

基于决定性能量比例的多径传输技术

袁林锋 杜旭 杨宗凯

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉 430074)

摘要 多径传输有两种模式:一种是主/备模式,只有在主路径失效之后,其它路径才可以传输数据;另一种是复制模式,数据同时从所有的路径传输。在传感器网络中,这两种模式都没有很好地结合能量节约和负载均衡。本文提出了一种传感器网络中能量敏感负载均衡的多径传输策略,数据基于决定性能量比例(DER)从源到目标沿着多径传输。这种技术不必定期计算 DER,容易实现而且开销较小。本文还提出带有过载避免机制的 DER 技术(DEROA),用来减少某些关键节点的过多通信量。仿真结果证明,DER 可以达到有效传输的目的。

关键词 传感器网络,多径传输,负载均衡,决定性能量比例

Multipath Delivery Scheme Based on Decisive Energy Ratio

YUAN Lin-Feng DU Xu YANG Zong-Kai

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

Abstract Two multipath schemes are put forward. One is primary/backup mode, which only in the case of primary path is not available and the other path can take the charge of transmitting. The other is replication mode, which the packets are sent along all the multiple routes simultaneously. Both the schemes have not efficiently combined load balancing and energy awareness in sensor networks. This paper proposes an energy-aware load-balancing delivery scheme in sensor networks. The data flow can be transmitted from the source node to the destination node along the multiple paths according to their Decisive Energy Ratio (DER), which is the proportion of the minimum equivalent residual energy of each path to the sum of the minimum equivalent residual energy on all the paths. This scheme needs not to calculate the DERs periodically, so it is easy to be implemented and brings fewer overheads. Also, DER with Overload Avoidance (DEROA) is proposed to avoid heavy traffic on some critical nodes. The simulations demonstrate how well DER will achieve the delivery efficiency.

Keywords Sensor network, Multipath, Load balancing, Decisive energy ratio

1 引言

传感器网络技术被认为是 21 世纪重要技术之一,它在未来的生活中将发挥重要作用^[1]。近来,传感器网络研究得到了越来越多的重视。无线传感器节点一般只能配置有限的能源($<0.5\text{Ah}$, 1.2V)^[2]。如果一个节点能量耗尽,网络中必然有一个盲点,从而导致系统分裂。因此能量敏感是传感器网络设计中的一个重要议题。通过负载均衡可以平衡节点间的能量消耗,而多径路由传输是提供负载均衡的一种有效途径。

现有的多径传输有两种模式:一种是主/备模式,数据随机地沿着一条路径传输(SRF, Selective Random Forwarding)^[3~5],或者沿着一条根据某种度量事先已经定义好的路径传输(SPF, Selective Preferential Forwarding)^[6~8]。主/备模式中,只有在主路径失效之后,备份路径才可以承担传输任务。它限制了备份路径的潜能,而且会很快消耗完主路径的能量。

另一种多径传输技术是复制模式,源节点复制数据并同时沿着所有的路径进行传输,以提高冗余性^[9,10]。它要求所有路径全部参与传输任务,所有路径都同时消耗了能量。由于传感器网络中能量资源匮乏,这两种多径传输策略都没有有效地把负载均衡和能量节约结合起来。

本文基于每条路径的能量消耗提出一种负载均衡策略。本文重点不是多径发现过程,而是怎样沿着多径有效传输数据的问题。数据的传输基于决定性能量比例(DER, Decisive Energy Ratio)。DER 是每条路径的最小等效剩余能量与所有路径的最小等效剩余能量之和的比例,它可以平衡通信流量,从而提高系统性能。这种技术不必定期计算 DER,因此容易实现而且开销较小。当一个节点需要中继多于两条路径的流量而且该节点的最小等效剩余能量是该路径中的决定性能量时,本文还提出带有过载避免机制的 DER 技术(DEROA, DER with Overload Avoidance),用来减少该关键节点过多的通信流量。

本文的主要贡献有:1)提出了一种有效的能量敏感负载均衡多径传输技术;2)提出了 DEROA 避免关键节点的过量负载。

本文第 2 部分提出基于 DER 的多径传输技术,第 3 部分给出 DEROA 的解决方案,第 4 部分分析仿真结果,最后总结全文。

2 DER 方法

2.1 DER 基本思想

发现多条路径不是本文的焦点。我们认为,从源节点 S 到目标节点 D 根据某种原则完成多条路径的建立是一个前

*)基金项目:国家自然科学基金资助项目(60302004)、湖北省自然科学基金(2005ABA264)。袁林锋 博士生,研究方向为无线网络协议设计;杜旭 副教授,博士,研究方向为高速 IP 路由技术和网络缓存;杨宗凯 教授,博士生导师,研究方向为下一代互联网技术和高速路由技术。

提条件。

记多径数目为 m , 路径 i 的节点集为 $P(i)$, 路径 i 上的节点数目为 $n(i)$, 节点 j 在时刻 t 可用于路径 i 上的剩余能量为 $E(i, j, t)$ 。

定义 1 决定性能量 (DE, Decisive Energy) 是指在某时刻可用于每条路径上的最小剩余能量。

记 $DE(i, t)$ 为路径 i 在时刻 t 的决定性能量, $DES(i, t)$ 为时刻 t 的决定性能量的集合, 有

$$DE(i, t) \in DES(i, t) = \{DE(i, t) \mid DE(i, t) \leq E(i, j, t), i \leq m, j \in P(i)\}$$

定义 2 决定性能量比例 (DER) 是指每条路径的 DE 与所有路径 DE 之和的比例。

记 $DER(i, t)$ 为路径 i 在时刻 t 的决定性能量比例, 有

$$DER(i, t) = \frac{DE(i, t)}{\sum_{i=1}^m DE(i, t)}$$

定义 3 决定性能量比例改变请求 (DERCR, DER Change Request) 是指路径上节点主动要求改变 DER 而向源节点发出的请求。

某节点中继路径的数目发生改变, 它就有可能向源节点发出 DERCR 要求更新 DE 和 DER。

定义 4 连通子系统 (CSS, Connectivity Sub-system) 是指包含从源节点到目标节点所有的路径的集合。

DER 技术基本思想是这样的: 首先通过比较路径上每个节点可用于该路径的剩余能量得到 DE, 然后源节点计算每条路径上的 DER。为了在任意时刻保持负载均衡和能量敏感, 具有较高 DER 的路径应当承担更多的传输任务, 较低 DER 的路径只需传递较少的数据。

假设多径建立之后有很多数据需要传输, 每次传输是可靠的且不需重传, 每个节点用于接收、处理、发送同样长度的数据包时所消耗的能量相等。因此, 每条路径的寿命就决定于该路径上的决定性能量。

定理 在 CSS 中, 当没有 DERCR 时, 任何时刻每条路径的 DER 是一个常量。

证明: 在时刻 t_0 , 假定 $DER(i, t_0)$ 是 CSS 中最大的 DER。在时刻 t , 路径 i 上每个节点消耗能量 $\Delta(i, t)$, 有 $DE(i, t) = DE(i, t_0) - \Delta(i, t)$ 。

由于传输是基于每个 DER 的, 所以能量消耗也是基于每个 DER 的。也就是说,

$$\frac{\Delta(j, t)}{\Delta(i, t)} = \frac{DER(j, t_0)}{DER(i, t_0)}$$

由于 $DER(i, t_0) = DE(i, t_0) / \sum_{k=1}^m DE(k, t_0)$

$$DER(j, t_0) = DE(j, t_0) / \sum_{k=1}^m DE(k, t_0)$$

$$\frac{DE(j, t_0)}{DE(i, t_0)} = \frac{DER(j, t_0)}{DER(i, t_0)}$$

因此另一条路径 j 上的每个节点消耗能量为

$$\Delta(j, t) = \frac{DER(j, t_0)}{DER(i, t_0)} \cdot \Delta(i, t) = \frac{DE(j, t_0)}{DE(i, t_0)} \cdot \Delta(i, t)$$

路径 j 在时刻 t 的 DE 为

$$\begin{aligned} DE(j, t) &= DE(j, t_0) - \Delta(j, t) \\ &= DE(j, t_0) - \frac{DE(j, t_0)}{DE(i, t_0)} \cdot \Delta(i, t) \\ &= \frac{DE(i, t_0) - \Delta(i, t)}{DE(i, t_0)} \cdot DE(j, t_0) \end{aligned}$$

在时刻 t , 所有路径的 DE 之和为

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^m DE(k, t) &= \sum_{k=1}^m \frac{DE(i, t_0) - \Delta(i, t)}{DE(i, t_0)} \cdot DE(k, t_0) \\ &= \frac{DE(i, t_0) - \Delta(i, t)}{DE(i, t_0)} \cdot \sum_{k=1}^m DE(k, t_0) \end{aligned}$$

路径 k 在时刻 t 的 DER 为

$$\begin{aligned} DER(k, t) &= \frac{DE(k, t)}{\sum_{k=1}^m DE(k, t)} = \frac{\frac{DE(i, t_0) - \Delta(i, t)}{DE(i, t_0)} \cdot DE(k, t_0)}{\frac{DE(i, t_0) - \Delta(i, t)}{DE(i, t_0)} \cdot \sum_{k=1}^m DE(k, t_0)} \\ &= \frac{DE(k, t_0)}{\sum_{k=1}^m DE(k, t_0)} = DER(k, t_0) \end{aligned}$$

定理成立。

推论: DER 与 $\Delta(i, t)$ 和 t 无关。在没有 DERCR 时, 源节点无需定期地计算 $DE(i, t)$ 和 $DER(i, t)$, 也不用关心每条路径上的能量损耗。

因此 DER 方法容易实现而且开销较小。

2.2 DER 在交织网络中的实现

除了以上的简单情形, 网络中还有一些复杂的拓扑。在两个节点之间建立多径有两种模式: 不交织模式和交织模式。如果一个节点需要中继两条以上的路径时, 它消耗的能量并不是与它中继路径上其它节点消耗的能量相同, 因此 DER 需要重新计算。另一种情形存在于不同的 CSS 之间。当不同的 CSS 共享一些节点时, 这些节点消耗的能量和交织多径路由存在同样的问题。

在图 1 中, 系统存在的 3 个 CSS 交织在一起, 而且在 CSS(S1, D1) 内部, 路径(S1, K, C, E, D1) 和 (S1, F, G, E, D1) 也有交织情形。节点 A, B, C, E, F, G, H, I, J 是交织节点。

规定每个节点保存以下变量: 节点中继路径数目、节点剩余能量、节点可用于每条路径的等效剩余能量、表示是否有 DERCR 的标志字。

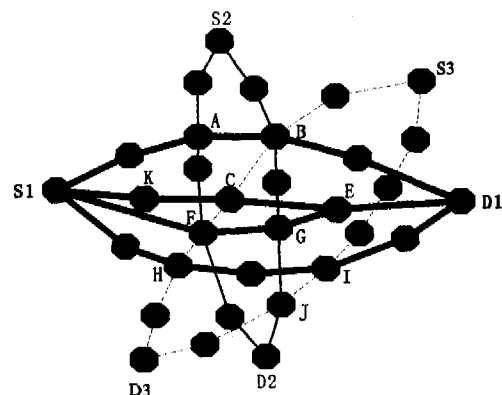


图 1 交织多径情形

如果一个节点只需要中继一条路径, 那么等效剩余能量就等于它的全部剩余能量。如果中继路径超过一条, 假设 n 条, 那么它的等效剩余能量就等于其全部剩余能量的 $1/n$ 。

每条路径通过比较该路径上每个节点的等效剩余能量得到其 DE 值, 最小的等效剩余能量即是该路径的 DE, 然后源节点计算每条路径的 DER。这样, 上述定理依然成立。

2.3 DERCR 功能

当 CSS(S1, D1) 工作在稳定状态时, 一个新的 CSS(S2, D2) 加入进来并且与 CSS(S1, D1) 有节点交织。记交织节点为 w , 假定节点 w 在 CSS(S2, D2) 加入之前中继的路径数目为 n , 在 CSS(S2, D2) 加入后, 节点 w 需要中继 $n+1$ 条路径。根据前面的解决方案, 该节点在每条路径上的等效剩余能量

为其全部剩余能量的 $1/(n+1)$ 。

在 $CSS(S1, D1)$ 中, 由于等效剩余能量已经改变, DER 需要重新计算。节点 w 必须通知源节点 $S1$, 这个通知信息就是 $DERCR$ 。源节点 $S1$ 在收到 $DERCR$ 之后, 通知 $CSS(S1, D1)$ 内的所有路径报告它们的 $DE(i, t)$ 并且根据 DE 计算 $DER(i, t)$, 这样 $CSS(S1, D1)$ 就在新的 DER 条件下继续运行。

节点 w 也需要把 $CSS(S2, D2)$ 内的中继路径的等效剩余能量设置成该节点全部剩余能量的 $1/(n+1)$, 但是由于 $CSS(S2, D2)$ 是一个新的 CSS , 还没有开始计算其 DE 和 DER , 因此节点 w 并不需要给该源节点 $S2$ 发送 $DERCR$ 信息。

同样地, 如果交织节点中继路径数目从 n 变到 $n-1$, 该节点可用于每条路径的等效剩余能量也会相应地减少为其全部剩余能量的 $1/(n-1)$, 同时向它的源节点发送 $DERCR$ 请求更新 DER 。

3 DEROA 解决方案

当某时刻节点中继路径很多时, 就可能造成过载现象, 节点消耗能量过快导致能量耗尽, 这是我们应该避免的。因此本文提出过载避免机制的 DER 解决方案 ($DEROA$)。简单起见, 我们给出另外一个定义。

定义 5 决定性节点 (DN , Decisive Node) 指路径上存在决定性能量的节点。

$DEROA$ 采用以下步骤避免 DN 的过量负载, 如图 2 所示。

当 $CSS(S1, D1)$ 进入稳定状态, 一个新的 $CSS(S2, D2)$ 加入进来并且与 $CSS(S1, D1)$ 有交织节点 B 。节点 B 通知路径 $(S2, F, B, G, H, D2)$ 上的前面一个节点 F 重新选路, 节点 F 按照它的路由原则选择另一个后继节点。如果节点 F 可以找到一个这样的节点 U , 那么 $CSS(S2, D2)$ 中新路径 $(S2, F, U, G, H, D2)$ 将不会影响到 $CSS(S1, D1)$ 中的路径 $(S1, A, B, C, E, D1)$, 因此 $CSS(S1, D1)$ 能够继续按照定理进行工作。

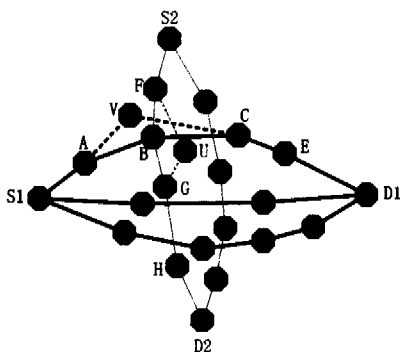


图 2 DEROA 解决方案

如果节点 F 找不到这样的一个后继节点, 将执行下述步骤。假定节点 B 在 $CSS(S2, D2)$ 之前中继的路径数目为 n , 在 $CSS(S2, D2)$ 加入之后, 节点 B 设置它的等效剩余能量为其全部剩余能量的 $1/(n+1)$ 并且发送 $DERCR$ 给 $CSS(S1, D1)$ 中的源节点 $S1$ 。源节点 $S1$ 通知路径 $(S1, A, B, C, E, D1)$ 报告其 DE 。如果节点 B 不是该路径的 DN , 源节点 $S1$ 现在就可以重新计算 DER 。否则, 节点 B 通知它在路径 $(S1, A, B, C, E, D1)$ 上的前向节点 A 重新路由, 节点 A 需要重新

按照路由原则找寻另一个后继节点。如果节点 A 可以找到一个这样的节点 V , 那么 $CSS(S1, D1)$ 中新路径 $(S1, A, V, C, E, D1)$ 将不会影响到 $CSS(S2, D2)$ 中的路径 $(S2, F, B, G, H, D2)$, 然后 $CSS(S1, D1)$ 更新其 DE 和 DER 。同时, 由于节点 B 改变了中继路径数目, 它将通知 $CSS(S2, D2)$ 中源节点 $S2$ 更新 DER 。

当然, 如果节点 A 找不到这样的节点, 那么节点 B 没有别的选择, 只好中继多于一条路径的数据了。图 3 给出 $DEROA$ 实现流程图。

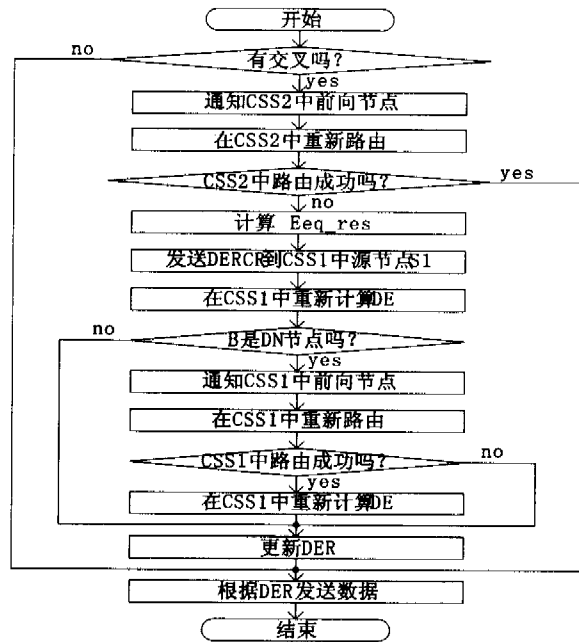


图 3 DEROA 实现流程图

4 仿真结果与分析

4.1 仿真环境

本节通过与主/备模式和复制模式的比较来评估 DER 传输技术的性能。试验采用 $ns-2$ 网络仿真器实现, 通过下述指标衡量其性能: 网络不分裂的时间; 传输过程中的能量分配。

图 4 是试验拓扑结构。从源节点 $n2$ 到目标节点 $n4$ 有三条路径: $(n2, n1, n4)$ 、 $(n2, n3, n4)$ 、 $(n2, n5, n4)$, 路径 $(n6, n1, n7)$ 用来说明与 $CSS(n2, n4)$ 的交织情形, 节点 $n1, n3, n5$ 分别是各自路径上的决定性节点。

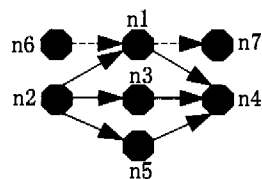


图 4 DER 试验拓扑结构

4.2 网络不分裂的时间

当一个节点能量耗尽时就会出现盲点, 导致网络分裂并降低了系统性能。在本文中, 系统寿命被定义为网络不分裂的时间。

主/备模式中, 具有最大的决定性能量的主路径上关键节点能量决定了系统的生命期; 复制模式中, 具有最小的决定性

能量的路径首先会失效。因此,我们评估主/备模式中具有最大的决定性能量的路径的生命期和复制模式中具有最小的决定性能量的路径的生命期。而基于 DER 的系统,生命期则决定于第一个能量耗尽的节点的寿命。

路由表建立之后,分别设置节点 $n1$ 、 $n3$ 、 $n5$ 的能量为 0.6J、0.3J、0.1J,考察在不同时间间隔条件下的系统寿命。每个包长为 100 字节,时间间隔从 0.2~2s,图 5~图 7 显示了仿真结果。

图 5 表明随着时间间隔的增加,系统寿命都在上升,DER 的系统寿命最高。图 6 表明相比较主/备模式而言,DER 的系统寿命提高了 50% 以上;图 7 表明 DER 的系统寿命比复制模型提高了 4~8 倍。因此无论什么情况下,DER 比其它两种方案都有更长的生命期。

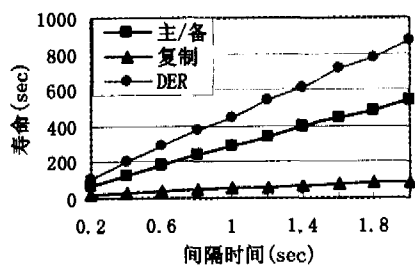


图 5 不同时间间隔的系统寿命

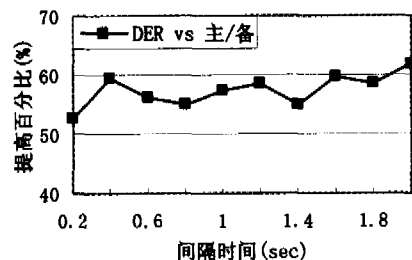


图 6 不同时间间隔时 DER 相比较主/备模式提高的百分比

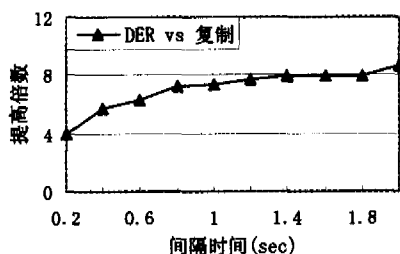


图 7 不同时间间隔时 DER 相比较复制模式提高的倍数

4.3 传输过程中的能量分配

为了验证 DER 方案,我们测量在多径系统每条路径中关键节点的剩余能量的分配情况。在路由表建立之后,分别设置节点 $n1$ 、 $n3$ 、 $n5$ 的能量为 1.8J、0.9J、0.3J,数据从 2s 开始发送,在 80s 停止。图 8~图 11 显示了仿真结果。

图 8 显示了无交织情形时关键节点的剩余能量,图 9 显示了此时关键节点的剩余能量比例。节点 $n1$ 、 $n3$ 、 $n5$ 的百分比基本保持在 60%、30%、10%,这些比例正好与它们在初始时刻的剩余能量所占的百分比相同。由于有一些路由信息需要经常更新,这种能量消耗对所有节点相同,而不是按比例减少。因此,随着时间的推移,节点 $n1$ 的比例越来越高,而节点 $n5$ 的比例越来越低。但是,这并没有影响到 DER 的效率。

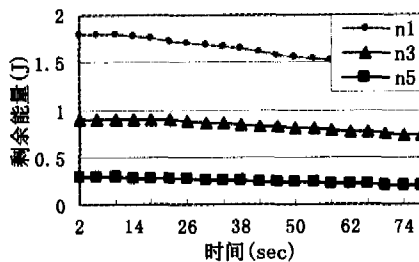


图 8 无交织情形时 DN 的剩余能量

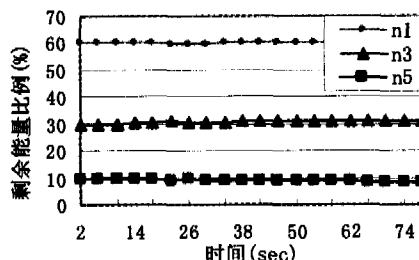


图 9 无交织情形时 DN 剩余能量比例

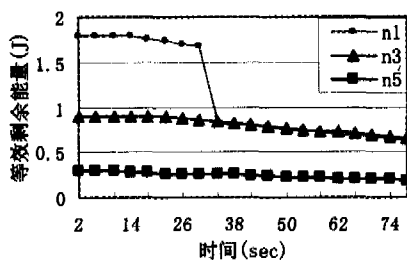


图 10 交织情形时 DN 的剩余能量

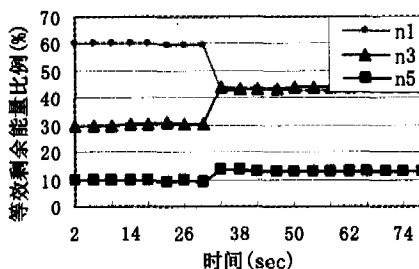


图 11 交织情形时 DN 剩余能量比例

图 10 和图 11 显示了交织情形下的仿真结果。原有的多条路径从 2s 开始按照 DER 传输数据,另外一条路径 ($n6$, $n1$, $n7$) 在 30s 时刻加入进来且节点 $n1$ 是关键节点 DN。我们考察 CSS($n2$, $n4$) 中的等效剩余能量。从 2s 到 30s,节点 $n1$ 的等效剩余能量等于该节点的全部剩余能量。但在 30s 后,根据 DER 方案,节点 $n1$ 的等效剩余能量等于该节点的全部剩余能量的一半,于是得到图 10 和图 11 的仿真结果。它们清楚地表明,3 个 DN 在 2s 到 30s 时消耗的能量同它们初始能量有相同的比例。在 30s 之后,能量消耗遵从着另外的比例,这些比例同它们在 30s 时刻的 DER 相同。

结论 我们在本文提出了一种能量敏感负载均衡的多径传输策略,数据以一种简单有效的方式根据 DER 从源节点到目标节点进行传输。这种技术可以有效地达到负载均衡和能量节约的目的。同时本文提出 DEROA 技术,用以避免某些关键节点的过量负载。

下一步工作中,我们将研究基于 DER 多径传输技术的路径可靠性问题,这必将使多径传输问题更加全面。

参考文献

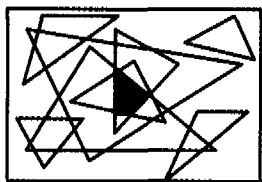
- 1 Stankovic J A, Abdelzaher T F, Lu Chenyang, et al. Real-Time Communication and Coordination in Embedded Sensor Networks. Proceedings of the IEEE, 2003, 91(7)
- 2 Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramanisam Y, et al. Wireless Sensor Networks; a survey. Computer Networks, 2002, 38, 393~422
- 3 Tzirigios A, Hass Z J. Multipath Routing in The Presence of Frequent Topological Changes. IEEE Communications Magazine, 2001, 132~138
- 4 De S, Qiao C, Wu H. Meshed multipath routing; An efficient strategy in sensor networks. In: Proc. WCNC, IEEE, New Orleans, LA, Mar. 2003
- 5 Lee S-J, Gerla M. Split Multipath Routing with Maximally Disjoint Paths in Ad hoc Networks. In: Proc. Of IEEE ICC 2001, Helsinki, Finland, June 2001, 3201~3205

- 6 Ganesan D, Govindan R, Shenker S, et al. Highly-Resilient, Energy-Efficient Multipath Routing in Wireless Sensor Networks. Mobil Computing and Communications Review, 2001, 5(4)
- 7 Nasipuri A, Das S R. On-Demand Multipath Routing for Mobile Ad Hoc Networks. In: Proc. Intl Conf on Computer Communication and Networks (ICCCN), Oct. 1999. 64~70
- 8 Huang Shih-Chang, Jan Rong-Hong. Energy-aware, load balanced routing schemes for sensor networks. In: 10th ICPDS, 2004. 419~425
- 9 Hong X, Gerla M, Wang H. Load Balanced, Energy-Aware Communications for Mars Sensor Networks. In: Proc. of IEEE Aerospace 2002, Mar. 2002
- 10 Dulman S, Nieberg T, Wu Jian, et al. Trade-off between traffic overhead and reliability in multipath routing for wireless sensor networks. In: Proc. WCNC, IEEE, 2003, 3: 1918~1922

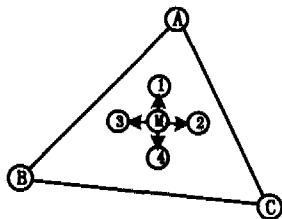
(上接第 38 页)

的信号强度小于节点 1 接收到信标 A 的信号强度。那么根据两者接收信标节点的信号强度判断,如果节点 M 运动至节点 1 所在位置,将远离信标节点 B 和 C,但会靠近信标节点

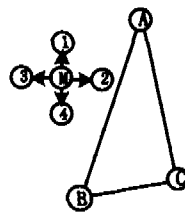
A。依次对邻居节点 2、3、4 进行相同的判断,最终确定节点 M 位于 $\triangle ABC$ 中;而在图 6(c)中,节点 M 可知假如运动至邻居节点 2 所在位置,将同时靠近信标节点 A、B、C,那么判定节点 M 在 $\triangle ABC$ 测试外。



(a) APIT定位原理图示



(b) M在三角形内



(c) M在三角形外

图 6 APIT 定位原理图示

APIT 定位具体步骤包括收集邻近信标节点信息、APIT 测试、计算重叠区域、计算未知节点位置。在无线信号传播模式不规则和传感器节点随机部署的情况下, APIT 算法的定位精度高、性能稳定,但 APIT 测试对网络的连通性提出了较高的要求。相对于计算简单的质心定位算法, APIT 算法精度高,对信标节点的分布要求低。

总结 随着无线传感器网络研究的深入开展,其特点和优势日益显著,应用也越来越广泛。本文以基于距离的定位和距离无关的定位的分类为线索,详细介绍了传感器网络中的各种定位机制,分析了各种定位机制的原理和优缺点。无线传感器网络节点的能量有限,内存和 CPU 的处理能力有限,这些约束要求定位算法必须是低复杂性的。要进一步延长网络的生存周期,就必须减少定位过程中的通讯开销,因为无线通信的能耗是节点的主要能耗。目前的算法大都在能耗、成本和精度上做了折衷考虑。由于各种应用差别很大,没有普遍适合于各种应用的定位算法,因此将针对不同的应用,通过综合考虑节点的规模、成本及系统对定位精度的要求,来设计最适合的定位算法。

参考文献

- 1 He Tian, Huang Chengdu, Blum B M, et al. Range-Free Localization Schemes in Large Scale Sensor Networks. In: Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Network (MobiCom), San Diego, California, USA; ACM Press, 2003. 81~95

- 2 priyantha N B, Balakrishnam H, Demaine E, et al. Anchor-Free Distributed Localization in Sensor Networks; [Technical Report]. MIT-LCS-TR-892, MIT Lab for Computer Science, 2003
- 3 Girod L, Estrin D. Robust Range Estimation using Acoustic and Multimodal Sensing. In: Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '01), Maui, Hawaii, USA; IEEE Computer Society, 2001, 3, 1312~1320
- 4 Priyantha N, Chakraborty A, Balakrishnan H. The Cricket Location-Support System. In: Proceedings of International Conference on Mobile Computing and Networking, Boston, MA, August 6-11, 2000. 32~43
- 5 Niculescu D, Nath B. Ad hoc positioning system (APS) using AOA. INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. IEEE, 2003, 3
- 6 Bahl P, Padmanabhan V N. RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system. In: Proceedings of Infocom' 2000, Tel Aviv, Israel, IEEE Computer and Communications Societies, 2000, 2, 775~584
- 7 Bulusu N, Heidemann J, Estrin D. Density Adaptive Algorithms for Beacon Placement in Wireless Sensor Networks. IEEE ICDCS '01, Phoenix, AZ, April 2001
- 8 Bulusu N, heidemann J, Estrin D. GPS-less Low Cost Outdoor Localization for Very Small Devices. IEEE Personal Communications, 2000, 7(5): 28~34
- 9 Hightower J, Borriello G. A Survey and Taxonomy of Location Systems for Ubiquitous Computing; [Technical Report]. UW-CSE 01-08-03
- 10 Savvides A, Han C C, Srivastava M B. Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors. In: Proceedings of the Seventh Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom). Rome, Italy, 2001. 166~179