

基于有效传输的能量敏感的路由协议^{*})

袁林锋 程文青 杜旭

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉 430074)

摘要 能量敏感是传感器网络设计中的一个基本要求,现有的基于位置的路由协议都没有考虑下一跳节点与源节点的距离,使得传输效率不高。本文通过引入有效传输(ET)概念保证每个前向节点比其前驱节点不仅更加靠近目标节点,而且更加远离源节点,提出一种基于 ET 的能量敏感的路由协议。仿真结果表明这种路由协议与其它一些协议比较起来,可以提供较低的能量消耗。

关键词 传感器网络,路由协议,能量敏感,有效传输

An Energy-aware Routing Protocol Based on Effective Transmission

YUAN Lin-Feng CHENG Wen-Qing DU Xu

(Dept. of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract Energy awareness is a basic requirement in the design of sensor networks. The existed position-based routing protocols have not considered whether the forwarding candidate is more farther from the source node with respect to its sender, which will give less efficiency. This paper introduces a novel concept of Effective Transmission (ET) that ensures each forwarding node is not only nearer to the destination node, but also farther from the source node with respect to its sender. An energy-aware routing protocol based on ET is proposed. The simulation results show the routing protocol is effective on the performance of energy consumption when compared with some other routing protocols.

Keywords Sensor network, Routing protocol, Energy awareness, Effective transmission

1 引言

传感器网络综合了传感器技术、嵌入式计算机技术、通信技术、电源技术等多项技术,可以应用于军事、环境、医疗、家庭以及商务等多个领域,传感器网络技术被认为是 21 世纪重要技术之一,在未来的生活中将发挥重要作用^[1]。传感器节点一般只能配置有限的能源($<0.5\text{Ah}$)^[1],能量敏感是所有传感器网络协议设计中的一个基本要求。

Ad hoc 网络设计中提出了很多路由协议,但由于它与传感器网络存在着诸多不同之处^[1],因此并不能把这些路由协议直接移植到传感器网络设计中来。同时,基于位置的设计方法是路由协议设计中的一个重要手段,一些典型的基于位置的无线网络路由协议(SPEED^[2]、MFR^[3]、GRS^[4]、COMPASS^[5])也都没有考虑节能问题,而且它们在路由选择过程中,只要求候选节点比其前驱节点更加靠近目标节点,而不管该候选节点是否更加远离源节点。

本文通过引入一种新颖的基于位置的有效传输(Effective Transmission, ET)概念保证每个前向节点比其前驱节点不仅更加靠近目标节点,而且更加远离源节点,提出一种能量敏感的传感器网络路由协议,能够有效地缩小候选节点选择范围,并进而达到节能的目的。

2 有效传输模型

路由协议设计中,传输路径查找的关键是如何找到每个节点的下一跳节点。基于位置的协议中有多种方法用来选择下一跳候选节点,但是它们仅仅考虑是否比发送节点更加靠近目标节点,并没有考虑是否更加远离源节点。本文同时考

虑这两个距离,这就是有效传输模型。

2.1 有效传输概念

假定每个节点的传输半径为 R ,节点 A 到节点 B 的距离为 $d(AB)$,给出如下一些定义:

定义 1 节点 V_i 的邻居定义为 $N(V_i) = \{K_j | d(V_i, K_j) \leq R\}$ 。

定义 2 有效传输(Effective Transmission, ET)确保每一个传输节点与目标节点的距离比其前驱节点与目标节点的距离更小,同时确保该传输节点与源节点的距离比其前驱节点与源节点的距离更大。

定义 3 节点 V_i 的前向候选节点集(Forwarding Candidate Set, FCS)由 V_i 邻居中遵循 ET 原则的节点组成。

给定源节点 S 和目标节点 D ,则 V_i 的 FCS 为

$$FCS(V_i) = \{K_j | d(K_j, S) > d(V_i, S), d(K_j, D) < d(V_i, D), K_j \in N(V_i)\} \quad (1)$$

如图 1 所示,弧线 $FAQG$ 以源节点 S 为中心,弧线 $HPAK$ 以目标节点 D 为中心,节点 H, C, G 在以 A 为中心、 R 为半径的圆周上,三段弧线 APH 、 HCG 和 GQA 围成的部分(图中阴影部分)构成节点 A 的 FCS 区域。

一些基于位置的路由算法仅仅要求前向节点距离目标节点更近,图 1 中,由于 $d(BD) < d(AD)$ 和 $d(ED) < d(AD)$,在这些算法中,节点 B 和 E 都可以是节点 A 的前向候选节点。但是 $d(ES) < d(AS)$,所以 E 作为候选节点并不十分有效,而 $d(BS) > d(AS)$,所以节点 B 可以带来有效传输。基于位置信息的路由选择算法必须保证所选择的路径是无环的,因此给出如下定理:

^{*}) 基金项目:国家自然科学基金(60572049)和湖北省自然科学基金(2005ABA264)。袁林锋 博士,研究方向为无线网络协议设计;程文青 教授,研究方向为无线网络协议设计技术和嵌入式系统;杜旭 副教授,博士,研究方向为高速 IP 路由技术和网络缓存。

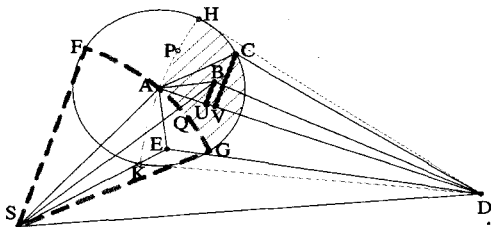


图1 ET模型

定理1 如果路由上所有节点都满足ET条件,则路由是无环路径。

证明: 如果路由不是无环路径,就意味着必然存在一个节点 V_i , 其下一跳节点是它的祖先中的一个节点, 记 V_i 。按照ET条件, 有

$$d(SV_i) < d(SV_{i+1}) < \dots < d(SV_{j-1}) < d(SV_j) \quad (2)$$

同时, 因为 V_i 是 V_j 的下一跳节点, 有

$$d(SV_j) < d(SV_i) \quad (3)$$

公式(2)和(3)矛盾, 因此不存在这样的节点, 其下一跳节点是它祖先节点之一, 定理成立。

2.2 基于能量消耗的前向候选节点模型

基于能量消耗的前向候选节点选取需要两个步骤, 第一个步骤决定FCS, 即决定能够保证ET条件的所有候选节点的集合。第二个步骤是在FCS中决定最优候选节点。根据文[6], 传感器网络能量消耗公式如下所示:

$$E_{Rx}(l) = E_{Rx-elec}(l) = lE_{dec} \quad (4)$$

$$E_{Tx}(l, d) = E_{Tx-elec}(l) + E_{Tx-amp}(l, d) = \begin{cases} lE_{dec} + l\epsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \\ lE_{dec} + l\epsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (5)$$

这里, E_{dec} 是电路能量消耗, $\epsilon_{fs}d^2$ 是自由空间模式下的能量消耗, $\epsilon_{mp}d^4$ 是多径衰落模式下的能量消耗, l 是数据长度(bit), d 是传输距离(米), d_0 是距离门限值(米)。在分布密度较高的网络中(即 $d < d_0$), 发送的能量消耗使用 $\epsilon_{fs}d^2$ 。对于路径上的中间节点, 它既需要接收数据, 也需要发送数据, 因此, 其能量消耗为

$$E(l) = E_{Rx}(l) + E_{Tx}(l, d) = 2lE_{dec} + l\epsilon_{fs}d^2 \quad (6)$$

基于位置的传感器网络路由协议中, 无论是利用角度信息还是利用距离信息, 其目的都是为了节省能量。给定一个发送节点A, 假设它有两个候选节点B和C, 我们比较数据通过每个节点中继所需要消耗的能量。

如果数据通过节点B传输, 节点A发送数据到节点B耗费的能量为

$$E_{B1}(l) = E_{Tx}(l, d(AB)) = lE_{dec} + l\epsilon_{fs}d^2(AB) \quad (7)$$

节点B接收数据耗费的能量为

$$E_{B2}(l) = E_{Rx}(l) = lE_{dec} \quad (8)$$

从节点B到目标节点D发送数据耗费的能量为

$$E_{B3}(l) = E_{Tx}(l, d(BD)) = lE_{dec} + l\epsilon_{fs}d^2(BD) \quad (9)$$

因此如果数据通过节点B中继, 耗费的总能量为

$$E_B(l) = E_{B1}(l) + E_{B2}(l) + E_{B3}(l) = 3lE_{dec} + l\epsilon_{fs}(d^2(AB) + d^2(BD)) \quad (10)$$

同样地, 如果数据通过C中继, 耗费的总能量为

$$E_C(l) = 3lE_{dec} + l\epsilon_{fs}(d^2(AC) + d^2(CD)) \quad (11)$$

因此, 通过两个不同节点中继耗费的总能量的差别在于 $(d^2(AB) + d^2(BD))$ 和 $(d^2(AC) + d^2(CD))$ 。记决定性能量因子(Decisive Energy Factor, DEF)为

$$DE_A(B) = d^2(AB) + d^2(BD) \quad (12)$$

$$DE_A(C) = d^2(AC) + d^2(CD) \quad (13)$$

如果通过节点B传输耗费的总能量小于通过节点C传输耗费的总能量, 则节点B比节点C更合适作为前向节点。此时,

$$E_B(l) < E_C(l) \quad (14)$$

从公式(10)、(11)和(12)、(13)得到, 公式(14)即意味着

$$DE_A(B) < DE_A(C) \quad (15)$$

因此对于一个特定长度的数据包, 能量消耗决定于决定性能量因子(DEF)。从能量消耗的角度来看, 发送节点可以通过比较FCS中每个节点的DEF, 选择具有最小DEF的节点作为最优候选节点。

很多基于位置的路由协议并不能保证传输路径最小的能量消耗。在SPEED和GRS中, 发送节点选择距离目标节点最近的邻居作为前向节点, MFR要求数据沿着progress最大的邻居节点转发。在图1中, 发送节点A有两个候选节点B和C, 设 $d(CD)=7, d(BD)=8, d(AC)=5, d(AB)=3, BU \perp AD, CV \perp AD$ 。在SPEED和GRS中, 由于 $d(CD) < d(BD)$, 所以节点C相比较节点B而言是一个更好的前向节点; 在MFR中, 由于 $d(AV) > d(AU)$, 所以节点C相比较节点B而言也是一个更好的前向节点。但从能量消耗公式可以得到

$$DE_A(C) = d^2(AC) + d^2(CD) > d^2(AB) + d^2(BD) = DE_A(B) \quad (16)$$

公式(16)表明数据通过节点C传输所需耗费的总能量大于通过节点B所需耗费的总能量, 所以节点B比节点C更适合作为下一跳节点。在COMPASS路由协议中, 它选择的候选节点保证其与发送节点的角度最靠近发送节点到目标节点的方向, 它常常导致从源节点到目标节点需要比其它协议中继更多的跳数, 因此也不能保证有效的能量消耗。

3 协议描述

3.1 候选节点选择

每个发送节点比较FCS(V_i)中每个成员的决定性能量因子(DEF), 并选择具有最小数值的节点作为最优的下一跳节点。

如果发送节点已经发出了寻路请求, 在经过一定时间之后还没有收到回复消息, 则表明没有找到满足ET限制的候选节点。这时协议自动采用一种自适应选择调整策略, 该发送节点以一个宽松的条件重启寻找下一跳的请求, 只需前向候选节点比该发送节点更加靠近目标节点即可。发送节点在收到前向候选节点的回复之后, 比较每个前向候选节点的DEF, 并指示具有最小DEF的节点作为下一跳节点。

3.2 协议流程

协议工作过程如下: 系统进入稳定状态之后, 发送节点 V_i (第一个发送节点是源节点S) 向邻居广播寻路请求以及自己的坐标值, 每个邻居节点 K_j 根据 $d(SK_j)$ 和 $d(SV_i)$ 、 $d(K_jD)$ 和 $d(V_iD)$ 的比较结果决定是否向发送节点 V_i 回复消息。如果存在 $d(SK_j) > d(SV_i)$ 、 $d(V_iD) < d(V_iD)$, 则该节点计算DEF并把结果反馈给发送节点 V_i 。

收到候选节点回复的消息之后, 发送节点比较每个DEF, 并通知具有最小函数值的节点为下一跳节点。如果发送节点在一定时间之后没有收到回复, 它重启另外一个选路请求, 只要求候选节点比自己更加靠近目标节点即可, 并重新等待候选节点的回复。

一直重复这个选路过程直到 sink 节点成为其中一个节点的前向候选节点,然后 sink 把路由建立的消息沿着路径反向发送给源节点。源节点在收到成功选路的信息之后就可以开始传送传感数据了。图 2 显示了路由协议实现的流程。

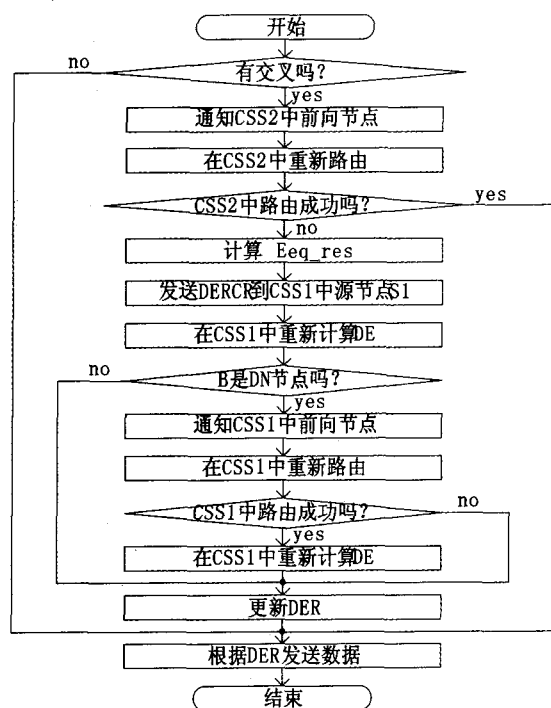


图 2 协议实现流程

4 仿真结果与分析

本节利用 ns-2 仿真工具评估本文提出的路由协议的性能。基本的参数设置如下:传感区域为 200×200 米²,每个节点的传输半径均为 30 米,初始能量为 2J,能量消耗模型使用仿真器的缺省方式,仿真持续 30 秒,每个数据包之间的时间间隔为 1 秒。记本文提出的路由协议为 ET 协议,通过比较 ET 与 SPEED、MFR、GRS、COMPASS 来评估 ET 以下性能:传输过程中的能量消耗、连通成功率。

4.1 能量消耗

节能是传感器网络设计中的基本要求,如果一种新的路由协议不能节能,那么不管它能够带来多大的好处,也没有任何意义。

仿真过程中,每隔 4 秒记录一次路由上所有节点消耗能量的总和,得到图 3 的仿真结果。可以看到,在相同的时刻,ET 协议的能量消耗都是最小的,COMPASS 协议的能量消耗是最大的。由于 COMPASS 协议要求候选节点与发送节点的角度最靠近发送节点到目标节点的方向,往往需要中继较多的跳数,因此传输数据时能量消耗较多。图示还可以看到 SPEED 协议比 ET 协议也会耗费更多的能量,这也解释了 SPEED 协议同 ET 协议比较起来,有时是以能量消耗的代价获取更高的传输速率。

为了从统计意义上更加清楚地说明能量消耗,在上述参数设置基础上,随机产生 30 个不同的网络拓扑结构,计算在每种拓扑下每种协议在 30 秒时刻路由上所有节点消耗能量的总和,然后对 30 个不同的总和求平均值,得到如图 4 所示的柱状图。图中清楚表明在所有协议中,ET 协议平均能量消耗最少,COMPASS 协议平均能量消耗最多,SPEED 协议

能量消耗稍高于 GRS 协议和 MFR 协议。正是由于 ET 协议在选路过程中考虑了能量的因素,而其余几种协议都没有把能量因素加以明显的考虑,所以在考察能量消耗时,ET 协议是一种更加有效的传输方式。

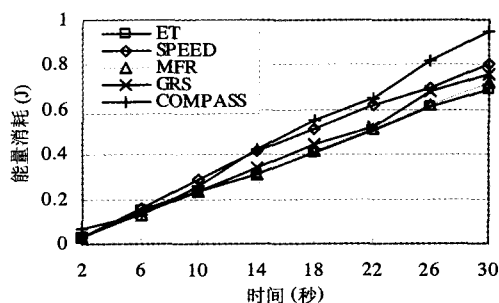


图 3 传输过程中的能量消耗

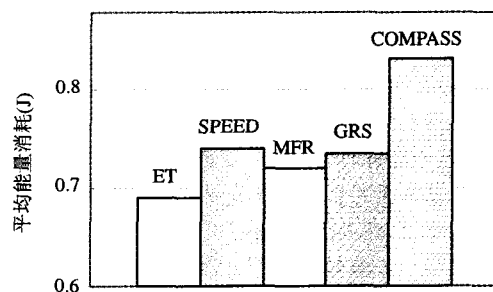


图 4 不同拓扑结构中的平均能量消耗

4.2 连通成功率

ET 模型减小了候选节点区域,使得找到满足条件的候选节点的难度增加。但是由于传感器网络中的节点通常密集分布,本文将通过仿真证明这种影响是比较有限的。通过改变传感区域内节点数目的多少来评估每种路由协议中源节点可以顺利找到满足条件的传输路由的概率,当节点数目一定时,测试每种协议在 50 种不同拓扑下可以成功选路的次数。图 5 显示了仿真结果。

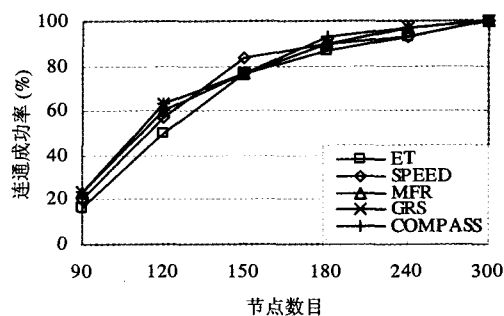


图 5 不同节点数目时的连通成功率

图示表明不同协议的连通成功率差别不是很大。当节点数小于 150 时,ET 连通成功率比其它协议稍小,这是因为 ET 协议中的候选节点区域比其它协议的候选节点区域都要小,但在密集分布的网络中,ET 可以获得与其它协议基本相同的连通成功率,如图中节点数目大于 150 时所示。也正是由于候选节点区域比较有限的原因才使得 ET 协议在选路过程中更加精确和更加有效。

结论 为了解决路径查找过程中的能量消耗问题,本文

(下转第 55 页)

时间后,网络又进入了另一次的类准备阶段,新一轮类头节点竞争活动再次开始。

LEACH 协议针对同类传感器采集的数据具有高关联度(或高相似性)时,表现性能较好,但是,许多应用不具备这样的特点。如在医疗监控应用上,人体不同部位部署不同的传感器,用于监控人体的各种主要信号(诸如心跳、血压等),这些传感器采集的数据不再具有相似性。这说明 LEACH 协议存在应用局限性,为满足多传感器接口的应用需要,必须设计新的路由协议。

(2) TEEN 算法

依照应用模式的不同,通常可以简单地将无线自组网分为主动和响应两种类型。主动型传感器网络持续监测周围的物理现象,并以恒定速率发送监测数据;而响应型传感器网络只是在被观测变量发生突变时才传送数据。相比之下,响应型传感器网络更适合应用在敏感时间的应用中。TEEN 和 LEACH 的实现机制非常相似,只是前者是响应型的,而后者属于主动型传感器网络。在 TEEN 中定义了硬、软两个门限值,以确定是否需要发送监测数据。当监测数据第一次超过设定的硬门限值时,节点用它作为新的硬门限值,并在接着到来的时隙内发送它。在接下来的过程中,如果监测数据的变化幅度大于软门限值界定的范围,则节点传送最新采集的数据,并将它设定为新的硬门限值。通过调节软门限值的大小,可以在监测精度和系统能耗之间取得合理的平衡。NS2 平台上的仿真研究结果表明:TEEN 比 LEACH 更有效。

(3) PEGASIS 算法

PEGASIS 由 LEACH 发展而来。它假定组成网络的传感器节点是同构且静止的。节点发送能量递减的测试信号,通过检测应答来确定离自己最近的相邻节点。通过这种方式,网络中的所有节点能够了解彼此的位置关系,进而每个节点依据自己的位置选择所属的聚类,聚类的首领参照位置关系优化出到目的节点的最佳链路。因为 PEGASIS 中每个节点都以最小功率发送数据分组,并有条件完成必要的数据融合,减小业务流量,所以,整个网络的功耗较小。研究结果表明,PEGASIS 支持的传感器网络的生命周期是 LEACH 的近两倍。PEGASIS 协议的不足之处在于节点维护位置信息(相当于传统网络中的拓扑信息)需要额外的资源。

(4) 多层聚类算法

多层聚类算法是 Estrin 为传感器网络设计的一种新的聚类实现机制。工作在网络中的传感器节点处于不同的层,所处层次越高,所覆盖面积越大。起初,所有节点均在最低层,通过竞争获得提升高层的机会。新的工作周期开始时,每一个节点都广播自己的状态信息,包括储备能量、所在层次和首领的 ID(如果有)等,然后进入等待状态以便相互了解信息,等待时间

与所在层次成正比。处在最低层的节点如果没有首领,等待状态结束后,立刻启动一个“晋升定时器”,定时时间与自身能量以及接收到同层其他节点广播消息的数目成反比,目的是为能量较高且在密集区的节点获得较多的提升机会。一旦定时时间到,节点升入高层,将有发给自己广播消息的节点视为潜在的子节点,并广播自己新的状态信息,低层节点选择响应这些准首领的广播消息,最终确定惟一的通信关系。选择了首领的节点,自己的“晋升定时器”将停止工作,也就意味着本轮放弃了晋升机会。在每一个工作周期结束以后,高层节点将视自己的状态信息(如有无子节点,功率是否充足)决定是否让出首领位置。上述的多层聚类算法具有递归性,Estrin 等人用两层模型验证了它在传感器网络中的有效性。

结论 无线感知网的路由协议是一个非常活跃的研究领域,在这方面国外学者提出了很多的解决方案。大致可以分为两类:平面路由协议和分层的路由协议。平面路由协议需要维持路由表,在大规模网络中,这样的路由表维持需要消耗大量的存储空间,同时发送信息中所包含的路由信息也会引起通信负担的加重。采用分层的网络可能在一定程度上缓解这个问题,但是,分层网络中类头节点是瓶颈,如果类内节点数量众多,类头节点的电池很快就会耗尽,导致网络需要重新组织。

本文首先对无线感知网的网络结构进行了研究,提出了由这种特殊的网络结构决定的相应路由协议的特点。通过与无线自组网的比较,总结了无线感知网路由协议设计应当重点考虑的因素。接着,对现存几种主要的路由协议进行了较为详细的介绍,最后对其中几种最为普遍的协议进行了比较研究。研究结果表明,尽管已经有几种现存路由算法在设计上充分考虑节点能量有限性的特点,注重了能量使用效率问题,属于能效高的路由协议,但是针对具体的问题,还需要依据不同的侧重点进行相应的调整。因此,对无线感知网路由协议的进一步研究是非常必要的。

参考文献

- 1 Nasipuri A, Das S R. On demand Multipath Routing for Mobile Ad Hoc Networks. In: Proc. of the 8th International Conference on Computer Communications and Networks (IC3N), Boston, 1999
- 2 Karp B, Kung H T. GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In: Proc. MOBICOM, August 2000. 243~254
- 3 Krishnamachari B, et al. Modeling Data-Centric Routing in Wireless sensor networks
- 4 Jones C E, et al. A Survey of energy efficient network protocols for wireless networks
- 5 Intanagonwivat C, Govindan R, Estrin D. Directed Diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In: Proc. ACM MOBICOMM, Boston, MA, 2000

(上接第 48 页)

提出了一种能量敏感的传感器路由协议,通过 ET 概念的引入确定前向候选节点,仿真结果表明这种协议与其它协议相比较,在获得高连通率的前提下还可以获得较低的能量消耗。

参考文献

- 1 Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless Sensor Networks: a Survey [J]. Computer Networks, 2002, 38: 393~422
- 2 He Tian, Stankovic J A, Lu Chenyang, et al. SPEED: a Stateless Protocol for Real-time Communication in Sensor Networks [C].

In: Proceedings of the 23rd International Conference on Distributed Computing Systems, May 2003. 46~55

- 3 Takagi H, Kleinrock L. Optimal Transmission Ranges for Randomly Distributed Packet Radio Terminals [J]. IEEE Transactions on Communications, 1984, 32(3): 246~257
- 4 Finn G G. Routing and Addressing Problem in Large Metropolitan-scale Internetworks [R]. ISI res. Rep ISU/RF-87-180, Mar 1987
- 5 Kranakis E, Singh H, Urrutia J. Compass Routing on Geometric Networks [C]. In: Proceedings of the 11th Canadian Conference on Computational Geometry, Vancouver, Canada, August 1999
- 6 Heinzelman W B, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An Application-specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, Oct 2002, 1(4): 660~670