

一种适用于多跳 Ad Hoc 网络的增强型协作多址接入协议

张 琰, 盛 敏, 李建东, 田 野, 姚俊良, 唐 迪

(西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室信息科学研究所, 陕西西安 710071)

摘 要: 针对多跳 Ad Hoc 网络提出一种增强型协作多址接入协议. 该协议联合考虑数据传输速率和隐藏终端对协作网络性能的影响, 通过优化协议的握手规则和协同节点的选择策略, 从而在不引入开销的条件下, 有效提高了网络的饱和吞吐量并降低了业务的接入时延. 另外, 基于对节点行为及其所处状态概率的分析, 本文建立了协作多址协议在多跳 Ad Hoc 网络中的饱和吞吐量分析模型, 并给出相应的理论分析结果. 最后, 通过多跳 Ad Hoc 网络中的大量仿真, 评估了所提增强型协作多址接入协议和分析模型的性能. 仿真结果表明: 相对于已有的协作多址协议该协议能够有效提高网络的饱和吞吐量. 此外, 仿真结果和理论分析结果能够很好的匹配, 从而也证明了分析模型的正确性和有效性.

关键词: 多跳 Ad Hoc 网络; 协作通信; 媒体接入控制; 协作节点选择

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0732-2112(2011)01-0224-09

An Enhanced Cooperative MAC Protocol for Multi-hop Ad Hoc Networks

ZHANG Yan, SHENG Min, LI Jian-dong, TIAN Ye, YAO Jun-liang, TANG Di

(The State Key Laboratory of ISN and Information Science Institute, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: An enhanced cooperative MAC protocol (ECoopMAC) is proposed for multi-hop Ad Hoc networks in this paper, which considers the transmission rate and the hidden node problem jointly. Through optimizing the order of handover and the strategy of helper selection, the saturated throughput and access delay are efficiently improved by ECoopMAC without introducing overhead and complexity. Furthermore, based on node's behavior and state probability, we propose an analytical model to evaluate the performance of cooperative MAC protocols in multi-hop Ad Hoc networks. Finally, the performances of the proposed analytical model and protocol are evaluated by extensive simulations in multi-hop wireless Ad Hoc networks. Simulation results show that our proposed protocol significantly improves the saturated throughput compared with CoopMAC. In addition, the results of analysis and simulation match well, which confirm that the proposed analytical model is correct and effective.

Key words: multi-hop Ad Hoc networks; cooperative communication; media access control; partner choice

1 引言

近年来, 由于多跳 Ad Hoc 网络可以在没有其他预先布设设备支持的条件下, 便捷地将多个无线节点以多跳的方式连接起来传递信息, 从而越来越受到人们的关注^[1,2]. 然而, 灵活的多跳 Ad Hoc 网络也给其多址接入协议的设计带来了巨大的挑战. 当前, IEEE 802.11^[3]系列的多址接入协议是最为流行的无线局域网接入标准, 并且在大多数多跳 Ad Hoc 网络的测试及仿真平台中也得到了广泛的应用.

另一方面, 协同通信作为一种新兴通信形式得到了

国内外学者的广泛关注. 协同通信技术充分利用了无线传输的全向传播特性, 使得多个节点协同工作来达到网络资源的共享, 从而有效地提高了整个网络的性能^[4]. 早期关于协同通信技术的研究大都集中在物理层^[4-6], 然而协同思想对上层协议的影响, 尤其是媒体接入协议并没有得到充分深入地研究. 近来, 文献^[7]首先提出了一种基于协作的无线媒体接入协议: CoopMAC. 该协议利用了 IEEE 802.11b 协议的多速率传输特性, 在源节点和目的节点信道条件较差时, 通过中间节点的协作转发来完成高速率传输. 因此, CoopMAC 大大提高了网络的饱和吞吐量并有效降低了业务的接入时延.

收稿日期: 2009-10-20; 修回日期: 2010-05-31

基金项目: 国家杰出青年科学基金(No. 60725105); 国家 973 重点基础研究发展计划(No. 2009CB320404); 长江学者和创新团队发展计划(No. IRT0852); 国家 863 高技术研究发展计划(No. 2007AA01Z217); 科技重大专项资助(No. 2010ZX03005-002, No. 2010ZX03003-001); 国家自然科学基金(No. 60972048); 国家重点实验室专项基金(No. ISN01080301); 高等学校创新引智计划(No. B08038); 教育部科学技术研究重点项目(No. 107103)

值得注意的是, CoopMAC 利用了中间节点来转发数据,这也正是多跳 Ad Hoc 网络的重要特点之一,那么 CoopMAC 能否在多跳 Ad Hoc 网络中得到很好的应用也就成为目前研究人员广泛关注的热点问题^[8-11]. 文献[8]综述了在多跳网络中协作多址协议设计需要注意的问题;文献[9]中对 CoopMAC 在多跳场景下的应用进行了仿真研究;文献[10]通过引入方向性天线来提高多跳 Ad Hoc 网络中 CoopMAC 协议的空间复用度;文献[11]通过将源节点和协作节点信息的联合解调,进一步增加了 CoopMAC 协议在多跳网络中的吞吐量,但这都大大增加了硬件设备的复杂性,因此不宜在实际的大规模多跳 Ad Hoc 网络中应用. 然而,在已有的研究中,大都忽略了隐藏终端这一多跳网络与生俱来的问题. 在 CoopMAC 协议中,由于协同传输的需要从而增加了协议的握手次数,这使得隐藏终端问题变得更加严峻,从而降低了协作握手成功概率,影响了 CoopMAC 协议的性能. 因此,避免或减少隐藏终端带来的负面影响已成为设计多跳 Ad Hoc 网络中协作多址接入协议必须考虑的问题. 针对该问题本文提出了一种增强型的协作多址接入协议 ECoopMAC (Enhanced Cooperative MAC Protocol). 该协议联合考虑了数据传输速率和隐藏终端对网络饱和吞吐量的影响. 通过优化协议的握手规则和协同节点的选择策略, ECoopMAC 协议在不引入开销的条件下大大降低了隐藏终端问题的影响,进而提高了网络的饱和吞吐量并降低了业务的接入时延. 另外,本文建立了协作多址协议在多跳 Ad Hoc 网络中饱和吞吐量的分析模型,从理论上给出了 ECoopMAC 协议的性能分析,且该模型具有一定的普适性亦可运用在对 CoopMAC 的性能评估中. 最后,大量仿真结果表明:相对于已有的协作多址协议, ECoopMAC 协议能够有效提高网络的饱和吞吐量. 此外,仿真结果和理论分析结果

能够很好的匹配,从而验证了所提分析模型的有效性和正确性.

2 MAC 层的协作及其隐藏终端问题

IEEE 802.11 系列协议能够支持多个物理层的传输速率,并根据信道条件的不同来进行调整. 以 IEEE 802.11b 为例,其支持 1, 2, 5.5 和 11Mbps 四种不同的传输速率. 当节点间的距离较远、信道条件较差时,只能使用较低的速率(即:1 或 2Mbps)来完成信息传输,这不仅影响到本节点的传输性能,而且使得周围邻节点需要等待较长的时间才有机会进行传输,从而降低了整个系统的性能. 因此,文献[7]提出了一种协作的多址接入协议: CoopMAC. 在该协议下,网络中的节点通过“偷听”周围邻节点发送的控制信息和数据信息,从而获得本节点到邻节点以及邻节点间的速率信息,并维护一个协同节点表. 当源节点和目的节点间信道条件较差时,该协议通过引入一个邻节点(称之为 Helper 节点)来协助源节点完成到目的节点的传输. 该 Helper 节点到源节点和目的节点的信道条件均比较理想,因此可以支持高速率协作传输,从而提高了整个网络的饱和吞吐量. 然而为了建立协作传输,传统 IEEE 802.11 中的 RTS/CTS 握手机制在 CoopMAC 协议中被扩展为三次握手模式. 当需要协作时,源节点首先发送 CoopRTS (Cooperative Request-To-Send); Helper 节点在正确收到 CoopRTS 后,判断是否能够支持源节点所期望的传输速率,如果可以即发送 HTS (Helper-ready-To-Send); 最后目的节点回复 CTS (Clear-To-Send),从而完成了协作握手过程,如图 1 所示. 此后,源节点以高速率将数据发送给 Helper 节点,并由它高速地转发给目的节点. 而当源节点和目的节点不需要协作传输或者不存在协作节点时,则使用传统的 IEEE 802.11b 协议.

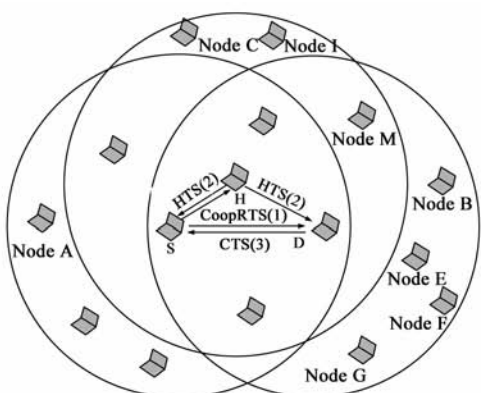


图1 CoopMAC的控制帧交换顺序

在全连通的网络中,协作传输所需要的三次握手机制和传统的 RTS/CTS 握手机制并没有太大区别,仅仅是增加了握手复杂度和握手时间. 然而,在多跳 Ad

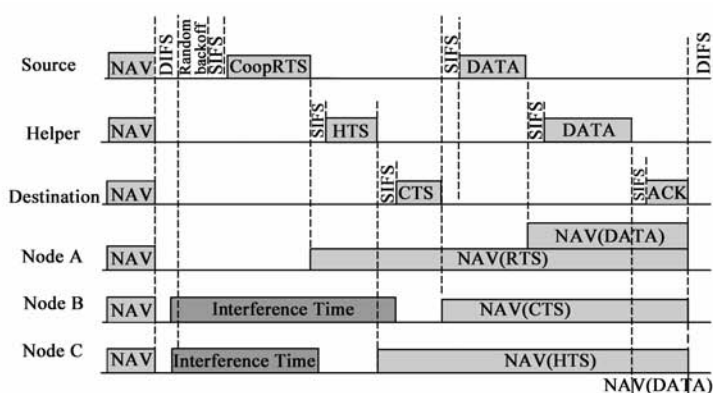


图2 COOPMAC的NAV设置及隐藏终端的干扰情况

Hoc 网络中,三次握手机制则更容易受到隐藏终端的影响. 从图 1 中可以看到:当源节点发送 CoopRTS 时,节点 {B, C, E, F, G, M, I} 均为隐藏终端,其中任何一个节点发

送信息均会影响到 CoopRTS 的正确接收,而当 Helper 节点发送 HTS 时,节点 {B, E, F, G} 仍然为隐藏终端.因此,以节点 B 为例,其在较长的时间内均可以干扰到当前握手信息的传输,如图 2 所示.由此我们可以看出隐藏终端问题严重影响到 CoopMAC 协议在多跳 Ad Hoc 网络中的性能.为了解决该问题本文提出了一种增强型的协作多址接入协议:ECoopMAC.

3 增强型的协作多址协议

ECoopMAC 协议联合考虑了数据传输速率和隐藏终端对网络饱和吞吐量的影响.通过优化协议的握手规则和协同节点的选择策略,该协议在不引入开销的条件下大大降低了隐藏终端问题的影响,进而提高了网络的饱和吞吐量并降低了业务的接入时延.

3.1 协议握手规则优化

在协作多址协议中,由于需要引入协作节点,因此必须增加一次握手来确认协作节点能否参与协作,即 HTS.然而,通过优化握手的顺序可以尽量减少由于控制帧的增加所带来的额外的隐藏终端问题.如果将如图 1 所示 CoopMAC 控制帧的交换顺序优化为先发送 CTS 再发送 HTS,那么隐藏终端问题就会在不引入任何开销的情况下得到很好地改善:当目的节点收到源节点的 CoopRTS 后就立即发送 CTS,此时影响 Helper 节点正确接收 CTS 的隐藏终端仅为节点 {C, I},而 Helper 节点在正确收到 CoopRTS 和 CTS 再后发送 HTS,此时 HTS 在源节点和目的节点处的接收均不会受到隐藏终端的影响.总体上讲,由于握手顺序的改变,在发送 HTS 以及 CTS 的过程中,隐藏终端的个数由 4 个 {B, E, F, G} 变为 2 个 {C, I}.这里我们首先给出一个结论,其证明将在附录 A 中给出.

结论 1 在节点均匀分布的网络中,如果存在 Helper 节点,那么优化了握手顺序的 ECoopMAC 协议受隐藏终端的影响在统计上总小于 CoopMAC 协议.

另一方面,在 CoopMAC 协议中,当 HTS 信息在目的节点处被隐藏终端干扰而不能正确接收时,目的节点会因收到了碰撞的信息而不能向源节点回复 CTS,从而导致整个握手过程失败.而在 ECoopMAC 协议中,源节点和目的节点首先通过 RTS/CTS 握手,成功地建立了连接,即使 CTS 信息在 Helper 节点处因受到隐藏终端的影响而没有正确收到,源节点也可以使用传统的 IEEE 802.11b 协议直接向目的节点传输数据.综上所述,ECoopMAC 在不引入开销的情况下,仅通过优化握手过程就可以降低隐藏终端的影响并提高协作多址协议在多跳 Ad Hoc 网络中的握手成功概率.

3.2 协作节点选择

协作节点的选择策略是协作多址协议乃至协作通

信系统中至关重要的问题,它甚至决定了协作能否带来性能增益^[4].在 CoopMAC 协议中,Helper 节点的选择只考虑了信息中继速率 R_{SH} 和 R_{HD} 的影响.但是,在多跳 Ad Hoc 网络中,Helper 节点的选择不仅要考虑传输速率,而且要尽量减少隐藏终端的影响并提高网络的空间复用度.如图 3 所示:协作节点 H_A 和 H_B 可以分别以 {11Mbps, 5.5Mbps} 和 {5.5Mbps, 11Mbps} 的速率中继数据,所以在 CoopMAC 协议中它们均可以成为 Helper 节点.然而,在多跳 Ad Hoc 网络中它们受到隐藏终端影响的情况却大不相同:如果使用 H_A 作为协作节点,源节点在发送 CoopRTS 时节点 {B, C, E, F, G, I} 均为隐藏终端, H_A 发送 HTS 时的隐藏终端为 {B, E, F, G};相反如果使用 H_B 作为协作节点,源节点发送 CoopRTS 时隐藏终端为节点 {B, E, F, G}, H_B 发送 HTS 时的隐藏终端仅为节点 {E},隐藏终端个数大大减少.另外,即使是优化了握手顺序的 ECoopMAC 协议,也会受到 Helper 节点选择的影响:在使用 H_A 作为 Helper 节点时,目的节点发送 CTS 时的隐藏终端为节点 {C, I};而使用 H_B 作为 Helper 节点,则没有隐藏终端对 CTS 的接收产生干扰.再者,无论是 ECoopMAC 还是 CoopMAC 中,使用 H_B 作为 Helper 节点时,协作带来的额外空间消耗均会减少,从而网络空间复用度得到了提高.因此在多跳 Ad Hoc 网络中,应使用三重标准对协作节点进行选择:(1)协同传输时间,这里定义协同传输时间为 $T_{Coop} = L/R_{SH} + L/R_{HD}$,其中 L 为数据包的长度, R_{SH} 和 R_{HD} 分别为源节点到协作节点以及协作节点到目的节点的传输速率,那么协同传输的时间越短则该 Helper 节点越优;(2)隐藏终端个数,应选择隐藏终端个数少的 Helper 节点参与协作;(3)空间复用度,在 Helper 节点选择时,应尽量减少额外的空间消耗以及对其他数据流的影响.

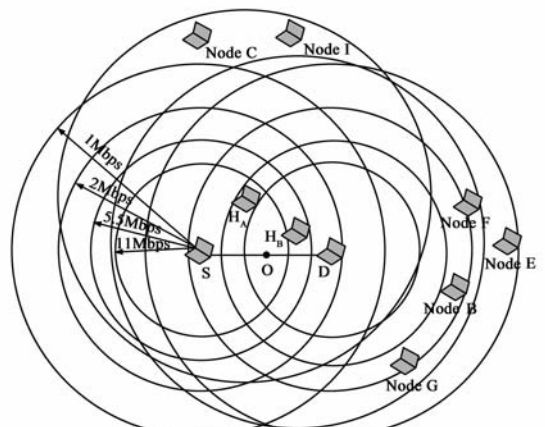


图3 协作节点选择

结论 2 在节点均匀分布的网络中使用 ECoopMAC 的情况下,当 Helper 节点的协作传输时间相同时,则选择到 S、D 连线的中点 O 距离最小的 Helper 节点参与协

作.

该结论相应的证明将在附录 B 中给出. 这里为了降低算法复杂度, 仅考虑了协同传输时间相同时最优协作节点的选择. 由该结论可以看出, 在邻节点位置信息已知的情况下可以很容易的选择出最优的 Helper 节点来参与协作. 然而, 在一些多跳 Ad Hoc 网络和多数传感器网络中, 由于信息监测和基于地理位置路由的需要, 节点的地理位置信息是上层协议已知的, 因此可以通过跨层设计使得该信息在 MAC 层得到共享, 进而提高 MAC 层的性能, 故称该模式为最优协作节点选择模式 ECoopMAC (HS) (Enhanced Cooperative MAC Protocol with Helper Selection). 需要说明的是: 这里节点位置信息并不是 ECoopMAC 协议所必须的, 而是在已知该信息时才触发新的协作节点选择方式, 否则转而使用 CoopMAC 中协作节点的选择方式. 在后续的仿真研究中, 给出了地理位置信息对 ECoopMAC 协议的性能影响.

3.3 协议描述

前面两节已经给出了 ECoopMAC 协议中握手顺序和协同节点选择的优化策略, 本节详细给出了 ECoopMAC 协议的具体执行过程:

Step 1 源节点完成退避过程后, 首先根据和目的节点的直接传输速率来判断是否需要协作传输, 如果需要, 则进入 Step 2; 否则进入 Step 7;

Step 2 当邻节点的地理位置信息已知时, 根据结论 2 来选择 Helper 节点; 否则, 源节点仅利用以往“偷听”到的节点间的速率信息来选择 Helper 节点. 如果存在协作节点, 则进入 Step 3; 否则进入 Step 7;

Step 3 源节点发送 CoopRTS 信息;

Step 4 目的节点正确收到 CoopRTS 且自身处于空闲状态时, 则立即回复 CTS; 否则不发送任何信息;

Step 5 如果 Helper 节点正确收到 CoopRTS 和 CTS, 并能满足 CoopRTS 中所携带的速率要求, 且处于空闲状态时, 则发送 HTS; 否则不发送任何信息;

Step 6 当源节点能正确收到 CTS 和 HTS 时, 则启动协作传输; 当源节点仅正确收到 CTS 时, 则启动直接传输; 否则, 再次进入退避过程;

Step 7 利用传统的 IEEE 802.11b DCF 协议传输数据.

图 4 和图 5 分别给出了 ECoopMAC 协议的握手顺序和 NAV 设置情况. 以图 4 为例, 在使用优化了握手规则和协作节点选择策略的 ECoopMAC 协议后, 虽然协作传输增加了一个控制帧 HTS 的传输但并没有引入更多隐藏终端, 仅在发送 CoopRTS 时存在隐藏终端 {B, E, F, G, M}, 而在传输 CTS 和 HTS 时并没有隐藏终端, 这和传统的 IEEE 802.11 协议相同. 这就意味着 ECoopMAC 在没有引入任何额外的隐藏终端的情况下完成了协作传输, 因此 ECoopMAC 更加适用于多跳 Ad Hoc 网络.

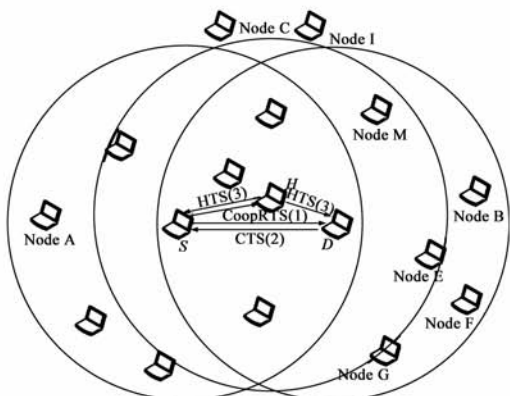


图4 ECoopMAC的控制帧交换顺序

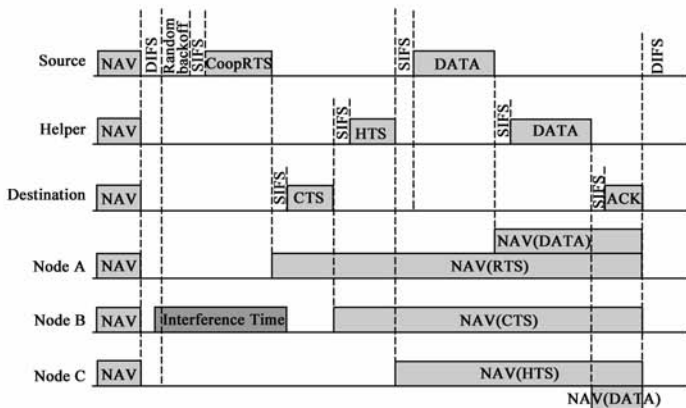


图5 ECoopMAC的NAV设置及隐藏终端的干扰情况

4 理论分析

为了从理论上给出 ECoopMAC 协议的性能分析, 本节中建立了协作多址协议在多跳 Ad Hoc 网络中的理论分析模型. 后续仿真研究也充分验证了该分析模型的正确性和有效性.

4.1 系统模型及相关定义

我们考虑一个由 n 个节点构成的多跳 Ad Hoc 网络. 这 n 个节点均匀的分布在某一指定区域, 节点密度为 ρ . 每个节点均配置一根全向天线并以半双工方式工

作. 这里以 IEEE 802.11b DCF 为基础, 节点支持四种不同的传输速率: 1Mbps、2Mbps、5.5Mbps、以及 11Mbps, 与之相对应的区域半径为 r_1 、 r_2 、 $r_{5.5}$ 和 r_{11} . 因此, 依据和源节点不同的传输速率, 可以将该源节点的邻节点分为四个集合 $\{\Omega_{11}, \Omega_{5.5}, \Omega_2, \Omega_1\}$. 当源节点到目的节点的信道条件较差时, 即仅可以支持 1Mbps 或 2Mbps 的传输速率, 那么此时源节点可以通过其他邻节点中继数据从而达到高速传输的目的. 如果一个协作节点位于区域 $A_{x,y}$, 即与源节点和目的节点的距离分别在 r_x 和 r_y 之内, 那么该节点可以帮助源节点以两跳形式中继数

据,速率分别为 x Mbps 和 y Mbps.如图 6 所示,节点 R 就可以帮助源节点以 11Mbps 和 5.5Mbps 的速率中继数据.

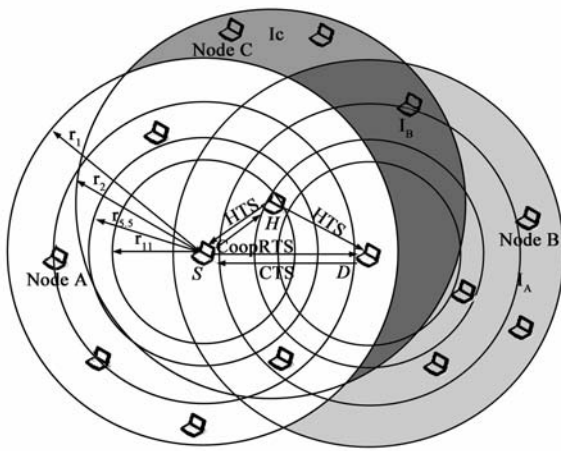


图6 干扰区域

在多跳 Ad Hoc 网络中,由于不同节点的覆盖区域不同,从而错误地判断了信道状态信息,那么它们的传输就可能相互干扰,互为隐藏终端.本文中称如图 6 所示的 I_A, I_B 和 I_C 三个区域为干扰区域,处于该区域的任何节点的传输都有可能干扰到源节点当前的传输.

另外,干扰时间的定义如图 7 所示.当源节点 S 向目的节点 D 发送 CoopRTS 时,位于干扰区域 I_A, I_B 和 I_C 的节点在干扰时间内传输均会影响目的节点和协作节点的正确接收.

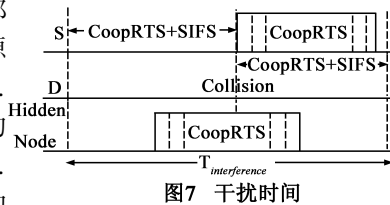


图7 干扰时间

当源节点 S 向目的节点 D 发送 CoopRTS 时,位于干扰区域 I_A, I_B 和 I_C 的节点在干扰时间内传输均会影响目的节点和协作节点的正确接收.

4.2 饱和吞吐量分析

和文献[12]相同,假定每个节点能够在其侦听范围内获得完全准确的信道状态信息,而碰撞仅仅发生在握手信息的交互过程中并且假设碰撞的概率为 p .由此,饱和条件下的 IEEE 802.11b DCF 协议即可以建模为二维马氏链.那么在某一随机给定的时隙内节点发送信息的概率 τ 可以表示为:

$$\tau = \frac{2(1-2p)}{(1-2p)(W+1) + pW(1-(2p)^m)} \quad (1)$$

其中 W 为二进制指数退避的最小退避窗口, m 为最大的退避阶段.

我们研究同质的多跳 Ad Hoc 网络,其中每个节点在网络中具有相同的地位,且每个节点所经历的事件在统计上是相同的.因此从单个节点的角度出发,分析单个节点在多跳 Ad Hoc 网络中所处的各个状态及其持续时间,从而推导出单个节点在多跳 Ad Hoc 网络中的

饱和吞吐量,然后乘以网络中的节点个数,进而获得整个网络的饱和吞吐量.在不影响分析有效性的前提下,为了简化分析这里忽略了两跳以外的节点对该节点所处状态的影响.这种分析方法也曾被用于 IEEE 802.11 协议在多跳 Ad Hoc 网络中的性能分析^[13,14].单个节点 S 在多跳 Ad Hoc 网络可能处于如下几个状态:(1)该节点没有传输,但监测到信道空闲,即周围亦没有节点进行传输;(2)该节点没有传输,但正确收到了周围邻节点传输的信息;(3)该节点没有传输,但检测到其他节点的碰撞信息;(4)该节点成功传输了一个数据包;(5)该节点传输的信息被碰撞.假设每个事件发生的概率为 $P_i, i = 1, \dots, 5$ 相应每个状态持续的时间为 T_i .那么该节点的饱和吞吐量可以表示为:

$$U = \frac{P_4 E[L]}{\sum_{i=1}^5 P_i T_i} \quad i = 1, \dots, 5 \quad (2)$$

其中 $E[L]$ 为平均数据包长度,接下来将逐一分析每个状态发生的概率及其持续的时间.

状态 1 节点 S 没有传输,且监测到信道空闲,即在节点监测范围内没有节点发送,那么:

$$P_1 = (1-\tau)(1-\tau)^{n_s-1} \quad (3)$$

$$T_1 = T_{slot} \quad (4)$$

其中 n_s 为节点 S 监测范围内节点的个数,其中包括节点 S 本身. T_{slot} 为一个退避时隙的长度.

状态 2 节点 S 没有传输,但正确收到了周围邻节点的握手信息,因此此时仅有一个邻节点传输信息.那么节点 S 被静默,从统计角度,节点被静默的时间应该为一个数据包正确传输所需要的平均时间,由此

$$P_2 = (1-\tau)(n_s-1)\tau(1-\tau)^{n_s-2} \quad (5)$$

$$T_2 = T_s \quad (6)$$

这里 T_s 为成功传输一个数据包的平均时间,其表达式将在后文给出.

状态 3 节点 S 没有传输,但节点检测到其他节点的碰撞信息.这意味着其邻节点中两个或两个以上节点同时传输了信息,因此

$$P_3 = (1-\tau)[1 - (1-\tau)^{n_s-1} - (n_s-1)\tau(1-\tau)^{n_s-2}] \quad (7)$$

$$T_3 = T_c \quad (8)$$

其中 T_c 为信息碰撞所消耗的平均时间,其表达式同样将在后文给出.

状态 4 节点 S 成功传输一个分组.根据节点 S 到其目的节点 D 的速率不同,我们可以将该状态划分为两个子状态:

(1)节点 S 向目的节点 D 成功发送了一个数据包,节点 D 属于集合 $\Omega_i, i = 11, 5.5$.此时 S 到 D 的直接传输信道已经比较理想,所以并不需要协作节点参与传

输,因此应采用直接传输并使用传统的 IEEE 802.11b DCF 协议.以目的节点属于集合 Ω_{11} 为例,可以得到该事件的概率 $P_{D_{suc},11}$ 和相应的时间 T_{11S}

$$P_{D_{suc},11} = \tau(1-\tau)^{n_D-1}(1-\tau)^{\overline{(n_A+n_B)}[2(T_{RTS}+T_{SIFS})/T_{slot}-1]} \quad (9)$$

$$T_{11S} = T_{RTS} + \delta + T_{SIFS} + T_{CTS} + \delta + T_{SIFS} + T_{PLCP} \\ + E[L]/R_{11} + \delta + T_{SIFS} + T_{ACK} + \delta + T_{DIFS} \quad (10)$$

其中 T_{RTS} 、 T_{CTS} 和 T_{ACK} 分别为传输 RTS、CTS 和 ACK 所消耗的时间, T_{PLCP} 为传输物理层开销所需要的时间, T_{SIFS} 和 T_{DIFS} 为退避时隙 SIFS 和 DIFS 的长度. n_D 为目的节点 D 覆盖范围内节点的个数,其中包括节点 D 本身. n_A 和 n_B 分别为位于干扰区域 I_A 和 I_B 中的节点个数,那么 $n_A + n_B$ 的均值为:

$$\overline{(n_A + n_B)} = \frac{\rho}{r_{11} - 0} \int_0^{r_{11}} S_D - S_{S \cap D}(r_{SD}) dr_{SD} \quad (11)$$

其中 r_{SD} 为节点 S 和节点 D 之间的距离. S_D 节点 D 所覆盖的面积. $S_{S \cap D}(r_{SD})$ 是 S 和 D 重叠覆盖区域的面积,它是由 r_{SD} 所决定的.式(10)中的 δ 表示传播时延.运用相同的办法可以很容易获得 $P_{D_{suc},5.5}$ 和 $T_{5.5S}$.

(2) 节点 S 向目的节点 D 成功发送了一个数据包,节点 D 属于集合 Ω_i , $i = 2, 1$. 这里以直接传输速率 2Mbps 为例.在这种情况下,如果存在协作节点则应该使用 ECoopMAC,反之则只能使用传统的 IEEE 802.11b DCF 协议.因此又可以分为如下三种情况进行讨论.

(a) 当存在协作节点时,源节点用 ECoopMAC 方式成功传输数据.这首先需要存在一个 Helper 节点,且源节点必须成功预约目的节点和 Helper 节点,即目的节点成功收到 CoopRTS 而 Helper 节点需正确收到 CoopRTS 和 CTS.以最优的协作节点位于区域 $A_{11,11}$ 为例,那么协作节点就可以 (11Mbps, 11Mbps) 的速率中继数据,该事件发生的概率和持续时间为:

$$P_{C_{suc},2,(11,11)} = P_{2,H(11,11)} \tau(1-\tau)^{n_D-1}(1-\tau)^{n_H - n_{H \cap D}} \\ (1-\tau)^{\overline{(n_A+n_B+n_C)}[2(T_{CoopRTS}+T_{SIFS})/T_{slot}-1]} (1-\tau)^{n_C[(T_{CTS}+T_{SIFS})/T_{slot}]} \quad (12)$$

$$T_{C(11,11)} = T_{CoopRTS} + \delta + T_{SIFS} + T_{CTS} + \delta + T_{SIFS} + T_{HTS} + \\ \delta + T_{SIFS} + 2T_{PLCP} + 2E[L]/R_{11} + \delta + T_{SIFS} + T_{ACK} + \delta + T_{DIFS} \quad (13)$$

其中 $P_{2,H(11,11)}$ 为直接传输速率为 2Mbps 时存在两跳传输速率为 11Mbps 和 11Mbps 的协作节点的概率,文献 [7] 已经给出了其计算方法. $T_{CoopRTS}$ 和 T_{HTS} 分别为传输 CoopRTS 和 HTS 所需要的时间. n_C 为干扰区域 I_C 中的干扰节点个数.以直接传输速率为 2Mbps 并且存在一个位于 $A_{11,11}$ 协作节点的场景为例, n_C 的均值为:

$$n_C = \frac{\rho}{r_2 - r_{5.5}} \int_{r_{5.5}}^{r_2} \int_{A_{11,11}} \frac{2r_{SR}S_C(r_{SD}, r_{SR}, \theta_{RSD}) dr_{SR} d\theta_{RSD}}{S_{11,11}(r_{SD})} dr_{SD} \quad (14)$$

其中 S_C 和 $S_{11,11}$ 分别为区域 I_C 和 $A_{11,11}$ 的面积, r_{SR} 是节点 S 和 R 之间的距离. n_C 均值的解析形式很难获得,可以通过数值法得到.以相同的方法,可以得到 $P_{C_{suc},2,(11,5.5)}$, $P_{C_{suc},2,(5.5,11)}$ 和 $P_{C_{suc},2,(5.5,5.5)}$ 以及相应的 $T_{C(11,5.5)}$, $T_{C(5.5,11)}$ 和 $T_{C(5.5,5.5)}$.

(b) 当存在协作节点,但不能成功地预约到,因此只能转而应用传统的 IEEE 802.11b DCF.这种情况是由于 CoopRTS 被目的节点成功接收但在 Helper 节点处被碰撞:

$$P_{CD_{suc},2} = P_H \tau(1-\tau)^{n_D-1}(1-\tau)^{\overline{(n_A+n_H)}[2(T_{CoopRTS}+T_{SIFS})/T_{slot}-1]} \\ \cdot [1 - (1-\tau)^{n_H - \overline{n_H} \cap n_D} (1-\tau)^{n_C[2(T_{CoopRTS}+T_{SIFS})/T_{slot}-1]}] \quad (15)$$

$$T_{CD} = T_{CoopRTS} + \delta + T_{SIFS} + T_{CTS} + \delta + T_{SIFS} + T_{SIFS} \\ + T_{PLCP} + E[L]/R + \delta + T_{SIFS} + T_{ACK} + \delta + T_{DIFS} \quad (16)$$

其中 $P_{2,H}$ 是直接传输速率为 2Mbps 时存在协作节点的概率: $P_{2,H} = \sum_{i,j=5.5,11} P_{2,H(i,j)}$.

(c) 当不存在协作节点时,节点 S 成功传输了一个数据包.此时应采用传统的 IEEE 802.11b DCF 协议,

$$P_{D_{suc},2} = (1 - P_H) \tau(1-\tau)^{n_D-1}(1-\tau)^{\overline{(n_A+n_B)}[2(T_{RTS}+T_{SIFS})/T_{slot}-1]} \quad (17)$$

$$T_{D(2)} = T_{RTS} + \delta + T_{SIFS} + T_{CTS} + \delta + T_{SIFS} + T_{PLCP} \\ + E[L]/R_2 + \delta + T_{SIFS} + T_{ACK} + \delta + T_{DIFS} \quad (18)$$

综合以上分析可以得到当直接传输速率为 2Mbps 时节点成功传输一个数据包的概率和所需的平均传输时间为:

$$P_{suc,2} = P_{D_{suc},2} + P_{C_{suc},2} + P_{CD_{suc},2} \quad (19)$$

$$T_{2S} = P_{D_{suc},2} T_{D(2)} + P_{C_{suc},2,(11,11)} T_{C(11,11)} \\ + P_{C_{suc},2,(11,5.5)} T_{C(11,5.5)} + P_{C_{suc},2,(5.5,11)} T_{C(5.5,11)} \\ + P_{C_{suc},2,(5.5,5.5)} T_{C(5.5,5.5)} + P_{CD_{suc},2} T_{CD} \quad (20)$$

以同样的方式可以获得直接传输速率为 1Mbps 时的 $P_{suc,1}$ 和 T_{1S} .最终推得节点 S 成功发送一个数据包的概率为:

$$P_4 = f_{11} P_{D_{suc},11} + f_{5.5} P_{D_{suc},5.5} + f_2 P_{suc,2} + f_1 P_{suc,1} \quad (21)$$

并且相应的平均时间为:

$$T_4 = T_S = f_{11} T_{11S} + f_{5.5} T_{5.5S} + f_2 T_{2S} + f_1 T_{1S} \quad (22)$$

f_x , $x = 1, 2, 5.5, 11$ 是源节点的邻节点位于集合 Ω_x 中的概率,可以很容易的表示为:

$$f_{11} = r_{11}^2/r_1^2, f_{5.5} = (r_{5.5}^2 - r_{11}^2)/r_1^2 \quad (23) \\ f_2 = (r_2^2 - r_{5.5}^2)/r_1^2, f_{5.5} = (r_2^2 - r_1^2)/r_1^2$$

状态 5 节点传输的分组被碰撞,该状态可以划分为两个子状态:

(1) 不存在协作节点时,RTS 在目的节点碰撞,使得目的节点不能回 CTS,从而不能传输数据,那么:

$$P_{RTS-c} = (1 - P_{1,H} f_1 - P_{2,H} f_2) \{ \tau [1 - (1-\tau)^{n_D-1}] \}$$

$$+ \tau(1-\tau)^{n_D-1} [1 - (1-\tau)^{\overline{(n_A+n_B)}[2(T_{RTS}+T_{SIFS})/T_{slot}-1]}] \} \quad (24)$$

$$T_{RTS-c} = T_{RTS} + \delta + T_{SIFS} + T_{HTS} + \delta + T_{CTS_timeout} + T_{DIFS} \quad (25)$$

$$T_{CTS_timeout} = T_{CTS} + T_{SIFS} \quad (26)$$

其中 T_{RTS-c} 和 $T_{CTS_timeout}$ 分别为 RTS 碰撞所消耗的时间以及 CTS 超时的时间。

(2) 存在协作节点, CoopRTS 在目的节点碰撞, 使得目的节点不能回 CTS, 从而不能传输数据, 那么:

$$P_{CoopRTS-c} = (P_{1,Hf_1} + P_{2,Hf_2}) \{ \tau [1 - (1-\tau)^{n_D-1}] + \tau(1-\tau)^{n_D-1} [1 - (1-\tau)^{\overline{(n_A+n_B)}[2(T_{CoopRTS}+T_{SIFS})/T_{slot}-1]}] \} \quad (27)$$

$$T_{CoopRTS-c} = T_{CoopRTS} + \delta + T_{SIFS} + T_{HTS} + \delta + T_{CTS_timeout} + T_{DIFS} \quad (28)$$

因此, 该状态发生的概率及消耗的时间为:

$$P_5 = p = P_{RTS-c} + P_{CoopRTS-c} \quad (29)$$

$$T_5 = T_C = P_{RTS-c} T_{RTS-c} + P_{CoopRTS-c} T_{CoopRTS-c} \quad (30)$$

联立式(1)和(29), 可以通过数值法得到 τ 和 p , 从而获得 P_i 和 T_i , 最终可以由式(2)得到单个节点的饱和吞吐量, 然后乘以网络中的节点个数, 进而推出 ECoopMAC 在多跳网络中的饱和吞吐量。另外, 该理论分析模型同样可以用于 CoopMAC 协议在多跳网络中的性能分析。

5 仿真研究

为了验证 ECoopMAC 协议在多跳 Ad Hoc 网络中的良好性能以及分析模型的正确性和有效性, 本节中给出了基于 OPNET 10.5 仿真平台的大量仿真结果及相应的性能比较。

表 1 仿真参数

MAC 帧头	272 bits
PHY 帧头	192 bits
RTS 帧	352 bits
CTS/HTS 帧	304 bits
ACK 帧	304 bits
CoopRTS 帧	426 bits
MAC 和 PHY 帧头的传输速率	1Mbps
时隙长度	20 μ s
SIFS	10 μ s
DIFS	50 μ s
最小竞争窗	31 slots
最大竞争窗	1023 slots
重传次数限制	6

5.1 仿真场景及参数

设置一个多跳 Ad Hoc 网络, 网络中的节点随机放置在 $R = 200\text{m}$ 的圆内且保持静止不动, 其发送功率固定, 覆盖范围为 100m ; 各节点均按相同的泊松分布产生

数据包, 数据包的包长为 1024 bytes, 数据包的目的地址随机选择 100m 接收范围内的节点。本仿真中信道的传输损耗模型采用自由空间模型, 数据帧的传输速率取决于源节点和目的节点之间的距离, 参照表 2。不失一般性, 以 IEEE 802.11b 为基础, MAC 层的核心参数如表 1 所示。相同的参数设置在文献[7]中也得到了应用。这里呈现的仿真结果是对 300 个不同随机种子且待仿真稳定后所获得的数据取平均后所得到的。

表 2 数据帧的传输速率

数据帧的传输速率(Mbps)	11	5.5	2	1
源节点和目的节点之间距离(m)	48.2	67.1	74.7	100

5.2 仿真结果及分析

图 8 给出了网络饱和吞吐量和网络中节点个数的关系, 其中仿真结果和理论分析结果能够较好的匹配, 从而印证了分析模型的有效性和正确性, 而存在的偏差是由于分析模型中忽略了两跳以外的节点对源节点传输的影响而造成的。仿真结果表明相对于传统 IEEE 802.11 DCF 协议, ECoopMAC 和 CoopMAC 均能够达到更高的饱和吞吐量, 这是由于节点间的协作提供了更高的传输速率。另外, 随着节点个数的逐渐增加, 隐藏终端数目增多, ECoopMAC 协议相对于 CoopMAC 协议在吞吐量性能方面的改善呈逐渐增加趋势, 这正是由于 ECoopMAC 更好地解决了隐藏终端问题。值得注意的是, 当节点个数给在 40 和 80 之间时, ECoopMAC 和 CoopMAC 均存在一个吞吐量平台期。因为此时 Helper 节点个数的增加恰好和隐藏终端的影响到达一种平衡状态, 然而随着节点个数的进一步增加隐藏终端问题占了主导地位, 从而网络的吞吐量也就随之下降。最后, 可以发现在节点个数较多时, ECoopMAC(HS) 获得了进一步的性能增益。因为当节点个数增加时, 可供选择的 Helper 节点也越多, 进而利用结论 2 可以选择出更优的 Helper 节点来解决隐藏终端问题并提高网络的空间复用度。另外, 图 9 中比较了不同网络规模下数据包的重传次数。重传次数直接决定了业务的接入时延, 结合图 8 可以看出: ECoopMAC 不仅提高了多跳 Ad Hoc 网络的

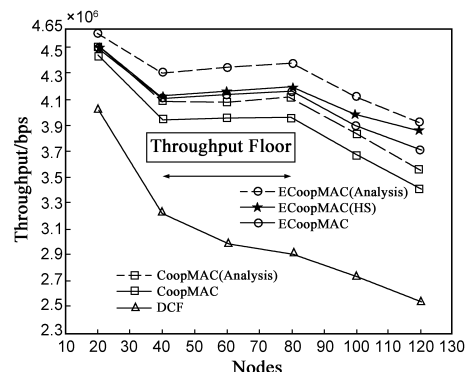


图 8 网络饱和吞吐量比较

饱和吞吐量而且降低了业务的接入时延,更加适合应用于多跳 Ad Hoc 网络中。

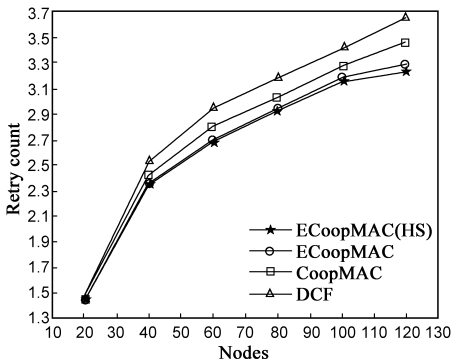


图9 MAC层重传次数比较

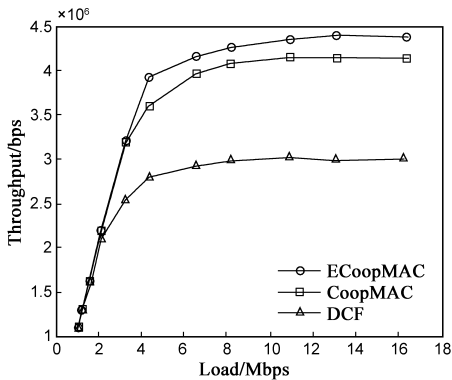


图10 网络吞吐量比较(80个节点)

图 10 给出了网络规模保持 80 个节点不变时,随输入负载的不同,整个网络吞吐量变化的情况.可以看出:随着负载的增加,协作大大改善了网络的吞吐量.当输入负载足够大时,网络吞吐量达到饱和,此时 E-CoopMAC 相对于 CoopMAC 的增益达到 12%. 图 11 对比了不同业务负载下数据包的重传次数,可以看出: E-CoopMAC 协议均优于其他两种协议,降低了业务的接入时延.

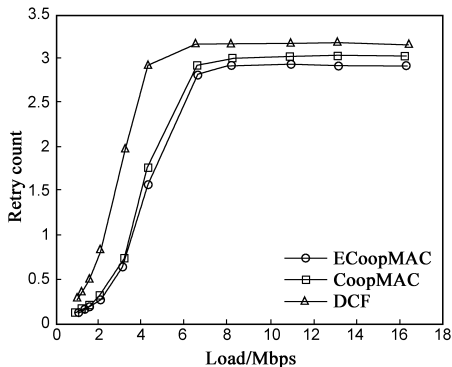


图11 MAC层重传次数比较(80个节点)

6 结论

本文提出一种应用于多跳 Ad Hoc 网络的增强型协作多址接入协议.该协议通过优化控制信息的握手规

则和协同节点的选择策略,从而在不引入开销的条件下有效地降低了隐藏终端的影响,增加了网络的空间复用度,进而提高了网络的饱和吞吐量并降低了业务的接入时延.此外,本文建立了协作多址协议在多跳 Ad Hoc 网络中饱和吞吐量的分析模型,并给出相应的理论分析结果.最后,大量仿真结果表明:相对于已有的协作多址协议该协议能够提高网络的饱和吞吐量达 12%,这和理论分析结果能够很好的匹配,从而验证了分析模型的正确性和有效性.今后工作的重点是进一步分析协作多址协议在移动多跳网络中的性能及相关问题,并研究协作多址协议对节点公平性的影响,从而进一步改进现有协议.

附录 A

证明: 如图 6 所示,在 CoopRTS 传输时, ECoopMAC 和 CoopMAC 具有相同的干扰区域 $I_A + I_B + I_C$, 因此受隐藏终端的影响也相同.然而在 CoopMAC 中, Helper 节点传输 HTS 时干扰区域为 I_A ;但优化握手规则后的 ECoopMAC 中,目的节点发送 CTS 时的干扰区域为 I_C . 设 I_A 和 I_C 的面积分别为 S_C 和 S_A , 那么

$$\begin{aligned} S_C &= S_H - [S_{H \cap D}(r_{HD}) + S_{S \cap H}(r_{SH})] + S_{S \cap H \cap D}; \\ S_A &= S_D - [S_{H \cap D}(r_{HD}) + S_{S \cap D}(r_{SD})] + S_{S \cap H \cap D} \end{aligned} \quad (31)$$

其中 S_H 和 S_D 分别是节点 H 和 D 覆盖区域的面积且相等. $S_{S \cap H}(r_{SH})$ 是 S 和 H 重叠覆盖区域的面积,它是由节点 S 和 H 间的距离 r_{SH} 所决定的.当节点 H 能够成为协作节点时,那么速率 R_{SH} 必须高于速率 R_{SD} , 否则协作将无法带任何增益.在自由空间传播模型下很容易得到 $r_{SH} < r_{SD}$, 另外 $S_{S \cap H}(r_{SH})$ 和 $S_{S \cap D}(r_{SD})$ 均为单调递减函数, 则

$$S_C - S_A = S_{S \cap D}(r_{SD}) - S_{S \cap H}(r_{SH}) < 0 \Rightarrow S_C < S_A \quad (32)$$

由于网络中的节点均匀分布,那么 I_C 中的隐藏终端个数在统计上总小于 I_A 中的隐藏终端个数,命题得证!

附录 B

证明: 在节点均匀分布的网络中使用 ECoopMAC 的情况下,当 Helper 节点的传输速率相同时,选择隐藏终端个数少、空间复用度高的协作节点等价于选择干扰区域 I_C 面积最小的协作节点.因此接下来证明无论 Helper 节点沿 Y 轴方向还是 X 轴方向远离 S 、 D 连线的中点 O , 均会使干扰区域 I_C 增大.当 Helper 沿 Y 轴方向远离 O 点时,如图 12 所示,干扰区域 I_C 的面积增大了 ΔS_C ;而当 Helper 沿 Y 轴方向远离 O 点时,如图 13 所示,干扰区域 I_C 的面积同样也会增加,增量为 $\Delta S_C = \Delta S_2 - \Delta S_1 > 0$. 因此,应选择到 S 、 D 连线的中点 O 距离

最小的 Helper 节点参与协作,命题得证。

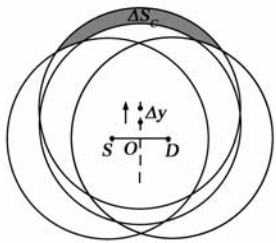


图12 沿Y方向远离O

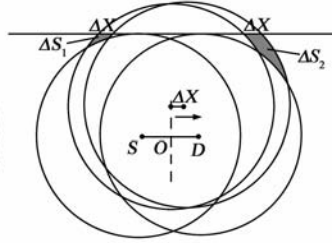


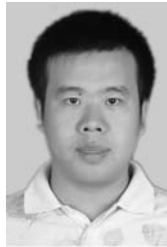
图13 沿X方向远离O

参考文献:

- [1] 盛敏,史琰,田野,李建东,周恩惠.移动 Ad Hoc 网络的 k 连通研究[J].电子学报,2008,36(10):1857-1861.
Sheng Min, Shi Yan, Tian Ye, Li Jian-dong, Zhou En-hui. On the k-connectivity in mobile ad hoc networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(10): 1857-1861. (in Chinese)
- [2] 田野,盛敏,李建东,段鹏.一维 Ad Hoc 网络二连通性的研究[J].电子学报,2008,36(4):715-719.
Tian Ye, Sheng Min, Li Jian-dong, Duan Peng. On biconnectivity for one-dimensional wireless ad hoc networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(4): 715-719. (in Chinese)
- [3] Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications [S]. ANSI/IEEE Std 802.11, 1999 Edition, 1999.
- [4] J N Laneman, D Tse, G W Wornell. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(12): 3062-3080.
- [5] A Sendonaris, E Erkip, B Aazhang. User cooperation diversity-Part I: system description[J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(11): 1927-1938.
- [6] A Sendonaris, E Erkip, B Aazhang. User cooperation diversity-Part II: implementation aspects and performance analysis[J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(11): 1939-1948.
- [7] P Liu, Z Tao, S Narayanan, T Korakis, S Panwar. CoopMAC: a cooperative MAC for wireless LANs[J]. IEEE Journal on Select Areas in Communications, 2007, 25(2): 340-354.

- [8] H Shan, W Zhuang, Z Wang. Distributed cooperative MAC for multihop wireless networks[J]. IEEE Communication Magazine, 2009, 47(2): 126-133
- [9] T Korakis, Z Tao, Y Slutskiy, S Panwar. A cooperative MAC protocol for Ad-Hoc wireless networks [A]. Proceedings of PWN07[C]. New York: White Plains, March 2007. 532-536.
- [10] R Islam et al. An efficient MAC protocol for cooperative diversity in mobile ad hoc networks[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2007, 8(6): 771-782.
- [11] F Liu, T Korakis, Z Tao, S Panwar. A MAC-PHY cross-layer protocol for wireless ad-hoc networks [A]. Proceedings of IEEE WCNC[C]. Las Vegas, USA, 2008. 1792-1797.
- [12] G Bianchi. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function[J]. IEEE Journal on Select Areas in Communications, 2000, 18(3): 535-547.
- [13] F Alizadeh-Shabdiz, S Subramaniam. Analytical models for single-hop and multi-hop Ad Hoc networks[J]. Mobile Networks and Applications, 2006, 11(1): 75-90.
- [14] M Hu et al. MIMO Ad Hoc networks: medium access control, saturation throughput, and optimal hop distance[J]. Journal of Communications and Networks, 2004, 6(4): 317-330.

作者简介:



张 琰 男,1983 年 8 月出生于河南开封。2001 年进入西安电子科技大学,于 2005 年获得工学学士学位。现为西安电子科技大学博士研究生。主要从事协作通信、自组织网络等方面的研究。
E-mail: yzhang@pcn.xidian.edu.cn;
yanzhangpcn@126.com



盛 敏(通信作者) 女,1975 年 8 月出生于湖南长沙。1993 年进入西安电子科技大学,分别于 1997 年、2000 年和 2004 年获得工学学士、硕士和博士学位。2007 年 7 月破格晋升为教授。现工作于西安电子科技大学综合业务网络理论与关键技术国家重点实验室。现为博士生导师、三秦学者、IEEE 会员、陕西省通信学会青年科技工作委员会委员、教育部新世纪人才、霍英东第十一届青年教师奖获得者。主要从事分组无线网、移动通信、传感器网络等方面的研究。E-mail: msheng@mail.xidian.edu.cn