

基于空分 TDMA 的定向 Ad Hoc 网 MAC 协议

何昭然^{1,2}, 史海滨²

(1 哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2 武汉船舶通信研究所, 湖北 武汉 430079)

摘 要: 提出了一种新的基于空分 TDMA 的定向 Ad Hoc 网 MAC 协议, 它根据节点位置和天线方向图, 自适应地选择干扰判断角度, 在此基础上采用贪婪算法对所有节点进行配对, 具有较高的空间复用度, 并采用捎带技术加快了全局共享信息的扩散速度; 给出了协议帧结构和相应算法, 理论分析与仿真结果表明该协议能有效改进网络效率, 且具有较好的工程实用性。

关键词: 定向通信; 空分 TDMA; 节点配对

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2013)01-0153-04

A MAC Protocol Based on Spatial TDMA for Ad Hoc Networks Using Directional Antenna

HE Zhao-ran^{1,2}, SHI Hai-bin²

(1 College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2 Wuhan Maritime Communication Research Institute, Wuhan 430079, China)

Abstract: A new MAC protocol based on spatial TDMA for Ad Hoc networks using directional antenna was put forward. It adaptively chose interference angle threshold in terms of nodes position and antenna pattern, then applied greedy algorithm to generate pairs of nodes to realize high spatial reuse, and adopted piggyback technology to speed up information propagation all over network. The MAC protocol frame structure and corresponding algorithms were presented. Analysis and simulation results showed that our protocol can improve network efficiency, and was applicable for engineering fulfillment.

Key words: directional communication; spatial TDMA; nodes pair

1 引言

随着战场信息化程度的提高, 在军用 Ad Hoc 网络中提供高速、高效、健壮和可裁减通信的需求也不断增长。相比与全向天线, 在 Ad Hoc 网络中引入定向天线可带来很多好处^[1]; 相同的功率下定向天线增加了空间复用度与传输距离, 提高了网络吞吐量。而且, 使用定向天线技术还可以增加抗敌对人为干扰的能力, 增强 LPI 和 LPD, 而这些在军事通信中都是非常重要的。

近年来, 人们针对定向 Ad Hoc 提出了很多 MAC 协议。大部分基于民用的 IEEE 802.11^[2-3],

不适用于军事应用中; 也有部份文章提出了基于 TDMA 的定向 MAC 协议^[4], 利用边染色算法进行定向网络的通信调度优化, 但算法复杂度较高, 工程实用性不强, 同时没有充分考虑天线副瓣的影响, 以至于空间复用度不高, 全局共享信息广播效率较低, 限制了其在实际军事中的应用。

本文提出了一种基于空分 TDMA 的、具有高效广播能力的定向 Ad Hoc 网 MAC 协议, 首先利用角度与距离干扰避免 (Angle and Range Interference Free, ARIF) 算法判断节点对之间的干扰, 在此基础上采用贪婪算法对所有节点进行配对, 完成通信调度。具有较高的空间复用度, 提高了网络吞吐量

收稿日期: 2012-05-14; 修回日期: 2012-06-18

基金项目: 船舶工业科技预研基金

和全局共享信息的扩散效率,具有较好的军事应用价值.

本文算法的前提是节点可以相互获知位置信息,这可通过 GPS 或相对导航等方式获得.

2 系统模型

单波束定向 TDMA 中,每个节点在同一时刻只能和一个邻居节点进行配对通信,但同一时隙中,允许多对节点同时配对访问信道.为了最大化网络吞吐量,在确保完成所需的通信任务的前提下,应最小化整个网络的通信调度周期.

将网络内的各节点分别抽象为不同的顶点 V ,它们之间的通信负载(定向收发)抽象为相应数目的边 E ,定向网络模型可抽象为图 $G(V, E)$. 网络通信调度周期最小化的问题就转化为图的边染色问题^[5].

图 1 为定向网络拓扑图,以及根据边染色得出的相应的空分 TDMA 调度示意图.其中边上标注的数字表示传输时隙顺序,相同的数字表示可在同一时隙传输.

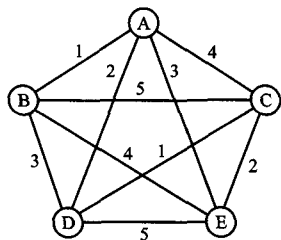


图 1 定向网络拓扑图

3 空分 TDMA 协议

空分 TDMA 协议采用集中调度算法,管理站收集各节点发送的位置信息,根据 ARIF 算法判断节点对的干扰情况,在此基础上进行配对,完成调度,形成时隙分配表,在每个通信周期的开始发送给各节点.网内各节点根据分配的时隙发送/接收数据,在发送数据时采用捎带转发的方式,实现全局共享信息的高效广播.

3.1 帧结构

在空分 TDMA 协议中,若干个时隙组成一帧.帧结构如图 2 所示.在每一帧的开始是控制时隙,由管理节点用全向方式,向所有节点发送整个网络的时隙分配表;中间是数据时隙,各节点根据时隙分配表中规定的时隙收发数据.在每个数据时隙,可同时进行多对节点进行收发.

数据时隙 $2k$ 与 $2k+1$ ($k=0, \dots, N-1$) 分别

被分配给一对节点发送与接收数据.每个数据时隙由前保护时间、转发时段、本地信息分发时段与后保护时间组成.转发时段用于转发从其它节点接收的、需要全局共享的信息,本地信息分发时段用于传输本地产生的信息.

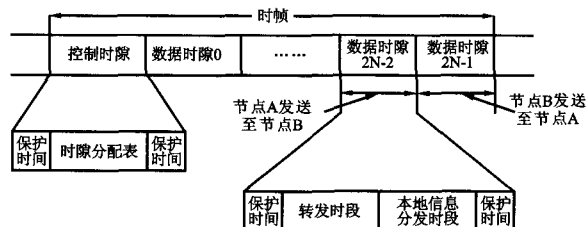


图 2 帧结构

3.2 基于 ARIF 的配对算法

3.2.1 ARIF 算法

现有 MAC 协议在考虑单波束定向天线时,通常采用单一角度干扰判断方法.或者假设所有波束为笔形波束,不存在副瓣,或者考虑副瓣,但要求同时通信的多对节点之间,一对全部在另一对的副瓣之外.

当定向天线无法同时做到窄的波束角和高的旁瓣抑制时,仅靠角度判决是不够的.如图 3 所示.如果以 $\angle aOb$ 为波束角,节点 B 尽管位于节点 O 的波束角之外,但仍受到 O 的付瓣干扰,如果以 $\angle cOd$ 为波束角,则因角度太大,节点间很容易落入干扰判断范围内,降低了空间复用度.

ARIF 算法将根据节点距离,自适应地选择干扰判断角度,从而减少单一角度干扰判断的冲突误判机会.

图 3 是 ARIF 算法判决示意图.设主瓣有效距离为 l_1 ,主波束角为 α_1 ,第一付瓣影响距离为 l_2 ,第一付瓣波束范围角为 α_2 ,目前只考虑主付瓣的影响.当 O 和 A 通信时,若存在接收节点 B ,当 $|OB| \geq l_2$,则干扰判决式中的波束角阈值取 α_1 ,当 $|OB| \leq l_2$,则波束角阈值取 α_2 ,当 $|OB| \leq l_2$ 时直接判定为干扰.

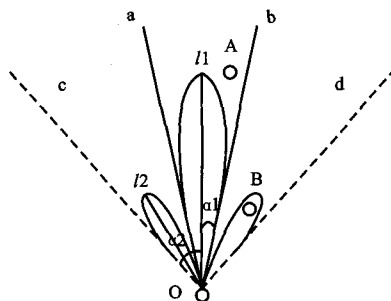


图 3 天线模型

3.2.2 配对算法

在每个时帧的开始,管理节点根据上一时帧各节点发送的位置信息形成的网络拓扑,得到图 $G(V, E)$. 设 A 为存放图 $G(V, E)$ 所有节点的列表, B 为 $G(V, E)$ 所有边集合, 集合 $C = \cup C_{E_{ij}}$, $C_{E_{ij}}$ 为所有与 $E_{i,j}$ 不存在干扰的边. 我们采用贪婪算法进行配对, 步骤如下:

(1) 对图 $G(V, E)$ 所有节点按照度的大小降序排列, 形成列表 $A = [V_1, V_2, \dots, V_M]$; 将所有边形成 $B = \cup_{i,j \in V} E_{ij}$; 集合 $C = \emptyset$;

(2) 从 A 中选取 V_i ;

(3) 在 B 中选取一条边 $E_{i,j}$, 根据 ARIF 算法, 搜索 B 中所有与 $E_{i,j}$ 不存在干扰的边;

(4) 将这些边与 $E_{i,j}$ 加入 $C_{E_{ij}}$ 中, 并从 B 中删除;

(5) 对于 B 中剩下的每一条与 V_i 关联的边 $E_{i,j}$, 执行(3)~(4)中操作;

(6) 对于 A 中剩下节点, 重复步骤(2)~(5), 直至 B 为空.

利用算法形成的集合 C 即可形成时隙分配表, 集合 $C_{E_{ij}}$ 中的所有边分配在同一时隙.

3.3 捎带转发

在军事应用中, 网络中各节点产生的某些信息, 如传感器的量测信息, 需要扩散至全网, 供所有节点共享. 定向通信虽然有更大的网络吞吐量, 然而相比于全向通信, 为了将某个节点的信息扩散至全网, 却需要花费长的多时间. 而实际上, 很多信息在传播过程中都具有时效性, 传播时间过长, 会导致目的节点最终接收到的为无用的信息.

为此在空分 TDMA 协议中, 采取了捎带转发的方式, 在每个时隙的转发时段(见图 2)捎带转发已收到的其它节点需要全网共享的“本地信息”, 实现全局共享信息的高效广播.

设集合 $I = \cup I_{V_k}$, I_{V_k} 为每个时帧节点 V_k 已经收到其本地信息(直接或转发方式)的节点集, 集合 $R = \cup R_{V_k}$, R_{V_k} 为每个时帧节点 V_k 还未收到其本地信息的节点集. 设图 2 中的转发时段最多可转发 M 个节点的本地信息.

所有节点都运行如下的算法:

(1) 在每个时帧开始, 令 $I_{V_k} = V_k$, $R_{V_k} = V/V_k$, $\forall V_k \in V$;

(2) 当节点开始配对通信, 设 V_i 向 V_j 发送数据时, 令 $T_{ij} = I_{V_i} \cap R_{V_j}$;

(3) 若 $|T_{ij}| = M$, 令 $T'_{ij} = T_{ij}$; 否则令 $T'_{ij} =$

$$\cup_{V_{n_1} \in T_{ij}, n_1 < n_2 < \dots < n_M} V_{n_1};$$

(4) V_i 在转发阶段向 V_j 转发 T'_{ij} 的本地信息;

(5) $I_{V_k} = I_{V_k} \cup T'_{ij}$, $R_{V_k} = R_{V_k} / T'_{ij}$, $\forall V_k \in V$;

(6) 重复步骤(2)~(5), 直到 $I_{V_k} = V$, $\forall V_k \in V$.

在每个时帧, 所有节点都需要根据以上算法初始化、更新 I 与 R . 捎带转发算法利用了定向网络的高吞吐量, 来加速全局共享信息的扩散时间, 增强了定向网络的军事实用性.

4 性能分析与仿真

图 4 是对网络节点数分别为 5、10、15、20 时、每种网络随机设定拓扑、经 50 次仿真后取的平均结果. 图中相同图案的点表示在某网络规模 N 下, 每次转发 1~ N 个节点的全局共享信息时, 对应的信息全网广播耗时数. 从曲线可以看到, 当每次只能转发一个节点信息时, 所需时隙数平均在 $O(2N)$ 的数量级. 当每次转发的节点数增加时, 所需时隙数迅速下降, 最终稳定在 $O(N)$.

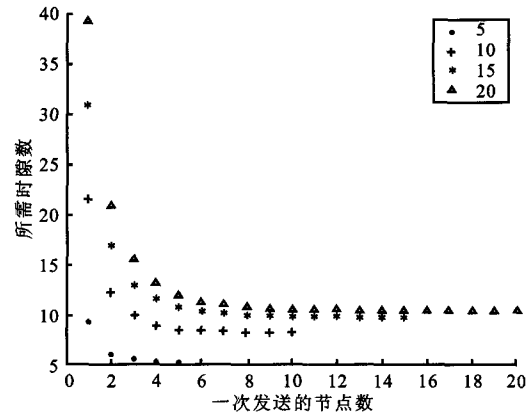


图 4 不同网络节点数下每次转发多个节点信息所需的广播时间

对于星形拓扑, 在第一轮配对通信时需要 $2(N-1)$ 个时隙, 在后续配对通信中, 由于中心节点已经获得所有节点信息, 因此每个外围节点需 $\text{ceil}(\frac{N-2}{n})$ 次通信才能获得所有其他节点信息, $\text{ceil}()$ 表示向上取整. 最后信息全网广播时间为 $(N-1)(2 + \frac{N-2}{n})$. 图 5 是对该理论结果的仿真, 与理论分析十分逼近. 图中“5 仿真”表示 5 个节点的仿真结果, “5 理论”表示 5 个节点的理论分析结果.

5 结束语

根据以上分析和仿真结果, 采用本技术方案后, 配对通信的信息广播时间将由原先的 $2(N-1) \sim N$

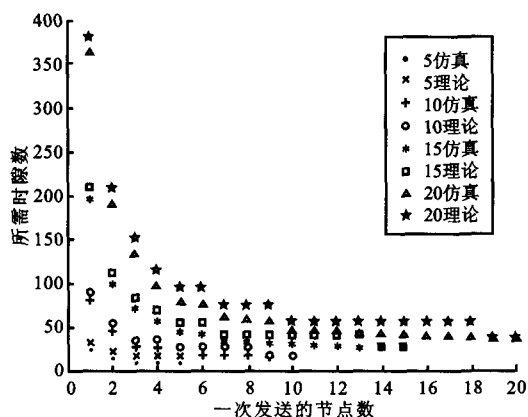


图5 星形拓扑下本方案理论
结果的仿真图

$(N-1)$ 变为 $O(N) \sim (N-1)(2 + \frac{N-2}{n})$ 个时隙, 变化范围由 $(N-2)(N-1)$ 变为 $(N-1)(1 + \frac{N-2}{n})$ 个时隙.

参考文献:

- [1] Ramanathan R. On the Performance of Ad Hoc networks with beamforming Antennas[C]//Proceedings of the 2nd ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing. California, USA: ACM, 2001:95-105.
- [2] Fahmy N S, Todd T D, Kezys V. Ad Hoc networks

with smart antennas using IEEE 802. 11-based protocols[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC2002). New York, USA: IEEE, 2002:3144-3148.

- [3] Nadeem Tamer. Analysis and enhancements for IEEE 802. 11 networks using directional antenna with opportunistic mechanisms[J]. IEEE Trans Veh Technol, 2010, 59(6):3012-3024.
- [4] Bibb Cain J, Billham Tom, and Foore Larry. A Link Scheduling and Ad Hoc Networking Approach Using Directional Antennas[C]//Proceedings of the IEEE Military Communications Conference (MILCOM'03). Boston, USA: IEEE, 2003:643-648.
- [5] Gandham S, Dawande M, and Prakash R. Link scheduling in sensor networks; Distributed edge coloring revisited[C]//Proceedings of the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2005). Miami, FL, USA: IEEE, 2005:2492-2501.

作者简介:

何昭然 男, (1979—), 博士研究生. 研究方向为网络与无线数字通信.

史海滨 男, (1975—), 博士, 工程师. 研究方向为宽带无线通信.