 第一代 TPL 通信拓扑结构，它使用总线开关在主节点和从节点之间被动地转发信号

在该方案中，主节点和所有从节点连接在同一总线上，几乎同时接收信号，只有波形传播延迟。然而，当信号从一个节点传到另一个节点时，信号功率和振幅都在下降。此外，每个节点的连接都会产生一些反射噪声，这会干扰通信。因此，第一代 TPL 通信调制解调器限制了需要高响应速度的小型电池管理系统 (BMS) 系统的应用。

MC33771C 具有第二代 TPL 通信调制解调器，可接收上行链路信号并主动将其中继到下行链路，如图 4 所示。

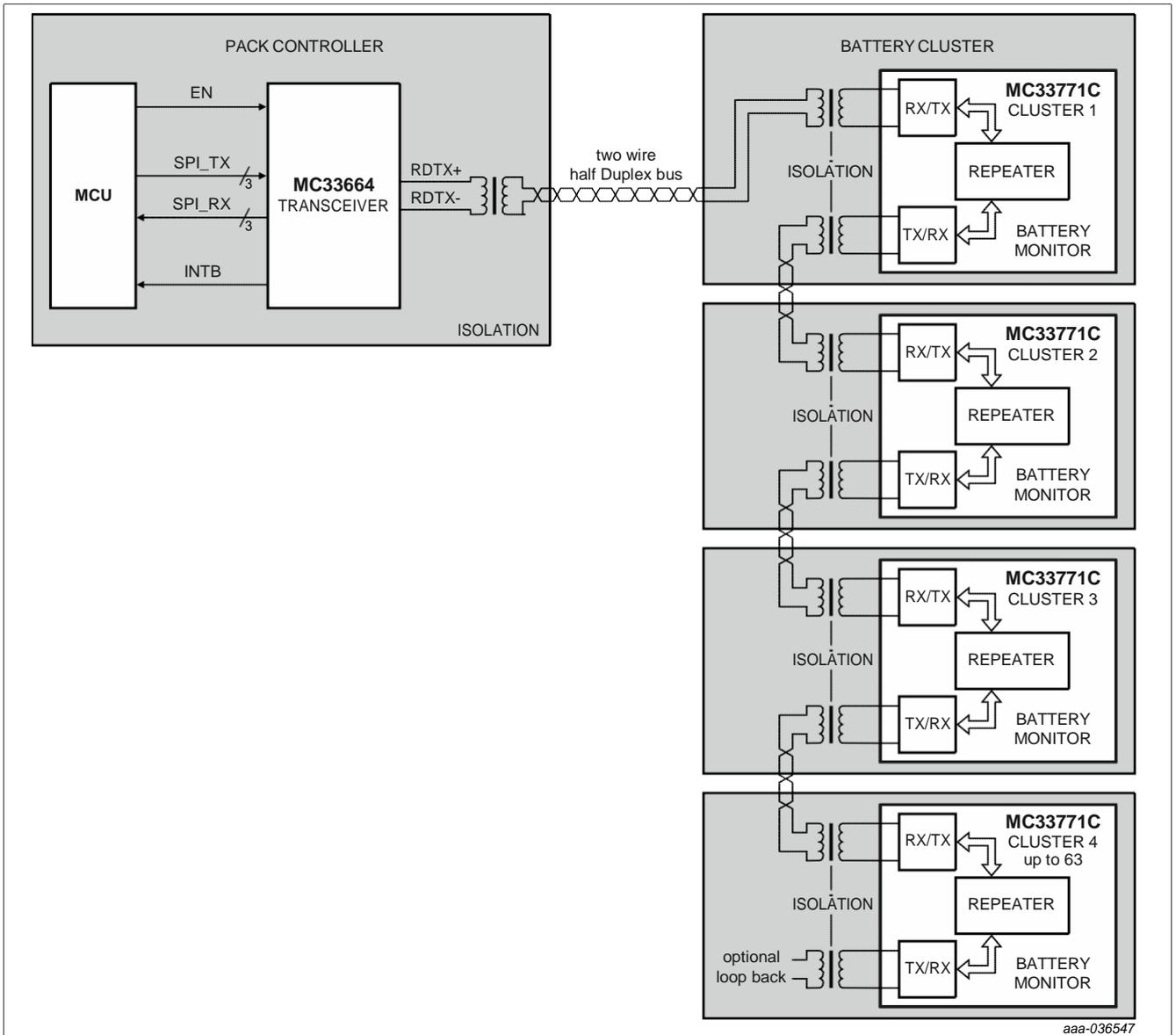


图 4. 第二代 TPL 通信拓扑结构，它使用中继器，在主节点和从节点之间主动转发信号

第一代 TPL 除了采用被动转发方案之外，它还使用截断的正弦波信号来表示每个信号位，如图 5 所示。这种结构往往具有较低的传导发射（CE），但常常受到反射效应和过冲的不利影响。第二代 TPL 使用较低幅值的脉冲波形，具有高速上升沿和下降沿；参见图 6。它很容易被接收器识别，而且过冲低。

衰减和过冲的情况将在接下来的章节中讲述。

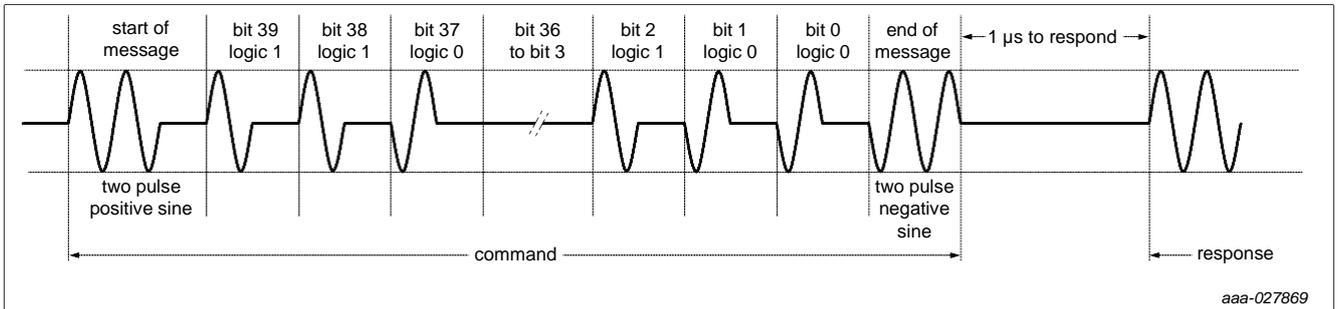


图 5. 第一代 TPL 通信波形图

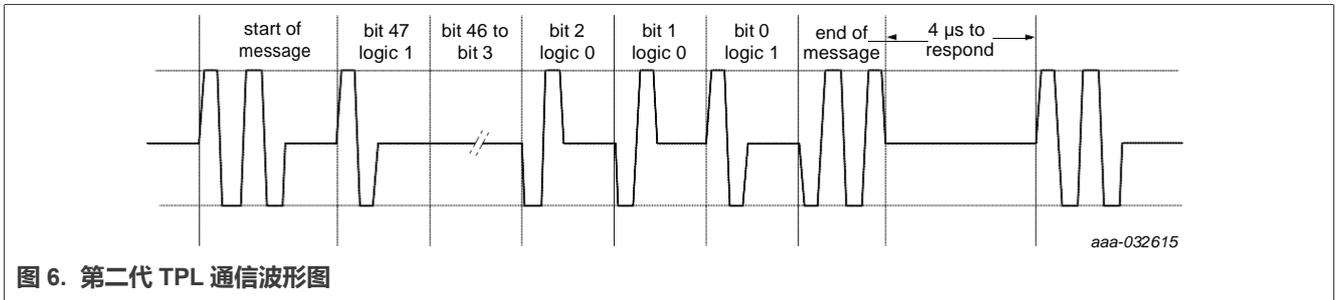
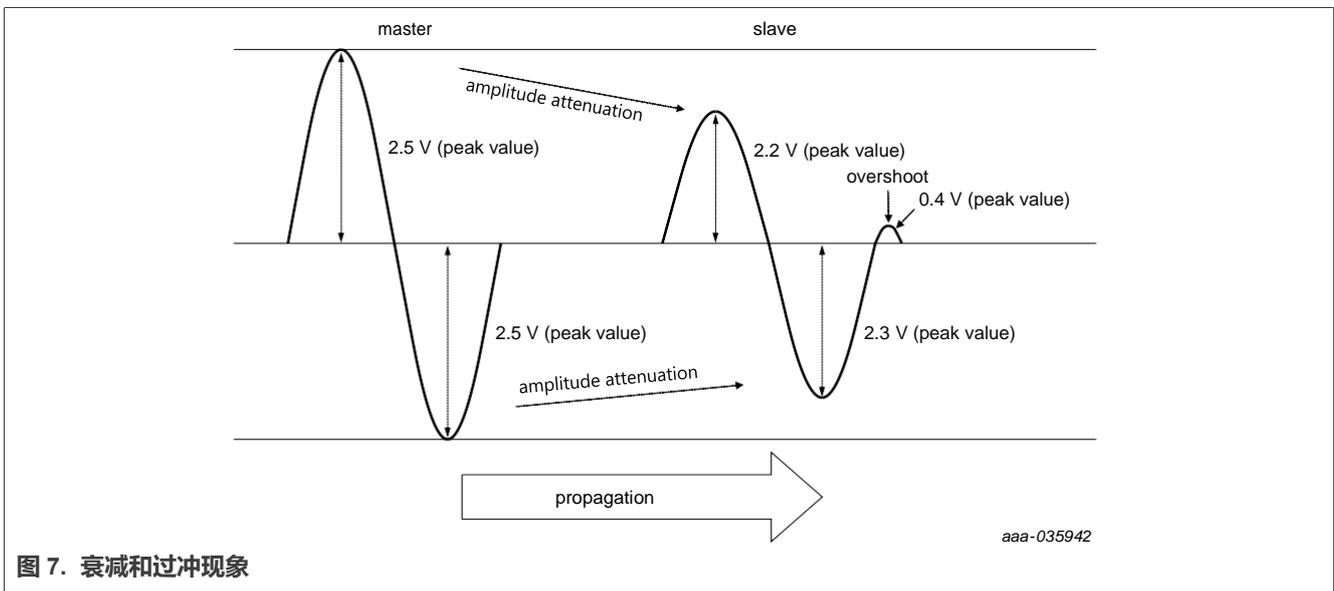


图 6. 第二代 TPL 通信波形图

3 为什么要评估通信网络中元器件的性能

3.1 通信网络中的问题和挑战

当 TPL 通信网络应用于许多节点时，会出现衰减和过冲行为；参见图 7。由于连接器、印刷电路板（PCB）、传输线等处的插入损耗，信号幅值从主节点到从节点都会衰减。不匹配的输入阻抗和传输线阻抗之间的反射会导致过冲现象。过冲是指信号或函数超过其目标值的情况。TPL 系统中各节点之间的反射可能会导致通信错误，因为超过了接收端的阈值电压。



3.2 TPL 网络中波型的特性

在通信路径上有许多元器件，包括 PCB 线、连接器、变压器和双绞线。哪一个是 TPL 通信的重要部分？

传输线模型描述了电磁波在传输线中的传播情况。该模型假设注入传输线的信号作为横向电磁波（TEM）沿传输线传播。当传输线的长度与电磁波的波长相比较短时，传输线的分析就没有必要了。一般来说，如果传输线的电长度小于 $l < \lambda / 16$ ^[1] 或 $l < \lambda / 8$ ^[2]（其中 λ 是信号的波长），那么传输线就是短的。传输线的电长度取决于信号的频率和电磁波的传播速度。公式： $\lambda = \frac{v}{f}$ 描述了信号频率 f 、波长 λ 和电磁波在传输线中的传播速度 v 之间的关系。

换句话说，根据使用的信号频率，同一条传输线可以被认为是电长或电短。

使用 MC3377x 时， v 大约是 2.2×10^8 m/s， f 是 1 位信号波形频率，为 4MHz。因此， λ 和 $\lambda/16$ 分别约为 55 m 和 3.4 m。同时，该应用要求节点之间的距离大约为几米到几十米。

根据计算，应将双绞线视为传输线进行分析。对于长度较短的 PCB 走线，可以忽略其影响。此外，考虑到传输线公式和理论，这将导致反射和插入损耗发生周期性变化。通常，虽然短传输线的插入损耗很大，但通信系统余量可以区分衰减后的信号电平。但是，插入损耗的衰减在长距离通信情况下需要被评估，例如 20 m 的 TPL。

在变压器处也有插入损耗和反射，将信号从一端带到另一端。

总之，双绞线和变压器是信号质量的重要组成部分。另外，对于劣质的 PCB 和连接器，其插入损耗高，电压驻波比 (VSWR) 也高，它们会导致通信错误，应避免使用。

4 评估的重要工具

从应用的角度来看，直流（DC）分析通常用于通信的静态功率和暂停时间。交流（AC）分析是用于通信稳定状态时的重要工具。此外，在信号的开始和停止时，时域反射仪（TDR）可以用来评估信号传输。通常，TDR 和矢量网络分析仪（VNA）设备可以帮助我们评估性能；参见图 8。

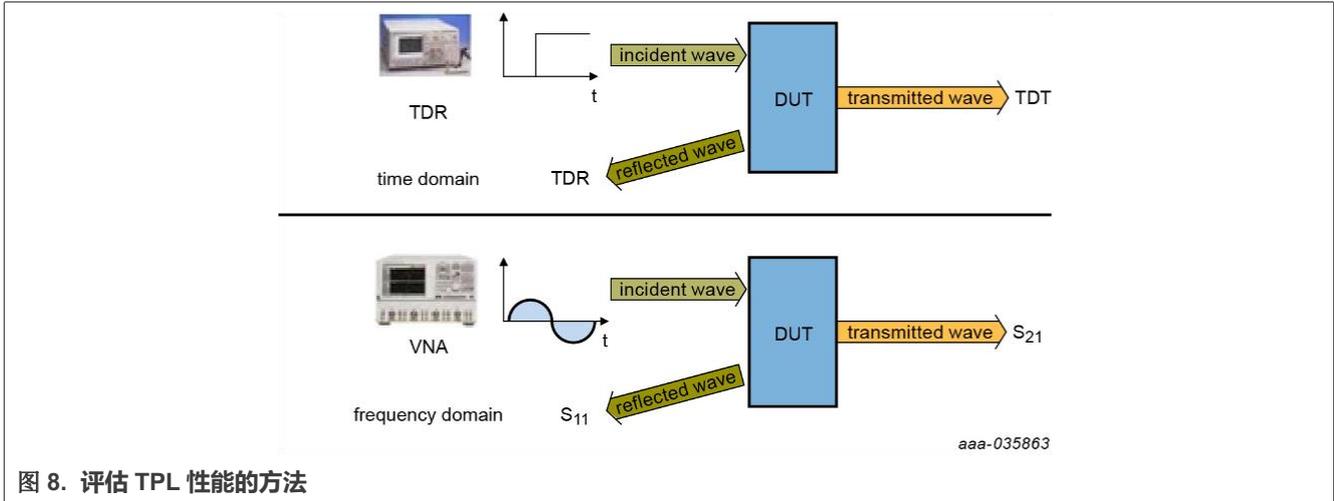


图 8. 评估 TPL 性能的方法

由于很难得到传输线和变压器的高精度模型，因此我们将两个端口的性能作为黑箱来研究。史密斯图和 S 参数可以帮助我们很好地解释通信的行为。

4.1 交流（AC）分析方法和 S 参数

当波在不同的独立介质之间传输时，会发生反射；参见图 9。该公式描述了阻抗和反射之间的关系。

$$\frac{V_{\text{reflected}}}{V_{\text{incident}}} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \beta \tag{1}$$

$V_{\text{reflected}}$: 反射电压

V_{incident} : 入射电压

Z_1 : 区域 1 中的阻抗

Z_2 : 区域 2 中的阻抗

β : 反射系数

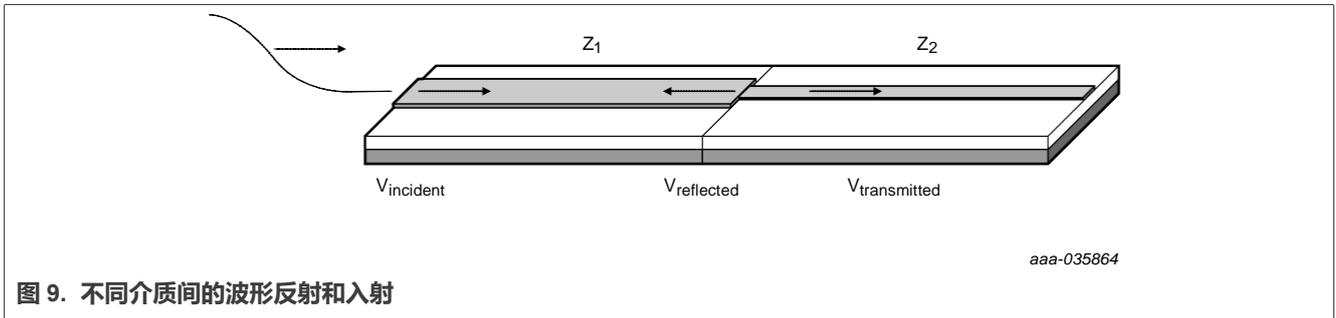


图 9. 不同介质间的波形反射和入射

最常见的情况是开路负载和短路负载；参见图 10。

如果负载是开路的，那么阻抗是无限的，这会导致完全反射的波。假设输入幅值为 1 V，则可以检测到输出端口 2v 的幅值。

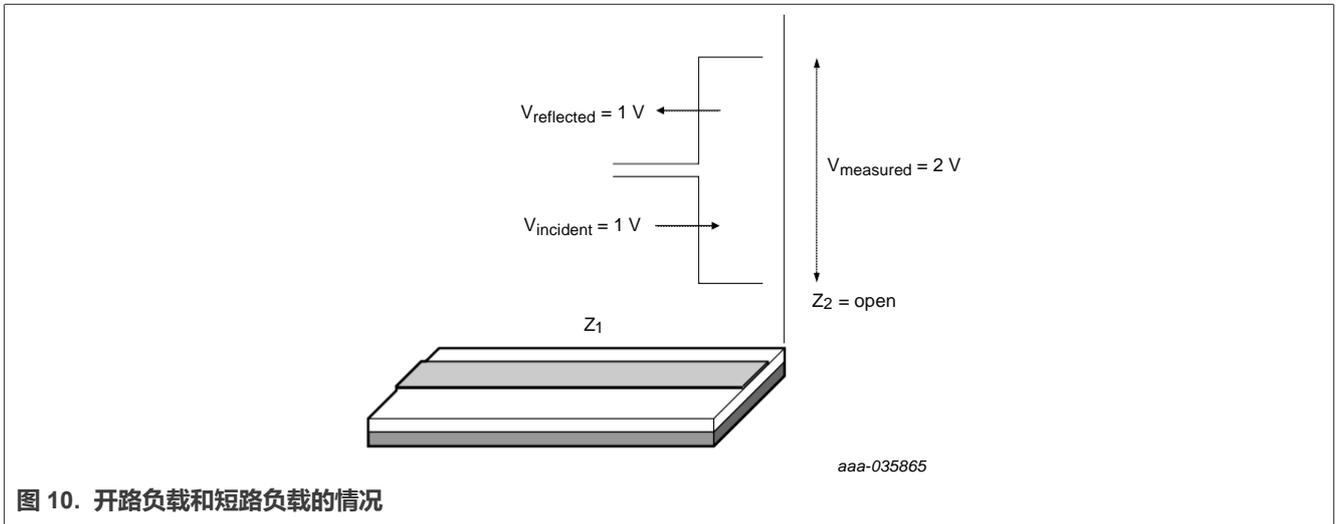


图 10. 开路负载和短路负载的情况

如果负载是短路的，那么阻抗为零，这会导致波的完全吸收。假设输入波幅是 1V，则可以监视输出口，即 0 V。另一方面，反射系数为-1。

图 11 显示了 50 Ω 阻抗中的波注入到其他介质的反射系数。

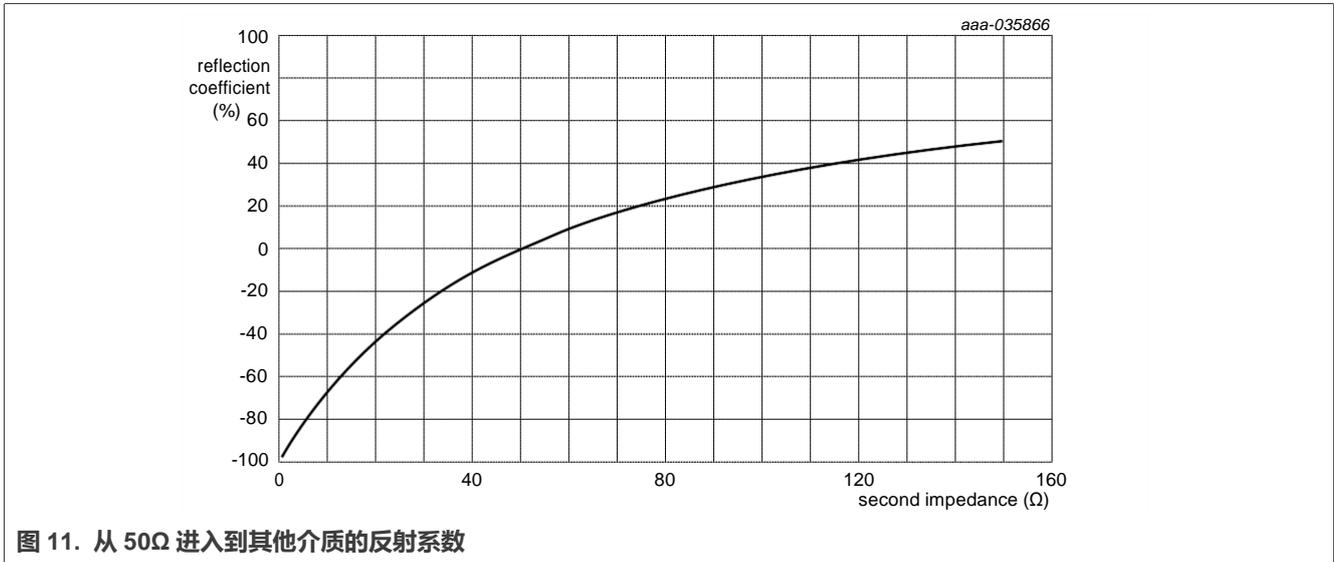


图 11. 从 50Ω 进入到其他介质的反射系数

S 参数用于分析双端口网络，此时波注入目标并反射到源。图 12 显示了 S 参数的概念。

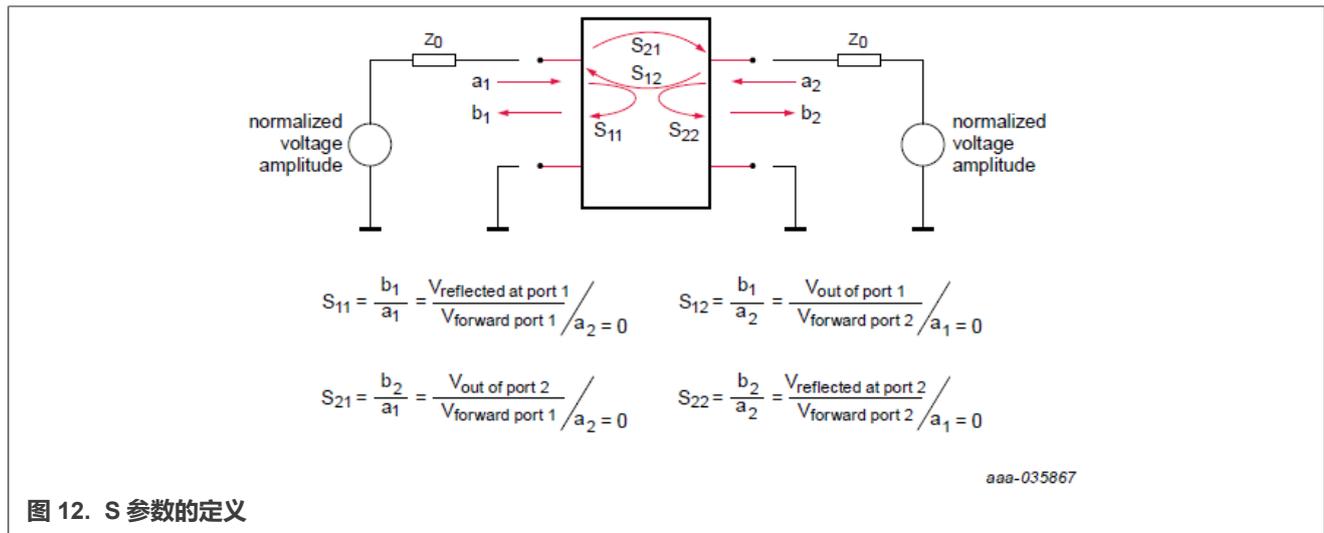


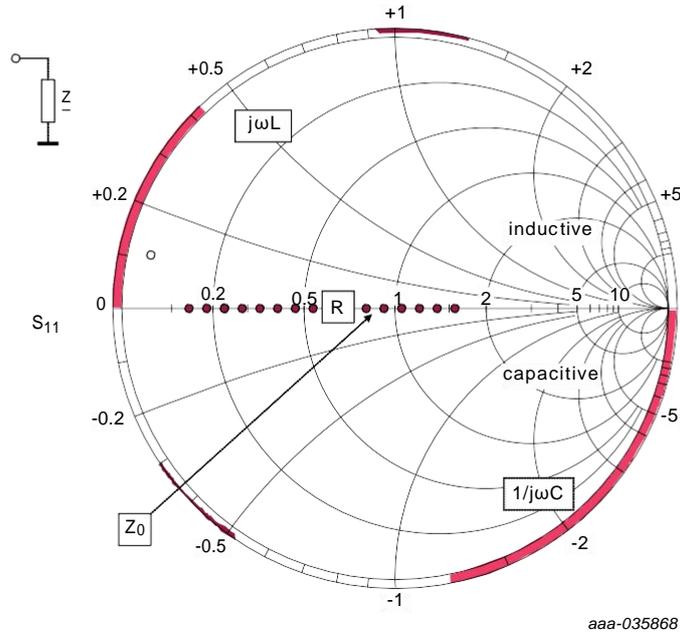
图 12. S 参数的定义

S_{11} 是端口 1 的回波损耗，用于评估反射部分。它低于 0 dB，通常为 -25 dB 至 -40 dB。

S_{21} 是插入损耗或转发传输系数。它接近于 0 dB，通常为 0.01 dB 至 0.1 dB。

史密斯图是检查反射和阻抗是否匹配的工具；参见图 13。

一些说明如下：
Sxx 在实轴上表示欧姆电阻。
实轴上方的 Sxx 表示电感。
实轴下方的 Sxx 表示电容。
史密斯图中的 Sxx 曲线顺时针旋转，频率越来越高。



aaa-035868

图 13. 显示阻抗的史密斯图

5 对双绞线的评估

5.1 对双绞线进行分析的方法及重要理论

对于传输线，有许多分析方法，如传输线公式、RLGC 模型，该模型将分布式系统改为 L、R、C、G 单位长度电路；参见图 14。该图表示的是更普遍情况下的一个具体示例。

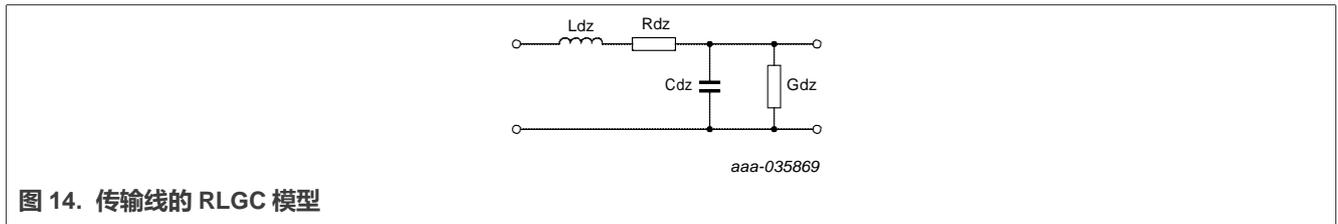


图 14. 传输线的 RLGC 模型

通常，建立不同温度下的 RLGC 模型需要很长时间。然而，S 参数可以很容易地被提取出来。图 15 显示了 4 英寸长、50 Ω 传输线的史密斯图和 S_{11} 对数图，这是双绞线的基本模型。

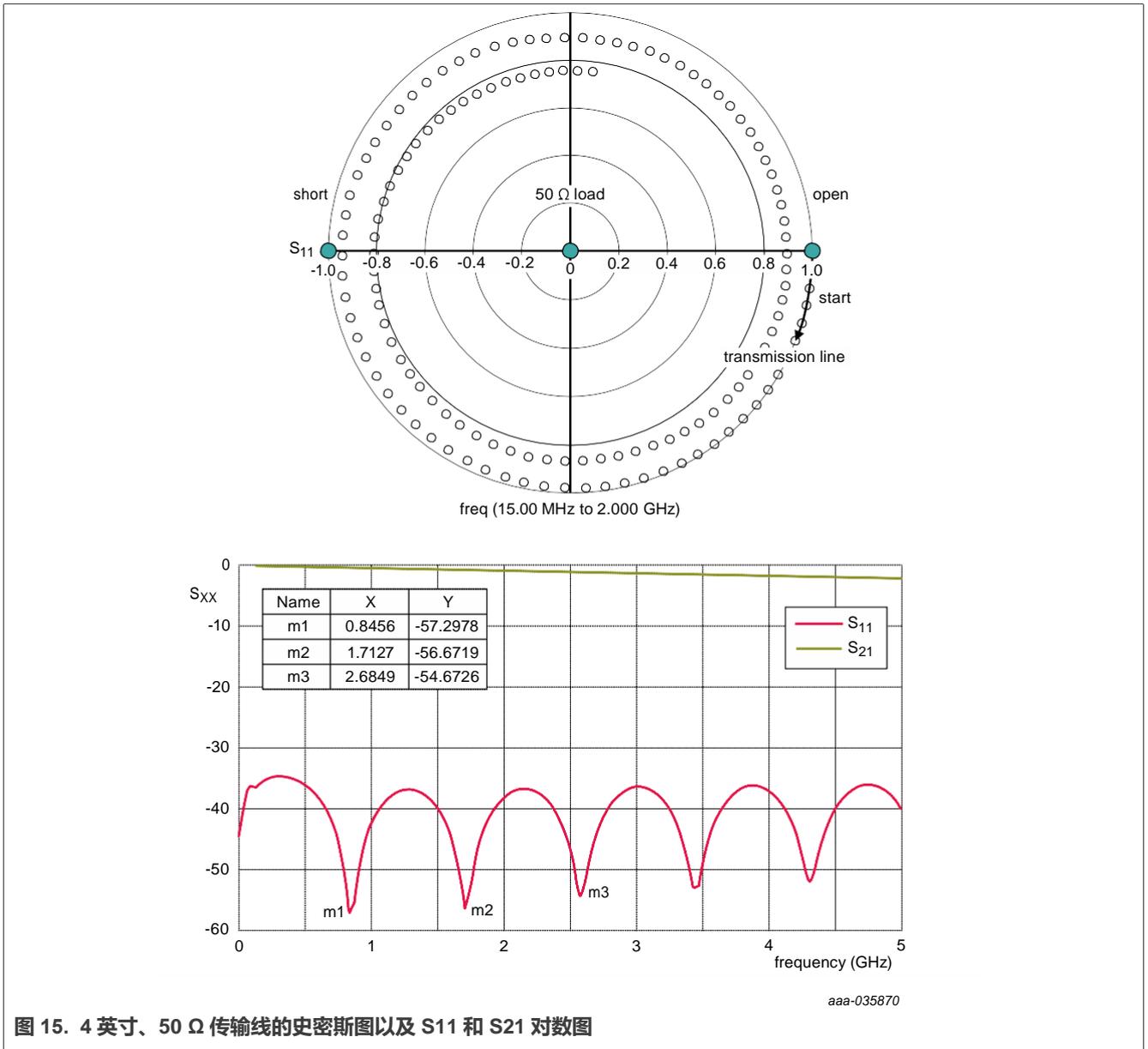


图 15. 4 英寸、50 Ω 传输线的史密斯图以及 S11 和 S21 对数图

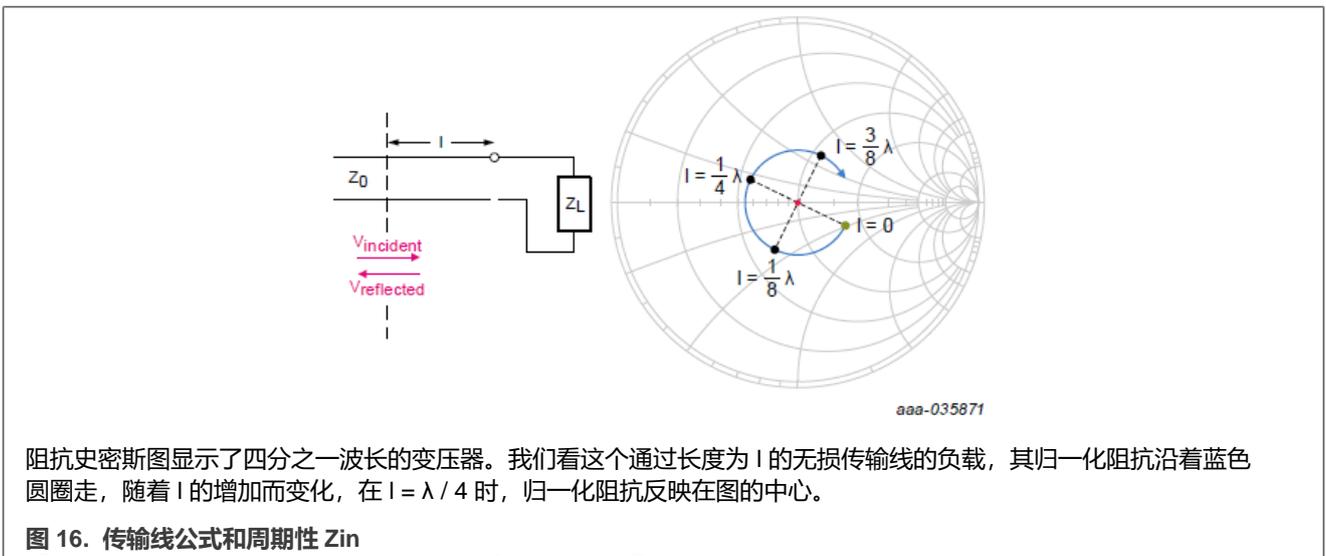
根据史密斯图，阻抗周期性地围绕着一个固定值变动。它被命名为 Z_0 (特性阻抗或波阻抗)，它是导线材料的一个函数，与导线长度无关。

Z_{in} 是要测量的进入网络的输入阻抗 (在本例中为导线和负载)。它是导线长度的强函数，可以从 S_{11} 计算出来。

根据传输线公式

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + iZ_0 \times \tan(\beta l)}{Z_0 + iZ_L \times \tan(\beta l)} \tag{2}$$

其中 β 与角波数相同。所以 $m1, m2, \dots$ 是 N 乘以 $\lambda / 2$ ；参见图 16。



这个结论可以用在以下方面：

1. S 参数，包括用于评估双绞线的 S_{11} 和 S_{21} 。
2. 双绞线的性能是周期性的，取决于信号线长度和频率。

5.2 对双绞线的测量及其对通信的影响

VNA 用于测量不同温度下双绞线的 S_{11} 和 S_{21} 参数。

20 m 双绞线的参数显示了从 1 MHz 到 51MHz 的插入损耗和反射性能。在 TPL 通信中，基频 4 MHz 点是重要的考虑值。几十 MHz 以下的带宽也是评估网络性能的参考。在图 17 中，对于 20 m 导线， S_{21} 在 4 MHz 时约为 -0.61 dB。 S_{11} 是周期性的，取决于频率和长度。如果频率确定，则不同的长度会导致不同的反射水平。

另一方面，史密斯阻抗环显示 Z_{in} 随频率变化而变化。当然，它也取决于长度；参见图 17。

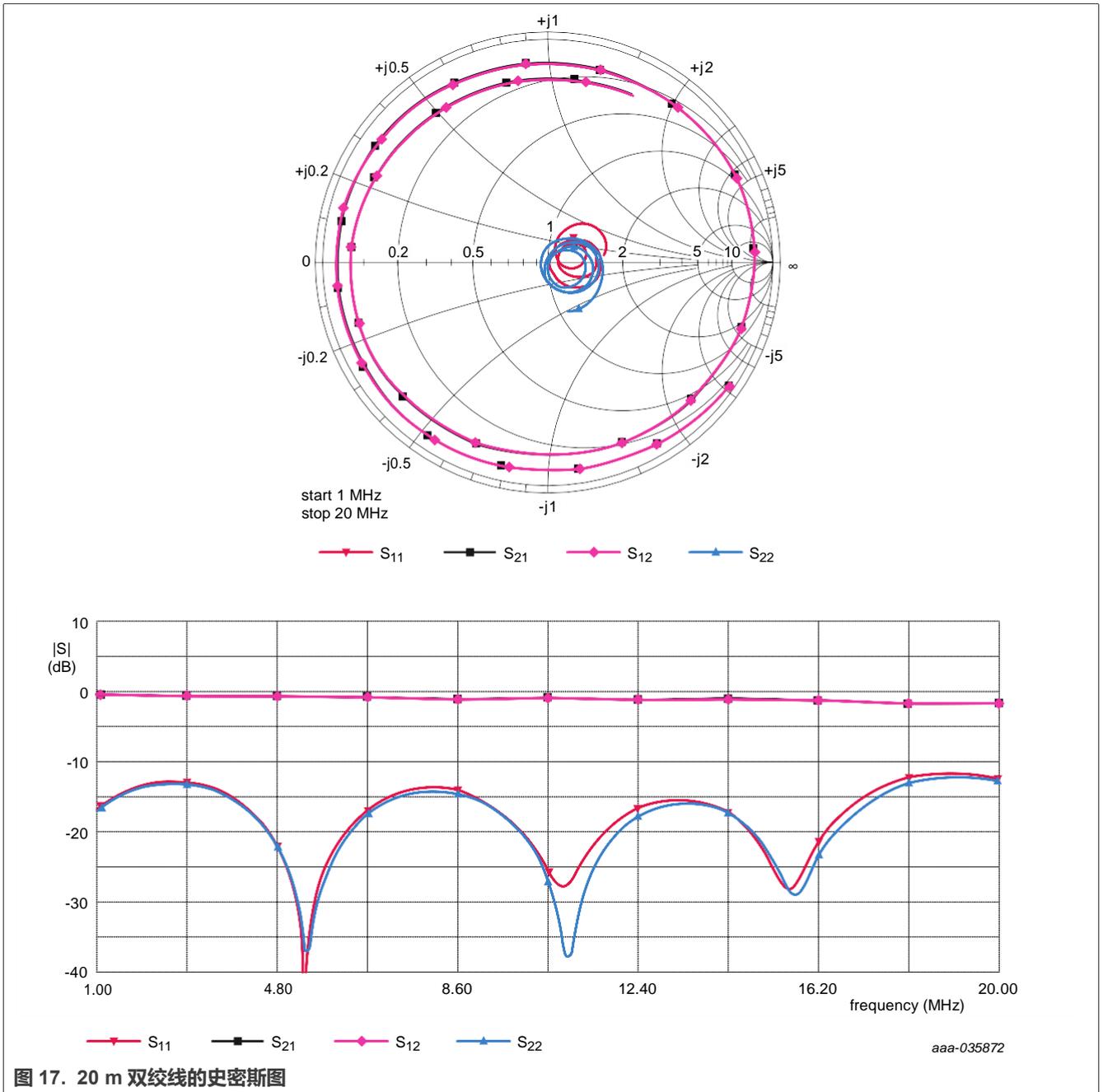


图 17. 20 m 双绞线的史密斯图

10 m 双绞线的性能如图 18 所示。

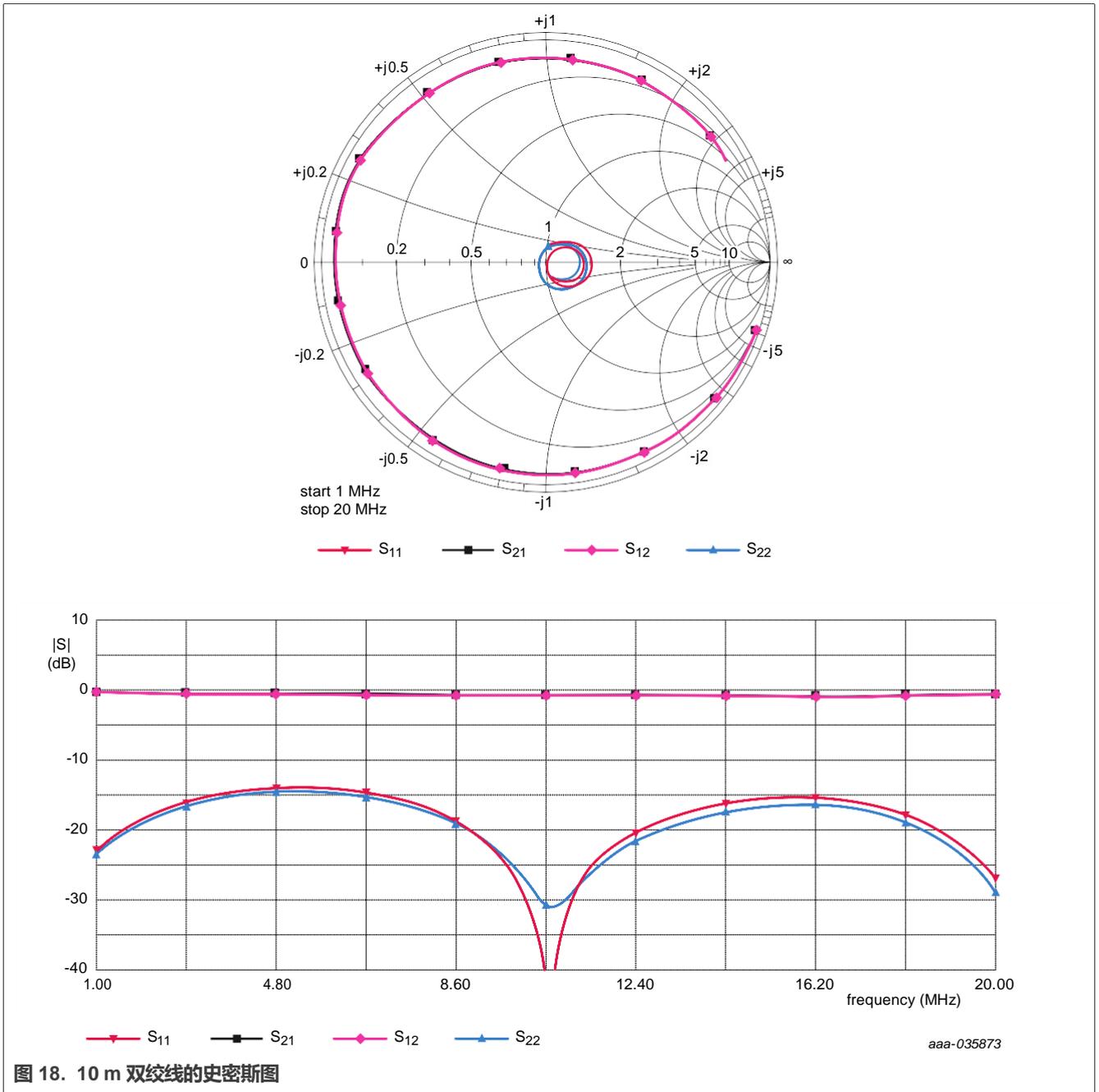


图 18. 10 m 双绞线的史密斯图

此外，温度性能也是一个重要因素。曲线显示 S_{11} 随 26 °C 至 125 °C 的温度而变化。通信失效的一个主要原因是高温下双绞线的性能不佳，参见图 19。

sample line 1	T/°C	26	50	75	100	105	125
	20 m loss	0.93	1.31	1.91	2.37	2.38	2.24
Cal	1 m loss	0.0465	0.0655	0.0955	0.1185	0.119	0.112

sample line 2	T/°C	26	50	75	100	105	125
	20 m loss	1.14	1.48	2.13	2.83	2.88	2.69
Cal	1 m loss	0.057	0.074	0.1065	0.1415	0.144	0.1345

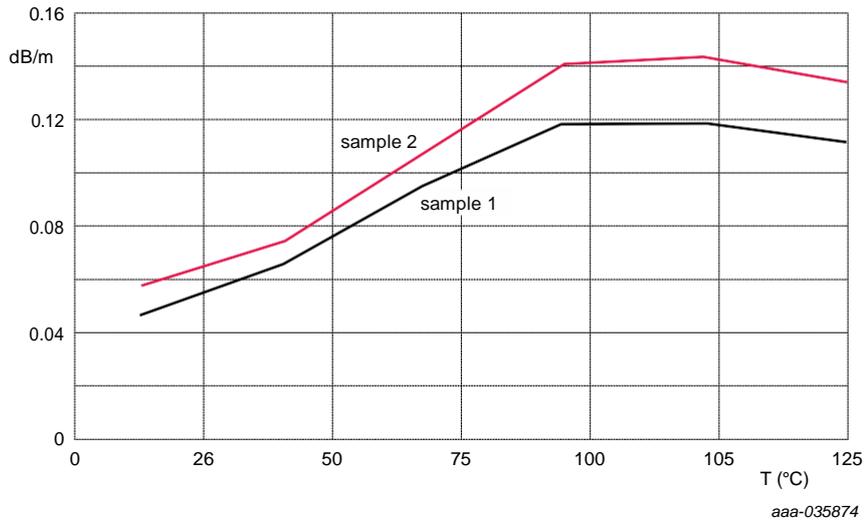
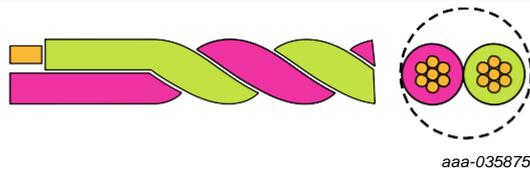


图 19. 双绞线的温度性能

推荐的具有衰减和 Z_0 的导线^[3]如图 20 所示。



描述: FLR9Y
 温度范围: -40 °C 至 +110 °C
 材料: 内部空间
 导线电阻: < 56 Ω/km
 阻抗: 100 Ω ± 10 %
 插入损耗: < 0.06 dB/m (5 MHz); < 0.08 dB/m (10 MHz)

图 20. 推荐的双绞线性能

6 对变压器的评估

6.1 对变压器进行分析的方法及重要理论

对于变压器，数据手册中有许多参数，例如开路电感（OCL）、漏电感和直流电阻（DCR）。S 参数也用来评估信号传输。

匝数比为 1 : 1 的变换将信号从 TX 端传输到 RX 端，并且不能改变幅度和驱动电流。要向远距离节点传输最大功率，那么低插入损耗（S 参数 S_{21} ）就非常重要。通常，在 TPL 系统中，插入损耗为 0.1 dB 至 0.25 dB。电感值较大的变压器通常具有更好的插入损耗效果。但是，较高的漏感会导致驱动电容负载的上升沿和下降沿缓慢。因此，TPL 信号的导通时间和暂停时间是错误的，并导致数据错误。

6.2 对变压器的测量及其对通信的影响

图 21 显示了 Bourns 变压器的性能。 S_{11} 优化为在 4 MHz 时达到最低值。

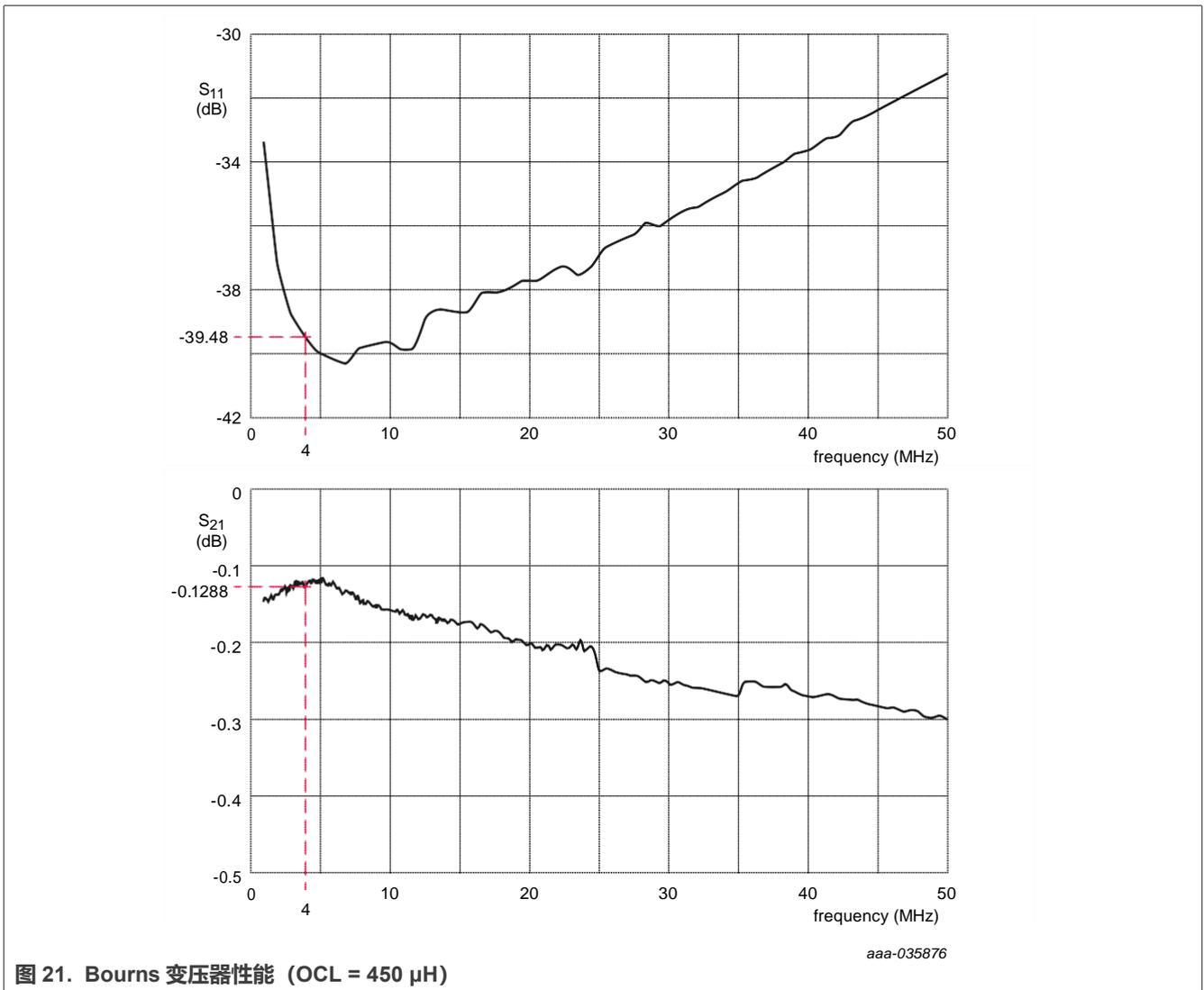


图 21. Bourns 变压器性能 (OCL = 450 μ H)

当然，温度是影响变压器性能的非常重要的因素。[表 1](#) 显示了 SM91501AL 变压器的高/低 OCL 极限和温度数据。根据[表 1](#)和[表 2](#)，高温下的变压器性能是影响功率衰减的主要原因。高温还会损坏双绞线。

表 1. 低和高 OCL 变压器的插入损耗

样品限值	4 MHz/dB 时的插入损耗				
	26 °C	50 °C	75 °C	100 °C	150 °C
OCL = 150 μ H	0.24 dB	0.28 dB	0.35 dB	0.41 dB	0.53 dB
OCL = 450 μ H	0.13 dB	0.16 dB	0.20 dB	0.25 dB	0.31 dB

表 2. 低和高 OCL 变压器的性能

参数	样品下限 OCL = 150 μ H	样品上限 OCL = 450 μ H
OCL [μ H]	150	450
漏感 [μ H]	0.15	0.15
DCR [Ω] (引脚 1 至引脚 3 和引脚 4 至引脚 6)	0.25	0.36
DCR [Ω] (引脚 9 到引脚 7, 引脚 12 到引脚 10)	0.65	0.78
4 MHz 时的回波损耗 [dB]	-32	-39

根据分析和验证，[表 3](#) 列出了推荐的变压器。它们因为具有低插入损耗和反射等优秀特性而被推荐使用。其他低成本变压器在评估后可用于短距离应用。

表 3. 推荐的变压器

变压器供应商	型号	规格		
		通道	插入损耗	回波损耗
恩智浦 (验证和 要求)	-	单/双	at 1 MHz to 10 MHz: > -0.25 dB at 4 MHz: > -0.2 dB	at 1 MHz to 10 MHz: < -30 dB at 4 MHz: < -32 dB
Pulse	HM2102NL	双	at 4 MHz: > -0.3 dB	at 4 MHz: < -20 dB
	HM2103NL	单	at 4 MHz: > -0.25 dB	at 4 MHz: < -20 dB
Bourns	SM91501AL	双	at 4 MHz: > -0.25 dB	at 4 MHz: < -26 dB
	SM91502AL	单	at 4 MHz: > -0.25 dB	at 4 MHz: < -26 dB

7 用于应用的评估结果

通常，TPL 通信系统的性能取决于双绞线、变压器、连接器和 PCB 的插入损耗和反射。由于 PCB 线路的长度短，衰减低，因此建立了简单模型来计算信号幅度。

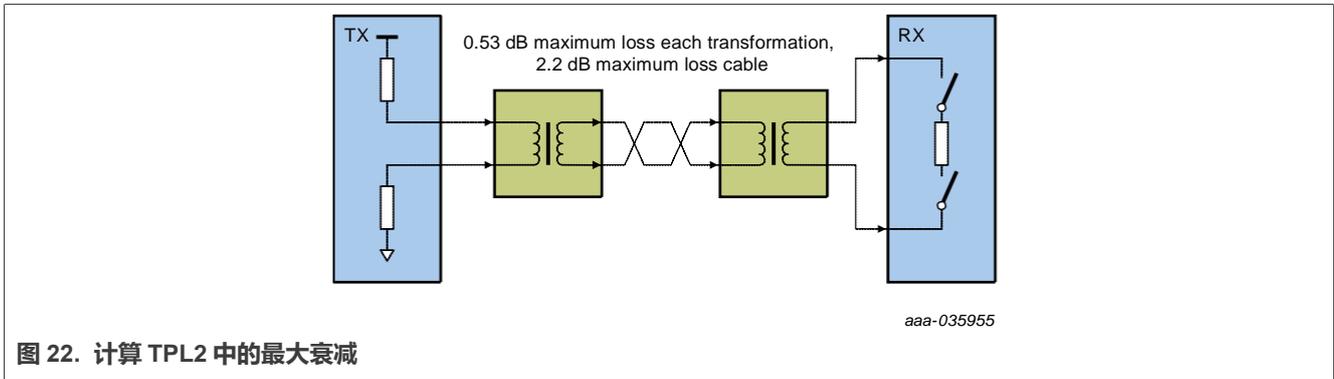
前面几章介绍了评估方法和一些数据结论。客户可以自行检查元器件，然后计算和模拟系统行为。

选择变压器时，插入损耗在短距离和低温下并不重要。计算是用来评估性能的。双绞线、连接器等的插入损耗与变压器是一样的。在第二代 TPL (TPL2) 系统中，低于 3.6 dB 的总损耗在所有条件下都是非常好的匹配。

通常，性能良好的连接器和 PCB 的损耗可以忽略不计。

图 22 显示了变压器和导线最大损耗的估计计算结果。

总损耗：0.53 dB × 2 + 2.2 dB = 3.26 dB <系统裕量：3.6 dB。



上面的例子太过简单，无法分析只有插入损耗的系统。但它可以快速计算出损耗。

下一个方法在考虑到反射的情况下比以前的方法更好。

对于所有最坏情况，参数可以在表 4 中找到。其中，TX 端的输出能力最低，在 -40 °C 时为 1.16 V，而接收端的接收器可以检测到 0.7 V 的信号幅度。对于导线和变压器来说，最坏的情况是高温。该参数可以在前面的章节和表 1 中找到。对于 IC 处于低温和导线处于高温的工况，不会发生这种情况。该示例具有所有最坏情况。

表 4. TPL2 系统中的参考参数

输入参数	值	单位	选择	输入范围
TX 端输出	1.16	V	-40 °C 的最坏情况	1.16 V 至 2.6 V
RX 端 V_{th}	0.7	V	00 mV 的最坏情况	-
导线损耗 (最坏情况)	0.12	dB/m	最大损耗; 105 °C	恩智浦实验室中的导线 0.044 dB/m (室温) - 0.115 dB/m
导线长度	40	m	-	-
线阻抗 Z_0	90	Ω	105 °C 的最坏情况	90 Ω 至 120 Ω
变压器损耗 × 2 (最坏情况)	0.5	dB	最大规格	典型值 0.15 dB × 2; 最大值 0.25 dB × 2

表 4. TPL2 系统中的参考参数...续

输入参数	值	单位	选择	输入范围
RX 端阻抗 (最坏情况)	120	Ω	-	自动测试设备 (ATE) 参考值: 150 Ω

图 23 显示了带有插入损耗和反射的简单模式, 但没有 TPL2 中的相位和波速。

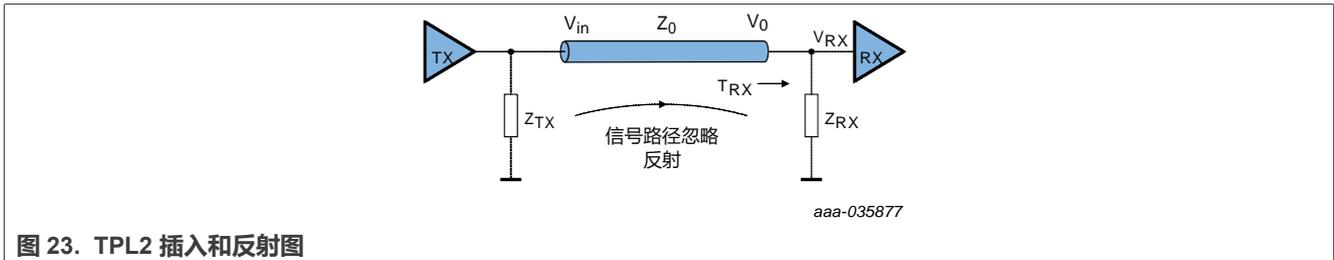


图 23. TPL2 插入和反射图

计算公式如下。

损耗 [dB] = 变压器损耗 + 导线每米损耗 × 米数

$$\text{损耗系数} = 10^{-\frac{\text{loss [dB]}}{20}}$$

$$T_{RX} = \frac{2 \times \sqrt{Z_{RX} \times Z_0}}{Z_{RX} + Z_0}$$

$$\frac{V_{RX}}{V_{in}} = \text{loss factor} \times T_{RX} \sqrt{\frac{Z_{RX}}{Z_0}}$$

$$V_{RX} = V_0 \times \sqrt{\frac{Z_{RX}}{Z_0}}$$

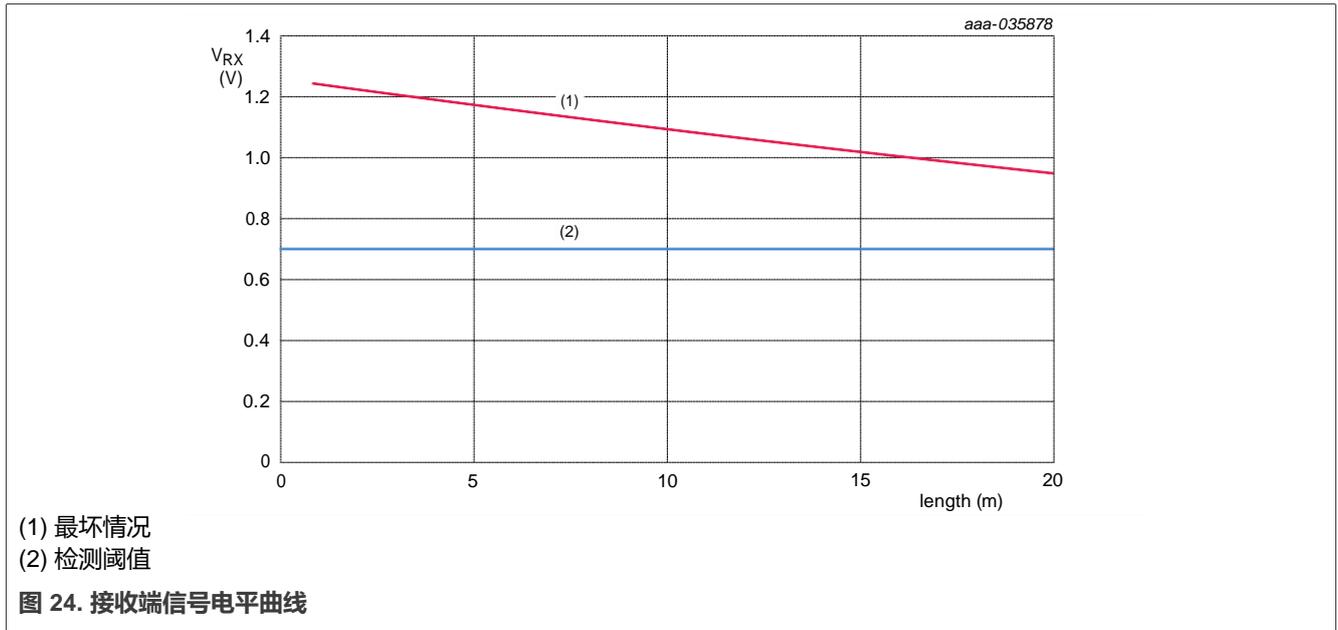
表 5 和图 24 显示了 1 m 至 20 m 处的衰减情况。

表 5. 接收端信号电平计算

米	损耗 [dB]	损耗系数	Z _{RX} [Ω]	T _{RX}	V _{RX} / V _{in}	V _{RX} [V]
1	0.62	0.931	120	0.989	1.064	1.234
2	0.74	0.918	120	0.989	1.049	1.217
3	0.86	0.905	120	0.989	1.035	1.200
4	0.98	0.893	120	0.989	1.020	1.184
5	1.1	0.881	120	0.989	1.006	1.168
6	1.22	0.868	120	0.989	0.993	1.151
7	1.34	0.857	120	0.989	0.979	1.136
8	1.46	0.845	120	0.989	0.966	1.120
9	1.58	0.833	120	0.989	0.952	1.105
10	1.7	0.822	120	0.989	0.939	1.090
12	1.94	0.799	120	0.989	0.914	1.060
14	2.18	0.778	120	0.989	0.889	1.031
16	2.42	0.756	120	0.989	0.864	1.003

表 5. 接收端信号电平计算...续

米	损耗 [dB]	Loss factor	Z_{RX} [Ω]	T_{RX}	V_{RX} / V_{in}	V_{RX} [V]
18	2.66	0.736	120	0.989	0.841	0.976
20	2.9	0.716	120	0.989	0.818	0.949



根据测试结果，当长度小于 20 m 时，电压电平有足够的余量来触发接收器。

如果长度超过 20 m，则反射会出现和信号周期相关的性能变化。为了获得良好的计算精度，应仔细计算信号的延迟相位和接收端阈值。

简单的计算不能很好地满足第一代 TPL (TPL1)，因为有许多复杂反射的节点。

但是，可以从 VNA 中提取结果以描述元器件性能（例如，导线和变压器）。然后，仿真可以模拟 TPL 和网络以获得结果。

8 缩略语

表 6. 缩略语

缩略语	解释
ATE	自动测试设备
BEV	纯电电动车
BMS	电池管理系统
CE	传导发射
DCR	直流阻抗
EMC	电磁兼容性
ESS	储能系统
OCL	开路电感
PCB	印刷电路板
PHEV	插电式混合动力车
TDR	时域反射仪
TDT	时域传输
TEM	横向电磁
TPL	变压器物理层
VNA	矢量网络分析仪
VSWR	电压驻波比

9 结论

该应用笔记介绍了评估传输线和变压器的方法。

[表 7](#) 显示了恩智浦推荐的变压器和双绞线的标准。客户可以获得整个系统的插入损耗和回波损耗，并根据应用条件来确定元器件规格。对于 TPL2，需要总损耗（变压器 + 双绞线 + 其他）小于 3.6 dB。因此，客户可以选择满足系统总损耗要求的、损耗较大但长度较短的双绞线。

表 7. 变压器和双绞线的推荐标准

项	插入损耗	回波损耗	4 MHz 时的阻抗	-40 °C, 100 kHz, 100 mV _{p-p} 时的开路电感	100 kHz, 100 mV 时的漏感
变压器	1MHz 到 10MHz: > -0.25 dB	1MHz 到 10 MHz: < -30 dB	90 Ω 至 100 Ω	> 150 μH	< 180 nH
	4 MHz: > -0.2 dB	4 MHz: < -32 dB			
双绞线	25 °C: 0.06 dB/m	-	90 Ω 至 120 Ω	-	-
	105 °C: 0.12 dB/m				

10 参考资料

- [1] 托马西尼 (W. Tomasini) , 《电子通信系统: 从基础到高级, 第四版》 (Electronic Communications Systems: Fundamentals Through Advanced, 4th edition) , Prentice-Hall Inc., 美国新泽西州, 马鞍河上游 (Upper Saddle River) , 2001 年。
- [2] 胡鲁 (J.Huloux) 和哈努斯 (L.Hanus) , ST7537 电力线调制解调器应用 (ST7537 power line modem application) , SGS-THOMSON 微电子公司, 应用笔记 AN655/0994, 1995 年; <http://www.datasheetcatalog.com>。
- [3] 数据手册, 克罗姆贝格和舒伯特 (Kromberg & Schubert) FlexRay 电缆, 克罗舒 (Kroschu) FlexRay 电缆 06 期.pdf。

11 Legal information

11.1 Definitions

Draft — A draft status on a document indicates that the content is still under internal review and subject to formal approval, which may result in modifications or additions. NXP Semiconductors does not give any representations or warranties as to the accuracy or completeness of information included in a draft version of a document and shall have no liability for the consequences of use of such information.

11.2 Disclaimers

Limited warranty and liability — Information in this document is believed to be accurate and reliable. However, NXP Semiconductors does not give any representations or warranties, expressed or implied, as to the accuracy or completeness of such information and shall have no liability for the consequences of use of such information. NXP Semiconductors takes no responsibility for the content in this document if provided by an information source outside of NXP Semiconductors.

In no event shall NXP Semiconductors be liable for any indirect, incidental, punitive, special or consequential damages (including - without limitation - lost profits, lost savings, business interruption, costs related to the removal or replacement of any products or rework charges) whether or not such damages are based on tort (including negligence), warranty, breach of contract or any other legal theory.

Notwithstanding any damages that customer might incur for any reason whatsoever, NXP Semiconductors' aggregate and cumulative liability towards customer for the products described herein shall be limited in accordance with the Terms and conditions of commercial sale of NXP Semiconductors.

Right to make changes — NXP Semiconductors reserves the right to make changes to information published in this document, including without limitation specifications and product descriptions, at any time and without notice. This document supersedes and replaces all information supplied prior to the publication hereof.

Applications — Applications that are described herein for any of these products are for illustrative purposes only. NXP Semiconductors makes no representation or warranty that such applications will be suitable for the specified use without further testing or modification.

Customers are responsible for the design and operation of their applications and products using NXP Semiconductors products, and NXP Semiconductors accepts no liability for any assistance with applications or customer product design. It is customer's sole responsibility to determine whether the NXP Semiconductors product is suitable and fit for the customer's applications and products planned, as well as for the planned application and use of customer's third party customer(s). Customers should provide appropriate design and operating safeguards to minimize the risks associated with their applications and products.

NXP Semiconductors does not accept any liability related to any default, damage, costs or problem which is based on any weakness or default in the customer's applications or products, or the application or use by customer's third party customer(s). Customer is responsible for doing all necessary testing for the customer's applications and products using NXP Semiconductors products in order to avoid a default of the applications and the products or of the application or use by customer's third party customer(s). NXP does not accept any liability in this respect.

Suitability for use in automotive applications — This NXP product has been qualified for use in automotive applications. If this product is used by customer in the development of, or for incorporation into, products or services (a) used in safety critical applications or (b) in which failure could lead to death, personal injury, or severe physical or environmental damage (such products and services hereinafter referred to as "Critical Applications"), then customer makes the ultimate design decisions regarding its products and is solely responsible for compliance with all legal, regulatory, safety, and security related requirements concerning its products, regardless of any information or support that may be provided by NXP. As such, customer assumes all risk related to use of any products in Critical Applications and NXP and its suppliers shall not be liable for any such use by customer. Accordingly, customer will indemnify and hold NXP harmless from any claims, liabilities, damages and associated costs and expenses (including attorneys' fees) that NXP may incur related to customer's incorporation of any product in a Critical Application.

Export control — This document as well as the item(s) described herein may be subject to export control regulations. Export might require a prior authorization from competent authorities.

Translations — A non-English (translated) version of a document, including the legal information in that document, is for reference only. The English version shall prevail in case of any discrepancy between the translated and English versions.

Security — Customer understands that all NXP products may be subject to unidentified vulnerabilities or may support established security standards or specifications with known limitations. Customer is responsible for the design and operation of its applications and products throughout their lifecycles to reduce the effect of these vulnerabilities on customer's applications and products. Customer's responsibility also extends to other open and/or proprietary technologies supported by NXP products for use in customer's applications. NXP accepts no liability for any vulnerability. Customer should regularly check security updates from NXP and follow up appropriately.

Customer shall select products with security features that best meet rules, regulations, and standards of the intended application and make the ultimate design decisions regarding its products and is solely responsible for compliance with all legal, regulatory, and security related requirements concerning its products, regardless of any information or support that may be provided by NXP.

NXP has a Product Security Incident Response Team (PSIRT) (reachable at PSIRT@nxp.com) that manages the investigation, reporting, and solution release to security vulnerabilities of NXP products.

11.3 Trademarks

Notice: All referenced brands, product names, service names, and trademarks are the property of their respective owners.

NXP — wordmark and logo are trademarks of NXP B.V.

表目录

表 1.	低和高 OCL 变压器的插入损耗	21	表 4.	TPL2 系统中的参考参数	22
表 2.	低和高 OCL 变压器的性能	21	表 5.	接收端信号电平计算	23
表 3.	推荐的变压器	21	表 6.	缩略语	25
			表 7.	变压器和双绞线的推荐标准	26

图目录

图 1.	TPL 通信图	4	图 11.	从 50Ω 进入到其他介质的反射系数	12
图 2.	TPL 通信格式	4	图 12.	S 参数的定义	12
图 3.	第一代 TPL 通信拓扑结构, 它使用总线开关在主 节点和从节点之间被动地转发信号	5	图 13.	显示阻抗的史密斯图	13
图 4.	第二代 TPL 通信拓扑结构, 它使用中继器, 在主 节点和从节点之间主动转发信号	6	图 14.	传输线的 RLGC 模型	14
图 5.	第一代 TPL 通信波形图	7	图 15.	4 英寸、50Ω 传输线的史密斯图以及 S11 和 S21 对数图	15
图 6.	第二代 TPL 通信波形图	7	图 16.	传输线公式和周期性 Z_{in}	16
图 7.	衰减和过冲现象	8	图 17.	20 m 双绞线的史密斯图	17
图 8.	评估 TPL 性能的方法	10	图 18.	10 m 双绞线的史密斯图	18
图 9.	不同介质间的波形反射和入射	11	图 19.	双绞线的温度性能	19
图 10.	开路负载和短路负载的情况	11	图 20.	推荐的双绞线性能	19
			图 21.	Bourns 变压器性能 (OCL = 450 μH)	20
			图 22.	计算 TPL2 中的最大衰减	22
			图 23.	TPL2 插入和反射图	23
			图 24.	接收端信号电平曲线	24

目录

1	介绍	3
2	TPL 调制解调器的性能	4
2.1	什么是 TPL	4
2.2	变压器通信格式	4
3	为什么要评估通信网络中元器件的性能	8
3.1	通信网络中的问题和挑战	8
3.2	TPL 网络中波型的特性	8
4	评估的重要工具	10
4.1	交流 (AC) 分析方法和 S 参数	10
5	对双绞线的评估	14
5.1	对双绞线进行分析的方法及重要理论	14
5.2	对双绞线的测量及其对通信的影响	16
6	对变压器的评估	20
6.1	对变压器进行分析的方法及重要理论	20
6.2	对变压器的测量及其对通信的影响	20
7	用于应用的评估结果	22
8	缩略语	25
9	结论	26
10	参考资料	27
11	法律声明	28

Please be aware that important notices concerning this document and the product(s) described herein, have been included in section 'Legal information'.