

为工业物联网正确选择无线网格网络协议以实现新应用

Choosing the right wireless mesh network protocol for the industrial internet of things enables new applications

□ Ross Yu 凌力尔特公司Dust Networks产品部 产品市场经理

无线网格网络得到了越来越广泛的采用,因为这类网络能够利用功率相对低的无线电设备在节点之间转发信息,并覆盖很大的区域,还能够使用替代的通路和途径以克服干扰问题,保持很高的可靠性。尤其是有一种称为时间同步通道跳频(TSCH)的网格网络技术,该技术由凌力尔特的Dust Networks率先提出,并已纳入WirelessHART工业标准。TSCH经过实用验证,可提供工业物联网所需性能。TSCH网络一般提供>99.999%的数据可靠性,而且所有无线节点(甚至路由节点)的小型锂电池之寿命都长达多年。相比之下,其他各种网格网络尽管采用的技术听起来类似(例如,“频率捷变”相对于“通道跳频”,“休眠”相对于“时间同步”

网格),但是所提供的性能却显著不同。因此,这些无线网络的不同细节决定了,协议选择对WSN(无线传感器网络)的性能以及网络对应用的总体适用性有极大影响。

1 无线传感器网络面临的挑战

无线从本质上而言是不可靠的,因此重要的是了解不可靠性的来源,以考虑怎样在通信系统中应对这问题。有线通信中,通信信号受到电缆屏蔽,不与外界接触。与此不同,RF信号露天传播,与周围环境相互影响。因此其他RF信号传输源有可能对有用RF信号造成有效干扰。

不过,更为常见的问题是多径衰落的影响,所谓多径衰落,即RF信号可能因其自身从周围表面反射回来且反射信号之间相位不同而被衰减(图1)。手机用户每天都会遇到多径衰落问题,当在某一点手机信号强度似乎很弱时,可能只需移动几厘米,信号强度就能改善。多径衰落的影响随时间而变,因为附近的反射表面(例如人、车、门等)一般会移动。最终结果是,随着时间推移,任一RF通道的信号质量都会发生很大变化。

使这种挑战更加严峻的是,多径衰落是不可预测的。按照定义,网络必须在

通道性能受到多径衰落影响(因此也要估算这种影响)的通道上有效传送数据。因此,尽管运用简单的无源信号强度测量方法(RSSI)测量未用通道的概念可能有助于检测有源干扰信号,但是用这种方法却不可能预测多径衰落情况下的通道适用性。

幸运的是,既然多径衰落对每个RF通道的影响都不同,而且随时间推移不断变化,那么采用通道跳频实现频率多样性,就可以最大限度减小多径衰落的负面影响。WSN协议面临的挑战是,能否在大型多跳网络上运用通道跳频技术。

2 在WSN中的常见采用方法

为了解在受到这些限制的情况下,WSN性能有何不同,我们先要看看,在一些无线网格网络中,为实现频率多样性并降低功耗,常常采用哪些方法。

(1)单通道WSN和通道捷变 在简单的无线网格网络中,一种常见方法是让所有节点都在单一通道上工作。既然仅用一个RF通道,那么按照定义,一次只能有一个设备发送信号。由于相对易于实现,网络协议栈开发人员依然常常选择单通道工作方式,而以此方式提供的WSN几乎没有频率多样性。

为了应对通道中存在的有源RF干扰

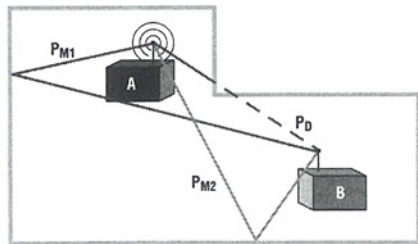


图1 多径衰落——无线信号在接收器端(B)的强度不仅受直接路径(P_D)影响,而且受反射路径(P_{M1} 和 P_{M2})影响,反射信号到达接收器端时,相位可能不同,从而导致显著的信号衰落

问题,有些单通道 WSN 采用了所谓的通道捷变机制。采用这种机制的网络可以向所有节点广播信息,以改变工作通道。不过,即使在通道捷变网络中,在任一时间点上,网络仍然在单一通道上工作。采用通道捷变方法的前提是,假定存在一个对整个网络都足够好的通道。然而,真实数据显示,在多径衰落的影响下,任何 RF 通道在网络寿命期内,都会经历严重的路径劣化问题,这会导致节点在几分钟甚至几小时内无法工作。尽管采用通道捷变方法的网络可以改变通道,避开某个有源干扰信号,但是既然该网络仍然在单一通道上工作,那么就仍然易于受到多径衰落的灾难性影响。

(2) 全网络休眠动态占空比 (Duty Cycling by Network Wide Sleeping) 为了以低功率运行,无线传感器网络进行某种形式的占空比调节,以最大限度减少有效运行(例如发送、接收等,这时通常消耗数 mA 功率)时间所占百分比,同时最大限度增大低功耗休眠模式(一般吸取 1mA 或更小的电流)在时间上所占百分比。有些无线传感器网络采用了全网络休眠方法(有时称为“休眠型”网络网络),采用这种方法时,网络中的所有节点会在较长时间内同时处于低功耗休眠状态,并几乎在开始发送/接收/转发网络流量的同时唤醒。采用这种休眠方法时,网络在待用期间完全不能用于通信。例如,如果一个 WSN 在 1 小时唤醒一次,那么在这 1 小时中,该网络不能发送报警信息,也不能接收来自控制器的信息,因此无法打开所附的报警指示器。还有一点也很重要,即需要考虑全网络休眠方法对 WSN 应对真实运行情况的能力有哪些影响。在较长的休眠期内,周围 RF 环境仍然是动态变化的。在网络休眠时,任何信号通路出现不稳定,都只能等网络唤醒以后才能修复。更加麻

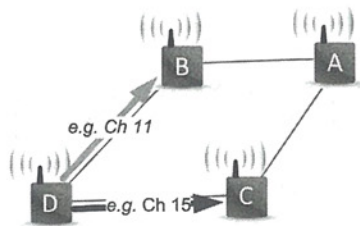


图2 通路和频率多样性 — 如果通信在“绿色”箭头所示方向失败,那么节点 D 就会采用另一个通道和途径,在“紫色”箭头所示方向重试

烦的是,休眠型网络往往是单通道网络,这在网络运行期间进一步给网络增加了压力,同时增加了通信不稳定的风险。

采用全网络休眠方法的另一个反响是,用户被迫接受低于应用所需的数据速率(因此也就少于应用所要求的数据)。这种折中令人遗憾,因为 WSN 的主要用途是可靠传送数据,并通过这些数据更深入地洞察用户系统,确定是否存在不良运行趋势和效率低的问题,例如是否因发动机老化而出现了性能劣化,或者零售店中的冷藏设备是否因太过陈旧而周期性地增大了功耗。如果由于网络限制而使 WSN 提供的数据过于稀疏,那么 WSN 的实用性和洞察能力就变得有限了,而且就监视/控制系统这一总体价值主张而言,也有实现效果大打折扣的风险。

3 时间同步通道跳频网络

时间同步通道跳频 (TSCH) 网络网络跨整个多跳网络实现严格的时间同步,严密协调通信及频道使用。在 TSCH 网络中,所有节点都采用共同的时间标准,整个网络的时间标准准确度在数 10 微妙以内。相邻节点之间交换时间偏移信息,以保持时间同步。网络通信被安排到多个时隙中,在这些时隙中,每个数据包的发送/接收都排定了时间。也就是说,每个时

隙都足够长(例如 7.5ms),以供发送节点唤醒、发送数据包并接收来自接收节点的链路层确认信号。TSCH 网络的流量传送可以动态地安排,这就实现了成对通道跳频、完整路径和频率多样性,也实现了低功耗数据包和高可用性占空比。

(1) 成对通道跳频 时间同步能够在每一个发送器-接收器对上实现通道跳频,因此实现了频率多样性。在 TSCH 网络中,每个数据包交换通道都会跳频,以避免不可避免的 RF 干扰和多径衰落。此外,不同设备对之间的多次数据传送可以在不同的通道上同时发生,这增大了网络带宽。例如,在 IEEE 802.15.4 2.4GHz 无线规范中,提供了 15 个可用通道,该规范是 WSN 最常用的选择,因为全球都可以使用这一 ISM 频段。这就意味着,与单通道 802.15.4 WSN 相比,TSCH 网络的可用带宽扩大到 15 倍。

(2) 完整通路和频率多样性 — 每个设备都有冗余通路以克服干扰引起的通信中断、物理障碍或多径衰落问题。如果一个数据包在一条通路上的传输失败了,那么智能节点会自动在下一个可用通路及不同的 RF 通道上重试(参见图 1)。每次重试(时间多样性)都利用了通路多样性和频率多样性,因此每次重试成功的可能性都比单通道系统高。

(3) 低功耗数据包交换 采用 TSCH 后,允许节点在排定的通信间隙以超低功耗休眠。每个设备都仅在发送数据包或等待来自相邻设备可能发送的数据包时,才进入工作模式。更重要的是,既然每个节点都知道自己的排定唤醒时间,所以所有节点都随时可用来转发来自相邻节点的信息。因此,TSCH 网络常常达到 <1% 的占空比,同时仍能保持网络完全可用。此外,既然对每个数据包的收发都排定了时间,那么在 TSCH 网络中就没有网络内数

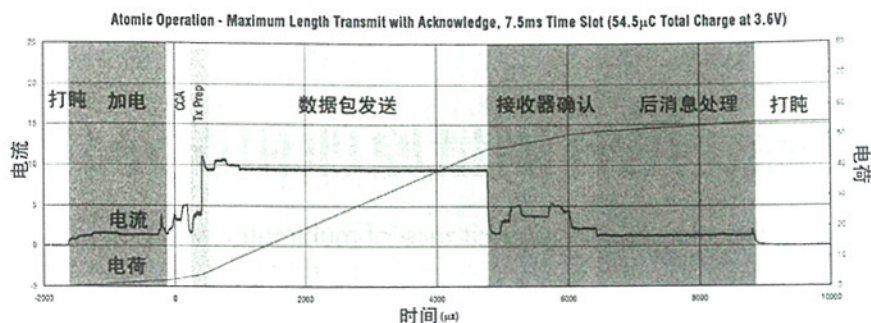


图3 针对 TSCH 进行了优化的硬件之优势。本图显示了数据包发送和链路层确认接收期间的电流消耗。采用 TSCH 进行了优化的硬件后 (例如凌力尔特公司的 LTC5800-IPM), 各个数据收发操作所需电荷量可以低至 $54.5\mu\text{C}$

据包碰撞问题。网络可以非常密集, 并可以扩展, 而不会产生削弱 RF 信号的自干扰。

(4)高可用性动态占空比 与全网络动态占空比网络不同, 在 TSCH 网络中, 每个节点都仅当需要发送数据包或等待接收数据包时, 才唤醒其收发器。通过将网络信息传送的时间安排细化到单独的发送器-接收器收发操作这一层面, TSCH 网络可以非常方便地跨整个网络提供不同占空比的数据传送。例如, 如果用户在一处使用了仅需 1 小时发送一次数据的水箱水位传感器, 而在另一处使用了每隔几秒钟就需报告一次数据的压力 / 水流传感器, 那么 TSCH 网络将仅按照传感器各自所需的频度唤醒节点 (及其母节点), 以可靠支持该类型的数据传送。

4 整合 TSCH 与低功率硬件可产生巨大威力

过去 10 年来, 802.15.4 收发器在发送、接收和休眠等一般工作模式时所需的工作电流一直在稳步下降。例如, 凌力尔

特公司提供的 LTC5800-IPM 消耗 +8dBm 发送功率时, 吸取 9.5mA 电流, 接收时吸取 4.5mA 电流, 这比前一代 802.15.4 收发器低 3 至 5 倍。降低所需峰值电流是一个良好的开端, 但是发送一个数据包所需的能量是一段时期内所吸取电荷总量的函数。如果用示波器测量所吸取的电流, 并画出随时间变化的电流曲线 (参见图 2), 那么发送一个数据包所需能量就可以用曲线下方涵盖的面积表示, 可以看出该能量既受到峰值电流的影响, 又受到每次处于工作状态的时长所影响。LTC5800-IPM 等产品实现了精确优化的数据包交换, 在 3.6V 电源电压时仅需 $54.5\mu\text{C}$ 电荷量 (或消耗 $196.2\mu\text{J}$ 能量) 就可成功完成数据包的发送 / 确认。

5 实现低功率的系统化方法

通过更全面地考察能量在无线传感器网络中的消耗方式, 我们可以看到, 功耗可以看作是以下的函数: 数据流量、发送数据包所需能量、从一个节点向另一个节点成功发送数据包所需的重试次数。

就每一个数据包所耗能量而言, 通过采用对每次重试都提供时间、通路和频率多样性的网络协议 (因此减少了每发送一个数据包所需的平均重试次数), 可以实现低电流消耗, 因为这样可以提高整个系统的效率, 而不是在应用层上造成损失。TSCH 网络中的通信时间表是高度可配置的, 而且通信时隙可以基于应用需求自动分配。TSCH 网络可以配置为低数据速率, 以最大限度降低所需功率, 而且这种网络有潜力采用能量收集技术。同样, TSCH 网络可以配置为支持不同的数据报告速率, 就像在工厂中常见的那样, 工厂中有变化慢的变量 (例如水箱水位) 和变化较快的变量 (管道中的流量)。TSCH 网络会自动给网络的各个部分分配其所需的时隙。因此 TSCH 网络不是迫使用户定制其应用以满足网络要求, 而是可以被定制以满足种类繁多的应用需求。

6 实现工业物联网

TSCH 已经成为 WirelessHART (IEC62591) 等现有工业无线标准的基本构件, 也是新出现的 IEEE802.15.4e 等 IP 无线传感器网络标准的组成部分。IETF 6TiSCH 工作组也在进行 TSCH 链路层的标准化工作。有关标准采用 TSCH 将有助于 TSCH 继续得到更加广泛的采用。

目前已经证实, 在工业流程监视、围栏线周边安全、数据中心能效、城市规模的智能停车解决方案等广泛和要求严格的应用中, TSCH 网络的电池寿命能够长达多年, 而且数据可靠性 >99.999%。TSCH 网络提供高度可靠、高度可配置的低功率无线网络, 非常适合工业物联网。EW