

一种多跳无线网络中的高效广播算法

刘靖永 李乐民

(电子科技大学通信与信息工程学院 成都 610054)

摘要: 广播是多跳无线网络中的一种基本操作。现有的广播算法中普遍存在转发冗余过多的问题。该文首先分析了覆盖网络所需的最少转发节点数目, 然后以此为基础, 提出了一种简单高效的广播算法。该算法中, 每个节点最多只需选择 3 个转发节点, 从而明显地减少了广播的转发次数, 提高了节点能量和网络资源的利用率; 同时, 所有转发节点实现了对整个网络接近双重的覆盖, 能够保证较高的传输可靠性; 此外, 对不同的网络规模和拓扑的动态变化, 该算法具有较好的可扩展性。仿真结果显示, 该算法在多种常见的网络环境下具有比现有方法更优越的性能。

关键词: 无线网络; 多跳网络; 广播; 洪泛

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)12-2813-06

An Efficient Broadcast Method in Multi-hop Wireless Networks

Liu Jing-yong Li Le-min

(School of Communication and Information Engineering,

University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Broadcast is a common operation in multi-hop wireless networks. However, previous schemes either have much transmission redundancy or cost too much overhead. In this paper, the minimal number of forwarding nodes needed to cover a network is analyzed. On this basis, a simple broadcast method is proposed to increase significantly the transmission efficiency. In this method, each forwarding node only needs to select no more than three forwarding nodes. The set of forwarding nodes can provide nearly double coverage to all the network area thus provide high delivery ratio. In addition, it has excellent scalability in large scale networks and highly dynamic environment. Simulation results show that the method exhibits much better performance in variety of network conditions, compared with existing methods.

Key words: Wireless networks; Multi-hop networks; Broadcast; Flooding

1 引言

广播(broadcast)操作是多跳无线网络中的一项基本功能。其传统的实现方法——洪泛(flooding)协议^[1]容易产生过多的传输冗余(transmission redundancy)和信号冲突, 因此会消耗大量的节点能量, 并造成网络拥塞而导致节点丢包。这一现象称为广播风暴(broadcast storm)问题^[2]。为了优化网络资源的利用, 实现传输的可靠性, 近年来, 针对多跳无线网络, 提出了很多改善广播操作效率的方法。这些方法按照节点所需邻居信息可分为 3 类: 不需要邻居信息的方法, 基于 1 跳邻居信息的方法和基于两跳或多跳邻居信息的方法^[3]。第 1 类方法包括基于概率的方法和基于面积的方法^[2,4]等, 这类协议虽然不需要节点了解邻居信息, 但要设置一个全局门

限值, 因而在节点密度或网络负载变化时性能较差。基于 1 跳邻居信息的协议中, 比较著名的包括 FSP^[5]、Edge Forwarding^[6]等。文献[7]对部分广播算法进行了分类和比较, 结果表明: FSP 协议在大多数网络环境下, 对性能的改善非常有限。两跳或多跳的方法包括 MPR^[8]、基于连接主导集(CDS)的方法^[9-12]等多种。最小连接主导集(MCDS)是完成广播功能所需的最少转发节点集合, 确定网络的 MCDS 是一个 NP 完全问题, 这些方法试图通过近似算法找出最少的转发节点, 然而, 维护 CDS 需要节点了解较多的网络拓扑信息并且计算复杂度较高, 因此难以在节点移动频繁或节点密度较大的网络中实现, 而且由于近似因子较大其结果并不理想。

无线网络中除了存在大量的冲突和拥塞外, 还容易出现传输错误。因此, 要实现可靠的广播存在很大的困难^[13]。过去的研究证明: 在一定程度上减少转发冗余可以减少由于冲突造成的丢包, 从而提高传输的可靠性^[10]。在容易出现传输错误的无线信

2008-11-26 收到, 2009-05-07 改回

国家重点基础研究发展 973 计划(2007CB307104, 2007CB307100)资助课题

道中提供完全的传输可靠性是不现实而且不必要的,尤其在节点密度较大的网络中,提高广播的转发效率更具有实际意义。基于邻居信息的广播协议的基本思想是每个节点在其所有邻节点中,选择部分节点作为转发节点,使得所有两跳邻居能够被这个转发节点集合覆盖^[7]。然而用1跳转发节点完全覆盖两跳邻节点会产生过多传输范围的重叠(transmission overlap),因此降低了广播的效率。以前的研究没有考虑过这个问题。

本文的目的是在保证较高送达率的前提下,尽可能地减少转发次数。文中首先分析了在节点理想分布的网络中实现全网覆盖所需的最小节点数目,并找到利用最少数目的转发节点实现对整个网络双重覆盖的方法,在此基础上提出一种3点转发的广播(Triple Forwarding Broadcast, TFB)算法。与以往的方法相比,TFB算法具有如下优点:(1)每个节点最多只需选择三个最优的转发节点,明显提高了转发效率;(2)所有转发节点实现了对整个网络区域接近双重的覆盖,能够提供较高的传输送达率;(3)具有良好的可扩展性,适于大规模的网络和拓扑剧烈变化的环境;(4)仅使用一跳邻居信息并且所需的计算量很小,因而减小了协议的开销,易于实现。

2 实现网络双重覆盖所需的最小转发节点个数

本文研究大型网络,即网络在任意方向的长度远远大于节点的传输半径。假设网络是连通的并且节点密度足够大;所有节点具有相同的传输半径 R 。假设节点通过GPS等方式知道自己所处的绝对位置。每个节点可以通过节点周期性的发送hello消息获得一跳邻居信息,包括节点ID和节点位置。

2.1 覆盖网络的最小转发节点个数

定理1 在网络节点分布理想的情况下,图1(b)中所示的转发节点分布方式能够用最少数目的转发节点实现对网络无缝的覆盖,所需的转发节点个数为 $9n(n+1)/2$,其中 $n=1,2,3,\dots$ 为图1(a)中所示的包围源节点 S 所需的转发节点层数。

证明 首先引入使用最少个数的半径为 R 的圆盘无缝地覆盖整个平面的问题。Kershner^[14]证明了图1(a)中所示的排列方法是实现这种覆盖的最有效方式,平面由边长为 R 的正六边形镶嵌覆盖,每个圆盘分别与一个正六边形外接。把每个圆盘看作节点的传输范围,节点在圆心处。以源节点所在的圆为中心,其他圆按照到中心圆盘的距离分层,层数依次为 $1,2,3,\dots$ 。则每层圆盘的个数为

$$6n, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

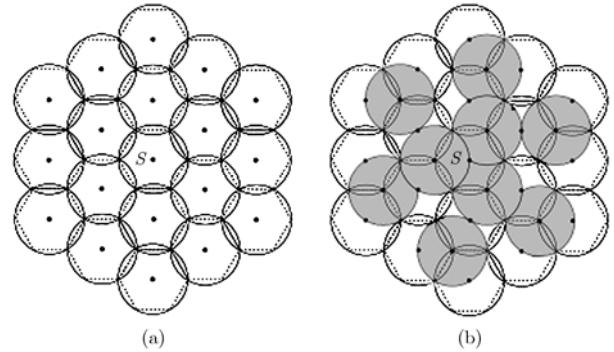


图1 覆盖网络的最小转发节点个数

为了完成转发,必须使这些节点互相连接。使两个节点互相连接必须在两个圆盘的相交区域增加转发节点。令 S 与第1层节点连接最少需要3个节点,此时连接节点落在中心圆盘与其他两个圆盘的公共交点,可以同时使 S 与两个第1层节点连接。同理,第1层与第2层连接最少需要6个节点,如图1(b)所示。每两层间需要增加的节点个数为

$$6n/2 = 3n, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

除源节点所在的圆盘以外,圆盘的个数可表示为两个等差数列分别为式(1)和式(2)。所以,总的圆盘个数即覆盖网络所需的最小转发节点个数为

$$(3 + 3n)n/2 + (6 + 6n)n/2 = 9n(n+1)/2, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

证毕

图1(b)所示的转发节点组成的子网中,每一个节点与其他两个或3个节点相连,这种结构具有最优的转发效率。但其中每个连接都是非冗余的,任何一个节点的传输错误都会导致部分节点丢包甚至无法继续转发。为了改善这一问题,提高可靠性,本文提出了定理2中利用最少个数的转发节点对网络进行双重覆盖的方法,与图1(b)所示的最优覆盖方法相比,这种方法通过增加很少的转发节点实现了对网络的双重覆盖,并且任意两个节点之间都有至少3条路径相连,增强了容错能力。

定理2 在节点分布理想的网络中,将网络平面划分为正六边形的网格,在每个六边形顶点处分别有一个转发节点,如图2(a)所示。这种转发节点分布方式能够用最少数目的转发节点实现对整个网络的双重覆盖,其中每个转发节点与其他3个转发节点相连接。

证明 将图1(a)中所有圆盘圆心位置移动到对应六边形的同一方位的顶点,可得到图2(b)或图2(c)所示的两种排列方式,这两种排列方式均等价于图1(a)中所示的方式。将这两组圆盘按照网格对齐叠加在一起,即得到图2(a)所示的节点分布。这种转

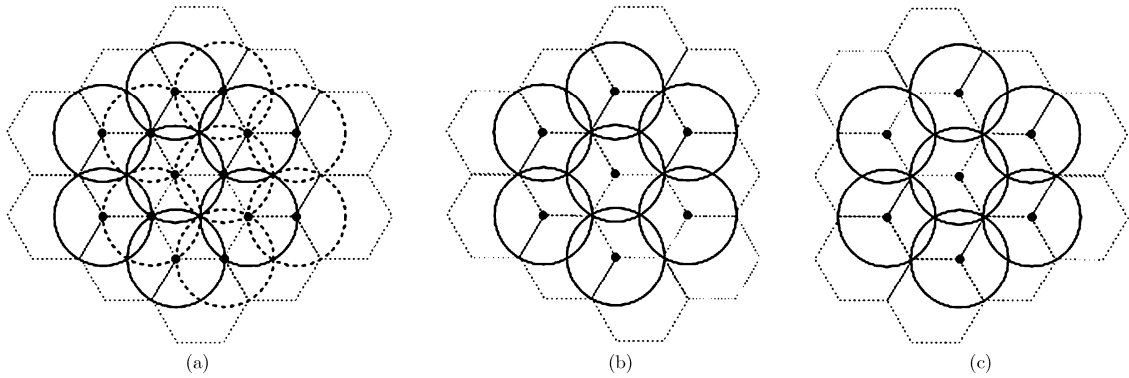


图 2 双重覆盖网络的最少转发节点个数

发节点的分布方式实现了最高效率的双重覆盖，并且任意两点之间都有至少 3 条路径相连。此外，圆盘之间的重叠面积最小，并可按式(4)，式(5)计算得到。两个节点传输范围的重叠面积(如图 3 所示)为

$$OA = 4 \int_{d/2}^R \sqrt{R^2 - x^2} dx \quad (4)$$

其中 d 为两节点之间的距离；图 2(a)中每个传输范围内总的重叠面积为

$$OA_{total} = 3OA_{1-hop} + 6OA_{2-hop} \approx 4.77R^2 \quad (5)$$

证毕

3 3 点转发广播算法

由图 2(a)中的转发节点结构我们提出了 3 点转发广播算法(TFB)。实际的网络不能得到这种理想的拓扑，当转发节点不在最佳位置时，覆盖效果会出现偏差。当转发节点距离较近时，会产生更多的重叠覆盖区域但不会影响其连接性；而且，只要保证节点分布的方向尽量对称，就可以尽量完全地覆盖网络。因此选择转发节点的思想是使每个节点尽量靠近 3 个理想方向并且具有尽可能大的附加覆盖面积(Additional Covered area, AC^[2])。转发节点的选择方法在 3.1 节中给出，需要注意的是，由于节点的附加覆盖面积 AC(如图 3 所示)是距离 d 的单调增函数且近似于 d 的线性函数，因此可以用距离 d 代替 AC 以降低计算量。

TFB 协议的工作过程:源节点在发送数据包时，首先选择 3 个最优的邻节点作为转发节点，将转发节点列表附加在数据包头中，然后广播该数据包。邻居节点接收到数据包后，检查是否已接收过，如果是则丢弃；否则将该包转交至上层协议，然后检查是否需要转发此包，如果是则选择另外两个转发节点加入节点列表并转发该包。所有节点重复此过程直到数据包到达网络边缘。

3.1 转发节点选择方法

源节点首先计算到每个邻居的距离，并选择距离最远的节点作为第一个转发节点，用 N_0 表示，其余两个节点基于 N_0 的位置选择。以源节点所在的位置为原点，直线 SN_0 为横坐标建立直角坐标系。将源节点的传输范围划分为三个角度为 $\pi/3$ 的扇形区域，如图 4 所示。对每个邻节点 n 定义一个角度函数

$$f_n = |\cos(3\alpha/2)|, \alpha = \angle N_0On, 0 \leq \alpha < 2\pi \quad (6)$$

和一个位置函数

$$g_n = f_n \cdot d_{Sn} \quad (7)$$

角度函数描述了节点接近最优方向的程度，如图 5 所示，其函数值在 $0, 2\pi/3, 4\pi/3$ 三个方向最大。位置函数用来描述节点位置与最佳位置的接近程度，节点的位置函数值越大越接近图 2(a)中所示的最佳位置。

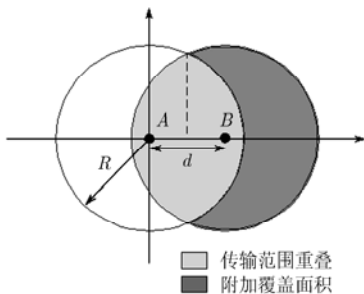


图 3 传输范围重叠和附加覆盖面积

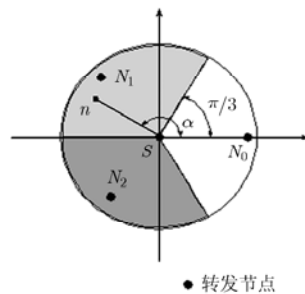


图 4 转发节点选择示意图

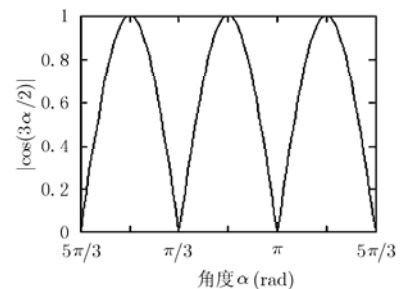


图 5 节点的角度函数

转发节点选择过程: 源节点首先计算并选择距离最大的邻节点作为 N_0 , 确定了 N_0 的位置以后, 源节点按式(6)和式(7)分别计算除 N_0 外所有邻节点的位置函数值。然后, 在 N_0 所在区域以外的两个扇形区域分别选择 g_n 值最大的节点作为转发节点。对于中间转发节点, N_0 为上一跳节点, 只需要按照相同的方法计算另外两个转发节点。这种节点选择方法保证了节点最均匀的分布在 3 个方向并且每个节点能产生尽可能大的附加覆盖面积。

3.2 消除相近的转发节点

实际网络拓扑与理想节点分布存在偏差, 而且转发节点在每个节点本地最优选择, 这会造成不同的节点在相近位置选择两个转发节点(在理想分布时是同一个节点)。本文称这种现象为相近节点。相近节点会产生传输冗余并且这种现象会蔓延, 我们引入一个门限值 d_{th} 来避免相近节点都进行转发。当两个转发节点距离小于 d_{th} 时, 只允许具有较大 g_n 值的节点发送。 d_{th} 的值影响转发次数和广播包送达率。 d_{th} 较小时, 转发次数较多, 转发冗余度较大, 节点收到数据包的机会也更多。然而过多的转发冗余会增加网络中的冲突甚至造成拥塞。这是一种折衷关系。 d_{th} 值的设置与网络节点密度有关, 其原则是在保证较高送达率的同时使转发次数尽量少。

4 仿真实验及结果分析

我们将TFB的性能与其他3种协议进行了仿真比较, 3种协议分别是洪泛协议(Pure flooding)^[1], 边缘转发协议(Edge Forwarding)^[5]和基于连接主导集的广播算法(CDS-based flooding)^[8]。洪泛协议是在多跳无线网中实现广播的常用方法, 边缘转发协议是一种基于一跳邻居信息的方法, 基于连接主导集的方法则是一种典型的使用两跳邻居信息的方法。仿真基于ns-2平台(版本2.29)。仿真参数设置如下: 无线传播信道采用two-ray ground reflection model; MAC层使用无RTS/CTS/ACK机制的IEEE 802.11协议; 无线信道的带宽为缺省值2 Mbps; 每个数据包长度固定, 为256 byte; 网络负载设置为10 Pkt/s; d_{th} 设为 $0.5R$ 。每次仿真运行时间为150 s, 结果为100次运行的平均值。性能评价参数为送达率(delivery ratio)和转发率(forwarding ratio)。送达率用来评价协议的传输可靠性, 其定义为成功接收到数据包的节点数与网络节点总数的比值。使用转发率来评价协议的转发效率, 定义为转发节点的平均个数对网络节点总数的比值。每次运行的结果为所有数据包的平均值。本文研究在不同的节点密度和节点采用不同传输范围时协议的性能。由于洪泛协

议是每个节点转发一次, 其转发率为100%, 因此在图7和图9中省略。

实验1 节点密度对协议性能的影响

仿真条件为: 200到1000个网络节点随机分布在面积为 $1000\text{ m} \times 1000\text{ m}$ 的正方形区域内。节点传输范围为250 m。节点最大速度为20 m/s。仿真结果示于图6和图7。

图6显示TFB的性能明显优于其他对比协议。由于TFB能提供几乎双重的传输覆盖, 当节点数较少时能获得接近100%的送达率。当节点密度增大是, 网络中出现较多的冲突, 因而所有协议的送达率降低, 其中TFB协议的降低较小, 当节点数目为1000时仍然获得大于95%的送达率。这是由于TFB使用很少的转发节点, 相对其他协议表现出更好的优势。图7中, TFB协议的转发效率与其他协议相比具有很大的改善, 对所有节点数转发率都不超过10%。在TFB中, 转发节点的数目只与网络范围相关, 并且当节点密度增大时, 转发节点数目减少并趋于最低值, 节点的分布也趋于最优分布。

实验2 节点传输范围对协议性能的影响

仿真的运行条件为: 1000个节点随机分布在 $1000\text{ m} \times 1000\text{ m}$ 的网络区域内。节点的传输范围分别设为100 m到300 m。节点最大速度仍为20 m/s。仿真结果示于图8和图9。

由图8可以看到, TFB在节点传输范围变化时性能均明显优于其他3种协议, 在传输范围为100 m时能提供大于95%的送达率, 300 m时接近100%; 而洪泛协议、边缘转发协议和基于CDS的广播协议的送达率在节点传输范围较小时都较低。随着传输范围增大所有协议的送达率逐渐增大, 这是由于节点传输范围增大时, 一方面会造成较多的冲突, 同时也增加了节点收到包的机会。图9中的结果显示了TFB在不同传输范围时的转发效率明显优于其他两种协议。其结果与图7中类似, 这是由于传输范围增大同样使节点密度增大, 与节点数目增加具有类似的效果; 同时, 传输范围增大时广播操作所需的跳数减少, 从而减少了转发节点的数目。这两种仿真试验的结果也表明: TFB更适合于节点密集的网络。

实验3 TFB协议的可扩展性

本文还针对不同的网络规模和节点速度分别运行了TFB协议。网络规模通过相同节点密度但不同的节点数和网络面积反映。运行条件为: 节点数目分别为200, 400, 800和1600, 对应的正方形网络区域边长分别为1000 m, 1414 m, 2000 m和2828 m; 节点最大速度为20 m/s; 传输范围为250 m。结果示于图10。不同节点速度反应网络拓扑的变化

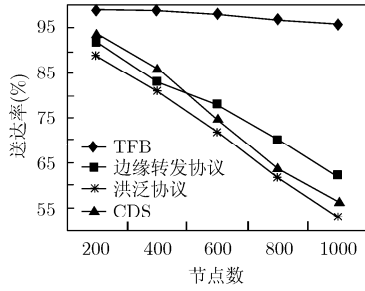


图 6 不同节点密度时的送达率

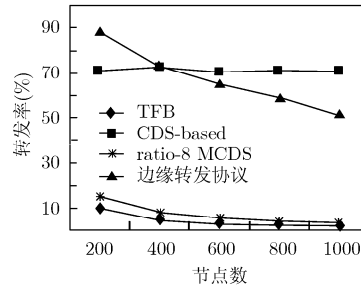


图 7 不同节点密度时的转发率

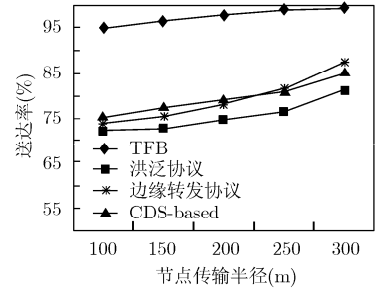


图 8 不同节点传输范围时的送达率

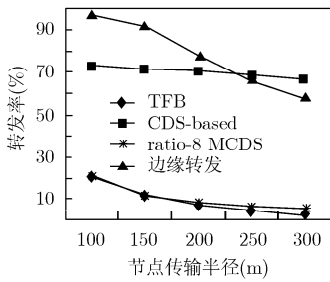


图 9 不同节点传输范围时的转发率

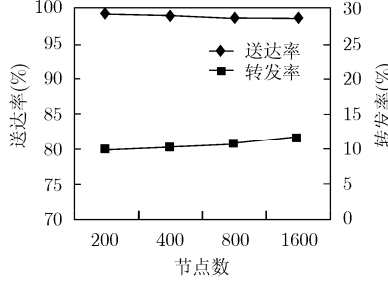


图 10 不同的网络规模下 TFB 的性能

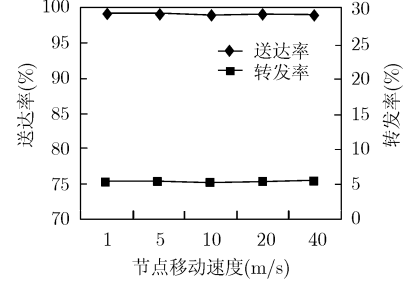


图 11 不同节点速度下 TFB 的性能

程度，最大节点速度分别设置为 1, 5, 10, 20 和 40 m/s。节点数为 500，网络面积为 1000 m × 1000 m。传输范围同样为 250 m。其结果显示于图 11。由图 10 可以看到，对于不同的网络规模 TFB 的性能均表现良好(送达率接近 100%，而转发率维持在 10%左右)，在网络面积增大时无明显变化。这得益于 TFB 采用极少的转发节点个数。图 11 显示出类似的结果，TFB 的性能不受节点速度影响。这是由于 TFB 采用一跳邻居信息，能够实时更新；并且转发节点的选择基于每一个数据包，使得转发节点总是处于最优的位置。此仿真结果说明 TFB 具有良好的可扩展性，适用于大规模的网络或拓扑剧烈变化的环境。

5 结束语

多跳无线网络中广播操作的传输冗余会产生额外的网络负载，增加信号冲突甚至使网络拥塞。除此之外，传输范围重叠过多也是造成性能降低的主要原因。本文分析了理想拓扑中覆盖网络最有效的转发节点分布方式，并由此提出了一种简单的 3 点转发广播算法——TFB。该算法的主要特征包括：每个节点只选择 2 到 3 个转发节点，并且转发节点传输范围之间的重叠面积最小；所有转发节点能够实现对整个网络接近双重的覆盖。因此，TFB 协议可以在保证较高送达率的同时明显提高广播操作的转发效率。此外，该算法具有良好的可扩展性并易于实现。

参考文献

- [1] Ho C, Obraczka K, Tsudik G, and Viswanath K. Flooding for reliable multicast in multi-hop Ad hoc networks [C]. Proc. of the 3rd Int'l Workshop on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications (DiaLM), Seattle, USA, 1999: 64-71.
- [2] Ni S Y, Tseng Y C, Chen Y S, and Sheu J P. The broadcast storm problem in a mobile Ad hoc network [C]. Proc. of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM '99), Seattle, USA, Aug. 1999: 151-162.
- [3] Liu H, Jia X H, Wan P J, Liu X X, and Yao F. A distributed and efficient flooding scheme using 1-hop information in mobile Ad hoc networks [J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2007, 18(5): 658-671.
- [4] Heissenbüttel M, Braun T, Wälchli M, and Bernoulli T. Optimized stateless broadcasting in wireless multi-hop networks [C]. Proc. IEEE INFOCOM2006, Barcelona, Spanish, April 23-29 2006: 1-12.
- [5] Lim H and Kim C. Multicast tree construction and flooding in wireless Ad hoc networks [C]. Proc. of the ACM Intl Workshop on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile System (MSWIM), Boston, USA, Aug. 2000: 61-68.
- [6] Cai Y, Hua K A, and Phillips A. Leveraging 1-hop neighborhood knowledge for efficient flooding in wireless Ad hoc networks [C]. Proc. IPCCC 2005, Phoenix, Arizona, April 7-9, 2005: 347-354.

- [7] Williams B and Camp T. Comparison of broadcasting techniques for mobile ad hoc networks [C]. Proc. of the 3rd ACM International Symposium on Mobile and Ad Hoc Networking and Computing (Mobi-Hoc '02), Lausanne, Switzerland, June 2002: 194-202.
- [8] Qayyum A, Viennot L, and Laouiti A. Multipoint relaying for flooding broadcast messages in mobile wireless network[C]. Proc. of the 35th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii, USA, Jan. 7-10, 2002: 3866-3875.
- [9] Wu J and Li H. On calculating connected dominating set for efficient routing in Ad hoc wireless networks [C]. Proc. of the 3rd Int'l Workshop on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications (DiaLM), Seattle, USA, 1999: 7-14.
- [10] Stojmenovic I, Seddigh M, and Zunic J. Dominating sets and neighbor elimination-based broadcasting algorithms in wireless networks [J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2002, 13(1): 14-25.
- [11] Thai M T, Wang F, Liu D, Zhu S, and Du D Z. Connected dominating sets in wireless networks with different transmission ranges [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2007, 6(7): 721-730.
- [12] Yang H Y, Lin C H, and Tsai M J. Distributed algorithm for efficient construction and maintenance of connected k-hop dominating sets in mobile Ad hoc networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2008, 7(4): 444-457.
- [13] Lou Wei and Wu Jie. Toward broadcast reliability in mobile Ad hoc networks with double coverage [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2007, 6(2): 148-163.
- [14] Kershner R. The number of circles covering a set [J]. *American Journal of Mathematics*, 1939, 61(1): 665-671.
- 刘靖永: 男, 1973 年生, 博士生, 研究方向为多跳无线网络。
李乐民: 男, 1932 年生, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 研究方向为光纤通信网络和无线通信网络。