

面向 WIA-PA 网络的并行组网方法

肖金超^{1,2,3} 曾 鹏^{1,2} 张 琼¹ 于海斌¹

(中国科学院沈阳自动化研究所 沈阳 110016)¹ (广州中国科学院沈阳自动化研究所分所 广州 511458)²
(中国科学院大学 北京 100049)³

摘 要 基于 TDMA 技术的工业无线网络在工厂里的使用越来越广泛。在分析 WIA-PA 工业无线网络在组网过程中出现漏斗效应而造成速度缓慢的问题后,提出了一种面向 WIA-PA 工业无线网络的快速并行组网方法,它通过改造网络的超帧结构,根据剩余能量、链路状况和启动时间选择加入时机,并改进了加入过程中的资源分配算法,实现了路由设备的并行组网,降低了通信冲突,避免了资源冲突。实验结果表明,该算法提高了组网过程的效率,缩短了组网时间。

关键词 并行加入,网络组建,工业无线网络,WIA-PA 网络

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Parallel Network Initialization Method for WIA-PA Network

XIAO Jin-chao^{1,2,3} ZENG Peng^{1,2} ZHANG Qiong¹ YU Hai-bin¹

(Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)¹

(Shenyang Institute of Automation, Guangzhou, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 511458, China)²

(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)³

Abstract The industrial wireless network is widely utilized in factories based on TDMA technology. This paper proposed a novel fast parallel networking to ameliorate the funnel effect which can slow down the network efficiency during the WIA-PA industrial wireless process. It can not only achieve a parallel network of the routing device, but also reduce the communication collision to avoid resource conflicts by transforming superframe structure, selecting the initial time based on the residual energy, linking status and starting time, as well as improving the resource allocation algorithm in the joining process. The experimental results illustrate that this algorithm plays an important role in enhancing the networking efficiency greatly, and shortening the networking period significantly.

Keywords Parallel networking, Network initialization, Industrial wireless, WIA-PA

1 引言

近些年来,无线技术在工业领域的使用越来越广。这种情况下,以中国科学院沈阳自动化研究所牵头成立的中国工业无线联盟,研发出了工业无线网络 WIA(Wireless network for Industrial Automation)^[1]技术,用来解决工厂中的高可靠无线传输问题。该技术已经成为国际电工委员会(IEC)的国际标准,同时也是中华人民共和国国家标准。WIA-PA 同 WirelessHart^[2]、ISA100^[3]作为工业无线领域的三大技术已开始影响工业通信的发展方向。WIA 技术面向工业过程自动化(Process Automation)领域,提出了 PA 版本,以解决过程参数和计量参数的低功耗、高可靠传输问题。WIA-PA 技术可以使过程仪表使用电池供电,彻底摆脱线缆,极大地降低了布线成本和维护成本,也使得一些以前不能测量的位置,如旋转设备,高温、高压、腐蚀性高位置,能够被有效地监测。

WIA-PA 技术以时分多路访问(TDMA)技术为基础,采用集中-分布式结合的管理方式,配合分层调度,实现了网络的通信无冲突和可靠传输,是一类特殊的无线传感器网络^[4]。WIA-PA 使用了网状+星形的网络拓扑结构,上层由网关和路由设备组成网状网络,提供高可靠的路由支持,下层路由和现场设备形成了星形结构,提供灵活高效的设备接入。

目前,针对 TDMA 网络的研究较多,包含通信协议能效分析^[5]、任务调度^[6]、路由算法及维护^[7]、无线安全^[8]等热点。而由于网络的复杂性,TDMA 的实现难点在于组网^[9,10]。组网完成之前,调度机制尚未起作用,存在着通信冲突发生的可能性。通信冲突会导致报文的重传次数变多,入网时间变长。如果网络规模较大,甚至还会引发设备难以入网的问题。从各方面研究看来,现有的人网方式一般都是串行方式,设备一个一个入网,发生通信冲突时会采用指数随机退避的方法重新选择时机进行通信。尽管如此,由于各设备在入网时采用

到稿日期:2013-01-15 返修日期:2013-04-21 本文受国家自然科学基金(61100159),国家科技重大专项基金资助项目(2010ZX03006-005-01,2011ZX03005-002),国家 863 计划(2011AA040101,2011AA040103),中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KGCX2-EW-104),中国科学院战略性先导专项(XDA06020500)资助。

肖金超(1982—),男,博士生,主要研究方向为工业无线、无线传感器网络,E-mail: xiaojinchao@sia.cn;曾 鹏 男,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向为工业无线、工业自动化;于海斌 男,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向为工业通信、分布式控制系统、传感器网络。

相同的参数,发生冲突的概率仍不可忽视。同时,在大量设备入网的过程中,网关作为网络的中心因受限于有效带宽,而会产生漏斗效应,形成通信的瓶颈。

本文提出了一种快速的并行组网方法。这种方法主要针对大量 WIA-PA 路由设备入网时出现的漏斗效应^[11]和通信冲突,在不影响网络性能的同时支持网络设备并行加入网络,缩短了网络组建时间。首先,在组网之前,会个性化地生成每个设备的入网时机参数,减少发生冲突的概率;其次,在设备发送入网请求之后,使其拥有独享的加入带宽,避免入网过程被打断;最后,在网关端,利用资源管理算法,避免资源申请和分配过程中发生互锁等冲突。

本文第 1 节介绍了 WIA 网络和网络组建问题的出现和基本情况,以及本文的研究内容;第 2 节介绍了 WIA 网络的相关模型和具体问题;第 3 节详细介绍了算法的流程和细节;第 4 节是实验和结果分析;最后总结全文。

2 WIA-PA 网络组建模型和问题

2.1 WIA 网络模型

WIA 网络结构如图 1 所示。

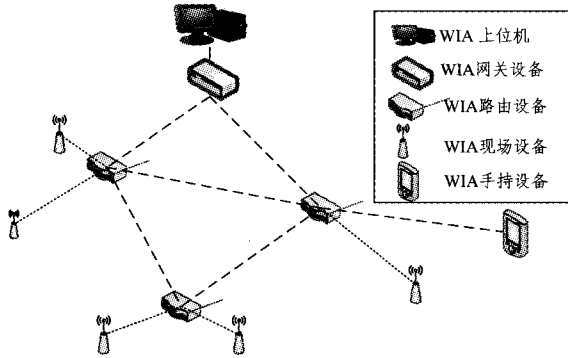


图 1 WIA 网络结构图

WIA-PA 网络中具有网关设备、路由设备、现场设备和手持设备。其中路由设备和现场设备涉及到入网的问题,路由设备要通过网状网络向网关注册,现场设备要向路由设备注册。现场设备向路由设备注册属于点到点通信的范畴,相对简单,因此本文主要解决路由设备向网关注册组网的问题,如非特指,本文中出现的设备均指路由设备。

由于是 TDMA 网络,WIA-PA 将时间等分为“时隙”,定义为传输一个数据报文且返回确认报文(ACKnowledgement, ACK)的时间,时隙的长度表示为 T_{slot} ,本文使用的值为 15.625ms。若干数目时隙周期性循环组成“超帧”,超帧长度表示为 N_s ,长度随网络规模变化。根据经验,网络内路由设备数目在 50 以上,超帧长度为 512;在 50 以下,则为 256。由于报文交互是以超帧为周期的,因此,设备的入网时间有时也会以经历的超帧数来计算。超帧和时隙如图 2 所示。

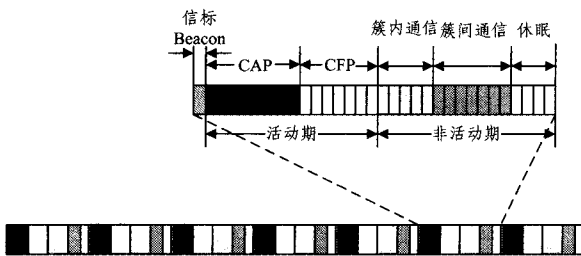


图 2 超帧和时隙

在每个超帧中,为了同 IEEE802.15.4 标准超帧形式兼容,设置了活动期(包含 CAP 和 CFP)和非活动期。活动期的 CAP 部分用于设备竞争加入,未划分时隙,其长度一般为时隙长度的整数倍。CFP 用于手持设备同网关和路由设备进行通信。非活动期也包含几个部分,一部分为簇内通信时隙,用于簇内现场设备和簇首路由设备通信;一部分为簇间通信时隙,用于路由设备同其他路由设备以及网关通信,分别进行数据传输和网络维护;最后一部分为休眠期,用于设备休眠。

2.2 网络组建模型和过程

对于一个网络 w 中的路由设备而言,从设备上电到正常发送数据,需要经历邻居发现、时间同步、链路评估、加入注册几个阶段,如图 3 所示。

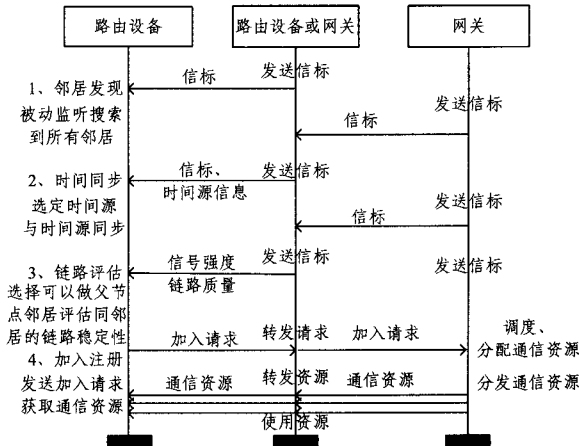


图 3 WIA 组网时序

1) 邻居发现阶段

设备上电之后通过监听网络进行邻居发现,邻居发现的目的是获得邻居情况,为加入过程提供加入通道和选路依据。邻居发现所用的时间可表示为 T_n ,大约经历 3~5 超帧。

2) 时间同步阶段

设备在入网之前,要进行时间同步,实现时隙通信。时间同步所用的时间可表示为 T_s ,大约经历 3~5 超帧。

3) 链路评估阶段

链路评估通过长时间观察来评估链路的稳定性和可用性,其实现的目的有两个,一个是确定两个设备之间形成了双向通信关系;另一个是确定这种双向通信关系在一定时间内是稳定的。从链路评估过程开始,待入网设备同在网设备进行通信交互。链路评估所用的时间可表示为 T_p ,同每个邻居进行 3~5 次交互,在没有冲突的情况下,经历 3~5 超帧。

4) 加入注册阶段

待加入设备会通过邻居将自己的加入注册请求发送到网关。网关将开始对待加入设备进行注册。注册的内容包括注册设备类型、分配短地址、分配路径、分配通信链路以及分配工作周期。所有的注册内容都要在网关上完成,并将这些信息分发到每个相关路由设备上。

加入注册所用的时间可表示为 T_p ,注册过程中,需要经历 3~5 次报文交互,在无冲突的情况下,经历 3~5 超帧。

2.3 组网过程存在问题

1) 冲突和漏斗效应

虽然 WIA-PA 网络通过 TDMA 和调度避免了网络运行过程中的通信冲突,但是,在入网之前,设备尚未得知网络的

调度信息,处于一个无序状态。同时,由超帧结构决定,设备加入是采用竞争方式,竞争使用有限的 CAP 时段。多个设备同时要求入网,必然会发生通信冲突。冲突的结果会是报文接收不成功,导致重传。连续的冲突必然会造成超时而导致入网失败。

WIA-PA 网络具有的集中式数据收集模式、多跳路由、多对一的通信模式,会造成“漏斗效应”问题,即越靠近网关的位置,组网过程中发生通信冲突、拥塞的概率就越大。在网络规模较大的情况下,由于漏斗效应的加重,网络的组建时间可能会按照天来计算。

网络组建过程中的漏斗效应如图 4 所示。

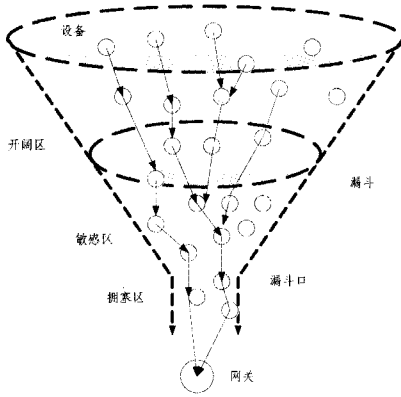


图 4 网络组建过程中的漏斗效应

为了解决漏斗效应造成的冲突,每个设备一般采用指数随机退避和空闲信道检测(CCA)相结合的方式。

当设备入网时,首先检测信道是否空闲,如果空闲,则发送加入请求,否则进行随机退避,等待一段时间后继续入网。等待时间不可忽略,表示为 Tb ,一般退避的时间是按照二进制指数形式递增的。假设设备在加入过程中仅发送一次报文, N 个设备同时入网,每一时刻发送报文的概率为常数 p ,基本等待时间为 Tb_{min} ,最长退避时间为 Tb_{min}/p ,则加入有序的情况下, p 为 $1/N$,而一般无序情况下, p 至少为 $1/2N$,第一个报文发送成功的平均等待时间约为 $N * Tb_{min}$ 。而在设备加入过程中,交互报文不止一条,如果加入过程中不能保证单个设备加入报文发送的连续性,则可能造成加入超时或报文重传,增加平均等待时间。极端情况下,会出现无法入网的现象。

2) 串行加入方式

现有的组网方式是串行入网方式,即一个设备入网未完成时,网关忽略其他设备的入网请求。这样做的好处是入网过程中的调度和资源分配仅针对单一设备,避免了资源冲突的发生,实现简单;而缺点则是入网时间过长。此外,串行入网方式默认为设备是一台台顺序开启的,开启过程中的时间差用于设备入网。然而在实际过程中,设备经常同时打开,这时会出现很严重的冲突情况。

2.4 组网时间计算

串行组网过程消耗的时间可用以下公式计算:

$$T = N_s * T_{slot} \sum_{i=1}^N (Tn_i + Ts_i + Tp_i + Tb_i + Tr_i) \quad (1)$$

如果 N 处于 $20 \sim 100$ 之间,其中各参数的基本情况如下。

表 1 网络组建中的基本参数

参数	描述	典型值/平均值
N_s	超帧内时隙个数	256/512
T_{slot}	单个时隙时间	15.625ms
Tn	邻居发现时间	5 超帧
Ts	时间同步时间	3 超帧
Tp	链路评估时间	5 超帧
Tb_{min}	基本退避等待时间	1 超帧
Tr	注册时间	3 超帧

除了可能会发生冲突的加入等待时间之外,其他都近似常量。因此原公式可以表示为:

$$T = E + K \quad (2)$$

其中:

$$E = N * N_s * T_{slot} * (Tn + Ts + Tp + Tr) \quad (3)$$

表示加入过程中的常量部分,只会受到超帧长度的影响,在一定范围内,是随着设备数目线性变化的。

$$K = N_s * T_{slot} * \sum_{i=1}^N Tb_i \quad (4)$$

表示加入过程中的可变部分,主要是等待时间,随着网络规模的增加而迅速增长,其中:

$$Tb_i = Tb_{min} * (N - i + 1) \quad (5)$$

因此

$$K = N_s * T_{slot} * Tb_{min} * (N + 1) * N / 2 \quad (6)$$

3 快速并行组网算法

组网时间是指从第一个路由设备上电到最后一个路由设备入网完成的时间。由式(2)、式(5)可知,影响网络组网时间的因素包括两个部分,一个是因为超帧结构中的 CAP 阶段漏斗效应导致的网关拥塞,另一个是由冲突引起的通信交互时间过长。因此,本文提出了一种快速并行加入组网方法,即通过将 CAP 进行时隙化,同时复用 CFP 时隙,增加加入时隙数目,扩大“漏斗口”的大小,允许并行加入,提高了整体加入速度;通过将 CAP 阶段分成时隙,选用个性化的通信选择概率,降低了发生通信冲突的可能性,提高了个体的加入速度和成功率。

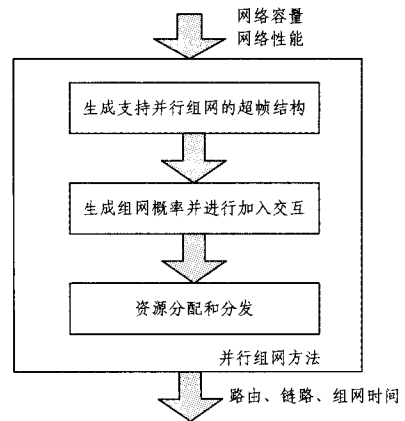


图 5 并行组网方法框图

3.1 并行组网方法

提高加入带宽,实现多个待加入设备的并行入网,是提高组网速度最有效的方法。

快速并行组网方法包含几个部分:

- 1) 面向并行组网的 WIA-PA 超帧结构;
- 2) 基于能量、通信质量和等待时间综合的设备入网概率

选择方法;

3) 基于时隙优先的冲突避免并行资源分配方式。

3.1.1 面向并行加入的 WIA-PA 超帧结构

为了解决加入过程中出现的漏斗效应,本文通过改造 WIA-PA 的超帧结构,实现了扩大漏斗开口和减少冲突的目的。具体改造如下:

1) 将 CAP 部分改造成时隙

由于 CAP 部分用于竞争,会导致加入过程中的冲突,因此,将其进行时隙化改造。

2) 将 CFP 部分的时隙用于加入阶段

CFP 部分由于仅用作手持设备同网关和路由设备的通信,在组网过程中,基本不会发挥作用,因此,可以用作网络组建过程,这样做可以增加可用于加入的时隙,提高加入带宽。

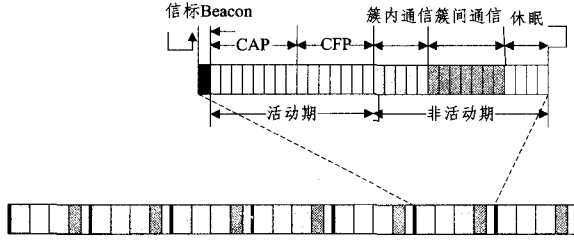


图6 支持并行组网的超帧和时隙

改造完成之后的 CAP 同 CFP 将共同构成加入区,加入区内的时隙供设备加入使用,为了避免造成混乱,时隙每两个一组,每组含有一个发送和一个接收时隙,称为一个加入共享时隙对。在加入过程中对每个共享时隙对进行限定,固定给第一次使用该时隙进行加入的设备,直至该设备加入完成。加入时隙对过少会影响并行组网的效果,过多则会影响网络的容量以及其他路由设备的休眠时间。

根据网络规模和网络的性能要求,加入时隙对可利用超帧结构中的空闲和休眠时隙,即:

$$2 * X + \text{Maxim}(C_i) + N_{\text{beacon}} + 2 * N + 2 * \sum_{i=1}^N T_{\text{slot}} * N_i / T_i \leq N_s \quad (7)$$

式中, X 是加入时隙对的数目, C_i 是第 i 个路由设备所带的现场设备的网络时隙数, $\text{Maxim}(C_i)$ 表示现场设备所占用的最大网络时隙数。 N_{beacon} 表示信标所占的时隙数目,一般为 1, T_i 表示第 i 个路由设备的通信周期。 $2 * N$ 表示在每个超帧中,每个路由设备有一对收发时隙做网络维护,所有的参数 2 都表示使用的时隙是成对出现的。

在超帧长度为 256、路由设备数目为 50、最大的现场设备所占用的网络时隙数为 100、路由设备的平均通信周期为 4 秒的情况下,可得 $X \leq 13$ 。

由于网关的处理能力问题,所能支持并行加入的设备数目有限,因此,一般将可并行加入的设备数目设置为 4~8,而将加入共享时隙对设置为与并行加入的设备数目相同。

改造之后的超帧结构不改变整体的网络功能,并可向下兼容 IEEE802.15.4 超帧结构。改造后的超帧结构将在设备部署之前写入到设备当中。

3.1.2 基于能量、通信质量和启动时间综合的设备入网概率选择方法

竞争的加入方式会造成冲突,通过限制单一设备加入的方式也无法避免冲突的发生。大量设备要求入网的情况下,

如果不对每个设备发送加入请求的时机进行控制,就会发生冲突。

采用个性化的加入时机概率选择方法可以有效降低冲突的发生,同时避免使用指数随机退避方式存在的规律性退避问题。

具体方法如下:

(1) 对每个待入网设备进行分级,分级的方法是采用加权的方式。分级是以设备特有的特征为基础的,包括设备剩余能量值 E 、最好邻居设备的信号强度值(RSSI)以及系统启动时间。特征集合可表示为:

$$C = [c_1, c_2, c_3] \quad (8)$$

式中, c 表示每个归一化的特征。其中,

$$c_1 = \begin{cases} E_{\text{remain}} / E_{\text{max}}, & \text{if } (E_{\text{remain}} < E_{\text{max}}) \\ 1, & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

式中, E_{remain} 表示仪表的剩余能量,用电池实际电压测量值来表示; E_{max} 表示仪表的初始能量,用电池出厂电压值表示。

$$c_2 = \begin{cases} \frac{(RSSI_{\text{current}} - RSSI_{\text{set}})}{(RSSI_{\text{max}} - RSSI_{\text{set}})}, & \text{if } (RSSI_{\text{current}} > RSSI_{\text{set}}) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

式中, $RSSI_{\text{current}}$, $RSSI_{\text{max}}$, $RSSI_{\text{set}}$ 分别表示最好邻居信号强度的测量平均值、射频部分的信号强度理论最大值和设定的平均值。其中 RSSI 的测量可通过射频芯片获得,而 RSSI 的信号强度理论最大值可通过查阅芯片手册和模块的出厂参数来获得,本文所用到的理论值为 48, RSSI 的设定值设定为 0。

$$c_3 = \begin{cases} T_{\text{run}} / T_{\text{set}}, & \text{if } (T_{\text{run}} < T_{\text{set}}) \\ 1, & \text{else} \end{cases} \quad (11)$$

式中, T_{run} 表示从系统启动到当前时刻所经历的时间,来自于设备内部运行的操作系统; T_{set} 表示一个预先设定值,可设置为 10 倍的单设备入网时间。

以上 3 种特征几乎都是独一无二的,对于这些特征,整个系统用同一套权值,即可保证分级的独一无二性。其中权值可表示为:

$$W = [w_1, w_2, w_3] \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^3 w_i = 1, w_i \in [0, 1] \quad (13)$$

因此,设备的分级值可表示为:

$$R = C * W = \sum_{i=1}^k c_i * w_i \quad (14)$$

分级值 R 处于 0~1 之间,因此可以直接作为设备入网时选择加入时机的概率。

3 个特征值所对应的 3 种目的,可根据权重大小来调节:

从网络生存周期考虑,先入网的设备有更大的机会为后入网的设备提供路由帮助,而路由服务将耗费更高的能量,因此,让能量高的设备优先入网有助于延长网络的生存周期。

从网络可靠性考虑,信号强度值在一定程度上可以指示链路质量的高低,因此,让同邻居之间信号强度高的设备优先入网有助于提高网络的稳定性。

从公平性考虑,本着先来先服务的原则,在同等条件下,让启动时间最长的设备优先入网。

也可以根据以上几种情况综合考虑每个特征值的权重,增大差异性。

(2)在加入时隙中,设备按照发送概率决定发送加入请求的时机。每个设备在发送选择时机上都只是有概率高低的区别,有些设备发送的概率高些,有些低些,但却没有剥夺该设备竞争加入时隙的权利。

发送概率选择不同的入网时机,可以降低冲突的发生,极限情况下,将不会发生冲突,使加入顺序变得有序,加入等待时间将降低为原来的一半。

为了保证同一设备加入交互过程的连续性,避免加入超时等情况的发生,在网关收到加入请求之后,将用广播形式宣布该设备用于加入的时隙对私有,用于后续的组网交互过程。当该设备加入完成之后或入网时间超时(即入网失败),私有的加入时隙对将被释放。

3.1.3 基于时隙优先的冲突避免并行资源分配方式

串行加入方式改为并行加入方式,首先需要解决的是资源分配方式。资源分配主要涉及到路由选择完成之后的链路资源的分配。链路资源包含时隙和信道的组合,处于同一个资源库中。

链路资源分配包含3个目标:(1)链路的收发双方要能够同路由相匹配,(2)链路上的延迟要尽量小,(3)链路上的通信可靠性要尽量高。

本文采用了基于贪心算法的启发式资源分配方法,即在通信路径上,根据由近到远的顺序,在资源库中选择尚未占用的时隙号较小的链路,同时要选路链路上通信成功率最高的信道,分配给收发双方。该过程的执行时间不可忽略。分配流程如表2所列。

表2 资源分配流程

输入:路由信息,链路资源库	
输出:分配给某一设备的链路资源	
1.	BEGIN
2.	初始化链路信息;
3.	标记空闲链路;
4.	For i=1 to n(n个设备的路由)
5.	For j=1 to m(路由上的m个链路)
6.	If(找到含有空闲链路的编号最小的时隙)
7.	选择通信成功率最高的信道,如存在多个,则随机;
8.	Else
9.	标记该链路分配失败;
10.	Break;
11.	End If
12.	End For
13.	If(为每段链路获取资源成功)
14.	分发已获取资源;
15.	标记资源为已占用;
16.	End If
17.	End For
18.	输出所有资源分配结果;
19.	END

并行组网过程需要多个设备同时入网,链路资源分配算法要同时运行多个实例,并在同一个资源库中进行运算,这很容易造成分配结果上相同或有部分重合,进而造成资源分配上的冲突。

发生冲突的可能方式有以下几种:(1)对于同一设备的两个任务分配到了同一时隙;(2)相同信道-时隙组合分给了不同的接收双方。

针对可能发生冲突的以上两种情况,1)对链路资源进行分类,根据时隙所在位置,分为不同的组,组的数目同所允许

并行入网的设备数目相同,每个组内的时隙均不重复,并均匀分布在可分配的时隙中,供一个设备入网时使用;2)当设备申请入网时,网关首先根据每组内可用资源的多少,将其分入到可用资源较多的一组中,然后从该组的链路资源中获取尚未分配的资源供其使用,并将分配给该设备的资源记录下来,防止下次被重复分配;3)如果设备入网过程发生了资源分配失败,则可直接回收。这样做既避免了资源分配过程中发生冲突,又能够使资源分配均匀。

然而,在网络接近最大容量时,这样做可能出现资源碎片,造成部分资源无法使用,使得部分设备无法入网。因此,在网络资源即将耗尽时,将对剩余资源进行合并,此时将不再支持并行入网。

3.2 改进后加入时间的评估

组网改进之后,一个包含 N 个设备的网络组建时间 T 可以由式(1)、式(2)算出,其中,增加了并行组网策略之后,可得:

$$E = \lceil N/S \rceil * N_s * T_{slot} * (Tn + Ts + Tp + Tr) \quad (15)$$

而增加了个性化发送概率选择之后,用于退避的时间最小可变为:

$$K = N_s * T_{slot} * (Tb_{min}/S) * (N+1) * N/4 \quad (16)$$

表3是根据实际情况,分为20、50、100这3种典型网络规模,计算其理论入网时间最小值。

表3 网络组建时间理论最小值

设备数目	参数		
	超帧	串行	并行
100	512	22943	1758
50	256	5743	879
20	256	2080	276

以上计算结果仅为理论值,具体加入时间将会随着网络状况的影响而变大。

4 物理实验结果与分析

为了检验本文所提算法的有效性,分别以网络加入时间、时隙开销、组网拓扑结构的合理性为指标,对单设备串行加入和并行加入两种方式进行实验。

4.1 实验条件和方法

实验建立如下的无线网络:20个设备组建网络,网关位于网络的中心,实验环境为实验室环境。其中,传感器设备采用中科院沈阳自动化所的SIA2420无线模块,核心处理器为MSP430F1611,运行 $\mu C/OS II$ 嵌入式实时操作系统;网关采用WIA无线网关,核心处理器为AT9200M,运行Nucleus嵌入式操作系统。测试环境如图7所示。

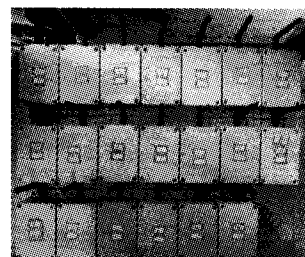


图7 实验现场图片

网络中20个设备按照4s的超帧长度组织,分别按照改进前和改进后两种方式入网。首先将所有设备上电,最后将

网关上电,从网关上电开始,记录每个设备的入网时间:

1)网关设备每个周期提供 2 个加入时隙,分别用于收发,同一时间只有一个设备可以进行加入,在网络刚开始组建的同时,一次打开所有设备。

2)网关设备每个超帧提供 8 个加入共享时隙对,同一时间可以加入 8 个设备,在网络刚开始组建的同时,一次打开所有设备。由于实验时全部使用新电池,打开时间也相同,因此将剩余能量和启动时间的权值设定为 0.1,而将最好邻居的链路质量权值设定为 0.8。

4.2 实验结果分析

4.2.1 并行组网方法对于组网速度的优化

1)组网速度随设备数目变化

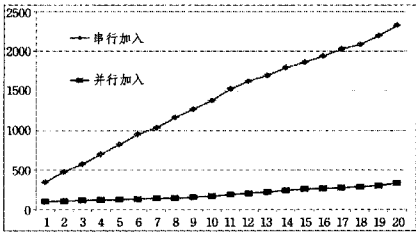


图 8 设备组网时间分布

从图 8 可以看出,组网时间随着入网设备的增加而增加。整个加入过程具有以下几个特点:

1)串行加入过程中,一些设备加入之后,单个设备的加入时间间隔会缩短,这是由于一些设备加入之后,网络的冲突变小,设备的等待时间也变小。最后 2、3 个设备由于一直在等待,退避时间较长,会出现加入时间间隔过长的情况。

2)并行加入过程中,由于将并行入网的数目设置为 8,按照 8 个设备分成一段,可以看出,每段近似为直线,即加入时间间隔近似相同。第二段比第一段的斜率要大,这是因为第一段中选择加入时机的概率较大,能更快选择到加入时机,入网速度较快,而第二段入网速度较慢。

3)同串行加入方式相比,并行组网大大降低了组网时间,有效地缓解了漏斗效应,降低了网络中的通信冲突。

为了验证理论分析的可靠性,以 20 个设备入网为例,进行理论值与测量值的对比。

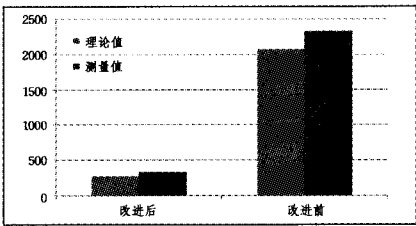


图 9 加入速度实际值同理论值的对比

实际的测量值与理论计算结果基本吻合(见图 9),从而验证了本文对于入网时间分析的可靠性。实际的测量值比理论最小值要略高,这是由于理论值考虑的是极端无冲突的情况,实际情况是不可能避免冲突的发生,也不能忽略入网等待时间和通信过程中的网络重传等时间。

4.2.2 网络跳数和稳定性影响

使用并行入网,尽管加入速度变快,但是,在设备最初加入时,会出现可用邻居较少、无法形成多路径路由由同时加入跳数不是最小的情况。

表 4 并行加入对网络稳定性的影响

加入方式	单跳设备 数目	多跳设备 数目	单路径设备 数目	多路径设备 数目
串行加入	20	0	1	19
并行加入	17	3	9	11

由表 4 可知,并行加入过程中,由于最初邻居数目较少,无法形成多路径,会造成多个设备直接形成单路径路由。同时,由于多个设备同时加入,可能网关无法同时响应,部分设备入网之后将会形成多跳,而不是预期的单跳网络。

通过使用 WIA 网络的路径维护机制^[6],可以在入网之后解决路径不是最优的问题。经过一段时间的路由维护,可以将路径和跳数进行优化。优化后的结果如图 10 所示。

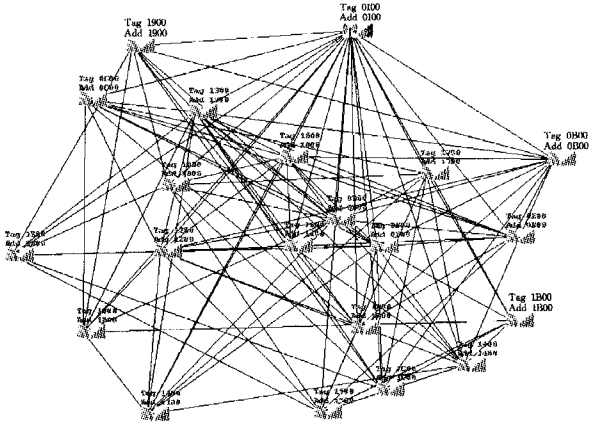


图 10 最终形成的拓扑结构图

结束语 提高无线传感器网络的运行效率,是传感器网络应用推广中所面临的重要问题,虽然网络组建在传感网部署中只是一个很小的一部分,但组网时间的长短会直接影响到用户的应用体验。同时,在一些网络拓扑频繁变化的应用系统中,快速组网和快速恢复也是一项很重要的工作内容。

本文提出的面向 TDMA 无线传感器网络的并行组网算法,解决了组网过程中出现的漏斗效应问题,提高了组网的速度。在下一步工作中,将进一步降低时间同步所消耗的时间,提高网络组建速度。本文提出的算法只是实现了快速组网,但没有进行网络拓扑结构和负载方面的优化,这也将是下一步研究的目标。

参考文献

[1] 于海斌,等. GB/T 26790.1-2011. 工业无线网络 WIA 规范,第一部分;用于过程自动化的 WIA 系统结构与通信规范 [S]. 北京:中国标准出版社,2011

[2] HCF. WirelessHART Device Specification, HCF_SPEC_290 [S]. Revision1. 1. HART Communication Foundation,2009

[3] ISA. ISA_100_11a_Draft_D2_2008_09_12[S]. 2008;164-215

[4] 于海斌,曾鹏,梁炜. 智能无线传感器网络系统[M]. 北京:科学出版社,2006

[5] 官铮,赵东风,余介夫. 一种 TDMA 无线传感器网络 MAC 协议能量有效性分析[J]. 计算机科学,2012,39(6A):151-153,173

[6] 李德威,曾鹏,肖金超,等. 基于双向多路径的工业无线传感器网络路由维护机制[J]. 小型微型计算机系统,2011,32(6):1094-1098

[7] 葛方振,魏臻,陆阳,等. 基于混沌蚂蚁的传感器网络分布式任务分配[J]. 仪器仪表学报,2012,33(5):961-969

(下转第 80 页)

补丁式的修改。改良意味着吸收借鉴与摒弃,是在可用性、可靠性、可管理性等诸多性能之间的取舍与博弈。本文的主要目的不是一一列举各种算法的实现原理,而是有针对性地提出问题、分析问题,并通过对典型解决方案的讨论来开拓思路,为尚处于起步阶段的 M2M 通信研究提供更广阔的思维空间和更多可供借鉴的方法。基于 IP 网络的 M2M 通信在拥有许多应用优势的同时,也存在大量现存和潜在的问题需要解决,这也是笔者需要进一步研究的内容和方向。

参考文献

- [1] 王群,钱焕延.一种面向物联网的 M2M 通信解决方案[J].微电子学与计算机,2012,29(11):13-17
- [2] Mukaidani H, Cai L, Shen X M. Stable Queue Management for Supporting TCP Flows over Wireless Networks[C]//Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Communications(ICC). New York: IEEE Press, June 2011: 1-6
- [3] Chaskar H, Lakshman T V, Madhow U. TCP Over Wireless with Link Level Error Control: Analysis and Design Methodology[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1996, 7(5): 605-615
- [4] Padhye J, Firoiu V, Towsley D F, et al. Modeling TCP Reno performance: a simple model and its empirical validation [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2000, 8(2): 133-145
- [5] Floyd S. TCP and Explicit Congestion Notification[J]. ACM Computer Communication Review, 1994, 24(5): 10-23
- [6] Zhai H Q, Chen X, Fang Y G. Rate-Based Transport Control for Mobile Ad Hoc Networks[C]//Proceedings of IEEE WCNC'05. New Orleans: IEEE Computer Society, 2005: 2264-2269
- [7] Lien Y N, Hsiao H C. A New TCP Congestion Control Mechanism over Wireless Ad Hoc Networks by Router-Assisted Approach[C]//Proceedings of the 27th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops(ICDCSW'07). June 2007: 84-84
- [8] Gergö B, Adam G, Thomas Z, et al. Explicit Loss Notification to Improve TCP Performance over Wireless Networks[C]//Proceedings of High Speed Networks and Multimedia Communications(HSNMC). 2003: 481-492
- [9] 冯颜君,孙利民,钱华林,等. MANET 中 TCP 改进研究综述[J]. 软件学报, 2005, 18(3): 434-444
- [10] Al-Jubari A M, Othman M, Ali B M, et al. An Adaptive Delayed Acknowledgment Strategy to Improve TCP Performance in Multi-hop Wireless Networks[J]. Wireless Personal Communications, 2013, 69(1): 307-333
- [11] 陈立家,江昊,吴静,等. 车用自组织网络传输控制研究[J]. 软件学报, 2007, 18(6): 1477-1470
- [12] Jung W S, Son S W, Rhee B H. A study of enhanced TCP for vertical Handover using explicit congestion notification (ECN) [C]//Proceedings of the 2011 Third International Conference on Ubiquitous and Future Networks(ICUFN). Dalian, China, June 2011: 305-308
- [13] Dyer T D, Boppana R V. A comparison of TCP performance over three routing protocols for mobile ad hoc networks[C]//Proceedings of the 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing (MobiHoc'01). ACM New York, 2001: 56-66
- [14] Wang F, Zhang Y G. Improving TCP performance over mobile Ad-hoc networks with out-of-order detection and response[C]//Proceedings of the 3rd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing (MobiHoc'02). ACM New York, 2002: 217-225
- [15] Ghanem T F, Elkilani W S, Hadhoud M M. Improving TCP performance over Mobile Ad Hoc Networks using an adaptive backoff response approach[C]//Proceedings of the International Conference on Networking and Media Convergence (ICNM 2009). Cairo, March 2009: 16-21
- [16] Chen K, Nahrstedt K, Vaidya N. The Utility of Explicit Rate-Based Flow Control in Mobile Ad Hoc Networks[C]//Proceedings of the 2004 IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC 2004). March 2004: 1921-1926
- [17] Liu W R, Wu M, Peng J, et al. A Stable Congestion Control Mechanism in Ad Hoc Network[C]//Proceedings of the Second International Conference on Information and Computing Science (ICIC'09). May 2009: 225-228
- [18] Brown K, Singh S. M-TCP: TCP for Mobile Cellular Networks [J]. Computer Communication Review, 1997, 27(5): 19-43
- [19] Chandran K, Raghunathan S, Venkatesan S, et al. A feedback-based scheme for improving TCP performance in ad hoc wireless networks[J]. IEEE Personal Communications, 2001, 8(1): 34-39
- [20] Kim D, Toh C K, Choi Y. TCP-BuS: Improving TCP Performance in Wireless Ad Hoc Networks[J]. Journal of Communications and Networks, 2001, 3(2): 1-12
- [21] Balakrishnan H, Seshan S, Katz R H. Improving Reliable Transport and Handoff Performance in Cellular Wireless Networks [J]. ACM Wireless Networks, 1995, 1(4): 469-481
- [22] Bakshi B S, Krishna P, Vaidya N H, et al. Improving performance of TCP over wireless networks[C]//Proceedings of the 17th International Conference on Distributed Computing Systems. Baltimore, MD, May 1997: 365-373
- [23] Holland G, Vaidya N. Analysis of TCP performance over mobile ad hoc networks[J]. Wireless Networks, 2002, 8(2): 275-288
- [24] Gunes M, Vlahovic D. The performance of the TCP/RCWE enhancement for ad-hoc networks[C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Computers and Communications (ISCC 2002). July 2002: 43-48
- [25] Liu J, Singh S. ATCP: TCP for mobile ad hoc networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2001, 19(7): 1300-1315

(上接第 57 页)

- [8] 魏旻,王平,金基天.一种适用于 WIA-PA 网络的分层入侵检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(7): 1453-1459
- [9] Burri N, von Rickenbach P, Wattenhofer R. Dozer: ultra-low power data gathering in sensor networks[C]//IPSN'07. ACM Press, New York, USA, Apr. 2007

- [10] Meier A, Weise M, Beutel J, et al. NoSE: efficient initialization of wireless sensor networks[C]//SenSys 2008. 2008: 397-398
- [11] Ahn G-S, Miluzzo E, Campbell A T, et al. Funneling-MAC: A Localized, Sink-Oriented MAC For Boosting Fidelity in Sensor Networks[C]//Proc. of Fourth ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2006). Boulder, Colorado, USA, 2006: 1-3