



货运铁路的环境智能



作者

J. M. Reason和R. Crepaldi

摘要

当前, 整个货运铁路行业都在竭力提高货运列车上智能遥感勘测技术应用水平。众所周知, 提高火车状态和正常运作的可见度, 可以推动加快实现很多领域的业务转型, 其中包括前瞻性维护、时间优化安排和资产利用率。然而, 努力引入新技术不仅可以创造商业价值, 而且还可能利于保护环境。例如, 故障预测技术可以在很大程度上减少脱轨事件, 从而保护环境免受因危险物质倾倒而造成不良影响。而且, 更高的火车可见度可以使火车安排效率更高, 从而提高铁路网络的吞吐量。研究显示, 火车的燃料使用效率是货运卡车的三倍, 如果将货运卡车货运量的1%转移到铁路, 那么每年的温室气体排放量将减少120万吨。本文主要描述了将新型智能遥感勘测基础架构应用到货运铁路中可以带来的潜在优势。这里提出了一个被称为SEAIT(即“支持传感器的环境智能遥感勘测”)的方法, 这种无线传感器网络方法可以支持高级货运场合的传感和通信。作为新技术试验研究的一部分, 我们谈到了SEAIT的一些初步性能结果。

简介

火车事故是造成铁路行业收入损失的一个重要原因。如果没能及时检测出故障,一个本来很容易维修的机械问题也有可能导致严重的故障(例如,火车脱轨),而这类故障通常需要大量的资金才可完成现场维修。此外,当火车停滞在铁轨上时,部分铁路系统就会瘫痪,从而导致其他火车也因此而延迟。由此带来的收入损失是造成经济损失的一个主要原因,但是未能维持最佳的运输速度和运输网络平衡也会影响到成本、设备利用率和客户信任度。

除了因延迟造成的收入损失外,载有各类危险物品的货运列车一旦发生事故,这些危险物品会倾倒在环境中,就有可能引发环境污染和更大的经济损失。火车事故的第三大惨重后果就是乘客伤亡。每年有几十人因火车事故而丧生(包括火车相撞、设备故障和其他运营事故),数百人因此而受伤。

撇开显而易见的经济效益不说,降低火车事故的发生率是我们每个公民都应努力的方向。一些火车设备制造商和供应商已经着手研究先进的技术,例如遥控火车头和电控制动系统。这些前期工作几乎都集中在研究如何通过现代技术来升级货运列车的某个子系统。从长远来看,基础架构的现代化是提高效率、安全和硬件可靠性的有效方法。但是,在本文中,我们将重点介绍整个传感和通信基础架构,因为这些为新的高级应用奠定了基础。支持传感器的环境智能遥感勘测(以下将简称为“SEAIT”)可对现有硬件进行前瞻性维护。SEAIT的目标并不是提高个别子系统的可靠性,而是通过检测潜在的故障来最大限度地提高维护服务的效率。这给铁路行业带来的直接好处就是最大程度地降低了维护成本并延长了火车(包括火车头和各车厢)的服务寿命。更重要的是,这可以改善火车的服务条件,保障人们的生命安全和环境安全。

SEAIT要成为一种行之有效的方法,首先必须解决最具挑战性的技术难题,其中包括提高不稳定的无线传输的可靠性、延长服务寿命(通常为几年),以及实现关键警报消息的低延迟交付。无线传输通常不是很可靠,而火车开动后稳定性方面的挑战会更大。因此,SEAIT支持的所有应用必须稳定可靠才行,唯有这样才能克服不可靠的数据交付。要成为一种经济可行的解决方案,通信网络节点的寿命不能短于列车车厢的服务寿命(≥ 5 年)。为防止灾难性故障出现,不仅需要具备可靠的关键故障检测能力,而且还应每隔几秒就报告关于故障的警报消息。在本文中,我们将描述SEAIT如何应对这些挑战。

背景

无线传感器网络

无线传感器网络(WSN)由大量小的无线节点组成。节点通常由电池供电,包括以下三个主要组件:RF(射频)通信设备、一个或多个传感器,以及一个微处理器。微处理器主要管理节点资源和功能,它通常有一个小容量的存储器。

无线传感器网络主要可应用于需要长期、频繁地执行数据收集的环境。部署WSN后,它可在整个网络周期内全自动地工作。试验过程中我们遇到的最大问题就是能耗。这些设备大多都由电池供电,而无线电收发器耗电十分严重。上面也提到了,存在的其他问题包括存储器容量太小(几千字节到几十兆字节)和计算时钟速度较慢,这就使得在微处理器上几乎无法执行复杂运算。

无线传感器节点在室外的通信范围通常在300米内。因此,如果要在较大的地理区域内部署,就必须设计将消息高效地转发到目的地的路由协议。用于WSN的协议通常采用针对多个通信中继段的多对一和一对多两种通信范例。在有多对一通信范例中,传感器节点将来自对等节点的消息转发给中央收集网络节点(通常称为网关)。在一对多范例中,网关将查询和命令分发到传感器节点上。通常,网关不存在资源受限制的问题,所以它可以执行传感器节点所不能完成的、更复杂的数据分析。

近年来,许多实验室都部署了传感器网络试验台(即用于实验的平台)。在2004年,ExScal [1]项目开展时就部署了一个试验台。它是当时规模最大的WSN部署,有力地证明非常大型的节点部署可以促进低成本地长期执行数据收集的任务。在这个实验中,在1300×300平方米的区域内共部署了1000多个节点。这个项目的主要目的是检测小型试验台(通常由几十个节点组成)未曾遇到的问题。最大的挑战是为这些节点提供足够的能量,以便它们可以在预定的实验时间内持续工作。

无线传感器网络不仅是一个引人关注的研究主题,同时还是一种可用于持续自主数据收集的非常有效的解决方案。另一个备受关注的部署领域就是“结构化运行状况监控”(Structural Health Monitoring, SHM)项目[2]。在进行相关实验的过程中,我们在加州金门大桥上部署了64个节点,用于监控大桥上的外力分布。研究人员可以查看系统生成的结构化振动数据,这种数据不仅空间密度更高、精确度更好,而且比有线系统的实现成本更低。

参考资料[3]中说明了另外一个备受关注的應用,其中地质学家使用WSN来监控活火山的表面。同样在这个例子中无线传感器网络必须长期、持续地工作,而且为降低成本保护环境无需人工干预。尽管研究人员的网络只由数量相对较少的节点组成,但是节能和数据可靠性仍然是主要的挑战。研究人员还指出,相较于其他方法(例如,硬连线的传感器节点),WSN的成本非常低廉,因此加大空间密度、增加使用的节点数目较易实现。试验显示该网络61%的时候可以正常运作,因此可靠性仍然是一个问题。尽管如此,它仍能在19天内检测出230多次火山事件。

上述例子说明,使用WSN进行数据收集和分析会给研究项目带来很多益处。这些大型的室外部署证明过去关于室内部署的许多假设可能并不成立。现在问题就是,考虑到工业应用比环境应用更加重视可靠性和服务寿命的问题,WSN能否立即被应用于工业应用中。

通常若某些行业希望监控其机器或工作环境的状态时,它们会选择使用诸如SCADA(即“监控和数据采集系统”)之类的系统[5]。SCADA系统低延迟且通信可靠,但是它们需要有线基础架构,而且通常很难重新配置,成本也比WSN要高。对于超大型部署场合,例如,若某公司希望监控生产工厂以外的区域时,SCADA系统就不再适用,因为布线的费用太高。

“管道监控”项目(Pipenet)[4]可以很好地说明WSN如何简化检测过程以及如何在大规模的分布式系统(如美国自来水网络)中预防故障。它利用振动传感器提供的高频采样子本来检测漏水情况。参考资料[4]所列的即是实验室结果和现场调查结果。如其它试验一样,实际部署中会遇到很多实验室所不能发现的挑战,而其中大部分由通信问题引起。

虽然在使用WSN时,可靠性、同步和节能仍然是公认的问题,但是Pipenet证明若无法布置更可靠的系统,那么成本低且高效的WSN也是个不错的选择。货运列车穿行于广阔的地理区域中,而且各地环境情况迥异。由于火车停运需要进行现场维护,所以所需的费用会非常高。火车停运可能会发生在其他交通工具不易到达的地方,这样问题会更加棘手,成本也随之上升。此外,火车停运可能会阻塞铁路网络中的重要线路,导致大量火车延时,最终造成收入损失。但是,如果通过定期对车厢进行人工检查来防止这类事件,费用将会非常高。由于WSN在车厢的关键点处安装传感器,持续监控车厢的情况并在火车改组时自动检测其编组,这些可推动制订一个可行解决方案以检测和预测潜在的灾难性故障。此处的“火车编组”是指某一火车中各车厢的排列顺序。此外,提高可见度还可以优化铁路运营,进而提高业务收入并保护环境,这一点我们将在下文中详细讨论。

术语和先进的货运铁路系统

货运列车由以下两部分组成：火车头和货物车厢。火车头为火车提供推进力，在北美，火车头主要使用柴油发动机。此外，包括通信系统和数据处理系统在内的大部分电子系统都位于火车头内。大多数火车头都采用多模式通信，包括卫星通信、蜂窝通信、无线局域网通信和双向无线传输。除去某些特殊的列车车厢(如冷冻车厢)，火车头通常是火车上唯一可以发电的车厢。尽管大多数货运列车车厢数目不足100节，但是也有火车有150或更多节车厢。为了配合火车碰头和超车情况以及路况(即倾斜度)的需要，火车编组的长度通常受到旁轨长度的限制。这里，术语“碰头”是指两辆火车在同一条铁轨上迎面对开；因此，其中一辆火车可能需要让道，例如，开到另一条铁轨上。“超车”是指快车越过慢车。术语“火车编组”或简称“编组”主要是指各车厢相对于火车头的排列顺序，用于描述编组火车的车厢组。在本文中，列车车厢和车厢意义相同。有些火车编组可长达2英里，例如，穿越美国最南部蒙大纳州和最北部怀俄明州之间的粉河盆地(横跨美国大平原)的运煤火车。

货运列车车厢由以下两个主要部分组成：车厢车身和车厢连接的敞篷货车组。为了容纳多种类型的货物，目前有十几种列车车厢车身，最常见、使用最广的要数货车车厢和联合运输车厢[1]。但是事实上，敞篷货车的编组在外观最为统一。每个敞篷货车有4个车轮和2个车轴，每对车轮共用一个车轴。为了减小滚动时的摩擦，每个车轮与车轴接合处的轮毂有密封的润滑滚珠轴承。这个密封体被称为“径向滚柱轴承”，简称为“轴承”。在每个轴承顶部有一个径向轴承座或轴承座，专为轴承和转向架侧架之间提供滑合座。转向架侧架将两对车轮和两个车轴连接在一起，并为车厢车身提供接触表面。每个敞篷货车都是可颠倒的，可以从两个方向平稳开动。整个敞篷货车是在地心引力的作用下由几个连锁部件连接到一起。

货运列车通过一个气闸系统来停止或减速。火车的制动系统由一个空气压缩机(位于火车头)和一系列储气缸(位于每节车厢)组成，由一个制动软管连接在一起。在每节车厢的末端，制动软管与相邻车厢的制动软管连接在一起。火车头上的压缩机为每个储气罐充满气，使压缩空气的标准制动管路气压稳定在每平方英寸90磅。在为每个储气罐充满气后，火车上的工作人员就可以通过降低制动管路中的气压来使用刹车。

列车尾部装置(EOT)也是大多数现代货运列车的一个主要组成部分。EOT通常为一个小型的金属盒，与火车最后一节车厢的后耦合器相连。EOT主要通过一个运动传感器来测量制动管路气压并检测火车车厢的事故隔离情况。这些装置还可以与火车头进行双向通信，这样它也成为制动系统的备用控制点。换句话说，如因刹车管路阻塞导致中间车厢中的制动气压消失，在这种紧急情况下火车工作人员可以同时为火车前部和后部进行刹车。在供电方面，EOT通常使用可再充电的电池，利用与制动管路相连的小型涡轮来充电。

在本文中，当提到实时可见度时，“实时”是指特定的铁路应用需求。对于大多数铁路应用而言，解释“实时”时都会用到“粒度”这一概念，而粒度可以是几秒到几分钟。测量火车的燃料使用效率时，我们使用的单位是公吨-英里/加仑，这是指货运列车每使用1加仑燃料可以将1吨货物运输多少英里。铁路网络容量仅表示在任何特定的时间点上火车网络中开动的货运列车数量。

本文剩下的部分按如下方式组织：下一节重点介绍的是与铁路有关的一些应用场合。然后，我们将讨论应用新技术提高铁路的收益如何造福于环境。接下来，我们将描述SEAIT的设计，并探讨其在铁路应用中的适用性。最后，我们提供了SEAIT在应用于少数特定场合时的一些实验结果，并给出了相应的总结。

铁路应用场合

货运铁路公司意识到车载WSN可以支持的大量应用场合。我们从广义上将这些应用分为两大类：实时可见度和故障检测/预测。实时可见度是很多高级应用的基础，这些应用可以增强铁路网络容量、提高燃料使用效率和资产利用率。这类应用需要定期测量与火车和/或货物有关的各种运行参数，以便改进铁路的整体运营。而故障检测这类应用主要是监控各部件(如车轮和车厢)是否在正常运行。这些应用是为了避免灾难事件(如脱轨事件)的发生。通过在火车的关键部件上部署传感器和相关智能装置，就可以检测出故障并在事故发生之前采取纠正措施。在这一部分中，我们将简要描述一些较为重要的元素及其对铁路行业的重要性。

火车编组的识别和监控

确定火车由哪些车厢编组及车厢的顺序，并监控火车运行参数(如重量和长度)的变化，对于改善铁路运营至关重要。及时、准确地了解火车编组可以更好地支持诸如优化火车时间安排之类的高级应用。优化火车时间安排可以降低出现资源闲置(如火车空闲时间)的几率，从而提高铁路网络容量。要看火车的时间安排是否优化，一个标准就是看在保持燃料使用效率不变的情况下网络内所有火车是否都能以最佳的速度运行。这种最佳状况在业内是指达到最佳的速度和平衡。优化速度就意味着缩短火车每趟运行的时间，这样同一铁轨就可以供更多火车使用。

开始介绍这样一个优化问题之前，我们必须先了解每辆火车的总重量和长度、重量分布、位置和制动力。在给定当前地形的情况下，火车速度大体上是火车安全减速或停止过程中所用的时间量和所行驶距离的函数。在给定速度和制动力的情况下，在山路下行过程中让火车停止所用的时间要比在水平路面上让火车停止所用的时间长很多。迄今为止，与火车速度有关的大多数决策都是依据人们的经验和估算来制订的，就好像通勤者熟悉了汽车路线后他/她就可以决定以多快的速度行驶。

当前，最先进的铁路也只能通过火车的载货单来估算火车的重量、长度和重量分布。但是，一般情况下是没有火车载货单的。通常，只在少数几个易导致阻塞的地方(例如，导致火车减速或停止的地方)使用符合行业标准的自动设备识别系统(AEI)来进行编组识别。从概念上讲，AEI类似于射频识别(RFID)技术，但是它不符合RFID标准。用于编组识别的AEI方法虽然很有用，但是存在一定的限制。而且并非所有脱离/加入车厢的地方都安装有AEI阅读器。事实上，在很多路旁位置，车厢通常会脱离火车来供客户装货，此时它们与所有通信设备(包括AEI)都断绝了联系。

在假定火车速度保持不变的前提下，铁路公司通过以较长的时间间隔获取全球定位系统(GPS)的信息来跟踪火车的位置，主要是使用卫星通信，并估算时间间隔之间的位置。当前技术只可以监控火车头(头部)和EOT(尾部)这两个点的制动力。这种方法无法检测出个别连接器处出现漏气或是整个制动管路中有多处阻塞。如果通过技术可以监控每节车厢的制动力而不是假定整个火车所有车厢的制动力均相等，这样优化算法将会更加有效。

热轴承检测

轴承密封体有时会裂开或破裂，暴露出滚珠轴承。这样的话，润滑脂会风干，而轴承也会出现故障。若轴承出现故障，可能会导致车轮停转，甚至导致火车脱轨。因此，检测或预测轴承故障可以从根本上减少或消除由此引起的脱轨事故。

轴承的温度可以很好地反映轴承是否已经出现故障或即将出现故障。因为随着轴承内润滑脂开始变少, 车轮和车轴之间的摩擦力逐渐增大, 轴承温度也会上升。在某些情况下, 有故障轴承的表面温度会比周围温度高出300° F以上。如果出现这种情况而又没有进行制动的話, 肯定会引发灾难性事故。通过安装合适的传感器装置(如热电耦)并在传感点嵌入局部智能装置, 就可以实时检测诸如此类的异常情况。最大的挑战是要长距离地向身处火车头内的司机通知这类事件, 以便他/她可以迅速采取纠正措施(例如, 使火车停止或减速)。

该方法在沿线要点零星地安放一些热轴承检测器(平均30英里部署一个), 这与当前使用的方法截然不同。由于其安放稀疏和较慢的火车平均速度(大约每小时行驶20英里), 当前这种方法不能及时报警。温度过高和实际发生故障之间可能只差数十秒到几分钟。而当前技术平均每45分钟提供一次可见度方面的信息。

裂开的车轮检测

车轮在运行期间可能出现裂缝, 与温度过高的轴承一样, 裂开的水轮也可能导致灾难性事故。及时发现并立即更换带有裂缝的水轮至关重要, 如果未能做到这一点的话, 裂开的水轮将逐渐破裂为碎片, 这必然会导致火车脱轨事故。

检查裂开的水轮比检查温度过高的轴承稍难一点; 不过, 它们却有一个明显的特征。裂开的水轮会发出清晰的声音并引起振动异常, 也就是说, 在此情况下振动数据或方式与正常方式截然不同。难点是如何在水轮上安装相应的声音或振动传感器。一旦安装完成, WSN即可发挥其强大的功能, 通过本地智能来处理传感器数据、实时检测异常情况, 并将警报事件传送给火车司机。

货物状态监控

在铁路运输过程中, 当前技术可提供的货物状态可见度信息非常有限。AEI仅能提供的稀疏定位跟踪格式如下: “货物在T时通过路点(如引用点)N”。如果能够提高GPS数据量并根据速度确定位置, 铁路系统应该可以跟踪任何货物的位置。这个级别的跟踪也许足以满足煤炭或其它散装货物的火车运行要求, 但如果货物价值很大、需要非常及时地送达或是货物为军用物品时, 跟踪就应当更为具体。位置信息本身并不是关键的应用程序。通过提供对运送货物的实时可见性, 车载WSN可支持高级货物监控应用程序, 如可对车厢入侵或敏感性货物引起的损伤进行实时检测。对于冷藏货运, 车载WSN可检测温度的异常升高, 并生成实时警报事件, 这类似于对热轴承的监测程序。

环境优势

货运铁路期望通过利用车载WSN创造更大的商业价值, 而事实上这也有利于保护环境。显而易见, 货运铁路行业想要最大程度地拓展其业务能力, 而换个角度看这也就是节约资源、减少污染和改善公共安全。

自然资源 and 污染

货运铁路占美国城际货运总吨英里的42% [7]。美国铁路协会(AAR)估计铁路的燃料使用效率是卡车的四倍。2007年, 货运铁路的燃料使用效率为每加仑436吨英里[8]。如果当前由卡车运输的货运中有10%转而由铁路运输, AAR估计每年会节省十亿多加仑的燃料。通过实时可见度来支持这项转移工作, 就可以直接减少资源消耗。

美国环境保护署(EPA)的预测显示, 火车每吨英里排放的氧化氮(氮氧化物)和颗粒物还不足传统卡车的三分之一。此外, EPA还估计铁路只占到与运输相关的氮氧化物排放总量的9%, 占颗粒排放的4%。如果将当前由卡车运输的货运的10%转交给铁路运输, AAR估计每年会减少1200万吨温室气体排放。[9]

将货物转由火车运输而不是选择卡车, 带来的另一项收益是可以减少高速公路堵塞。这是因为联合运输铁路交通发展非常迅速。联合运输交通是指通过铁路长途运送卡车拖车, 此外还应有至少另一种短途运输方式(通常是通过卡车)。事实上, 从玩具到汽车, 几乎所有的消费品都通过联合运输传送。采用联合运输(而不是卡车)进行长途运输可以使高速公路上的卡车减少280辆(相当于1100辆汽车)。德州交通研究院估计, 假设堵车共浪费42亿个小时和29亿加仑的燃料, 那么城区高速公路堵塞共浪费了美国人民780亿美元。[10]如果要考虑如货物延迟等其他因素的话, 堵塞带来的损失就更高了。

铁路还可通过使用实时可见度来提高燃料使用效率(而不是增加容量), 进而减少自然资源的消耗。容量提高并不意味着收入也会增加。铁路还可以在保持稳定的燃料使用效率和容量的同时, 通过尽可能降低资金利用来减少自然资源使用量(例如, 用更少的火车来运送相同数量的货物)。可见度越高, 铁路就越能解决燃料利用效率最大化、容量最大化和/或资金利用率最低之间的矛盾。

有了上述各方面效率的改善, 铁路就可以节省开支, 而这些资金可用来投资于升级基础设施或开展研究以维持环境收益。铁路还可在保底的前提下适度降低其收益率, 这样可以鼓励更多人通过铁路运输货物, 进一步增加网络环境收益。

公共安全

除了节约自然资源这一优势外, 支持货物由铁路运输也可保障公共安全。危险物品的运输就是最好的一个例子。铁路和卡车载的危险品大约等量, 但是卡车发生事故的频率是火车的十七倍。因此, 将更多的货物从卡车转到铁路运输会使这一优势愈发明显。

危险物品约占铁路货运总量的12%。大多数混装火车都参与其运送过程。虽然卡车发生事故的机率更高, 铁路事故发生后涉及到的范围却更大。2008年5月, 美国一列很常见的火车(如大型货运列车)发生脱轨事故, 并在路易斯安娜的拉法叶附加泄露了10, 000加仑氯化氢。其后五人因皮肤和眼睛不适住院治疗, 另有数千人被撤离。2007年, 联邦铁路管理局(FRA)报告说美国铁路发生了2852起事故, 其中78人死亡, 总伤亡人数为429人, 总报告损失超过3.16亿美元[11]。在所有事故中, 11.2%由设备故障导致, 这引起的伤亡人数占总数的7.4%, 以及报告损失总量的17.6%。此类事故大多与车轮、轮轴、轴承或刹车故障有关。另有34.7%是由人为错误引发(如超速), 31.8%由轨道问题引发(如轨道之间的跨度过大)。

通过使火车实时了解其周边环境, 可减轻或完全消除许多引发铁路事故的罪魁祸首。例如, 由于人为操作与认定的程序之间没有实时关联, 就会因此发生许多事故。例如, 若司机超过了规定或最佳运行速度限制, 那么了解其运行参数(例如位置、前方地形、速度、重量和长度)的智能火车就可以判定司机操作会带来潜在安全问题, 然后酌情警告司机或管理人员。

提高实时可见度可以避免很多因设备故障而引发的事故, 因为提前维护应用程序可以更加及时地掌握所有相关信息。请思考一下轴承温度过高的情况。当前铁轨旁热轴承检测器的安装情况根本无法进行预测。仅凭借平均每45分钟一次的现场抽样很难进行任何趋势分析, 而分析本可以在其达到关键阈值之前帮助预测轴承温度的变化趋势。理想状态下, 我们希望能大加利用本地的、嵌入式遥感和智能, 以便于提前维护。智能传感节点可在以秒为单位的时间内灵活调整采样率, 这样可产生更好的预测效果。同样地, 若某些故障无法避免, 这种方法能够提供比现有技术更及时的故障检测, 进而更好地缓解故障可能带来的有害影响。

SEAIT的设计

部署示例

本节主要描述SEAIT在应用于铁路系统中时该如何设计。例如,图1介绍了货运列车敞篷车厢上SEAIT可能的部署视图,所有车厢单元结构一致时,这种火车通常运煤。无线传感器节点连接在车轮上,形成车载网络,为进行数据收集、处理和传输等任务奠定了基础。为方便起见,该图中每节车厢只有两个无线传感器节点,这是保证数据正常传输所需的最小节点数目。

部署期间,我们给每个节点都提供了所连接的车厢信息,以及监控的传感位置。节点识别器和车厢及车厢位置识别器之间的连接必须是连续的,我们假设网关有权访问此信息。图1还显示了连接至每个车轮轴承座的数字或模拟传感器。例如,热电耦可能被连接到轴承座上,进行热轴承检测。其他传感点包含刹车和车厢上的其他部件(图中未显示)。与火车头相连的网关是控制点和数据池,也就是说它可以接收和存储数据。

本节接下来将主要探讨SEAIT的关键功能,以及如何使用这些功能应用在特定的铁路系统中。

网络发现和拓扑结构的形成

在SEAIT中,无线传感器节点通过两种方法形成网络:网关指导和节点指导下的发现。当节点位于网关传输范围内时,网关指导下的发现支持网络的形成。发现以网关在专用唤醒渠道发出特别唤醒消息为开端。唤醒消息是特殊格式消息的一系列连续脉冲,用于表示唤醒类型和唤醒超时。网关范围内和未与网络关联的所有节点将在唤醒渠道上采用低能耗、任务循环策略侦听(如监控)。在唤醒时,节点从网关侦听关联消息。

此关联消息包含独特的网络识别器、同步数据、网关的实体识别器和编组位置值,以及实体识别器列表。实体识别器指定哪些节点可以加入网络,并且仅在预期的网络成员的深入了解实现时才可用。例如,当列车编组顺序的清单可用时,实体识别器专门识别列车车厢。当未能对预期的网络成员进行深入了解时,实体识别器列表为空,我们将此消息看作“全部加入关联消息”。当接收全部加入关联消息时,节点就可以自由加入任何可用网络。

相反,节点指导下的发现支持由节点开始的网络发现。由于不能保证所有节点都在网关的传输范围内,所以需要这个备用选项。使用这个特别方法,关联到网络的每个节点定期在专门的唤醒渠道轮流发送唤醒消息,然后使用更新的时间戳转播其关联数据。如果实体识别器在关联消息中,那么从临近节点接收转播的关联消息的节点将加入网络。否则,如果实体识别器列表为空,那么节点将根据传感器输入和基于规则的逻辑随机加入网络。

网络发现是拓扑结构形成的第一步,在本示例中,指的是列车编组顺序的形成。加入网络后,每个节点会定期向网关报告其最近的临近节点的排行列表。网关使用此消息构建列车编组顺序的图表。经过几次定期报告后,网关会对编组的结构、顺序和方向作出决策。然后,网关会向网络分发一系列“更新关联消息”,每条消息包含实体识别器列表和编组中每个实体识别器的位置。了解了这些信息之后,每个节点就可以执行有效的路由(请参阅以下部分)。

数据交付

SEAIT支持最大限度的、依赖链接的和依赖端到端的消息交付。通过最大限度交付,消息的接收者并不确认其已接收。不过,最大限度消息的发送方可要求发送一次或连续发送多次消息。本技术(多次发送最大限度消息)就是SEAIT支持唤醒消息的方式。

依赖链接的交付使用连接确认和连接再传输, 对它来说, 再传输的最大数为运行时可配置参数。对于每次连接传输, 路由层确定N个备用的下一中继段路由。以循环方式, 链接层连续尝试每个路由M次, 直到传输成功为止, 或者尝试最多次重试; N和M也是运行时可配置参数。

依赖端到端的交付使用端到端确认和再传输。这种级别的交付主要针对警报消息和配置数据。如果发起人未在特定时间内从网络目标节点收到确认, 那么将会重新发送要求端到端可靠性的消息。要支持必须交付的类似服务的警报消息, 端到端交付中有无限期的再发送选项。

路由

SEAIT支持三种形式的路由: 概率路由、特殊路由和线性网状路由。概率路由下, 消息使用最大限度交付以一到多的方式从源到目标转发。SEAIT使用概率路由将路由命令和请求从网关路由至实体网络。每个中间节点都可根据一套规则确定其是否应该转发消息, 此规则包括顺序编号检查和转发的概率机会。

特别路由下, 消息在每个中继段中使用依赖链接传输以同级到同级方式被从源到目标转发。当未关联的节点接收到关联消息或网关或其临近网关的全部加入关联消息时即调用特别路由。当建立与网络的关联时, 节点会随意选择一个网络地址和时隙来传送其数据。在每一个中间中继段, 节点根据中继段总数以及其邻近的链接质量确定下一个中继段。确定编组形成期间, 每次定期报告之前节点都会测量这些数量。在我们的部署示例中, 我们暂定特别路由是运行方式, 因为编组鉴定的结果可能提高路由的效率。

网关收集到足够的定期临近报告, 并且已对列车编组作出决策之后, 网关会发布更新关联消息。在接收更新关联消息时, 节点会计算出新地址和时隙(作为其位置功能), 并调用线性网状路由。在线性网状路由中, 节点使用编组内的位置和编组内临近的地址和位置的先验知识路由至下一个中继段。由于不需要存储路由表或临近列表, 因此线性网状路由会很有效。每个中间节点可以通过利用列车编组的拓扑结构选择下一中继段, 其中每个节点的位置代表线性地理的坐标。

同步

保持同步是SEAIT功能的主要考虑因素。建立网络后, 网络中的所有节点都会与网关的时钟保持同步, 因为它遵循协调世界时(UTC)格式。因此, 网关分配包含格式为“星期二, 2008-06-01 01:41:00”时间戳的同步消息。网络时间基于实际时钟格式, 因此SEAIT不依靠绝对时间来进行正确操作。然而, 网关需要使其时刻与参考源保持合理的误差; 10毫秒或更少的误差不会对铁路运营工作带来很大影响。

网络中的每个无线传感器节点将其时钟与分配的网关时间戳同步。由于网关时间戳创建与节点时间戳消耗之间存在延迟(该消息可穿过多个中继段), 因此网络中的每个节点(包括该网关)必须测量转发延迟。在传输每条消息之前, 每个节点必须更新消息头中的指定字段, 该消息头代表累积的转发延迟。

这种同步方法需要跨层设计, 其中消息组织中的本地时间戳必须沿着通信层的派遣链向下传输, 而消息接收的本地时间戳必须沿着各层的接收链向上传输。如果操作正确, 这个方法可以说明转发期间发生的所有实际延迟(除了传播延迟), 这在两英里长的火车上最多只有11微妙(根据真空中的光速估计)。

由于时钟晶体会随着时间和温度变化而轻微变化, 因此需要定期向网络发送最新的同步数据。SEAIT使用双管齐下的方法推动这一进程。首先, 网关定期发出新的同步数据, 其频率由应用程序需求确定。其次, 每当节点确定其同步状态为陈旧时, 每个节点就会积极主动地调查其临近节点, 以获取所需的最新数据。

报告范例

SEAIT支持多个报告范例, 包括定期的、N次、事件和一次性报告。网关通过发送报告请求消息来调用报告范例, 此消息包括报告中包含的数据对象和/或事件利益类型。对于定期和N次报告, 节点以指定的时隙定期发送请求的数据对象。N次报告与定期报告略有不同, 因为只在某些特定期限内才可发送N次报告。当通过关联消息第一次将节点关联到网络时报告日程表也被设置好, 其中包括网络的报告期限和占空期。

在火车部署示例中, 当节点发现网络后, 会在列车编组形成期间部署定期报告。在报告期限的占空期内, 会向火车上的每节车厢分配传输时隙。在车厢的时隙期间, 车厢上的无线传感器节点采用一系列射频测量来辨别不同车厢上临近节点的远近。车厢上的每个节点创建一个临近报告, 然后经过多个中继段将其传输到网关。

事件报告支持警报消息的快速传输, 如火车部署示例中的热轴承警报。由于警报事件可能随时发生, 因此SEAIT根据需要通过唤醒消息来完成快速传输。在正常报告期限外发送警报消息的任何节点都将首先在公共网络渠道(不是唤醒渠道)发送唤醒消息, 然后再发送该警报。在报告期限的闲置期间, 关联到网络的所有节点都将使用低功耗、任务循环策略在公共网络渠道上侦听。首先接收到警报的中间节点尝试将该警报转发至下一中继段。若转发节点无法找到下一个中继段, 转发节点将在公共网络渠道发送后续的唤醒消息, 然后再发送该警报消息。每个中间节点会遵循此过程, 直到其将消息交付至下一中继段或进行W次唤醒尝试为止。

电源管理

节能是WSN的大多数应用的首要关注因素。SEAIT使用跨层设计方法促进电源管理, 它被认为是每个无线传感器节点的应用服务。电源管理服务使用基本策略, 在不需要运行的情况下, 将能耗大户部件(如节点的无线传输)设置成低功耗睡眠模式。电源管理服务跟踪所有的活动应用程序、其时间表和所有可管理的物理资源, 尤其包括处理器、无线电发射和接收装置、外部内存和传感器。如果没有应用程序运行(或在某些时间段内预定运行), 那么不必要的资源会被设置成处于睡眠模式。这种节能方法对响应时间影响微乎其微, 因为用于传感器节点的大多数现代处理器和无线传输的唤醒时间在毫秒级。

试验结果

为评估在特定应用范围内这种解决方案解决技术难题的效率, 在本节中我们描述了SEAIT的某些初步优势。具体说来, 我们考虑了传送警报和交付定期数据的延迟和可靠性。交付警报的低延迟非常重要, 因为在某些情况下, 严重的故障就在检测到危险情况后数秒内发生。同样地, 可靠地交付警报也非常重要, 因为损失会影响到整体延迟。定期数据报告在确定列车编组中发挥了核心作用, 这是另一个重要的应用领域。要促进准确的编组确定, 编组形成期间(所有节点在其时隙中同步报告时)还需要可靠的数据。

讨论下列结果时, 我们尽力在延迟和可靠性之间寻找某些平衡, 其中将可靠性定义为数据包成功率。此外, 还对节点的能耗给出了一些定性评价。

实施说明

我们共建立了25个传感器节点平台的原型。每个平台包含一个TmoteSky** 传感器节点、传感器电路板、电池、内置天线、输入/输出连接电路板和防水外壳。TmoteSky采用8 MHz的MSP430** 微控制器和集成的250 KB/s、IEEE 802.15.4标准的无线传输。MSP430为程序存储提供了10 KB的随机存取内存(RAM)和48 KB的内部闪存。TmoteSky节点为数据存储额外提供1 MB的外部闪存。具有多个传感器模式的扩展电路板提供了传感功能。每小时5.4安培的工业电池为平台供电。防雨外壳为所有部件提供保护层, 这些部件集成在单层输入/输出电路板。所选的全部部件都符合或超过工业温度范围(零下40摄氏度到85摄氏度), 并确保能够承受列车车厢上出现的冲击和振动程度。

每个传感器节点的运行时操作系统采用TinyOS操作系统[12]。用于SEAIT的无线传感器节点软件需要小于42 KB的闪存和9 KB的RAM。网关软件大多使用Java**, 并在IBM T40 ThinkPad上运行。小型TinyOS应用程序通过两个网关无线连接(一个专用发射器和一个专用接收器)支持命令和查询传输以及数据接收。

网络时间协议将网关时钟保持在10毫秒以内的误差[13]。在实际的部署中, 网关时钟会使用其他方法保持同步, 例如参照全球定位系统时间。

部署设置

为了模拟每节车厢都带有一个无线节点的25节车厢组成的火车, 我们在纽约IBM研究中心霍桑工厂的停车场部署了节点。每次试验中, 节点之间间隔为7到15米, 并被安排在一个细长、类似于蛇形的列车编组中。货运车厢从12米至30米不等, 平均长度为18米。但是, 就试验而言, 我们的空间非常有限。通过使用支架和柱子, 每个节点被提升至地面以上1到2米。由于该部署中每个车厢只有一个节点, 所以在整个讨论中, 我们将交替使用节点和车厢二词。

我们做了两组实验来计算前面提到的指标。两组实验的目标是分别测量警报报告和定期报告的端到端延迟和可靠性。在两组实验中, 节点使用了线性网格路由(如前面标识的列车编组)。为了理解这些指标的上界, 我们强迫节点执行最坏情况路由。即, 每个中间中继段都选择其最近的邻居作为下一个中继段。

警报报告实验

在第一组实验中, 通过发送定期警报消息(最大为128个字节), 将编组中的最后一个节点配置成模拟重要事件。实际上, 在定期报告占空期内外都会发生紧急传输; 然而, 就该实验而言, 我们假设每个警报都不与占空期一致。因此, 为了促进消息传送, 发送每个警报之前, 警报节点必须先用唤醒消息唤醒其邻居, 这是最糟糕的一种情况。其他节点的低功率无线装置睡眠时间表设置为1.2%(1012毫秒中的12毫秒)。我们做了这样一个实验, 列车最多包含25节车厢, 增量为5节车厢, 警报节点始终在最后一节车厢。唤醒脉冲时间设置为256、384和512的数据包, 也就是说唤醒持续时间为1.0、1.5和2.0秒。在每个实验中, 我们对每个位置和每个脉冲时间进行50次试验。

利用这个设置, 我们测量了端到端警报延迟和可靠性, 并针对不同的唤醒脉冲时间计算权衡。图2显示了中继段数目与警报消息到达网关的延迟之间的关系(50次传输的平均值)。正如预期的那样, 至网关的中继段数目越多, 传递延迟以单调的递增方式增加。1.5秒唤醒脉冲时间的20个中继段研究结果稍微不同于该趋势, 可能是因为试验次数较少。

为了增加脉冲时间, 端到端延迟也必须增加, 因为最初延迟与脉冲时间成比例。然而, 令人惊讶的是, 增加脉冲持续时间时, 平均可靠性几乎没有变化。在1秒唤醒脉冲实验中, 所有中继段的平均可靠性是0.942, 而2秒唤醒脉冲实验结果是0.960。这就说明延迟与可靠性之间存在潜在的可替代行为。25个中断段1秒唤醒脉冲时间的端到端延迟比25个中断段2秒唤醒脉冲时间的端到端延迟少40%左右, 但所有中断段的平均可靠性只差2%。1秒实验中的可靠性略低是由于唤醒警报节点的邻居的概率较低。

图3说明的是每个编组配置在每个唤醒脉冲时间段内的平均可靠性之间的关系。该视图展示了延迟与可靠性之间存在的另一种权衡。对于大多数编组配置而言, 最短的唤醒脉冲时间具有的可靠性最差, 这在我们预料之中。然而, 每个系列之间的差异很小, 不超过8%。

总的来说, 测量到的延迟和可靠性次数非常令人鼓舞, 在一定程度上是因为警报节点发送的单个脉冲即能够唤醒整个网络, 即使是25节车厢也是如此。如果不是这样, 在需要新唤醒消息以继续传送数据包的一些中间中继段会突然增加延时。在实际部署中, 我们期望一个唤醒消息最多可以唤醒12节车厢(基于当前原型中的无线传输)。这样, 在试验次数增加和车厢间距离变长的情况下, 我们预期更短的脉冲时间可以引起更长的延迟(由于多次唤醒)和可靠性的明显降低(由于最初唤醒失败)。警报报告过程执行很顺利, 但我们部署的空间太小, 无法观察到每个事件的多次唤醒。我们目前正在较大的区域中执行测试, 使节点间距能够与火车车厢长度保持一致。

定期报告实验

在第二组实验中, 网络中的每个节点被配置成每隔1分钟定期报告自己相邻邻居列表, 并尽可能降低所有传输所需的占空期。在其指定时隙中报告的每个节点不相重叠。每个实验包含时隙长度为250毫秒和500毫秒的50次试验。

图4描绘了每个中继段的端到端可靠性, 为多次试验的平均值。在两个实验中, 所有中继段计数的可靠性都不低于0.925。250毫秒系列的可靠性稍微低于500毫秒系列。如果我们对每个系列的每个中继段的可靠性求平均值, 那么二者的差距只有1%。250毫秒系列的可靠性略低, 是因为同时传输的概率更大, 这会导致丢失上升。时隙长度越短, 冲突机会就越大, 因为要用230毫秒的时间来测量邻居关闭并收集相邻邻居报告。因此, 对于具有来自网关的多个中继段的各个节点, 250毫秒系列的每个报告通常与其他时隙中的其他传输重叠。另外, 冲突越多重新传输越多, 由此导致250毫秒系列的平均传送延迟较长(为242毫秒), 而500毫秒系列的平均传送延迟仅为214毫秒。

图5显示了从占空期开始算起, 每个节点的报告到达网关所需的平均端到端延迟。图4和图5的结果突出显示了等待时间、可靠性和能量消耗之间的相互作用关系。每个节点所消耗的能量与定期报告的占空期成一定比例, 时隙长度设置最小占空期。对于25个不相重叠的时隙, 时隙长度为250和500毫秒的最小占空期分别为6.25和12.5秒。图5证实了这些数字, 这与最后一个节点的报告到达网关所用的平均时间相同。因此, 时隙长度为500毫秒的配置使用的能量大约是250毫秒配置的两倍, 但额外的时间带来的可靠性未增加多少。这个结果表明SEAIT可以不断调整主要性能指标, 使之符合应用需求。

结论

在本文中, 我们描述了传感器支持的智能无线遥感勘测系统SEAIT并讨论了其在北美货运铁路行业的潜在应用。我们分析了SEAIT可给铁路行业带来的主要优势——实时可见度和及时故障检测和预报。我们还讨论了SEAIT如何发挥其优势以帮助铁路行业实现商业价值, 同时还可保护环境。其中很重要的一点即是, 通过提高铁路运营效率和容量, 工作负荷可从货车转移到铁路, 这就可以节约资源、减少污染并提高公共安全。另外, SEAIT为我们提供了一种通信基础架构, 更及时地应对关键性故障, 从而减轻或避免脱轨及其它灾变性事故。虽然使用铁路涉及到的因素有很多, 包括燃料价格和人口稠密的市区内的各种限制, 但总的来说WSN将很有可能在日后的铁路系统中扮演重要角色。

我们还简要地讨论了WSN使用中面临的主要难题, 如同步、可靠的数据传递和能源管理。最后, 我们设计了许多原型节点, 并进行了一些初步实验。我们主要调查了两个不同方案中的传递延迟和通信可靠性, 即检测到关键状态之后警报消息的传递, 以及有关车辆状态的正常定期报告。初步调查结果显示SEAIT及时传递警报消息的效力可靠性比大多数中继段高出98%。

这些实验只是对SEAIT的性能进行了初步研究, 更重要的一方面是它说明传感器网络应用带来的投资回报很可观。近期, 我们将在较长距离较长周期内通过使用不同拓扑来执行大量测试, 深入研究系统的行为特征。系统的其他方面目前仍在研究, 编写本文时结果尚未公布。这些方面包括描述通用模型的使用寿命的特性和研究火车编组确认的准确性。我们衷心地希望能与各运输伙伴合作, 将SEAIT应用到货运列车上。

致谢

我们非常感谢联合太平洋公司率先在行业中推动这一成果的应用。对于Jeff Elliott、Sastry Duri、Xianjin Zhu和Marco Zimmerling在各执行环节上作出的贡献, 我们表示感谢。最后, 我们感谢全球企业咨询服务部的同事Keith Dierkx和John Dorn为我们促成了这次机会。

* International Business Machines Corporation在美国和/或其他国家或地区的商标、服务标记或注册商标。

** Sentilla Corporation, Texas Instrument, Inc. 和Sun Microsystems, Inc. 在美国和/或其他国家或地区的商标、服务标记或注册商标。

参考资料

1. A. Arora, R. Ramnath, E. Ertin, P. Sinha, S. Bapat, V. Naik, V. Kulathumani, H. Zhang, H. Cao, M. Sridharan, S. Kumar, N. Seddon, C. Anderson, T. Herman, N. Trivedi, M. Nesterenko, R. Shah, S. Kulkarni, M. Aramugam, M. L. W. Gouda, D. Young-ri Choi, Culler, P. Dutta, C. Sharp, G. Tolle, M. Grimmer和B. Ferreira著: ExScal: Elements of an extreme scale wireless sensor network, 第11届IEEE国际会议实时计算系统和应用程序分会公报, 中国香港特别行政区, 2005年8月17日至19日, 第102-108页。
2. S. Kim, S. Pakzad, D. Culler, J. Demmel, G. Fenves, S. Glaser和M. Turon著: Wireless sensor networks for structural health monitoring, 第4届IEEE国际会议嵌入式网络化传感器系统分会公报, 美国科罗拉多州Boulder, 2006年10月31至11月3日, 第427-428页。

3. G. Werner-Allen, K. Lorincz, M. Welsh, O. Marcillo, J. Johnson, M. Ruiz和J. Lees著: Deploying a wireless sensor network on an active volcano, *IEEE Internet Computing*, 第2期(全年10期), 第18-25页(2006年)。
4. I. Stoianov, L. Nachman, S. Madden和T. Tokmouline著: PIPENET: A wireless sensor network for pipeline Monitoring, 第6届IEEE国际会议传感器网络中的信息处理分会, 马萨诸塞州剑桥大学, 2007年4月25日至26日, 第264-273页。
5. D. Bailey和E. Wright著: *Practical SCADA for Industry*, Newnes 2003年出版。
6. J. H. Armstrong著: *The Railroad-What It Is, What It Does*, Simmons-Boardman Publishing Corp. Omaha, NE 1987年出版。
7. Federal Railroad Administration, Freight Railroading; 欲知详情, 请登录<http://www.fra.dot.gov>。
8. Policy and Economics Dept., "Railroads: Building a Cleaner Environment", *Association of American Railroads*, 2008年5月; 欲知详情, 请登录<http://www.aar.org/IndustryInformation/~media/AAR/BackgroundPapers/364.ashx>。
9. Policy and Economics Dept., "Freight Railroads and Greenhouse Gas Emissions", *Association of American Railroads*, 2008年6月; 欲知详情, 请登录<http://www.aar.org/IndustryInformation/~media/AAR/BackgroundPapers/466.ashx>。
10. D. Shrank和T. Lomax著: The 2007 Urban Mobility Report, 得克萨斯州运输协会, 2007年9月; 欲知详情, 请登录: http://tti.tamu.edu/documents/mobility_report_2007_wappx.pdf。
11. Federal Railroad Administration, Office of Safety Analysis; 欲知详情, 请登录<http://safetydata.fra.dot.gov/OfficeofSafety>。
12. P. Levis, S. Madden, D. Gay, J. Polastre, R. Szewczyk, K. Whitehouse, A. Woo, D. Gay, J. Hill, M. Welsh, E. Brewer和D. Culler著: TinyOS: An operating system for sensor networks, *Ambient Intelligence*, Springer-Verlag 出版, 2004年。An Operating System for Sensor Networks," *Ambient Intelligence*, W. Weber, J. Rabaey, and E. Aarts (Eds.), Springer-Verlag, 2004.
13. D. L. Mills著: Internet Time Synchronization: the Network Time Protocol, *IEEE Transactions on Communications*, 第10期(全年39期), 第1482-1493页(1991年)。

图和表

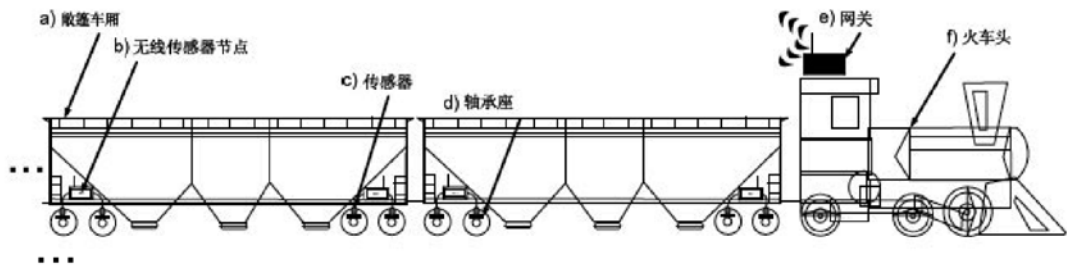


图1货物敞篷车厢(a)上SEAIT的部署视图, 无线传感器节点(b)与车厢主体和传感器(c)相连, 传感器(c)与轴承座(d)相连。网关(e)与火车头(f)相连。

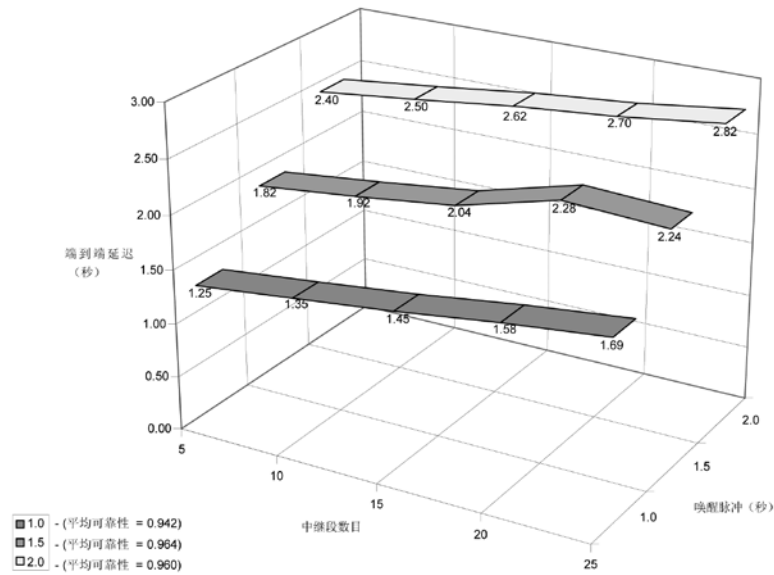


图2传递警报消息时产生的平均延迟。延迟是指从检测到警报到网关接收到警报之间所需的时间。警报节点被放置在编组中的不同位置, 与网关中的不同中继段计数相对应。延迟与唤醒脉冲时间成比例。

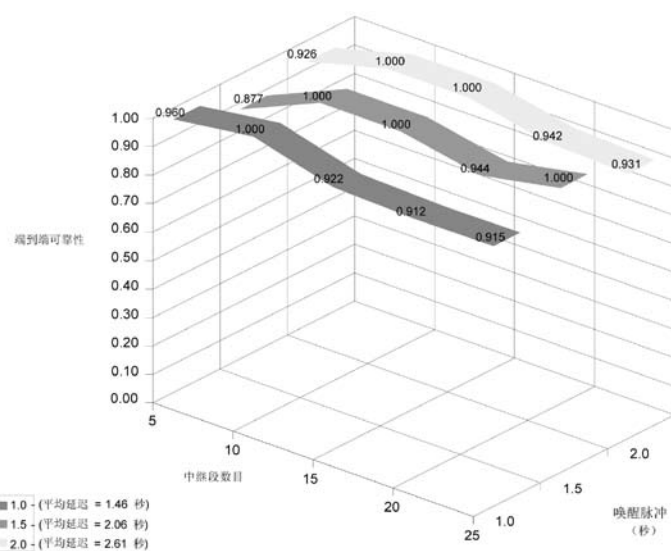


图3根据每个警报消息的成功传递率测得的平均端到端可靠性。警报节点被放置在编组中的不同位置，与网关中的不同中继段计数相对应。在每个编组配置中，我们对三个不同唤醒脉冲时间进行测量和求值。由于最初唤醒失败，最低脉冲时间的可靠性亦略低。

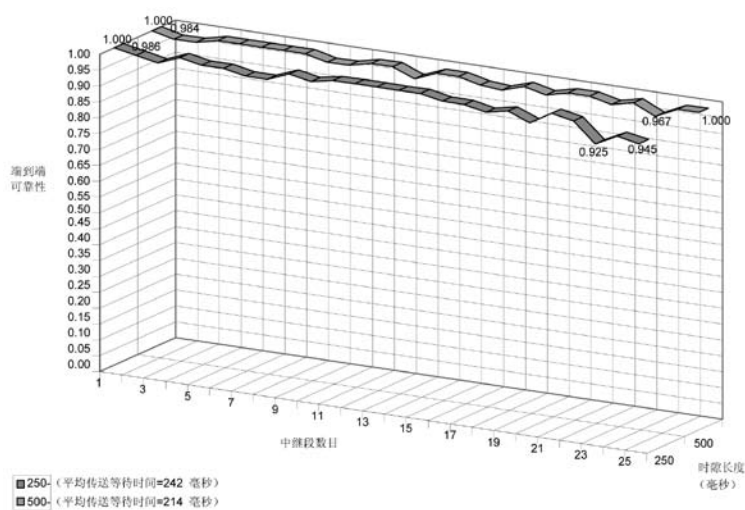


图4根据每个定期报告的成功传递率测得的平均端到端可靠性。

在有25个节点的网络中，在每个中继段计数，我们都对两个不同时间间隔进行测量并求值。所有中继段的平均可靠性只比较短时间长度的可靠性低1%。

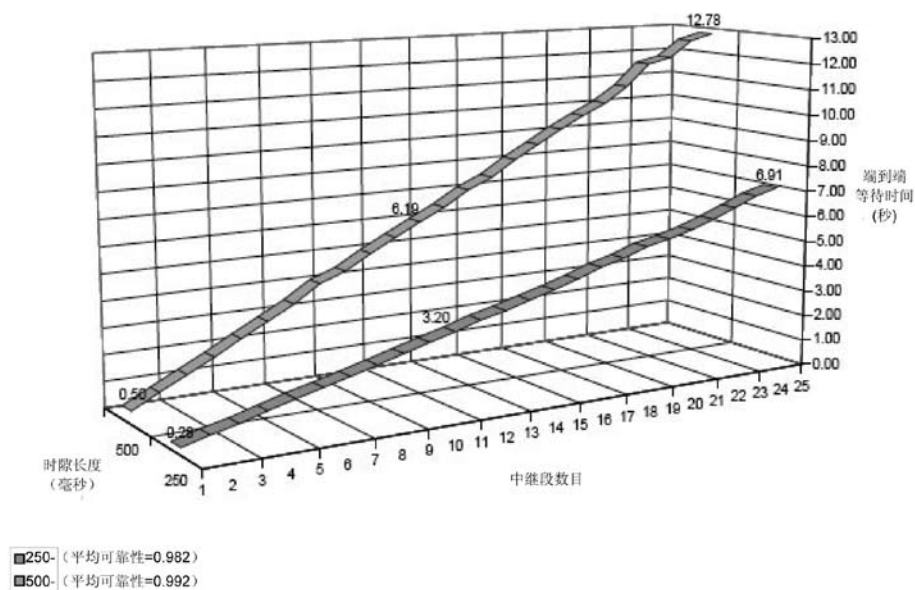


图5. 传递定期报告时在每个中继段都将产生平均端到端延迟。延迟是指占空期开始到报告到达网关的这段时间。最后一个节点的延迟大约等于占空期, 500毫秒时隙的延迟是250毫秒时隙的两倍。该图突出显示了延迟与能量消耗之间的权衡, 这与占空期成比例。

人物简介

Johnathan M. Reason就职于华生研究中心IBM研究部, 电子邮件地址为reason@us.ibm.com。Reason博士是IBM华生研究中心传感器与传动器解决方案小组的研究成员。他于1990年获得了北卡罗来纳A&T州立大学电机工程学士学位, 于1993年和2000年分别获得了加利福尼亚大学伯克利分校电机工程硕士和计算机科学博士学位。随后他加入了IBM华生研究中心, 致力于为包括石油运输业在内的各种行业提供传感器与传动器解决方案。他的主要研究领域包括无线传感器网络、嵌入式系统设计和通信网络。他是六项未决专利和诸多出版物的创始人或合作者。Reason博士是电机工程协会和计算机协会的成员。

Riccardo Crepaldi美国伊利诺斯州伊利诺伊大学香槟分校计算机科学部, Crepaldi先生于2006年获得意大利帕多瓦大学电信工程硕士(拉瑞尔理工学院)学位。毕业后到2007年这段时间, 他一直在帕多瓦大学Signet小组从事科研工作。他主要研究无线传感器网络(WSN), 他设计和部署了WSN试验台, 并为之开发了管理工具。他还进行了路由和本地化的设计和性能分析, 也研究了WSN的网络编程算法。他目前是伊利诺伊大学香槟分校计算机科学部的在读博士, 导师是Robin Kravets教授。他的研究领域包括WSN系统设计与管理以及容许延迟网络。他曾于2008年夏参与IBM传感器和传动器解决方案小组的研究实习。

