

电力线载波 (PLC) 技术应用评估指南

Richard Ma

Shenzhen MCU FAE Team

摘要

TI 专注于基于 OFDM 调制的窄带电力线载波 (PLC) 技术的研发和推广。通过 DSP 加高集成度的模拟前端 (AFE) 的架构, 使电力线载波设计变得灵活且简单。

但由于 PLC 一般用于非专用线路, 线路特性波动大, 且通常环境复杂、距离长, 在不同应用中的表现常出现有较大差异。对于未知环境未知应用, 为了大致判断该某环境下 PLC 的性能表现, 使用前可以先进行评估。对该环境下性能表现有大体了解后, 可以确定 PLC 技术的适用情况及适用频带。

本文主要介绍对于未知环境, 考虑应用 PLC 技术时应进行的评估及其方法, 指出应关注的参数及意义, 讨论技术本身的特性对应用可能产生的影响。使读者能够根据评估的结果, 充分地利用 TI 方案的灵活性, 选择合适自己的产品及方案。

目录

前言 3

1 物理性能测试	3
1.1 物理测试 (PHY Test) 法	4
1.2 信道分析法	6
2 通信速率评估	8
2.1 实际传输速率	8
2.2 延迟及实时性问题	8
参考文档	11

图

图 1. 在两节点间进行通信测试	3
图 2. 在两节点间进行通信测试	4
图 3. RSSI、SNR 在测试过程中变化, 以及 SNR 对 BER 影响的例子	5
图 4. 电力线信道模型	6
图 5. 电力线信道模型	7
图 6. 电力线信道模型测量分析	7
图 7. 典型的 PRIME 数据帧	9
图 8. 在 PHY Test 调整数据帧长度、调制方式及前向纠错	10

表格

表格 1. PRIME PHY 标称速率与实测速率参考值..... 8

前言

开发一种有效的电力线载波（PLC）应用会面临许多挑战，例如，线路固有的噪声；需要健壮的架构来确保数据可靠性；每种应用和运行环境都是不同的，需要开发者优化设计来适应各种因素。PLC 实现的功能过于固定化将会限制其应用领域；而且，由于 PLC 的标准还没完全确定且仍在不断演进中，开发者需要灵活性的平台，这将能够针对每种应用的特定需求来优化设计，同时也能够适应新的标准和新兴的市场机会。这样，PLC 技术可以在多种应用得以重用，进而在应对不断扩展的市场机会时能够加速开发进程、缩短产品上市时间。

对于一个应用的评估主要考虑以下三个问题：

1. 是否可以成功通信
2. 通信速率及实时性是否满足要求
3. 安全性是否可以满足要求

后文中将介绍两种通信评估的方法：物理层测试法及信道分析法。其中物理层更加简单易行，但信道分析法可以提供更全面更具体的信息。对于实时性，本文主要讨论由于数据帧本身的特性所带来的延迟。而安全性主要考虑总线的仲裁及系统的冗余，在本文不作讨论。

1 物理性能测试

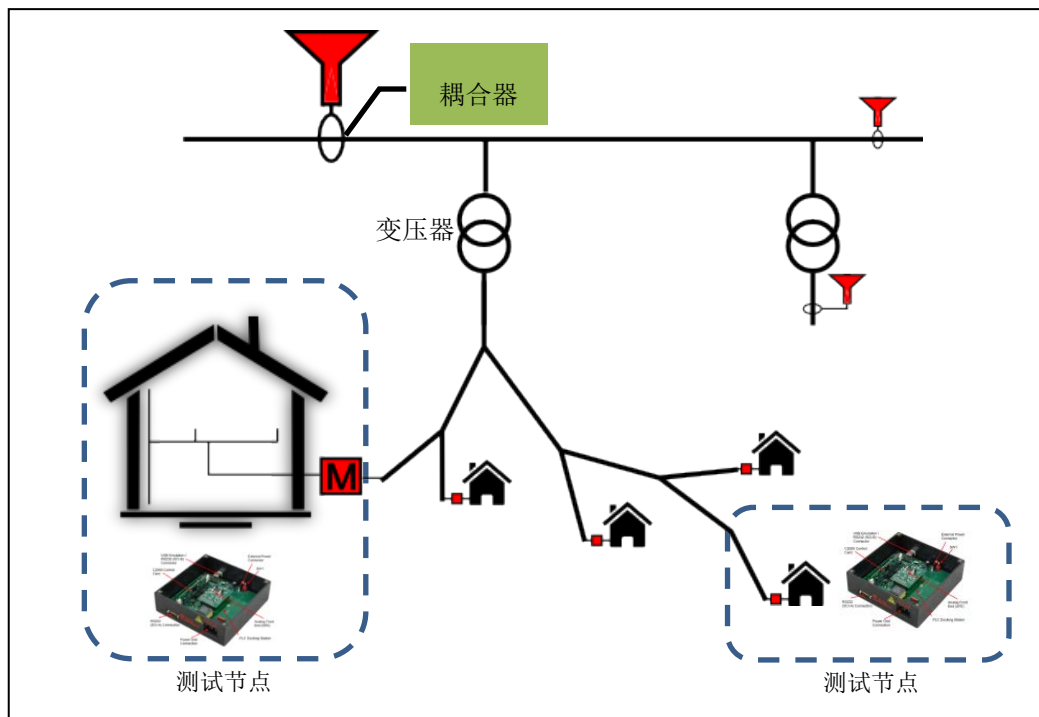


图 1. 在两节点间进行通信测试

通信测试中，通过物理层测试法或信道分析法分析物理层性能，可以快速对 PLC 在现场中的连通与否进行判断，并大致了解其可达到的性能。

两种测试方法都是通过在网络中选取节点，在节点间进行信号传输测试，判断节点间是否可以进行通讯，并分析性能。图 1 为在节点间进行测试的拓扑示例。

现场测试的经验表明，测试点对性能影响最大的因素并不是物理线路的距离，导致无法通信的原因更多是噪声影响或线路衰减。同一个网络中，经常会出现较近距离的节点无法通信，而远处的节点却可以通信正常的情况。所以建议在整个网络的覆盖范围内较为均匀地选择一些节点，进行节点间的通信测试。测试中，选择潜在噪音较大、分支较多的节点进行测试能更好反应出通信中可能出现的问题。在使用到中继功能的网络中，网络范围会被大大拓宽，测试节点间的距离也无需覆盖整个网络范围，但应大于任意两节点间的距离的最大值。

需注意的是，由于电力线信道具有非对称性，信号在节点间的传输方向对性能有较大影响，所以测试中两个方向的传输性能均需要评估。应分别将两个节点作为发送、接收节点进行测试。

1.1 物理测试（PHY Test）法

TI 的 PLC 套件中的软件都内置了物理测试（PHY Test）功能，可以在如图 1 中节点位置使用 TI 的 PLC 评估套件（或用户自己的 PLC 模块）进行测试。将 UART 通过电平转换与计算机 COM 口相连，配合 Zero Config GUI (ZCG) 软件，可以使用物理性能测试功能。该软件可以在 TI PLC 软件开发包中获得

(<http://www.ti.com/lstds/ti/apps/powerinfrastructure/plcmodem/product.page#software>)，使用方法请参考开发包中的 ZCG 软件说明手册。

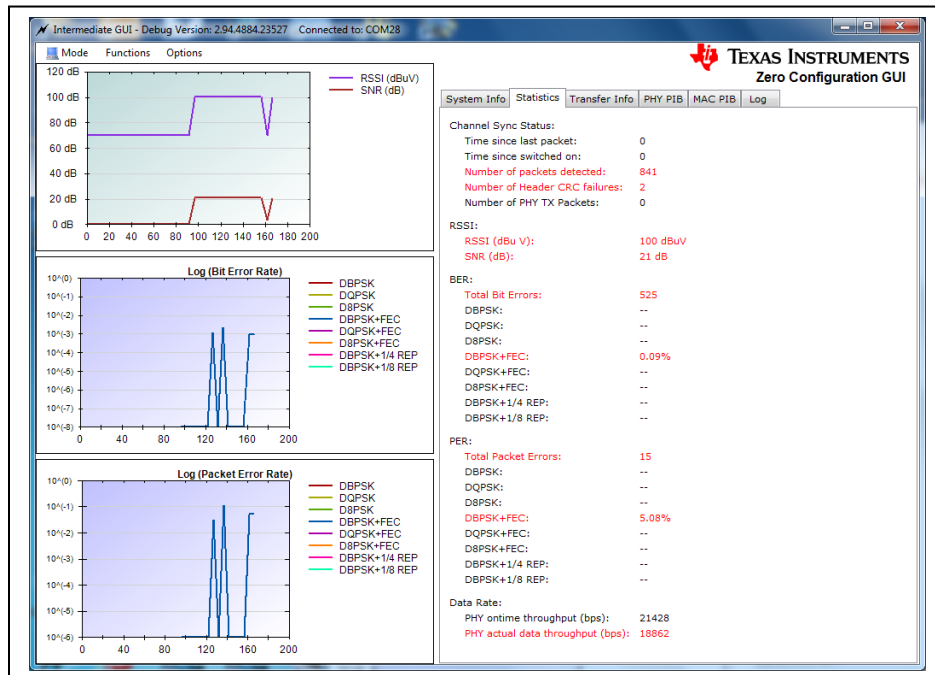


图 2. 在两节点间进行通信测试

在 ZCG 软件的 Intermediate 模式下，一侧节点通过 PHY Test 发送一定量的数据包，另一侧的接收节点上可以查看接收的统计信息，如图 2。对比发送的数据，可以大致了解 PLC 模块工作时，物理层通信可达到的性能。由于此测试使用模块正常工作的发送功能，此时的性能是模块工作频带内的性能，统计数据无法预测改换工作频带可能带来的影响。

评估时应注意以下几个关键指标：

Number of Packets detected

正常接收的数据帧的个数。PHY 层通信是基于数据帧的，对比发送端发送的数据封包(Number of PHY TX Packets)，可以判断整个收发过程中丢失的数据封包个数。丢包率能反应通信的质量。通常丢包率小于 2%时，都可以认为环境比较稳定。

SNR

SNR 即信噪比，直接决定通信的成功与否及质量。在 ZCG 窗体上，有统计整个过程的 SNR 变化情况，如图 3所示。在不同环境下，SNR 对接收时误码率(BER)的影响可以在 TI 的 PHY 测试报告中找到参考。基于此可以大致了解通信时理论可达到的性能。

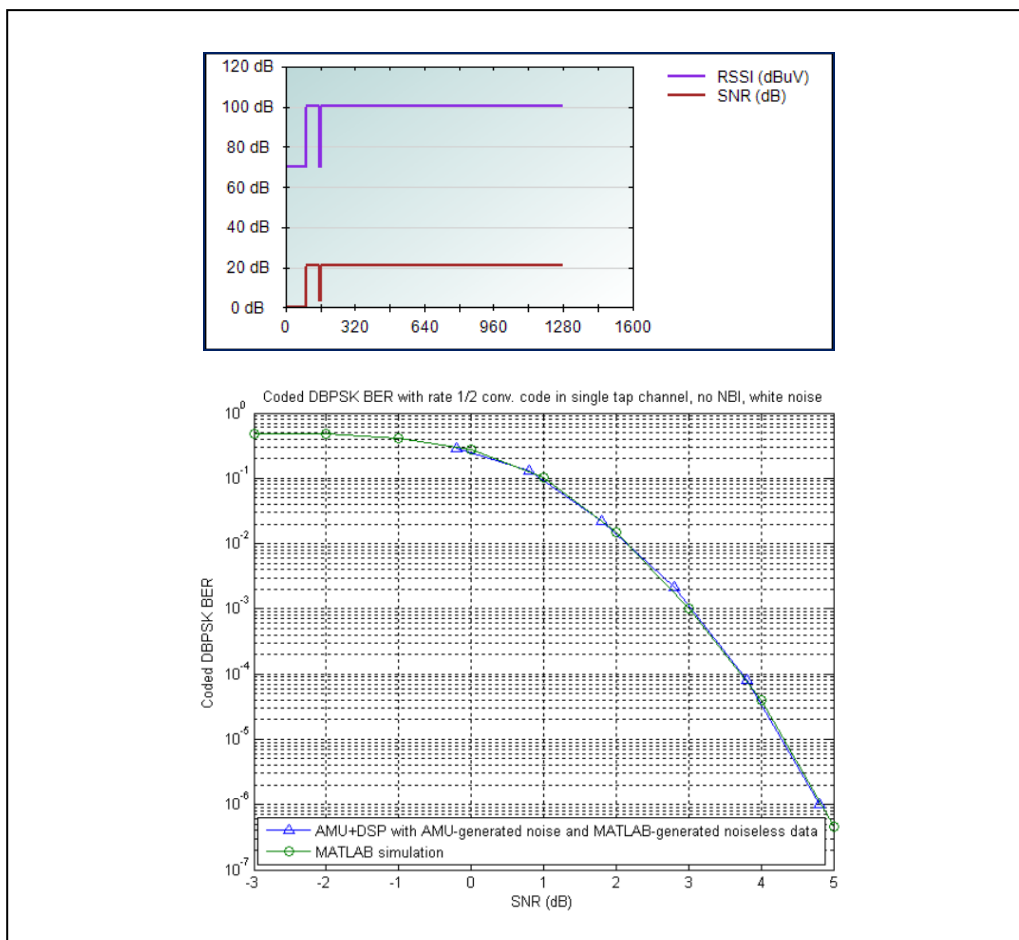


图 3. RSSI、SNR 在测试过程中变化，以及 SNR 对 BER 影响的例子

BER

BER 是位错误率，即误码率。在整个传输过程中，伴随着噪声的影响和信道的变化，误码率是一个不停变化的值。ZCG 软件中，会统计所有错误的位的数量，可以用错误的位数除以封包的总位数，得到平均的误码率。总位数计算公式为：

$$\text{总位数} = \text{封包数} \times \text{每包数据Byte数} \times 8$$

其中每包数据 Byte 数可以在 PHY Test 设置中进行配置。

在接收过程中，BER 也会根据线路噪声情况动态变化，如图 2 左侧中部的 BER Log，也反映了线路质量波动的情况。

PHY actual data throughput (bps)

在 PHY 层连续发送时，实际传送的数据量。反应了当前环境下，以固定帧长发送时，PHY 层最大可能达到的数据传输速率。对于连续较大量的数据传输（每帧数据较长），传输速率会更接近于测试值；而使用多封包小数据量（每帧数据较短）传输时，预期的传输速率可能远小于测试值。PHY 层实际传输数据量也是对通信质量的反应。当受干扰较大时，速率也会受到影响。实际应用中，应结合 MAC 层、网络层的消耗，根据通信方式估算速率。

1.2 信道分析法

通信信道——即电力线的状况，决定了通信的效果。图 4 对电力线信道的建模，输入信号为 $s(t)$ ，输出信号为 $r(t)$ ，主要的影响参数有两个：信道响应 h 及噪声 n 。所以对信道的分析需要对信道响应和噪声情况进行测量评估。

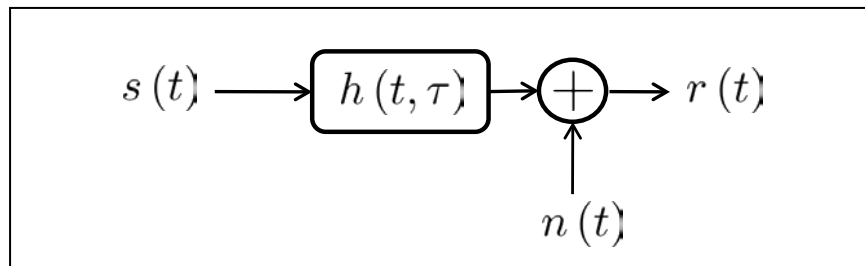


图 4. 电力线信道模型

对于信道响应的测量，最简单的办法是在测试点一端输入宽频率信号，使发送信号在工作频率范围的幅值等于 PLC 模块发送时的幅值，另一端采集该信号。TI 的 Channel Analyzer 工具可以作为节点进行该项测试。由于关心的是通信频带内的响应，所以测量的频带一般在 500K 以内，即测试信号一般是一个在 50-500KHz 频域内的信号，其功率谱如图 5 所示。

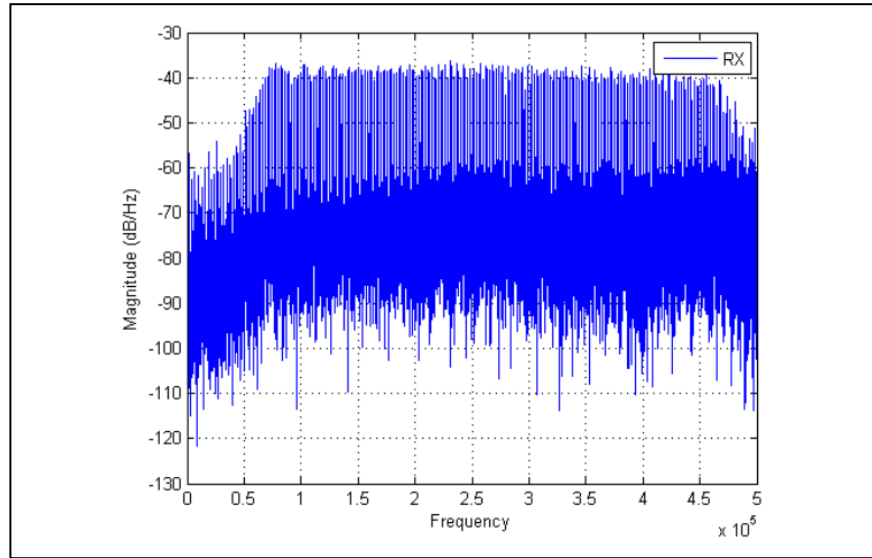


图 5. 电力线信道功率谱图

对于噪音的测量，只需要在测试点上直接采集噪音即可。

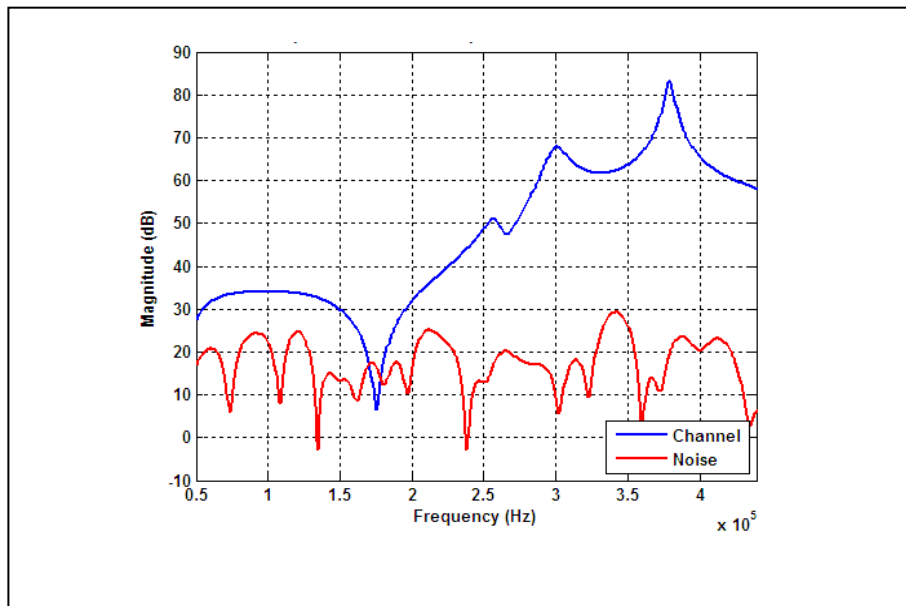


图 6. 电力线信道信噪比分析

对采集到的信号及噪音做频域分析，即可以分析出信道的情况。图 6 是对某信道测试数据的分析结果。图中红色 **Noise** 是测试点采集到的噪声的功率谱。图中蓝色 **Channel** 部分是接收到的信号的功率谱强度，反应了信道对信号的衰减。图中可以看到该信道对 **160KHz-180KHz** 左右的信号衰减非常明显，故以当前的发射功率难以在该频带内提供可用的信号噪声比，信号几乎都会被噪声淹没；也可以看出对于 **280KHz-500KHz** 的信号，该信道质量较好（衰减少），信号以同样功率发射，可以接收到的信号更强。

2 通信速率评估

除了连通性的评估，通信速率的考量也是十分关键的，一般考虑两个因素：

- 实际传输速率
- 实时性要求

2.1 实际传输速率

如前文所述，PHY 层实际通信速率（Actual PHY Data Rate）与每帧所载数据长度有关，数据量越大，效率越高。PRIME PHY 的实测速率与标称速率的关系可以参考表格 1。所得数据使用 TI 开发板通过 ZCG 软件，在误码率为 0 时测得，为参考值。G3 与 PLC-lite 也可以通过同样方式测得。

表格 1. PRIME PHY 标称速率与实测速率参考值

	DBPSK		DQPSK		D8PSK	
	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
每帧数据长度 (Byte)	377	756	755	1512	1133	2268
PRIME 理论速率 (Kbps)	21.4	42.9	42.9	85.7	64.3	128.6
实测速率 (Kbps)	19.8	39.8	39.8	75.5	58.9	110.7

2.2 延迟及实时性问题

实际应用中，除了通过测试 PHY 层实际速率（Actual PHY Data Rate）估计数据在物理层的传输速率，也需要考虑数据封装延迟的因素。

图 7 的波形是 PLC 在电力线上的一个数据帧（PRIME 标准，其它标准类似）。PLC 通信时，都是基于这样的数据帧。数据帧分为 3 部分：前导（Preamble），帧头（Header），数据（Payload）。只有当一个完整帧接收完成时，上位机才会收到通知。数据帧的前导和帧头的长度是固定的，所以对任意长度的数据，除了本身的传输时间外，也会引入几毫秒到几十毫秒的固定延迟。

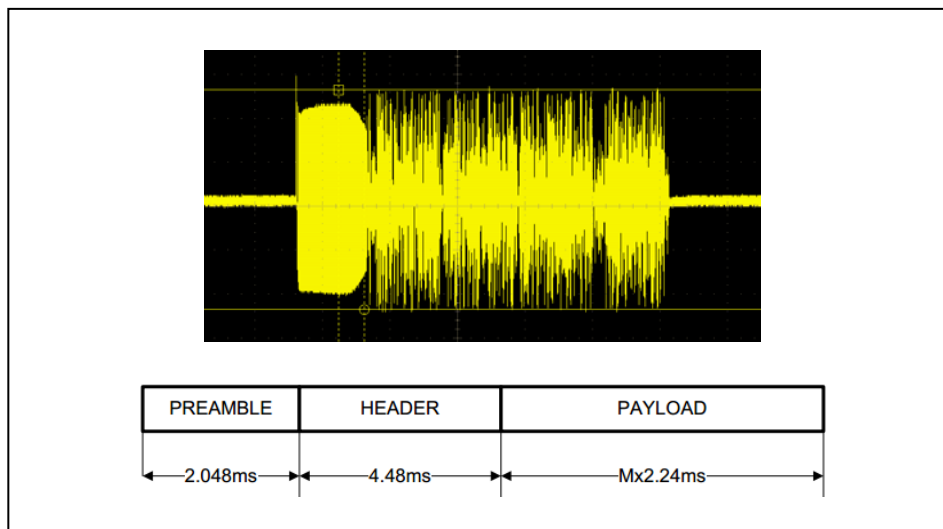


图 7. 典型的 PRIME 数据帧

例如，如图 7 可以看出，对于 PRIME 数据包：

- 当 $M = 63$ （最大值），最长数据帧为 148ms
- 当 $M = 1$ （最小值），最短数据帧为 9ms

具体的延迟时长与协议、每帧数据的长度及调制方式相关，由于组合复杂，计算起来较为繁琐，建议在使用时，通过 ZCG 根据具体要发送的数据包长度实测确定。如图 8 所示，ZCG PHY Parameters 设置的几个值都会影响数据帧的长度：

- **Modulation:** 调制方式，影响帧数据部分长度
- **FEC:** 前向纠错，开启后会使得帧数据部分长度加倍。
- **PPDU Payload:** 每帧中数据的长度。

在设计网络层时，也应该考虑到 PLC 的收发线只有一根，所以属于半双工的通信方式，为握手信号、确认（ACK）信号留足充分的时间余量。

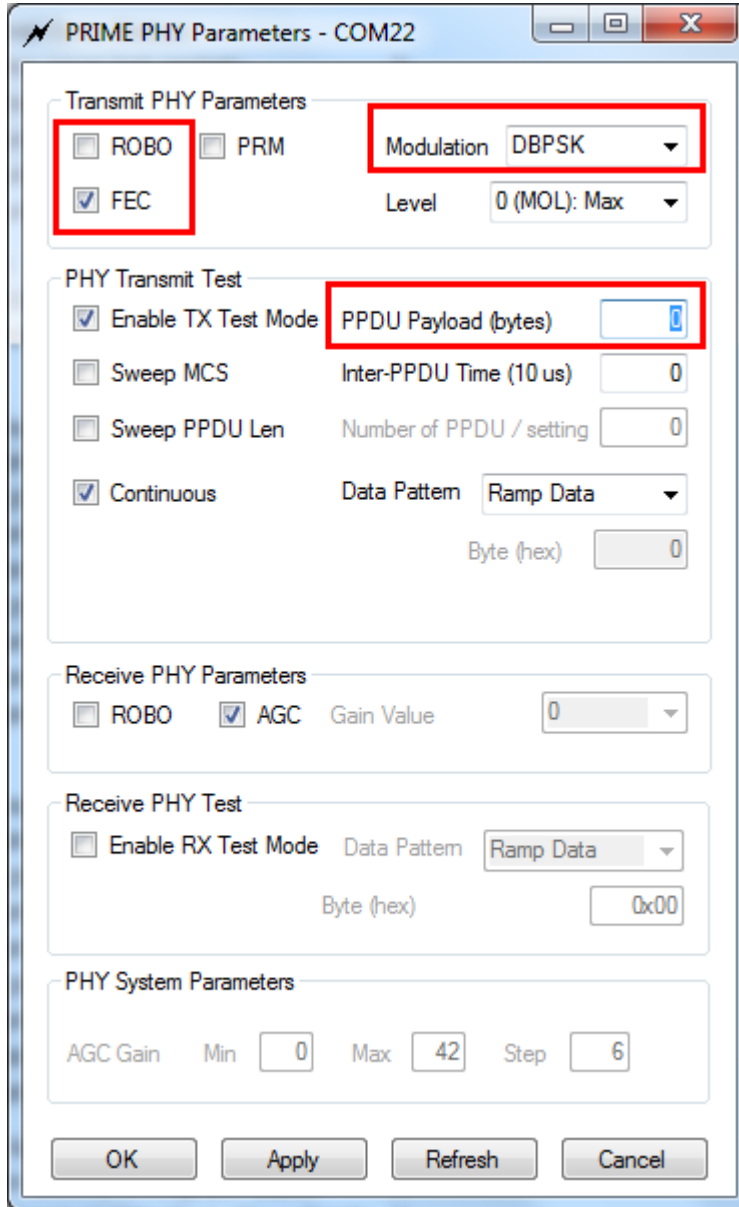


图 8. 在 PHY Test 调整数据帧长度、调制方式及前向纠错

参考文档

1. *PRIME specification v1.3.6*
2. *TI PRIME User Guide-Zero config GUI*
3. *Channel and Noise Measurement Methods*

重要声明

德州仪器(TI) 及其下属子公司有权根据 JESD46 最新标准, 对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其它更改, 并有权根据 JESD48 最新标准中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的组件的性能符合产品销售时 TI 半导体产品销售条件与条款的适用规范。仅在 TI 保证的范围内, 且 TI 认为有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非适用法律做出了硬性规定, 否则没有必要对每种组件的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用 TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

TI 不对任何 TI 专利权、版权、屏蔽作品权或其它与使用了 TI 组件或服务的组合设备、机器或流程相关的 TI 知识产权中授予的直接或间接版权限作出任何保证或解释。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息, 不能构成从 TI 获得使用这些产品或服务的许可、授权、或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是 TI 的专利权或其它知识产权方面的许可。

对于 TI 的产品手册或数据表中 TI 信息的重要部分, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况下才允许进行复制。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任或义务。复制第三方的信息可能需要服从额外的限制条件。

在转售 TI 组件或服务时, 如果对该组件或服务参数的陈述与 TI 标明的参数相比存在差异或虚假成分, 则会失去相关 TI 组件或服务的所有明示或暗示授权, 且这是不正当的、欺诈性商业行为。TI 对任何此类虚假陈述均不承担任何责任或义务。

客户认可并同意, 尽管任何应用相关信息或支持仍可能由 TI 提供, 但他们将独自负责满足与其产品及其应用中使用 TI 产品相关的所有法律、法规和安全相关要求。客户声明并同意, 他们具备制定与实施安全措施所需的全部专业技术和知识, 可预见故障的危险后果、监测故障及其后果、降低有可能造成人身伤害的故障的发生机率并采取适当的补救措施。客户将全额赔偿因在此类安全关键应用中使用任何 TI 组件而对 TI 及其代理造成的任何损失。

在某些场合中, 为了推进安全相关应用有可能对 TI 组件进行特别的促销。TI 的目标是利用此类组件帮助客户设计和创立其特有的可满足适用的功能安全性标准和要求的终端产品解决方案。尽管如此, 此类组件仍然服从这些条款。

TI 组件未获得用于 FDA Class III (或类似的生命攸关医疗设备) 的授权许可, 除非各方授权官员已经达成了专门管控此类使用的特别协议。

只有那些 TI 特别注明属于军用等级或“增强型塑料”的 TI 组件才是设计或专门用于军事/航空应用或环境的。购买者认可并同意, 对并非指定面向军事或航空航天用途的 TI 组件进行军事或航空航天方面的应用, 其风险由客户单独承担, 并且由客户独自负责满足与此类使用相关的所有法律和法规要求。

TI 已明确指定符合 ISO/TS16949 要求的产品, 这些产品主要用于汽车。在任何情况下, 因使用非指定产品而无法达到 ISO/TS16949 要求, TI 不承担任何责任。

	产品		应用
数字音频	www.ti.com.cn/audio	通信与电信	www.ti.com.cn/telecom
放大器和线性器件	www.ti.com.cn/amplifiers	计算机及周边	www.ti.com.cn/computer
数据转换器	www.ti.com.cn/dataconverters	消费电子	www.ti.com.cn/consumer-apps
DLP® 产品	www.dlp.com	能源	www.ti.com.cn/energy
DSP - 数字信号处理器	www.ti.com.cn/dsp	工业应用	www.ti.com.cn/industrial
时钟和计时器	www.ti.com.cn/clockandtimers	医疗电子	www.ti.com.cn/medical
接口	www.ti.com.cn/interface	安防应用	www.ti.com.cn/security
逻辑	www.ti.com.cn/logic	汽车电子	www.ti.com.cn/automotive
电源管理	www.ti.com.cn/power	视频和影像	www.ti.com.cn/video
微控制器 (MCU)	www.ti.com.cn/microcontrollers		
RFID 系统	www.ti.com.cn/rfidsys		
OMAP应用处理器	www.ti.com.cn/omap		
无线连通性	www.ti.com.cn/wirelessconnectivity	德州仪器在线技术支持社区	www.deyisupport.com

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2015, Texas Instruments Incorporated