

Application Brief

太阳能应用中的电力线通信



引言

随着太阳能装置数量的增加，系统监控和安全的重要性也随之提高。在这种趋势下，有线通信起着关键作用。支持 NEC 2014、NEC2017 和 UL1741 模块级快速关断的 SunSpec® 快速关断 (RSD) 等安全标准构建于有线通信接口之上。除了大多数安装中都严格要求的快速关断功能外，许多系统中还添加了模块级电力电子 (MLPE) 监控。

图 1 所示为不同太阳能装置中实现的典型电力线通信选项。这些装置可分为直流线路上的通信 (红色) 和交流线路上的通信 (蓝色)。区别主要在于数据信号如何在发送器处耦合到电力线，以及如何在接收器侧提取信号。

另一个区分选项是从太阳能电池板到逆变器的通信和到电网的通信。逆变器与 MLPE 之间的通信用于监控 PV 电池板运行条件、故障检测和快速关断。这适用于与电源优化器和其他 MLPE 通信的串式逆变器，或在汇流箱中或直接在串输入处收集串或面板信息的商用串式或中央逆变器。面向电网的第二个通信选项通常用于监测和控制多个串式逆变器 (由电网运营商执行以控制功率级别，从而实现电网稳定性)，或在住宅用例中同步微型逆变器以形成分相或三相交流电网，或将操作信息从单个微型逆变器发送到数据聚合器。

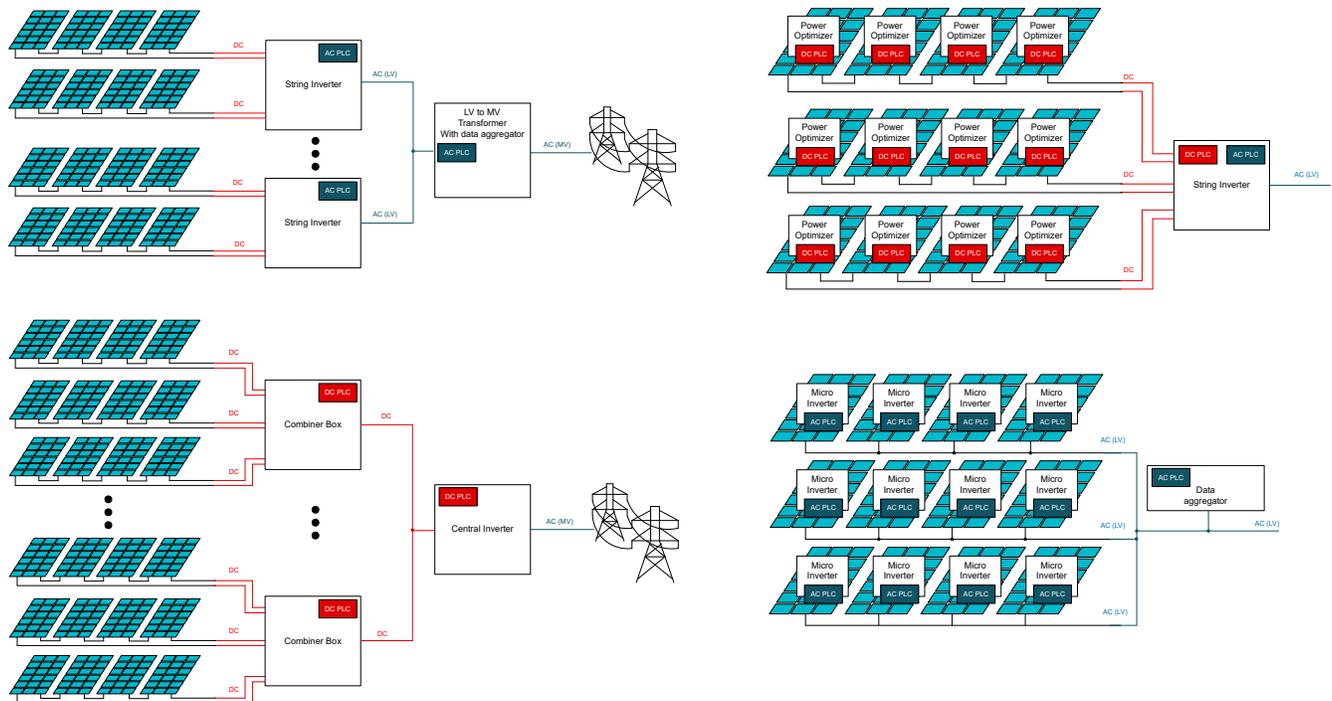


图 1. 太阳能装置中 PLC 的典型配置

窄带与宽带 PLC

国际标准和规范规定了可用于电力线通信的频段。一般而言，分为窄带和宽带 PLC 这两类。

窄带 PLC 使用高达 500kHz 的载波频率。表 1 展示了不同地区的可用频段。窄带 PLC 能够进行更远距离的通信，通常用于智能仪表。因此，窄带 PLC 非常适合太阳能，以便在从 PV 电池板到串式逆变器输入的更远距离进行通信。

表 1. 窄带 PLC 标准和频带

区域	组织	频段 (kHz)
欧洲	CENELEC	3-95 95-125 125-140 140-148.5
日本	ARIB	10-450
中国	EPRI	3-90 3-500
USA	FCC	10-490

宽带 PLC 使用高于 2MHz 的频率，因此可提供更高的数据速率，并且与窄带 PLC 相比具有更小的覆盖范围，功耗明显更高。表 2 显示了简要比较。

表 2. 窄带和宽带 PLC 的比较

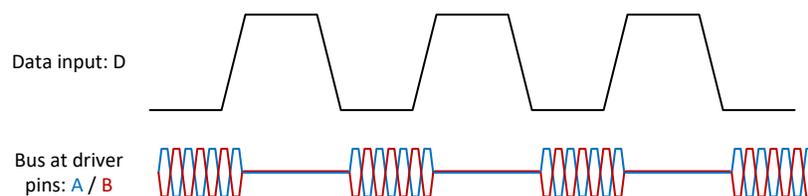
	窄带 PLC	宽带 PLC
数据速率	< 200kbps	>1Mbps
范围	< 1 km	< 100 m
频段	< 500kHz	> 2MHz
功耗	低	高
调制	OOK、FSK、OFDM	OFDM、QAM、QPSK

窄带 PLC 中使用的调制方案

电力线通信使用了不同的调制方案。窄带应用开关键控 (OOK)、移频键控 (FSK) 和正交频分复用 (OFDM) 是最常见的调制，而在宽带 PLC 中主要使用 OFDM。本章将更详细地介绍这三种调制技术。

开关键控 (OOK)

这种简单的调制形式通过传输定义的载波频率 (例如对于逻辑“0”) 或不发送逻辑“1” (请参阅图 2) 来对二进制 1 和 0 进行编码。调制和解调都可以通过 THVD8000 等简单的收发器完成，无需在微控制器或处理器中进行任何额外的数字解码。为了具有足够的驱动能力，当需要使用长电缆时，需要使用 THS6222 或 THS6232 等线路驱动器 OPAMP 以及耦合电路。


图 2. OOK 的电力线编码示例

TIDA-010935 是展示 OOK 如何用于太阳能应用的参考设计。此参考设计具有运行简单 OOK 调制所需的所有电路。该设计内置了可由 MSPM0 MCU 控制的 BoosterPack 配置，但也可以使用其他 MCU BoosterPack。

移频键控 (FSK)

在移频键控 (FSK) 中，使用不同的载波频率对符号中的数据进行了编码。符号是指可通过通信通道传输的最少数据量。根据使用的频率数量，每个符号可以传输多个位。在非常简单形式的二进制 FSK (BFSK) 中，只使用两种频率。其中一个用于传输逻辑“0”，另一个频率用于传输逻辑“1”。在这种情况下，这些载波被称为标记频率和空间频率。BFSK 的一种变体是在 SunSpec RSD 中使用的展频型移频键控 (S-FSK)。在 S-FSK 中，标记频率和

空间频率的间隔足够远，以避免窄带干扰对两个频率造成干扰。这样，即使两个频率之一被系统中的干扰信号阻断，接收器仍然可以恢复数据。图 3 所示为 S-FSK 的图示。

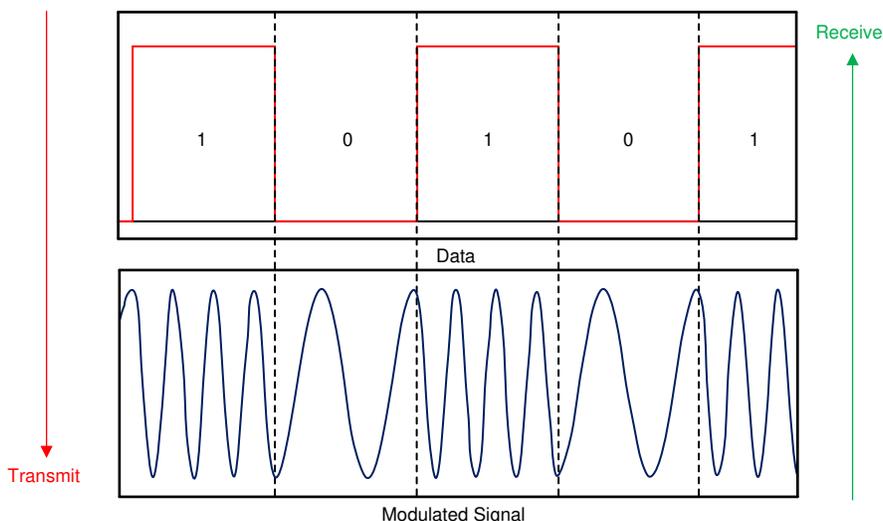


图 3. 用于 S-FSK 的时域编码

为了进行解调，信号采样值至少是最高载波频率的两倍。这通常由也运行解调算法的微控制器完成。解调算法仅对指定的载波频率敏感，这使算法能够抵抗宽带噪声，但在确切的载波频率下不受窄带干扰。对于太阳能应用，重要的是使电源转换系统的开关频率远离所选载波频率，以免影响通信通道。

TIDA-060001 参考设计已实现了适用于 SunSpec 快速关断发送器或接收器的 S-FSK。该设计采用集成模拟前端 IC：[AFE031](#)。[C2000-WARE-SDK](#) 中的 [TMS320F280049C](#) 可获得 FSK 调制和解调所需的所有软件，从而使其易于移植到 C2000 系列的其他成员。例如，在太阳能电源优化器参考设计 [TIDA-010949](#) 中，快速关断接收器软件已移植到 [TMS320F2800137](#)。由于电源优化器的运行频率为 300kHz，这个频率远离此通信示例中使用的载波频率，因此该参考设计非常稳健。

正交频分多路复用接入 (OFDM)

本文最后介绍的调制技术是 OFDM。在 OFDM 中，数据流被分割并通过多个子载波传输。正交子载波用于保证它们之间的干扰尽可能小。每个子载波使用传统的调制方案进行调制，如相移键控 (PSK) 或差分相移键控 (DPSK)。使用多个密集分布的子载波会显著提高数据速率。使用 OFDM 的一个例子是智能仪表，其中像 G3 和 PRIME 等标准使用具有 100 多个子载波的 OFDM。这可以在窄带运行中实现高达几百 Kb 的数据速率。OFDM 还可用于提高嘈杂环境中的稳健性，这在太阳能应用中很常见。监控子载波上的信号质量并移除信噪比不佳或使用多个子载波冗余的子载波可提高整体稳健性。

图 4 和图 5 展示了使用四个子载波的 OFDM 调制示例。每个子载波使用 PSK 对一个位进行编码。所有这些信号都将相加并进行传输。选择正交子载波的影响显示在频域中。载波频率的峰值出现在其他子载波的过零处。这可以更大限度地减少码间串扰 (ISI)，换言之，可提高数据传输的稳健性。

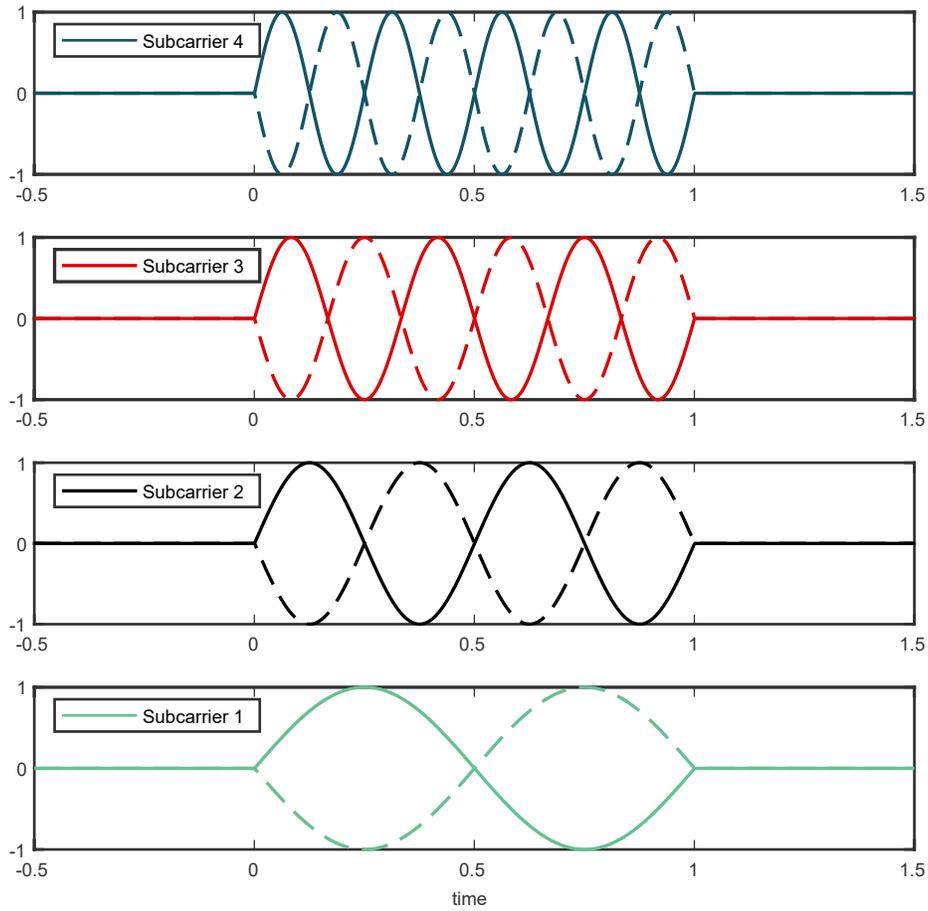


图 4. 时域中的 OFDM 信号

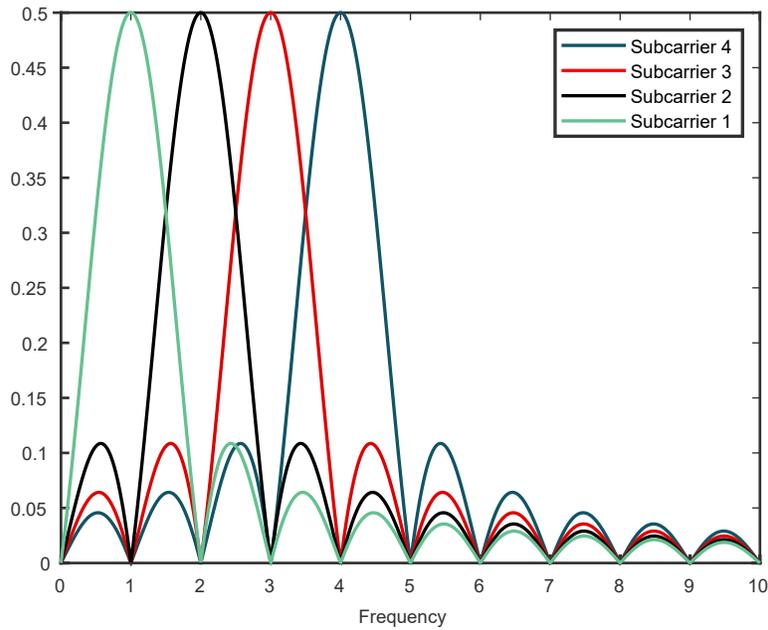


图 5. 频域中的 OFDM 信号

图 6 中给出了具有 C2000 MCU 和 AFE031 的 PLC 收发器的可能实现方案。为了进行发送操作，MCU 通过 SPI 控制 AFE031 内的 DAC。DAC 输出还被滤波，然后放大并耦合到电力线。对于接收路径，传入信号将通过线路

耦合电路传播、进入可编程增益级 (PGA1)、再次进行带通滤波，再由额外的可编程增益级 (PGA2) 放大，然后由 MCU 的内部 ADC 进行采样。所有用于编码和解码信号的软件都在 MCU 上运行 (例如，TMS320F28069 或 TMS320F28P550)。

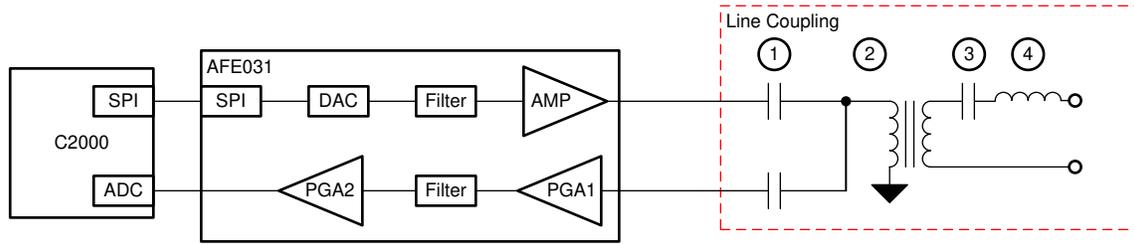


图 6. 交流电源的简化线路耦合电路

可以进行多个 MCU 分区，如图 7 所示。在专用 MCU 上运行 PLC SW，并具有用于其他功能 (如数字电源控制) 的单独 MCU。或者将全部功能组合到一个 MCU 中，以便在不同中断服务例程中运行电力线通信协议和数字电源控制。

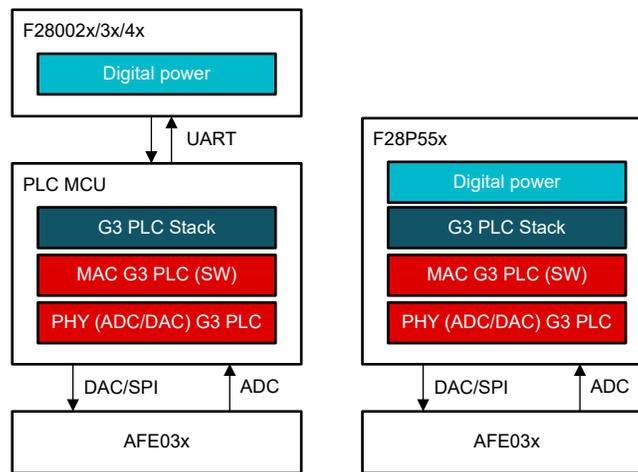


图 7. 针对电力线通信的 MCU 选项

总结

在太阳能应用中，窄带 PLC 有不同的调制方案。表 3 中总结了优缺点。对于简单的低数据速率应用，OOK 就足够了。FSK 增加了一些额外的稳健性，因此非常适合具有低数据速率要求的安全应用。在监测系统中，大量节点正在将更多数据传输到数据聚合，因此 FSK 和 OOK 的带宽是不够的。在这些系统中，OFDM 是一个不错的选择。

表 3. 窄带调制方案比较

	OOK	FSK	OFDM
复杂性	简单	中等	复杂
数据速率	低	低	高
稳健性	低	中等	稳健

商标

SunSpec® is a registered trademark of SunSpec Alliance, Inc.

所有商标均为其各自所有者的财产。

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司