

文章编号: 1007-2861(2010)01-0020-06

线型拓扑无线传感器网络关键技术

张雪凡

(上海大学 特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072)

摘要: 线型拓扑无线传感器网络的数据传输跳数多, 传输路由单一, 延时大, 各节点转发的信息量不均衡. 针对这些特点, 分析了传统无线传感器网络协议在线型拓扑网络中存在的问题, 提出链式快速分簇数据传输协议. 该协议采用周期性地对传感器节点进行时间基准化, 并且对数据进行逐段融合与回传. 实际数据传输测试结果表明, 链式快速分簇数据传输协议在传输延时、低功耗方面有优越的性能.

关键词: 线型拓扑; 无线传感器网; 数据融合; 时间同步

中图分类号: TN 925

文献标志码: A

Key Techniques of Wireless Sensor Networks with Linear Topology

ZHANG Xue-fan

(Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Network, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Wireless sensor networks (WSN) with linear topology have special features such as a large number of hops, unique routing, long delay, and unbalanced information transmission from the nodes. From these features, this paper analyzes the problems of normal protocols used in linear sensor networks, and proposes a fast data transmission protocol based on chain cluster. This protocol applies a reference time on the nodes periodically and transmits fused data to the sink node. Experimental results show that the proposed protocol possesses low delay and low power consumption.

Key words: linear topological structure; wireless sensor networks; data fusion; time synchronization

1 线型拓扑网特点

线型拓扑无线传感器网络, 可以应用于被测对象呈线状或带状的场所, 如河流水质监测、油气管道监测、大坝监测等.

线型拓扑网络具有如下特点:

(1) 路径单一. 普通传感器网络节点周围有多个相邻节点, 传输路径是多条的; 而线型拓扑传感器网络节点信息只能顺着唯一的直线路径依次传递.

(2) 多跳路由. 由于线型拓扑结构的单一路径, 源节点采集到的信息必定要经过其他节点的接力转发才能到达汇聚节点. 如果网络总共有 N 个节点, 那么最大跳数是 $N - 1$. 在如图 1 所示的线型拓扑网络中有 12 个传感器节点和 1 个汇聚节点, 从节点 12 到节点 0 是最大跨度的传递, 共有 12 跳, 实际系统中可能会多达几十个节点.

(3) 节点处理的信息量不均衡. 每个节点不但要采集本地的信息, 还要对邻居节点传送来的信息

进行处理和转发,所以信息量是沿着传递路线递增的,越靠近汇聚节点,需要处理的信息量就越大。

如果能量不受限制,线型拓扑无线传感器网络不存在特别难的问题。文献[1-2]是不考虑能耗的情况下比较典型的无线接力传输方案。在该情形下,信号可以随时传送,传输延时较小,也没必要为节省能量做数据融合,协议就比较简单。而在电池供电的系统中,为节省能量,传感器节点采用工作和睡眠交替。节点平时处于睡眠状态,只有当采集数据和接收转发信息时才处于工作状态,这就对线型拓扑无线传感器网络的时间同步、数据融合等提出了特殊要求。

目前,成熟的无线传感器网络 MAC 协议有很多种,其中应用比较广泛的有 IEEE802.15.4, S-MAC^[4], T-MAC^[5]。这些协议注重通用性,考虑了各种可能的应用场景,比较适合普通面型和层次型网络,但是均未充分考虑线型拓扑结构的特点,在线型拓扑结构中性能无法得到优化。

IEEE802.15.4 标准的特点是采用超帧结构,以超帧为周期组织网络内设备间的通信。每个超帧都以网络协调器发出信标帧 (beacon) 开始。信标帧中包含超帧的时间分配信息,相关的设备就可以根据其中的内容休眠或工作。但是在线型拓扑结构的网络中,由于节点线状分布及多跳的特殊性,超帧和信标帧不能有效地工作。

S-MAC 协议通过周期性的监听与休眠的工作方式来减少空闲监听所带来的能量消耗。S-MAC 的时间同步机制要求节点在相同的时刻保持同步,而多个节点的转发延时会造成数据转发停顿问题^[6],不能在线型拓扑结构中流畅地接力传输,导致较大的传输时延。T-MAC 是对 S-MAC 的改进,主要是缩短了工作时隙的时间,但也存在同样的问题。

因此,针对线型拓扑无线传感器网络的特点,可以借鉴现有协议合理的因素,制定专用的协议,以使性能更优。本研究提出了链式快速分簇数据传输协议,该协议重点解决两个关键技术,一是链式快速时间同步,二是快速分簇的数据融合。

2 链式快速时间同步

线型拓扑无线传感器网络的特点之一是路径单一,即定向路由,因此可以将节点的接收时间与发送时间进行交错排列,这样可以提高时间利用率,降低

数据传输延时;特点之二是多跳路由,节点不能直接和时间基准节点同步,而只能与和时间基准节点存在同步误差的节点进行同步,因此必将出现同步误差的累积。本研究的链式快速时间同步重点关注多节点之间的时间协调性,而不是控制绝对的时间误差,就如文献[3]提到的萤火虫同步技术。举例来讲,如图1所示,节点12和节点0之间可能存在较大的绝对时间误差,但邻居节点之间的相对时间误差较小,这类网络在类似周期性数据采集系统中具有实用价值。

2.1 时隙控制

链式快速时间同步的时隙控制如图1所示。该时隙控制有两个特点:①接收时间与发送时间进行交错排列,节点 n 的发“TX”与节点 $n-1$ 的收“RX”是对齐的,多个节点在时序上看形如楼梯,或者说收发之间犹如一条环环相扣的链,因此取名为“链式快速时间同步”;②为了避免传输中的错误和时间上的误差,接收和发射都留有双倍的时隙。从图1中可以看出:当数据传输成功时,接收端回答 ACK 后进入睡眠,发送端收到 ACK 后也进入睡眠;当数据传输失败时,发送端在规定时间内没有收到 ACK,那么在第二时隙的“TX”重新发送,接收端在第二时隙的“RX”重新接收。这种方法具有很强的抗时间抖动性和容错性。

2.2 时基同步

时间基准由汇聚节点周期性地发出,保证所有的节点以这个时间基准为参考,进行工作和休眠定时。如图2所示,从0开始到 t_4 是一个周期,一个周期包括命令下行、数据上行、休眠3个阶段。每个节点当接收到下行命令时就校正时间基准定时器,数据上行和休眠阶段的定时是以时间基准定时器为基准的。

图2中,无论是命令下行还是数据上行的时序控制,都是按照图1的时隙进行。簇1、簇2和簇3的数据是在各自相应的规定时刻开始上行传送数据的,这个起始时刻和发起节点可由下行时的命令规定。

以图2为例,4个节点为一簇,那么起始时刻分别由4,8和12号节点决定,在它们接收到下行命令后的 T 时刻开始数据融合并上传。 t_3 和 t_4 之间是休眠阶段, t_4 时刻是新周期开始,重新开始校正时间基准定时器。

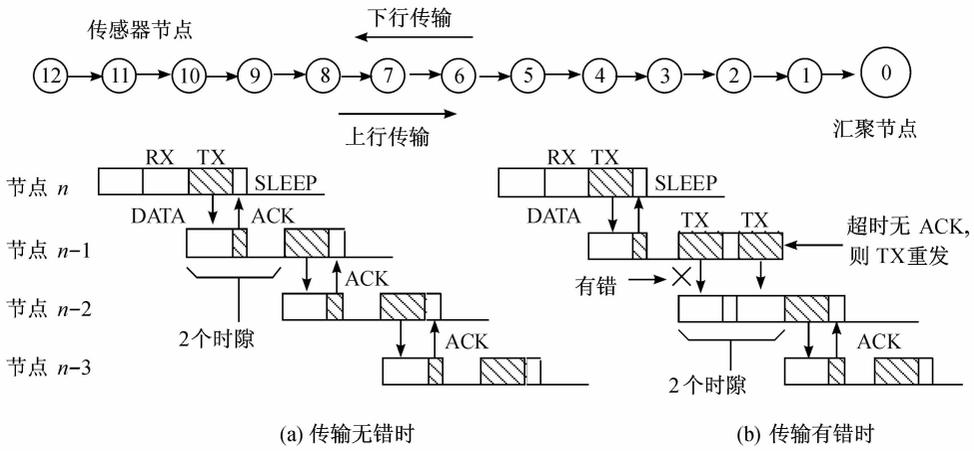


图1 链式快速分簇时间同步的时隙控制

Fig.1 Time-slot control based on fast chain cluster

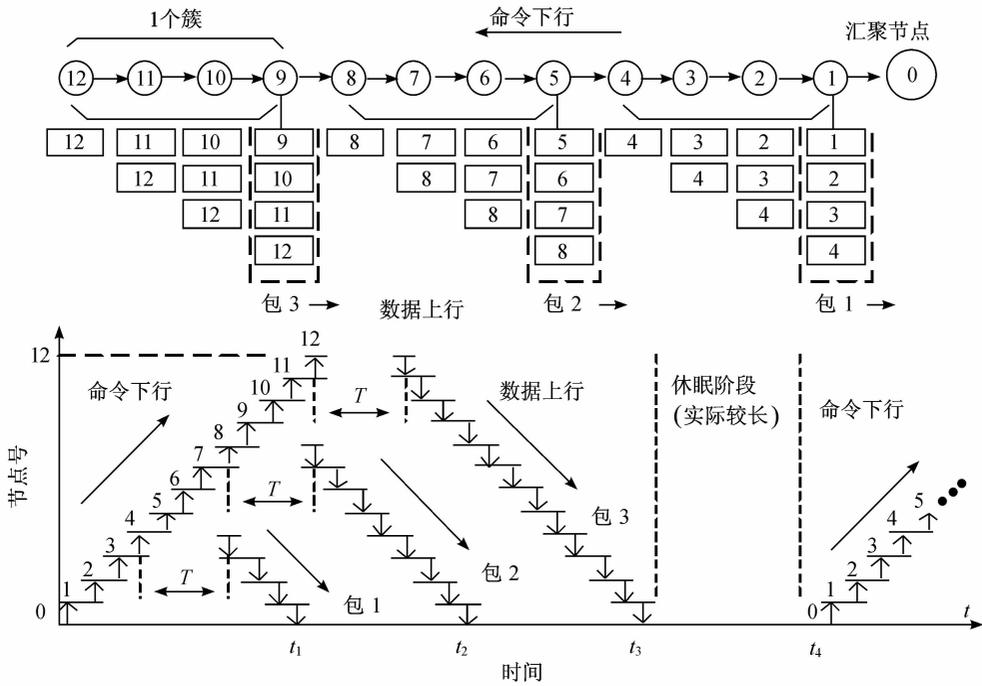


图2 时基同步与快速分簇

Fig.2 Time synchronization and fast data fusion

2.3 时间的初始同步

无线传感器在正常同步工作前也应该是低功耗的,只是在这个阶段各个节点的睡眠和苏醒时刻不在同一个节拍上,而且节点还没有一个统一的序号,因此,在线型拓扑结构网络中建立路由首先是要让节点处于一个初始的同步工作状态,并对节点进行逻辑序号的标定。

如图3所示,规定汇聚节点序号为0,节点0,A,B,C等按顺序放置,节点A离节点0最近。初始时,各节点处于周期性的交替睡眠和苏醒。在图3中,

RX表示接收侦听时隙.除RX时隙外,大部分时间是睡眠的.平均功耗与RX长短有关,RX越短平均功耗越小,而RX必须大于 T_1 ,否则可能遗漏唤醒命令.有两种常用的无线唤醒方式,一种是被呼节点收到唤醒命令立即应答,另一种是被呼节点要等到唤醒周期 T_2 全部结束后再应答.本研究采用第二种唤醒方式,目的是进一步缩短RX瞬间醒来的时间以节省能量^[8].根据图3,由汇聚节点发起的时间初始同步和逻辑序号标定过程如下:

(1) 序号为0的汇聚节点广播路由命令,其广

播的发射功率是可控的,控制在大约两跳范围,路由命令被距离最近的节点 A 和 B 接收,C 节点由于距离远无法正确接收.

(2) 节点 A 和 B 分别向汇聚节点发送应答帧,应答帧包含接收的信号强度指示 (RSSI). 为避免冲突,发送应答帧时,根据 RSSI 值的大小不同其退避延时值也不同.

(3) 汇聚节点分别收到节点 A 和 B 的应答帧,比较两个 RSSI 值的大小,判定 RSSI 值大的序号为 $N+1$. 由于节点 A 靠得更近,其 RSSI 值较大,则节点 A 的序号应为 1. 所以,汇聚节点发送编号命令给节点 A,规定节点 A 的序号为 1,同时通知节点 A 开始广播路由命令,将接力权交给 A.

(4) 节点 A 广播路由命令,路由命令被距离最近的节点 B 和 C 接收,同时也被汇聚节点接收.

(5) 节点 B 和 C 分别向节点 A 发送应答帧,应答帧包含 RSSI; 汇聚节点接收到节点 A 的广播路由命令后,知道本节点的任务已完成,不会再向 A 节点发送应答命令.

(6) 重复步骤(3),节点 A 发送编号命令给节点 B,规定节点 B 的序号为 2,同时通知节点 B 开始广播路由命令,将接力权交给 B.

重复以上步骤,直到所有的节点都完成逻辑序号的标定,这时各节点处于时间的初始同步,随时可以接收命令,为下一步时间基准同步作好准备.

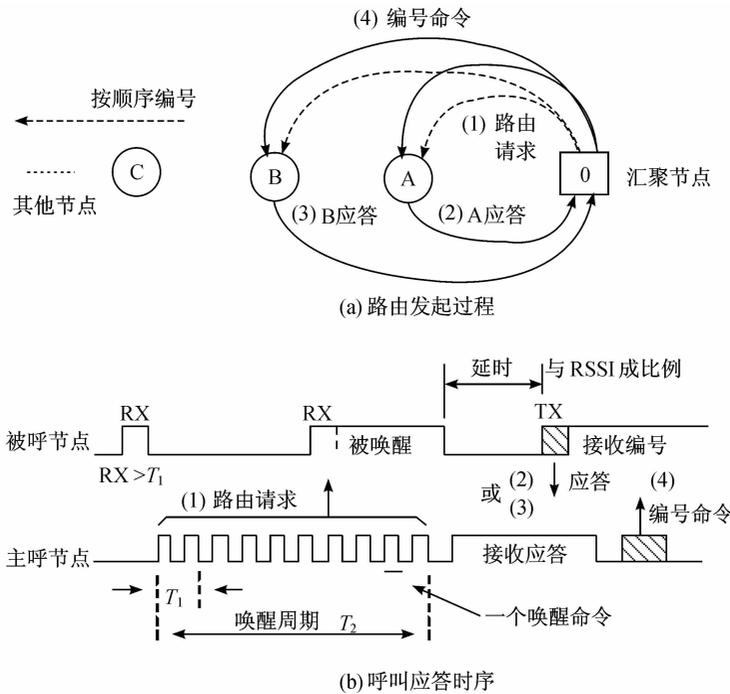


图 3 时间的初始同步

Fig. 3 Initial synchronization

3 快速分簇的数据融合

传统的网络协议需对每个信息包进行单独转发,由此造成节点转发的数据包数量线性增长,控制信息的开销很大. 一种有效的办法是利用数据汇聚技术^[7],将多个较短的数据包融合为单个较长的数据包,从而大幅度降低转发的数据包数目,降低数据控制开销. 融合后的数据包也不宜过长,否则要求节点的存储器容量大,传输中丢包率也会增加,而且长包的重传会造成延时的延时,对时间同步不利,因此必

须对包长进行控制.

常用的数据包格式如表 1 所示.

表 1 常用的数据包格式

Table 1 Data packet format

前导码	同步字	目的地址	源地址	包类型	数据长度	有效数据	校验字
2	4	2	2	1	1	N	2

显然,有效数据只是整个数据包的一部分,其余是控制信息. 如果每个传感器节点的有效数据长度 N 是固定的,那么就可以方便地将 M 个节点的数据

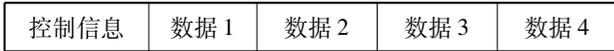
融合成一个较大的数据包,结果如下:

数据融合前为



数据融合后为

融合后的数据包



定义数据包的效率 $\eta = L_1/L_2$, 其中 L_1 为有效数据长度, L_2 为数据包总长度。

设单节点有效数据长度为 N , 融合的节点数为 M , 包的数据效率为 η , 三者之间关系如图4所示。例如, 当有效数据长度 $N = 6$ 时, 融合前的数据效率 $\eta = 0.30$, 当8个节点融合后, 融合后的数据效率 $\eta = 0.77$ 。

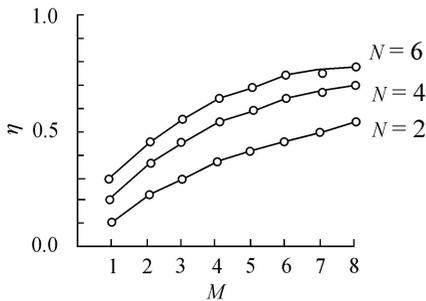


图4 数据融合的效率比较

Fig. 4 Comparing of data fusion efficiency

数据融合过程与时基同步有机地结合在一起, 如图2所示, 这种方式的特点如下:

(1) 自动分簇打包. 将整个网络中的节点进行分簇, 每个簇有 N 个节点, N 个节点的数据在簇头处融合成一个定长的数据包, 簇的定义在命令下行的过程中自动完成。

(2) 簇的并行传输. 分簇打包传输与命令下行过程并行进行. 例如, 命令下行到节点8时, 簇1就开始工作。

(3) 网络可扩展性强. 由于每个簇的节点数 N 是固定的, 所以在图2中包1和包2到达时间 t_1 和 t_2 也是固定的, 与网络节点总数无关. 如果要扩充网络节点总数, 只要增加后面的数据包, 节点在固定时间醒来, 如果超时接收不到数据就进入休眠状态。

4 协议性能测试与分析

测试环境和条件: 在36层高楼内的每个楼面各放置一个无线传感器节点, 共36个; 以60s为周期进行数据采集, 收集36个传感器数据到0号汇聚节点. 具体参数设置如表2和表3所示。

表2 物理信道参数

Table 2 Parameters setting for physical channel

物理信道参数	参数值	物理信道参数	参数值
载波频率/MHz	433.9	发射状态电流/mA	15.5
调制方式	GFSK	接收状态电流/mA	15.3
比特率/(kbits · s ⁻¹)	38.4	休眠电流/μA	20
发射功率/dbm	0	节点总数	36

表3 协议设置

Table 3 Protocol setting

协议设置	设置值	协议设置	设置值
单节点数据长度/bytes	6	下行命令长度/bytes	12
分簇的节点数	6	下行接收时隙宽度/ms	15
最大有效数据长度/bytes	64	数据采集周期/s	60
上行接收时隙宽度/ms	35		

4.1 测试结果及分析

由于每个簇的节点数为6, 所以测试共分6组进行, 主要测试传感器节点的瞬间工作时间. 通过测试一周期60s内有多少个工作时间段, 就可以得出结论, 如表4所示。

表4 测试结果

Table 4 Test results

簇号	节点号	命令下行个数	数据包上行个数	一周期内工作时间/ms	工作时间占空比/%	平均电流/μA
第1簇	1~6	1	6	225	0.375	25.8
第2簇	7~12	1	5	205	0.342	25.3
第3簇	13~18	1	4	155	0.258	24.0
第4簇	19~24	1	3	120	0.200	23.1
第5簇	25~30	1	2	85	0.142	22.2
第6簇	31~36	1	1	50	0.083	21.3

从测试结果可以看出,36个节点中耗电最多和耗电最少的节点差别很小,主要原因是工作时间占空比小,最大的一簇还不到4/1 000,20 μA 的休眠电流成为主要的耗电因素了.由此可以估算电池的寿命,以最耗电的第1簇节点来计算,如果只考虑无线部分的耗电,AA碱性电池容量为2 200 mAh,那么电池寿命为 $2\ 200 \times 10^3 / 25.8 = 85\ 271\ \text{h} = 9.7\ \text{a}$.

考虑到电池的自放电、低温特性以及电池将用完时的小电流放电特性,实际电池寿命要打折扣.如果成本允许,用温度和放电特性较好的锂电池效果将更好.

4.2 网络布局及算法复杂性分析

根据实际网络的情况,在布局上要注意以下几点:(1)簇的大小可灵活调节,在节点间距较小时,簇的节点数可以多一些,以减少簇与簇之间在上行时可能出现的无线干扰;(2)考虑可能的节点失效,节点分布要有冗余度;(3)在考虑冗余度的基础上,靠近汇聚节点的密度应更大些,因为节点越靠近汇聚节点,耗电越大.

至于算法的复杂性问题,可以用图2来分析.算法的难点是时间的同步,时间同步可以分为两个大的步骤:一是命令下行时,各个节点要按时醒来,为保证系统稳定性可以留一个苏醒时间的提前量;二是数据上行时的发起点和发起时间,发起点由命令下行时预先指定,发起时间是经过时间 T ,其余各节点以 T 为基准加各自的偏移量.每个节点在经过一次数据上行后,间隔固定时间醒一次,如果有数据则继续上传,如果超时没数据上传,则进入休眠状态.所以这个算法适合网络的扩展,因为前面的时间是固定的,如 t_1 和 t_2 ,后面有接收超时进入休眠状态做保证,因此非常灵活方便.

与S-MAC相比,链式快速分簇数据传输协议在线型拓扑网络中具有优势,因为在相对稳定的线型路由中,没有必要每次都有SYNC,RTS和CTS,S-MAC这样做的目的是为了动态地感知周边的信息,而链式快速分簇数据传输协议只是在初始建立路由或定期维护路由时,才采用这些握手信号,因此额外开销少,传输效率高.S-MAC占空比一般是10%或更低些.从表2测试结果中看出,链式快速分簇数据传输协议要更小些.

5 结束语

线型拓扑无线传感器网络适合于周期性采样的

应用场所,普通无线传感器网络协议未能充分考虑线型拓扑结构的特点,性能无法得到优化.本研究提出的链式快速分簇时间同步协议是针对线型拓扑无线传感器网络设计的,重点解决了多跳时间同步和数据融合这两个关键技术问题,因而使得整个网络具有时间同步快速可靠、数据传输延时小、节点有效工作时间短等优点,显著地延长了传感器的寿命,为线型拓扑无线传感器网络走向实用化提供了有力支持.

参考文献:

- [1] 袁冰冰,郭黎利.公交车站间的无线接力数据通信[J].应用科技,2004(12):11-13.
- [2] 黄建松,陈钟荣.高速公路气象监测数据的无线接力传输[J].微计算机信息,2008(27):117-119.
- [3] 徐朝农,徐勇军,李晓维.无线传感器网络时间同步新技术[J].计算机研究与发展,2008(1):138-145.
- [4] YE W, HEIDEMANN J, ESTRIN D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks [C]// Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies Proceedings. 2002:1567-1576.
- [5] VANDAM T, LANGENDOEN K. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks [C]// Proc of the First ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. 2003:171-180.
- [6] WANG L N, LIU K. An energy-efficient and low-latency MAC protocol for wireless sensor networks [C]// Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. 2007:90-93.
- [7] YEN H H, LIN C L. Integrated channel assignment and data aggregation routing problem in wireless sensor networks[J]. IET Communications, 2009, 3(5): 784-793.
- [8] BACHIR A, SAMPER L, BARTHEL D. Link cost and reliability of frame preamble MAC protocols [C]// Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, SECON'06, 2006 3rd Annual IEEE Communications Society on. 2006:632-638.

(编辑:赵宇)