

## 无线自组织网络中能量有效的广播与组播<sup>\*</sup>

李 政<sup>1,2</sup>, 李德英<sup>1,2+</sup>

<sup>1</sup>(数据工程与知识工程教育部重点实验室(中国人民大学),北京 100872)

<sup>2</sup>(中国人民大学 信息学院,北京 100872)

### Energy-Efficient Broadcast and Multicast in Wireless Ad Hoc Networks

LI Zheng<sup>1,2</sup>, LI De-Ying<sup>1,2+</sup>

<sup>1</sup>(Key Laboratory of Data Engineering and Knowledge Engineering (Renmin University of China), Beijing 100872, China)

<sup>2</sup>(School of Information, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

+ Corresponding author: E-mail: deyingli@ruc.edu.cn

Li Z, Li DY. Energy-Efficient broadcast and multicast in wireless ad hoc networks. *Journal of Software*, 2010, 21(8):2023–2036. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3619.htm>

**Abstract:** This paper gives an introduction to the energy-efficient broadcast/multicast routing problem and makes a survey on recent existed algorithms. Firstly, an introduction is made to the broadcast/multicast routing problem. Secondly, the communication and energy models, the definition of energy-efficiency and the optimization objectives are clearly presented. Finally, comparison is made for existing representative algorithms in two aspects: minimum energy and maximum lifetime. Open research issues and research trends are also discussed.

**Key words:** wireless ad hoc network; energy efficient; maximum lifetime; broadcast; multicast; approximation algorithm; omni-directional antenna; directional antenna

**摘 要:** 介绍了无线自组织网络能量有效的广播和组播问题,总结了近年来提出的各种能量有效的广播与组播算法及主要设计思想.首先概述了广播/组播技术,分析了其技术难点.然后介绍了自组织网络的通信模型和能耗模型,以及能量有效性的定义和优化目标.最后对现有的研究成果按照能量最小化和最大化生命周期这两个方面进行分类介绍并进行了比较,总结了研究现状中存在的问题、需要进一步研究的内容以及技术发展趋势.

**关键词:** 无线自组织网络;能量有效性;最大化生命周期;广播;组播;近似算法;全向天线;定向天线

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

无线自组织网络(wireless ad hoc networks,以下简称为自组织网络)是一种新型无线通信网络.传统的有线网络和无线蜂窝通信网络依赖于固定的基础通信设备(如基站等),无法满足野外或无固定基站环境的应用需求.而无线自组织网络不需要固定设备支持,网路节点既是路由器又是主机,作为对等实体自行组网.非邻接的两节点间的通信必须通过网络中其他节点的转发(relay)才能实现,从而组成一个多跳(multi-hop)无线网络.在自

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.10671208 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2008AA01Z120 (国家高技术研究发展计划(863)); the Foundation of the Renmin University of China under Grant No.10XNJ032 (中国人民大学基金)

Received 2008-10-28; Revised 2009-02-24; Accepted 2009-03-31

组织网络中,节点可以是传感器(sensor)、PDA、智能手机等无线设备.无线传感器网络和无线 Mesh 网络是两种典型的无线自组织网络.自组织网络在抢险救灾、战场监控、环境监测、医疗卫生中具有重要的实用价值和广阔的应用前景<sup>[1-6]</sup>.

与传统的网络相比,无线自组织网络主要具有以下特点<sup>[3,4]</sup>:

- 节点能量有限.自组织网络中的通信节点通常只能以电池为电源,并且在许多应用环境下,节点的电源不可更新.这就使得网络的工作寿命与网络中节点的能量消耗密切相关.
- 动态拓扑.自组织网络中,节点间采用无线传输的通信方式,通信链路不稳定,网络没有固定的基础结构,并且网络节点本身具有移动性,这就使得自组织网络的拓扑具有高度的动态性.
- 节点资源高度受限.由于体积、功能、成本等因素的限制,自组织网络节点的计算和存储能力有限、节点间的通信带宽有限,容易产生信号干扰、冲突等,这些因素使得自组织网络中的相关技术的研究变得更加困难.
- 高度分布性和多跳通信.自组织网络中没有负责中心控制的骨干网,并且网络中的节点通信覆盖范围较小,通常只拥有局部网络拓扑信息,必须通过协同工作及必要的多跳通信才能实现相关网络功能.

除了以上特点以外,自组织网络还具有网络规模大、部署环境复杂等特点.所有这些特点在基础理论和工程技术两个层面提出了大量具有挑战性的技术问题,引起了国内外学术界和工业界的极大关注.作为自组织网络的典型应用,无线传感器网络更是成为目前的研究热点,世界各国都对其给予了足够的重视<sup>[4-6]</sup>.广播与组播技术是无线自组织网络中的关键技术之一.本文将全面阐述能量有效的广播与组播技术的研究进展,介绍各种算法的设计技巧和方法,期望能够激发研究兴趣,为将来的研究工作提供有益的参考.

本文第 1 节介绍广播与组播的任务和相关概念.第 2 节介绍自组织网络的网络模型和节点能耗模型,并给出能量有效性的定义和算法的优化目标.第 3 节和第 4 节分类讨论现存的研究成果,介绍基于不同优化目标的代表性算法.第 5 节全面分析和归纳当前研究工作中存在的问题及技术发展趋势.第 6 节总结全文.

## 1 广播与组播技术概述

广播与组播技术在无线自组织网络中扮演着非常重要的角色.它既涉及到信息的传输策略问题,也涉及到网络的管理控制问题<sup>[7,8]</sup>.广播是指从源节点发送消息到网络中其他所有节点的路由过程.而组播是指从源节点发送消息到目标集(destination set)中所有节点的路由过程,广播与组播路由对网络中节点的协同工作起着重要作用.显然,当组播路由的目标集中只包含 1 个节点时,组播路由等价于单播路由(unicast);当组播路由的目标集中包含网络中除源节点外的其他所有节点时,组播路由就等价于广播路由.组播路由是广播路由和单播路由的一般化实现.

广播与组播是自组织网络中最基本的通信方式,许多路由协议的效率取决于其所采用的广播与组播算法的效率.此外,广播与组播在自组织网络中还广泛用于节点状态控制、时钟同步、监控数据收集等诸多方面.这就决定了能量有效的广播与组播技术在自组织网络研究中的重要性:首先,能量有效的广播与组播是一种重要的节能技术.事实上,自组织网络中几乎所有种类广播与组播技术的研究都必须考虑能量有效性.特别是在广播与组播操作非常频繁的网络应用中,对广播与组播路由进行优化可以极大地节省节点能量、提高传输效率,从而有效地延长网络的生命周期;其次,节能的一个重要且必要的手段是减少冗余信息的传输,从而使能量有效的广播与组播成为解决广播风暴问题(broadcast storm problem)<sup>[7]</sup>的有效途径之一;再次,能量有效的广播与组播技术能够有效降低通信干扰、提高 MAC(media access control)协议的效率.由于许多单播路由协议在路由发现的过程中需要广播路由信息<sup>[3]</sup>,因而在单播路由操作非常频繁的网络应用中对广播与组播路由操作进行优化可以提高单播路由的效率并提高网络的性能;此外,广播与组播技术还是数据融合技术的基础,为网络监测数据的有效收集和融合提供了直接的技术参考.然而,由于节点能量受限、拓扑易变、多跳通信等诸多不同于传统网络的特性,使得传统网络中的广播与组播技术不能直接应用于自组织网络.自组织网络中的广播与组播问题给广大研究人员带来了新的挑战<sup>[8,9]</sup>.

## 2 广播与组播技术难点及问题的定义

### 2.1 无线自组织网络的特点和Wireless Multicast Advantage

自组织网络中节点的通信覆盖区域可模型化为一个以节点为圆心、以  $r$  为半径的圆(假设节点装配全向天线,  $r$  为信号发射距离)。这种通信模型是目前应用最为广泛的模型,几乎所有现有的广播与组播技术都基于这种模型实现<sup>[8,9]</sup>。与有线网络不同,无线通信具有局部广播特性:当节点发射信号时,所有在其通信覆盖范围内的节点均可接收到信号。这种性质被称为 Wireless Multicast Advantage(WMA)性质<sup>[8,9]</sup>,如图 1(a)所示,即当节点装备全向天线时,节点  $u$  想发送消息到节点  $v_1, v_2, \dots, v_k$ , 只需以传输功率  $p_u = \max\{p_{uv_i} | 1 \leq i \leq k\}$  工作就能使节点  $v_1, v_2, \dots, v_k$  都接收到来自  $u$  的信号。而对于有线网络,如图 1(b)所示,节点  $u$  必须分别与  $v_1, v_2, \dots, v_k$  建立通信链路才能使它的通信信号到达上述所有节点,其总功耗为  $p_u = \sum_{i=1}^k p_{uv_i}$ 。由此可以看出,无线网络中的算法设计更多的是从“点”的角度出发,同时也使传统有线网络中基于“边”的算法不适用于无线网络。

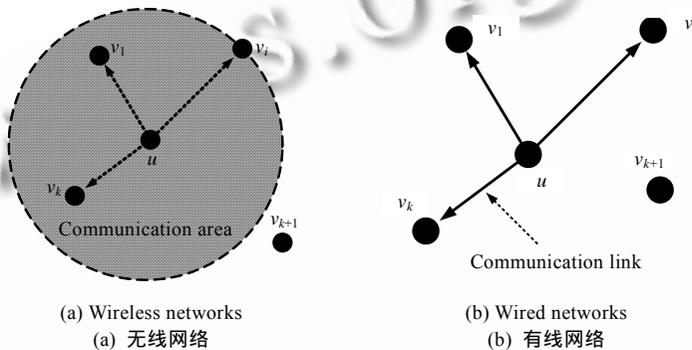


Fig.1 Illustration of the WMA

图 1 无线组播特性示例

### 2.2 网络通信模型

自组织网络的拓扑结构取决于网络节点的通信模型。节点的通信模型与能耗模型是研究能量有效的广播与组播技术的前提。目前,自组织网络中节点的信号发射功率可分为连续可调和离散可调两种调节方式<sup>[10]</sup>。节点的天线模型可分为全向天线和定向天线两种模型<sup>[11,12]</sup>。

#### 2.2.1 全向天线与定向天线

网络节点在装备全向天线后,在发送消息时向空间中各个方向都发射通信信号,只要落在在发射区域的点都能接收到信号(如图 1(a)所示)。文献[11]中提出了智能定向天线(smart directional antenna)技术。网络节点可以将其通信信号集中在某一特定区域发射(通常采用圆心在该节点扇形表示),区域外的节点接收不到该节点发出的信号。定向天线一个直接的优点是节省通信能耗。此外,由于可以将通信信号集中到某一特定范围,可有效降低网络的通信干扰并提高网络的吞吐量<sup>[11]</sup>。

定向天线模型假设天线可使其信号覆盖区域(即信号发射波束)转到任意方向,并且其发射波束的宽度(beam-width)可以在  $[\theta_{\min}, 360]$  的范围内调整。当节点  $u$  向节点  $v_1, v_2$  和  $v_3$  发送消息时,定向天线的使用可以让节点选择不同的通信方式。图 2 展示了 3 种不同的信号发射方案,哪一种方案更节省传送能耗取决于节点通信能耗模型中的参数以及节点间的距离。文献[11,12]中指出,在节点接收信号能耗相对于发射信号能耗很少的情况下,后两种中转的传送方式优于第 1 种直接传送的方式。

然而,定向天线的使用不仅会增加硬件成本,还会使问题变得更为复杂。如图 2 所示,基于定向天线模型的广播与组播算法的设计必须考虑如何调节天线的信号覆盖区域,这将使算法的复杂度有所增加。但由于定向天线

有许多独有的优点和特性,随着技术的进步,它将成为自组织网络中非常有前景的一项技术<sup>[11,12]</sup>.

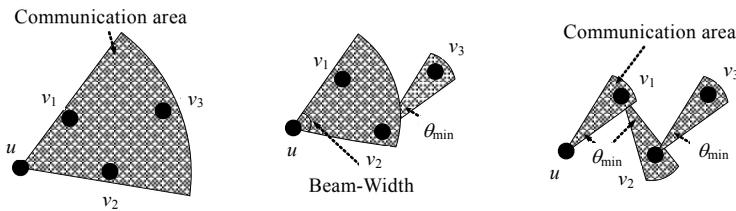


Fig.2 Communication types using directional antennas

图2 定向天线的各种通信方式

### 2.2.2 功率控制问题

自组织网络中的功率控制问题是在网络节点能量有限、信号存在衰减等若干限制条件下,调节各个节点的信号发射功率,使网络满足能量消耗最小化,连通性和吞吐量最大化等若干优化目标的一类控制问题<sup>[10]</sup>.通常,自组织网络中节点的信号发射功率有严格的上限  $P_{\max}$ ,其控制方式有以下 3 种:

- 固定:网络中所有节点的通信信号发射功率不变,为一预先设定的固定值.
- 离散可调:节点可以在几个离散的功率值中调节,例如 Cisco Aironet 350 系列无线网卡有 6 个可调的功率值(1mw,5mw,20mw,30mw,50mw,100mw)<sup>[10]</sup>.发射功率固定可以认为是功率离散可调的特殊情况,即只有 1 个可供选择的功率值.
- 连续可调:节点的发射功率可以在  $[0, P_{\max}]$  之间连续调节.

不同的功率控制策略会导致不同的网络拓扑结构,从而影响网络的性能.从广播与组播操作的角度来看,相关算法设计所采用的功率控制策略首先要保证源节点与目标节点间的连通性,这是广播与组播路由成功的基础.更重要的是,如何调节节点发射功率以最优化广播/组播路由的能耗,这是设计算法时必须考虑的问题.在全向天线的前提下,文献[13]将信号发射功率控制问题归结为通信区域半径的指派问题.

### 2.3 能量消耗模型

在下面的讨论中,假设网络中节点的信号发射功率在单位时间内恒定,这样就可以用节点的信号传输功率来衡量节点在单位时间内的能耗.

首先,考虑全向天线的情况.在绝大多数文献中,节点间的通信采用了信号衰减模式,即天线的信号强度以  $r^{-\alpha}$  的比例衰减,其中,  $r$  为通信节点间的欧氏距离,  $\alpha$  为根据环境及通信媒介的情况在 2~4 之间变化的参数.当节点  $u$  向节点  $v$  发送一个单位消息时,节点  $u$  所消耗的能耗为

$$p_{uv} = \max\{p_{\min}, r_{uv}^{\alpha}\}, 0 < r_{uv} \leq P_{\max}^{-\alpha} \quad (1)$$

其中,  $p_{\min}$  为两节点之间通信所需能耗的最小阈值,  $r_{uv}$  为节点  $u$  与  $v$  之间的距离,  $\alpha$  为信号衰减参数.而节点  $u$  向  $v$  发送一个单位消息时,节点  $u$  和  $v$  的功耗分别为

$$P_u = p_{uv} + p_{trans}, P_v = p_{rec} \quad (2)$$

其中,  $p_{uv}$  为节点信号发射能耗,  $p_{trans}$  为信号调制、数据处理等能耗,  $p_{rec}$  为接收消息的能耗(信号解调等).在许多文献中都不考虑节点接收信号的能耗,因为节点间通信时,信号发射能耗占了整个通信能耗的绝大部分<sup>[13]</sup>.

其次,考虑定向天线的情况.定向天线可以将通信信号集中在某一特定区域发射,但其波束宽度必须有一个最小阈值  $\theta_{\min}$ .在这种情况下,节点  $u$  的信号覆盖区域的最大半径应为  $(P_{\max} \cdot 360 / \theta_{\min})^{1/\alpha}$ .当节点  $u$  向节点  $v$  发送消息时,必须考虑其信号发射波束的宽度(即相应扇形区域的圆心角),节点  $u$  的信号发射功率应为

$$p_{uv} = \max\left(p_{\min}, \frac{\theta}{360} r_{uv}^{\alpha}\right), \theta_{\min} \leq \theta \leq 360, 0 < r_{uv} \leq (P_{\max} \cdot 360 / \theta_{\min})^{1/\alpha} \quad (3)$$

其中,  $p_{\min}$  为两节点之间通信所需能耗的最小阈值,  $r_{uv}$  为节点  $u$  与  $v$  之间的距离,  $\alpha$  为信号衰减参数,  $\theta$  为其信号发射波束的宽度,  $\theta_{\min}$  为信号发射波束宽度支撑节点间通信的最小阈值.当节点  $u$  向  $v$  发送一个单位消息时,节点  $u$

和  $v$  的功耗的表达式与公式(2)相同.由公式(3)可以看出,在定向天线模型中,节点信号发射功率控制不仅与通信区域半径相关,而且与节点选择的通信信号覆盖区域相关.

#### 2.4 能量有效性及其度量标准

如文章开篇所述,自组织网络中的节点一般依靠电池提供能量,在许多情况下,更换网络节点的电池或者为这些电池充电的代价很大,甚至是不可能的.如果某些节点因能量耗尽而失效,则会大幅度降低网络性能,甚至导致通信中断及网络分割.这一事实使节省能量以尽可能地延长网络寿命成为自组织网络中的一个首要问题.实际上,自组织网络中几乎所有种类的广播与组播技术都必须考虑能量有效性.因此,设计能量有效的广播与组播技术成为决定自组织网络可用性与有效性的关键技术之一,关系到网络应用的成败<sup>[8,9]</sup>.

对广播与组播路由的能量有效性,可以从以下两个方面考虑:

- 在广播/组播路由中,使所有转发节点的能耗总和最小(minimum energy broadcast/multicast).
- 最大化广播/组播生命周期(maximum lifetime broadcast/multicast):使从广播/组播路由操作开始到网络中出现一个节点因电能耗尽而失效的持续时间最长.也可以将生命周期定义为从操作开始到一定比例的节点失效为止,本质上都是要使节点能耗分布更加均衡.

能量有效性本质上是指降低节点能耗以延长网络寿命.上面的两种度量标准使算法的设计具有两种优化目标.第1种度量标准主要是从节省节点能耗的角度考虑;第2种度量标准主要从延长广播/组播路由持续时间的角度考虑.目前还无法证明这两种度量标准中哪一种更为有效,若使广播/组播生命周期最大化,就必须使涉及到的节点尽可能地消耗更少的能量.而采用第一种度量标准则有可能导致某些“关键”节点因过度使用而过早失效.文献[13,14]中证明了上述两种优化目标并不能同时达到最优,应根据不同的情况选择相应的度量标准.目前,基于这两种优化目标,都已有很多研究成果问世.下文将分类介绍并讨论这些研究成果.

#### 2.5 问题的分类及形式化定义

本文旨在介绍能量有效的广播与组播路由算法的设计技巧及其研究方向,所以不考虑 MAC 层与物理层的相关问题(即作出不存在通信干扰、不存在丢包、通信链路稳定等假设).本文统一使用图  $G=(V,E)$  表示网络模型, $V$  为网络中所有节点的集合, $E$  为图中边集代表网络中节点间的通信链路. $n=|V|$  为网络中的节点个数. $\Omega(R)$  代表广播/组播路由中所有可能的转发节点集合, $R(A)$  表示算法  $A$  产生的转发节点集合, $R^*$  代表相应问题最优的转发节点集合.根据第 2.4 节介绍的两类度量标准,能量有效的广播与组播路由优化问题可定义为以下两类:

- MEB/MEM(minimum energy broadcast/multicast)问题,即求解

$$\min_{R(A) \in \Omega(A)} \sum_{u \in R(A)} P_u \quad (4)$$

- MLB/MLM(maximum lifetime broadcast/multicast)问题,即求解

$$\min_{R(A) \in \Omega(R)} \max_{u \in R(A)} P_u \quad (5)$$

#### 2.6 问题的复杂性

本文第 2.1 节介绍了自组织网络的 WMA 特性.实际上,这种特性使自组织网络中能量有效的广播与组播路由算法的设计变得更加困难.文献[14,15]中分别证明了自组织网络中基于全向天线的图版本和几何版本的 MEB 问题均为 NP 难问题.而同样的优化问题在有线网络中却是 P 问题.文献[16]中证明了全向天线下的 MEM 问题为 NP 难.目前,已有的研究表明,大多数 MEB/MEM 问题在不同的天线模型和功率调节方式下都为 NP 难<sup>[9]</sup>.而 MLB/MLM 问题在全向天线模型下却可以在多项式时间内求出最优解,如文献[17]中所提出的算法.但是,同样的优化问题在定向天线模型下却被证明是 NP 难题<sup>[18]</sup>.表 1 展示了 MEB/MEM 和 MLB/MLM 问题在不同的天线模型下基于计算复杂性的分类.

到目前为止,关于 NP 困难问题,几乎所有的研究工作都集中在启发式算法和近似算法的设计及其近似性能分析上.对于近似算法的性能,公认的度量标准为算法的近似比(approximation ratio)<sup>[19]</sup>.

**Table 1** Classification of energy-efficient broadcast/multicast problems based on computational complexity**表 1** 基于计算复杂性的能量有效广播/组播问题的分类

Antennas model	MEB	MEM	MLB	MLM
Omni-Directional antennas	NP-Hard	NP-Hard	P	P
Directional antennas	NP-Hard	NP-Hard	NP-Hard	NP-Hard

### 3 最小化能量消耗的广播与组播路由算法

#### 3.1 基于全向天线模型

##### 3.1.1 信号发射功率连续可调的集中式算法

目前,能量有效的广播算法从方法上讲主要分为基于支撑树的算法和基于拓扑控制的算法两类,此外还有一些局部改进算法。

基于支撑树的方法是广播与组播算法设计所普遍采用的技术.对广播操作而言,此类算法构建一棵以广播源节点为根,并连接网络中其他所有节点的广播树(即从源节点到网络中其他所有节点都存在一条路).广播树中只有非叶子节点转发广播消息.对 MEB/MEM 问题的研究,文献[8]的贡献具有开创性.文中提出了 MST (minimum spanning tree)算法和 SPT(shortest path tree)算法,同时还提出了著名的 BIP(broadcast incremental power)算法以求解 MEB 问题.MST 算法和 SPT 算法是基于边权(以节点间的通信能耗为权值,没有考虑无线网络的 WMA 性质)的启发式算法,分别利用标准 Prim 算法和 Dijkstra 算法求得相应的 MST 和 SPT,然后调节树中转发节点的发射功率使其成为一棵根在源节点的树,从而实现广播路由操作.这两种算法的时间复杂度取决于相应的 Prim 算法和 Dijkstra 算法,均为  $O(n^2)$ .文献[20]中证明了 MST 算法的近似比介于 6~12 之间,而 SPT 算法的近似比至少为  $n/2$ .

BIP 算法考虑了无线网络的 WMA 特性,其运行过程与标准 Prim 算法相同.该算法维护了一棵从源节点出发的广播树,初始时刻广播树只包含源节点.在算法的每一步迭代中,每次选择一个与树中节点建立通信链路所造成的能耗增加量最少的节点加入到树中,直到所有的节点被包含到这棵广播树中.与 Prim 算法不同,BIP 算法动态地更新每条通信链路的权值为  $P'_{uv} = P_{uv} - P_u$ ,其中,  $P_u = \max\{P_{uw} | w \in N(u)\}$ ,  $N(u)$  为节点  $u$  的邻接点集合.在增加一个节点时,该节点可以与树中所有节点建立通信链路,这样就可以计算出每次添加一个节点到树中所造成的增加能耗.算法的时间复杂度为  $O(n^3)$ ,作者通过仿真实验分析了 3 种算法的效果,文献[20]中证明了该算法的近似比介于 13/3 到 12 之间.此外,文中还提出了 MIP 算法求解 MEM 问题,其主要思想是:首先利用 BIP 算法构建一棵根在源节点的广播树,然后利用剪枝操作(除去不必要的通信链路)得到相应的组播树.然而,文献[21]中分析了基于剪枝方法的 MEM 算法的近似比,证明剪枝的方法并不能获得很好的近似效果,MIP 算法的近似比为  $n-2-O(1)$ .根据算法第 1 步采用的不同的 MEB 算法,文献[21]中还提出了 P-MST(pruning-MST)算法和 P-SPT (pruning-SPT)算法求解 MEM 问题.

文献[20]中还提出了一种 BAIP 算法以求解 MEB 问题.其原理与 BIP 算法相似,但每次可以添加多个节点到广播树中,添加的规则为平均增加能耗最少(即增加能耗除以增加节点数).文献[22]中提出一种贪婪算法 GPBE.该算法也是通过构造一棵支撑树来完成广播路由.文中以单位能量所能覆盖的新节点数为转发节点选择标准,每次将覆盖最多的节点加入广播树.对 MEB 问题,还有一些改进能量有效性的算法,如 sweep<sup>[8]</sup>,EWMA<sup>[13]</sup>,IMBM<sup>[23]</sup>.这些算法都是利用其他算法建立一棵广播树,然后在这棵树上进行局部化改进.

SPF 是一种求解 MEM 问题的集中式算法<sup>[21]</sup>,基于 Takahashi-Matsuyama Steiner 树算法.该算法维护了一棵根在源节点的有向树.初始时刻,这棵树只包含源节点.在每一步迭代中,这棵树沿着到达一个目标节点所需能耗最小的路生长.文献[21]中还提出了另一种求解 MEM 问题的算法 MIPF.该算法也是通过构建一棵根在源节点的有向树实现广播路由.初始时刻,这棵树只包含源节点,其生长过程类似于 BIP 算法<sup>[8]</sup>的思想.

##### 3.1.2 信号发射功率连续可调的分布式算法

拓扑控制是指在保证一定的网络连通质量和覆盖质量的前提下,一般以延长网络生命周期为主要目标,兼

顾通信干扰、网络延迟等其他性能,通过指派节点信号发射功率、选择邻接点等方法形成一个优化的网络拓扑结构<sup>[24]</sup>。利用经过优化的网络拓扑结构设计广播/组播路由是一种重要的设计方法。一般而言,拓扑控制算法的目标是形成一个能量有效的无向拓扑结构。在这种网络结构上设计广播/组播路由,任何节点都可以作为源节点。而基于拓扑控制的广播/组播算法设计的思路是:先对网络进行拓扑优化,在经过优化的拓扑结构上,针对某一特定广播/组播操作(源节点已确定),再进一步调整节点发射功率、选择邻接点以优化从某一确定的源节点发出的广播/组播路由。

RNG(relative neighborhood graph)这种连通的拓扑结构是由 Toussaint<sup>[25]</sup>首先提出来的。RNG 由所有满足以下条件的边构成:如果边  $uv$  属于 RNG,则不存在点  $w$  使得  $uw < uv$  和  $vw < uv$  同时成立。图 3 所示的边  $uv$  不满足这个条件,所以不属于该 RNG。RNG 这种网络拓扑结构可以用线性通信复杂度的分布式算法构造出来。文献[26]中提出了一种建立在 RNG 拓扑结构上的分布式能量有效的广播算法 RBOP。该算法分为两个阶段:在第 1 阶段,先对初始网络进行拓扑控制,使其形成 RNG 结构。在算法的第 2 阶段,从某一特定的源节点开始,利用文献[27]中 NES (neighbor elimination scheme)方法排除不必要的转发节点。然后再调节转发节点的通信半径到最小可能。最后就形成了一棵以该源节点为根,并支撑网络中其他所有节点的有向最小能耗广播树。

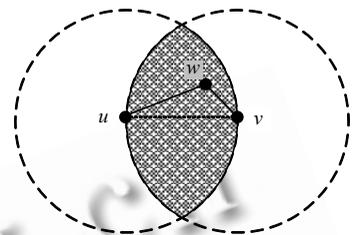


Fig.3 Illustration of non-RNG edge

图 3 RNG 中边的反例

文献[28,29]中分别提出了另一种基于 LMST(localized minimal spanning tree)拓扑结构的广播算法 LBOP。该算法的主要思想与 RBOP 相同,只是在算法的第 1 阶段采用了 LMST 作为其拓扑结构。LBOP 算法的转发节点总能耗总是低于 RBOP。但是,由于其使网络拓扑变得更稀疏,可靠性有一定程度的降低。在对 RNG 与 LMST 的几何性质进行深入观察后, Li 等人在文献[30]中提出了一种 IMRG 拓扑结构。这种拓扑结构具有良好的理论性质:(1) IMRG 能够以 RNG 图中的两跳(2-hop)邻接点信息构建出来;(2) IMRG 为平面图,其节点的度最多为 6;(3) 基于 IMRG 的分布式 MEB 算法的近似系数为  $O(n^{\alpha-1})$ ,其中,  $\alpha$  为通信信号衰减系数。他们还证明了 IMRG 可以由线性通信复杂度的分布式算法生成。文献[31]中拓展了 BIP 算法,提出了 LBIP 算法。LBIP 是一种基于树的求解 MEB 问题的分布式算法。该算法利用节点的两跳邻接点信息计算局部广播树,最后形成总的广播树。

S-REMiT(refining energy efficiency of multicast tree)是一种分布式改良优化算法<sup>[32]</sup>,用于求解 MEM 问题。该算法作用于一棵已存在的组播树上,对其能量有效性进行改进。S-REMiT 算法分为两个阶段:第 1 阶段利用任意一种组播算法构建一棵组播树;第 2 阶段在不影响网络连通性的前提下,修改网络的局部拓扑以达到节省能耗的目的,直到不能减少能耗为止。最后,在形成的组播树上删去冗余的通信链路。

上述分布式算法的优化效果都不如相应问题的集中式算法。然而,集中式算法假设网络中所有节点都拥有全局拓扑信息,并没有考虑管理全局拓扑信息的复杂性。并且,集中式算法通常假设在每次进行路由操作时网络拓扑为静态,这与实际情况不符。自组织网络在实际应用中一个很重要的特性就是动态拓扑,对集中式算法来说,这将增加大量的全局拓扑信息管理成本,这一点就导致集中式算法不适用于大规模分布式网络应用环境(如无线传感器网络)。而分布式算法仅需要网络的局部拓扑信息,对节点的计算能力要求相对较低。而局部拓扑信息相对容易收集,对网络拓扑变化具有更好的适应性。由此可以看出,分布式广播/组播算法更适用于实际应用。

### 3.1.3 信号发射功率离散可调的集中式算法

在信号传输功率离散可调方面,文献[14]中假设网络中每个节点有有限个可供选择的信号发射功率值,首先证明相应的 MEB 问题为 NP 难题,然后提出一种基于最小支撑树的广播算法,但是并没有给出算法的近似系数。

文献[15]中提出了一种辅助子图结构,如图 4 所示。对网络中的每个节点,增加  $k$  个辅助节点(代表该节点可供选择的  $k$  个功率值)与其相连,从该节点到辅助节点的边上的权值为相应的功率值。然后,再将辅助节点与以相应的功率值工作时所能达到的节点相连,并对这条边赋权值为 0。这样,该辅助图就能反映节点使用不同信号发

射功率值所导致的不同的网络拓扑结构.文中提出了一种基于有向斯坦纳树(directed Steiner tree)的广播算法来求解 MEM 问题,并证明该算法的近似比为  $n^\epsilon$ ,  $\epsilon$  为一个 0,1 之间的常数,与算法的时间复杂度相关(该算法的时间复杂度为  $O((k+1)^{1/\epsilon}n^{3/\epsilon})$ ).文献[33]中利用相同的辅助图结构,提出了另一种基于斯坦纳树的近似算法来求解 MEM 问题.

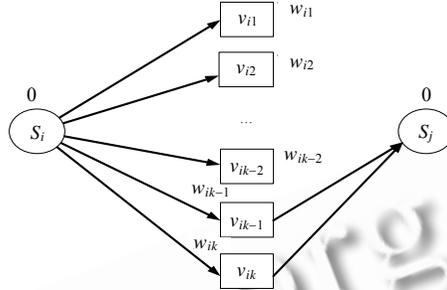


Fig.4 Construction of node-weighted auxiliary graph  
图 4 点权辅助图构造示例

以上的辅助图基于边权,但无线网络具有 WMA 性质,用边权不能精确反映出节点的能耗.文献[34]中提出了 MNJT 算法和 g-D-MIP 算法求解 MEM 问题,同时还提出了 BNJT 算法求解 MEM 问题.其算法都是构建在基于点权的辅助子图结构上,能够更好地反映无线网络的 WMA 特性.这 3 种算法都是启发式算法,没有给出近似比.但仿真实验结果显示,在多数情况下,这 3 种算法求解相应问题时要优于文献[15,33]中的算法.并且这 3 种算法具有相对较低的时间复杂度(分别为  $O(n^2k), O(n^3), O(kn^3)$ ).

如前所述,传输功率固定可认为是离散可调的特殊情况.文献[35]中考虑网络中每个节点拥有一个预先设定好的信号传输功率,但不同节点之间的传输功率无需相同(即异质网络).该文献中建立网络的有向点权图模型,然后提出了 3 种能量有效的广播算法来求解 MEM 问题,即 SPT-h, Greedy-h 和 NST-h.此外,文中还证明了 NST-h 算法的近似比为  $1+2\ln(n-1)$ .SPT-h 算法对原始网络模型作了转换,将每个节点分裂为两个辅助节点并用一条边相连,将原图中点的权值赋给这条边,其他边的权值为 0.如图 5 所示,当路由通过某节点时,等价于通过转化后的图中相应的边,这就使原本基于点权的问题转化为已广泛研究的基于边权的斯坦纳树问题.Greedy-h 算法以单位能量所能覆盖的点的个数为选择标准,每次选取值最大的点作为转发节点.该算法的时间复杂度仅为  $O(n^2)$ .仿真实验结果显示,该算法在多数情况下都能取得较好的优化效果.NST-h 算法是一种基于点权斯坦纳树(Steiner tree)的启发式算法,其主要思想是不断地连接不同的强连通分支,最终形成一棵广播树.文中定义不包含源节点且没有入弧的强连通分支为 orphan.初始,除源节点外,所有节点都是 orphan,每次将在单位能量下能连接 orphan 数最多的节点加入传输集合.最后,当 orphan 集合为空时就形成了一棵广播树.NST-h 算法的时间复杂度为  $O(n^4)$ .

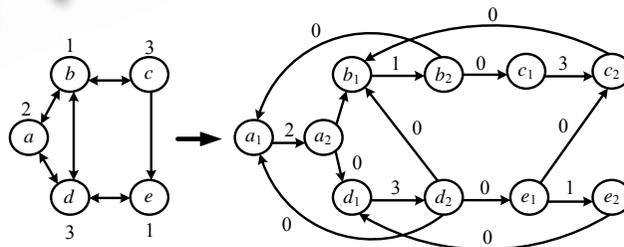


Fig.5 Illustration of the transformation from node-weight graph to edge-weight graph  
图 5 从点权图到边权图的转化示例

文献[16]中考虑了同样的网络模型下的 MEM 问题,提出了一种基于有向斯坦纳树的近似算法,并证明了该算法的近似比.该算法的主要思想是:首先建立网络基于点权的有向图模型,然后再将基于点权的有向图转化为基于边权的有向图,这样就将问题转化为已广泛研究的斯坦纳树问题,可以采用任何一种已有的斯坦纳树算法来解决.文中还提出两种高效的启发式算法:NJT(node join tree)和 TJT(tree join tree).这两种算法的时间复杂度更低.仿真实验结果显示,在大多数情况下,这两种算法的效果并不亚于基于斯坦纳树的近似算法.

### 3.1.4 信号发射功率固定的分布式算法

本节主要介绍分布式的广播算法.这类算法都假设网络中所有节点具有固定且相同的信号发射功率.由于节点的信号发射功率固定,要减少广播路由的总能耗就必须减少转发节点的个数和冗余消息的发送.而正是基于这一点,使广播算法在致力于解决广播风暴问题的同时也达到了能量有效性的目标.在本节的讨论中,所有提及的算法都假设网络中所有的节点具有固定并且相同的信号发射功率(即相同信号发射半径,网络模型为 UDG).此类算法的设计技巧主要是利用邻接点覆盖(neighbor coverage)和连通控制集(connected dominated set,简称 CDS)所具有的特殊性质.

MPR(multi-point relaying)算法是典型的基于邻接点覆盖的分布式广播算法<sup>[36]</sup>.该算法的主要思想是,在每个节点的一跳邻接点集合中选择一个子集转发消息,使得该节点所有两跳邻接点都被覆盖(即能收到该消息).这个选出来的子集称为多点转发集.MPR 算法需要节点的两跳拓扑信息,旨在保证广播消息可达性(reachability,即网络中其他所有节点都能接收到广播消息)的前提下选择尽可能少的转发节点,以减少冗余消息的转发.对于多点转发集的选择,MPR 算法可描述如下:

- (1) 搜索节点  $u$  所有的两跳邻接点,若存在  $u$  的某个两跳邻接点只能被某一个  $u$  的一跳邻接点所覆盖,则将这一跳邻接点加入到  $u$  的多点转发集.
- (2) 将目前的多点转发集所能覆盖的两跳邻接点从  $u$  的两跳邻接点集合中去除.
- (3) 从剩余的一跳邻接点中选择能够覆盖  $u$  的两跳邻接点最多的一个,将其加入到多点转发集.
- (4) 转到步骤(2)继续执行,直到节点  $u$  的两跳邻接点集为空为止.

连通控制集(CDS)的概念是:网络中所有的节点属于 CDS 或者为 CDS 中的点的一跳邻接点,并且 CDS 中的点组成一个连通分支.一个重要的思想就是利用 CDS 中的点转发广播消息,这样就可以保证广播消息可以发送到网络其他所有节点,从而减小转发节点个数等价于求解最小连通控制集(minimum connected dominate set,简称 MCDS)问题.但是,MCDS 问题为 NP 难题<sup>[27]</sup>.文献[37]中提出了一种基于连通控制集的分布式广播算法.文献[38]中进一步改进了此算法,首先定义中转节点(intermediate node):该节点存在两个不直接相邻的一跳邻接点,然后提出 self-pruning rule 规则去选取转发节点.文献[38]中证明了,通过这种规则选取的转发节点集合确实为 CDS.算法中考虑了节点的度,能够有效减少 CDS 中点的个数,从而能够减少冗余消息的发送,有效降低网络中转发节点的总能耗.

## 3.2 基于定向天线模型

由于节点在装备定向天线后,其信号发射功率不再与通信覆盖区域的半径一一对应,节点与其他节点通信时的能耗不仅与通信覆盖区域的半径相关,还与信号发射波束的宽度(即圆心角)相关.在定向天线模型下,能量有效的广播与组播技术的研究大部分都假设节点信号发射功率连续可调,在此我们不再按功率调节方式分类.

### 3.2.1 集中式算法

关于定向天线模型下的 MEB/MEM 问题的研究,文献[12,39]中的工作最为著名,并且是开拓性的.文中拓展了 BIP/MIP 算法,提出了启发式算法 RB-BIP/D-BIP 和 RB-MIP/D-MIP,分别针对 MEB 和 MEM 问题.RB-BIP 算法的主要思想是:首先利用全向天线模型下的 BIP 算法获得一棵能量有效的广播树(算法的运行过程中没有考虑定向天线的特性),然后将每个转发节点的信号发射波束的圆心角减小到能够覆盖其所有孩子节点的最小可能角度.而 D-BIP 算法的运行机制与 BIP 算法相同,只是在计算添加一个节点的能耗增加量时考虑了定向天线的特性:既可以调节通信半径,又可以转动天线方向及调节波束宽度.这样,算法运行的每一步就必须增加对选择定向天线信号覆盖区域的操作,这将使 D-BIP 算法的时间复杂度增加.RB-BIP 算法的时间复杂度为

$O(n^3)$ , D-BIP 算法的时间复杂度为  $O(n^3 \log n)$ . 仿真实验结果显示, D-BIP 算法的性能总是优于 RB-BIP 算法. 而针对 MEM 问题的 RB-MIP 算法和 D-MIP 算法首先分别利用 RB-BIP 和 D-BIP 算法分别构建一棵能量有效的广播树, 然后再利用剪枝的方法去掉多余的边, 使其能够支撑所有目标点集中的点, 最后形成能量有效的组播树.

文献[40]中提出一种贪婪算法来求解定向天线模型下的 MEB 问题. 该算法以单位能量所能覆盖的节点数衡量每个节点的各种天线调节方案的能量有效性, 然后选择局部最优值, 最后形成最终的广播树.

### 3.2.2 分布式算法

文献[41, 42]中分别提出了分布式 D-RBOP 算法和 A-DLBOP 算法来解决 MEB 问题. D-RBOP 算法是 RBOP 算法的拓展, 基于点对点(one-to-one, 即不具有 WMA 特性)通信模型. 如果每个节点第 1 次收到来自 RNG 邻接点的消息, 则向剩余的 RNG 邻接点转发这条消息. 节点利用信号发射波束的最小角度  $\theta_{\min}$  依次向 RNG 邻接点发送消息. 文献[42]中基于 LMST 进一步提出了 A-DLBOP 算法. 这种分布式算法是一种混合式自适应算法, 针对不同的网络情况选择点对点或点对多通信模型. 最后, 模拟结果表明, 该算法在不同的网络密度下都具备较高的性能. 这两种算法的思路与 RBOP 和基于 LMST 的算法相同, 通信复杂度均为  $O(n)$ .

## 4 最长生命周期的广播与组播路由算法

### 4.1 全向天线模型

如前所述, MLB/MLM 问题在全向天线模型下为 P 问题, 这使得对于该问题的研究集中于优化算法的设计. 本节所介绍的算法都是具有多项式时间复杂度的优化算法.

#### 4.1.1 集中式算法

文献[43]中证明了一个重要的结论: 在一个无向连通图的所有支撑树中, 最小支撑树(MST)的最长边最短. 换句话说, 就是图中每棵支撑树都有其最长的一条边, 其中, 最小支撑树的最长边最短. 根据这条性质, 文中提出一种基于最小支撑树求解 MLB 问题的 MLE 算法. 文中假设网络每个节点的最大信号覆盖区域都可以将网络中其他所有节点覆盖, 这样, 网络就可以模型化为一个无向完全图, 图中每条边的权值为两个顶点之间的通信能耗. MLE 算法分为两个阶段:

- (1) 给定一个无向完全赋权图, 首先构建一棵根在广播源节点的最小支撑树. 最小支撑树的构建可以使用分布式最小支撑树算法<sup>[29, 30]</sup>, 也可以使用经典的 Prim 或 Kruskal 算法.
- (2) 由无线网络的 WMA 性质可知, 支撑树中的节点可能被多个节点的信号覆盖区域所覆盖, 而广播操作只要求从源节点到其他节点之间存在一条有向路. 因此, 可以从得到的支撑树中删除不必要的通信链路.

由 MLB 问题的定义可知, MLE 算法的优化性可以由前述理论结论保证, 但前提是 MLE 算法第 1 步求得的最小支撑树必须为最优. MLE 算法的时间复杂度取决于第 1 阶段中求解 MST 的算法.

BMT 算法<sup>[44]</sup>是一种基于 Dijkstra 最短路算法的 MLM 算法. BMT 算法将 Dijkstra 算法中的权值  $D[u]$  更新操作改为: 如果  $\max\{D[v], w_{vu}\} < D[u]$ , 则更新  $D[u] = \max\{D[v], w_{vu}\}$ . 这样, BMT 算法通过运行与 Dijkstra 算法相同的迭代步骤获得一棵支撑树, 再对其进行剪枝操作, 最终获得一棵最优的最长生命周期组播树. 文献[44]中证明了 BMT 算法的最优性, 并证明算法的时间复杂度为  $O(n^2)$ . 文献[45]中提出了 DPBT/DPMT 算法以分别求解 MLB 和 MLM 问题, 并证明这两种算法都能以  $O(n^2)$  的时间复杂度求得问题的最优解. DPBT 算法和 DPMT 算法的基本原理相同, 都是基于有向赋权图上的 Prim 算法求解, DPMT 算法在算法的最后利用剪枝操作获得相应最优的最长生命周期组播树.

#### 4.1.2 分布式算法

MMT 算法<sup>[46]</sup>是第 1 种能够求出 MLM 问题最优解的分布式算法. MMT 算法的运行分为两个阶段: 在生长阶段, 在边权大于等于  $\delta_{LB}$  ( $\delta_{LB}$  为瓶颈边权值的估计值)的前提下, 尽可能多地往组播树中加边, 但是必须保证构成的图形满足树的性质(即不能产生圈); 在搜索阶段, 在连接树节点与非树节点的边中选择一条具有最小权值的边  $(u, v)$ , 将其加入到组播树中, 并将  $\delta_{LB}$  更新为  $w_{uv}$ . 重复迭代这样的生长-搜索过程, 直到目标节点集中所有的点都被包含到组播树中, MMT 算法终止. 文献[46]中最后证明了 MMT 算法能够求得 MLM 问题的最优解, 并具

有线性通信复杂度.

## 4.2 定向天线模型

### 4.2.1 集中式算法

如前所述, RB-BIP/D-BIP 算法和 RB-MIP/D-MIP 算法是基于定向天线模型的 MEB 算法和 MEM 算法. 文献 [18,39] 中拓展了网络中通信链路的能耗度量, 将网络中通信链路  $(u, v)$  的权值(能耗) 设为  $w_{uv} = p_{uv} \left( \frac{\varepsilon_u(0)}{\varepsilon_u(t)} \right)^\beta$ , 其中,  $\varepsilon_u(0)$  为初始时刻节点  $u$  所具有的能量,  $\varepsilon_u(t)$  为节点  $u$  在时间点  $t$  的剩余能量,  $\beta$  是一个表示剩余能量度量重要性的参数, 并提出了相应的 RB-BIP- $\beta$ /D-BIP- $\beta$  算法和 RB-MIP- $\beta$ /D-MIP- $\beta$  算法分别求解能量有效的广播与组播问题. 与 RB-MIP 和 D-MIP 算法中通信链路权值的设置相比, 这种权值设置方法考虑了节点剩余能量对算法效果的影响, 可以使网络中节点的能耗分布更加均匀. 在 MEB/MEM 问题中, 算法的设计目标是 minimized 转发节点总能量消耗, 这样就有可能使某些处于关键路由位置的节点因频繁使用而过早失效. RB-BIP- $\beta$ /D-BIP- $\beta$  算法和 RB-MIP- $\beta$ /D-MIP- $\beta$  算法与前述的相关算法思路 and 运行过程都一致, 在此不再赘述. 该算法的核心思想是, 在求解 MEB/MEM 问题时避免选择剩余能量很少的节点参与广播/组播操作, 从而达到延长相应的广播/组播树寿命的目的. 最后的仿真实验结果也说明了这一点. 该类算法的总能耗要高于原算法, 但却使相应的广播与组播操作的持续时间变长.

S-DPMT/D-DPMT 算法<sup>[47]</sup> 都是对前述 DPMT 算法的拓展, 是解决 MLM 问题的近似算法. 文献 [48] 中给出了 S-DPMT/D-DPMT 算法近似比的上界, 证明了这两种算法都有常数因子近似性能.

### 4.2.2 分布式算法

文献 [47] 中提出了求解 MLM 问题的分布式算法: MMT-OA 和 MMT-DA 算法. 这两种算法与 MMT 算法的基本思路相同, 但其在算法迭代的过程中考虑了定向天线的特性. MMT-OA 算法仍然采用了通常的思路: 先假设节点装有定向天线, 待相应的组播树求出后再调节转发节点天线的波束, 使其在能够覆盖所有孩子节点的前提下达到最小. 而 MMT-DA 算法则在算法运行的过程中就考虑定向天线的特点, 其运行过程与 MMT 算法相同. 文献 [48] 中证明了 MMT-OA 和 MMT-DA 算法都具有常数因子的近似比.

## 5 存在的问题和未来的研究方向

本文系统地综述了自组织网中广播与组播路由涉及能量有效性的两个基本优化问题: MEB/MEM 和 MLB/MLM 问题. 在介绍现存研究成果的同时, 我们也可以看出目前的研究工作中存在的一些问题:

- (1) 大多数研究工作的模型假设过于理想化, 这给相应技术的实用化带来了困难. 例如, 在网络的通信模型中一般都使用确定性模型, 即落在某个节点通信覆盖区域内的其他节点都能准确地接收到通信信号. 在实际应用中, 由于部署环境及信号干扰、冲突等因素的影响则很难保证这一点. 因此, 在今后的研究工作中, 应更多地考虑节点间通信链路的随机性.
- (2) 对能量有效性的度量标准还缺乏进一步的研究. 本文所述的两种度量中究竟哪一种更为有效, 目前还没有定论. 例如, 在某些情况下, 广播/组播路由操作并不是持续进行, 而是分成多个 session 依次执行, 最后要总能耗最小, 这就等价于每个 session 中的能耗最小. 文献 [13] 中指出, 应针对不同应用情况采用不同的优化目标, 比如对举例的这种情形, 最小化每个 session 中广播操作的总能耗更为有效.
- (3) 期待跨层协议的进一步研究. 目前的研究工作都是基于理想的物理层或 MAC 层模型, 缺乏对实际情况的考虑. 今后, 基于更为现实的物理层或 MAC 层约束下的研究将是趋势.
- (4) 一些新技术的出现(例如, MIMO 系统的应用以及无线传感器网络技术的发展), 这些都对网络并行性、节点移动性、规模可扩展的协议、分布式算法设计等研究工作提出了新的要求.

总之, 无线自组织网络中的广播与组播技术仍然是当前的研究热点, 不断有新的研究成果问世<sup>[49-51]</sup>. 我们归纳和总结了已有的研究成果, 期望能为广大科研工作人员提供有益的帮助.

## 6 总 结

本文综述了无线自组织网络中能量有效的广播与组播技术的研究现状,并分析了当前研究中存在的问题.从目前的研究现状来看,能量有效性是广播与组播路由算法设计所必须考虑的因素.进而,结合功率控制以及新型天线技术的能量有效的广播与组播技术还有不少问题没有解决.但是,目前的研究还普遍存在着模型过于理想化、对网络性能的综合考虑较少、研究结果没有足够的实践说服力等问题.总之,能量有效的广播与组播技术已经取得了初步的研究成果,但是大多数算法还只停留在理论研究阶段,没有考虑实际应用的诸多困难.关于自组织网络中的广播与组播技术,还有许多问题需要进一步研究,特别是需要探索更加实用、考虑更加全面的算法协议.以实际应用为背景、多种机制相结合、跨层设计、综合考虑网络性能将是广播与组播技术研究的发展趋势.

### References:

- [1] Kahn JM, Katz RH, Pister KSJ. Next century challenges: mobile networking for "Smart Dust". In: Proc. of the ACM MOBICOM. 1999. 263–270. <http://bnrg.eecs.berkeley.edu/~randy/Papers/mobicom99.pdf>
- [2] Estrin D, Govindan R, Heidemann J, Kumar S. Next century challenges: Scalable coordination in sensor networks. In: Proc. of the ACM MOBICOM. 1999. <http://research.cens.ucla.edu/people/estrin/resources/conferences/1999aug-Govindan-Estrin-Next.pdf>
- [3] Akyildiz IF, Su WL, Sankarasubramania Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. *ACM Trans. on Multimedia Computing, Communications and Applications*, 2002,40(8):102–114.
- [4] Chlamtac I, Conti M, Liu JJN. Mobile ad hoc networking: Imperatives and challenges. *Ad Hoc Networks*, 2003,1(1):13–64. [doi: 10.1016/S1570-8705(03)00013-1]
- [5] Ren FY, Huang HN, Lin C. Wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2003,14(7):1282–1291 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1282.htm>
- [6] Sun LM, Li JZ, Chen Y, Zhu HS. *Wireless Sensor Networks*. Beijing: Tsinghua University Press, 2005 (in Chinese).
- [7] Ni SY, Tseng YC, Chen YS, Sheu JP. The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network. *Wireless Networks*, 2002,8(4): 153–167. [doi: 10.1023/A:1013763825347]
- [8] Wieselthier JE, Nguyen GD, Ephremides A. On the construction of energy-efficient broadcast and multicast trees in wireless networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. 2000. <http://www.ee.washington.edu/research/nsl/class/565/2002wtr/wieselthier.pdf>
- [9] Guo S, Yang OWW, Leung VCM. Energy-Aware multicasting in wireless ad hoc networks: A survey and discussion. *Elsevier Computer Communications*, 2007,30(4):2129–2148.
- [10] Li FM, Xu WJ, Liu XH. Power control for wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2008,19(3):716–732 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/716.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.0716]
- [11] Ramanathan R. On the performance of ad hoc networks with beamforming antennas. In: Proc. of the ACM MOBIHOC. 2001. 95–105. <http://www.ir.bbn.com/~ramanath/pdf/mobihoc01-beamform.pdf>
- [12] Wieselthier JE, Nguyen GD, Ephremides A. Energy-Limited wireless networking with directional antennas: The case of session-based multicasting. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. 2002. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/7943/21921/01019260.pdf>
- [13] Chang JH, Tassiulas L. Energy conserving routing in wireless ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. 2000. 22–31. <http://www.ee.washington.edu/research/nsl/class/566/2001spr/papers/2.pdf>
- [14] Čagalj M, Hubaux JP, Enz C. Minimum-Energy broadcast in all-wireless networks: NP-Completeness and distribution issues. In: Proc. of the ACM MOBICOM. 2002. 172–182. <http://www.sigmobile.org/mobicom/2002/papers/p044-cagalj.pdf>
- [15] Liang WF. Constructing minimum-energy broadcast trees in wireless ad hoc networks. In: Proc. of the ACM MOBIHOC. 2002. 112–122. [http://cs.anu.edu.au/people/Weifa.Liang/conf\\_papers/p23-liang.pdf](http://cs.anu.edu.au/people/Weifa.Liang/conf_papers/p23-liang.pdf)
- [16] Li DY, Liu Q, Hu XD, Jia XH. Energy efficient multicast routing in ad hoc wireless networks. *Computer Communications*, 2007, 30(18):3746–3756. [doi: 10.1016/j.comcom.2007.09.003]
- [17] Kang I, Poovendran R. Maximizing static network lifetime of wireless broadcast ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE ICC. 2003. 2256–2261. <http://www.ee.washington.edu/research/nsl/papers/ICC-03.pdf>

- [18] Hou YT, Shi Y, Serali HD, Wieselthier JE. Online lifetime-centric multicast routing for ad hoc networks with directional antennas. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. 2005. 761–772. <http://filebox.vt.edu/users/yshi/papers/Infocom05.pdf>
- [19] Du DZ, Ko KI. Theory of Computational Complexity. Hoboken: John-Wiley, 2000.
- [20] Wan PJ, Călinescu G, Li XY, Frieder O. Minimum-Energy broadcast routing in static ad hoc wireless networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. 2001. 1162–1171. <http://www.cs.iit.edu/~xli/paper/Conf/energy-INFOCOM01.pdf>
- [21] Wan PJ, Călinescu G, Yi CW. Minimum-Power multicast routing in static ad hoc wireless networks. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2004,12(3):507–514. [doi: 10.1109/TNET.2004.828940]
- [22] Kang I, Poovendran R. A novel power-efficient broadcast routing algorithm exploiting broadcast efficiency. In: Proc. of the IEEE VTC. 2003. 2926–2930. <http://stinet.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA459890&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf>
- [23] Li FL, Nikolaidis I. On minimum-energy broadcasting in all-wireless networks. In: Proc. of the IEEE CLCN. 2001. 14–16. <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=871792>
- [24] Zhang X, Lu SL, Chen GH, Chen DX, Xie L. Topology control for wireless sensor networks. Journal of Software, 2007,18(4): 943–954 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/943.htm> [doi: 10.1360/jos180943]
- [25] Toussaint GT. The relative neighborhood graph of finite planar set. Pattern Recognition, 1980,12(4):261–268. [doi: 10.1016/0031-3203(80)90066-7]
- [26] Cartigny J, Simplot D, Stojmenović I. Localized minimum-energy broadcasting in ad-hoc networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. 2003. [http://www.ieee-infocom.org/2003/papers/54\\_01.PDF](http://www.ieee-infocom.org/2003/papers/54_01.PDF)
- [27] Stojmenovic I, Seddigh M, Zunic J. Dominating sets and neighbor elimination based broadcasting algorithms in wireless networks. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 2002,13(1):14–25. [doi: 10.1109/71.980024]
- [28] Cartigny J, Ingelrest F, Simplot-Ryl D, Stojmenović I. Localized LMST and RNG based minimum-energy broadcast protocols in ad hoc networks. Ad Hoc Networks, 2005,3(9):1–16. [doi: 10.1016/j.adhoc.2003.09.005]
- [29] Li N, Hou JC, Sha L. Design and analysis of an MST-based topology control algorithm. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. 2003. 1702–1712. [http://www.ieee-infocom.org/2003/papers/42\\_01.PDF](http://www.ieee-infocom.org/2003/papers/42_01.PDF)
- [30] Li XY, Wang Y, Wan PJ, Frieder O. Localized low weight graph and its applications in wireless ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. 2004. [http://www.ieee-infocom.org/2004/Papers/10\\_1.PDF](http://www.ieee-infocom.org/2004/Papers/10_1.PDF)
- [31] Ingelrest F, Simplot-Ryl D. Localized broadcast incremental power protocol for wireless ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE ISCC. 2005. 28–33. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.3.8096&rep=rep1&type=pdf>
- [32] Wang B, Gupta SKS. S-REMIT: A distributed algorithm for source-based energy efficient multicasting in wireless ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE GLOBECOM. 2003. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.1.9153&rep=rep1&type=pdf>
- [33] Liang WF. Approximate minimum-energy multicasting in wireless ad hoc networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2006,5(4): 377–387. [doi: 10.1109/TMC.2006.1599406]
- [34] Li DY, Zhu QH, Li Z. Energy efficient multicast routing for discrete power levels in ad hoc wireless networks. In: Proc. of the IEEE WiCOM. 2008. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=4677908>
- [35] Li DY, Jia XH, Liu H. Energy efficient broadcast routing in static ad hoc wireless networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2004,3(2):144–151. [doi: 10.1109/TMC.2004.10]
- [36] Qayyum A, Viennot L, Laouiti A. Multipoint relaying for flooding broadcast messages in mobile wireless networks. In: Proc. of the HICSS. 2002. <http://hipercom.inria.fr/olsr/hicss2001.ps>
- [37] Wu J, Li HL. A dominating set based routing scheme in ad hoc wireless networks. Telecommunication Systems, 2001,18(2):13–36. [doi: 10.1023/A:1016783217662]
- [38] Wu J, Dai F. Broadcasting in ad hoc networks based on self-pruning. Int'l Journal of Foundations of Computer Science (IJFCS), 2003,14(2):201–221. [doi: 10.1142/S0129054103001686]
- [39] Wieselthier JE, Nguyen GD, Ephremides A. Energy-Aware wireless networking with directional antennas: The case of session-based broadcasting and multicasting. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2002,1(3):176–191. [doi: 10.1109/TMC.2002.1081754]
- [40] Li DY, Li Z, Liu L. Energy efficient broadcast routing in ad hoc sensor networks with directional antennas. In: Proc. of the WASA. 2008. <http://www.springerlink.com/content/a5n738tq4615878n/>

- [41] Cartigny J, Simplot-Ryl D, Stojmenović I. Localized energy efficient broadcast for wireless networks with directional antennas. In: Proc. of the Mediterranean Ad Hoc Networking (IFIPMED-HOC-NET) Workshop. 2002. <http://www.lifl.fr/~simplot/hdr/hdra6.pdf>
- [42] Cartigny J, Simplot-Ryl D, Stojmenović I. An adaptive localized scheme for energy-efficient broadcasting in ad hoc networks with directional antennas. In: Proc. of the PWC 2004. 2004. 399–413. <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsid=16208790>
- [43] Cheng MXY, Sun JH, Min MK, Li YS, Wu WL. Energy-Efficient broadcast and multicast routing in ad hoc wireless networks. In: Proc. of the IEEE IPCCC. 2003. 87–94. <http://www.cs.gsu.edu/~cscysl/papers/mwia.pdf>
- [44] Georgiadis L. Bottleneck multicast trees in linear time. IEEE Communications Letters, 2003,7(11):564–566. [doi: 10.1109/LCOMM.2003.820102]
- [45] Guo S, Yang O. Multicast lifetime maximization for energy-constrained wireless ad-hoc networks with directional antennas. In: Proc. of the IEEE GLOBECOM. 2004. 4120–4124. <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F9481%2F30082%2F01379140.pdf>
- [46] Guo S, Leung V, Yang O. A scalable distributed multicast algorithm for lifetime maximization in large-scale resource-limited multi-hop wireless networks. In: Proc. of the ACM IWCMC. 2006. 419–424. <http://delivery.acm.org/10.1145/1150000/1143633/p419-guo.pdf?key1=1143633&key2=2413339321&coll=GUIDE&dl=GUIDE&CFID=30468666&CFTOKEN=57419105>
- [47] Guo S, Yang OWW, Leung VCM. Tree-Based distributed multicast algorithms for lifetime maximization in wireless ad hoc networks with omni-directional and directional antennas. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2007,1(2):20–30.
- [48] Guo S, Yang O, Leung V. Approximation algorithms for longest-lived directional multicast communications in WANETs. In: Proc. of the ACM MOBIHOC. 2007. <http://www.u-aizu.ac.jp/~sguo/mobihoc07-guo.pdf>
- [49] Chen ZM, Qiao CM, Xu JH, Lee TK. A constant approximation algorithm for interference aware broadcast in wireless networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. 2007. <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F4215581%2F4215582%2F04215674.pdf>
- [50] Yang SH, Wu J, Cardei M. Efficient broadcast in MANETs using network coding and directional antennas. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. 2008. [http://www.cse.fau.edu/~jie/research/publications/Publication\\_files/TPDS2009a.pdf](http://www.cse.fau.edu/~jie/research/publications/Publication_files/TPDS2009a.pdf)
- [51] Mahjourian R, Chen F, Tiwari R, Thai M, Zhai HQ, Fang YG. An approximation algorithm for conflict aware broadcast scheduling in ad hoc networks. In: Proc. of the ACM MOBIHOC. 2008. <http://166.111.120.94/acm/Files/20090410114123828872%5B@211.71.28.232%5D@page.pdf>

#### 附中文参考文献:

- [5] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络. 软件学报, 2003, 14(7): 1282–1291. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1282.htm>
- [6] 孙利民, 李建中, 陈渝, 朱红松. 无线传感器网络. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [10] 李方敏, 徐文君, 刘新华. 无线传感器网络功率控制技术. 软件学报, 2008, 19(3): 716–732. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/716.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.0716]
- [24] 张学, 陆桑璐, 陈贵海, 陈道蓄, 谢立. 无线传感器网络的拓扑控制. 软件学报, 2007, 18(4): 943–954. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/943.htm> [doi: 10.1360/jos180943]



李政(1984 - ),男,宁夏银川人,硕士,主要研究领域为无线自组织网络,传感器网络.



李德英(1965 - ),女,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机通信与网络,无线自组织网络与 Mesh 网络,传感器网络,算法设计与分析.