

# 全双工 CSMA 网络中的隐藏终端问题研究

刘圣波<sup>1,2,3</sup> 付立群<sup>4</sup>

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所 上海 200050)<sup>1</sup>

(上海科技大学信息与科学技术学院 上海 200031)<sup>2</sup> (中国科学院大学 北京 100049)<sup>3</sup>

(厦门大学信息与科学技术学院 福建 厦门 361005)<sup>4</sup>

**摘要** 同时同频全双工技术允许节点在同一频带内同时发送和接收信号,理论上可以将频带利用率提高一倍。该技术虽然可以有效缓解传统 CSMA 网络中的隐藏终端问题,但是全双工 CSMA 网络中的隐藏终端问题仍然缺少全面且深入的研究。对半双工 CSMA 网络中隐藏终端问题及其解决方案进行了分析,介绍了全双工 CSMA 网络中的 4 种传输模式,理论分析和实验仿真说明了全双工 CSMA 网络中的隐藏终端问题。最后进一步分析了一些现有的全双工媒体访问控制(Medium Access Control,MAC)协议,并提出了几个在设计全双工 MAC 协议时为解决隐藏终端问题而应该考虑的问题。

**关键词** 隐藏终端问题,全双工,载波侦听多址接入,网络,MAC 协议

中图分类号 TN925 文献标识码 A

## Study of Hidden Node Problem in Full-duplex Enabled CSMA Networks

LIU Sheng-bo<sup>1,2,3</sup> FU Li-qun<sup>4</sup>

(Shanghai Institute of Microsystem & Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)<sup>1</sup>

(School of Information and Science Technology, Shanghai Tech University, Shanghai 200031, China)<sup>2</sup>

(University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)<sup>3</sup>

(School of Information and Science Technology, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)<sup>4</sup>

**Abstract** Full-duplex (FD) technology enables simultaneous transmission and reception in the same band. Thus, it is expected to double spectrum efficiency of wireless networks. Full-duplexing can alleviate the hidden node problem in traditional CSMA networks. However, hidden node problem in FD CSMA networks is short of comprehensive and deep research. This paper briefly analyzed the hidden node problem and its solutions in half-duplex CSMA networks, and introduced four transmission modes in FD CSMA networks. Theoretical analysis and simulations illustrate the hidden node problem in FD CSMA networks. Finally, this paper further discussed the existing FD MAC (Medium Access Control) protocols, and proposed several important issues which need to be taken into consideration in the design of FD MAC protocols in order to reduce the hidden node problem.

**Keywords** Hidden node problem, Full-duplex, CSMA, Networks, MAC Protocols

## 1 引言

随着社会的发展和科技的进步,人们对无线传输数据提出了更高的要求。由于无线频谱资源十分有限,提高频谱的利用率一直是一个热门课题。近年来,能够提升频谱利用率的同时同频全双工技术得以实现并取得了很大的进展<sup>[1-4]</sup>。同时同频全双工技术允许节点在同一频带内同时发送和接收无线信号。与当前的半双工无线通信系统相比,在理想情况下,同时同频全双工技术可以将频谱利用率和网络容量提高一倍<sup>[5]</sup>,该技术得到了工业界和学术界的广泛关注。

在半双工无线网络中,载波侦听技术被广泛用来避免数据包碰撞。但是,由于无线通信共享信道的特点,网络中会出现隐藏终端问题,即不应该发送信号的节点错误地认为信道空闲从而发送信号,导致当前链路传输失败。隐藏终端问题

会对网络的性能造成严重的影响,如降低网络吞吐量、增大通信时延、导致不公平接入等。而具备同时同频全双工技术的节点在接收信号的同时可以通过发送信号来通知周围节点延迟发送,从而在一定程度上缓解隐藏终端问题<sup>[1-3]</sup>。

同时同频全双工技术不仅可以帮助无线网络提高频谱利用率,研究者还可以利用该技术同时收发信号的特点设计新的网络层协议以进一步提高网络的性能。例如,当前无线局域网中使用的是基于冲突避免的载波侦听多址接入协议,对于无线全双工网络,研究人员可以设计基于冲突检测的载波侦听多址接入协议<sup>[6]</sup>,即全双工发射节点可以获取接收端反馈的即时信息,一旦接收端发生碰撞,发射端立刻停止发送信号,退避重发,从而减少碰撞,提高网络吞吐量,降低时延,改善网络的公平性。

随着对同时同频全双工技术研究的深入,研究人员发现

本文受国家青年千人计划科研启动项目(D1210048),国家自然科学基金面上项目(61771017)资助。

刘圣波(1992-),男,硕士生,CCF 学生会员,主要研究方向为无线全双工 CSMA 网络;付立群(1982-),女,博士,教授,主要研究方向为无线通信与网络等,E-mail:liqun@xmu.edu.cn。

该技术可以与 MIMO 技术、认知无线电技术等其他提升频谱利用率的技术相结合,进一步提升网络的性能<sup>[5]</sup>。同时同频全双工技术作为 5G 的关键技术之一,为了充分发挥其技术优势,一方面需要尽可能地消除发射端引入的自干扰,另一方面需要精心设计全双工 MAC 协议增加全双工传输机会,提高网络的吞吐量。

## 2 半双工 CSMA 网络中的隐藏终端问题及解决方案

隐藏终端问题在传统无线 CSMA 网络中由来已久,由于传统的无线节点在同一频段内不能同时收发信号,加上节点的随机分布特性,因此网络中很容易产生隐藏终端问题。

### 2.1 半双工 CSMA 网络中的隐藏终端问题

由于无线半双工通信系统使用开放式信道,所有节点通过载波侦听技术判断信道是否空闲。如果节点侦测到的信号功率小于所设的载波侦听阈值,则认为信道空闲,开始发送数据包给接收端。然而,由于接收端周边的某些节点侦听不到接收端正在接收的信号,这些节点一旦发送信息就会造成数据包碰撞,从而导致丢包。隐藏终端问题一直是无线网络中的重要问题,它会给网络带来诸多不利影响,如吞吐量下降、时延变长、不公平的网络接入、网络不稳定等。过去几十年里,研究人员不断提出新的技术方案和 MAC 协议以解决隐藏终端问题。

隐藏终端可以分为两种情况,如图 1 所示。图 1(a)所示的情况被称为经典的隐藏终端问题。节点  $T_2$  没有侦听到节点  $T_1$  正在发送信息给节点  $R_1$ ,从而认为信道空闲并开始发送信息给节点  $R_1$ ,于是节点  $R_1$  处发生数据包碰撞, $R_1$  接收失败。图 1(b)所示的情况通常发生在无线 Ad hoc 网络或多个重叠的基础网络中。在这种情况下,节点  $T_2$  没有侦听到节点  $T_1$  发送信号给节点  $R_1$ ,从而开始发送 DATA 帧给节点  $R_2$ 。此时  $R_1$  的接收有可能受到来自  $T_2$  传输 DATA 帧的干扰;或者一段时间后, $R_2$  的接收将受到  $R_1$  发送 ACK 帧的干扰。

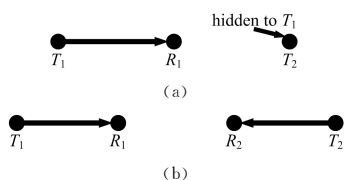


图 1 半双工 CSMA 网络中隐藏终端问题的两种情况

### 2.2 半双工 CSMA 网络中隐藏终端问题的解决方案

本文对减轻半双工 CSMA 网络中隐藏终端问题的 MAC 协议归类如下。

#### 2.2.1 基于 Busy Tone 的 MAC 协议

文献[7-9]提出利用忙音信号(Busy Tone)解决无线网络中的隐藏终端问题。接收端在接收的同时使用单独的信道发送忙音信号,通知周围节点推迟发送信号,从而避免了隐藏终端发送信号导致数据包碰撞的情况。Tobagi 等针对以基站为中心的网络提出了忙音多址接入(Busy-Tone Multiple Access, BTMA)协议<sup>[7]</sup>,他们把通信频段分为数据信道和忙音信道,前者用来传输各种数据包,后者用来传输忙音信号;接收端在接收信号的同时向外发送忙音信号,表示数据信道被占用。Wu 等提出了使用忙音信号避免隐藏终端的机制 RI-BTMA<sup>[8]</sup>,与 Tobagi 等提出的 BTMA 不同的是,发送端先发送数据帧的报头,接收端正接收后立即使用带外信道发送

忙音信号,该忙音信号用来回应发射端的请求和避免隐藏终端的干扰,发射端收到忙音信号后再发送数据帧的数据部分。Hass 等也提出了利用忙音信号避免隐藏终端的机制 DBT-MA<sup>[9]</sup>。与发送忙音相关的机制都需要重新设计当前的无线收发器,实现难度较大。此外,基于忙音的机制在无线 Ad hoc 网络中不能完全解决隐藏终端问题,因为该机制无法解决两条半双工传输链路中的隐藏终端问题。

#### 2.2.2 基于 RTS-CTS 握手的 MAC 协议

RTS-CTS 握手机制要求在发送数据帧之前通信双方先用控制帧 RTS 帧和 CTS 帧进行握手,其他听到 RTS 帧和 CTS 帧的节点必须推迟发送信号。RTS-CTS 握手机制又可以分为两类:单信道 RTS-CTS 握手和双/多信道 RTS-CTS 握手。单信道 RTS-CTS 握手是指发送 RTS 帧、CTS 帧、DATA 帧和 ACK 帧时使用同一个信道。Karn 提出的 MACA 协议<sup>[10]</sup>和 Bharghavan 等提出的 MACAW 协议<sup>[11]</sup>等都是基于单信道 RTS-CTS 握手。MACAW 协议中通过增加载波侦听来避免 RTS 帧冲突,通过 ACK 帧加快丢帧重发。IEEE 802.11 中使用的 RTS-CTS 机制是基于单信道 RTS-CTS 握手的,虽然基于单信道 RTS-CTS 握手的协议可以有效地减轻无线局域网和 Ad hoc 网络中的隐藏终端问题,但并不能将其彻底解决<sup>[12]</sup>,还会导致多链路之间 RTS 帧、CTS 帧与数据帧的相互干扰,而使用双/多信道 RTS-CTS 握手可以避免这个问题。

双信道 RTS-CTS 握手是指把信道分为控制信道和数据信道,用控制信道发送 RTS 帧、CTS 帧,用数据信道发送数据帧。多信道 RTS-CTS 握手是指把信道分为一个数据信道和两个控制信道,传输 RTS 帧和 CTS 帧用一个控制信道,传输 ACK 帧用另一个控制信道。基于双信道 RTS-CTS 握手的协议有 Yang 等提出的 DCMAC 协议<sup>[13]</sup>,基于多信道 RTS-CTS 握手的协议有 Muqattash 等提出的 PCDCMA 协议<sup>[14]</sup>。尽管基于双/多信道 RTS-CTS 握手的协议可以解决无线网络中的隐藏终端问题,但是相应的物理层设计变得更加复杂,而且也会一定程度上增加开销。

#### 2.2.3 基于物理层载波侦听的 MAC 协议

如果隐藏终端侦听的范围足够大,就可以感知到信道被占用,从而推迟发送信号以避免冲突。但是过大的侦听范围会减小空间复用度,加重暴露终端问题,因此找到一个合适的侦听范围也是解决隐藏终端问题的一个途径。

文献[12]和文献[15]都提出了通过载波侦听来避免隐藏终端问题的协议设计。Xu 等认为只要物理层载波侦听的范围大于干扰距离与信号传输距离之和就可以完全避免隐藏终端问题<sup>[12]</sup>,而 Jiang 等认为物理层载波侦听的范围应大于干扰距离与两倍的信号传输距离之和才可以完全避免隐藏终端问题<sup>[15]</sup>,并且可以应用到各种无线网络场景中。Fu 等认为文献[17]中两对链路干扰模型所得到的载波侦听功率阈值不够准确,难以应对网络中节点密集的情况<sup>[16]</sup>。在文献[15]的基础上,Fu 等给出了密集网络中基于叠加干扰模型的增强型载波侦听机制(IPCS),通过侦听信号功率增量判断是否发送信号,从而避免密集网络中的隐藏终端问题。基于物理层载波侦听的方案设计比较容易实现,但是缺乏实际系统的验证。

## 3 全双工 CSMA 网络中的隐藏终端问题

在全双工 CSMA 网络中,尽管接收端可以在接收的同时

向外发送信号,但由于传输模式的增加,网络中仍然存在隐藏终端问题。

### 3.1 全双工网络中的传输模式

在无线全双工网络中,由于同时存在半双工节点和全双工节点,因此半双工传输链路和全双工传输链路必然都会产生,故全双工网络中可能存在4种无线传输链路模式,如图2所示。假设网络中每一种传输模式中竞争到信道的节点为节点 $T$ ,由节点 $T$ 发起链路传输,其接收端为节点 $R$ ,节点 $T'$ 和节点 $R'$ 分别为三节点全双工链路中的第二发送节点和第二接收节点。下面分别讨论图2中的4种传输模式。



图2 全双工网络中的4种传输模式

(1) $T$ 以半双工的方式发送信息给 $R$ ,该链路发生在以下3种情况下:1) $T$ 和 $R$ 都是半双工节点;2) $T$ 是半双工节点, $R$ 是全双工节点,但 $R$ 没有数据包要传给节点 $T$ 或其他节点,同时也不发送忙音信号;3) $T$ 是全双工节点, $R$ 是半双工节点,但没有其他节点要发送数据给 $T$ 。

(2) $T$ 和 $R$ 之间建立全双工传输链路,该链路发生在以下两种情况下:1) $T$ 和 $R$ 都是全双工节点,而且两个节点都有数据要发给对方;2) $T$ 是半双工节点, $R$ 是全双工节点, $R$ 在接收信号的同时发送忙音信号。如果网络中存在视频聊天业务,这种传输模式很可能会发生。

(3) $T$ 先发送信号给 $R$ , $R$ 在接收的同时发送信息给 $R'$ ,其中 $R$ 必须是全双工节点, $T$ 和 $R'$ 可以为半双工节点或全双工节点。这种传输模式可能出现在多跳网络、中继网络以及基础网络中,比如, $R$ 可以是一个全双工AP,一个终端先建立上行链路,AP在接收的同时可以和另一个终端建立下行链路。

(4) $T$ 先发送信号给 $R$ , $R$ 没有数据要传输或者 $R$ 是半双工节点,此时另一个节点 $T'$ 有数据要发送给 $T$ 。该链路中 $T$ 必须是全双工节点, $T'$ 和 $R$ 可以为半双工节点或全双工节点。在基础网络中,这种模式也意味着上行链路和下行链路可以同时进行,与(3)中不同的是由AP先建立下行链路,然后再建立上行链路。

与半双工网络相比,全双工网络中多了图2(b)~图2(d)所示的3种全双工传输模式,相应地,全双工网络中的隐藏终端问题也会随着传输模式的增多而变得更加复杂。此外,由于全双工模式下同一时间存在两个节点发送信息,除了同时收发节点有残留的自干扰,三节点传输模式中还存在节点间干扰,因此全双工网络中的干扰情况比半双工网络的干扰情况要复杂得多。

### 3.2 全双工CSMA网络中的隐藏终端问题

因为全双工CSMA网络中存在多种全双工传输模式,所以隐藏终端问题也存在多种情况。前面已经讨论过半双工链路中的隐藏终端情况,下面简单讨论全双工链路中的隐藏终端问题。

与图1中第二种隐藏终端情况类似,对于两条两节点全双工链路,假设一条全双工链路 $l_1(T_1, R_1)$ 正在通信,另一条链路 $l_2(T_2, R_2)$ 的发起节点 $T_2$ 侦听到空闲信道,但其接收节点 $R_2$ 可能因遭受 $l_1$ 的干扰而不能正确接收信号。对于两条

三节点全双工链路,同样假设其中一条 $l_1(T_1, R_1, R_1')$ 正在通信,当节点 $R_1'$ 和 $R_2'$ 相距较近,而节点 $T_1$ 和 $T_2$ 相距较远时,另一条 $l_2(T_2, R_2, R_2')$ 开始建立链路,节点 $R_1'$ 和 $R_2'$ 则很可能因相互干扰而不能正确接收信号。

通过物理层载波侦听避免隐藏终端的方案在全双工CSMA网络中同样适用。一条两节点全双工链路中的两个节点都在发送信号,因此其干扰的范围比半双工链路的更大。相比于两节点全双工链路,为避免隐藏终端问题,三节点全双工链路所需的载波侦听范围则会更大。但是,过大的侦听范围会导致严重的暴露终端问题,使网络吞吐量下降。

全双工CSMA网络中隐藏终端问题的产生主要有以下原因:1)全双工网络中存在多种传输模式,从而导致隐藏终端问题变得多样化,也更加复杂;2)全双工链路中存在自干扰,现有的干扰消除技术在某些情况不能完全消除自干扰,从而降低了链路容忍外来干扰的能力;3)三节点全双工链路中还存在难以消除的节点间干扰,进一步降低了链路抗干扰的能力。

### 3.3 全双工CSMA网络中的隐藏终端问题仿真

为了说明全双工CSMA网络中的隐藏终端问题,我们设计了两个简单的仿真实验,分别验证两节点和三节点全双工链路中存在的隐藏终端问题,拓扑结构如图3所示。在该实验中考虑两条全双工链路,并且两条链路的节点都在一条直线上,将同一条链路中节点间的距离设为最大传输距离 $d_{\max}$ 。

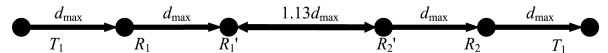


图3 全双工CSMA网络中隐藏终端问题示例

实验所用的全双工MAC协议请参考文献[17]。节点 $T_1$ 侦听信道空闲后发送DATA数据包给 $R_1$ ,对于两节点全双工链路 $l_1(T_1, R_1)$ , $R_1$ 接收到数据包的头部后发送其DATA帧给 $T_1$ ;对于三节点全双工链路 $l_1(T_1, R_1, R_1')$ , $R_1$ 接收到DATA帧的头部后发送其DATA帧给 $R_1'$ 。如果两个帧的长度不一样,先结束发送的节点继续发送忙音信号直至另外一个DATA帧发送结束。等待SIFS时间后,两个接收节点同时发送ACK帧。

仿真实验使用ns-3仿真器[18],仿真参数设置如表1所列。仿真时通过改变图3中 $R_1$ 和 $R_2$ 以及 $R_1'$ 和 $R_2'$ 之间的距离 $D$ 来控制隐藏终端问题对链路产生的影响, $D$ 的取值范围为 $0.5d_{\max} \sim 2.5d_{\max}$ ,步长为 $0.2d_{\max}$ 。载波侦听范围CS1为一般默认设置[19],CS2为文献[19]所得出的半双工网络中避免隐藏终端的设置。

表1 仿真参数设置

仿真参数	参数值
全双工MAC协议	RFD-MAC
传播模型	Two-ray Ground
路径损耗指数	4
最大传输距离 $d_{\max}/m$	50
DATA包大小/Byte	2000
数据速率/Mbps	12
发射功率/dBm	13
载波侦听范围CS1	$2.2d_{\max}$
载波侦听范围CS2	$3.78d_{\max}$

仿真结果如图4所示,对于两节点全双工链路,当采用默认的载波侦听范围CS1时,如果两条链路间的距离 $D$ 较小,则网络中的隐藏终端问题并不严重,这是因为载波侦听技术

发挥了效用;但随着  $D$  的增加,载波侦听技术开始失效,隐藏终端问题逐渐变得严重。对于三节点全双工链路,当采用默认的载波侦听范围 CS1 时,网络中的隐藏终端问题导致的碰撞率随着  $D$  的增加逐渐减小,这说明默认的载波侦听设置不能有效解决三节点全双工链路间的隐藏终端问题。当采用载波侦听范围 CS2 时,隐藏终端问题有所缓解,但当  $D$  的取值在  $1.3d_{\max}$  附近时仍然比较严重,这说明半双工 CSMA 网络中对载波侦听的无隐藏终端设置并不能解决全双工网络中的隐藏终端问题。仿真结果表明,全双工 CSMA 网络中的隐藏终端问题仍然存在,并且三节点全双工链路中的隐藏终端问题比较严重。为了保证全双工网络的优势,研究者需要对该问题进行深入的研究,以寻找有效的解决方案。

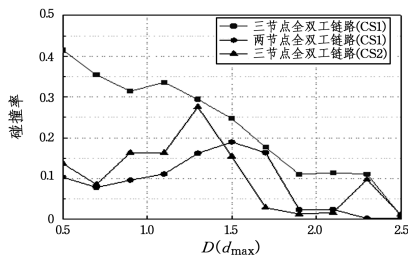


图 4 全双工 CSMA 网络中隐藏终端问题的仿真结果

### 3.4 全双工 MAC 协议分析

全双工技术的应用需要设计新的与之匹配的 MAC 协议,而避免碰撞是 MAC 协议的主要功能之一。过去的几年里,学术界提出了许多全双工 MAC 协议<sup>[17,20-22]</sup>,以提高全双工网络的容量、公平性等性能指标。但是,这些协议的设计都没有充分考虑全双工网络中的隐藏终端问题。

文献[17]设计了一种适合无线多跳传输的全双工 MAC 协议。该协议可以支持两节点全双工传输和图 2(c)中的三节点全双工传输,其中第二发送节点由发起节点确定。发起节点凭借过去侦听周边节点传输的数据帧来获得经验,从而选择第二发送节点。该协议考虑了隐藏节点的存在,并采取避免了一些隐藏终端的问题,但其并没有深入研究如何解决隐藏终端问题。

文献[20]基于 IEEE 802.11 提出了一种分布式全双工传输协议,该协议兼容半双工和全双工无线通信,包含 3 种全双工传输模式。该协议适用于无线 Ad hoc 网络和基础网络,考虑了全双工传输场景中的竞争问题。但是,该文献没有考虑应对全双工网络中的隐藏终端问题。尽管全双工技术本身在两节点传输场景中可以有效缓解隐藏终端问题,但其没有讨论三节点全双工传输场景中的隐藏终端问题。

文献[21]考虑到全双工网络中可能也存在隐藏终端问题,提出了一种基于 RTS/CTS 机制的全双工 MAC 协议 RTS/FCTS,支持两节点的全双工双向通信和三节点的全双工通信。但是作者没有给出避免隐藏终端问题的理论分析,他们认为 RTS/CTS 机制能够解决半双工中的隐藏终端问题,从而认为 RTS/FCTS 协议能够完全避免全双工网络中的隐藏终端问题,但是文献[13]证明了 RTS/CTS 机制并不能完全解决半双工网络中的隐藏终端问题。

文献[22]总结了此前存在的全双工 MAC 协议,并分析了全双工 MAC 协议设计中存在的挑战和需要考虑的问题,认为全双工技术可以减轻隐藏终端问题。基于 RTS/CTS 设

计的全双工 MAC 协议也可以有效缓解全双工网络中的隐藏终端问题,但并不能彻底解决,主要原因在于全双工传输的数据包不是完全同步的。该文献同样没有给出隐藏终端问题的具体分析,没有充分考虑全双工网络中隐藏终端问题所有的可能性。

## 4 全双工 MAC 协议设计时应考虑的几个问题

上一节已经说明在某些情况下全双工 CSMA 网络中依然会出现较为严重的隐藏终端问题,影响整个网络的性能。为了解决这一问题,需要谨慎地设计全双工 MAC 协议,本节总结了在设计全双工 MAC 协议时应考虑的几个问题。

### 4.1 新的干扰分析模型

在半双工网络中,一对传输节点同一时刻只有一个节点在发送数据帧,因此在研究隐藏终端问题时大多采用基于圆的传输模型,即发射节点所干扰的区域是一个以发射节点为中心的圆形区域。然而,在全双工网络中,一条全双工传输链路中有两个节点同时发送数据,周边节点所接收到的信号是来自两个发射端的叠加信号,该链路所产生的干扰区域不能使用半双工通信系统中基于圆的传输模型。因此,全双工链路的干扰分析需要新的传输模型。

三节点的全双工传输链路的干扰分析比两节点全双工传输链路更加复杂。多数全双工 MAC 协议中,两节点全双工传输 DATA 帧或 ACK 帧几乎是同时的,因此该链路的干扰区域相对固定。而对于三节点全双工传输链路,传输 DATA 帧的两个节点不同于传输 ACK 帧的两个节点,因此三节点全双工传输链路的干扰区域会随着传输信号帧的不同而发生位置上的变化,这给设计避免隐藏终端的协议增加了难度。到目前为止,还没有研究人员充分考虑这个问题。

### 4.2 节点间干扰的影响

对于三节点的全双工传输链路,由于同链路中存在节点间干扰的影响,建立三节点的全双工链路比两节点全双工链路更困难。例如,图 2(c)中,节点  $T$  和节点  $R'$  存在互相的节点间干扰,节点  $R'$  在接收 DATA 帧时会受到发起节点  $T$  所发 DATA 帧的干扰,发起节点  $T$  在接收 ACK 帧时也会受到节点  $R'$  所发 ACK 帧的干扰。因此,在多个链路共存的网络中,三节点全双工链路更容易受到其他链路的干扰,网络中多个同时工作的无线传输链路给三节点全双工传输链路带来的叠加干扰很可能会导致遭受节点间干扰的节点接收失败。因此,在设计全双工 MAC 协议时,不仅要考虑如何选择节点建立三节点全双工链路,还要充分考虑此三节点全双工链路中节点间干扰的影响。

### 4.3 多链路共存下的叠加干扰

当前的全双工 MAC 协议设计大多只考虑了两条链路共存的情况,而网络中更多全双工链路共存所导致的叠加干扰问题也需要严谨的分析和研究。比如在一片区域中,处于区域中心的全双工链路会遭受四周多个无线链路的叠加干扰,此叠加干扰很可能会超出全双工链路所能容忍的极限,从而导致传输失败。因此,密集型网络中需要慎重考虑多链路带来的叠加干扰问题。

### 4.4 功率控制

在三节点全双工链路中,功率控制是对抗节点间干扰的

一种方法<sup>[23]</sup>。由于节点间干扰的存在,三节点全双工链路中的半双工接收节点很容易因外来的干扰而接收失败。通过功率控制,接收节点可以获得更高的信噪比,网络中也有可能同时建立更多的三节点全双工链路,从而增加网络吞吐量。因此,功率控制在三节点全双工链路或多跳全双工链路中有着重要的作用。

**结束语** 隐藏终端问题是传统无线 CSMA 网络中难以彻底解决的问题,对网络性能有诸多不良影响。同时同频全双工技术的出现不仅可以提高频带利用率和网络容量,还可以有效减轻隐藏终端问题。但是,对于全双工网络中隐藏终端问题及其解决方案的研究还较少。本文首先分析了传统 CSMA 网络中隐藏终端问题的两种情况,对无线半双工网络中隐藏终端问题的解决方案进行了分类和分析;然后在分析全双工 4 种传输模式的基础上,通过理论结合仿真实验说明了全双工 CSMA 网络中存在隐藏终端问题,其中三节点全双工链路可能会存在较为严重的隐藏终端问题,接着进一步分析了当前全双工 MAC 协议中应对隐藏终端问题的情况;最后总结了在设计全双工 MAC 协议时为减轻网络中隐藏终端问题需要考虑的几个比较重要的问题。

### 参 考 文 献

- [1] JAIN M, CHOI J I, KIM T, et al. Practical, real-time, full duplex wireless[C] // Proceedings of the 17th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. ACM, 2011: 301-312.
- [2] CHOI J I, JAIN M, SRINIVASAN K, et al. Achieving single channel, full duplex wireless communication[C] // Proceedings of the Sixteenth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. ACM, 2010: 1-12.
- [3] BHARADIA D, MCMILIN E, KATTI S. Full duplex radios[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2013, 43(4): 375-386.
- [4] KIM D, LEE H, HONG D. A survey of in-band full-duplex transmission: From the perspective of PHY and MAC layers [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4): 2017-2046.
- [5] 孙彦景, 左海维, 李松. 带内全双工无线通信自干扰消除及 MAC 调度研究综述[J]. 电子科技大学学报, 2016, 45(6): 873-887.
- [6] SONG L, LIAO Y, BIAN K, et al. Cross-layer protocol design for CSMA/CD in full-duplex WiFi networks[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(4): 792-795.
- [7] TOBAGI F, KLEINROCK L. Packet switching in radio channels: part II--the hidden terminal problem in carrier sense multiple-access and the busy-tone solution[J]. IEEE Transactions on Communications, 1975, 23(12): 1417-1433.
- [8] WU C, LI V. Receiver-initiated busy-tone multiple access in packet radio networks[C] // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. ACM, 1987: 336-342.
- [9] HAAS Z J, DENG J. Dual busy tone multiple access (DBTMA)-a multiple access control scheme for ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(6): 975-985.
- [10] KARN P. MACA-a new channel access method for packet radio [C] // Amateur Radio 9th Computer Networking Conference. 1990: 134-140.
- [11] BHARGHAVAN V, DEMERS A, SHENKER S, et al. MACAW: a media access protocol for wireless LAN's [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1994, 24(4): 212-225.
- [12] XU K, GERLA M, BAE S. How effective is the IEEE 802.11 RTS/CTS handshake in ad hoc networks[C] // Global Telecommunications Conference. 2002, 1: 72-76.
- [13] YANG X, HUANG Y F, YANG W, et al. A dual channel MAC protocol for providing high spatial reuse and channel efficiency [C] // 2009 1st International Conference on Information Science and Engineering (ICISE). IEEE, 2009: 3930-3935.
- [14] MUQATTASH A, KRUNZ M. Power controlled dual channel (PCDC) medium access protocol for wireless ad hoc networks [C] // INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. IEEE Societies, 2003: 470-480.
- [15] JIANG L B, LIEW S C. Improving throughput and fairness by reducing exposed and hidden nodes in 802.11 networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(1): 34-49.
- [16] FU L, LIEW S C, HUANG J. Effective carrier sensing in CSMA networks under cumulative interference[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013, 12(4): 748-760.
- [17] TAMAKI K, RAPTINO H A, SUGIYAMA Y, et al. Full duplex media access control for wireless multi-hop networks[C] // 2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). IEEE, 2013: 1-5.
- [18] The Network Simulator: ns3[OL]. <http://www.nsnam.org>.
- [19] JIANG L B, LIEW S C. Removing hidden nodes in IEEE 802.11 wireless networks[J]. IEEE Vehicular Technology Conference, 2005, 62(2): 1127-1131.
- [20] GOYAL S, LIU P, GURBUZ O, et al. A distributed MAC protocol for full duplex radio[C] // 2013 Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. IEEE, 2013: 788-792.
- [21] CHENG W, ZHANG X, ZHANG H. RTS/FCTS mechanism based full-duplex MAC protocol for wireless networks[C] // Globecom Workshops (GC Wkshps). 2013: 5017-5022.
- [22] THILINA K M, TABASSUM H, HOSSAIN E, et al. Medium access control design for full duplex wireless systems: challenges and approaches [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(5): 112-120.
- [23] CHOI W, LIM H, SABHARWAL A. Power-controlled medium access control protocol for full-duplex WiFi networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(7): 3601-3613.