



一种基于全双工的无线网络 MAC 协议设计与性能分析

莫红枝

(玉林师范学院教育技术中心 玉林 537000)

摘要:半双工无线电台使用两个独立频段实现信息同时发送和接收,而全双工无线电台则使用一个频段实现信息同时收发。为了进一步提升全双工网络性能,提出一种应用于全双工网络的简单高效的 MAC 协议——全双工 MAC (full duplex MAC, FD-MAC) 协议,该协议能够兼容 IEEE 802.11 MAC 协议。在综合考虑物理层和 MAC 层的基础上,分析了使用 FD-MAC 协议的全双工无线网络的性能。数值和仿真结果证明,和已有的全双工网络 MAC 协议相比,FD-MAC 协议具有更优的网络吞吐性能和更低的能量消耗。

关键词:无线网络;全双工;IEEE 802.11 MAC 协议;吞吐量;时延

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015203

Design and Performance Analysis of a Novel MAC Protocol for Full Duplex Wireless Network

Mo Hongzhi

(Education Technology Center, Yulin Normal University, Yulin 537000, China)

Abstract: Two independent frequency bands are used for half duplex radios to realize simultaneous transmission and reception. Recently, full duplex radios are allowed to transmit and receive data packets simultaneously in one frequency band. To improve the performance of full duplex radio networks, a novel MAC protocol called FD-MAC for full duplex radio networks, which was a simple and efficient protocol compatible with standard IEEE 802.11 MAC protocol, was proposed. By taking both the physical layer and MAC layer into account, the performance of full duplex network with FD-MAC was analyzed. The analytical and simulation results demonstrate that, compared with the existing MAC protocols for full duplex radio, FD-MAC protocol owns a higher network throughput performance and a lower power consumption.

Key words: wireless network, full duplex, IEEE 802.11 MAC protocol, throughput, delay

1 引言

目前无线网络主要采用半双工(half duplex, HD)无线设备。因为半双工无线电需要使用不同的频率信道才能

实现无线信号的同时收发,导致无线频率资源的严重浪费^[1]。全双工(full duplex, FD)通信凭借可以在一个频率信道上同时收发信号的优势,从本质上解决了半双工通信存在的资源浪费问题^[2~3]。

收稿日期:2015-03-31;修回日期:2015-08-04

基金项目:2015 年度广西高等教育本科教学改革工程资助项目(No.2015JGA325)

Foundation Item: The Guangxi Higher Education Teaching Reform Fund (No.2015JGA325)

论文引用格式:莫红枝.一种基于全双工的无线网络 MAC 协议设计与性能分析.电信科学,2015203

Mo H Z. Design and performance analysis of a novel MAC protocol for full duplex wireless network. Telecommunications Science, 2015203



为了充分利用全双工系统的频率资源优势,半双工无线电 MAC 协议已经不适用于全双工系统,需要设计专门的全双工 MAC 协议。目前,参考文献[4]提出了基于 CSMA/CA 的全双工 MAC 协议 Contraflow,由于 Contraflow 没有预约信道,因此在没有次级分组传输时通过发送忙音信号来避免隐藏终端问题,但这会造成能量浪费。参考文献[5]提出了一种基于 IEEE 802.15.4 的单信道全双工 MAC 协议,协议设计了全双工帧结构,它能够根据负载数据流动态设置全双工通信时长,以提高全双工网络吞吐量。

本文提出了一种新的全双工 MAC (full-duplex MAC, FD-MAC)协议,并分析了基于 FD-MAC 协议的全双工通信网络性能。对于全双工通信,由于发射功率影响自干扰和传输速率,因此发射功率控制成为网络性能优化的重要因素。本文最后综合考虑物理层和 MAC 层开销,对比分析了基于 FD-MAC 全双工网络、基于 Contraflow 的全双工网络、半双工 2×2 MIMO 网络、1×1 SISO 等系统的带宽、能量性能。仿真对比分析验证了 FD-MAC 协议的有效性和优越性能。

2 全双工无线电台模型

本文给出了一种新的全双工无线电模型,作为 FD-MAC 的研究基础。该模型有两个节点参与了全双工通信,一个节点作为主节点初始化全双工通信,另一个节点作为次节点。假设两节点均有两根天线并使用相同的发射功率,分别在同一频率信道上同时发送和接收信号,进而带来接收天线的自干扰问题。由于收发天线很近,自干扰信号功率强度远远大于来自其他节点的发送信号。由于节点发送的信号对于节点本身是已知的,因此利用它来消除自干扰。假设本文使用参考文献[6]提出的 RF 端自干扰消除数字消除技术,但其自干扰抵消能力并不理想。设 K 表示自干扰和发送信号功率的比值,其中待消除自干扰信号包括天线之间的损耗、平衡干扰消除和数字干扰消除的值。设信道为具有独立路径损耗的 IID 瑞利衰落信道,则全双工通信的平均接收信噪比 (signal interference noise ratio, SINR)^[7]是:

$$SINR = \frac{E_t \cdot \frac{1}{N_0} \cdot \frac{1}{d^\alpha}}{1 + K \frac{E_t}{N_0}} \quad (1)$$

其中, E_t 是发送信号能量, d 是源节点和目的节点之间

的距离, α 是路径损耗指数,当 W 为接收机端的噪声信号带宽时, $N_0 W$ 表示噪声功率。当没有次级分组传输时,平均接收信噪比 (signal noise ratio, SNR) 和半双工系统^[8]相同,表示为:

$$SNR = \frac{P/d^\alpha}{N_0 W} \quad (2)$$

其中, P_t 指信号发射功率。假设无线通信能够获得信道容量, IID 瑞利衰落信道具有独立距离路径损耗,具有信道互易性。同时假设主传输和次级传输的信道衰落分布和发射功率相同。总速率为:

$$C_{full} = 2E[\ln(1 + |h|^2 SNR)] \quad (3)$$

其中, h 指瑞利衰落, C_{full} 指单信道传输速率,单位为 bit/s。假设信道具有互易性,每个分组传输的速率可达到 $C_{full}/2$ 。

作为对比,半双工 1×1 SISO 和半双工 2×2 MIMO 系统的容量分别为:

$$C_{SISO} = E[\ln(1 + |h|^2 SNR)] \quad (4)$$

$$C_{MIMO} = E\left[\ln \det\left(1 + HH' \frac{SNR}{2}\right)\right] \quad (5)$$

考虑能量消耗,本文采用了功率消耗模型,其中包括 RF 前端、基带处理器和 MAC 处理器的功率消耗。在发射机端, RF 前端包括功率放大器、滤波器和可变增益放大器。基带处理器和 MAC 处理器在处理分组传输时会消耗功率。接收机端包括具有低噪声放大器的 RF 前端、基带处理器和 MAC 处理器^[9]。为了建模发射机端的 RF 前端,假设 RF 前端有效率因子 η 、发射功率为 P_t 的信号, RF 前端消耗 P/η 。对于基带和 MAC 处理信号,设消耗能量 P_{proc} 。因此,传输消耗的总功率为:

$$P_{tx} = P/\eta + P_{proc} \quad (6)$$

对于接收机端,设 RF 前端消耗固定大小功率 $P_{RF,rx}$,而信号处理过程消耗能量和发射机端相同为 P_{proc} 。因此,接收端总功率消耗为:

$$P_{rx} = P_{RF,rx} + P_{proc} \quad (7)$$

3 FD-MAC 协议

FD-MAC 协议以 IEEE 802.11 RTS/CTS 协议^[10]为基础,能够和 IEEE 802.11 协议相兼容,而且能够充分利用全双工无线的优势。图 1 是 FD-MAC 协议中分组传输的主要过程。

如图 1 所示,当源节点将要发送大量数据分组给目的节点时,源节点使用标准的 RTS/CTS 协议。源节点每隔固

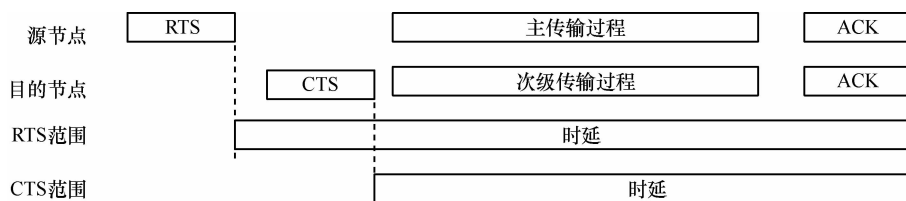


图1 FD-MAC 分组交换过程

定的时间间隔侦听信道,此间隔称为分布式帧间距(distributed inter frame space, DIFS)。当信道在 DIFS 间隔内空闲,源节点开启随机退避计数器,退避计数器的尺寸大小根据竞争窗口随机选取。当退避计数器终止,源节点向目的节点发送 RTS 分组。一旦接收到 RTS 分组,目的节点向源节点返回 CTS 分组。当网络中其他节点收到 RTS 或 CTS 分组,延迟分组发送直至当前分组传输结束。图 2 给出了源目的节点分组传输时的预约区域。

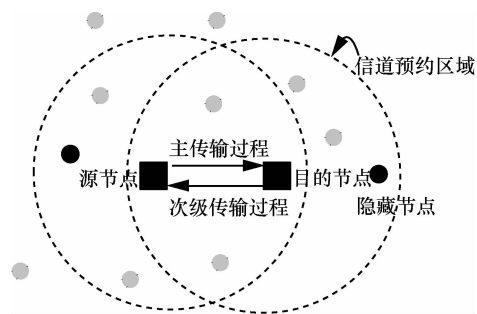


图2 FD-MAC 信道预约区域

当 RTS/CTS 交换完毕后,数据分组从源节点传输到目的节点,称为主分组传输;在主分组传输过程中,接收机可以同时传输分组给发射机节点,称为次级分组传输。因为在源节点给目的节点发送分组的过程中信道被预留给主分组传输,次级分组传输不需要通过额外的 RTS/CTS 分组来预约信道。即使次级分组结束早于主分组传输,在主分组传输结束时主发射机和次发射机仍均同时发送 ACK 确认分组。为了提高控制分组传输的解码效率,本文使用固定传输速率 R_{MAC} 发送控制分组。当不同节点的 RTS 分组发生冲突时,目的节点不能够正确解码 RTS 分组。

4 网络性能

联合考虑物理层和 MAC 层,从带宽利用效率和能量利用效率等性能标准分析了全双工通信系统性能。

4.1 带宽利用效率

为计算带宽效率,首先计算分组传输总时延。时延包

括 MAC 层运行时占用的时间。假设分组传输能够获得信道容量。因此,数据分组传输速率随发射功率变化。数据分组时延为:

$$D_{\text{data}} = \frac{2M}{C_{\text{full}}} \quad (8)$$

其中, M 指包括分组头和分组负载的分组大小。因为 S_{full} 是全双工通信系统两路分组传输的总速率,每路分组传输分组在信道具有互易性时速率为 $S_{\text{full}}/2$ 。为了计算 MAC 层运算时延,假设物理层速率固定且竞争节点数目时变^[1]。但是,物理层的传输速率受发射功率和信道状态影响。假设节点均匀分布,通过改变发射功率,信道接入的竞争节点数目也会发生变化。因此,物理层和 MAC 层性能受发射功率影响。设接收信号功率大于某门限 P_{th} ,则此节点位于接收范围内。当路径损耗指数是 α 时,接收信号范围为:

$$d_{\text{rec}} = \left(\frac{P_t}{P_{\text{th}}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (9)$$

进而竞争节点数目为:

$$n = \rho \pi d_{\text{rec}}^2 \quad (10)$$

图 2 给出竞争节点范围和节点分布示意。对于全双工通信系统,由于发射功率影响物理层传输速率、MAC 层时延和自干扰,因此至关重要。发射功率影响物理层和 MAC 层,需要跨层优化以对整体系统性能寻优。MAC 层时延计算表达式为:

$$D_{\text{MAC}} = E[X] \cdot E[L] + T_{\text{RTS}} + T_{\text{CTS}} + T_{\text{ACK}} + 4\delta + 3T_{\text{SIFS}} + T_{\text{DIFS}} \quad (11)$$

其中, $E[X]$ 指源节点的平均退避次数, $E[L]$ 指退避计数器一次退避所占用的时间, δ 指传播时延。传输控制分组 RTS/ATS/ACK 所占用的时间分别为 T_{RTS} 、 T_{CTS} 和 T_{ACK} 。 T_{SIFS} 指控制分组传输间隔的短帧间间隔 (short inter frame space, SIFS), T_{DIFS} 指分布式帧间距。分析 $E[X]$ 和 $E[L]$ 可使用马尔可夫链模型,见参考文献[12,13]。吞吐量计算如下:

$$T = \frac{I}{D_{\text{total}}} \cdot \frac{(1+\xi)D}{D_{\text{data}} + D_{\text{MAC}}} \quad (12)$$



其中, I 指交换的信息比特总数目, D 指主分组的信息比特数目。吞吐量分析只考虑不包括分组头的数据部分。 ξ 表示次级分组和主分组信息比特数目比值。当主分组大小等于次分组时, 有 $\xi=1$ 。

4.2 能量利用效率

发送和接收分组均要消耗能量。控制分组的发送和接收在 MAC 层的运行过程也需要消耗能量。当 MAC 协议要求节点侦听信道, 也需要消耗能量^[14]。因此, 本文考虑发送、接收和侦听所消耗的总能量。分组传输的能量消耗可简单认为是分组传输功率消耗和分组传输时长的乘积。数据分组传输的能量消耗表示为:

$$E_{\text{data}}=(1+\xi)(P_{\text{tx}}+P_{\text{rx}})D_{\text{data}} \quad (13)$$

MAC 层运行的能量消耗可分为两部分: 侦听信道的能量消耗 E_{lis} 和信道预约能量消耗 E_{resv} 。设某时段周期内有分组正在传输的概率为 p_{tr} , 因此 FD-MAC 协议侦听信道的能量消耗为:

$$E_{\text{lis}}=2(p_{\text{tr}}P_{\text{rx}}T_{\text{RTS}}E[X]+(1-p_{\text{tr}})P_{\text{rx}}\sigma E[X]) \quad (14)$$

其中, σ 是时段周期, $p_{\text{tr}}P_{\text{rx}}T_{\text{RTS}}E[X]$ 表示其他节点间有分组传输的情况, $(1-p_{\text{tr}})P_{\text{rx}}\sigma E[X]$ 表示其他节点间没有分组传输的情况。总能量消耗指主节点和次级节点的能量消耗之和。

信道预约的能量消耗为:

$$E_{\text{resv}}=\frac{1}{1-p}p_{\text{tx}}T_{\text{RTS}}+p_{\text{tx}}(T_{\text{CTS}}+2T_{\text{ACK}})+P_{\text{rx}}(T_{\text{RTS}}+T_{\text{CTS}}+2T_{\text{ACK}}) \quad (15)$$

其中, p 指至少有一个 RTS 分组传输发生冲突的概率。 $\frac{1}{1-p}p_{\text{tx}}T_{\text{RTS}}$ 指当有冲突重传 RTS 分组的能量消耗, 其余指使用 RTS、CTS 和 ACK 分组成功预约信道的能量消耗。因此, 总能量消耗可计算为:

$$E_{\text{total}}=E_{\text{data}}+E_{\text{MAC}}=E_{\text{data}}+E_{\text{lis}}+E_{\text{resv}} \quad (16)$$

当比较不同的传输方案时, 使用每比特能量消耗作为性能标准, 表示为:

$$E_b=\frac{E_{\text{total}}}{I} \frac{E_{\text{total}}}{(1+\xi)D} \quad (17)$$

其中, I 指通信方案传输的比特数目。

5 仿真结果与分析

使用网络仿真软件 OPNET 14.5 和 MATLAB 对基于 FD-MAC 的全双工网络和相关对照网络进行了仿真分析, 对照方案分别选择半双工 2x2 MIMO^[15]网络、基于 Contraflow 的全双工网络、半双工 1x1 SISO 网络。主要参数设置有:

节点密度为 $\rho=0.000\ 01$ 节点/ m^2 , 两节点间距为 100 m, 信号频率为 2.4 GHz, 信号带宽为 10 Mbit/s, 分组大小为 2 000 byte, 路径损耗指数 $\alpha=4$, 比率 ξ 为 1。

全双工系统分组传输总时延为:

$$D_{\text{total,full}}=D_{\text{data}}+D_{\text{MAC}}=\frac{2M}{C_{\text{full}}}+D_{\text{MAC}} \quad (18)$$

其中, M 是分组大小。而半双工系统总时延为:

$$D_{\text{total,half}}=(1+\xi)D_{\text{data}}+2D_{\text{MAC}}=(1+\xi)\frac{M}{S}+2D_{\text{MAC}} \quad (19)$$

其中, S 是物理层的传输速率。基于 Contraflow MAC 协议的全双工系统的总时延为:

$$D_{\text{total,contra}}=D_{\text{data}}+D'_{\text{MAC}} \quad (20)$$

其中, D'_{MAC} 指 Contraflow MAC 层运行时延, 由于 Contraflow 使用的 CSMA/CA 协议不要求传输 RTS/CTS 控制分组传输, 表示为:

$$D'_{\text{MAC}}=E[X] \cdot E[L]+2\delta+T_{\text{ACK}}+T_{\text{SIFS}}+T_{\text{DIFS}} \quad (21)$$

图 3 给出了 FD-MAC 和传统方案随发射功率变化的吞吐量仿真结果。

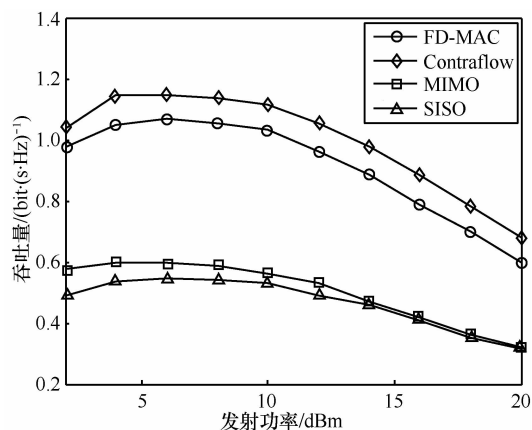


图 3 不同系统的吞吐量随发射功率变化的仿真结果

尽管 FD-MAC 协议的吞吐量不如 Contraflow 协议, 但吞吐量差距很小。这主要由于 FD-MAC 需要额外的控制分组, RTS/CTS 分组开销占用了一定的吞吐量。可以得知, 全双工系统比半双工系统有更加显著的吞吐量优势, 因为全双工通信系统只需要一个信道就能够完成双向数据分组传输, 而半双工系统则需要两个信道。当分组传输发生冲突时, Contraflow 协议会由于丢弃的传输分组造成资源浪费, 不过由于分组传输速率大于 MAC 控制分组传输速率, 进而产生较高的吞吐量性能。再者, 据图 3 可知, 系统具有最大吞吐量时的发射功率既不是最大发射功率也不是最小发射功率。当同时考虑物理层和 MAC 层时, 发射功率低

则分组传输速率低,发射功率高则会造成 MAC 竞争开销和干扰增加。当系统取最优的发射功率时,物理层和 MAC 层性能平衡时,系统才能获得最大吞吐量。

接下来分析 FD-MAC 协议的能量消耗性能。由于半双工系统的数据传输和信道预约不同于 FD-MAC,因此其数据分组传输的能量消耗为:

$$E_{\text{data,half}}=(1+\xi)(P_{\text{tx}}+P_{\text{rx}})D_{\text{data}} \quad (22)$$

半双工系统的信道预约能量消耗表达式为:

$$E_{\text{resv,half}}=2\left(\frac{1}{1-p}P_{\text{tx}}T_{\text{RTS}}+P_{\text{tx}}(T_{\text{CTS}}+T_{\text{ACK}})+P_{\text{rx}}(T_{\text{RTS}}+T_{\text{CTS}}+T_{\text{ACK}})\right) \quad (23)$$

基于 Contraflow MAC 协议的全双工系统,侦听信道的能量消耗为:

$$E_{\text{lis,contra}}=2(p_{\text{tr}}P_{\text{rx}}D_{\text{data}}E[X]+(1-p_{\text{tr}})P_{\text{rx}}\sigma E[X]) \quad (24)$$

由于 Contraflow 协议不预约信道,因此没有信道预约能量消耗,只有 ACK 分组传输消耗的能量,表示为:

$$E_{\text{resv,contra}}=2(P_{\text{tr}}+P_{\text{rx}})T_{\text{ACK}} \quad (25)$$

考虑由冲突引起的分组重传,故有数据分组传输的能量消耗为:

$$E_{\text{data,contra}}=\frac{2}{1-p}(P_{\text{tr}}+P_{\text{rx}})D_{\text{data}} \quad (26)$$

图 4 给出了不同系统随发射功率变化的能量消耗仿真对比结果。

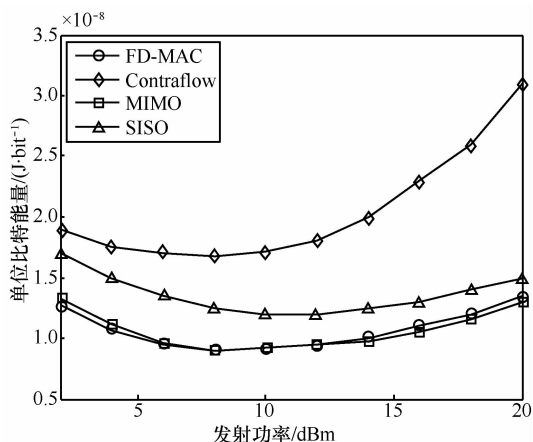


图 4 不同系统的能量消耗随发射功率变化的仿真结果

据图 4 可知,FD-MAC 协议和半双工 2×2 MIMO 网络具有最小的能量消耗,其中在低发射功率条件下 2×2 FD-MAC 有更小的能量消耗,而在高发射功率条件下 MIMO 有更小的能量消耗,但两者能量消耗差异微小。在低发射功率条件下,FD-MAC 有更好的能量消耗性能,这与其他协议比较起来具有更小的 MAC 开销,反之在高发射功率条件下,2×2 MIMO 能量消耗性能更优,因为其在高

发射功率条件下有比全双工通信更高的吞吐量性能。而 Contraflow 协议性能最差,因为如果有冲突发生,需要重新传输双向数据分组,而且当次级分组比主分组小时会消耗额外的忙音信号能量。而且可以得知,最小能量消耗所需要的发射功率对所有通信系统均不是最小或最大。在低发射功率水平,功率消耗减小但是功率消耗所持续的时间增加也会导致能量消耗增加。而高发射功率水平,分组传输周期减小但是功率消耗增加。而且 MAC 层运行的能量消耗随发射功率增加。因此,在设计最优能量消耗网络时,需要通过数值评估来选择最优的发射功率。

6 结束语

本文研究了兼顾物理层和 MAC 层的全双工无线网络的带宽效率和能量利用效率问题,并提出了一种全双工系统框架来分析通信网络性能。基于全双工系统模型,提出了 FD-MAC 全双工 MAC 协议。和现有半双工系统、基于传统 MAC 协议的全双工系统性能比较,FD-MAC 能够在更低能量消耗的条件下获得极具竞争力的吞吐量性能,具有很好的参考价值。

参考文献

- 张丹丹,王兴,张中山.全双工通信关键技术研究.中国科学:信息科学,2014,44(8):951~964
Zhang D D, Wang X, Zhang Z S. Key techniques research on full-duplex wireless communications. SCIENTIA SINICA Informationis, 2014, 44(8): 951~964
- 方飞.基于超高速 WLAN 的 MAC 协议设计.内江师范学院学报,2011,26(12): 28~32
Fang F. Design of MAC protocol for ultra high rate WLAN. Journal of Neijiang Normal University, 2011, 26(12): 28~32
- Jain M, Choi J I, Kim T M, et al. Practical, real-time, full duplex wireless communications. Proceedings of the 17th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, Las Vegas, Nevada, USA, 2011: 301~312
- Radunovi B, Gunawardena D, Protiere A. Efficiency and Fairness in Distributed Wireless Networks Through Self-Interference Cancellation and Scheduling. Technical Report MSR-TR-2009-27, Microsoft Research, 2009
- 万成杰,张春,林进佳等.一种基于 IEEE 802.15.4 的单信道全双工 MAC 协议.微电子学与计算机,2014,31(1): 83~87
Wan C J, Zhang C, Lin J J, et al. Single channel full duplex IEEE 802.15.4 MAC protocol. Microelectronics & Computer, 2014, 31(1): 83~87



- 6 王俊,赵宏志,卿朝进等. 同时同频全双工场景中的射频域自适应干扰消除. 电子与信息学报,2014,36(6): 1426~1440
Wang J, Zhao H Z, Qing C J, *et al.* Adaptive self-interference cancellation at RF domain in co-frequency co-time full duplex systems. Journal of Electronics & Information Technology, 2014,36(6): 1426~1440
- 7 吕磊, 张忠培. 多输入多输出广播信道下基于有限反馈的最大输出 SINR 线性天线合并算法. 电子与信息学报,2014,6(6): 1460~1464
Lv L, Zhang Z P. Limited feedback-based maximum SINR linear antenna combiner for MIMO broadcast channels. Journal of Electronics & Information Technology, 2014,6(6): 1460~1464
- 8 Shaqfeh M, Alnuweiri H. Half-duplex decode-partial-forward. Proceedings of the 10th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks, Paderborn, Germany, 2012: 208~215
- 9 Duarte M, Dick C, Sabharwal A. Experiment-driven characterization of full-duplex wireless systems. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(12): 4296~4307
- 10 陈伟,俞雷,张迎周. IEEE 802.11 协议中 RTS/CTS 机制的安全漏洞分析. 计算机应用,2008,32(12): 12~20
Chen W, Yu L, Zhang Y Z. A vulnerabilities analysis of RTS/CTS mechanism in IEEE 802.11 protocols. Computer Applications, 2008,32(12): 12~20
- 11 Rappaport T S, Mayzus R. Millimeter wave mobile communication for 5G cellular: it will work. IEEE Access, 2013(1): 335~349
- 12 Elsayed A, Eltawil A M, Sabharwal A. Rate gain region and design tradeoffs for full-duplex wireless communications. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12 (7): 3556~3565
- 13 Widrow B, McColl J M, Larimore M. Stationary and nonstationary learning characteristics of the LMS adaptive filter. Proceedings of the IEEE, 1976, 64(8): 1151~1162
- 14 Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(3):535~547
- 15 Hyukmin S, Seonghyun K, Sanghoon L. A multi-user MIMO downlink receiver and quantizer design based on SINR optimization. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(2): 559~568

[作者简介]



莫红枝,女,玉林师范学院教育技术中心讲师,主要研究方向为智能计算与数据挖掘。