

文章编号:1671-251X(2015)07-0078-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2015.07.018

张麦玲,赵敏.井下无线传感器网络最小跳数路由改进算法研究[J].工矿自动化,2015,41(7):78-83.

井下无线传感器网络最小跳数路由改进算法研究

张麦玲, 赵敏

(平顶山工业职业技术学院 计算机学院, 河南 平顶山 467000)

摘要:针对经典无线传感器网络最小跳数路由算法存在节点能耗高、网络生存周期较短的问题,提出了一种最小跳数路由改进算法。该改进算法在梯度场建立阶段设置节点延时计时器;在数据传输阶段综合考虑节点能耗的有效性和均衡性,依据能量代价函数,动态选择唯一中继节点,构建一条从信源节点到 Sink 节点能量代价最小的路径。仿真结果表明,该改进算法进一步降低了节点能耗,延长了网络寿命,能够满足井下无线传感器网络路由需要。

关键词:无线传感器网络;最小跳数路由;能量代价;梯度场;数据传输;Sink 节点;父节点集

中图分类号:TD655 文献标志码:A 网络出版时间:2015-07-01 11:19

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20150701.1119.018.html>

Research of improved algorithm of minimum hop count routing of underground wireless sensor networks

ZHANG Mailing, ZHAO Min

(Computer College, Pingdingshan Industrial College of Technology, Pingdingshan 467000, China)

Abstract:In view of problems of high energy consumption and short life time of classical minimum hop count routing algorithm of wireless sensor networks, an improved algorithm was proposed. The improved algorithm sets node delay timer on gradient field establishing stage, and comprehensively considers the effectiveness and balance of the energy consumption of the sensor nodes on the data transmission stage, and dynamically selects the only relay node by the energy cost function to construct the minimum energy consumption path from the source node to the Sink node. The simulation results show that the improved algorithm can further decrease energy consumption of the sensor node, prolong life time of networks, and meet demands of underground wireless sensor networks.

Key words:wireless sensor networks; minimum hop count routing; energy cost; gradient field; data transmission; Sink node; father node set

0 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)能够对井下瓦斯浓度、湿度、温度、坑壁压力等实现 24 h 监测,因其具有维护方便、成本低廉、可靠性高等优势,成为目前井下安全监测首选组网技术^[1]。但由于传感器节点依靠电池供电,能量有限,而且井下部分监测区域环境恶劣,节点电池更换困

难,所以,研究井下无线传感器网络路由算法,降低节点能耗,对提高煤矿安全监测水平有很重要的现实意义^[2-3]。

为降低能耗,减少数据分组的转发次数是一个重要的研究方向。以洪泛算法(Flooding)和定向扩散算法(Directed Diffusion, DD)^[4]为基础提出的最小跳数(Minimum Hop Count, MHC)^[5]路由算法是这一研究方向最经典的算法之一,近年来国内外

收稿日期:2015-03-02;修回日期:2015-05-21;责任编辑:张强。

基金项目:河南省高等学校青年骨干教师资助计划项目(2012GGJS-235);河南省高等学校重点科研项目(15B520023)。

作者简介:张麦玲(1981—),女,河南卫辉人,讲师,主要从事传感器网络、网络安全等方面的教学和技术研究工作,E-mail:34320667@qq.com。

学者对该算法进行了大量的研究,也给出了许多改进方法。参考文献[6]通过在梯度场建立阶段设置计时延时器来减少网络的冗余分组;参考文献[7]利用邻居节点表记录所有邻居节点,在数据传输时按优先级在同级别节点中随机挑选下一跳路由,从而减少该阶段网络冗余分组;参考文献[8]设计的R-MHC算法在转发分组时利用权值计算公式从父节点、兄弟节点表中选择唯一中继节点,减少冗余分组,并均衡网络负载。这些算法虽然减少了网络冗余分组,节约并均衡了中继节点的能耗,但均未考虑数据传输过程中传输路径上各节点的总能耗是否最小,即未考虑节点能耗的有效性,因此,有必要从节点能耗的有效性和均衡性2个方面对算法进行优化,使其适应井下特殊环境的需要。

本文针对井下无线传感器网络通常呈带状分布以及监测环境相对恶劣、电池更换困难这一特殊情况,提出了一种最小跳数路由改进算法。为兼顾节点能耗的有效性和均衡性,该算法引入了能量消耗模型,设计了新的能量代价函数,使得每个节点转发数据分组时,均能通过计算选择出能量代价最小的父节点作为中继节点,在均衡节点能耗的同时,最大限度地节约了节点能量,延长了网络寿命。

1 井下无线传感器网络体系结构

井下无线传感器网络主要由传感器节点、Sink节点构成,并通过交换机和光纤网络共同组成通信网络^[9],如图1所示。传感器节点实时对巷道内的湿度、温度、坑壁压力和瓦斯浓度等进行监测,并通过无线传感器网络把监测数据传递给Sink节点, Sink节点再通过交换机与光纤把监测数据上传到井上监控终端或监控中心。

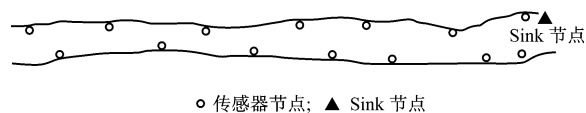


图1 井下无线传感器网络结构

显然,在井下巷道内,传感器节点将根据需要随机分布在狭长的带状区域内,但由于井下环境复杂,在某些危险区域传感器节点电池更换困难,所以,节约节点能耗、延长网络生存时间是设计井下无线传感器网络最为重要的目标之一。以追求最小能耗为目标的MHC路由算法是目前被广泛采用的路由算法,但在煤矿巷道这一特定区域内,由于算法自身的局限性,网络中会产生冗余数据,并且距离巷道口Sink节点较近的节点容易过早失效,所以,需要改

进后才能更好地满足需要。

2 最小跳数路由算法

最小跳数路由算法把整个运算过程分为梯度场建立和数据传输2个阶段。梯度场建立阶段主要是Sink节点通过发布查询分组建立起各节点到Sink节点的最小跳数梯度场;数据传输阶段利用数据传输节点到Sink节点的跳数来决定下一路由节点的选择。

2.1 梯度场建立阶段

Sink节点通过洪泛方式向WSN发送查询分组,分组中含有Sink节点的ID、HC(到Sink的最小跳数,初始值为0)等。

邻节点收到查询分组后,先把查询分组中的跳数HC加1,然后用加1后的新HC和自身HC比较。若新HC比自身HC小,则把新HC赋值给自身的HC,并把查询分组的ID和HC修改为自身的ID和新HC,然后再通过洪泛方式把修改后的查询分组转发给邻节点;若新HC比自身HC大,则直接丢弃,不作其他处理。整个处理过程结束后,建立的最小跳数梯度场如图2所示。

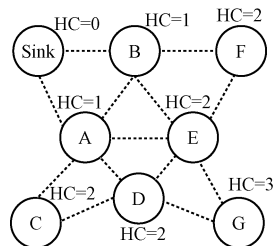


图2 最小跳数梯度场

2.2 数据传输阶段

传感器节点通过受控洪泛方式把采集到的数据向Sink节点传送。在传送过程中,只有父节点(比自身HC小于1的节点)才转发数据分组,其他节点不作处理,这样就保证了数据分组能够向Sink节点移动,如图3所示。

2.3 最小跳数路由算法分析

在最小跳数路由算法的梯度场建立阶段,当Sink节点通过洪泛方式发出查询分组信息时,正常情况下,距离Sink节点跳数相同的兄弟节点(图2中的A、B节点)将先后接收到来自Sink节点的信息并立即进行转发。但是,由于环境等因素影响,A节点可能在接收到Sink节点发出的信息前,已经收到B节点转发的查询分组信息,从而导致一些无用操作,浪费节点能量;在数据传输阶段,若数据传输节点有多个父节点,则所有的父节点均要转

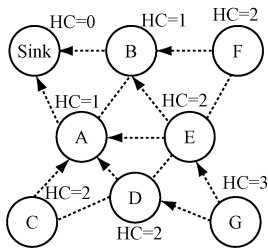


图 3 数据传输模式

发数据分组,这会产生大量的冗余分组,且算法也未考虑整个数据传输路径上节点能耗的有效性和均衡性。

3 最小跳数路由改进算法

3.1 算法能量消耗模型及定义

井下无线传感器网络在巷道内呈带状分布,网络中通常包含大量的传感器节点和一个 Sink 节点,节点的通信能耗和其他主要能耗(如数据感知和数据处理能耗)相比要大得多,因此,文中主要考虑通信能耗,并采用参考文献[10]所定义的无线通信硬件能量消耗模型。

节点发送 l bit 数据到距离为 d 的节点的位置消耗能量为

$$E_T(l, d) = lE_{\text{elec}} + l\epsilon_{\text{amp}}d^\alpha \quad (1)$$

式中: E_{elec} 为电路中发送或接收单位数据所需能耗; ϵ_{amp} 为发送放大电路单位能耗; α 为路径损失指数,自由空间模型中 $\alpha=2$,在多路衰减模型中 $\alpha=4$ 。

节点接收 l bit 数据所需能量为

$$E_R(l) = lE_{\text{elec}} \quad (2)$$

为方便描述算法,给出能量代价、父节点集和祖父节点集的定义。

能量代价(Energy Cost, EC):若节点 A 发送 l bit 数据到节点 B, A 和 B 之间的距离为 $d_{(A,B)}$,则定义能量代价为节点 A 发送数据消耗的能量与节点 A 现有能量水平的比值,即

$$E_{AB} = \frac{E_T(l, d_{(A,B)})}{E_A} \quad (3)$$

$E_T(l, d_{(A,B)})$ 表示节点 A 发送 l bit 数据到节点 B 所需的能量; E_A 表示节点 A 的剩余能量与初始能量的比值,即节点 A 现有能量水平。显然, E_{AB} 越小,节点 A 被选择作为中继节点的可能性越大。

父节点集(Father Node Set, FNS):在含有一个 Sink 节点的无线传感器网络中,对于任意不同的节点 A, B, C, 节点 A 和节点 B, C 都是联通的。设 HC_A, HC_B, HC_C 分别表示节点 A, B, C 到 Sink 节点的跳数,若 $HC_B - HC_A = 1, HC_C - HC_A = 1$,则由

节点 B, C 构成的集合 $\{B, C\}$ 是节点 A 的父节点集,表示为 $F_A = \{B, C\}$ 。父节点集如图 4 所示,若节点 F 是 Sink 节点,则 $\{B, C\}$ 是 A 的父节点集。

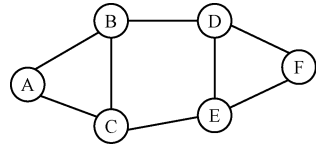


图 4 父节点集

祖父节点集(Grandfather Node Set, GNS):在含有一个 Sink 节点的无线传感器网络中,对于任意不同的节点 A, B, C, D, E, 若 $F_A = \{B, C\}, F_B \cup F_C = \{D, E\}$, 则集合 $\{D, E\}$ 为节点 A 的祖父节点集。若图 4 中节点 F 是 Sink 节点,节点 A 的父节点集是 $\{B, C\}$, B 和 C 的父节点集的并集为 $\{D, E\}$, 则 $\{D, E\}$ 是节点 A 的祖父节点集,表示为 $G_A = \{D, E\}$ 。

由以上定义可知,若节点 A 的数据通过节点 B 转发至节点 K,则总能量代价为将数据由节点 A 传输到节点 B 的能量代价与将数据由节点 B 传输到节点 K 的能量代价之和:

$$E_{A,B,K} = E_{AB} + E_{BK} = \frac{E_T(l, d_{(A,B)})}{E_A} + \frac{E_T(l, d_{(B,K)})}{E_B} \quad (4)$$

节点 B 的选择应满足如下条件:

$$E_{A,B,M} = \min(E_{A,M,N}) \quad (5)$$

$$M \in F_A, N \in G_A$$

节点 A 的下一跳路由节点 B 的选择为

$$B = \operatorname{argmin}(E_{A,M,N}) \quad (6)$$

3.2 算法设计思想

为减少最小跳数路由算法在数据传输过程中的冗余数据,减少能量消耗,并提高节点能量利用的有效性和均衡性,改进算法在梯度场建立阶段设置节点延时计时器,在数据传输阶段综合考虑节点能量消耗的有效性和均衡性,依据能量代价函数,动态选择唯一中继节点,构建一条从信源节点到 Sink 节点能量代价最小的路径,从而最大程度地延长整个网络的寿命。改进算法路由如图 5 所示。

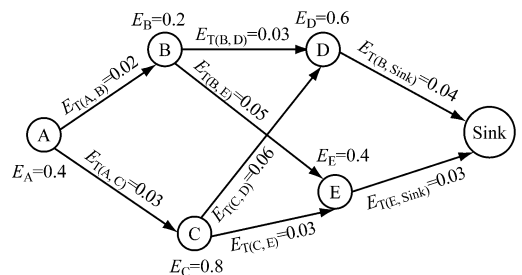


图 5 改进算法路由

节点 A 为信源节点;节点 B,C 为节点 A 的父节点;节点 D,E 为节点 A 的祖父节点。节点 A 把数据传输到祖父节点 D 或 E,可能的路径有 4 条: $A \rightarrow B \rightarrow D$; $A \rightarrow B \rightarrow E$; $A \rightarrow C \rightarrow D$; $A \rightarrow C \rightarrow E$ 。

由式(4)和图 5 可知,4 条路径总能量代价分别为

$$E_{A,B,D} = E_{AB} + E_{BD} = 0.02/0.4 + 0.03/0.2 = 0.2$$

$$E_{A,B,E} = E_{AB} + E_{BE} = 0.02/0.4 + 0.05/0.2 = 0.3$$

$$E_{A,C,D} = E_{AC} + E_{CD} = 0.03/0.4 + 0.06/0.8 = 0.15$$

$$E_{A,C,E} = E_{AC} + E_{CE} = 0.03/0.4 + 0.03/0.8 = 0.11$$

由于 $E_{A,C,E}$ 的值最小,所以节点 A 选择节点 C 作为下一跳的路由。

同理,节点 C 把数据传输到 Sink 节点,可能的路径有 2 条: $C \rightarrow D \rightarrow \text{Sink}$ 和 $C \rightarrow E \rightarrow \text{Sink}$,其路径总能量代价分别为

$$E_{C,D,\text{Sink}} = E_{CD} + E_{D,\text{Sink}} = 0.06/0.8 + 0.04/0.6 = 0.14$$

$$E_{C,E,\text{Sink}} = E_{CE} + E_{E,\text{Sink}} = 0.03/0.8 + 0.03/0.4 = 0.11$$

由于 $E_{C,E,\text{Sink}}$ 的值最小,所以节点 C 选择节点 E 作为下一跳路由,节点 E 接收到数据分组后,直接把分组转发给 Sink 节点。

通过能量代价函数构建的整个传输路径为 $A \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow \text{Sink}$,传输数据消耗的总能量为 0.09,是所有传输路径中能耗最少的,体现了改进路由选择能耗的有效性。另一条传输路径 $A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow \text{Sink}$,虽然数据传输耗能也为 0.09,但是节点 B 的能量水平为 0.2,而节点 C 的能量水平为 0.8,显然选择节点 C 作为中继节点,均衡了网络负载,体现了改进算法路由选择能耗的均衡性。

3.3 算法实现

改进算法同样将运算过程分为梯度场建立阶段和数据传输阶段。在梯度场建立之前,要对 Sink 节点和其他传感器节点进行初始化设置,设定 Sink 节点的 $HC=0$,其他节点的 HC 为无穷大,并构建其他节点的父节点集合 FNS 和祖父节点集合 GNS,集合初始值均为空。

3.3.1 梯度场建立阶段

梯度场建立过程:

(1) Sink 节点使用洪泛方法向 WSN 网络广播查询分组,分组中主要字段有节点 ID、节点 HC、节点剩余能量、节点位置信息 (x, y) 、节点的父节点集 FNS 等。

(2) 若节点首次接收到查询分组,则开启计

时器。

(3) 将查询分组中的跳数 HC 值加 1,并与自身 HC 作比较,若比自身 HC 值大,则把分组直接丢弃,不做其他操作;若比自身 HC 值小,则把新 HC 赋值给自身 HC,并将查询分组加入自身父节点集 FNS,若新 HC 值比自身 HC 小,且大于 1,则需将分组中的父节点集 FNS 也赋值给自身的祖父节点集 GNS,然后把查询分组中的 ID 和 HC 修改为自身的 ID 和新 HC。

(4) 若计时器超时,则将包含自身 HC、ID、剩余能量、FNS 的分组发布出去。

3.3.2 数据传输阶段

数据传输阶段的主要任务:数据源节点采集到数据后将数据分组通过无线传感器网络传递到 Sink 节点,利用数据缓存和 ACK 机制来确保数据传输的安全性,并动态掌握中继节点的剩余能量。整个数据传输过程主要包括 3 个步骤:

(1) 能量代价计算。节点查找自身父节点集 FNS 和祖父节点集 GNS,获取所有父节点以及祖父节点的剩余能量、位置信息,计算出节点到父节点的距离和父节点到其对应的祖父节点的距离,然后,利用式(4)计算出节点到所有祖父节点的总能量代价。

(2) 路由选择。利用式(5),从父节点集 FNS 中选择总能量代价最小的父节点作为中继节点。

(3) 数据发送。源节点将采集到的监测数据转发给总能量代价最小的中继节点,中继节点用同样的方法选择出下一跳路由节点,并将数据转发出去,然后给源节点回复含有中继节点剩余能量的 ACK 分组。若源节点收到 ACK 分组,则清空缓存中数据分组;若源节点未收到 ACK 分组,则从其余父节点中选择总能量代价最小的节点作为路由节点转发分组,直到收到 ACK 分组后,更新其父节点集 FNS 和祖父节点集 GNS,即将不返回 ACK 数据分组的父节点从父节点集 FNS 中删除,并将与该父节点对应的祖父节点也从祖父节点集 GNS 中删除。若中继节点剩余能量水平低于一特定值,如 10%,也要将该中继节点从父节点集 FNS 中删除,使该中继节点进入睡眠状态,以节省能量,延长网络寿命。

3.4 算法复杂度分析

假设无线传感器网络梯度场建立之后,HC 的最大值为 m ,节点平均有 n 个父节点,每个分组所需存储空间为 j ,每个父节点或祖父节点所需存储空间为 k ,则改进算法比 MHC 算法增加的时间复杂度和空间复杂度如下:

时间复杂度:网络中共有 $m \times n$ 个节点,由于每个节点利用能量代价函数求取能量代价最小的下一跳路由,需要做 $m \times n$ 次总能量代价计算,所以,增加的时间复杂度为 $O(mn^3)$ 。

空间复杂度:改进算法每个节点需增加 1 个分组大小的缓冲区和 n 个祖父节点的存储空间,因此,增加的空间复杂度为 $O(mn^2) + O(mn)$ 。

由于在井下带状分布的无线传感器网络中,通常每个节点的父节点不会超过 4 个,即 $n \leq 4$,所以,改进算法增加的时间和空间复杂度非常有限。

4 仿真分析

用 Matlab7.0 模拟井下巷道,对改进算法进行仿真实验。无线传感器网络节点随机分布在 $500\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的带状区域中,Sink 节点在带状区域的最前端,实验时利用式(1)和式(2)来计算节点转发和接收数据分组消耗的能量。以每次实验中第 1 个节点失效(节点能量水平低于 10%)的时间作为整个网络的生命周期,并与 MHC 算法和 R-MHC 算法进行比较,以验证改进算法的有效性。实验参数见表 1。

表 1 实验参数

参数	取值
传感器节点数量	40—200
Sink 节点坐标	(0,0)
传感器节点初始能量/J	100
$E_{\text{elec}}/(\text{nJ} \cdot \text{bit}^{-1})$	50
$\epsilon_{\text{amp}}/(\text{pJ} \cdot \text{bit}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	10
数据包大小/Byte	500
传感器节点最大通信距离/m	30

4.1 数据包平均能耗仿真结果

将传感器节点定为 100 个,且随机分布在带状区域中,改变网络的发包频率,3 种算法的数据分组平均能耗比较如图 6 所示。从图 6 可以看出,MHC 算法采用洪泛方法向 Sink 节点传递数据包,网络中冗余数据包多,数据包平均能耗最大;R-MHC 算法通过权值计算公式求取唯一中继节点,大幅减少了网络中的冗余数据包,使得平均能耗有较大幅度的下降;改进 MHC 算法综合考虑了节点能耗的有效性和均衡性,选择能量代价最小的路径进行数据包传递,数据包平均能耗最小。

4.2 网络生存周期仿真结果

将发包频率定为每秒发送 5 个数据包,改变带状区域中传感器节点的数量,同样要求传感器节点

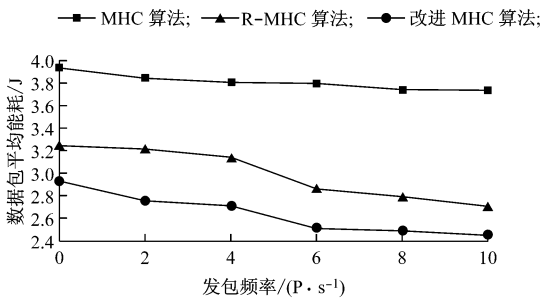


图 6 3 种算法的数据分组平均能耗比较

随机分布,3 种算法的网络生存时间比较如图 7 所示。从图 7 可看出,MHC 算法由于传感器节点转发了大量的冗余数据包,能量消耗最快,网络生存周期最短;改进后的 R-MHC 算法通过减少冗余数据包,并均衡节点能量消耗,增加了网络生存周期;改进 MHC 算法在减少冗余数据包、均衡节点能耗的同时,追求整个数据传递路径能耗的最小化,因此,进一步提高了网络生存周期。但同时也看到,随着传感器节点的增加,网络的生存周期整体上呈下降态势,这是因为随着传感器节点的增多,数据包传递的路径也在延长。

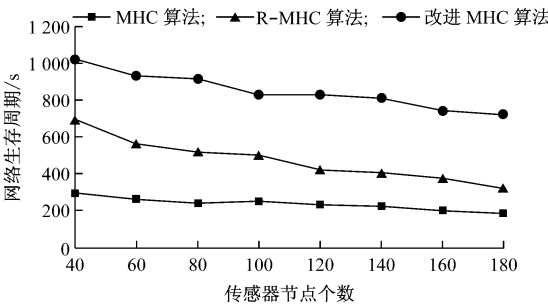


图 7 3 种算法的网络生存时间比较

5 结语

井下无线传感器网络最小跳数路由改进算法引入了能量消耗模型,兼顾了节点能耗的有效性和均衡性,并依据新的能量代价函数,通过计算选择出能够使整个传输路径总能量代价最小的父节点作为下一跳路由。仿真结果表明,改进算法能够降低传感器节点的能耗,延长网络寿命,更好地满足井下组网需要,对于提升井下安全管理和监测水平具有一定的意义。

参考文献:

[1] 薛霞,孙勇. 监测煤矿的一种无线传感器网络节点定位算法[J]. 传感器与微系统,2010,29(9):119-123.
[2] 乔钢柱,曾建潮. 信标节点链式部署的井下无线传感器网络定位算法[J]. 煤炭学报,2010,35(7):1229-1234.

- [3] 刘鹏,吕振,胡冰.用于井下瓦斯监测的无线传感器网络系统[J].工矿自动化,2009,35(3):8-10.
- [4] INTANAGONWIWAT C,GOVINDAN R,ESTRIN D, *et al.* Directed diffusion for wireless sensor networking [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking,2003,11(1):2-16.
- [5] HAN K H,KO Y B,KIM J H. A novel gradient approach for efficient data dissemination in wireless sensor networks [J]. Vehicular Technology, 2004, 60(4):2979-2983.
- [6] VERBIST F,FESTJENS N,STEENHAUT K,*et al.* Hop count discovery protocol for gradient based routing in wireless sensor networks [C]// Communications and Electronics,2006:102-105.
- [7] CHANG S S,HUANG C H,CHANG K C. A minimum hop routing protocol for home security systems using wireless sensor networks[J]. Consumer Electronics,2007,53(4):1483-1489.
- [8] 陈志泊,徐孝成.一种改进的基于跳数的无线传感器网络路由算法[J].计算机科学,2013,40(4):83-85.
- [9] 魏宁,尹洪胜,刘秀荣,等.基于无线传感器网络的煤矿瓦斯监测系统的设计[J].工矿自动化,2010,36(1):70-73.
- [10] HEINZELMAN W R. Application-specific protocol architectures for wireless networks[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology,2000.