

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.07.011

引用格式:王辛果.一种高效的无线自组网全网可靠广播协议[J].电讯技术,2015,55(7):769-772. [WANG Xinguo. An Efficient Network-Wide Reliable Broadcast Protocol for Wireless Ad Hoc Networks[J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(7): 769-772.]

一种高效的无线自组网全网可靠广播协议*

王辛果**

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘 要:现有大部分的无线自组网广播协议采用最小虚拟骨干子网进行全网广播,能最小化广播的总发送次数。但是,由于未考虑无线链路的不可靠性,这些协议在实际网络中的广播效率并不高。为此,提出了一种高效的全网可靠广播协议(ENWRB),该协议采用网络编码技术减少单跳广播的重传次数,并通过一种基于链路感知的虚拟骨干网选择算法产生更高效的广播骨干网。仿真结果表明,在确保所有节点成功接收广播消息的相同前提下,ENWRB 协议的效率显著高于 HCA(Hierarchical CDS-based Algorithm)协议。

关键词:无线自组网;可靠广播;虚拟骨干网;网络编码;链路感知

中图分类号:TN915.04 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2015)07-0769-04

An Efficient Network-Wide Reliable Broadcast Protocol for Wireless Ad Hoc Networks

WANG Xinguo

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 10036, China)

Abstract: Most existing broadcast protocols for wireless ad hoc networks use a minimal virtual backbone subnet to broadcast messages, which can minimize the total broadcast transmission number. However, since the unreliability of wireless link is not considered, the broadcast efficiencies of these protocols are not high in real networks. This paper proposes an efficient network-wide reliable broadcast protocol (ENWRB), which adopts network coding scheme to reduce the retransmissions in single-hop broadcast and a link-aware virtual backbone election algorithm to generate the more efficient broadcast backbone. Simulation results show that, under the same premise of ensuring all nodes to receive broadcast message successfully, the efficiency of ENWRB is higher than that of Hierarchical CDS-based Algorithm (HCA) greatly.

Key words: wireless ad hoc network; reliable broadcast; virtual backbone; network coding; link-aware

1 引 言

全网广播是单个节点向网络中所有节点发送消息的通信模式,可广泛应用于全网通告、寻呼、路由发现等。全网广播协议既要保证所有节点都能够正确接收广播消息,即实现全网覆盖,还要尽可能减少总的发送次数,提升广播效率。

全网广播协议大致可分为全网洪泛、概率转发、骨干转发等三类^[1]。全网洪泛是让所有节点都参与转发广播消息,虽能实现全网覆盖,但冗余的广播转

发次数多,效率较低。概率转发为每个节点分配参与转发的概率,虽能减少广播转发次数,但很难通过选择合适的转发概率来保证全网覆盖。在骨干转发的全网广播协议中,每个节点或者是骨干节点,或者至少与一个骨干节点直接相邻,且骨干节点之间保持连通,每个骨干节点只转发一次就能实现全网覆盖。

显然,虚拟骨干网的规模越小,总的次数越少,广播效率越高。因此,现有文献主要研究如何生成最小的虚拟骨干网。文献[2]已经证明即使根据全

* 收稿日期:2015-05-05;修回日期:2015-06-09 Received date:2015-05-05;Revised date:2015-06-09

** 通讯作者:xinguowang911@163.com Corresponding author:xinguowang911@163.com

网拓扑信息生成最小虚拟骨干网是 NP(Non-deterministic Polynomial) 难问题, 只能寻找近似最优算法。文献[3]提出了一种适用于无线自组网的仅利用部分全网拓扑信息寻找最小虚拟骨干网的近似最优算法。然而, 这些算法未考虑到由于无线链路的不可靠性导致的大量重传, 最小虚拟骨干网并不能最小化广播发送次数。本文首先采用网络编码技术减少单跳广播的重传, 并提出基于链路感知的虚拟骨干网选举算法减少全网广播的总发送次数。

2 单跳广播

2.1 问题概述

由于链路之间的状态相互独立, 在发送节点连续广播发送一组消息之后, 多个邻居节点缺失的消息可能并不相同。发送节点可以利用网络编码将多条需要重传的消息编码成一条消息发送, 邻居节点结合之前已收到的消息, 从编码消息中解码获取各自缺失的消息。采用网络编码进行广播重传, 能够获取编码增益, 减少重传次数, 提升广播效率^[4]。

假设发送节点广播发送 M 条原始消息, 并采用网络编码对缺失的消息进行重传, 直到所有 N 个邻居节点 $R = \{r_1, r_2, \cdots, r_N\}$ 都正确收到这 M 条消息。发送节点维护一个 $N \times M$ 的 0-1 矩阵 T , 记录所有邻居关于最近 M 条消息的接收状态。对于 T 中的每个元素 $t_{i,j}$, 1 表示节点 r_i 已收到该消息 m_j , 0 表示未收到。为节省控制开销, 接收节点采用 ARQ(Auto Repeat Request) 机制一次性以广播的方式反馈最近 M 条消息的接收状态。如果发送节点选择 $m(m \leq M)$ 条消息 $\langle p_1, p_2, \cdots, p_m \rangle$ 进行异或编码发送, 且节点 r_i 已经收到其中的 $m-1$ 条消息, 则 r_i 在收到 $\oplus(p_1, p_2, \cdots, p_m)$ 消息之后将这 m 条消息进行异或解码就可以提取出缺失的消息。

在图 1 的场景中, 如果不使用网络编码, 假设不会再次发生丢包, 发送节点需要重传 p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 , 总共需要 5 次传输; 如果使用网络编码, 发送节点只需重传 $p_1 \oplus p_2, p_3 \oplus p_4, p_5$, 总共需要 3 次传输, 可见采用网络编码的可靠广播机制的重传次数更少, 效率更高。

	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5
r_1	1	0	1	0	1
r_2	1	1	0	1	1
r_3	0	1	1	1	0

图 1 接收状态矩阵 ($N=3, M=5$)

Fig. 1 Reception status matrix ($N=3, M=5$)

2.2 编码重传

在图 1 的场景中, 发送节点还可以选择编码重传 $p_1 \oplus p_2 \oplus p_3$ 和 $p_4 \oplus p_5$, 这只需要两次传输, 传输效率更高。文献[5]已经证明基于接收状态矩阵生成传输次数最少的编码方案是 NP 难问题。由于异或编码的限制, 为了保证所有节点都能成功解码, 不能将一个节点缺失的多条原始消息同时进行编码。另外, 优先选择更多节点都缺失的原始消息有助于获取更大的编码增益。因此, 可采用以下基于贪婪策略的启发式编码重传方案:

Step 1: 每次编码时, 集合 S 和 P 都初始化为空集;

Step 2: 循环进行以下操作, 直到步骤(1)无法完成:

(1) 找到编号最小且依次满足以下条件的消息 p_j : 缺失消息 $p_j(t_{i,j}=0)$ 的所有节点都不在集合 S 内; 缺失消息 p_j 的节点数最多;

(2) 将消息 p_j 加入 P ;

(3) 将缺失消息 p_j 的所有节点加入 S ;

(4) 将矩阵 T 中 p_j 对应的列全置 1;

Step 3: 将集合 P 中的所有消息进行异或编码, 重复发送直到集合 S 中所有节点都收到编码消息。

2.3 广播效率

假设发送节点到 N 个邻居节点的丢包率分别为 $e_1, e_2, \cdots, e_N$ 。如果不采用网络编码, 发送节点将重复传输直至 N 个节点都收到 M 条消息, 平均传输次数为

$$T_x(N, M) = M \times \sum_{k=1}^{\infty} k \times (\prod_{i=1}^N (1 - e_i^k) - \prod_{i=1}^N (1 - e_i^{k-1})) = M \times \sum_{l_1, l_2, \cdots, l_N} \frac{(-1)^{(\sum_{i=1}^N l_i) - 1}}{1 - \prod_{i=1}^N e_i^{l_i}}, l_i \in \{0, 1\}, \text{ 且 } \exists l_i \neq 0. \quad (1)$$

下面分析采用网络编码的平均传输次数。不失一般性, 假设 $e_1 \leq e_2 \leq \cdots \leq e_N$, 且 $\sum_{i=1}^N e_i \leq 1$ 。

定理 1: 由于每个节点从每条编码消息中最多恢复出 1 条原始消息, 因此, 在最优情况下, 至少经过 $M \times e_N$ 次编码才能使得 N 个节点都正确接收 M 条原始消息。

定理 2: 如果 $\sum_{i=1}^N e_i \leq 1$, 经过 $M \times e_N$ 次编码, N 个节点都能正确接收 M 条原始消息。

证明: 如果 $\forall j, \sum_{i=1}^N t_{i,j} \geq N-1$, 编码算法每次将为集合 $R - \{r_i \mid \sum_{j=1}^N t_{i,j} = M\}$ 中的每个节点选择 1 条其缺失的消息进行编码。经过 $M \times e_N$ 次编码, N 个节点都能正确接收 M 条消息。否则, 不失一般性, 假设 $\exists j', \sum_{i=1}^N t_{i,j'} < N-1$ 且 $\forall j \neq j', \sum_{i=1}^N t_{i,j} \geq N-1$ 。由于 $\sum_{i=1}^N e_i \leq 1$, 则矩阵至少存在 $N-1 - \sum_{i=1}^N t_{i,j'}$ 个全 1 列。因此, 经过 $M \times e_N$ 次编码, N 个节点都能正确接收 M 条消息, 证毕。

发送节点先广播 M 条原始消息,然后,编码算法将为所有尚未完全正确接收 M 条消息的节点选择 1 条缺失的消息进行编码。前 $M \times e_1$ 条编码消息需要 N 个节点正确接收,平均重传次数等于 $T_X(N, M \times e_1)$; $M \times e_1$ 到 $M \times e_2$ 条编码消息需要 $N-1$ 个节点正确接收,平均重传次数为 $T_X(N-1, M \times (e_2 - e_1))$; 最后 $M \times e_{N-1}$ 到 $M \times e_N$ 条编码消息只需要 1 个节点正确接收,平均重传次数为 $T_X(1, M \times (e_N - e_{N-1}))$ 。因此,采用网络编码广播发送 M 条消息至 N 个邻居节点的总传输次数的平均值为

$$T_X^{NC}(N, M) = M + \sum_{i=1}^N T_X(i, M \times (e_{N+1-i} - e_{N-i})) \quad (2)$$

式中,为统一表达式,引入 $e_0 = 0$ 。

3 全网广播

如果考虑实际的无线链路,全网广播的优化目标不再是虚拟骨干成员数最少,而是总传输次数最少。下面介绍一种基于网络编码和虚拟骨干网的全网可靠广播协议,进一步减少总传输次数。

与其他虚拟骨干网的分布式生成算法^[6]一样,ENWRB 协议分为初始阶段和剪枝阶段。在初始阶段,根据 2 跳邻居信息构建连通度较高的骨干网;在剪枝阶段,从初始骨干网中删除不必要、广播效率低的节点。为方便描述,将节点 u 的 1 跳邻居节点集记为 $N(u)$ 。

3.1 初始阶段

在初始阶段,每个节点周期性广播 HELLO 消息,其中,包含了本节点 id 以及本节点的邻居节点 id。如果节点 u 存在两个邻居节点 v, w 彼此不相邻,说明 v, w 可能需要通过 u 转发消息,则节点 u 成为初始骨干节点。图 2 所示为节点 b, c, f, h 组成初始的虚拟骨干网。

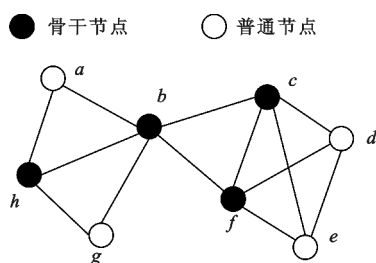


图 2 初始的虚拟骨干网
Fig. 2 Initial virtual backbone network

3.2 剪枝阶段

在剪枝阶段,每个初始骨干节点通过比较广播效率和 2 跳邻居连接关系决定是否成为最终的骨干

节点。广播效率的定义如下:

$$\eta = \frac{N \times M}{T_X^{NC}(N, M)} \quad (3)$$

η 值越大,成为骨干节点的优先级越高; η 值相同时, id 越大的节点的优先级越高。链路丢包率可以通过统计 HELLO 消息的正确接收比例或信号强度估算得到。每个初始骨干节点按照如下规则进行判断:

- (1) 如果 v 是初始骨干节点, $N(u) - \{v\} \subseteq N(v)$ 且 u 的优先级低于 v , 则 u 放弃成为骨干节点;
- (2) 如果 v, w 是互为邻居的初始骨干节点, $N(u) - \{v, w\} \subseteq N(v) \cup N(w)$, 且 u 的优先级低于 v 和 w , 则 u 放弃成为骨干节点。

如图 3 所示, c 到 d 的丢包率较高导致 c 的广播效率较低, 则 c 放弃成为最终的骨干节点。在文献 [6] 提出的算法中, h 不会成为骨干节点, 但在本协议中 h 将成为骨干节点, 这能避免因 b 到 g 的丢包率较高而造成大量重传。因此, 节点 b, f, h 组成最终的虚拟骨干网。链路层协议通常都会发送 HELLO 消息且包含生成虚拟骨干网需要的信息, 所以上述机制不会增加额外的开销。

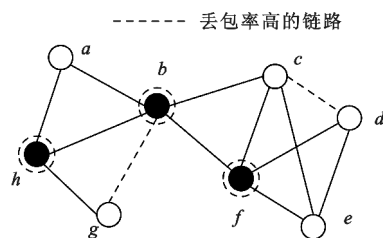


图 3 最终的虚拟骨干网
Fig. 3 Final virtual backbone network

4 仿真实验及结果分析

首先,在 Matlab 仿真平台上分析采用网络编码的单跳可靠广播的效率。考虑邻居节点数分别为 10 和 20、广播消息数为 50 和 100 的场景。每条链路的丢包率为均匀随机生成^[7],最小的丢包率为 0,最大的丢包率在 0.01 ~ 0.05 变化。无编码和有编码的广播重传次数对比如图 4 所示,图中的每个结果为 100 次仿真的平均值。总体来看,节点数越多或消息数越多,重传次数越多,有网络编码的重传次数明显低于无网络编码。例如, $N = 20, M = 100$ 、链路最大丢包率为 0.05 时,无网络编码的平均重传次数高达 42 次;相同场景下,采用网络编码的平均重传次数仅为 7 次。

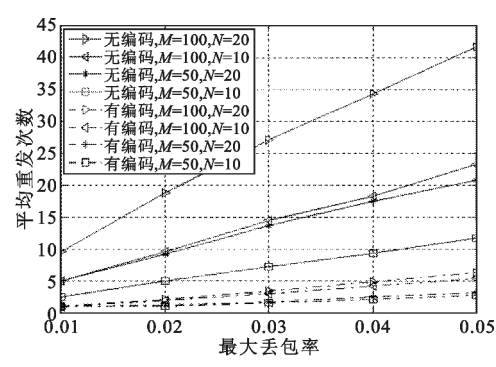
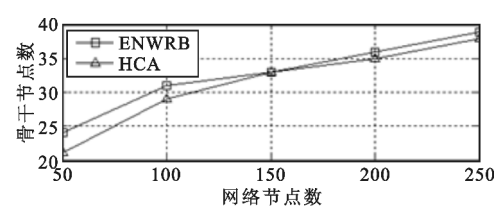


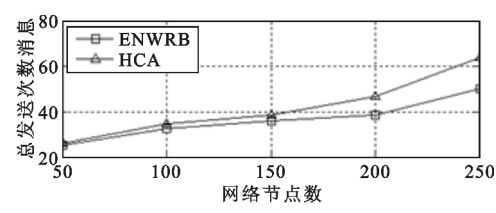
图4 单跳广播平均重传次数

Fig.4 Average retransmission number of single-hop broadcast

接下来,比较 ENWRB 协议与文献[3]提出的 HCA (Hierarchical CDS-based Algorithm) 协议在全网可靠广播中的效率。为保证公平性,假设 HCA 也采用本文提出的基于网络编码的单跳广播机制,提升单跳广播的效率。考虑在边长为200 m的正方形区域内随机部署节点,每个节点的通信半径都为 50 m。链路的最大丢包率为 0.05, M 设为 100。在不同网络规模下,两种协议的骨干节点数和广播每条消息至全网所有节点的总传输次数如图 5 所示。尽管 ENWRB 协议选择的骨干节点数略多于 HCA 协议,但总的发送次数更少,因而广播效率更高。网络的节点密度越大,ENWRB 协议的优势越明显。当网络节点数为 200 时,ENWRB 的总传输次数仅为 HCA 的 72% 左右。



(a)骨干节点数



(b)总发送次数

图5 全网广播效率

Fig.5 Efficiency of network-wide broadcast

5 结束语

本文提出了一种高效的无线自组网全网可靠广播协议——ENWRB 协议。首先,在单跳广播中,采

用了网络编码技术减少重传次数,并分析了由此带来的广播效率提升;接着,在单跳广播机制的基础上提出了基于虚拟骨干网的全网广播协议,优先选择广播效率更高的节点转发广播消息,从而减少全网的总发送次数。仿真结果表明,在保证全网所有节点都能正确接收广播消息的前提下,ENWRB 比 HCA 具有更高的广播效率。由于网络编码机制可能会增加完成全网广播的时间,分析 ENWRB 的时延是值得继续深入研究的问题。

参考文献:

[1] Wisitpongphan N, Tonguz O K, Parikh J S, et al. Broadcast storm mitigation techniques in vehicular ad hoc wireless networks[J]. IEEE Wireless Communication, 2007, 14(6): 84-94.

[2] Hong J, Cao J N, Li W Z, et al. Minimum-transmission broadcast in uncoordinated duty-cycled wireless ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(1): 307-318.

[3] Tang B, Ye B L, Hong J, et al. Distributed low redundancy broadcast for uncoordinated duty-cycled WANGTs [C]// Proceedings of 2011 IEEE Globecom Conference. Houston, Texas, USA: IEEE, 2011: 274-284.

[4] Nguyen D, Tran T, Nguyen T, et al. Wireless broadcast using network coding[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(2): 914-925.

[5] Chi K, Jiang X, Ye B, et al. Efficient network coding based loss recovery for reliable multicast in wireless networks[J]. IEICE Transactions on Communication, 2010, 93(4): 971-981.

[6] Dai F, Wu J. An extended localized algorithm for connected dominating set formation in ad hoc wireless networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2004, 15(10): 908-920.

[7] Basagni S, Mastrogianni M, Panconesi A, et al. Localized protocols for ad hoc clustering and backbone formation: A Performance Comparison[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2006, 17(4): 292-306.

作者简介:



王辛果(1983—),男,四川遂宁人,2011 年于中国科技大学获工学博士学位,现为工程师,主要研究方向为战术数据链、无线自组网等。

WANG Xinguo was born in Suining, Sichuan Province, in 1983. He received the Ph. D. degree from University of Science and Technology of China in 2011. He is now an engineer. His research interests include tactic data link, wireless ad hoc networks, etc.

Email: xinguowang911@163.com