

无线传感器网络密度控制研究

贾玉福 石 坚 董天临

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉 430074)

摘 要 无线传感器网络节点能量受限,部署环境恶劣、复杂。在监测区域内部署大量节点,通过节点之间的状态轮换与合作策略延长网络寿命是非常重要的方法。本文论述了设计密度控制算法状态转移条件需要解决的两个基本问题:区域覆盖问题和节点连通性优化问题,并分别以ILP的形式给出了一个集中式算法解决方案。通过节点的覆盖效用范围与连通性效用范围的几何分析,提出了传感器网络密度控制算法中解决两个基本问题的一致性策略。

关键词 无线传感器网络,密度控制,区域覆盖,节点连通性,NP-完全问题

Research on Density Control for Wireless Sensor Networks

JIA Yu-Fu SHI Jian DONG Tian-Lin

(Department of Electronics and Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract Energy is a paramount concern in wireless sensor network applications that need to operation for a long time on battery power. An effective approach for energy conservation is scheduling sleep intervals for extraneous nodes, while the remaining nodes stay active to provide continuous service. For the sensor network to operate successfully, the active nodes must maintain both sensing coverage and network connectivity. This paper discusses this problem and presents the analysis of two ILP(Integer Linear Program) formulations and some strategies to reduce overall energy consumption while maintaining guaranteed coverage levels or connectivity level. A consistency strategy to maintain both coverage levels and connectivity level is proposed in the end.

Keywords Wireless sensor networks, Density control, Coverage, Connectivity, NP-Complete

目前对无线传感器网络的研究一般基于这样的假设:传感器节点能量由电池供应,不能再生。节点生命周期有限而短暂,因此能量管理与能量有效性研究正成为无线传感器网络研究领域的一个重要课题。延长网络寿命的一个基本方法就是在信息采集域内部署大量节点,但如果所有节点同时处于工作状态,网络就会增加更多机会使包在转发过程中产生碰撞与拥塞,并有更多中间节点投入到信息从信息源到基站的转发过程中。对监测区的多重覆盖也会造成大量冗余信息的出现。功率控制(通过调整节点发射功率来控制节点的转发范围)可以部分解决上述问题,但一个根本的解决办法是密度控制机制——适当控制一部分节点处于工作状态,另一部分进入休眠,交替轮流工作。这样既保证了监测域内的信息采集,又延长了网络寿命。传感器网络的应用环境使各个节点之间很难做到完全时间同步。位于节点内部的各种算法和协议应该是局部分布式的,密度控制算法也不例外。因此将监测域内节点完全分为几个可以完成信息采集任务的子集,靠子集之间交替工作的做法在实际传感器网络应用中行不通。而且,由于个别节点极易受到外部或内部破坏而失效,上述方法的健壮性也会受到怀疑。密度控制算法的设计与实现应该考虑两个问题:首先是状态转移条件,即判断满足什么样的条件时节点由工作状态进入休眠状态,或由休眠状态进入工作状态。其次是退避时间的选择。密度控制算法要求退避时间应与节点自身剩余的能量有关。剩余能量多的节点应有更多的机会处于工作状态,或工作状态持续时间更久。剩余能量少的节点休息机会更多。

与节点状态转移条件密切相关的两个问题分别是区域覆盖问题和节点连通性问题。区域覆盖问题解决的是当监测域内至少有多少个节点处于工作状态才能完全采集覆盖域内产生的信息或是对监测域达到特定要求的多重覆盖。节点连通性问题指的是工作节点在监测域内怎样部署才能实现节点之间互相通信,以便信息总能从信息源经由一条或几条路由转发到基站。本文重点从如何解决区域覆盖优化问题、节点连通性优化问题以及区域覆盖与节点连通性相结合的优化问题等3个方面论述几种密度控制算法的思想与策略。

1 具有区域覆盖优化性质的密度控制算法

理想状态下具有完全区域覆盖能力的密度控制算法不但能够将每次处于工作状态的节点数量控制在最少,也应使节点彼此之间的能耗达到均衡。假设传感半径(Sensing Disk)均为 r_s 的 N 个传感器节点部署在监测域 Ω 内。 C_i 为一个完成监测区域完全覆盖的传感节点的工作集合(分析可知,工作集合内的节点数 $n \geq \lceil \frac{\sqrt{27}|\Omega|}{2(\pi r_s)^2} \rceil$ [1])。每个传感节点必存在于且仅存在于一个覆盖集合内,即 $s_i \in \bigcup_{1 \leq j \leq m} c_j$ 。 $c_i \cap c_j = \emptyset (i \neq j)$ 。 C 为工作集合的集合 $\{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ 。求解势最小的集合 c_i 并不是理想状态下监测区域覆盖优化的最终目标。理想情况下密度控制算法要解决的核心问题是怎样划分节点可得到集合 C ,使 m 值达到最大。由于最小顶点覆盖问题是NP完全问题,且可多项式约化为上述问题[2],则该问题也是NP完全问题。求解NP完全问题得到精确解的唯一方法就是穷举

法,但该方法的计算复杂度随节点的增加呈指数上升。因此可以引入一些启发式搜索算法,求得该问题的近似解,作为比较分布式密度控制算法有效性的参考。比如,可以从监测域内被覆盖最稀疏的位置入手,大致估计覆盖集 C 的势的上限,并分别以覆盖该稀疏位置的每个节点为源求解一个覆盖。也可将上述覆盖优化问题转换为整数线性规划(Integer Linear Programming)的形式,通过 ILP 解析器来处理。

设 $\{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_{|\Omega|}\}$ 是区域 Ω 的一个分划。分别定义区域覆盖矩阵 $A_{|\Omega| \times N}$ 和优化矩阵 $X_{N \times m}$ 。如果区域 Ω_i 在传感节点 s_j 的监测范围之内,则矩阵 A 的元素 a_{ij} 为 1, 否则为 0。如果传感节点 $s_i \in c_j$, 则矩阵 X 的元素 x_{ij} 为 1, 否则为 0。将已知各个传感节点分别在不同的覆盖集内,要求所分的覆盖集的个数达到最大,这等价于求解所分的覆盖集内节点个数最多的覆盖集的势最小。引入变量 k 来表示覆盖集内节点个数最多的覆盖集的势,则区域覆盖优化问题的 ILP 形式表示如下:

求解极小值: k

约束条件: $1_{1 \times N} \cdot X_{N \times m} \leq 1_{1 \times m} \cdot k$

$A_{|\Omega| \times N} \cdot X_{N \times m} \geq 1_{|\Omega|} \times m$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1 (1 \leq i \leq N)$$

ILP 模型为传感器网络区域覆盖优化管理提供了极佳的解决方案。但它仍然属于集中式算法,不适合实际部署的 WSNs 应用环境。其结果只能作为一个标准,用于评价以计算几何为基础的分布式密度控制算法的优劣。

应用于实际环境中的节点密度控制算法应该是分布式的,且往往是以节点与邻居节点对某一区域的覆盖关系为基础的。其核心思想是:当某一节点发现自己处于工作状态时,所负责的传感区域(即以自身位置为中心,半径为 r_s 的圆)被其他处于工作状态的邻居节点已经覆盖,则该节点进入休眠状态,否则处于持续工作状态。不同的密度控制算法差异主要体现在对区域内某点或某一局部区域是否存在重复覆盖或是否达到特定覆盖度。覆盖度大的覆盖能够使网络产生大量冗余数据信息,增加系统的负担,同时能够提高系统容错能力,提供较强的 QoS 服务。

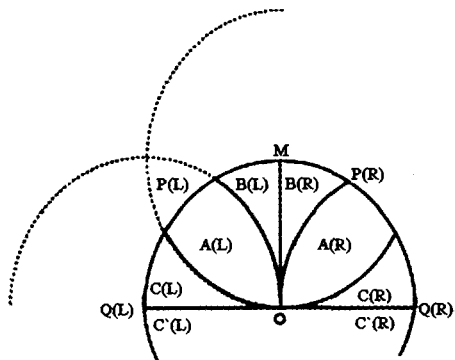


图 1 NCP 重复覆盖区分示意

NCP(Neighbor-Based Coverage Protocol)^[3] 协议利用邻居节点与自身所处的相对位置来判定自己负责的区域是否已经被覆盖。该协议采用“分而治之”的思想,将该节点负责的区域划分为 4 个四分之一圆子区域(图 1 只画出了上半部,下半部作为上半部的镜像被省略),只有 4 个子区域都被邻居节点传感覆盖,节点才被视为冗余点而进入休眠状态。通过观

察比较可知,满足该区域被完全覆盖的邻居部署情况有两种: I) $A(L), A(R), A(L)$ 的镜像区 $A(L)', A(R)$ 的镜像区 $A(R)'$ 都有处于 Active 状态的邻居节点。II) $B(L)$ 或 $B(R), B(L)$ 的镜像 $B(L)'$ 或 $B(R)$ 的镜像 $B(R)', C(L)$ 或 $C(L)$ 的镜像 $C(L)', C(R)$ 或 $C(R)$ 的镜像 $C(R)'$ 都有处于 Active 状态的邻居节点。该协议简单可靠,但不能精确确定某一区域的覆盖度。当条件 I) 和 II) 都部分满足时,协议不能辨别覆盖度较大的子区域并对此做出应对措施。因此该协议易造成监测域内各子区域覆盖不均匀。对节点负责区域的 4 个子区域的划分同样影响协议判别的结果。GCP(Grid-Based Coverage Protocol)^[3] 协议假设监测域被虚拟划分为多个正六边形格子的网状结构,每个格子的边长为 $r/2$, 因此位于每个格子内部的节点都能完全覆盖该格子区域。节点首先根据自身的坐标计算其所在的格子,再通过邻居节点的信息判断该格子是否被处于 Active 状态的邻居节点所覆盖。GCP 协议能够使监测域内各子区域覆盖较均匀,但同样没有具备精确确定某一区域的覆盖度的能力,同时不能处理节点同时覆盖多个格子的情况。

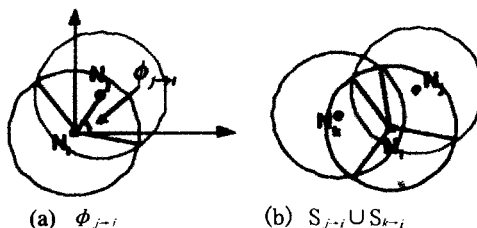


图 2 相邻节点重复覆盖区域计算模型

NCP 算法根据位于自身传感区域的静态子区域内的邻居节点状态判断自身状态是否改变。与其不同, D. Tian 等^[4] 提出的基于“Sponsored Area”的算法能够动态计算节点与每个邻居节点重叠覆盖的区域。当节点的覆盖域包含于多个邻居节点重叠覆盖的区域的并集时,节点可被视为冗余节点。节点与邻居节点的重叠覆盖计算如图 2(a) 所示。为了计算便捷,协议以图中的阴影扇形部分代替 N_i, N_j 二者相交的区域。 ϕ_{j-i} 表示 N_j 对 N_i 的覆盖角, S_{j-i} 表示 N_j 对 N_i 的覆盖域, $\phi_{j-i} = \arccos(\frac{d(i,j)}{2r_s})$ 。只有当 $\sum_{j \in N(i)} \phi_{j-i} \geq \pi(N(i))$ 为 N_i 的邻居节点时,节点才有可能被完全覆盖。该协议需要节点已知邻居节点与自身的距离及所处的位置方向信息。

2 具有节点连通性优化性质的密度控制算法

传感器网络节点连通性的要求与 Ad Hoc 网络大致一致: 1) 信息必须有一条或足够多的路径从信息源转发到目的节点(基站); 2) 信息在转发过程中的延迟应尽量小。信息的转发路径越多,系统越可靠,但由于需要多个中间节点同时处于工作状态,节点能耗增加,系统寿命降低。无线发射器件的能耗随着收发距离长度的变大呈指数增长,采用多跳(multi-hops)方式进行信息转发代替点对点通信,可以节约大量的能量。但过多的跳数会增加信息接收转发的次数,同样会带来额外的能耗。因此,将上述两个互相矛盾的因素折衷,适当控制转发节点的个数是降低能耗的关键。

理想状态下,具有节点连通性优化作用的密度控制所要解决的核心问题同覆盖优化类似,但节点的约束条件更多。将所有传感节点组成的集合分为 $\{h_1, h_2, \dots, h_{m'}\}$ 等 m' 个子

集,即, $s_i \in \bigcup_{1 \leq j \leq m} h_j, h_i \cap h_j = \emptyset (i \neq j)$ 。设 h_i 为组成主干连接网络的传感节点的一个集合,每个处于传感状态的非主干节点能够与至少一个主干节点通信,主干节点之间必须有一条且至少一条直接或间接的路径实现二者相连。密度控制算法所要解决的核心问题是怎样划分节点集合,以便生成的主干连接网络子集的个数 m' 达到最大。该节点连通性优化问题同样可以转换为整数线性规划的形式,通过 ILP 解析器来处理。

假设传感节点的发送半径(Transmitting Disk)为 r_i ,节点 i 与节点 j 的距离为 d_{ij} 。分别定义矩阵 $L_{N \times N}$ 、矩阵 $Y_{N \times m'}$ 、矩阵 $P_{N \times N}$,当 $d_{ij} < r_i$ 时,矩阵 L 的元素 l_{ij} 为 1,否则为 0。当节点 $n_i \in h_j$,矩阵 Y 的元素 y_{ij} 为 1,否则为 0。当节点 i 能够通过单跳或多跳与节点 j 相连时,矩阵 P 的元素 p_{ij} 为 1,否则为 0。定义矩阵 Y 的第 j 列元素为列向量 $y_{\cdot j} = (y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{Nj})^T$,引入变量 k 来表示节点个数最多的集合 h_i 的势,则节点连通性优化问题的 ILP 形式表示如下:

求解极小值: k

约束条件: $1_{1 \times N} \cdot Y_{N \times m'} \leq 1_{1 \times m'} \cdot k$

$L_{N \times N} \cdot Y_{N \times m'} \geq 1_{N \times m'}$

$\sum_{j=1}^{m'} y_{ij} = 1 (1 \leq i \leq N)$

$P_{N \times N} \cdot y_{\cdot j} \cdot y_{\cdot j}^T = 1_{N \times N} (1 \leq j \leq m')$

在传感器网络应用中,一般要在监测区域部署大量的节点,才能完成信息采集任务。一个节点不可能已知所有节点的地理位置和工作状态。即便已知上述信息,由于节点自身计算及数据存储能力的局限性,在局部节点实现最优的密度控制算法也是很难的。实现密度控制的途径一般有两种:一是由基站(sink)收集全网节点信息,找出最优的节点工作分组集合,并通过网络通知节点其应处于的工作状态和分组。该方法显然增加了网络传输负载,并在节点状态更新上存在滞后。二是节点在局部根据某种启发式思想动态决定自己的状态。该方法不必已知全网的节点信息,但结果不是最优的。实现连通性优化作用的分布式密度控制的一个最简单形式是:节点通过广播报文获悉处于工作状态的邻居节点个数,当邻居节点数大于某一临界值时,节点便被视为冗余节点。这种算法实现起来简单容易,但不能保证节点之间的连通性,特别是不能保证网络提供一条从信息源节点到基站的路由存在。GAF^[5]协议的核心思想与 GCP 类似,假设监测区域被分割成虚拟的正方形网格,定位于同一网格内的节点通过竞争机制轮流担任主干转发节点。网格大小的确定应保证相邻网格内的任意一对节点都能够互相通信,以使主干节点实现全连通,因此网格边长应小于 $\frac{r_i}{\sqrt{5}}$ 。Span 协议^[6]要求节点发现存在

在一对邻居节点不能通过转发主干节点(coordinator)或间接通过 coordinator 相连时,节点进入工作状态。该协议不需已知节点具体的位置坐标,但要求节点之间周期性广播自己的 ID、邻居节点 ID 以及自己的状态和所属 coordinator 信息,因此该协议是先验式(proactive)的。显然 Span 协议能够保证 coordinator 节点之间的连通性,并提供至少一条路由使信息从信息源节点转发到基站。GAF 和 Span 都不能产生最小或更小的 coordinator 节点集合,甚至有时 coordinator 节点冗余度过高而使密度控制算法对提高网络系统寿命的效果不明显。开发具有特定要求的节点连通度动态控制能力的算法,是目前具有节点连通性优化性质的密度控制应该考虑的重要

问题。

3 区域覆盖与节点连通性优化相结合的密度控制算法策略

既要监测区实现完全覆盖以使数据采集不会遗漏,又要求节点之间实现全连通以使数据总有路由转发回基站,这是传感器网络应用的重要特征,也是密度控制算法的基本前提。上述两类算法思想都只是考虑了其中的一个方面,并没有在数据采集与数据转发效用形成一致。定义以节点位置为圆心、传感半径 r_s 为半径的圆为节点的覆盖效用范围,以节点位置为圆心、发送半径 r_t 为半径的圆为节点的连通性效用范围。通过几何分析找出二者之间的基本关系,并将双重问题转换为单方面的问题,可以简化密度控制算法的结构。

如果一个凸域内任意一点都在至少 k 个不同传感节点的覆盖效用范围之内,称之为该区域被传感器节点 k 覆盖。如果区域内任意一个传感器节点至少可经 k 条不同线路到达另外任意一点,称之为该区域内传感器节点之间实现 k 连通。

定理 1 在一个无限大凸域里部署无限多个传感节点,当 $2r_s \leq r_t$ 时,传感器节点对该区域完全覆盖是传感节点之间互相连通即任意两个节点之间必有至少一条线路可达的充分条件。

证明: 因为凸域是无限大的,所以不考虑边界效应。见图 3,设 S、D 为凸域内任意两个处于工作状态的传感器节点。连接 SD 成一条直线。以位于 SD 上距离 S 点 r_s 的点为圆心、 r_s 为半径画圆,在圆内或圆弧上应该还有另一处于工作状态的传感器节点。这是因为如果没有另一点存在,可以将该圆沿 SD 朝 D 方向偏移 $\Delta \epsilon$ 使之包含一点,但当偏移量 $< \Delta \epsilon$ 时,圆内将不会包含任何点,此时圆心不被任何点覆盖,这与“该区域被完全覆盖”条件相悖。

假设 P 为该圆所包含的另一点, $\because SP \leq 2r_s \leq r_t, \therefore S、P$ 两点之间可实现连通。根据三角不等式可知 $PD < SD$ 。再在 PD 上做类似分析,可找到一点 Q,使 $QD < PD$, S、P、Q 之间实现连通, ..., 如此下去,终能找到一点 M,使 $MD \leq r_t$,即 S、P、Q、...、M、D 之间实现连通。

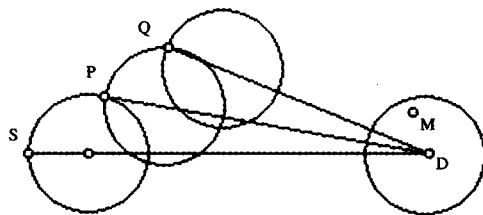


图 3

推论 在一个无限大凸域里部署无限多个传感节点,当 $2r_s \leq r_t$ 时,如果传感器节点对该区域实现 k 覆盖,则该区域内传感器节点之间必实现 k 连通。

定理 1 及其推论表明: 当 $2r_s \leq r_t$, 可将传感器网络密度控制中的区域覆盖问题和节点连通性问题转换为单一的区域覆盖问题。具有区域覆盖优化性质的密度控制算法同时也基本达到了具有节点连通性优化性质的密度控制算法的要求。但当 $2r_s \geq r_t$ 时,为了保证节点对区域实现 k 覆盖的同时,节点产生的信息有 k' 条路径到达基站,密度控制算法对在节点分别进入工作状态和休眠状态之前的判别条件应做如下修改: 1) 当节点发现其覆盖效用范围被处于工作状态的邻居节

点的覆盖效用范围 k 覆盖, 并且邻居节点产生的信息有 k' 条不经过该节点的不同路径到达基站, 节点便进入休眠状态。

2) 当节点发现处于工作状态的邻居节点的覆盖效用范围不能够对其覆盖效用范围 k 覆盖, 或存在任一邻居节点产生的信息不能经 k' 条不经过该节点的不同路径到达基站, 节点便进入休眠状态。

结束语 目前已有的传感器网络节点密度控制算法一般需要节点已知自己的精确地理位置信息。节点地理位置信息或是通过 GPS 来得到, 或是预先在已知的几个不同位置部署节点, 然后通过三角测量方式对 TOA、TDOA、RSSI 进行分布式计算得到。前者代价昂贵, 后者计算得到的偏差较大。因此, 开发节点不具备地理位置信息的密度控制算法非常重要, 这也是作者下一步的工作目标。在局部节点实现的分布式密度控制算法, 往往造成不同节点之间的状态转换碰撞, 为了避免这一现象, 节点在状态转换条件判定后有时仍需退避一段时间再进行状态转换。退避时间的选择机制对密度控制算法的性能有重要的影响。节点密度控制协议位于网络层与 MAC 层之间, 密度控制算法的实现往往造成网络拓扑结构频繁变化, 网络路由由更新频率增加。密度控制算法中邻居节点的状态信息有时又要通过路由信息来获取。因此在节点密度控制协议中充分考虑路由协议的影响, 结合路由协议来设计也是十分重要的。

参考文献

- Williams R. The geometrical foundation of natural structure: A source book of design. New York; Dover Pub Inc, 1979
- Garey M R, Johnson D S. Computers and intractability: A guide

(上接第 45 页)

(H6)。如果最优 GN 发生改变, 则进行最优 GN 的动态调整。DRM 发送 LO-BU 到最优 GN, R-BU 到 HA/CN。

• 状态 F: 是虚状态, 用来表示网络切换的结束, 整理和回收预分配的资源, 如断开与旧子网的连接、注销前一个最优 GN 等。

集成状态转换模型描述了层次化与非层次化移动管理相结合的切换控制方法, 同时描述了软切换与硬切换两种切换模式的结合使用。使用集成状态转换模型的切换控制, 能够保障系统在复杂网络环境下的连续、稳定工作。例如, 当网络不支持软切换的时候, 可以使用硬切换完成切换操作; 当网络不支持层次化移动管理的时候, 可以使用非层次化移动管理完成切换操作。

结论 现存的层次化移动管理框架对层次化体系中的地址管理做了比较详细的规划和描述, 但在性能分析和优化方面论述较少, 并且缺乏对使用的一般性论述。本文针对层次化移动管理中的瓶颈问题和最短路径问题, 首先提出了最优路径问题。结合 MIPv6, 提出了具有最优路径选择的层次化移动管理框架, 并给出了最优路径选择的考核指标和控制方法。针对一般性使用问题, 本文对 Optm-HMIPv6 在自治系统中的使用进行了规划和描述, 并给出了结合多种切换模式和管理结构的集成状态转换模型。较现存的层次化移动管理框架, Optm-HMIPv6 具有更好的通用性和更广泛的适用能力。

本文接下来的工作, 将围绕用于指标考核的资源信息统一描述方法和评价体系两方面内容展开。

参考文献

- Perkins C E. Mobile Networking through Mobile IP. IEEE Inter-

- to the theory of NP-Completeness. New York; Freeman, 1979
- Sanli H O, Cam H. Energy Efficient Differentiable Coverage Service Protocols for Wireless Sensor Networks. Pervasive Computing and Communications Workshops, 2005. PerCom 2005 Workshops. In: Third IEEE International Conference on 2005. 406~410
- Tian D, Georganas N D. A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks. First ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, Georgia, GA, 2002
- Xu Y, Heidemann J, Estrin D. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. Proc of ACM MOBICOM '01, Rome, Italy, July 2001
- Chen B, Jamieson K, Balakrishnan H, et al. Span: An energy-efficient operation in multihop wireless ad hoc networks. Proc of ACM MobiCom'01, 2001
- Zhang Honghai, Hou Jennifer. Maintaining coverage and connectivity in large sensor networks. International Workshop on Theoretical and Algorithmic Aspects of Sensor, Ad hoc Wireless and Peer-to-Peer Networks, Feb 2004
- Slijepcevic S, Potkonjak M. Power efficient organization of wireless sensor networks. ICC 2001, Helsinki, Finland, June 2001
- Chakrabarty K, Iyengar S S, Qi H, et al. Grid coverage for surveillance and target location in distributed sensor networks. IEEE Transactions on Computers, 2002, 51(12): 1448~1453
- Meguerdichian S, Potkonjak M. Low Power 0/1 Coverage and Scheduling Techniques in Sensor Networks: [UCLA Technical Reports]. 030001. 2003
- Zou Yi, Computers C K. A Distributed Coverage- and Connectivity-Centric Technique for Selecting Active Nodes in Wireless Sensor Networks. IEEE Transactions on, 2005, 54(8): 978~991
- Megerian S, Koushanfar F, Potkonjak M, et al. Worst and best-case coverage in sensor networks, Mobile Computing, IEEE Transactions on, 2005, 4(1): 84~92
- Heo Nojeong, Varshney P K. Systems, Man and Cybernetics, Energy-efficient deployment of Intelligent Mobile sensor networks Part A, IEEE Transactions on, 2005, 35(1): 78~92

- net Computing, 1998, 2(1): 58~69
- Yi Myung-Kyu, Song Ui-Sung, Hwang Chong-Sun. A lazy update strategy for minimizing signaling cost using the forwarding pointer in mobile IP. Journal of Information Science and Engineering, 2005, 21(2): 259~286
- Jonsson A, Gustafsson E, Perkins C. Mobile IPv4 regional registration. Internet Draft, draft-ietf-mobileip-reg-tunnel-07, 2002
- Dommety G, Ye T. Local and Indirect Registration for Anchoring Handoff. Internet Draft, draft-dommety-mobileip-anchor-handoff-03. txt, July 2001
- Soliman H, Castelluccia C, El-Malki K, et al. Hierarchical Mobile IPv6 Mobility Management (HMIPv6). Internet RFC 4140, August 2005
- Campbell A T, Gamez J. IP micromobility protocols. ACM SIGMOBILE Mobile Computer and Communication Review, 2001. 45~54
- Li J, Sampalli S. A Load Balancing Hierarchical Micro-mobility Management. In: The 13th Int'l Conf on Computer Communications and Networks (ICCCN 2004), October 2004. 347~351
- Das S, Misra A, Agrawal P. TeleMIP: telecommunications-enhanced mobile IP architecture for fast intradomain mobility. IEEE Wireless Communications, 2000, 7: 50~58
- Das S, Mcauley A, Dutta A, et al. IDMP: an intra-domain mobility management protocol for next generation wireless networks. IEEE Wireless Communications, 2000, 9(3): 38~45
- Xu Y, et al. Mobile IP based micro mobility management protocol in the third generation. Internet Draft, draft-ietf-mobileip-3gwireless-ext-07. txt, June 2000
- Campbell A, Gomez J, Kim S, et al. Design, implementation, and evaluation of cellular IP. IEEE Wireless Communications, 2000, 7(4): 42~49
- Ramjee R, Varadhan K, Salgarelli L, et al. HAWAII: a domain-based approach for supporting mobility in widearea wireless networks. Networking, IEEE/ACM Transactions on, 2002, 10(3): 396~410
- Keszei C, Georganopoulos N, Turanyi Z, et al. Evaluation of the BRAIN Candidate Mobility Management Protocol. IST Summit Barcelona, September 2001
- Kato T, Takechi R, Ono H. A Study on Mobile IPv6 Based Mobility Management Architecture. FUJITSU Sci Tech J, 2001, 37(1): 65~71