

簇状树形无线传感器网络系统级设计分析

万亚东 王 沁 张晓彤

(北京科技大学信息工程学院 北京 100083)

摘 要 簇状树形网络在无线传感器网络应用中大量存在,对此种网络的协议进行系统级建模可以有效地提高设计的灵活性,可以针对不同的应用进行快速配置。针对一种工业无线传感器网络协议,提出了一种典型的簇状树形网络的系统级建模方法,并在系统的可靠性、低功耗、时延等不同的方面进行了设计评估。实际工厂的部署和实验表明,采用系统级分析,可以快速高效地对系统的参数进行调整,达到网络设计的需求。

关键词 无线传感器网络,簇状树形,系统级模型,工业无线应用

中图法分类号 TP393 **文献标识码** A

System Level Analysis of Cluster-tree Based Wireless Sensor Network Design

WAN Ya-dong WANG Qin ZHANG Xiao-tong

(School of Information Engineer, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract Cluster-tree based topology is widely used in wireless sensor network applications. In order to target different applications using this kind topology, a system level analysis approach is needed for the flexible and efficient protocol design and deployment. Based on a TDMA industrial MAC protocol, a system level model was proposed to reveal the relationship between network parameters and application requirements on reliability, energy efficiency and delay. The large scale deployment and experiment on the factory real field showed that the approach could be useful for the adjustment of protocol parameters and satisfy the application requirements.

Keywords Wireless sensor network, Cluster-tree based topology, System level model, Industrial wireless application

无线传感器网络的应用越来越广泛,特别是在工业领域,已有大量的网络应用到监测和控制中。随着无线传感器网络的发展,网络的拓扑结构也从简单的星型网络到复杂的MESH网络逐渐呈现多样化,其中簇状树形网络拓扑在众多实际应用中由于其简单实用而被大量使用^[1,2]。簇状树形网络提供了一种降低网络能耗,便宜网络规模扩展的方法^[3]。针对此种网络,结合工业应用特征,我们在文献[4]中提出了一种混合网络协议,该协议结合TDMA和FDMA,采用时隙调度和随机接入分别完成周期性数据传输和突发性数据传输,并在工业监测应用中取得了良好的效果。然而对于同类网络结构,在不同的具体应用中设计需求不同,需要对网络参数进行调整,例如有些应用中主要关注节点的能耗,而有些关注网络的可靠性,有些关注网络延迟,有些是多个方面的综合考虑。

基于上述问题,本文在系统设计上采用数学模型对能耗、可靠性、时延等进行建模,通过调整网络参数从而满足不同应用的需求。

系统级设计在众多的无线传感器网络协议以及应用的设计中都有所体现^[5],但对于一类具体协议的研究比较少^[6],本文针对在工业无线传感器网络中常用的簇状树形网络拓扑以

及TDMA/FDMA混合网络协议,对其网络设计的整体目标进行分析,为各种不同的应用需求提供设计指导。

1 簇状树形网络特征

簇状树形网络的结构如图1所示。网络由多层的簇构成,传感节点和簇头构成第一级簇,一级簇头构成第二级簇,以此类推直到SINK,从整个网络拓扑上看是一个树状结构。数据从传感节点传输到一级簇头,再由一级簇头转发到二级簇头,依次直到SINK。

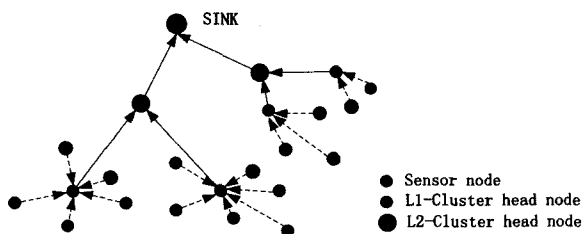


图1 拓扑结构

簇状树形拓扑结构便于网络的部署,特别是在工业场合,合理地将已有的基础设施作为簇头的布放位置,在工艺和流程上将同区域的传感节点构成一个簇,便于对数据进行融合

到稿日期:2009-09-21 返修日期:2009-12-18 本文受国家高技术研究发展计划(863)(2007AA041201),国家高技术研究发展计划(863)(2007AA04Z169),国家自然科学基金(50674010)资助。

万亚东(1982-),男,博士生,主要研究方向为无线传感器网络等,E-mail:wanyadong82@163.com;王 沁(1961-),女,教授,主要研究方向为无线网络、计算机系统结构等;张晓彤(1968-),男,教授,主要研究方向为无线传感器网络等。

处理和容错判断。从网络布局上,每个传感节点都是一跳和簇头进行通信,降低传感节点不必要的转发能耗;簇状网络的另一个主要优点是便于网络的扩展。

对簇状网络协议的研究比较多^[7-9],主要集中在分簇算法^[7]、簇状路由算法^[8]等,大多数协议针对低功耗设计。本文在簇状树形拓扑下,针对一种典型的工业网络协议,研究网络的能耗、可靠性、时延、网络的规模、数据周期、重传次数等等因素之间的关系。

2 一种典型的工业无线应用协议 TD-FDF

针对于图1所示的拓扑结构,我们在轴承监测应用中设计了TD-FDF协议^[4,2]。每个簇中包括一个簇头节点,一个备份簇头用于簇头冗余和突发数据转发以及若干传感节点。本节对协议进行简要描述。

2.1 混合 MAC 协议

MAC调度的算法很多,主要可以分为基于竞争的协议和固定配置协议。竞争接入协议,如S-MAC^[10]、BMAC^[11]等;固定配置协议,典型的如LEACH^[12]等;其它如CDMA的PicoRadio^[13]等。

CSMA接入在大规模接入时碰撞会增加,性能会大大降低,不能保证数据传输的可靠性和时延,因此采用TDMA解决该问题。TDMA协议具有低功耗等优点,但一旦节点过多,容易造成时隙分配紧张,增大网络时延,因此,引入FDMA,对网络进行适当划分,每个簇采用不同的频段进行通信,以减小TDMA子网络的规模。

协议的基本流程如下:

- 1) SINK启动后周期性的扫描频道,准备接收簇头请求;
- 2) 传感节点启动之后,扫描频道,查询周围的簇头,选择通信质量最好的簇头加入本簇,并由簇头分配节点号;
- 3) 传感节点根据自己的节点号计算通信时隙,然后休眠,进入周期性采集,并在自己的通信时隙将数据发送到簇头,等待簇头返回ACK;
- 4) 传感节点收到簇头的ACK后,根据ACK中捎带的同步计数进行时钟同步调整;
- 5) 簇头将节点的数据进行数据融合,向SINK请求频道,之后向SINK发送数据。

簇内的TDMA机制的关键是精确的时钟同步和合理的时隙分配。TDMA需要在发送与接收节点之间实现严格的同步,以避免在相邻的时隙出现信号的重叠,由于网络中的节点的晶振漂移,无线信道传输延迟以及节点数据处理带来的不确定性,导致网络中时钟产生偏差,其中晶振漂移是最主要的因素。无线传输的延迟和节点的传输波特率与数据包的大小有关,累计效应比较小,节点收发包处理时延比较小,因此可以通过簇头的本地时钟计数器来确定节点的时钟偏差。

簇头本身维护一个周期性的定时器,每 Δt 时间计数一次,收到节点的数据之后,在ACK中将当前时间的计数值返回给节点,称之为时标。同步精度是 Δt 的整数倍: $R = n \cdot \Delta t$ 。节点以周期 T 采集并传输数据。

• 时隙分配

节点时隙采用固定时隙槽分配方法,每个节点从簇头获取到节点号之后,根据节点号计算自己的发送时隙,时隙只进行一次分配。每个节点的时隙大小 T_i 是 Δt 的整数倍,由 x

个发送机会组成。设节点1的发送时隙是 $[0, T_i)$,则节点2的发送时隙为 $[T_i, 2 \cdot T_i)$,依次,节点 i 的发送时隙为 $[(i-1) \cdot T_i, i \cdot T_i)$ 。节点1发送数据时,簇头的计数器值清零,此时节点 i 对应的簇头计数器值理论上应为 $(i-1) \cdot T_i$,因此,每个节点都可以计算出自己在发送时隙对应的理论时标是多少。

• 同步调整

节点通过与簇头的数据交换调整时钟同步,传感节点收到簇头的ACK后,比较ACK中的簇头的时标和自己计算的理论时标是否符合,如果发现簇头节点返回给 j 号节点的ACK中所带时标 $TS_j \notin [(j-1) \times T_i, j \times T_i]$,则说明传感节点定时器相对簇头节点的定时器发生了偏移,需要依照簇头的标准时标进行校准,调整下一个周期的发送时间点为 $T_{next} = T - TS_j + (j-1) \times T_i$,重新设置工作时钟后进入休眠;否则,不予处理,直接进入休眠状态。即:

$$T_{next} = \begin{cases} T - TS_j + (j-1) \times T_i, & TS_j \notin [(j-1) \times T_i, j \times T_i) \\ TS_j + T_i, & TS_j \in [(j-1) \times T_i, j \times T_i) \end{cases} \quad (1)$$

• 簇间的分频机制

对于一级簇头组成的二级簇,同步和传输方式与一级簇相同,但在数据传输中二级簇头需要进行信道切换。例如,一级簇1采用频道CH1,一级簇2采用频道CH2,一级簇1和簇2的二级簇头采用频道CH3,则一级簇1和簇2的簇头需要在和二级簇簇头通信时切换到CH3。

SINK在各簇频道间循环切换, m 个最后一级簇头工作在 m 个不同的频道,SINK始终以 T_r 为周期循环切换这 m 个频道($T_r \ll T$)。最后一级的簇头在有数据时首先以 T_r 为周期向SINK发送“数据发送请求”,当SINK切换到与该簇头相同的频道并接收到“数据发送请求”时,就立即停止切换频道,并向簇头返回确认ACK,此后簇头和SINK进行数据传输。数据发送完毕后,SINK节点重新开始以 T_r 为周期循环切换频道。这样,SINK节点通过频道切换与各个簇头通信,从而将各个分散的簇结合成一个整体的网络。

2.2 路由和传输

在工业网络中簇头一般都是固定的,因此网络采用静态路由分配方法,簇内节点将数据转发到簇头,簇头按照固定路由表将数据进行转发。为了提高转发的可靠性,簇头可以进行1+1冗余,为每个转发提供两条传输路径,当其中一个目标簇头失效时通过备份簇头进行数据转发。传输层采用ARQ协议进行重传。

3 系统级设计

3.1 参数及分析对象

本文采用YY分析方法^[14],对系统设计的需求和参数进行划分。系统输入可以分为3个部分:应用相关输入、拓扑和环境相关输入、平台相关输入,如表1所列。

表1 系统级设计的输入参数

应用相关参数	• 周期性数据采样周期
	• 网络端到端可靠性
	• 网络端到端时延
	• 网络寿命

拓扑和环境参数	- 网络拓扑结构: 拓扑结构在本文的设计中针对的是簇状树形网络, 网络的结构与其簇的级数 C_L 有关。 - 网络规模 N - 簇内节点数 n - 单次传输成功率 p - 最大重传次数 r - 同步精度 θ - 轮转周期 T_r - TDMA 时隙大小 T_{slot}
	- 频道数量 m - CPU 工作电流 I_{active} - CPU 休眠电流 I_{sleep} - RF 发送电流 I_{tx} - RF 接收电流 I_{rx} - RF 传输波特率 ω - RF 最大缓冲区 L - 电池总能量 E
平台相关参数	

系统级分析的目标是在给定输入参数下网络的可靠性、寿命、端到端时延等指标的理论值, 反之, 在给定应用需求的可靠性、寿命等一个指标或者几个指标下, 调整网络参数以满足设计需求, 并对其他指标给出估计。

对于不同的应用系统, 系统设计考虑的目标不同, 如对于工业应用, 可靠性是系统设计的首要目标, 而对于野外环境监测应用, 低功耗是系统设计的关键, 我们可以用图 2 对系统的设计目标进行描述。图 2 表示了 3 种不同的应用在可靠性、功耗、时延和网络规模 4 个方面的设计需求。为满足给定的应用需求, 可以通过对网络的系统级分析推导出网络各种参数的取值。

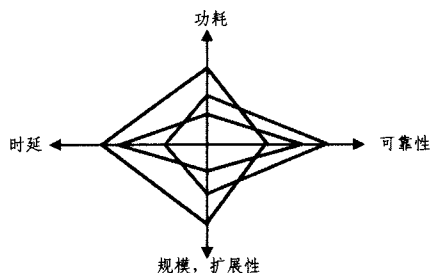


图 2 3 种不同的应用设计需求

3.2 可靠性

根据第 2 节描述的协议, 网络的级数为 C_L , 节点在不同频道上的包传输成功率为 p_i ($i=1, 2, \dots, m$)。传感节点向 SINK 的数据传输, 经过了 C_L 次的数据转发, 假设数据转发过程为马尔科夫过程。在簇内, 传感节点 S_i 的周期性数据传输采用 TDMA, 其成功传输到簇头的概率为 p_i , 如果有最多 r 次传输时隙, 则 S_i 到一级簇头的传输成功率为:

$$P = p_i(1 + (1 - p_i) + (1 - p_i)^2 + \dots + (1 - p_i)^{r-1})$$

$$= p_i \cdot \sum_{x=0}^{r-1} (1 - p_i)^x \quad (2)$$

一级簇头向二级簇头的转发采用不同的频道, 其包传输成功率为 p_j , 则 S_i 的数据被成功转发的概率为:

$$P' = p_j \cdot \sum_{x=0}^{r-1} (1 - p_j)^x \quad (3)$$

簇头转发的数据包数量 A 与簇内节点数量 n 有关, A 包数据传输成功的概率为:

$$P^{all} = (P')^A = [p_j \cdot \sum_{x=0}^{r-1} (1 - p_j)^x]^A \quad (4)$$

以此类推, 对于 C_L 级的网络, S_i 的数据被传输到最后一级簇头时的端到端可靠性为:

$$P_{s-cl} = P \cdot P' \cdot P'' \cdot \dots \cdot P^{C_L} \quad (5)$$

最后一级簇头到 SINK 的传输分为请求阶段和传输阶段, SINK 在 m 个频道上轮转, 簇头请求 n 次 ($n \geq m$), 暂不考虑 SINK 在某个频道上停止轮转接收簇头数据带来的影响, 则簇头经 m 次请求后簇头频道和 SINK 频道相同的概率为:

$$P_{ch-same} = \frac{1}{m} (1 + (1 - \frac{1}{m}) + \dots + (1 - \frac{1}{m})^{m-1}) \quad (6)$$

假设簇头请求频率为 p_k , 则簇头 n 次请求成功的概率为:

$$P_{cl-sink_req} = P_{ch-same} \cdot p_k \cdot (1 + (1 - p_k) + \dots + (1 - p_k)^{\lfloor \frac{n}{m} \rfloor}) \quad (7)$$

最后一级簇头请求成功之后, 将一包数据成功发送到 SINK 的概率为 $P_{cl-sink} = p_k \cdot \sum_{x=0}^{r-1} (1 - p_k)^x$, 其中 r 为重传次数。因此, $P_{s-sink} = P_{s-cl} \cdot P_{cl-sink_req} \cdot P_{cl-sink}$ 。定义集合 B 为所有使用频道的传输成功率, $B = [p_1, p_2, \dots, p_n]$, $n \leq m$ 。对于网络, SINK 收集到一个簇所有数据的概率为:

$$P_{s-sink}^{all} = (P_{s-cl})^A \cdot P_{cl-sink_req} \cdot (P_{cl-sink})^A = \sum_{x=0}^{m-1} (1 - \frac{1}{m})^x \cdot p_k \cdot \sum_{x=0}^{\lfloor \frac{n}{m} \rfloor} (1 - p_k)^x \cdot \prod_{n=1}^{C_L} (p \cdot \sum_{x=0}^{r-1} (1 - p)^x)^A$$

$$(p \in B, k=1, \dots, n, n \leq m) \quad (8)$$

由式(7)可以看出, 网络的可靠性与簇的级数、频道的数据传输成功率、重传次数、数据量的大小有关, 也与最后一级簇头向 SINK 的请求次数 n 以及 SINK 的轮转频道数 m 有关。频道数据传输成功率 p 与网络环境有关, 随着时间的变化, p 可能会发生变化, 因此网络管理者可以通过 p 的统计数据调整重发次数、发送功率等来提高网络可靠性。

3.3 能量有效性

能耗是网络设计关注的一个重要指标, 能耗与具体平台相关, 也与网络的拓扑、协议有关。考虑到可靠性的要求, 节点的数据最多有 r 次重传, 假设系统的可靠性要求为 P , 频道传输成功率为 p , 则节点的平均发送次数 $\alpha = \log_{(1-p)}(1 - P)$, 对于传感节点, 若传感节点的采样周期为 T_{cycle} , 则:

$$T_{cpu} = \alpha \cdot T_{w-fifo} + T_{r-fifo} + T_{p-p} + T_{s-p} \quad (9)$$

其中数据包解析的时间 T_{p-p} 和传感器数据处理时间 T_{s-p} 可以看作是基本固定的, 而读写射频模块缓冲区的时间 T_{w-fifo} , T_{r-fifo} 与数据包的长度有关, 重传时数据包的处理时间可以忽略不计, 因此, CPU 工作时间可记为: $T_{cpu} = \alpha \cdot T_{w-fifo} + T_{r-fifo} + \Delta$ 。

射频工作的时间包括发送数据包, 接收 ACK 数据包以及等待 ACK 超时, $T_{RF} = \alpha \cdot T_{tx} + T_{rx} + (\alpha - 1) \cdot T_{ack}$, 考虑最坏情况, 即 r 次重传也不能成功, 则 $T_{RF} = r \cdot T_{tx} + r \cdot T_{ack}$ 。

射频的休眠电流相比 CPU 的休眠电流一般都比较小, 通常在几百个纳安左右, 可以忽略, 因此 $T_{sleep} = T_{cycle} - T_{cpu}$, 那么传感节点一个周期的平均能量消耗为:

$$E_{node} = (\alpha \cdot T_{w-fifo} + T_{r-fifo} + \Delta) \cdot I_{cpu} + \alpha \cdot T_{tx} \cdot I_{tx} + (\alpha - 1) \cdot T_{ack} \cdot I_{rx} + T_{rx} \cdot I_{rx} + (T_{cycle} - \alpha \cdot T_{w-fifo} - T_{r-fifo} - \Delta) \cdot I_{sleep} + E_{sensor} = (\alpha \cdot \sigma L_{tx} + \sigma L_{ack} + \Delta) \cdot (I_{cpu} - I_{sleep}) + \alpha \cdot \omega L_{tx} \cdot I_{tx} + \omega L_{ack} \cdot I_{rx} + (\alpha - 1) \cdot T_{ack} \cdot I_{rx} + T_{cycle} \cdot I_{sleep} + E_{sensor} \quad (10)$$

式中, E_{sensor} 为传感器的能耗, σ 为微控制器和射频模块的 SPI 接口通信速率, ω 为射频的传输速率, L_{tx} 和 L_{rx} 分别为发送和接收数据包的长度。

对于簇头节点,若簇内有 n 个传感节点,每个传感节点的平均发送次数为 a ,由于数据丢包包括两种:1)簇头没有接收到传感节点的数据,2)传感节点没有收到簇头的 ACK,假定这两种情况概率均等(即不考虑链路的非对称性),簇头有 $a/2$ 次接收和 $a/2$ 发送,因此接收簇内节点数据的能耗为:

$$E_{intracluster} = n \cdot \alpha \cdot (T_{slot} - T_{tx}) \cdot I_{rx} + n \cdot \frac{\alpha}{2} \cdot T_{tx} \cdot I_{tx} + n \cdot \frac{\alpha}{2} \cdot (T_{w-fifo} + T_{r-fifo} + T_{p-p}) \cdot I_{cpu} \quad (11)$$

簇头对簇内节点数据进行数据融合,假定射频模块支持的最大包长为 L_{max} ,则簇头转发的数据包总数为 $A = \lceil \frac{n \cdot L_{tx}}{L_{max}} \rceil$,转发能耗计算方法与传感节点的类似。

$$E_{intercluster} = A \cdot ((\alpha \cdot \sigma L_{max} \sigma L_{ack} + T_{p-p}') \cdot (I_{cpu} - I_{sleep}) + \alpha \cdot \omega L_{max} \cdot I_{tx} + \omega L_{ack} \cdot I_{rx} + (\alpha - 1) \cdot T_{ack} \cdot I_{rx}) + (T_{cycle} - n \cdot \frac{\alpha}{2} \cdot (\sigma L_{ack} + \sigma L_{tx} + T_{p-p})) \cdot I_{sleep} \quad (12)$$

式中, T_{p-p}' 为簇头向上一级簇头转发数据时的处理时间, T_{p-p} 为簇头处理传感节点数据的时间。根据式(11)和式(12),簇头节点在一个周期的总能耗为:

$$E_{cluster-head} = E_{intracluster} + E_{intercluster} = I_{cpu} \cdot \left[\frac{n \cdot L_{tx}}{L_{max}} \cdot (\alpha \cdot \sigma \cdot L_{max} + \sigma \cdot L_{ack} + T_{p-p}') + \frac{n \cdot a \cdot \sigma}{2} \cdot (L_{tx} + L_{ack}) + T_{p-p} \right] + I_{sleep} \cdot \left[T_{cycle} - \frac{n \cdot L_{tx}}{L_{max}} \cdot (\alpha \cdot \sigma \cdot L_{max} + \sigma \cdot L_{ack} + T_{p-p}') - \frac{n \cdot a}{2} \cdot (\sigma \cdot L_{tx} + \sigma \cdot L_{ack} + T_{p-p}) \right] + I_{rx} \cdot \left[n \cdot \alpha \cdot (T_{slot} - \omega \cdot L_{ack}) + \frac{n \cdot L_{tx}}{L_{max}} \cdot (\omega \cdot L_{ack} + (\alpha - 1) \cdot T_{ack}) \right] + I_{tx} \cdot \left[\omega \cdot \alpha \cdot \left(\frac{n}{2} \cdot L_{ack} + \frac{n \cdot L_{tx}}{L_{max}} \cdot L_{max} \right) \right] \quad (13)$$

二级簇头以及更高级的簇头在一个周期内的能耗计算与一级簇头的类似,不同在于 $L_{tx} = L_{max}$, $n = A$, $A = \lceil \frac{N}{n} \rceil \cdot A$ 。

若电池电量为 $E(\text{mAh})$,传感节点采样周期 T_{cycle} 以秒为单位,各种状态下的电流以 mA 为单位,则其寿命为:

$$T = \frac{T_{cycle} \cdot E}{3600 \cdot E_{node}} \quad (\text{小时})$$

将式(10)带入上式可知,传感节点的寿命与重传次数、ACK 的等待时间成反比。同样,簇头的寿命为:

$$T = \frac{T_{cycle} \cdot E}{3600 \cdot E_{cluster-head}} \quad (\text{小时})$$

将式(13)带入上式可知,簇头节点的寿命与簇内节点的数量以及 ACK 等待时间、重传次数成反比。

3.4 时延

时延是网络系统考虑的另一个重要因素,对于簇状树形拓扑,传感节点一跳即可传输到簇头,因此传感节点到簇头的传输时延为: $D_{intracluster} = \alpha \cdot T_{slot}$,主要与重传次数有关。

簇头在收集完传感节点的数据之后对簇内节点的数据进行融合,然后进行转发,对于每个传感节点,其一级簇头的转

发时延为: $D_{sensor-i} = (n - ID) \cdot T_{slot} + \alpha \cdot A \cdot T_{slot}$,其中 ID 为传感节点的编号。

一级簇头转发传感节点数据的平均时延为:

$$\overline{D_{intracluster}} = \frac{\sum_{i=1}^n i}{n} \cdot T_{slot} + \alpha \cdot \left\lceil \frac{n \cdot L_{tx}}{L_{max}} \right\rceil \cdot T_{slot}$$

对于 C_L 级的网络,

$$\overline{D_{intracluster}} = \sum_{j=1}^{C_L} \left(\frac{\sum_{i=1}^n i}{n_j} \cdot T_{slot} + \alpha \cdot \left\lceil \frac{n \cdot L_{tx}}{L_{max}} \right\rceil \cdot T_{slot} \right)$$

式中, N_j 为每级簇中的节点数量。

对于最后一级的簇头,假定网络可靠性要求为 P ,簇头使用频道的可靠性为 p_k ,根据式(6)、式(7),簇头向 SINK 发送数据传输请求成功的平均次数为:

$$\beta = \log_{(1-p_k)} \left(1 - \frac{P}{1 - (1 - \frac{1}{m})^m} \right)$$

式中, m 为 SINK 轮转的频道总数, $\beta \geq m$ 。传感节点到 SINK 的端到端网络时延如式(14)所示。

$$D_{sensor_to_sink} = D_{intracluster} + D_{request} = \sum_{j=1}^{C_L} \left(\frac{\sum_{i=1}^n i}{n_j} \cdot T_{slot} + \alpha \cdot \left\lceil \frac{n_j \cdot L_{tx}}{L_{buffer}} \right\rceil \cdot T_{slot} \right) + \beta \cdot T_{slot} + \alpha \cdot \left\lceil \frac{n_j \cdot L_{tx}}{L_{buffer}} \right\rceil \cdot T_{slot} \quad (14)$$

为了降低端到端的时延,需要进行合理的时隙大小划分和网络级数划分。

4 应用结果

我们在冷轧连铸生产线布设了一个 2 级的簇状树形网络,网络中传感节点有 406 个,共分为 6 个簇,每个簇有一个报警用的备用簇头,拓扑结构如图 3 所示。

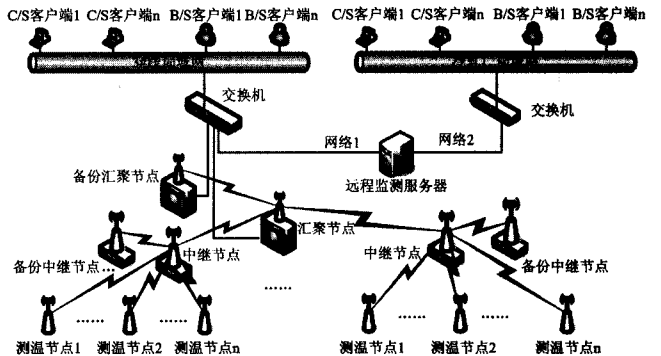


图 3 应用现场拓扑结构

传感节点周期性地采集温度信息,通过网络发送到 SINK,同时传感节点的温度报警信息也通过报警簇头发送到 SINK。网络可靠性的设计目标为 99%,迄今已运行 22 个月,部分时段传感节点的数据传输可靠性如图 4 所示,传感节点数据到 SINK 的传输成功率基本保持在 97% 以上,比设计目标偏小,原因在于工业环境中链路的数据传输可靠性 p_k 会随环境的变化发生变化。功耗的测试结构如图 5 所示,网络运行 6 个月压降小于 0.3V,随着电压的降低,节点的功耗会下降,网络运行结果符合网络寿命的理论计算。

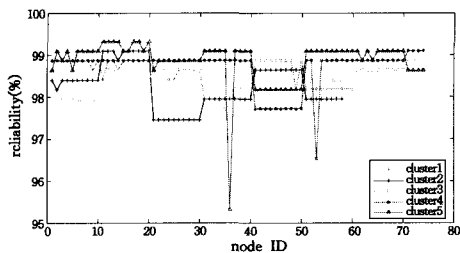


图4 链路可靠性测试结果

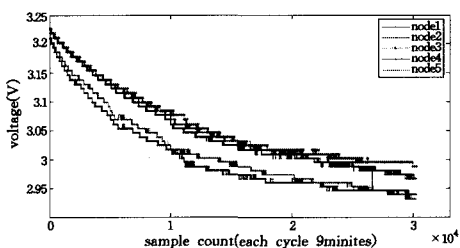


图5 电池电压检测结果

结束语 簇状树形网络是一种在无线传感器网络中常用的拓扑结构,本文通过对该种拓扑特征的分析,结合一种 TDMA 的工业无线传感器网络协议,从理论上分析了可靠性、功耗、时延等应用需求和网络协议参数,以及节点平台参数之间的关系,并通过该关系模型,实现了在一种协议和平台下经过参数调整来满足不同应用的需求,简化了网络的设计,同时也为网络部署到现场之后根据现场环境进行调整提供了理论依据。通过该方法,在工厂设计了一个 406 点的大规模监测网络,实际测试表明,该方法可以较好地预测网络的可靠性和能耗,并能对诸如重传次数、数据发送速率等网络参数的调整给出参考值,便于系统的部署和调试。

参考文献

- [1] Johnstone I, Nicholson J, Shehzad B, et al. Experiences from a Wireless Sensor Network Deployment in a Petroleum Environment[C]//Mobisys2007. 2007;382-387
- [2] Wan Yadong, Li Lei, He Jie. Anshan: Wireless Sensor Network

for Equipment Fault Diagnosis in Process Industry[C]//SECON2008. 2008

- [3] He Yulin. Multi-level Clustering Architecture for Wireless Sensor Networks [J]. Information Technology Journal, 2006 5(1): 188-191
- [4] Wan Yadong, Wang Qin, Zhang Xiaotong, et al. A Hybrid TDM-FDM MAC Protocol for Wireless Sensor Network Using Timestamp Self-Adjusting Synchronization Mechanism[C]//WICOM 2007. 2007
- [5] Stanley-Marbell P, Basten T. System Models in Wireless Sensor Networks[R]. ES Reports. Eindhoven University of Technology Department of Electrical Engineering Electronic Systems. May 2008
- [6] Bonivento A, Fischione C, Necchi L, et al. System Level Design for Clustered Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Informatics, 2007, 3(3): 202-214
- [7] 李建波, 黄刘生, 徐宏力, 等. 一种密集部署传感器网络的分簇算法[J]. 计算机研究与发展, 2008(07)
- [8] 沈波, 张世永, 钟亦平. 无线传感器网络分簇路由协议[J]. 软件学报, 2006(7): 1588-1600
- [9] 周祖德, 胡鹏, 李方敏. 无线传感器网络分簇通信协议的可靠性方案[J]. 通信学报, 2008, 29(5)
- [10] Ye W, Heidemann J, Estrin D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor network[C]//INFOCOM 2002. 2002
- [11] Polastre J, Hill J, Culler D. Versatile low power media access for wireless sensor networks[C]//SenSys2004. 2004
- [12] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks[C]//HICSS 2000. 2000
- [13] Rabaey J, Ammer J, Da Silva J L, et al. Patel PicoRadio: Ad-hoc wireless networking of ubiquitous low-energy sensor/monitor nodes[C]//IEEE Computer Society Workshop on VLSI 2000. 2000
- [14] Culler D. GENESIS: The Synthesis of a Semi-Random Protocol for Data Collection in Clustered Sensor Networks[R]. CLASS PROJECT, CS294-1. FALL, 2003

(上接第 79 页)

$$T_D = B_D * S = 0.9172$$

T_A, T_B, T_C, T_D 以量化的方式反映了 4 个网络在 1 个月中基于统计的网络质量的高低。从得出的基于统计的网络质量综合分数可知, A 网络的网络质量最好, C 网络质量次之, B 网络质量略低于 C 网络质量, D 网络质量最差。

结束语 网络质量的评估是当前网络运营管理中一个非常关注的问题。本文根据网络的运营特点, 提出了网络质量的概念, 扩展了网络性能的概念, 给出了建立网络质量指标体系的建议, 并以此为基础设计了一组网络质量评估指标体系, 并提出采用隶属度向量的概念计算指标值。在评估模型建立方面, 将模糊数学中的模糊评估方法应用于网络质量评估中, 从而建立了网络质量的模糊评估模型。最后将所建立的模糊评估算法对不同驻地 IP 网络的网络质量指标数据进行了模糊评估, 为网络质量评估提供了一种新的思路。

参考文献

- [1] ITU-T Y. 1541. Network performance objectives for IP-based

services[S]. Feb. 2006

- [2] IETF RFC4148. IP Performance Metrics(IPPM) Metrics Registry[S]. Aug. 2005
- [3] 刘怀亮, 王东, 徐国华. 一种基于流量工程的网络端到端性能分析算法[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(9): 1165-1168
- [4] 张冬艳, 胡铭曾, 张宏莉. 基于测量的网络性能评估方法研究[J]. 通信学报, 2006, 27(10): 74-79
- [5] 蒋序平. 网络性能综合评估方法 IEMONP 的设计和实现[J]. 海军工程大学学报, 2006, 18(5): 74-78
- [6] Hershey P, Runyon D, Wang Yangwei. Metrics for end-to-end monitoring and management of enterprise systems[C]//2007 IEEE Military Communication Conference. Orlando: IEEE, 2007: 1-7
- [7] 阙伟科, 张国清, 魏郑浩. IP 网络综合性能评估模型[J]. 计算机工程, 2008, 34(8): 99-101
- [8] 陈小帅. IP 网络运行质量分析与系统实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2008
- [9] 杜栋, 庞庆华, 吴炎. 现代综合评估方法与案例精选(第 2 版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008