

MANET 网络中节约能量的组播路由协议

罗 瑛, 黄传河, 张媛媛, 余雄伟, 周 浩

(武汉大学计算机学院, 武汉 430072)

摘 要: 从平衡节点能量消耗的角度出发, 考虑无线广播的特性, 提出了一种新的节约能量的组播路由协议。基本原理是, 利用 Wireselthier 等提出的最小增量的思想, 考虑不同节点能量消耗的不平衡, 提出一种节约能量的 multicast 树构造算法, 在使网络的总能量消耗减小的条件下实现节点能量消耗的分布平衡。协议通过区域预测机制来维护 multicast 树。

关键词: 移动 Ad hoc 网络; 组播路由; 节约能量路由

Energy-efficient Multicast Routing Protocol in Mobile Ad Hoc Networks

LUO Ying, HUANG Chuanhe, ZHANG Yuanyuan, YU Xiongwei, ZHOU Hao

(School of Computer, Wuhan University, Wuhan 430072)

【Abstract】 This paper introduces a new multicast routing protocol that exploits the broadcast nature of the wireless communication environment and addresses the need for energy-efficient operation. On the construction of energy-efficient multicast tree, a node joins the multicast tree by taking into consideration not only the incremental cost but also the energy consumption of it. This protocol uses a localized prediction scheme for tree maintenance. It provides a scheme to balance the energy consumption among all nodes.

【Key words】 Mobile ad-hoc networks(MANET); Multicast routing; Energy-efficient routing

在 Ad Hoc 网络中移动节点通过电池来供应能量, 因此移动节点的能量有限。在战争、灾难救助等特殊条件下, 更换移动节点的电池是不可想象的。如果部分节点的电池被耗尽, 整个网络将变成多个分离的网络, 网络的生命周期减小。在路由协议的设计中如何有效使用能量、延长网络生命周期十分重要。本文的目标是构造一个节约能量的 multicast 树。

在 Ad Hoc 网络中, 信息的发送必须合理分配, 才能避免对网络中部分节点过度使用。为了使网络的生存周期最大化, 信息发送必须保证网络总的能量消耗最小, 而且平均地分配给所有节点。在设计协议过程中, 获得能量消耗最小化性能与能量消耗分布平衡之间总是存在矛盾, 如何在二者之间找到一个平衡点是一个有待解决的问题。本文提出一个新的 multicast 树的构造算法, 试图通过这一算法解决该问题。

本文在基于节点的无线 Ad Hoc 网络环境中, 提出一种基于权重的实现节点之间能量消耗平衡的 multicast 树构造算法, 通过区域预测机制动态维护 multicast 树。

1 相关工作

信息通过组播协议传输的过程是源节点向多个目的节点发送数据包的过程。近年来出现了大量的面向 MANET 网络的组播路由协议, 按其节点的组织结构, 可分为两类: 基于网状结构和基于树状结构。

基于网状结构的组播路由协议中, 源节点与目的节点之间存在多条路径, 数据包传输过程具有较好的健壮性。在丢包率和网络延迟等性能方面基于网状结构的组播优于基于树状结构的组播。

在基于树状结构的组播路由协议中, 源节点与目的节点之间仅有一条路径, 减少网络中节点的能量消耗。文献[6]通过定量的分析提出, 基于网状结构组播的能量消耗是基于树

状结构组播的 $(f+1)/2$ 倍, 其中 f 表示网络中平均每个节点拥有的子节点个数。

关于建立 multicast 树的研究, 已有较多结果。例如 Dijkstra 提出了一种基于最短路径树的方法。其基本思想是从源节点到各子节点分别计算各自最短路径, 并将其组成以源节点为根的树。该方法并不能保证生成树的成本最小。Prim 提出一种基于 MST 的算法, 基本思想是从源节点开始每次向树中增加一个离树最近(成本最小)的节点, 直到 multicast 组中所有目的节点全部加入到树中。该方法基于有线网络, 不能充分利用无线广播的特性。

文献[1]提出一种节约能量的 multicast 树构造算法 MIP。MIP 对 Prim 算法进行改进, 在基于节点的无线 Ad Hoc 网络环境中依次选取具有 MIC (Minimum Incremental Cost) 性质的目的节点, 添加进 multicast 树。将 $P_{i,j}$ 定义为节点 i 与节点 j 之间链接的能量消耗, $P(i)$ 为 multicast 树中传输节点 i 用于广播的能量消耗。节点 i 与节点 j 之间链路建立增加的能量消耗表示为: $P_{i,j} = P_{i,j} - P(i)$ 。Prim 算法将 $P_{i,j}$ 作为节点的选择标准; MIP 算法将 $P_{i,j}$ 作为节点的选择标准。

文献[3]提出一种接收节点驱动模式的 multicast 树构造算法。当网络中出现一个新的需要加入 multicast 组的接收节点时启动树的构造机制。该接收节点通过发送 JoinReq 数据报并接收 Reply 数据报, 从 multicast 树中选择最近的节点作

作者简介: 罗 瑛(1980—), 男, 硕士生, 研究方向: 计算机网络, 分布并行计算; 黄传河, 博士、教授、博导; 张媛媛、余雄伟、周 浩, 硕士生

定稿日期: 2004-06-23 **E-mail:** looy_luo@126.com

为接入端口, 将接收节点添加到 multicast 树。接收节点驱动式算法降低 multicast 树构造过程中的网络开销。同时由于选取最近的节点作为接入端口具有较低的丢包率。

本文在基于节点的无线 Ad Hoc 网络环境中, 通过接收节点驱动模式来构造 multicast 树。基于 Wieselthier 等提出的最小增量的基本思想^[1], 考虑不同节点能量消耗的不平衡, 提出一种节约能量的 multicast 算法, 在使网络中总的能量消耗减小的条件下实现节点能量消耗的分布平衡。

2 协议假设与网络模型

在协议设计的过程中, 认为移动 Ad Hoc 网络拓扑结构是一个由 n 个节点构成的完全图 $G: G=(V, E)$, V 代表网络中所有节点的集合且节点分布在二维平面内; E 代表网络中节点之间的链路(边)集合。同时假设:

(1) 每个节点都通过全球卫星定位系统(GPS)获得自己的位置坐标, 同时还可以由此获得网络中其他节点的位置坐标。

(2) 网络中每个节点都是移动的, 即节点的位置经过一段时间后可能会改变。每个节点知道其他节点的平均移动速度。

(3) 网络中每个节点能够调整自己的发送功率, 但不超过最大值 P_{\max} 。

(4) Ad Hoc 网络中节点的能量消耗由两部分构成: 接受处理信息的能耗与广播的能耗。在此假设能耗中用于广播的能耗占大多数, 在计算总的能耗时只考虑广播的能耗。

(5) 采用最常见的信号衰减模型 $p \sim \gamma^{-\alpha}$, 其中 p 为节点的收节点与发送节点之间的距离, 指数 α 通常在 2~4 之间(由具体的环境决定)。假设节点 i 与节点 j 之间通信所需的能量 $P_{i,j} = \gamma_{i,j}^{\alpha}$ 。其中 $\gamma_{i,j}$ 表示节点 i 与节点 j 之间的距离。

(6) 移动节点使用全向辐射天线。

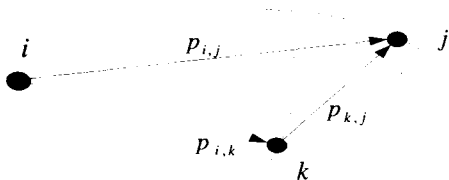


图 1 $i \rightarrow j$ 和 $i \rightarrow k \rightarrow j$ 的比较

如图 1 所示, 节点 i 是源节点, 节点 j, k 是目标节点, 且 $\gamma_{i,j} > \gamma_{i,k}$ 。在有线网络中, 信息由节点 i 发送给节点 k, j 时, 节点 i 分别将信息发送给节点 k 和节点 j 。节点 i 的能量消耗为 $P_{i,k} + P_{i,j}$ 。在无线网络中, 由无线广播的特性知道, 如果节点 i 的发送能量 $P(i) = \gamma^{\alpha}$, 那么所有到节点 i 的距离小于 γ 的节点都将接收到节点 i 发送的信号。在这种情况下可以使节点 i 的发送能量达到 $P_{i,j}$, 节点 j 和节点 k 都将接收到信号。节点 i 的能量消耗为 $P_{i,j}$ 。在无线 Ad Hoc 网络中, 定义节点 i 的能量消耗(发送能量) $P(i) = \max_{s \in S} \gamma_{i,s}^{\alpha}$ 。其中 S 表示节点 i 的子节点的集合。

对于 multicast 树 T , 其总成本定义为: $COST(T) = \sum_{i \in D} P(i)$, 其中 D 是 multicast 组中节点的集合。

移动 Ad Hoc 网络中节约能量的路由问题可以定义为: 给定网络的拓扑 $G = (V, E)$, 找到一个 multicast 树 T , 使网络中总的能量消耗 $COST(T)$ 最小。

3 协议描述

协议在基于节点的无线 Ad Hoc 网络环境中构造和维护节约能量的 multicast 树。构造 multicast 树的过程中, 利用接收节点驱动模式将需要加入 multicast 组的接收节点添加到 multicast 树。在选择中间传输节点的过程中, 考虑无线 multicast 的特性, 将 $P'_{i,j} = P_{i,j} - P(i)$ 作为判断条件。为了延长网络的生命周期必须平衡网络中传输节点的能量消耗, 协议将 $\omega_i = E_i^{\text{原}} / E_i^{\text{Now}}$ 作为判断条件, 其中 $E_i^{\text{原}}$ 表示传输节点 i 初始状态下的能量, E_i^{Now} 表示传输节点 i 当前剩余的能量。

由于节点的不断运动, multicast 树中的传输路径可能随时破裂。为了保证协议在移动网络环境下具有较低的丢包率, 维护过程中使用区域预测方法来动态维护 multicast 树。

3.1 Multicast 树的构造

具有 n 个移动节点的无线网络中, multicast 树由一个源节点与若干个目的节点构成。用接收节点驱动模式构造 multicast 树, 当网络中出现新的接收节点需要加入 multicast 树时, 需要从 multicast 树中选择节点作为其接入节点。如何选择最优的接入节点是一个关键问题。对接入节点的选择算法描述分为:

接收节点 R (非树中节点) 的算法:

BEGIN

While (接收节点 R 需要加入 multicast 树)

{

节点 R 广播一个带有确定生命周期(TTL)的 JoinReq 数据报。

While (节点 R 收到 Reply 数据报)

{

读取 Reply 数据报中的信息。

计算接入节点 I_i 的链接权重 $Q_i = \omega_i * P'_{i,R}$

/* 其中 $P'_{i,R}$ 表示建立 $i \rightarrow R$ 链接后网络消耗能量的增量, 当

$P_{i,R} > P(i)$ 时 $P'_{i,R} = P_{i,R} - P(i)$; 当 $P_{i,R} \leq P(i)$ 时 $P'_{i,R} = 0$ */

}

节点 R 选择链接权重最小的接入节点 I_{\min} , 向节点 I_{\min} 发送

JoinConf 数据报。通过节点 I_{\min} 将节点 R 添加到 multicast 树中。

}

END

树中节点 I_i 的算法:

BEGIN

While (节点 I_i 收到 JoinReq 数据报)

{

计算节点 I_i 当前的能量状况 $\omega_i = E_i^{\text{原}} / E_i^{\text{Now}}$ 。

计算节点 I_i 使用的传输能量 $P(i)$ 。

生成 Reply 数据报 (包含 $\omega_i = E_i^{\text{原}} / E_i^{\text{Now}}$ 和 $P(i)$)。

向节点 R 发送 Reply 数据报。

}

END

下面通过一个例子说明 multicast 树构造算法的执行情况。multicast 树由源节点 S 与目的节点 $\{I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6\}$ 构成, 移动节点 R 为待加入节点, 如图 2(a)所示。节点 R 广播 JoinReq 数据报, 并接收到由 I_1, I_2, I_4 发送的 Reply 数据报。通过对 multicast 树中节点 (I_1, I_2, I_4) 权重的计算, 得到 $Q_1 < Q_2 < Q_4$ 。选择节点 I_1 作为接入节点。如图 2(b)。

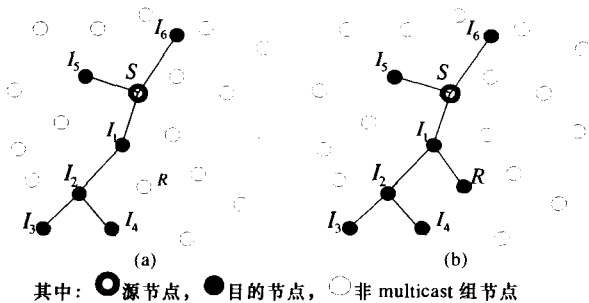


图2 Multicast 树构造算法的执行情况

3.2 Multicast 树的维护

在 Multicast 树维护过程中,许多路由协议使用主动应答来监测链路状态,当发现链路断开时才修复或重新查找路由,这种方式降低了数据报发送的成功率。本文中协议通过区域预测的方法来预测网络中某条链路保持连接的时间,根据该时间判断是否需要对该链路进行修复,从而达到维护 multicast 树的目的。

移动 Ad Hoc 网络中,假定网络中所有节点主机处于同一个自由空间传播模型中,信号强度仅与传输距离有关。某一时刻网络中任意两个节点,若二者之间的距离不大于有效传输距离,可认为两节点此时能够保持连接。基于这种思想,通过全球定位系统 GPS 获得节点的坐标、运动速度和运动方向,然后采用以下公式对每条链路的连接时间进行预测^[5]。

$$t_p = \frac{-(ab + cd) + \sqrt{(a^2 + b^2)R^2 - (ad - cb)^2}}{(a^2 + b^2)} \quad (1)$$

其中: $a = v_1 \cos \theta_1 - v_2 \cos \theta_2$, $b = x_1 - x_2$, $c = v_1 \sin \theta_1 - v_2 \sin \theta_2$, $d = y_1 - y_2$ 。式中 t_p 为两节点 i, j 保持连接的最小时间。 v_1, v_2 是两节点的平均移动速度。 θ_1, θ_2 是节点的移动方向。

$(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ 是节点 i 与节点 j 的坐标。 R^2 代表当前移动节点 i, j 之间的距离。在式 (1) 中,对于已保持连接的两个节点,当移动方向与速度一致时, t_p 为无穷大,即可以一直保持连接。若 t_p 为负数,则认为两节点不能保持连接。

在 multicast 树中,每一个节点具有一张邻居组播树表 NMT(Neighbor Multicast Tree Table)。NMT 表的结构见表 1。

表1 NMT 表的结构

Multicast Group Address	Tree Node ID	NodeDistance	NMTExistence Timer
...

当节点接收到其他邻居节点发送的数据报时,节点将相关的信息保存在 NMT 表中,同时刷新有效计时器。当某节点 NMT 表的有效计时器过期时,清空 NMT 表。

multicast 树的维护算法流程如下:

Step1: 当 multicast 树中的节点 I_b 收到来自父节点 I_p 的数据报时,启动区域预测机制。 t_p 为节点 I_b 在父节点 I_p 的发送范围之内的时间。 t_k 为重新建立连接所需的时间。利用式 (1) 进行区域预测获得 t_p 。若 $t_p > t_k$, 节点 I_b 与节点 I_p 之间的链路即将断开,继续执行 Step2。

Step2: 根据 NMT 表中的信息,节点 I_b 广播“请求握手”数据报。

Step3: 邻居节点 I_n 收到“请求握手”数据报后,如果满足以

下两个条件,发送“回答握手”数据报给节点 I_b 。“回答握手”数据报包含邻居节点 I_n 当前的能量状况 $\Omega_n = E_n^{\text{旧}} / E_n^{\text{Now}}$ 和当前使用的传输能量 $P(n)$ 。

条件 1: 节点 I_b 是节点 I_n 维护的 NMT 表中相邻组播组中的成员。

条件 2: $\gamma_{nb} < \gamma_{pb}$, 其中: γ_{nb} 是节点 I_n 所维护的 NMT 表中对应的节点 I_n, I_b 之间距离。 γ_{pb} 是节点 I_p 与节点 I_b 之间的距离。

Step3: 若节点 I_b 收到“回答握手”信息后,从发送“确认握手”数据报的邻居节点中选出 $Q = \omega_n(P_{p,n} + P_{n,b})$ 最小的邻居节点 I_{\min} ,向邻居节点 I_{\min} 发送消息修复链路。若节点 I_b 没有收到“确认握手”数据报,利用平面受限的洪泛的方法来重新修复链路。

3.3 性能分析

由接收节点驱动模式构造 Multicast 树的消息复杂度为 $O(n^2)$, 其中 n 为网络的节点数。因此本算法的消息复杂度为 $O(n^2)$ 。移动 Ad hoc 网络中的组播路由协议除了支持移动性以外,其能量的有效性利用也是重要的指标。协议的主要优点在于,在 multicast 树构造过程中利用无线广播的特性,同时考虑树中节点的能量消耗,平衡不同传输节点之间的能量消耗,有效地延长网络的生命周期;树的维护算法在网络节点发生变化时能及时地更新连接,较好地适应了网络拓扑结构的易变性。

4 结束语

移动 Ad Hoc 网络是一种取消基站的无线网络,网络中的每个节点本身要充当路由器的角色。不同于固定网络,Ad Hoc 网络中移动节点的能量由电池供应,因此在 Ad Hoc 网络中进行路由选择时如何有效的使用电池能量是一个关键问题。本文提出的组播路由协议,在基于节点的无线 Ad Hoc 网络中,构造 multicast 树。由于网络中不同节点的能量消耗是不同的,经过一段时间的消息发送后,一部分节点的剩余能量较其他节点少。针对这种情况,在构造 multicast 树时,不但考虑链路的能耗,而且将节点剩余的能量考虑在内。在移动 Ad Hoc 网络中,平衡结点的能量消耗是一种新的思想,不同的特殊环境,对获得能量消耗最小化与能量消耗分布平衡的要求是不同的,有待于进一步的研究。

参考文献

- Wieselthier J, Nguyen G, Ephremides A. On the Construction of Energy-efficient Broadcast and Multicast Trees in Wireless Networks. IEEE INFORCOM 2000, 2000: 585-594
- Wieselthier J, Nguyen G, Ephremides A. Algorithms for Energy-efficient Multicasting in Ad Hoc Wireless Networks. MILCOM 1999, 1999: 1414-1418
- Ozaki T, Kim J B, Suda T. Bandwidth-efficient Multicast Routing Protocol for Ad-hoc Networks. In: Proceedings of IEEE ICCCN'99, 1999: 10-17
- Cheng M X, Sun Jianhua, Min M, et al. Energy-efficient Broadcast and Multicast Routing in Ad Hoc Wireless Networks. In: Proceedings of IEEE ICCCN'2003, 2003: 87-94
- Su W, Gerla M. IPv6 Flow Handoff in Ad Hoc Wireless Networks Using Mobility Prediction. GLOBECOM '99, 1999: 271-275
- Youn H Y, Yu C, Lee B, et al. Energy Efficient Multicast in Ad Hoc Networks. Handbook of Ad Hoc Wireless Networks, CRC Press, 2002