

边缘智能第3部分： 边缘节点通信

Ian Beavers
ADI公司

简介

工业物联网机器可以感知众多信息，以用于工业物联网(IIoT)中的关键决策。边缘节点中的传感器可以在空间上远离任何数据聚合点。它必须通过将边缘数据连接到网络的网关进行连接。传感器构成工业物联网生态系统的前端边缘。测量阶段将检测到的信息转换为压力、位移、旋转等可量化数据。可以对数据进行过滤，只连接节点以外最有价值的信息，以便进行处理。在低延迟连接条件下，只要关键数据可用即可作出关键决策。

检测、测量、解读、连接

边缘节点一般必须通过有线或无线传感器节点(WSN)连接到网络。在信号链的这一部分中，数据完整性仍然十分关键。如果通信不一致、丢失或损坏，则优化检测和测量数据几乎没有价值。理想情况下，要在系统架构设计期间预先设计鲁棒的通信协议。最佳选择取决于连接要求：范围、带宽、功率、互操作性、安全性和可靠性。

有线设备

在连接的鲁棒性至关重要的情况下(如EtherNet/IP、KNX、DALI、PROFINET和ModbusTCP)，工业有线通信发挥着关键作用。远距离传感器节点可以用无线网络向网关回传信息，网关则依赖有线基础设施。数量较少的连网物联网节点会一律使用有线通信，因为多数这些设备会采用无线连接。借助有效的工业物联网连接策略，可以将传感器安装在可以检测到有价值信息的任何地方，不仅是现有的通信设施和电源基础设施所在之处。

传感器节点必须有与网络通信的方法。以太网在有线领域占据主导，因为工业物联网框架把更高层的协议映射于这类连接上。具体的以太网实施方案的速率范围为10 Mbps至100 Gbps及以上。高速率通常面向互联网主干网，用于连接云中的服务器群。¹

KNX一类的低速工业网络是基于双绞线，采用差分信令模式传输数据，电源电压为30 V，总带宽为9600 bps。虽然每段只能支

持数量有限的地址(256)，但寻址最高可支持65,536台设备。最大分段长度为1000米，可选线路中继器，最多支持4段。

工业无线网络面临的挑战

在考虑采用哪种通信和网络技术时，工业物联网无线系统设计师面临诸多挑战。为此，需要高度重视以下制约条件：

- ▶ 范围
- ▶ 间歇性连接与连续性连接
- ▶ 带宽
- ▶ 功率
- ▶ 协同能力
- ▶ 安全性
- ▶ 可靠性

范围

范围指接入网络的工业物联网设备传输数据的距离。以米为单位的短程个人局域网(PAN)可以用于通过BLE进行设备调试的情况。长达数百米的局域网(LAN)则可用于安装在同一栋建筑中的自动化传感器。广域网(WAN)以千米为单位，其应用包括安装在大型农场里的农用传感器。

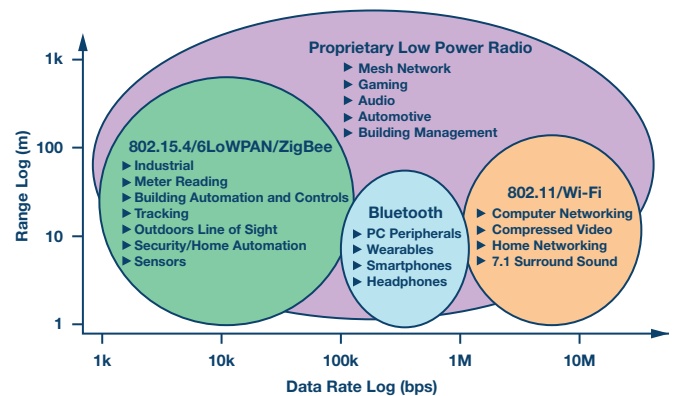


图1. 短程无线连接。

选择的网络协议应与工业物联网的具体应用案例要求的范围相匹配。例如，对于工作距离为数十米的室内局域网应用，4G蜂窝网络在复杂程度和功率方面就不合适。在要求范围内传输数据有困难时，边缘计算不失为一种替代方案。在边缘节点进行数据分析，而不是把数据传输到其他地点进行处理。

发射的无线电波在功率密度方面遵循平方反比定律。信号功率密度与无线电波传输距离的平方反比成比例。传输距离增加一倍，无线电波只能维持最初功率的四分之一。发射输出功率每增加6 dBm，可能传输范围就会增加一倍。

在理想的自由空间里，平方反比定律是影响传输范围的唯一因素。然而，墙、栅栏、植物等障碍物会减小现实范围。空气湿度可能会吸收射频能量。金属物可能会反射无线电波，导致次要信号在不同时间到达接收器端，形成具有破坏性的干扰，进一步导致功率下降。

无线电接收器的灵敏度决定了可以实现的最大信号路径损耗。例如，在2.4 GHz工业、科研和医疗(ISM)频段中，接收器的最低灵敏度为-85 dBm。射频辐射器的能量全向均匀传播，形成一个球体($A = 4\pi R^2$)，其中，R为从发射器到接收器的距离，单位为米。自由空间功率损失(FSPL)与发射器与接收器之间的距离的平方以及基于Friis传输方程集的射频信号频率的平方成比例。²

$$S = \frac{P_t}{4 \times \pi \times R^2} \text{ 其中, } P_t = \text{发射功率, 单位为瓦特,}$$

S = 距离R时的功率

$$P_r = \frac{S \times \lambda^2}{4 \times \pi} \text{ 其中, } P_r = \text{接收功率, 单位为瓦特}$$

$$\lambda \text{ (发射波长, 单位为米)} = c \text{ (光速)} / f \text{ (Hz)} = 3 \times 10^8 \text{ (m/s)} / f \text{ (Hz) 或 } 300 / f \text{ (MHz)}$$

$$FSPL \text{ (dB)} = \frac{P_t}{P_r} = \frac{4 \times \pi \times R^2}{\lambda^2} = \frac{(4 \times \pi \times R \times f)^2}{c^2} =$$

$$20 \log \frac{4 \times \pi \times R \times f}{c} \text{ 其中, } f = \text{发射频率}$$

给定已知发射频率和要求的距离，则可以计算目标发射和接收对的FPSL。链路预算的形式如方程1所示：

$$\text{Received power (dBm)} = \text{Transmitted power (dBm)} + \text{gains (dB)} - \text{losses} \tag{1}$$

带宽和连接能力

带宽是在特定时间内可以传输的数据速率。它限制了可以从工业物联网传感器节点采集数据的最大速率以及向下游传输数据的最大速率。考虑这些因素：

- ▶ 每台设备随时间推移产生的数据总量
- ▶ 网关中部署和聚合的节点数
- ▶ 以恒定数据流或间歇性突发方式存在的突发数据高峰期需要的可用带宽

网络协议的包大小最好与传输的数据大小相匹配。发送含有空数据的包会造成效率下降。然而，把大数据块分割成过多小包也会开销一定的资源。工业物联网设备并非始终连着网络。为了节省电量或带宽，它们可以周期性地连网。

功耗与协同能力

如果工业物联网设备必须用电池供电，为了省电，可以在其空闲时使其进入睡眠模式。可以在不同的网络负载条件下模拟设备的功耗。这样可以确保设备的电源和电池容量与传输必要数据需要的功耗相匹配。³

网络中不同可能节点之间的协调配合可能是个挑战。为了维持互联网的协调能力，传统方法是采用标准有线和无线协议。为了跟上新技术的快速发展步伐，很难实现新的工业物联网流程的标准化。以工业物联网生态系统为例，看看符合现有解决方案需要的最佳技术。如果技术被广泛运用，则实现长期协调配合的概率会更高。

安全性

工业物联网的网络安全性在系统中起着三个重要的作用：机密性、完整性和真实性。机密性要求网络数据只停留在已知框架中，不允许数据被外部设备破坏或截获。数据完整性要求消息内容与发射数据完全相同，不改变、减少或增加信息。^{4, 5}真实性要求从符合预期的独家来源接收数据。以虚假身份进行错误通信是虚假身份验证的一个例子。

连接不安全网关的安全无线节点会造成安全漏洞，有可能遭到破坏。数据时间戳有助于发现是否有任何信号被跳过并被通过旁道传输。时间戳也可以用于正确重整来自多个未同步传感器的凌乱的关键时间数据。

可在IEEE802.15.4框架下实现AES-128加密，在IEEE 802.11框架下实现AES-128/256加密。密钥管理、加密级随机数生成(RNG)和网络访问控制清单(ACL)都有助于清除通信网络的安全障碍。

频段

物联网无线传感器可以在蜂窝基础设施中使用特许执照频段，但这些设备可能非常耗电。在车载远程信息处理这个应用示例中，需要采集移动信息，所以，短程无线通信并不可行。然而，许多其他低功耗工业应用会占用ISM频段中免执照频谱。

IEEE 802.15.4低功耗无线标准可能是诸多工业物联网应用的理想选择。该标准的工作频段为2.4 GHz、915 MHz和868 MHz ISM，总共有27个通道可以用于射频通道多次跳跃。物理层支持免执照频段，具体取决于在全球所处位置。欧洲提供的是处于868 MHz的600 kHz通道0，北美则提供了以915 MHz为中心的10个2 MHz频段。全球通用通道是2.4 GHz频段内的5 MHz通道11至通道26。

蓝牙®低功耗(BLE)是一种功耗大幅减小的解决方案。BLE不是文件传输的理想选择,更适合小块数据。一个主要优势是与竞争技术相比,因其已与移动设备广泛集成,所以更具普遍性。蓝牙4.2核心规范采用高斯频移调制,工作频段为2.4 GHz ISM,范围为50米至150米,数据速率为1 Mbps。

表 1. IEEE 802.15.4 频段与通道分配

	频段 (MHz)		
	868.3	902 至 928	2400 至 2483.5
通道数量	1	10	16
带宽 (MHz)	0.6	2	5
数据速率 (kbps)	20	40	250
符号速率 (kbps)	20	40	62.5
免执照地区	欧洲	美洲	全球
频率稳定性	40 ppm		

在确定用于工业物联网解决方案的最佳频段时,要考虑2.4 GHz ISM解决方案的优点和缺点:

优点

- ▶ 多数国家或地区均免执照
- ▶ 所有地区市场采用相同的解决方案
- ▶ 83.5 MHz的带宽允许在不同通道上实现高数据速率
- ▶ 可实现100%占空比
- ▶ 与1 GHz以下频段相比天线较紧凑

缺点

- ▶ 在相同输出功率下,距离比1 GHz以下频段短
- ▶ 无处不在,数量众多,因而会形成许多干扰源信号

通信协议

通信系统中用来格式化数据和控制数据交换的一组规则和标准。开放系统互连(OSI)模型将通信分解成不同的功能层,以便更容易地实现可扩展的互操作型网络。OSI模型有七个层次:物理(PHY)层、数据链路层、网络层、传输层、会话层、表示层和应用层。

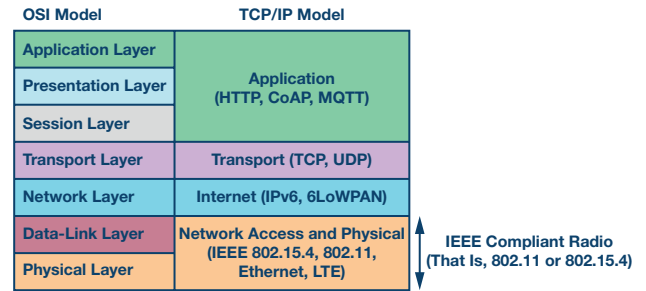


图2. OSI与TCP/IP模型。

IEEE 802.15.4和802.11 (Wi-Fi)标准停留在媒介访问控制(MAC)数据链路层和PHY层。附近的802.11接入点应各用一个非重叠通道以减小干扰效应(图3)。802.11G使用的调制方案是正交频分复用(OFDM)方案,该方案比后文介绍的IEEE 802.15.4方案复杂。

链路层用于把无线电信号波转换成比特,并把比特转换成无线电信号波。这一层负责数据成帧以实现可靠通信,同时管理对目标无线电通道的访问操作。

网络层在整个网络中路由数据并对数据寻址。互联网协议(IP)正是在这一层中提供IP地址,并将IP包从一个节点带到另一个节点。

在运行于网络两端的应用会话之间,传输层会生成通信会话。这样一样,多个应用就可以在一台设备上运行,每个应用均使用自己的通信通道。互联网上的连网设备主要采用传输控制协议(TCP),并将其作为首选传输协议。

应用层对数据进行格式和管理,以针对节点传感器的具体应用优化数据流。TCP/IP堆栈中一个常见的应用层协议是用于通过互联网传输数据的超文本传输协议(HTTP)。

FCC Part 15规则将ISM频段中发射器的有效功率限制为36 dBm。2.4 GHz频段中的固定点对点链路是个例外,其天线增益为24 dBi,发射功率为24 dBm,总EIRP为48 dBm。发射功率应至少达到1 mW。如果包差错率小于1%,则要求接收器灵敏度在2.4 GHz频段内支持-85 dBm,在868 MHz和915 MHz频段内支持-92 dBm。

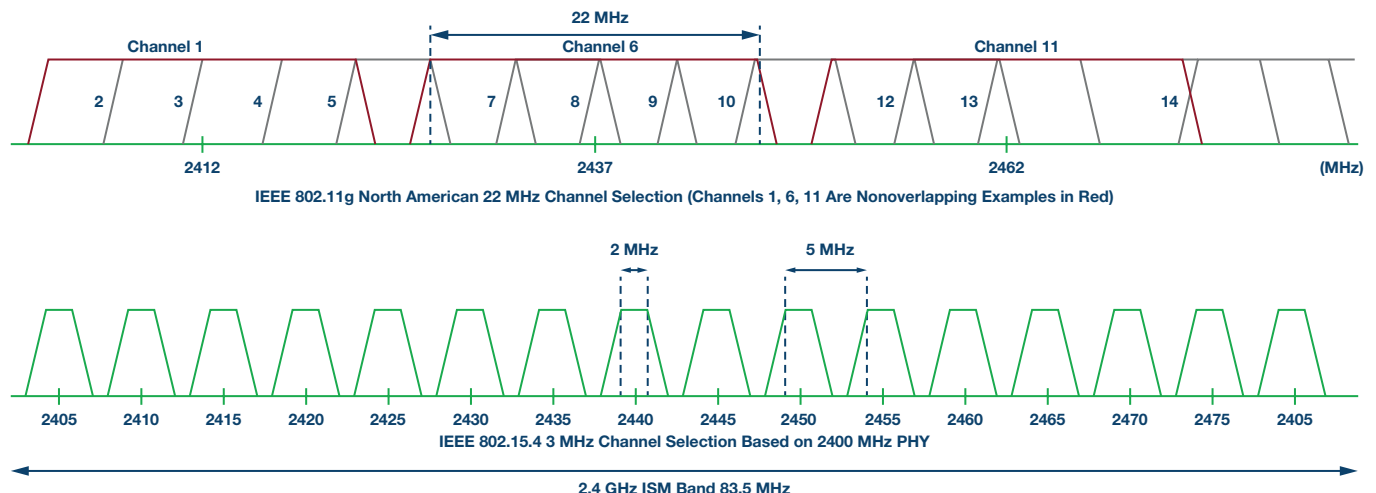


图3. 全球IEEE 802.15.4 PHY通道11至通道26与IEEE 802.11g通道1至通道14。

原地安装与全新安装

工业互联网意味着连接范围广，要用多个有线和无线标准来实现。然而，若要安装到现有网络系统中，选择可能并不多。可能需要对新的工业互联网解决方案进行改造，以适应网络需求。

全新安装是指在全新的环境中从零开始安装。不存在传统设备的限制。例如，在建设新厂房或仓库时，可以在框架规划中考虑工业互联网解决方案，以达到最优性能。

原地部署是指在原有基础设施中安装的工业互联网网络。挑战尤其明显。传统网络可能并不理想，但新的工业互联网系统必须与会产生干扰源射频信号的任何现有系统共存。开发人员在受限的环境下，继承硬件、嵌入式软件和以前的设计决策。因此，开发过程变得非常艰难，需要进行认真严谨地分析、设计和测试。⁶

网络拓扑结构

IEEE 802.15.4协议规定了两个设备类别。全功能设备(FFD)可以在任何拓扑结构中，作为PAN协调器与任何其他设备通信。精简功能设备(RFD)仅限于星形拓扑结构，因为它不能成为网络协调器。它只能在简单的IEEE 802.15.4实施方案中与网络协调器通信。根据具体应用，有多种网络模型：点对点模型、星模型、网模型和多跳模型。

点对点网络可以轻松把两个节点连起来，但无法利用智能扩大网络的范围。这种结构支持快速安装，但缺乏冗余性，如果一个节点不能运行，则整个网络失效。

星形模型将总辐射范围扩展至两个节点的传输距离，因为该模型用一个FFD作为主控节点，与多个RFD通信。然而，每个RFD仍然只能与路由器通信。只要FFD不出故障，就可以容忍一个点发生故障。

Mesh（网状）网络允许任何节点进行通信或跳过任何其他节点。这就提供了冗余的通信路径，可增强网络的强度。智能型Mesh网络可以通过最少的跳跃路由通信，以降低功耗和延迟。自组拓扑结构可以自行适应环境的变化，允许节点抵达或离开网络环境。

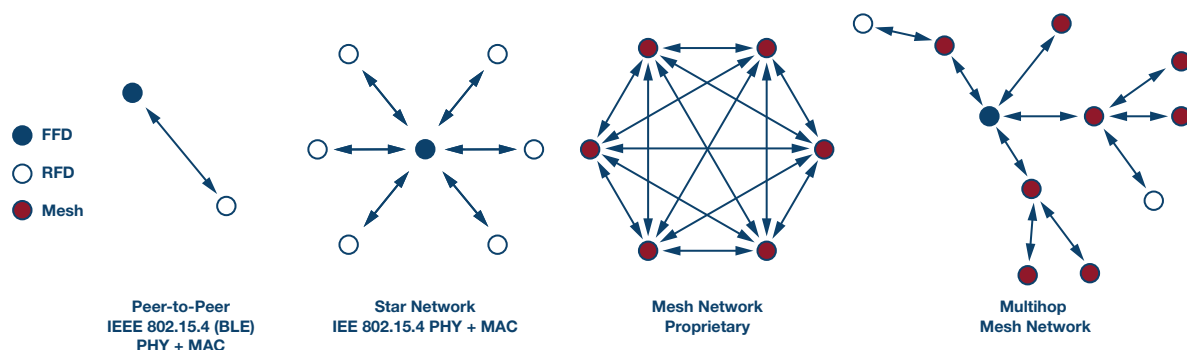


图4. 网络模型：点对点、星形、网状和多跳拓扑结构。

可靠性

工业互联网客户在做出订购决策时，最看重的是可靠性和安全性。企业一般用复杂的大型集群进行数据分析，其中可能存在大量的瓶颈问题，包括数据传输、数据索引和数据抽取，以及转换和加载流程等。每个边缘节点的高效通信对防止下游集群中出现瓶颈问题至关重要。⁵

工业环境通常非常恶劣，不利于射频波的有效传播。形状不规则的大型高密度金属工厂设备、混凝土、隔断和金属支架都可能形成多路径波传播。射频波从各个方向离开发射天线，“多路径”指射频波在到达接收器之前会受到环境传播的影响。接收器端的入射波分为三类——反射波、衍射波和散射波。多路径波的幅度和相位会发生变化，形成复合波，结果会在目标接收器端产生破坏性的干扰。

CSMA-CA通道访问

载波侦听多路访问/冲突避免(CSMA/CA)是一种数据链路层协议，在该协议下，网络节点采用载波侦听。节点只在侦听到通道空闲时才发射整包数据，从而避免冲突。无线网络中的隐藏节点不在其他节点的范围之内。在图5所示例子中，范围内远端边缘的节点可以看到接入点“Y”，但看不到范围内另一端的节点X或Z。⁷

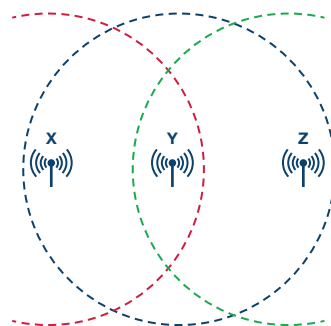


图5. 隐藏节点X和Z无法直接通信。

基于RTS/CTS的握手方案通过面向WLAN的简短“请求发送”和“允许发送”消息，实施虚拟载波侦听技术。802.11主要依赖物理载波侦听技术，IEEE 802.15.4则采用CSMA/CA。为了克服隐藏节点问题，与CSMA/CA结合实施RTS/CTS握手。在允许的条件下，提高隐藏节点的发射功率可以延长其观察距离。

协议

为了提高带宽, 用高级调制方案调制相位、幅度或频率。正交相移键控(QPSK)是一种调制方案, 对每个符号均用四个相位来编码两个比特。正交调制采用一种混合式架构, 通过相移来降低信号带宽要求。二进制数据被细分成两个连续的比特, 并在 ω_c 载波、 $\sin\omega_c t$ 和 $\cos\omega_c t$ 正交相位上进行调制。

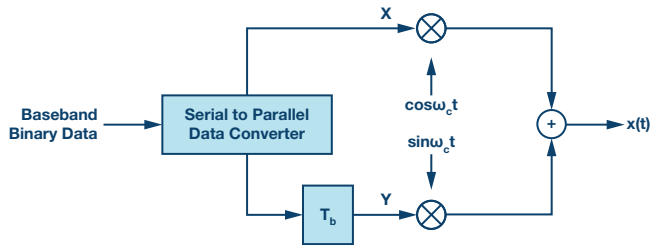


图6. 偏移型QPSK调制器架构。

IEEE 802.15.4收发器运行于2.4 GHz ISM频段, 采用QPSK的一种物理层变体, 称为偏移型QPSK (即O-QPSK) 或交错型QPSK。一个数据位(T_{bit})偏移时间常量被引入比特流中。这样, 数据在时间上偏移符号周期的一半, 结果可以避免节点X和Y的波形同时跃迁。连续相位步进不得超过 $\pm 90^\circ$ 。一个不足之处是O-QPSK不支持差分编码。但它的确可以排除相干检测这项具有挑战性的技术任务。

IEEE 802.15.4中采用的调制方案通过降低符号速率来发射和接收数据。O-QPSK要求通过同时发射两个编码位, 使符号速率与比特率之比达到 $1/4$ 。这样就能以62.5 k symbols/sec的符号速率, 实现250 kbps的数据速率。

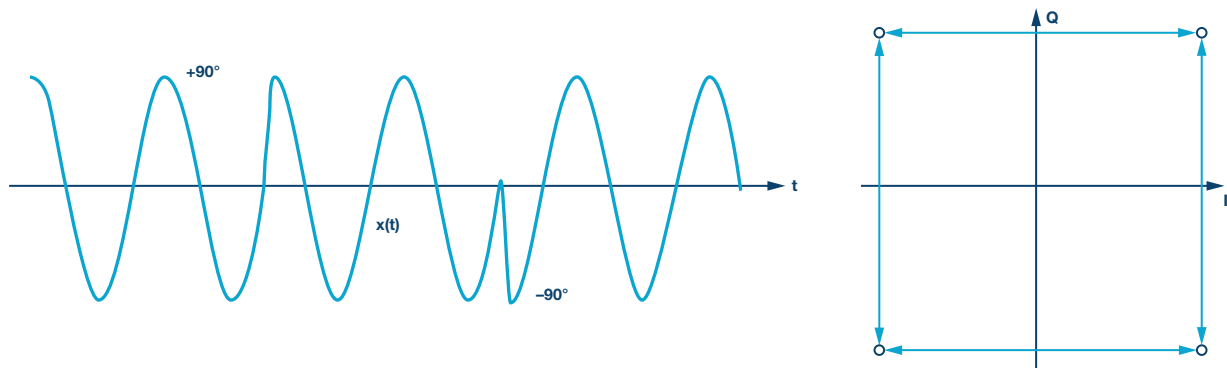


图7. 相变 $\pm 90^\circ$ (左) 及I/Q O-QPSK选项 (右)。

可扩展性

并非所有物联网都要求采用外部IP地址。对于专用通信, 传感器节点应能支持唯一IP地址。虽然IPv4支持32位寻址, 但在几十年前人们就清楚地认识到, 仅43亿个地址无法支持互联网的发展需要。IPv6将地址长度提高到128位, 能支持 240×10^{36} 台全球唯一地址(GUA)设备。

在两个不同的IPv6域和IEEE802.15.4网络中映射数据和管理地址对设计提出了较大的挑战。6LoWPAN定义了封装和报头压缩机制, 支持通过基于IEEE 802.15.4的网络发送和接收IPv6包。举例来说, Thread是一种运行于6LoWPAN之上, 基于封闭式文档、免版税协议的自动化标准。

ADI公司为ADuCx系列微控制器和Blackfin®系列DSP提供全面的无线收发器和有线协议。低功耗ADRF7242支持IEEE 802.15.4、可编程数据速率和调制方案, 采用全球ISM频段, 速率范围为50 kbps至2000 kbps。符合FCC和ETSI标准的要求。ADRF7023的工作频段为全球免执照ISM频段, 工作频率为433 MHz、868 MHz和915 MHz, 速率范围为1 kbps至300 kbps。ADI公司提供完整的WSN开发平台, 助力定制解决方案的设计。Rapid®平台是一个用于嵌入工业网络协议的模块和开发套件系列。SmartMesh®无线传感器是芯片和预认证PCB模块, 带网状组网软件, 使传感器可以在恶劣的工业物联网环境中进行通信。

参考文献

- ¹ Brijesh Kumar, “[物联网连接选项](#),” *IoT Daily (物联网日报)*, 2015年3月。
- ² Chris Downey, “[理解无线范围计算](#),” *Electronic Design (电子设计)*, 2013年4月。
- ³ Bob Karschnia, “[Industrial Internet of Things \(IIoT\) Benefits](#),” *Control Engineering*, 2015年6月。
- ⁴ Joy Weiss和Ross Yu, “[工业物联网无线传感器网络](#),” *Electronic Design (电子设计)*, 2015。
- ⁵ Ross Yu, “[SmartMesh IP无线网状网络拓展到工业物联网领域](#),” *Sensors Online (传感器在线)*, 2017年1月。
- ⁶ Sanjay Manney, “[工业物联网需要严格要求](#),” *EETimes*, 2014。
- ⁷ Rana Basheer, “[高密度无线传感器网络: 工业物联网的未来](#),” *LinkedIn.com*, 2016年7月。

作者简介

Ian Beavers是ADI公司自动化、能源和传感器部(美国北卡罗来纳州格林斯博罗)的产品工程经理。他于1999年加入公司。Ian拥有超过19年的半导体行业工作经验。Ian于美国北卡罗来纳州立大学获得电气工程学士学位并于格林斯博罗分校获得工商管理硕士学位。联系方式: Ian.Beavers@analog.com。

在线支持社区

访问ADI在线支持社区, 与ADI技术专家互动。提出您的棘手设计问题、浏览常见问题解答, 或参与讨论。



请访问ezchina.analog.com

全球总部
One Technology Way
P.O. Box 9106, Norwood, MA
02062-9106 U.S.A.
Tel: (1 781) 329 4700
Fax: (1 781) 461 3113

大中华区总部
上海市浦东新区张江高科技园区
祖冲之路 2290 号展想广场 5 楼
邮编: 201203
电话: (86 21) 2320 8000
传真: (86 21) 2320 8222

深圳分公司
深圳市福田中心区
益田路与福华三路交汇处
深圳国际商会中心
4205-4210 室
邮编: 518048
电话: (86 755) 8202 3200
传真: (86 755) 8202 3222

北京分公司
北京市海淀区西小口路 66 号
中关村东升科技园
B-6 号楼 A 座一层
邮编: 100191
电话: (86 10) 5987 1000
传真: (86 10) 6298 3574

武汉分公司
湖北省武汉市东湖高新区
珞瑜路 889 号光谷国际广场
写字楼 B 座 2403-2405 室
邮编: 430073
电话: (86 27) 8715 9968
传真: (86 27) 8715 9931

©2017 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners. Ahead of What's Possible is a trademark of Analog Devices. TA16321sc-0-9/17

analog.com/cn

