

无线传感器网络 k-Anycast 通信模型研究

高德民¹ 钱焕延¹ 严筱永¹ 王晓楠^{1,2}

(南京理工大学计算机学院 南京 210094)¹ (常熟理工学院计算机系 常熟 215500)²

摘要 针对无线传感器网络多基站多源路由问题,提出一种基于 k-Anycast 技术的路由协议,研究了多基站无线传感器网络中的最大生命期问题。首先根据数据能耗和数据流量守恒建立混合整型非线性规划模型,考虑到该数学模型为 NP-hard 问题,将其进一步转化为非线性规划模型,求解到达所有基站的链路,取最优 k 条链路为路由通路,根据链路生命周期分配数据流量,达到平衡能量消耗的目的,最终实现最大化最小生命期。实验仿真表明,该通信模型可以有效延长网络的生存周期。

关键词 无线传感器网络, Anycast, 多基站

中图法分类号 TP393 文献标识码 A

k-Anycast Routing Protocol for Wireless Sensor Networks

GAO De-min¹ QIAN Huan-yan¹ YAN Xiao-yong¹ WANG Xiao-nan^{1,2}

(Computer School, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)¹

(Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, China)²

Abstract For the problem of multiple base stations in wireless sensor networks, k-Anycast technology based on routing protocols was suggested, the maximum life of wireless network based on multiple base stations was researched. First, based on all energy consumption and data traffic conservation, a combination of the nonlinear planning model was established. Because the mathematical models are the NP-hard problem, they were further changed into mixed integer nonlinear programming model to solve all the base links to link the propitiation for the routing paths. According to the link life, assigned data flow to reach balance energy consumption purposes and to maximize the life span. The simulation models indicate that the communication could prolong the life cycle.

Keywords Wireless sensor networks, Anycast, Multiple sinks

随着无线传感器网络规模的不断扩大,单基站(Sink)通信已经不能满足网络高效实时的要求,整个网络的生存周期比单纯降低某一链路能量消耗更重要。在单基站网络中,位于基站周围的普通节点同时承担数据采集和大量的数据转发业务,节点能量很容易耗尽而造成网络中断。另外,节点随机部署在条件恶劣的环境中,如果仅仅部署一个基站,当基站因各种因素失效时,整个网络将无法正常工作。为了改善传感器网络的生存期、流量分布和健壮性等,通常在传感器网络中布设多个基站,传感器节点将数据传送到性能最优的基站是传感器网络路由协议研究的主要问题。Anycast 技术可以有效解决节点与多基站通信的问题。

Anycast 作为一种网络通讯服务模型,最初诞生于 IPv6 网络,即可以用一个 Anycast 地址来标识属于不同节点的多个接口,发送给这个地址的数据包将会被传送到具有该地址标识的、根据路由协议距离度量“最近”的一个接口上(按路由协议的距离度量计算)^[1]。组播(Multicast)是一种在 IPv4 中就已经存在的网络服务,它允许服务申请者访问共享同一 Multicast 地址所标识的一组成员。Anycast 与组播的区别在于,Anycast 只访问一个 Anycast 组中距离源主机最近的一个

组成员,而 Multicast 则访问一个 Multicast 组中的所有成员^[2]。IPv6 将它与单播(unicast)、组播(multicast)并列定义,称为未来网络的 3 种服务形式之一^[3]。

为方便描述 k-Anycast 通信模型,本文做如下定义:设 A 为通信组共有特性; $G(A)$ 为共享 A 的通信组成员集合; $G(A_i)$ 为 $G(A)$ 中第 i 个成员; N 为 $G(A)$ 成员数目。k-Anycast 是指发送者与通信组中至少 k ($1 \leq k \leq N$) 个成员之间进行通信^[4]。k-Anycast 是介于 Anycast 与 Multicast 之间的一种网络服务。Anycast 与 Multicast 是 k-Anycast 的两种特殊情况, $k=1$ 时为 Anycast,而 $k=m$ (这里 m 为 k-Anycast 组成员的总数)时为 Multicast。k-Anycast 模型具有广泛的应用价值,它可以在网站镜像、DNS、负载均衡、移动多播、密码学和大规模并行计算等领域发挥重要的作用。

1 相关的工作

文献[4]提出了一种面向 Ad-hoc 网络的 k-Anycast 泛洪通信模型。泛洪模型是将客户的 k-Anycast 服务请求数据包向所有邻居节点广播出去,直到数据包的生存时间(Time to live, TTL)为零或到达 $G(A)$ 成员才停止传播的方法。该方

到稿日期:2010-09-27 返修日期:2010-12-27 本文受江苏省自然科学基金(BK2009133),中国博士后科学基金(20090451217)资助。

高德民(1980-),男,博士生,主要研究方向为无线传感器网络,E-mail:gdmnj@139.com;钱焕延 男,教授,博士生导师,主要研究方向为现代通信技术、网络技术;严筱永 男,博士生,主要研究方向为无线传感器网络;王晓楠 女,博士后,副教授,主要研究方向为无线传感器网络。

法不需要维护路由信息,简单易行,但随着网络规模增大,通信开销呈指数性增长,扩展性差,且每次通信都需等待 k 个 $G(A)$ 成员的响应,时延较长。文献[5]在 IPv6 中提出一种基于树型结构的集中式 k -Anycast 路由模型:由某中心节点充当根节点构建树型结构,将所有 $G(A)$ 成员联系起来。与无路由协议的泛洪方法比较,该方法可以节省寻找 k 个成员的时延,但其缺点是:(1)构建树型结构要求每个节点掌握全局信息,大量节点资源和网络资源被浪费;(2)当网络规模增加或 k -Anycast 服务请求频率较高时,一方面中心节点成为路由的瓶颈,另一方面中心节点与各 $G(A)$ 成员平均通信距离增加,通信开销递增,因此系统扩展性较差。文献[6]讨论自私网络中 k -Anycast 的通信策略。文献[7]提出一种基于移动 Agent 的分组 k -Anycast 路由协议。协议创建多个分组,每个分组由组长管理至少 k 个 k -Anycast 成员。

目前关于 k -Anycast 通信模型的研究仍然非常有限,并且主要集中于 IPv6 通信领域。这些 k -Anycast 模型虽然在具体实现上有所差别,但具有以下共同特点:(1)由服务提供方 Server 成员组成通信组 $G(A)$, Server 可以运行于 TCP/IP 协议下,用共享 IP 地址进行标识。客户 Object 主要从 $G(A)$ 获取服务, $G(A)$ 将 Object 任务分解,由 k 个 Server 协同完成。(2)客户 Object 一定可以找到一个通信组 $G(A)$ (至少 k 个成员)为其提供服务。

无线传感器网络不同于 IPv6 和 Ad-hoc 网络,在通信路由方面,主要存在以下不同之处:(1)依照目前传感器技术,节点无法运行 IP 协议,所以目前成熟的 TCP/IP 协议技术不能照搬到无线传感器网络中。基站可以作为 Server,多个基站组成 $G(A)$,但是,在无线传感器实际应用中,节点通常是感知数据传输给基站,而无须由 $G(A)$ 提供服务。(2)由于通信技术的限制,传感器节点 Object 不一定找得到一个通信组 $G(A)$ (至少 k 个成员),信号只能在相对固定的通信半径内传输。

基于以上原因,目前无线传感器网络 k -Anycast 通信模型还处于探索阶段。在多基站通信中,文献[8-10]提出一种 Anycast 通信模型。但 Anycast 通信并不能满足数据高传输速率下通信延迟和能量均衡的要求,特别是在只需监测覆盖区域内特定位置的情况下,Anycast 通信模型可能造成观测区域的所有节点都路由至同一个基站,剩余的基站则处于空闲状态。另外,在无线传感器网络领域中的绝大部分相关文献中,通常假设基站使用交流电,没有能量限制。但是在特殊条件下,基站随机部署在远离基础设施的区域,且使用大容量储电设备,现实条件下不可能成为能量无限设备。本文通信模型,可以有效均衡基站能量消耗。本文将 k -Anycast 通信模型的思想应用到无线传感器网络中,不需要 TCP/IP 协议的支持。

2 k-Anycast 通信模型

2.1 模型描述

在 k -Anycast 通信模型中, k -Anycast 通信组成员无差异性,可以单独或协同完成数据传输任务,全部成员组成一个通信组 $G(A)$, k -Anycast 模型针对每个通信源。在本模型中,一个属于某个通信源的 k -Anycast 组具有如下定义: k -Anycast 组成员 $G(A_i)$ 与通信源的距离(根据不同服务的需要

采用不同的度量单位来计算,例如:组成员性能和跳数等)相比通信组其他成员到通信源要近。设有 m 个源,形成的 k -Anycast 组为 $h_{i,anycast}, i=1,2,\dots,m, \{h_{i,anycast} | h_{i,anycast} \in G(A), h_{i,anycast} \cap h_{j,anycast} = \phi | h_{i,anycast} \cap h_{j,anycast} \neq \phi, i \neq j, i=1,2,\dots,m, j=1,2,\dots,m\}$, k 为源节点到达基站的个数, $k \leq |G(A)| - 1$, 一个源节点最多到达 k 个基站,这与文献[4-7]中提出的最少到达 k 个目标节点的 k -Anycast 模型不同。 $k=N$ 时,通信组 $G(A)$ 是最大的一个 k -Anycast 组, $G(A)$ 中有一个基站作为 Anycast Leader,只与其它基站通信,承担协议和分片数据整合的任务。

本模型中,每个 k -Anycast 组成员都由基站组成。基站是一个具有增强功能的传感器节点,担任网关作用,没有通信距离限制,可以自由与其他基站通信,也可以直接联入数据中心或互联网。源节点通过多条链路到达 k 个基站。所有 k -Anycast 组共享一个 Anycast Leader,如果把 Anycast Leader 作为每个源节点的最终通信目标,就可以将 k -Anycast 通信模型简化为多源多汇路通信模型。这样,应用于 Anycast、组播通信模型的很多实施方案就可以应用到 k -Anycast 通信模型中。

现有大部分路由算法都以网络总体能耗为目标函数,难以准确反映网络的生命期。本文首先分析了多基站无线传感器网络最大生命期路由问题,然后建立以生命期为最大值的数学模型,该通信模型从源节点到 k -Anycast 组之间建立多条路径进行数据传输,数据最终在 Anycast Leader 汇聚整合。根据每条路径上的最小生命期不断调整数据流量,使得数据总能在链路性能较优的多路径中传输。该算法采用多条较好的路径来取代单条最好的路径进行传输数据,避免了一味地依靠某一条路径进行数据传输造成某些节点过早死亡,最终导致网络的分割或者是该网络快速崩溃,从而延长了网络的生存周期,提高了传输的可靠性,同时也实现了负载均衡。

2.2 能量模型

从传感器节点能量的消耗过程中可以看出,节点用于通信的能量开销要远远大于用于数据计算的能量开销。要延长网络生命周期,必须尽量减少通信过程中的能耗。在设计路由协议时主要考虑节点在通信时的能量消耗情况。无线通信模块在发送和接收状态时能量消耗最大,本文分别考虑了节点发送和接收数据时能量的消耗情况。设节点 i 产生数据速率为 g_i ,且 $g_i = \{i | g_i > 0, i \in N\}$ 。节点 i 将数据传输到邻居节点 k 消耗的能量为

$$p_i(i, k) = e_{ik} \cdot f_{ik} \quad (1)$$

式中, e_{ik} , f_{ik} 分别表示节点 i 发送数据到节点 k 的单位信息能耗和数据速率,且

$$e_{ik} = \alpha + \beta \cdot d_{ik}^m \quad (2)$$

式中, α, β 是常数, d_{ik} 表示节点 i 到 k 的欧氏距离, m 为路径功耗模型参数,通常介于自由空间(d^2 功耗)信道模型和多径衰落(d^4 功耗)信道模型之间,且 $2 \leq m \leq 4$ 。节点接收数据能耗与距离无关,能耗为

$$p_r(i) = \rho \sum_{k \neq i} f_{ki} \quad (3)$$

式中, ρ 为固定常数。本模型中假设所有的节点有相同的初始能量 E_i , $E_i > 0$, 剩余能量为 ΔE_i 。节点 i 的能量模型为 $c_{ik} = e_{ik} \Delta E_i^v$, 其值用来选择下一跳节点,式中 τ, v 为常数,分别表明节点通信能耗和剩余能量的重要程度。 $(\tau, v) = (1, 0)$, 表

明链路中主要考虑通信能耗; $(\tau, \nu) = (0, 1)$, 表明链路中主要考虑节点的剩余能量; $(\tau, \nu) = (1, 1)$, 表明在形成的链路中, 通信能耗和剩余能量同等重要。

2.3 k-Anycast 通信模型

无线传感器网络中节点之间通过双向无线链路通信, 网络中的每个节点至少与一个基站连通。网络可以被抽象为一个无向图 $G(V, E)$, 其中 V 表示网络中的传感器节点和基站的集合, E 表示链路的集合。网络中的传感器节点集合记为 S , 基站集合为 $G(A)$, 则 $V = S \cup G(A)$ 。记节点 $i \in V$ 的邻居集合为 S_i , 传感器节点初始能量为 E 。每个传感器节点 $i \in V$ 连续或周期性地向基站报告所收集到的数据, 数据产生速率为 g_i 。只要任意一个基站收集到数据, 该数据就算被成功接收。由于无线传感器网络具有很强的面向应用性, 本文假定网络链路具有足够的带宽传输数据。无线信道中的冲突、干扰等可以通过物理层和链路层技术进行抑制, 目前已有大量文献对此进行研究, 而本文重点研究该类网络中的路由问题。

本文模型基于以下条件: (1) 任意源节点至少可以找到一条链路到达基站, 孤立源节点不作考虑; (2) 在通信模型中, 忽略信息传输过程中的损耗, 任意源节点产生的数据总量等于到达基站后的数据总量。在 k-Anycast 通信模型中, 将节点分为以下几种: 基站节点形成 Anycast 组, 成员为 Anycast Object, 成员中有一个担当 Anycast Leader; 传感器节点分为 Anycast Source Node (或 Source Node)、Anycast Mid Node (或 Mid Node) 和 Isolated Node, 分别为源节点、中间节点和孤立节点。Anycast Source Node 为数据源, 感知数据, 是数据产生地; Anycast Mid Node 为源节点, 担任数据转发任务, 将数据传输至基站; Isolated Node 作为备用节点, 临时处于休眠状态或者无法与其它节点建立通信连接。

源节点 (Source Node) s 存在 $m (m \leq k)$ 条链路可到达 m 个基站。某一链路中, s 经过一跳或多跳到达基站节点, 假设该链路经过 i (Tree Source 或 Tree Mid), i 的通信半径内的所有节点记为 S_i , 通信链路中每个 Tree Source 或 Tree Mid 接收到子节点的数据后, 向父节点转发。为跟踪数据在转发过程中的变化, 令 $f_{s_k s_i}$ 表示节点 i 接收到邻居节点 k 的信息量, 其中 $i \in S_k$; $f_{s_i s_j}$ 表示节点 i 发送到邻居节点 j 的信息量, 其中 $j \in S_i$ 。若节点 i 为 Tree Source, 则 $f_{s_k s_i} + g_i = f_{s_i s_j}$; 若节点 i 为 Tree Mid, 则 $f_{s_k s_i} = f_{s_i s_j}$ 。当所有节点的初始能量为 E , 数据流量为 f 时, 节点 i 的生命周期为

$$T_i(f) = \frac{E_i}{(\rho + \sum_{j \in S_i} e_{ij}) \cdot \sum_{j \in S_i} f_{s_i s_j}}$$

$$\text{或 } T_i(f) = \frac{E_i}{\rho \sum_{i \in S_k} f_{s_k s_i} + \sum_{j \in S_i} e_{ij} \cdot \sum_{j \in S_i} f_{s_i s_j}} \quad (4)$$

网络在一定数据流量 f 下的生命周期 $T_{\text{sys}}(f)$ 为所有节点的最小生命周期:

$$T_{\text{sys}}(f) = \min_{i \in N} T_i(f) = \min_{i \in N} \frac{E_i}{(\rho + \sum_{j \in S_i} e_{ij}) \cdot \sum_{j \in S_i} f_{s_i s_j}} \quad (5)$$

高效的网络通信模型的目标是将最小生命周期最大化, 尽可能地延长网络寿命, 使在单个节点上的能量消耗均衡到整个网络中。无线传感器网络通信研究的目的就是最大化网络寿命, 本文为网络通信建立的数学模型为

$$\text{Max } \min_{i \in N} \frac{E_i}{(\rho + \sum_{j \in S_i} e_{ij}) \cdot \sum_{j \in S_i} f_{s_i s_j}}$$

$$\begin{aligned} \text{s. t. } & \sum_{k, i \in N, i \in S_k} f_{s_k s_i} + g_i = \lambda^{S_i S_j} \sum_{j \in S_i} f_{s_i s_j}, \forall i \in N - G(A), \\ & \forall j, k \in N \\ & \sum_{j \in S_i} \lambda^{S_i S_j} = 1 (1 \leq i \leq N) \\ & \lambda^{S_i S_j} = 0, 1, f_{s_i s_j}, f_{s_k s_i} \geq 0, \forall i, k \in N, \forall j \in S_i \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $\lambda^{S_i S_j}$ 用来表示链路状态, 如果节点 i 到 j 存在一条链路, 则 $\lambda^{S_i S_j} = 1$; 否则 $\lambda^{S_i S_j} = 0$ 。式(6)中等式 1 表示节点 i 产生的数据经过一跳或多跳到达基站的数据流量等于节点 i 产生的数据流量, 数据经过的链路 $\lambda^{S_i S_i} = 1$, 其他 $\lambda^{S_i S_i} = 0$ 。式(6)中等式 2 表示节点 i 从 k 接收到的数据总流量等于从节点 i 流出到其他节点 j 的数据总流量。本文不考虑数据在传输中的损耗, 式(6)中等式 2 体现数据信息保持守恒。节点 i 的能量消耗包括发送和接收过程的总能耗, 根据式(2)、式(3), 节点能耗消耗分别考虑。节点 i 在时间 $T_{\text{sys}}(f)$ 内总能耗不会超过节点能量设定值 E_i 。

$$T_{\text{sys}}(f) (\rho \sum_{i \in S_k} f_{s_k s_i} + \sum_{j \in S_i} e_{ij} \cdot \sum_{j \in S_i} f_{s_i s_j}) \leq E_i,$$

$$f_{s_k s_i} \geq 0, f_{s_i s_j} \geq 0, e_{ij} \geq 0$$

令 T 表示网络生存周期, T 表示网络从开始运行到出现第一个节点无法将数据送出的时间间隔。 T 代替 $T_{\text{sys}}(f)$, 考虑能量数学模型为:

Max T

$$\text{s. t. } \sum_{k, i \in N, i \in S_k} f_{s_k s_i} + g_i = \lambda^{S_i S_j} \sum_{j \in S_i} f_{s_i s_j},$$

$$\forall i \in N - G(A), \forall j, k \in N$$

$$T (\rho \sum_{i \in S_k} f_{s_k s_i} + \sum_{j \in S_i} e_{ij} \cdot \sum_{j \in S_i} f_{s_i s_j}) \leq E_i$$

$$\sum_{1 \leq j \leq M} \lambda^{S_i S_j} = 1 (1 \leq i \leq N, M \leq k)$$

$$\lambda^{S_i S_j} = 0, 1, f_{s_i s_j} \geq 0, \forall i \in N, \forall j \in S_i, f_{s_k s_i} \geq 0,$$

$$f_{s_i s_j} \geq 0, e_{ij} \geq 0 \quad (7)$$

模型的目标是求解 T 的最大值, 从该数学模型中可以看出, 该模型是一个混合整数非线性规划模型, 是 NP 难问题^[11]。在 k-Anycast 模型中, Source Node 产生数据后将数据分片通过 m 条链路同时发送至 $m (m \leq k)$ 个基站, 可以将 $\lambda^{S_i S_i}$ 分成 m 个部分, 所以 $\lambda^{S_i S_j} \in [0, 1]$, $\lambda_m^{S_i S_i}$, $m = 1, 2, \dots, m$, $\sum_{m=1}^m \lambda_m^{S_i S_i} = 1$ 。为了考虑模型中网络寿命与数据流量的关系, 令 $V_{s_i s_j}$ 表示节点 i 在某一链路上传输的数据总量, 且 $V_{s_i s_j} = T \cdot f_{s_i s_j}$ 。如果 Source Node 一跳到达基站 l , 则 $V_{s_i s_l} = T \cdot f_{s_i s_l}$ 。令 $\mu^{S_i S_j} = T \cdot \lambda^{S_i S_j}$, 则上面数学模型变为

Max T

$$\text{s. t. } \sum_{k, i \in N, i \in S_k} V_{s_k s_i} + T g_i = \lambda^{S_i S_j} \sum_{j \in S_i} V_{s_i s_j},$$

$$\forall i \in N - G(A), \forall j, k \in N$$

$$\rho \sum_{i \in S_k} V_{s_k s_i} + \sum_{j \in S_i} e_{ij} \cdot \sum_{j \in S_i} V_{s_i s_j} \leq E_i, \forall i \in N$$

$$\sum_{j \in S_i} \mu^{S_i S_j} = T \quad (1 \leq i \leq N)$$

$$T, V_{s_k s_i}, V_{s_i s_j}, \mu^{S_i S_j} \geq 0$$

$$(1 \leq i, j, k \leq N, i \neq j, k \neq j, 1 \leq l \leq M) \quad (8)$$

该数学模型是一个非线性规划模型, 网络通信问题转化为求解非线性规划模型数学问题。

2.4 k-Anycast 通信模型的启发式算法

在模型中, 利用分布式 Bellman-Ford^[12] 算法解决式(8)问题, 使每个 Source Node 向所有的 Anycast Object 广播测试信息包。数据扩散满足式(8)的要求, 最终数据分发到所有的 Anycast Object。假设源节点 i 到基站有 m 条链路, 用 P_i^m 表

示,且 $m \leq k$; 另假设其中一条链路为 p , 且 $p \in P_i^n$, 它表示节点 i 经过中间节点 j_1, j_2, \dots, j_l 到达一个基站; $L_p(f)$ 为所有节点的生命周期向量组, 且 $L_p(f) = [T_i(f), T_{j_1}(f), T_{j_2}(f), \dots, T_{j_l}(f)]$. 由式(5)可得, 该链路的生命周期由最小节点生命周期 $\sum_{T_i(f) \in L_p(f)} \min T_i(f)$ 决定. 获取 k -Anycast 通信模型的启发式算法如下.

步骤 1 $i = \{1\}; N = \{1, 2, \dots, n\}$, 每个 Source Node i 形成 $G(A)$ 条链路.

步骤 2 如果源节点 i 发送数据到基站的 $G(A)$ 条链路, $L_p(f)$ 按照从大到小排列, 取前 k 条链路为有效链路, 剩余链路为无效链路. 若 $i = n$, 则停止, 否则转向步骤 1.

m 条链路中每条链路的数据流量由生命周期的大小决定, 节点 i 向 m 条链路发送的数据量占总数据量的大小为 θ_i , $i = 1, 2, \dots, m$.

$$\theta_i = \frac{\sum_{T_i(f) \in L_p(f)} \min T_i(f)}{\sum_{\rho=1}^m \sum_{T_i(f) \in L_p(f)} \min T_i(f)} \quad (9)$$

随着运行时间的延长, 各条链路上的节点最短生命期不断变化, 源节点 i 在 m 条链路上的流量每隔一段时间 t_{set} , 需要对每条链路上的数据流量进行调整. 假设: 某一链路的最小生命周期为 $T_i(f)$, 另一链路最小生命周期为 $T_j(f)$, 且 $T_j(f) > T_i(f)$; 分片的数据大小 ϵ 为平衡节点寿命. $T_i(f)$ 链路中减去一定的数据流量 $\lambda \epsilon_i$, 将 $\lambda \epsilon_i$ 增加到 $T_j(f)$ 链路中, 经过流量调整, m 条链路上最小生命周期趋于相等.

$$T_j(f) + \frac{E_j}{e_{jk} \lambda \epsilon_i} \geq T_i(f) \quad (10)$$

图 1 中源节点 $S1$ 形成两条链路到达 $G(1), G(2)$, 分别为: $S1 \rightarrow G(1), S1 \rightarrow G(2)$. 令 $\delta = 0.001$, 可得 $\min T_{S1 \rightarrow G(1)} = 2.63 \times 10^5$, $\min T_{S1 \rightarrow G(2)} = 4.0 \times 10^5$, $S1$ 数据流量分配为 $\theta_{S1 \rightarrow G(1)} = 0.385$, $\theta_{S1 \rightarrow G(2)} = 0.615$, $T_{sys}(f) = 6.84 \times 10^5$. 如果采用 Anycast 模型 $T_{anycast}(f) = 4.0 \times 10^5$, 则网络生命期提高 $(T_{sys}(f) - T_{anycast}(f)) / T_{anycast}(f) = 70\%$, 网络在多基站通信下明显比单基站通信的生命周期长.

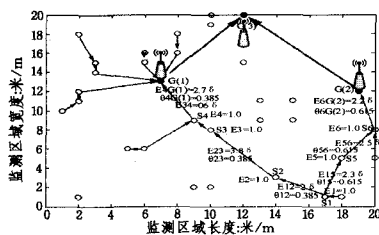


图 1 数据流量分配模型

3 路由分析

3.1 Anycast Leader 选举

Anycast Leader 承担所有基站的协调和数据整合任务, 基站通过协商选举一个 Sink 作为 Anycast Leader, 它需要具备以下两个特点: (1) 有足够的能量自由与其它所有基站通信; (2) 是最远离监测区域的; (3) Anycast Leader 与其它基站通信时, 尽量降低对节点间通信的干扰. Anycast Leader 只与其它基站通信, 不与传感器节点通信, 目的是降低自身的通信压力. 当接收到其它基站传输的数据分片后, 将其组装分片, 去除冗余, 累积数据后发送到数据中心或联入互联网.

Anycast Leader 选举方式如下: 某一个 Sink 节点首先声明自己为 Anycast Leader, 然后将自己的信息包括声明发送给邻居 Sink, 如果邻居 Sink 在上文提到的要求中比前一个 Sink 节点更具有优越性, 则宣称自己为 Anycast Leader, 继续向邻居 Sink 转发. 如果优越性差, 则必须将前一个 Sink 节点的相关信息转发, 直到所有的 Sink 选举出一个最优的 Anycast Leader.

Anycast Leader 相对于其它基站能量消耗较大, 当它的剩余能量低于系统预先设定的阈值时, 将降为普通基站, 同时通知其它基站, 按照前面规定特征重新发起 Anycast Leader 选举. 该策略可以有效平衡基站的能量消耗.

3.2 k-Anycast 邻居节点发现

孤立节点 i 加入到 k -Anycast 通信网络中, 需要 i 尽量找到 k 个父节点, 形成至少 k 条链路到达 k 个基站节点. 假设节点 i 以半径 r_1 广播父请求信息包, 收到 p_1 个回复; 如果 $p_1 < k$, 节点 i 则增加广播半径到 r_2 , 以尽量保证收到的回复 $p_2 \geq k$, 如图 2 所示, $\frac{\pi r_i^2}{p_i} = \frac{\pi r_{i+1}^2}{p_{i+1}} \Rightarrow r_{i+1} = \sqrt{\frac{p_{i+1}}{p_i}} \cdot r_i$. 节点 i 在适当增加通信半径后, 如果收到的回复个数 $p_2 \geq k$, 则按照上面的启发式算法选择最优 k 条路径达到 k 个基站. 节点 i 在进行数据传输时将数据分片, 在 k 条链路上传输, 如果收到的回复个数 $p_2 < k$, 则所有的链路根据需要参与数据传输. 每个节点发现 k 个邻居节点, 只需要广播一次信息包即可, 在回复个数小于 k 时, 也只需要再一次增大传输半径而已, 所以复杂度是常数, N 个节点的计算复杂度为 $O(N)$, 计算复杂度较小.

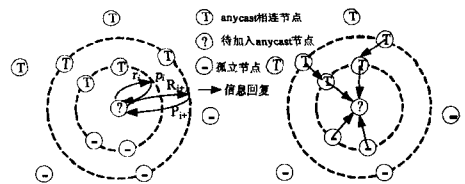


图 2 节点搜索邻居节点过程

4 性能分析

仿真在 NS-2 环境中实现, 随机产生 3~7 个 Sink 节点和 100~300 个普通传感器节点, 节点随机分布在 $100 \times 150 \text{m}^2$ 的平面区域, 所有节点的传输功率可以调节, 传输最大半径距离 $R = 20 \text{m}$, 在传输距离内的任意两个节点可以互相直接通信. 数据产生率均为 $g_i = 1 \text{kbit/s}$, 数据包大小为 512 Bytes, 元数据大小为 25 Bytes, 传感器节点的初始能量 $E_{start} = 10 \text{J}$, 发送单位数据能耗系数 $\alpha = 50 \text{nJ/b}$, $\beta = 0.0013 \text{pJ/b/m}^4$, 接收单位数据能耗系数 $\rho = 50 \text{nJ/b}$, 能量模型 $(\tau, v) = (1, 1)$.

图 3 所示为网络生命期与网络规模之间的关系. 从图 3 (a) 中可以看到: 当 $k = 2$ 时, 随着网络中节点数量的增加, 网络生命期也逐渐减少; 随着基站数量的增加, 网络生命期逐渐增加; 随着基站数量的增多, 新加入基站对网络生命期的提升幅度逐渐减少. 这是因为节点数量的增加, 引起节点间距的缩短, 有利于发射功率的降低以及数据相关性的提升, 同时路由算法能够有效地均衡节点数据流量负载, 这些有利因素超过了网络原始数据率增加所带来的能耗增加, 因而使得网络生命期增加; 而在网络中引入新的基站, 能够减少节点与基站间的距离, 降低节点负载, 提高网络生命期; 随着基站数量的

增大,新加入的基站只能影响邻近基站的路由路线,对网络的影响逐渐变小,因而对网络生命期的提升效果逐渐减弱。当 $k=3,4$ 时,网络生命期与节点数量的关系如同 $k=2$ 时的曲线走向,但是网络生命期都得到一定程度的提高: $G(A)=7$, $k=3$ 时,网络生命期要高于 $G(A)=7, k=2$ 的情况; $k=4$ 时结果基本一致,这是由于数据流被分成更多的链路传输,节点负载进一步被减低,网络生命期得到提高。如果假设 $k=1$,那么网络就完成变成了 Anycast 通信模型,其结果基本同于 $k=2$ 的情况。

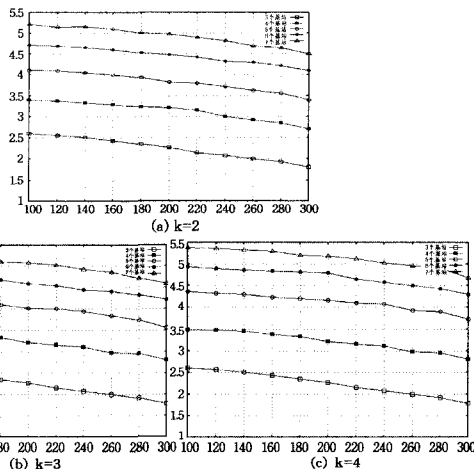


图3 网络生命期与节点数量的关系

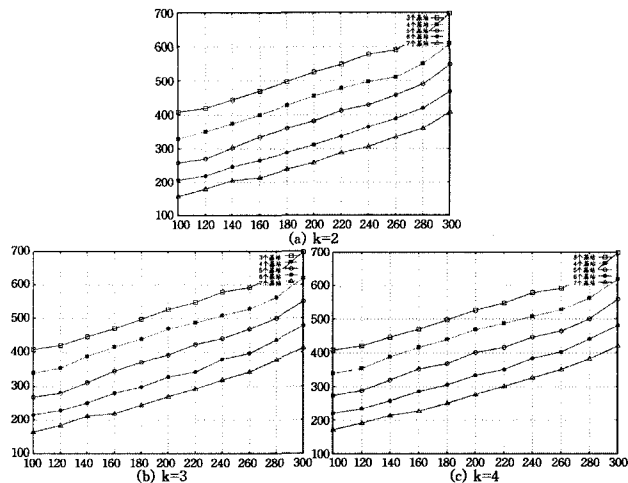


图4 网络总能耗与节点数量的关系

图4为网络总能耗与节点数量的关系:随着网络规模的增加,网络总能耗率呈上升趋势;随着基站的增加,网络总能耗率逐渐降低;而当基站数量增多时,新加入基站对网络平均能耗率的降低程度也减少。从图4(a)所示的变化曲线上可以体现出 $k=2$ 时的趋势。在相同的基站数量下,随着 k 值的增大,网络总能耗也逐渐增加,这是由于新增加的链路在通信距离或能耗上都劣于原链路,当链路由2条增加到3条时,能量消耗也相应的增加,所以虽然在图3中可以发现 k 值增大可以有效延长网络生命周期,但是同时也增大了网络总能耗。在 k 值较小时,网络比较容易出现第一个死亡节点,因此, k 值较大时,网络比较容易同时出现大量死亡节点,在 k -Anycast 通信模型中,选择一个合适的 k 值至关重要。在需

要实时高效的监测时,可以设置 k 值较大,网络建立的链路可以维持相当长的时间;在对监测实时性要求不高、对网络总能耗要求较高时,可以设置 k 值较小,保证数据一直保持在一条最短的路径上传输。

结束语 本文对多基站无线传感器网络中的最大生命期路由由算法进行了研究,建立以网络生命期最大化为目标的非线性规划数学模型,以此提出一种多基站 k -Anycast 通信模型。该模型主要是在网络中从源节点到 k -Anycast 组之间建立多条路径最多到达 k 个基站来进行数据传输,该算法采用多条较好的路径来取代单条最好的路径进行数据传输,避免了依靠单一路径进行数据传输极易造成某些节点过早死亡的现象。该模型可以有效提高传输的可靠性和实现负载均衡,最后的仿真实验也表明 k -Anycast 通信模型可以有效延长网络的生存周期。

参考文献

- [1] Weber S, Cheng L. A survey of Anycast in IPv6 networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(1): 127-132
- [2] Doi S, Ata S, Kitamura H. Protocol design for anycast communication in IPv6 network [A]// Proceedings of 2003 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing (PACR MI '03) [C]. New York, USA; IEEE Press, 2003: 470-473
- [3] Jia W, Zhou W, Kaiser J. Efficient algorithm for mobile multicast using anycast group[J]. IEEE Proc. Communications, 2001, 148(1): 14-18
- [4] Wu B, Wu J. k -Anycast routing schemes for mobile Ad Hoc networks [A]// The 20th International Parallel and Distributed Processing Symposium [C]. Rhodes Island, Greece; IEEE, 2006
- [5] Wang X N. Analysis and design of a k -Anycast communication model in IPv6 [J]. Computer Communications, 2008, 31(10): 2071-2077
- [6] Wang W, Li X Y, Frieder O. k -Anycast game in selfish networks [A]// Proceedings of the 13th International Computer Communications and Networks [C]. Chicago, USA; IEEE, 2004: 289-294
- [7] Xu Xin, Gu Yun-li. A Distributed k -Anycast Routing Protocol Based on Mobile Agents [C]// Proceedings of the 2009 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM). 2009
- [8] Chang J, Tassiulas L. Maximum lifetime routing in wireless sensor networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2007(12)
- [9] Buratti C, Orris J, Verdone R. On the design of tree-based topologies for multisink wireless sensor networks [Z]. September 2006
- [10] Kalantari M, Shayman M. Design optimization of multi-sink sensor networks by analogy to electrostatic theory [C]// IEEE WCNC. 2006
- [11] Garey M R, Johnson D S. Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness [M]. New York; Freeman, 1979: 245-248
- [12] Cormen T H, Leiserson C, Rivest R L, et al. Introduction to Algorithms [M]. Cambridge, MA; MIT Press, 2001