

面向移动自组网的高效多点中继选择算法

王 斌 段友祥

(中国石油大学(华东)计算机与通信工程学院 青岛 266580)

摘 要 多点中继选择算法是一种泛洪技术,可用于移动自组网中信息的有效传播,减少不必要的节点选取及网络中数据包冲突的数量,从而达到节约节点能量、延长移动自组网的生存周期以及减少节点查找和信息传播的时间的目的。从探索集合覆盖理论与多点中继算法的关系入手,提出了新的适应度函数,并改进了经典的多点中继算法。最后采用模拟实验来验证提出的算法。仿真结果表明,该算法能够减少14%的搜索节点数目、12%的能量消耗以及9%的信息传递时间,在一定程度上改进了移动自组网的性能。

关键词 移动自组网,多点中继,集合覆盖

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Efficient Multipoint Relay Selection Algorithm Facing Mobile Ad hoc Algorithm

WANG Bin DUAN You-xiang

(College of Computer and Communication Engineering, China University of Petroleum(East), Qingdao 266580, China)

Abstract Multipoint relay selection algorithm is a flooding technique which can be used to propagate message in MANET. This algorithm is proved to save node's energy and prolong the MANET's life, and also can reduce the number to be searched and reduce the broadcasting time. This paper began with the relationship between set covering problem and multipoint relay selection algorithm to improve the classic algorithm and then proposed a new one called efficient multipoint relay selection algorithm (E-MRSA). The simulation results show that the new algorithm can reduce the number of nodes up to 14%. Moreover, it also can reduce the power-consumption of network up to 12% and save the propagation time by 9%. So the E-MRSA algorithm can improve the performance of mobile Ad hoc networks in a certain extent.

Keywords Mobile Ad hoc network, Multipoint relay, Set covering

1 简介

泛洪技术是网络中传递信息的主要方式之一,特别是在移动自组网中,被用来进行路由,寻找路径,通知事件等。但是在移动自组网的泛洪机制中,有两方面的问题不容忽视。

(1)数据报的数量。完整的泛洪过程中发送数据包的数量对于移动自组网来说至关重要。移动自组网本身就依靠有限的自带电源,占用有限的频段,其发送数据包的数量越大,移动节点消耗的能量也就越大,同时还会产生网络阻塞。(2)传播时间。一次完整的泛洪过程需要对整个网络发送数据包来确定网络拓扑结构,需要的时间非常长。在移动自组网中,节点都是移动的,拓扑结构随时都在变化,花费的时间太长,那么获取的网络路径没有任何使用价值。

常用的泛洪方法是盲目泛洪(blind flooding)^[1],这种方法需要所有节点都转发接收到的数据包。这是执行效率最低的一种方法,因为它会产生许多不必要的信息。与盲目泛洪相比,许多优化后的算法能够减少转接节点的数目,通常分为

基于发送方的算法和基于接收方的算法。在基于发送方的算法中,节点发送一个数据包时,会首先选择邻居作为转发节点。而在基于接收方的算法中,是由下一个节点自己决定是否转发数据包。

基于OLSR路由算法,本文提出了高效多点中继的选择方法,这也是基于发送方的算法。本文首先简要描述多点中继算法存在的问题,然后定义了集合覆盖问题(Set Cover Problem)并将多点中继问题映射到文中提出的一种高效的多点中继算法,这是一种启发式的贪心算法。最后,通过实验证明在减少中继节点数目的条件下,这种算法能够节约能量,减少数据传播的时间。

2 多点中继选择算法

多点中继是为了减少包传递中冗余的节点,提高传递效率。这是对泛洪技术的改进,在候选节点中,选择一个子集而不是全部节点传递接收的数据包。这个子集被称为中继节点,可以看作是特定节点间的一次跳跃。研究的目标就是用

到稿日期:2011-12-20 返修日期:2012-02-24 本文受山东省自然科学基金(ZR2009GM010, ZR2011FL024),中央高校基本科研业务费专项资金(11CX04055A)资助。

王 斌(1981—),男,博士,主要研究方向为下一代网络、数据库应用, E-mail: loadingusa@gmail.com; 段友祥(1964—),男,教授,主要研究方向为数据库应用、网络安全。

尽量少的节点完成到另一个有效节点的第二跳来传递信息。同时作为一个基本目标,多点中继应该能够通过网络覆盖所有节点,这就意味着每个数据包应该像泛洪技术一样能够被所有节点接收到。

因为多点中继算法使用基于发送方的泛洪策略,所以决定第一跳和第二跳对于决定多点中继子集是至关重要的。因此,一些 HELLO 信息被设计出来进行局部广播,以收集第一跳后邻居的信息。针对局域网络,这些信息被周期性的广播用来更新节点周围的拓扑信息。

文献[2]中提出了针对 n 个节点的启发式贪婪算法:

算法 1 多点中继选择算法

1. $MPR \leftarrow \emptyset$
2. $N(n) \leftarrow$ 节点 n 的邻居节点
3. $N^2(n) \leftarrow N(n)$ 中第二跳能够到达的邻居节点
4. While $N^2(n)$ 中有节点没有被中継集合包含,那么执行 5,6
5. 对于所有的 $N(n) \notin MPR(n)$, 在 $N^2(n)$ 中没有被覆盖的集合中寻找上述节点
6. 在 $MPR(n)$ 中增加 $N(n)$
7. End while

多点中继选择机制是一种分布式技术,其中每个节点在单跳距离节点中选择中継,不获取已经被其他节点选择的节点。此算法比较容易实现,还能在许多场景下得到最优的中継节点子集。

许多工作已经减少了泛洪中的广播数,改进了多点中继机制。文献[3]提出了一种算法,用以预测中継节点,每个独立节点检查前面的并预测中継节点来获取比较可靠的通信。在采用这种方式删除一跳记录和与之连接的第二跳时,必须给予足够的时间去进行计算。因此,在密度较大、移动速率较快的情况下,这个算法可能不太适合内存和能量比较紧张的自组网。经典中継选择算法中,通常选择最远的节点作为转发节点(也被称作边界节点)。由于节点移动,这种机制下选择的节点作为边界丢失的概率非常高。在文献[4]中,作者提出了一种基于能量感知和移动感知的广播机制,其能够防止边界节点作为中継节点。而且,他们还设置了一个边界缓冲区来应对传递节点移动性强的情况。文献[4]试图选择更多的稳定节点用作中継节点,并通过预测来确定节点的移动方式。因此,他们的方法需要更多的内存空间来适应其移动性。

链接持续代表了一个节点在有效范围内与另一个节点连接的持续时间。文献[5]使用了链接持续(Link Duration)的理念作为选择中継节点的标准。而在选择的时候,不同类别的移动尺度所选择的节点几乎没有移动性。相比前面提到的方法,文献[6]比较注意服务范围,他们控制每个节点的 MAC 层的局部可用带宽,通过获取的数据计算服务质量(QoS)的值。然后局部通过 HELLO 信息分配可用带宽,从全局来控制拓扑信息。最后把邻居节点按照降序排列,使用中継算法选择中継节点。很明显,现有的工作主要是集中在利用不同的参数来提高中継选择机制上,而主要的算法还是保持不变。为此,本文提出了一个新的节能中継选择算法,它能够大大提高中継选择机制的工作效率。

3 集合覆盖问题与中継选择算法

集合覆盖问题(Set Covering Problem)是著名的优化问题,在许多领域特别是与移动自组网相关的问题中都有应

用^[7,8]。例如:对移动自组网的泛洪问题,已经提出的一个解决方案,即基于集合覆盖的多点中継算法。算法如下:

算法 2 基于集合覆盖的 Chavatal 算法

1. 在目标集中寻找最优子集。
2. 从目标集中删除已经选择成员来寻找没有被覆盖的成员。
3. 如果找到任意一个没有被覆盖的成员,转到第 1 步。

集合覆盖问题是从全集中选择一个能耗最小的子集。集合覆盖问题^[3]可以做如下描述:

$$\chi = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\} \quad (1)$$

$$S = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_m\}; \forall i \in \{1 \dots m\} \rightarrow s_i \subseteq \chi \quad (2)$$

$$W = \{w_1, w_2, w_3, \dots, w_m\} \quad (3)$$

式中, χ 是全集, s_i 是子集, S 表示 χ 中所有可能的子集。并且, W 是每个集合的功耗,与 S 中的元素是一一对应的关系。集合覆盖理论的目标是寻找一个新的子集,其中 S' 满足:

$$S' \subseteq S \quad (4)$$

S' 有两个条件:

$$\bigcup_{s_j \in S'} s_j = \chi \quad (5)$$

最小化

$$W(S') = \sum_{i=1}^m w_i x_i \quad (6)$$

$$\text{式中, } x_i = \begin{cases} 1, & s_i \in S' \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

要想把多点中継问题映射到集合覆盖问题,应该对 χ, S 和 S' 重新做如下定义:

1. X : 基点;
2. $N(x)$: 距离 x 的第一跳节点集合;
3. $N^2(x)$: 距离 x 的第二条节点集合;
4. $MRP(x)$: 从 $N(x)$ 中选出的多点中継集合,能够覆盖 $N^2(x)$ 中的所有节点。

首先,假设

$$N^2(x) = \chi \quad (8)$$

$N^2(x)$ 是全集,可能被所选子集完全覆盖。因此定义 S 如式(9)所示, n_i 是距离 x 的第一跳的所有节点, $N(n_i)$ 表示距离 n_i 的所有第一跳节点。

$$N(x) = \{n_1, n_2, n_3, \dots, n_m\} \quad (9)$$

集合 $N(n_i)$ 能够被分为 3 个独立子集:

N_i : 通过 n_i 距离 x 两跳的所有节点集合;

$N_i(x)$: 距离 x 和 n_i 一跳的所有节点;

x : 距离 n_i 一跳距离的所有节点。

可以推导出 N_i 为:

$$N_i = (N(n_i) - N_i(x)) - x \quad (10)$$

因为这个集合中包含距离 x 的一些两跳节点,所以

$$N_i \in N^2(x) \quad (11)$$

现在定义 $N^1(x)$, 或者所有可能子集的集合可以表示为:

$$N^1(x) = \{N_1, N_2, N_3, \dots, N_m\} \quad (12)$$

N_i 相当于集合覆盖问题中的 S 。而多点中継问题算法的目标就是 $MRP(x)$, 相当于 S' , 因此根据式(4)可以得到如下公式:

$$MRP(x) \subseteq N^1(x) \quad (13)$$

$$\bigcup_{N_i \in MRP(x)} N_i = N^2(x) \quad (14)$$

从而当所有子集的并等于集合 x 的时候,就可以找到集合 $MRP(x)$, 如下所述:

最小化

$$W(MPR(x)) = \sum_{i=1}^m w_i x_i \quad (15)$$

$$\text{其中 } x_i = \begin{cases} 1, & N_i \in MPR(x) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

集合覆盖和中继选择算法的最大区别是没有权重函数来选择 N_i 集合。因此,需要提出一个新的权重函数:

$$\forall_{i=1}^m w_i : w_i = 1 \quad (17)$$

根据这个定义,多点中继算法就是基于权重函数的集合覆盖理论的一个应用。换句话说,多点中继算法是统一的集合覆盖问题,在 N_i 选择所有节点的能量耗费是相同的。

4 高效的多点中继算法 (Efficient MultiPoint Relay Selection Algorithm, E-MRSA)

与原始的算法相比,目前已有^[9-11]的优化算法能够减少中继节点的数目,达到传输的目的。然而,本文的观点是:提高节点之间的传输速度远比减少节点重要。本文提出的高效多点中继算法基于没有采用局部优化函数的爬山法。这个方法的目的是减少优化性能函数,从而提高节点间的传输速度。这个算法与原始的多点中继算法非常相似,主要有两点不同。首先,在原始的算法中,给每一节点增加了一个距离为一跳的邻居,从而有最多两跳的邻居节点;而在本文算法中,给中继节点集合减少或者增加一个邻居节点,从而降低耗费函数的值。第二,原始的算法尽可能地覆盖所有的两跳节点;而本文算法有一个适应度函数,根据适应度函数的值来减少节点的数目。算法的伪代码如下:

算法3 高效的多点中继算法

1. Selected_Sol \leftarrow [0 0 0 0 ... 0]
2. Selected_Fit \leftarrow Fitness(Selected_Sol)
3. Repeat
4. Alternates_Sol \leftarrow Find_Alternates(Selected_Sol)
5. Alternates_Fit \leftarrow Fitness(Alternates_Sol)
6. Min_Index \leftarrow Find_Minimum(Alternates_Fit)
7. if Alternates_Fit[Min_Index] < Selected_Fit then
8. Selected_Sol \leftarrow Alternates_Sol[Min_Index]
9. Selected_Fit \leftarrow Alternates_Fit[Min_Index]
10. end if
11. Until Selected_Sol not changed

算法在初始状态全部为 0,意味着没有节点被选择。例如: $r = \{0, 0, 0, 0\}$ 。在高效的中继算法的循环中,Find_Alternates 函数创建了一个可能的集合,这与只有一个成员的输入集合是不一样的,可以表示为:

$$\forall r_{ai} \rightarrow \#(r - r_{ai}) = 1 \quad (18)$$

式中, r_{ai} 代表所有可能的集合。例如:如果 $r = \{0, 1, 1, 0, 0\}$,那么 r_{a1} 和 r_{a2} 是 5 个节点自由组合中的两个可能的集合 $r_{a1} = \{1, 0, 1, 1, 0\}$, $r_{a2} = \{0, 0, 1, 0, 0\}$ 。高效自组算法的下一步是寻找最优集合,也就是让适应值函数最小。当找不到比所选集合更优的组合时,循环停止。这个算法的一个主要条件是用上述方法找到所有邻居节点也被节点集合所覆盖的节点。假设没有更好的方案能够覆盖所有的相邻节点,所以,可以得到:

$$C_{R(x)} \neq N^2(x) \quad (19)$$

$$\forall R_{ak} \rightarrow \text{Fitness}(R(x)) \leq \text{Fitness}(R_{ak}(x)) \quad (20)$$

因为 $R(x)$ 不能覆盖 $N^2(x)$,所以可以得到:

$$\exists n_k, n_k \in R(x) \rightarrow C_{R(x)} < C_{R(x) \cup n_k} \quad (21)$$

$$R_{ak} = R(x) \cup n_k \quad (22)$$

$$\text{Fitness}(R(x)) > \text{Fitness}(R_{ak}(x)) \quad (23)$$

式(22)与式(19)是相反的,表示 $R(x)$ 具有更好的解决方法。算法不能在这一点停止,采用递归方法继续,直到覆盖所有邻居节点为止。

5 实验

NS2(Network Simulator 2)是模拟有线网络与无线网络研发的实验平台。日前多进行移动自组网(MANET)的实验,提供了功能强大的数学库和优化工具箱。实验主要从运行效率和内存使用等方面比较了经典的多点中继算法和新提出的算法。节点设定为无线信道,广播模式为:Two ray ground,采用了Omni天线,实验平台搭建的参数如表1所列。

表1 NS2无线通信参数设定

参数	值	参数	值
CP threshold	10.0	RX threshold	2.78869e-9
CS threshold	2.78869e-9	Bandwidth rate	1e6
Transmission power	0.281838	Frequency	2.4e+9
Transmission Range	100m		

在NS2中,测试了两种不同的场景。首先,在网络划定的区域中随机分布不同数目的节点(从100个到1000个),设定节点的传输范围是100m,网络区域为500m * 500m的矩形区域。节点间反复交换HELLO信息,然后采用经典算法和高效算法在节点间进行节点的选择。模拟实验在每个场景中重复100次,结果如表2所列。

表2 选择节点数目对照表

节点数目	中继节点总数		平均中继节点数		提高(%)
	经典	高效	经典	高效	
100	35251	31284	3.53	3.13	11.25
200	95839	85624	4.79	4.28	10.66
300	167560	147820	5.59	4.93	11.78
400	247687	216802	6.19	5.42	12.47
500	332638	290711	6.65	5.81	12.60
600	425040	368417	7.08	6.14	13.32
700	520541	452073	7.44	6.46	13.15
800	621318	538105	7.77	6.73	13.41
900	729774	624547	8.11	6.94	14.42
1000	836296	717487	8.36	7.17	14.21

从表2中可以看出,本文提出的算法与经典算法相比,在低密度的情况下,中继节点的选择数目最少减少了10.66%左右;而且在节点密集区域(1000个节点),传输性能提高了14.21%。其次,还可以检查能量利用情况和泛洪传输时间,能量利用模型可以采用文献[2]提供的模型,结果如表3所列。从表3可以看出,采用本文所用方法,发送和接收节点的数目以及能量消耗都在下降,根据密度不同,能量消耗降低6.85%到12.02%。尽管这个值不高,但是,当广播采用泛洪的形式进行发送时,这个结果将会乘以一个系数,会变得很客观。

本文采用的算法同样会减少传播时间,这里的时间是一个节点发送消息,所有节点都可以接收到所消耗的最小时间。因为移动自组网中的节点是移动的,所以传播速度非常重要。由表3可以看出,根据不同节点密度,传播时间平均节省了4.56%到9.14%。

(下转第84页)

密钥预分配管理方案,其核心思想是针对网络能量有限及节点所处环境的不安全性,提出基于分级矩阵空间的密钥预分配和信息逐步删除机制。仿真结果表明,其较好地满足了在节点资源有限的情况下网络安全性与能量消耗之间的关系,可以较好地应用于大规模的无线传感器网络。

参 考 文 献

[1] Yuan Ting, Ma Jian-qing, Zhong Yi-ping, et al. Key Management Scheme Using Time-Based Deployment for Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Software, 2010, 1 (3): 516- 527

[2] Xu Qiao-juan, Zheng Yan-fe, Chen Ke-fe, et al. Random pairwise key pre-distribution scheme based on LU matrix space[J]. Journal of Computer Applications, 2009, 29(7): 1816-1819

[3] Ren Heng, Sun Xing-ming, Ruan Zhi-qiang, et al. An Efficient Scheme Against Node Capture Attacks using Secure Pairwise Key for Sensor Networks[J]. Information Technology Journal, 2011, 10(1): 71-79

[4] 余旺科, 马文平, 王淑华. 基于部署信息的无线传感器网络密钥预分配[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(11): 51-54

[5] Eschenauer L, Gligor V D. A Key Management Scheme for Distributed Sensor Networks[C]// 9th ACM Conference on Com-

puter and Communications Security. New York, 2002: 41-47

[6] Blom R. An optimal class of symmetric key generation systems [C]// Proceedings of the International Conference on the Theory and Applications of Cryptographic Techniques. Paris, 1984: 335-338

[7] Du W, Deng J, Han Y S, et al. A pairwise key pre-distribution scheme for wireless sensor networks[J]. ACM Transactions on Information and System Security, 2005, 8(2): 228-258

[8] Dai Hang-yang, Xu Hong-bing. Key predistribution approach in wireless sensor networks using LU matrix[J]. IEEE Sensors Journal, 2010, 10(8): 1399-1409

[9] Choi S J, Youn H Y. An Efficient Key Predistribution Scheme for Secure Distributed Sensor Network[C]// 2005 IFIP International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing. Nagasaki, iSpringer, 2005: 1088-1097

[10] Zhu B, Zheng Y, Chen K, et al. Cryptanalysis of LU decomposition-based key pre-distribution scheme for wireless sensor networks[DB/OL]. <http://eprint.iacr.org/2008/411.pdf>

[11] Deng J, Hartung C, Han R, et al. A practical study of transitory master key establishment for wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 1st IEEE/CreateNet International Conference on Security and Privacy for Emerging Areas in Communication Networks, 2005: 289-299

(上接第 80 页)

表 3 算法间能量消耗以及广播时间比较表

节点数目	能量消耗			广播时间		
	经典	高效算法	提高(%)	经典	高效	提高(%)
100	285.08	265.57	6.85	0.018833	0.017974	4.56
200	560.41	536.47	4.27	0.01962	0.018542	5.49
300	883.14	830.53	5.96	0.018978	0.017807	6.17
400	1237.51	1134.48	8.33	0.020301	0.018589	8.43
500	1561.32	1433.71	8.17	0.019999	0.01846	7.7
600	1929.79	1708.46	11.47	0.020866	0.019222	7.88
700	2275.85	2126.77	6.55	0.020853	0.019529	6.35
800	2671.87	2391.72	10.49	2.10962	1.97193	6.53
900	3040.6	2753.34	9.45	2.14635	1.97706	7.89
1000	3473.21	305.79	12.02	0.022211	0.020182	9.14

结束语 本文首先就多点中继算法与结合覆盖理论的联系进行了论述,然后采用结合覆盖理论提出了一种高效的多点中继算法。通过实验表明,泛洪传播方式下能量节约了 6%到 12%,传播时间根据节点密度不同,节约了 4%到 9%。所有的实验结果表明,节点密度越高,本算法执行效率就越高。此外,在真实环境中测试改进后的算法,获取的结果也非常理想。

参 考 文 献

[1] Tseng Y-C, Ni S-Y, Chen Y-S, et al. The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network[J]. Wireless Network, 2002, 8 (2/3): 153-167

[2] Qayyum A, Viennot L, Laouiti A. Multipoint relaying: an efficient technique for flooding in mobile wireless networks[R]. Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique, 2007

[3] Gonzalez T F. Handbook of approximation algorithms and metaheuristics[M]. London/Boca Raton: Chapman and Hall/CRC Press, 2007

[4] Chavatal V. A greedy heuristic for the set-covering problem [J]. Math operating Research, 1979, 4(3): 233-235

[5] Guturu P, Dantu R. An impatient evolutionary algorithm with probabilistic tabu search for unified solution of some NP-hard problems in graph and set theory via clique finding[J]. IEEE Transaction system Man Cybern B, 2008, 38(3): 645-666

[6] Chiang C C, Dai H K. On the minimum-cost set-covering problem[C]// Proceedings of the 2005 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications, PDPTA'05. 2005, 3: 1199-1205

[7] Khan A Y, Rashid S, Iqbal A. Mobility vs predictive MPR selection for mobile ad hoc networks using OLSR [C]// Proceedings—IEEE 2005 International Conference on Emerging Technologies, ICET 2005. 2005: 52-57

[8] Chang Y-K, Ting Y-W, Wu S-C. Power-efficient and path-stable broadcasting scheme for wireless ad hoc networks[C]// Proceedings—21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops/Symposia. AIN-AW'07. Vol 1, 2007: 707-712

[9] Yawut C, Paillasa B, Dhaou R. Mobility versus density metric for OLSR enhancement[C]// Lecture notes in computer science. Berlin: Springer, vol 4866, 2007: 2-17

[10] Nguyen D, Minet P. Analysis of MPR selection in the OLSR protocol[C]// Ainaw '07: Proceedings of the 21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops. Washington, DC, USA, IEEE Computer, Soc., Los Alamitos, 2007: 887-892

[11] Liang O, Sekercioglu Y A, Mani N. Gateway multipoint relay-san MPR-based broadcast algorithm for ad hoc networks[C]// 10th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems, ICCS 2006. Nov. 2006: 1-6

[12] Johnson D S. Approximation algorithms for combinatorial problems[C]// STOC '73: Proceedings of the 5th Annual ACM Symposium on Theory of Computing. New York, USA, ACM, New York, 2003: 38-49

[13] 彭海英, 蔚承英, 唐红. 无线自组网分级结构的性能与可扩展性研究[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2007, 19(2): 172-176