

• 通信与信息工程 •

带内全双工无线通信自干扰消除及MAC调度研究综述

孙彦景, 左海维, 李 松

(中国矿业大学信息与电气工程学院 江苏 徐州 221116; 江苏省煤矿电气与自动化工程实验室 江苏 徐州 221008)

【摘要】带内全双工(in-band full-duplex, IBFD)无线通信允许节点在同一频段上同时进行发送和接收, 与传统双工相比理论上最大可成倍提高频谱利用率。分析了IBFD无线全双工通信需要解决的主要技术问题, 系统性地归纳了IBFD无线通信研究现状。介绍了IBFD无线通信系统模型和关键技术, 特别强调了自干扰消除方法和媒体接入控制(media access control, MAC)层协议及调度机制的研究。最后结合当前研究和应用热点, 提出了未来IBFD无线通信发展趋势和研究方向。

关键词 带内全双工; MAC协议; 自干扰消除; 频谱利用率; 无线通信

中图分类号 TN92 **文献标志码** A **doi**:10.3969/j.issn.1001-0548.2016.06.001

Survey of Self-Interference Cancellation and MAC Scheduling for In-Band Full-Duplex Wireless Communication

SUN Yan-jing, ZUO Hai-wei, and LI Song

(School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology Xuzhou Jiangsu 221116;
Coal Mine Electrical Engineering and Automation Laboratory in JiangSu Province Xuzhou Jiangsu 221008)

Abstract In-band full-duplex (IBFD) wireless communication, which allows nodes to transmit and receive simultaneously in the same frequency band, can double spectral efficiency theoretically compared with conventional duplex. The survey presents an analysis of the main technical problems of IBFD wireless full duplex communication to be solved, and summarizes the research progress systematically. The system models and key technologies of IBFD wireless communication are introduced, especially emphasizing the research of self-interference cancellation methods, MAC (Medium Access Control) protocols and scheduling mechanisms. Finally, combined with current research and application focuses, the future trends and main research directions of IBFD wireless communication are discussed.

Key words in-band full duplex; MAC protocols; self-interference cancellation; spectral efficiency; wireless communication

无线通信可提供多样化的信息服务, 随着移动数据量和用户需求飞速的增加, 可分配的无线频谱资源日益紧张, 然而用户发展、技术升级等业务都需要以充裕的频谱资源为基础。近年来, 针对频谱资源这一制约无线通信发展的关键问题, 研究人员相继提出很多提高频谱利用率的新技术与方法^[1-4]。其中, IBFD无线通信允许节点在同一频段上同时进行发送和接收, 与现有的半双工(half duplex, HD)、时分双工和频分双工相比, 理论上最大可成倍提高频谱利用率^[5], 在无线通信领域备受关注。

IBFD无线通信的瓶颈性技术问题, 主要是受自干扰信号的影响。无线通信节点在接收过程中, 自

干扰信号与远端节点的有用信号相比, 功率差值很大, 严重制约了接收电路解码有用信号的性能^[2]。受硬件电路设计及无线传输环境变化等影响, 目前尚不能简单地从接收电路去除自干扰信号。因此, 自干扰信号消除成为实现IBFD无线通信首先需要解决的技术问题。

IBFD无线通信在提高频谱效率的同时, 还使研究人员能够利用带内全双工无线通信技术对其网络层协议进行创新性设计, 提升网络性能。例如, 在无线局域网MAC协议中实现碰撞检测方法的突破, 在竞争型网络中IBFD节点在发送的同时能够检测是否有碰撞发生, 能够接收同一信道其他节点的即

收稿日期: 2015-06-02; 修回日期: 2016-06-24

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51274202); 中央高校基本科研业务费专项资金(2013RC11); 江苏省科技成果转化项目(子课)(BA2012068); 江苏省自然科学基金面上项目(BK20130199, BK20131124); 江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2014028-01)

作者简介: 孙彦景(1977-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事无线通信、协作通信、矿井通信与监控、矿山物联网等方面研究。

时反馈信息,从而减少无线通信隐藏终端所导致的丢包问题,增加网络的公平性和吞吐量^[6]。文献[7]提出综合半双工和全双工技术的虚拟全双工无线网络技术,用于解决网络节点邻居发现等问题。

随着IBFD无线全双工通信研究的深入,其提高频谱利用率的优势在无线通信领域已被认可^[2, 5, 8-10]。Rice、Stanford等国内外研究机构和院校逐渐开展IBFD及其综合性应用的研究工作。尤其在发送功率较低的短距离无线通信应用中,自干扰信号影响较小,为IBFD的发展应用提供了有利条件。Rice大学提出的分布式全双工和Northwestern大学提出的虚拟全双工^[11-12],实现全双工设备与半双工设备之间的无线通信,为IBFD基站和传统双工小型移动设备系统构建提供了可行性。

随着IBFD在实验室环境下的研究逐渐深入,研究人员开始尝试向实用性IBFD的方向发展,将IBFD应用到多用户网络中来提高网络容量^[13-15],把IBFD与认知无线电、5G和MIMO等其他提高频谱效益技术的研究相结合开展研究^[16-18],研究结果进一步证明了IBFD能够与其他无线通信技术结合,提高频谱利用率。

本文首先分析了IBFD无线全双工通信主要的技术问题,并介绍了国内外相关研究内容与技术,系统性地归纳了IBFD无线通信的研究现状。在IBFD无线通信系统模型的基础上,从物理层(physical layer, PHY)自干扰消除和MAC层协议及调度机制两方面进行了分析和对比。最后,结合当前的研究和应用热点提出了未来IBFD无线通信发展趋势和主要研究方向。

1 IBFD无线通信问题

IBFD单节点无线通信如图1所示,节点接收天线 R_x 在接收来自远端节点发送的有用信号的同时,也会接收来自自身节点发射天线 T_x 发送出去的信号,此信号称为自干扰信号。远端节点有用信号在无线传输过程中大幅衰减,被 R_x 接收的远端节点有用信号远小于来自发射天线的大功率自干扰信号,使得节点难以解码有用信号^[19-20]。因此,要保证IBFD节点在同一频段同一时间发送和接收无线信号,首先需要解决消除自干扰信号这一难题。

下面以蜂窝系统为例进行说明,假设手机为IBFD无线通信节点,理想情况下手机与基站无线通信时,手机输出信号强度一般约为+20 dBm,接收自基站的有用信号强度衰减至-90 dBm,如图1所

示。假设自干扰信号强度受天线隔离影响可减小至+10 dBm,手机接收到的自干扰信号功率将是基站有用信号功率的 10^9 倍,甚至更多,此时接收电路根本无法解码有用信号。需要将自干扰信号功率降低到-90 dBm甚至完全消除,接收电路才能正常工作。因此,IBFD无线通信过程首要的任务就是消除自干扰信号。

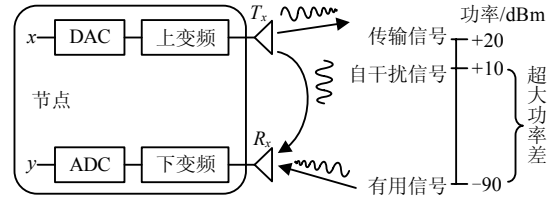


图1 IBFD单节点无线通信问题描述

对于自身节点而言,自干扰信号内容和调制方式是可知的。自干扰信号消除的思想和方法来源于较为成熟的回波抵消技术^[10],接收电路可以此为依据进行自干扰消除,理论上较容易解决。但实际上IBFD无线通信的自干扰信号并不能完全消除,主要原因有:1) 自干扰消除电路和算法设计不足,不能够将自干扰信号的功率降低至不影响有用信号解码的水平;2) 无法精确模拟无线自干扰传播信道状态,接收电路不能彻底去除经衰减和延时的自干扰信号。

自干扰信号的存在严重制约了在同一频段上同时发送和接收信号,也是长久以来阻碍传统双工向带内全双工发展的主要原因之一。为实现IBFD无线通信,需要研究自干扰消除方法,在IBFD无线通信电路中增加自干扰消除模块,逐层消除自干扰信号使其降低至不影响有用信号正常解码的水平。当前的自干扰消除方法主要分为被动消除(passive suppression)和主动消除(active cancellation)^[21],具体消除方法和过程将在第4节进行详细介绍。

2 IBFD无线通信研究现状

实际上,无线全双工及其干扰抵消关键技术概念于20世纪40年代就已应用在雷达领域。连续波雷达系统使用两个分离天线或单个天线同时发送和接收信号,且工作范围不受限制,成为雷达领域主流研究对象。但是,同时发送和接收信号导致的自身发射机泄漏问题严重干扰了有用信号的接收,是连续波雷达研究过程中必须解决的技术难题。文献[22]将自适应干扰抵消技术应用于短波和超短波通信,解决了同址干扰问题,提高了频谱利用率。该

技术于1993年还获得了国防专利。早期消除泄漏干扰的方法主要依赖增加干扰信号无线传播路径的损耗, 2000年之后, 关于连续波雷达系统泄漏干扰消除的研究更加细化, 出现了自适应消除、反射功率补偿消除和数字消除等多种方法^[23-24]。

雷达系统全双工技术的使用为IBFD无线通信奠定了理论基础, 研究人员开始考虑将IBFD应用于中继、蜂窝通信和WiFi等无线通信系统。对于小型蜂窝通信和WiFi等短距离无线通信网络, 虽然一些早期研究指出IBFD的应用潜力, 但当时的自干扰消除技术不够成熟, 以增加收发天线间的物理分离的消除为主^[25], 实验效果并不理想, IBFD应用于小型无线通信网络的可行性令人难以信服。2009年, 微软公司实验室环境测试结果证实了IBFD确实能够提高WiFi无线网络频谱利用率和网络吞吐量, 提出室内无线网络能够使用低载波频率、低发射功率和单波段全双工传输的思想^[8]。2010年, Rice大学在NSF资助下构建了采用Xilinx硬件的WARP(wireless open-Access research platform)平台, 用于开发IBFD实用性的无线通信系统, 目前已被全球125个研究机构和组织使用, WARPv3开发平台如图2所示^[26]。Stanford和Aalto等院校也逐渐展开相关研究工作^[9-10], 掀起了蜂窝通信和WiFi等无线网络中IBFD应用研究的热潮。

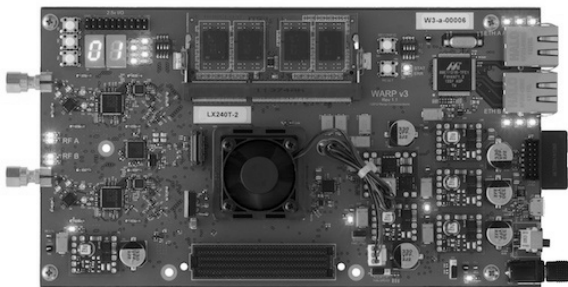


图2 WARPv3开发平台

考虑自干扰信号对IBFD无线通信的影响, 研究人员首先在实验室测试环境下, 从IBFD硬件电路和传播模型设计开始, 对各种自干扰消除电路和技术开展研究。自干扰消除的研究大致分为3个阶段: 寻找最适合小型无线通信网络的自干扰消除方法, 其中包括物理隔离、模拟消除和数字消除等方法的研究^[20, 27]; 研究最小化剩余自干扰信号量的方法, 其中包括各消除方法之间的关系以及剩余自干扰信号量对接收电路各模块影响的分析^[21, 28]; 研究影响自干扰消除过程的因素, 其中包括相位噪声和非线性失真等因素的分析^[29-30]。

IBFD的实现对于无线通信领域具有重要意义, 为充分发掘其潜在价值, 除了自干扰消除电路和算法的设计之外, IBFD的研究与设计还需要充分考虑MAC层及相关网络层次之间的协同关系, 以进一步提升整体网络性能。其中包括无线资源调度算法、MAC层和网络层协议等的设计, 例如邻居发现和交互广播等^[31-33]。在PHY层和MAC层研究基础上做IBFD无线通信性能分析和实验仿真验证, 评估IBFD无线通信可提供的实际效益。

然而, 即便克服了设计上的挑战, 并不是每种通信节点都适用IBFD, 例如手机等小型移动设备采用IBFD无线通信仍然存在问题, 限制了IBFD的应用范围。但是, 随着无线网络对速度的要求以及全双工通信技术的不断成熟, 无线通信向带内全双工演进是个必然趋势。分布式全双工和虚拟全双工的提出表明了半双工与全双工综合使用的可能性^[11-12], 为今后无线通信网络添加和替换IBFD节点提供了基础性研究。另外, IBFD与认知无线电、5G等其他提高频谱利用率技术的结合也说明了IBFD拥有广阔的应用前景^[16-17]。

随着国内外院校和科研机构对IBFD无线通信的不断深入研究, PHY层自干扰消除方法和MAC层协议及调度算法已经在仿真实验和测试平台中得到验证和应用。目前国际上多个研究机构已经开始了IBFD的相关研究与探索, 其中包括Rice大学^[2, 12]、Stanford大学^[20, 34]、Northwestern大学^[11, 35]、Aalto大学^[10, 36]、Microsoft公司^[31, 37]、韩国信息技术研究中心-ITRC^[38-39]和Xilinx公司等。此外, 我国的多家院校及研究机构如电子科技大学^[40-41]、北京大学^[42-43]、西安电子科技大学^[44-45]、北京科技大学^[46-47]、北京邮电大学^[48-49]、中国信息通信研究院^[50]、中国移动、华为公司等也对该领域的基础理论与关键技术进行了研究。其中Rice、Stanford、Microsoft、Xilinx和电子科技大学主要集中于IBFD自干扰信号消除技术的研究, Aalto和北京大学主要涉及IBFD MIMO无线通信技术研究, 北京科技大学和北京邮电大学研究重点为IBFD中继无线通信技术, 西安电子科技大学主要研究IBFD D2D无线通信技术。本文选取具有代表性的Rice、Stanford、Aalto和电子科技大学在IBFD方面的研究成果, 对相关研究重点、主要研究内容及成果、技术优势等进行对比分析, 如表1所示。具体技术及对应文献将在第4节进行介绍。

表1 Rice, Stanford, Aalto和电子科技大学IBFD研究重点及成果对比

指标项	Rice	Stanford	Aalto	电子科技大学
参考文献	[2], [6], [19], [21], [27], [29], [51-55]	[9], [20], [34], [56-58]	[10], [28], [59-63]	[40], [41], [64-69]
主要研究内容	模拟消除, MAC层调度机制	单天线天线消除, 数字消除	IBFD MIMO, IBFD Relay, 自干扰消除影响因素	自干扰消除能力验证、模拟消除、混合双工
实验环境	室内	室内	室内	室内
测试平台/软件	WARP, MATLAB	WARP, USRP, MATLAB	MATLAB	Testbed, MATLAB
工作频段/GHz	2.4/5	2.4	1.875	2.6
实验带宽/MHz	20/40	20	12.5/3	20
调制方式	QSPK, OFDM	BPSK, QAM	QAM	QAM, OFDM, BPSK
天线消除	天线距离、位置、夹角	天线数量	自然隔离	/
模拟消除	自干扰信道模拟	Balun 主动消除(QHx220)	频率选择滤波器、模拟算法	直接射频耦合法、自适应干扰抵消算法
数字消除	数字算法	相干检测、最小二乘法	自适应梯度下降算法、宽线性数字消除、最小均方误差滤波器	信道估计、归一化均方误差算法
自干扰消除影响因素	ADC 动态范围、相位噪声、非线性失真	非线性组件	相位噪声、I/Q 不平衡、ADC、非线性失真	ADC 量化
最大自干扰消除量/dB	100	110	90	100
MAC 协议	调度机制: 共享随机退避, 头部探测、虚拟竞争; MAC 协议: 数据包发现和传输方式、ACK 管理、串音节点行为 PoCMAC 协议	基于 RTS/CTS 的 MAC 协议: 使用忙音	/	/
与 HD 对比吞吐量最大提高量/%	87	低复杂度时 95 高复杂度时 36	/	/
公平性	0.97	0.977	/	/

3 IBFD无线通信模型

3.1 IBFD无线通信节点模型

IBFD无线通信节点电路一般包括以下几个主要信号处理模块: 编码调制、解调解码、数模转换器(digital to analog converter, DAC)、模数转换器(analog to digital converter, ADC)、发送射频(T_x radio)和接收射频(R_x radio)。基带(baseband, BB)信号通过 T_x radio 上变频转变为射频(radio frequency, RF)信号。RF信号通过 R_x radio 下变频转变为BB信号。发送比特流 $x_i[n]$ 在数字域进行编码调制, 再经过DAC、上变频处理后馈入发射天线 T_x 。接收天线 R_x 接收的信号经过下变频、ADC和解调解码后获得接收比特流 $y_i[n]$ [21, 27, 34, 36]。接收电路中各类自干扰消除模块和技术依次对接收信号进行处理, 在通信节点电路模型中的作用位置如图3所示。

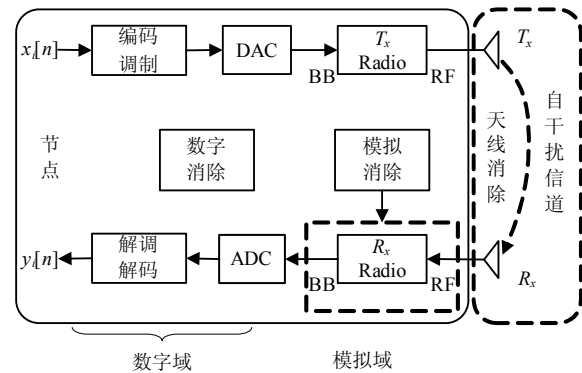


图3 IBFD通信节点电路模型

天线消除(antenna cancellation)通过增加收发天线间传输损耗的方式最大化自干扰信号在无线信道中的衰减量, 但仅依靠天线消除尚不能完全抑制自干扰信号, 还需要结合其他消除技术在接收电路逐层消除。首先在模拟域对RF信号或者BB信号进行消除(analog cancellation, 模拟消除), 抵消部分自干扰

信号, 然后在数字域对ADC转换之后的数字BB信号再次进行消除(digital dancellation, 数字消除), 消除剩余自干扰信号。

IBFD无线通信的实现首先需要有自干扰消除技术和硬件电路的支持, 因此PHY层自干扰消除方法的研究至关重要。另外, 为充分发掘和利用IBFD特性, 研究人员还需对MAC层及相关网络层次的协议和调度机制进行研究。

3.2 IBFD无线通信模型及性能分析

下面以Stanford和Rice的IBFD研究为例, 对IBFD单节点无线通信电路和信道模型进行性能分析, 简化模型如图4所示^[70], 其中阴影部分为模拟消除电路。在两类模型中, x 为节点发送信号, y 为自干扰消除后接收信号, e 为发送电路噪声, n 和 q 分别为节点接收电路热噪声和量化噪声, h_I 为无线自干扰信道冲激响应, h_C 为发送端消除电路有线信道冲激响应。

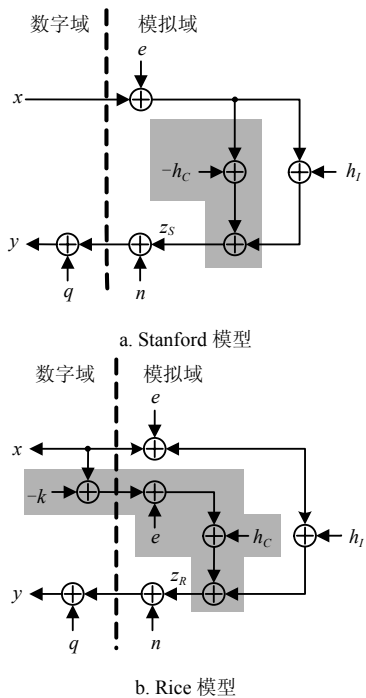


图4 Stanford和Rice大学IBFD无线通信模型

由图4a可知, Stanford模型直接对发送电路的RF信号进行处理。在发送端模拟 h_I , 使 h_C 趋近于 h_I , 发送信号有线传输到接收电路同自干扰信号相加, 完成抵消过程。接收电路经模拟消除后剩余自干扰信号量 z_S 为:

$$z_S = (x + e)(h_I - h_C) = (x + e)h_S \quad (1)$$

式中, $h_S = h_I - h_C$ 为模拟 h_I 时信道估算误差。假设模拟消除后与消除前的自干扰信号功率比为 β_S , 对于任意 h_S 和 h_I , 可知:

$$\beta_S = \frac{E[|(x + e)h_S|^2]}{E[|(x + e)h_I|^2]} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |h_S|^2}{\int_{-\infty}^{\infty} |h_I|^2} \quad (2)$$

式中, $E[\cdot]$ 为期望算子, 基于时间 τ 积分。由式(2)可知, 估算误差 h_S 越小, β_S 值越小, 理想值为0。因此, Stanford模型的模拟消除量受估算准确度的影响较大。

Rice模型的消除电路首先对发送电路的数字信号进行处理。发送端消除电路与发送电路硬件配置相同, 数字信号经过消除电路ADC、上变频等处理后, 有线传输到接收电路与自干扰信号进行抵消, 如图4b所示, 其中, k 为发送端消除电路数字补偿, 理想情况下 $-kh_C = h_I$ 。接收电路经模拟消除后剩余自干扰信号量 z_R 为:

$$z_R = xh_R + eh_I + eh_C \quad (3)$$

式中, $h_R = h_I - kh_C$ 为信道估算误差。对于任意 h_R 和 h_I , 可知模拟消除后与消除前的自干扰信号功率比为:

$$\beta_R = \frac{E[|xh_R + eh_I + eh_C|^2]}{E[|(x + e)h_I|^2]} \quad (4)$$

如果调整 $\int_{-\infty}^{\infty} |h_C|^2 \approx \int_{-\infty}^{\infty} |h_I|^2$, 并使 k 趋于1, 那么 $\int_{-\infty}^{\infty} |h_R|^2 \approx 0$ 。因此式(4)可简化为:

$$\beta_R = \frac{2E[|e|^2] \int_{-\infty}^{\infty} |h_I|^2}{E[|x|^2] \int_{-\infty}^{\infty} |h_I|^2 + E[|e|^2] \int_{-\infty}^{\infty} |h_I|^2} = \frac{2 \left[\frac{E[|x|^2]}{E[|e|^2]} + 1 \right]^{-1}}{\quad} \quad (5)$$

由式(5)可知, 发送电路噪声 e 越小, β_R 值越小, 理想值为0。因此, Rice模型的模拟消除量受发送噪声的影响较大。

综合上述分析, 由式(1)分析可知, 如果估算误差很小, Stanford模型 z_S 中的发送电路噪声 e 可以同时去除, 在数字域也更加容易实现数字消除, 这是Stanford模型优势之一。但同时也存在一个问题, 在模拟无线信道时, h_C 中还包括了有用信号传输信道, 而目前数字消除算法尚没有指出如何处理有用信号部分, 从而影响Stanford模型数字消除效果。由式(3)分析可知, 即便信道估算误差很小, 也不能去除Rice模型 z_R 中发送端噪声 e 的影响, 增加了数字消除的难度。为了在数字消除阶段有更好的消除效果, Rice模型必须在模拟消除阶段把自干扰信号影响尽可能降低到最小, 所以Rice模型主动消除过程主要依靠模拟消除。另外, 无论是Stanford模型还是Rice模型中, 相移等不理想因素都会影响模拟域自干扰消除

效果,具体相关影响因素将在第4.1.3节进行介绍。

4 IBFD无线通信技术

当前IBFD无线通信技术的研究重点主要集中在PHY层自干扰消除方法和MAC层及相关网络层协议的研究和性能评估。

4.1 自干扰消除方法

自干扰消除可分为被动消除和主动消除两类,被动消除以天线消除为主,主动消除又可分为模拟消除和数字消除两类。被动消除通过增加自干扰信号在无线传播路径上的损耗达到消除效果。主动消除则在接收电路中利用消除电路和算法等对自干扰信号进行抵消,进一步完成自干扰消除工作。

4.1.1 天线消除

天线消除技术通过合理设置发送和接收天线数量、天线间距、天线方向以及天线位置等参数,最大化自干扰信号在无线传播路径上的衰减量^[21]。以下针对不同天线参数对天线消除技术进行分析。

1) 天线数量

Stanford大学针对天线数量的影响对IBFD自干扰消除方法进行研究。最初在单节点使用了3副天线^[9],两发送天线到接收天线之间距离设置半载波波长差,使接收到的自干扰信号因 π 相位差而相互抵消,如图5a所示。实验结果表明,此天线消除方法可以抵消20~30 dB的自干扰信号。文献[71]提出的天线消除方法也使用了3副天线,对其中一路接收信号做 π 移位处理,达到抵消目的。

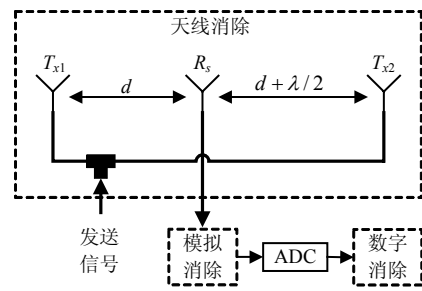
上述天线消除方法不仅需要3副天线,而且需要人工调谐。文献[20]对此做了改进,仅使用两副天线,如图5b所示。使用Balun转换器为接收电路提供RF参考信号,且在接收信号强度指示器(received signal strength indicator, RSSI)的协助下完成自调谐功能。20 cm天线间距、3 dBI全方向天线测试条件下,可达到40 dB的自干扰消除量。

文献[34]结合隔离电路,仅使用单天线完成IBFD天线消除的方法,如图5c所示。该方法直接去除了无线自干扰信号回路,在发送电路和接收电路之间添加了一个带有三端口环形器的隔离电路,能够有效隔离发送电路RF信号的馈入。实验结果表明此单天线消除可完成15 dB的自干扰消除量。

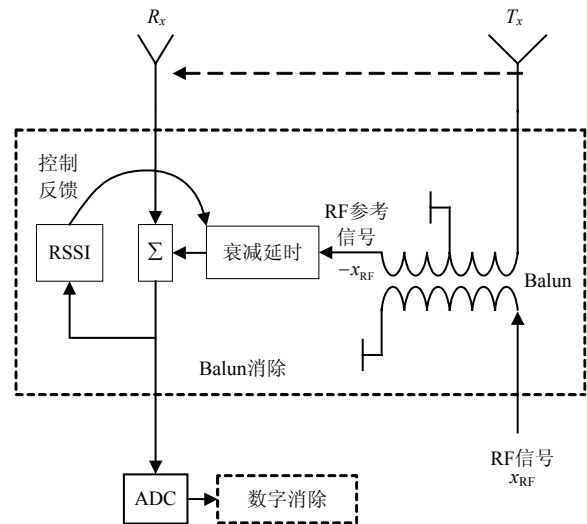
2) 天线间距、方向和位置优化

天线间距、方向和位置对天线消除效果的影响较为明显。文献[2]中分析了发送天线和接收天线间距和角度对天线消除量的影响,研究表明,一定范围内的两天线间距越大,传播路径上衰减越大,

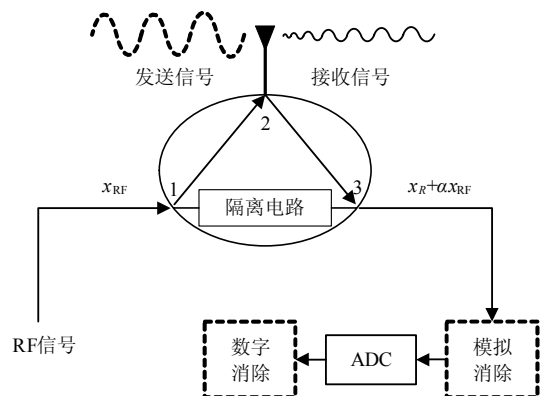
可获得的自干扰消除量也就越大。文献[51]以配有定向天线的基站和移动台为研究对象,在10 m距离、12 dBm发射功率测试环境下,基站收发天线夹角大于 45° 时,自干扰信号无线传播路径损耗较大。文献[19]和文献[21]中关于收发天线位置对天线消除影响的研究结果表明,收发天线分别置于设备两侧时,获得的自干扰信号消除量高于其他位置配置情况。文献[53]对收发天线间距、角度和位置进行最佳配置,最小化IBFD节点邻近天线的影响,实现了70 dB的自干扰消除量。



a. 基于半载波波波长差的3副天线自干扰消除



b. 结合Balun消除的两副天线自干扰消除



c. 基于隔离电路的单天线自干扰消除

图5 基于天线数量的天线消除方法

4.1.2 模拟消除和数字消除

为进一步消除自干扰信号使其降低到不影响有用信号解码水平, 天线消除之后还需要对自干扰信号进行模拟消除和数字消除。

1) 模拟消除

模拟消除是指接收电路获得信号后在模拟域内对自干扰信号进行消除的方法。模拟消除可分为直接耦合和间接耦合两类, 图4所示的两种IBFD无线通信模型中, Stanford模型属于直接耦合方法, Rice模型属于间接耦合方法。

直接耦合模拟消除方法将发送电路RF信号经延时、衰减处理后, 通过有线链路传输到接收电路, 用于抵消自干扰信号。典型直接耦合方法如文献[20]的Balun模拟消除方法, 如图6所示。其采用动态元件QHx220噪声消除芯片将Balun反转后的RF信号 $-x_{RF}$ 分解为同相(g_i)和正交(g_q)两个分向量信号。结合RSSI和梯度下降算法对 g_i 和 g_q 进行调控, 模拟自干扰信号无线传播过程, 在接收电路与自干扰信号相加进行抵消。测试结果表明, 输入功率为 -60 dBm时, 此方法可抵消约30 dB的自干扰信号量。但是当输入功率大于 -40 dBm时, QHx220会造成非线性失真, 影响模拟消除本身效果的同时也会减少数字自干扰消除量。

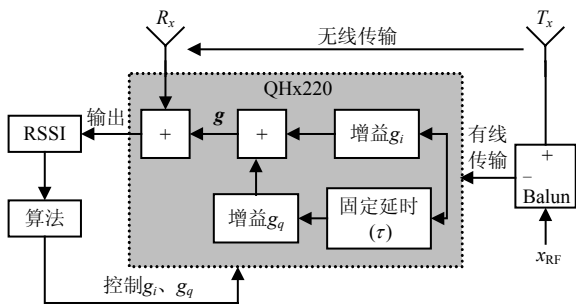


图6 使用QHx220的Balun模拟消除模块图

间接耦合模拟消除方法利用一条额外的有线链路产生与原始信号有相同信道衰落的RF信号, 有线传输到接收电路后与自干扰信号进行相消。文献[21]将原始信号分成两路传输, 一路经DAC、上变频等处理之后无线发送, 另一路负信号经相同处理后, 通过模拟了无线传播路径的有线信道传输至接收电路, 使用RF加法器与自干扰信号进行抵消, 达到消除目的。之后Rice大学对文献[21]方法进行改进, 将高阶滤波器及单载波消除方法应用到模拟消除过程中^[53], 进一步增加了模拟消除量。

2) 数字消除

数字消除是指模拟消除之后在数字域对剩余自

干扰信号进一步消除的方法, 可利用数字算法和数字滤波器等进行信道估算。

典型的应用于IBFD数字消除的算法有自适应梯度下降算法^[72]、最小二乘参数估算法^[63]、最小均方算法、归一化均方算法和递归最小均方误差算法^[73]等。文献[72]提出一种基于自适应梯度下降的数字算法, 利用MIMO中继的有用信号估算自干扰信道, 消除IBFD中继的自干扰信号。在低信噪比和收敛时间约束的测试环境下, 对此算法静态节点和平均收敛参数的影响进行分析, 仿真结果表明该数字消除方法可平均消除28.6 dB的自干扰信号量。文献[63]提出基于宽线性最小二乘参数估算的数字自干扰消除方法, 在适当使用天线消除和模拟消除的情况下, 该方法的数字自干扰消除量高达40~50 dB。文献[74]在数字消除算法基础上, 还在电路中添加最小均方(least mean square, LMS)自适应滤波器。将接收电路上ADC转换后的数字信号分成两路, 一路通过LMS滤波器进行智能延时处理之后与另一路正常传输的信号进行叠加相消, 达到数字消除目的。

除数字算法和数字滤波器的方法之外, 部分文献还介绍了其他IBFD无线通信数字消除方法。文献[9]使用直接序列扩频的自干扰信号, 对扩频信号进行相干检测, 得到自干扰信道的延时和衰减量。文献[75]对比分析了基于伪噪声序列的信道估算以及基于干扰信号的信道估算的性能, 由于伪噪声序列具有良好的互相关与自相关性, 前者信道估算结果和自干扰消除效果都优于后者。

3) 模拟消除和数字消除的均衡问题

研究发现, 模拟消除和数字消除之间存在均衡性和相关性。文献[21]和文献[27]提出, 主动消除平均量随着接收的自干扰信号功率的增加而增加, 数字消除有时甚至会增加自干扰信号量, 数字消除的效果取决于上一阶段模拟消除的效果。文献[28]分析了模拟消除与数字消除在全双工MIMO-OFDM收发器中的作用, 公式推导及仿真结果表明, 数字消除并不总是有益, 当接收器饱和之后数字消除将失去作用。

综合上述分析, 自干扰消除的主要分类及相关研究文献总结如图7所示。

4.1.3 影响自干扰消除的因素

IBFD无线通信自干扰消除过程会受发送和接收电路中电子组件产生的线性/非线性失真、相位噪声等未知信号的影响^[70]。下面介绍影响自干扰消除的几个因素:

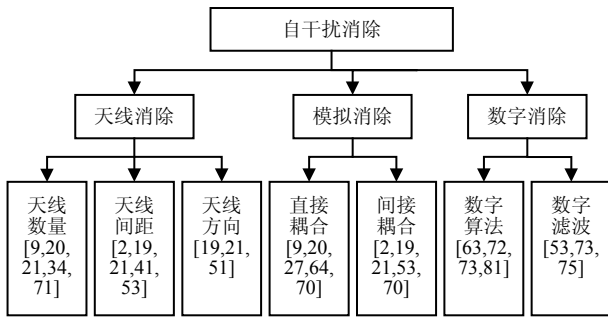


图7 IBFD自干扰消除方法分类

1) 本机振荡器相位噪声

IBFD节点收发器的本机振荡器相位噪声限制了自干扰主动消除量^[76]。除了提高振荡器质量，减少混频器的相位噪声系数以及缩短处理延时时间等方法也可以进一步提高自干扰消除量^[29, 61]。另外，收发电路振荡器配置对自干扰消除也有影响。文献[62]比较了在发送电路和接收电路使用同一振荡器和独立振荡器两种配置下相位噪声的影响，结果表明前一配置自干扰消除量明显高于后一配置。

2) 非线性失真

对于非线性IBFD系统，自干扰信号与有用信号之间的大功率差还导致了发送和接收电路非线性失真问题^[30]。可以利用数字消除方法，减小非线性失真对自干扰消除的影响。文献[52]提出一种结合迭代技术的数字消除方法，有效抑制发送和接收电路的非线性失真的同时，还使系统性能更加接近线性IBFD系统，易于分析。文献[36]利用非线性数字消除算法得出系统非线性部分的推导方式，传输信号及无线信道不变环境下的测试结果表明，非线性数字消除算法在高传输功率下可获得更高的信噪比。

3) 动态范围受限

Aalto大学在对全双工MIMO中继的研究中提出，接收电路动态范围有限，影响自干扰信号消除过程^[77]。针对这一问题，文献[78]利用带有动态范围限制和导频辅助信道估算性能的显式高斯模型，根据IBFD节点通信总速率计算出随导频数量增加而变化的动态范围上下界，提出基于下边界最大值的传输优化方法，其数值优化结果表明IBFD性能明显优于半双工。

4) I/Q不平衡

IBFD无线通信的发送和接收电路中，I/Q不平衡问题会影响自干扰信道模拟的准确度^[63]。针对I/Q不平衡问题，文献[79]在IBFD节点接收电路中添加二阶迭代回波消除器，并从发送电路功率放大器输出端获取自干扰消除参考信号，进行I/Q误差估算和补

偿操作。该方法在有效解决I/Q不平衡问题的同时，还减小了功率放大器非线性对自干扰消除的影响。

5) ADC器件

文献[28]提出如果自干扰信号强度经过模拟消除后能够降低到ADC动态范围内，那么IBFD将更容易进行数字消除。ADC位数、干信比、量化判决准则等因素直接影响干扰消除效果和系统误码性能，文献[40]推导了这3个因素对误码率影响的闭合表达式。仿真结果表明，随着干信比的减小和ADC位数的增加，误码率性能呈宏观改善趋势，且数字消除效果得到优化。

4.2 MAC层协议及调度机制

目前，自干扰消除等物理层通信技术日渐成熟并建立了一定的发展体系，实现了网络中单节点同时同频发送和接收的功能。然而，若要进一步实现多节点之间IBFD无线通信，还需要IBFD无线通信MAC协议及调度机制的支持。IBFD无线通信同一频段同时进行发送和接收的特性，允许发送节点能够在发送信号的同时侦听来自接收节点的消息，确定为冲突通知后便立刻停止传输；接收节点一旦发现碰撞发生，能够第一时间发送消息告知发送节点^[20]。IBFD无线通信的MAC层研究将有助于减少隐藏终端所导致的丢包问题，缓解网络延时等问题，进一步提高IBFD性能。

现有WLAN的802.11协议CSMA/CA仅有冲突避免而没有冲突检测功能，发送节点只有在完成整个发送过程之后才能根据所得ACK数量推断是否有碰撞发生并重新发送出错数据包，不能解决网络中隐藏终端造成的信道资源浪费问题。在WLAN中直接使用带有冲突检测的CSMA/CD协议将面临的技术难题主要有：1)无线发送节点不能在同一频段上同时进行信号发送和冲突侦听；2)发送节点周围的任一信道动态都不能作为接收节点的冲突指示。因此CSMA/CD协议不能完全适用于无线通信系统。

IBFD克服了无线通信自碰撞的调度约束，在解决隐藏终端问题，增加网络吞吐量和公平性等方面具有较大潜力。当前关于IBFD无线通信MAC层的研究主要有MAC协议和调度机制的研究。

4.2.1 MAC协议

IBFD无线通信MAC协议的研究多以标准802.11协议为基础，对MAC通信数据帧结构、ACK和RTS/CTS等进行研究和设计，实现IBFD无线通信功能。

1) 数据帧结构

文献[20]以CSMA/CA协议为基础, 在回复数据帧结构中添加预定义忙音数据段, 并结合IBFD的即时回复性能, 有效缓解了无线通信隐藏终端问题。文献[31]提出的MAC协议ContraFlow也使用了忙音。该文献就ContraFlow的双链路访问控制和分布式调度算法中如何避免碰撞、忙音的使用以及第二接收器的选择等问题进行了研究与设计, 缓解隐藏终端问题的同时还增加了节点自适应调度和空间复用的能力。文献[80]提出一种带有冲突通知的载波侦听多路访问(carrier sense multiple access with collision notification, CSMA/CN)技术, 在源节点数据帧的前导码与信头之间添加一段仅互相通信双方可知的专属签名序列, 出现冲突时目的节点会检测此签名序列并将其作为冲突通知立刻反馈给源节点, 源节点收到通知后中止发送。

2) ACK和RTS/CTS

文献[81]提出一种即时ACK的MAC协议方案, 源节点向目的节点发送数据包, 一旦数据包头部被正确接收, 目的节点便在接收数据包的同时立刻返回ACK消息, 错误接收时则立刻返回NACK消息并终止接收。该方法还使用即时NACK处理帧丢失, 所以在丢包率较高的情况下, 该方法性能衰落也相对较小。文献[82]基于IEEE802.11的RTS/CTS协议, 提出适用于IBFD无线通信的MAC协议。信道空闲时, 源节点向目的节点发送RTS, 目的节点一旦开始接收RTS便立刻返回CTS, 通信范围内的其他节点收到此RTS或CTS信号后保持沉默。建立连接后, 源节点传输期间为目的节点保留信道, 所以目的节点传输时不需要再次进行RTS/CTS信道预留。文献[66]基于3次握手机制提出一种RTS/FCTS(full-duplex CTS)访问机制, 同时支持IBFD无线通信双向链路和单向链路传输, 提高网络吞吐量的同时有效解决了隐藏终端问题。

3) 通信过程

文献[83]提出分布式访问全双工MAC协议, 针对IBFD通信特点对路径建立和数据传输通信过程

进行整体设计, 并建立有限状态离散时间马尔科夫模型对协议过程进行数学分析和验证。文献[84]认为IBFD具有冲突检测和冲突干扰等潜在性机制, 并基于这些机制提出应用于全双工正交频分多址无线网络的带有冲突检测的载波侦听多路访问协议(full-duplex CSMA with collision detection, FD-CSMA/CD), 描述了子信道随机访问时正常成功传输、冲突检测和冲突干扰等通信协议过程。

对于集中式、分布式和多跳IBFD无线网络与传统的HD无线网络不同, 已有的HD MAC协议不能完全适用于IFBD无线环境。主要存在的问题有:

1) 当集中式网络AP节点与两个client终端进行IBFD无线传输时, 若这两个client终端彼此为暴露终端, 则存在节点间干扰问题, 下行链路接收器将不能正确接收有用信号。而已有的HD MAC协议不能帮助解决节点间干扰等问题, 限制了网络性能的提升。因此需要研究集中式IBFD无线网络的MAC协议。文献[55]提出了一种应用于集中式IBFD无线网络的PoCMAC协议, 其在控制帧中添加信干燥比信息, 帮助通信节点进行功率控制, 在抑制节点间干扰的同时提高了网络吞吐量。

2) 传统HD MAC协议无法帮助网络节点识别通信节点的传输模式(HD传输或IBFD传输)。文献[85]对分布式IBFD无线网络传输模式进行了分类, 分别为HD模式、同步IBFD模式、基于目的节点的IBFD异步模式和基于源节点的IBFD异步模式, 并以此为基础进行IBFD MAC协议设计。

3) 将标准RTS/CTS应用于多跳IBFD无线网络, 需要使用多次信道接入完成链路建立, 增加了网络延时。文献[83]在其设计的DFD-MAC协议的控制帧中添加通信节点上一跳及下一跳节点的MAC地址, 在接入下一跳节点的同时回复上一跳节点的请求。该方法可通过一次信道接入完成多个节点之间的链路连接。

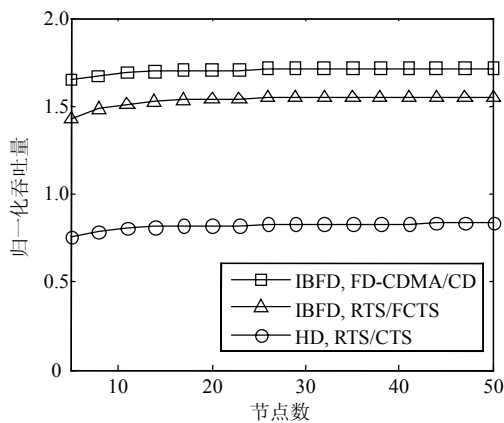
为突出IBFD MAC协议优越性, 结合上述分析, 对多篇文献进行归类对比, 如表2所示。

表2 IBFD无线通信MAC协议对比分析

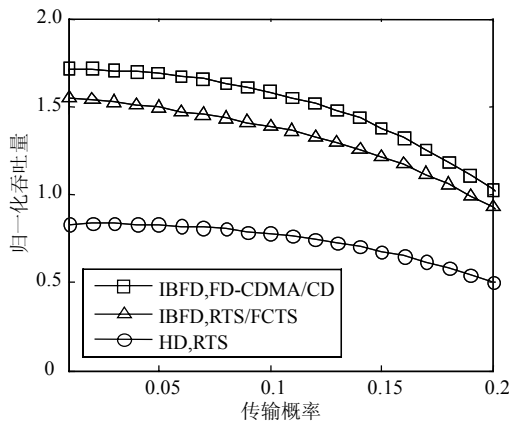
文献	协议命名	拓扑	竞争方式	性能分析	对比优势	仿真实现
[19]	FD-MAC	集中式	随机访问	吞吐量	随机退避, 头部探测和虚拟竞争	WARP
[20]	/	集中式	随机访问	吞吐量, 公平性, 包接收率	忙音	WARP
[80]	CSMA/CN	集中式	随机访问	吞吐量, 冲突检测精确度	冲突通知, 签名序列	USRP
[84]	FD-CDMA/CD	集中式	随机访问	吞吐量, 延时	冲突检测, 冲突干扰	Simulator
[86]	Janus	集中式	随机访问	吞吐量、公平性, 误包率	负载控制单元, 速率选择分配	WARP

(续表)

文献	协议命名	拓扑	竞争方式	性能分析	对比优势	仿真实现
[55]	PoCMAC	集中式	RTS/CTS	吞吐量、公平性	功率控制	WARP
[87]	/	集中式	CSMA/CA	吞吐量、FD增益	Markov建模	Simulator
[31]	ContrFlow	分布式	随机访问	吞吐量	忙音, 双链路访问控制	Simulator
[82]	FD-MAC	分布式	RTS/CTS	吞吐量, 能耗	CTS即时回复	Simulator
[44]	RTS/FCTS	分布式	RTS/CTS	吞吐量	双向/单向链路传输	Simulator
[85]	/	分布式	随机访问	吞吐量	FD ACK, 传输标记	OPNET
[83]	DFD-MAC	分布式/多跳	随机访问	吞吐量, 延时	转发路由请求	Simulator
[81]	/	分布式/多跳	随机访问	吞吐量	即时ACK	Simulator
[88]	RFD-MAC	多跳	随机访问	端到端吞吐量	1-bit信息标志位	Simulator



a. 节点数目与吞吐量关系图



b. 传输概率与吞吐量关系图(节点数为20)

图8 IBFD与半双工无线通信网络吞吐量对比分析

在IBFD MAC协议支持下, IBFD无线通信网络吞吐量与半双工无线通信相比最大可高出一倍。本文对文献[63]的FD-CDMA/CD、文献[66]的RTS/FCTS和HD的RTS/CTS 3种协议对网络性能的影响进行对比分析, 建立Markov模型, 并对网络节点数目与吞吐量以及节点传输概率与吞吐量的关系进行仿真, 如图8所示。由图8可明显看出, FD-CDMA/CD协议的IBFD网络吞吐量几乎是使用RTS/CTS协议的HD网络吞吐量的二倍, 使用

RTS/FCTS协议的IBFD网络吞吐量亦高出约86%。

4.2.2 MAC层调度机制

部分文献对IBFD无线通信的MAC层调度机制进行了整体规划。文献[19]提出, 为最大化网络吞吐量, IBFD无线通信的MAC层必须允许所有节点能够访问介质, 且IBFD节点需要同邻居节点之间共享队列信息, 并以此思想提出了IBFD无线通信MAC层的3个调度机制设计准则: 1) 共享随机退避: 正在通信的两个节点允许其他节点竞争媒体介质, 若没有节点能够成功获取介质, 则这两个节点继续IBFD无线通信; 2) 头部侦听: 即使网络分配向量 (network allocation vector, NAV) 为0, 节点也能够对所有正在传输的数据包头部进行解码, 进而估算本地拓扑结构并适时开启IBFD无线通信模式; 3) 虚拟竞争: AP查看缓冲区内数据包, 统筹决定优先发送的数据包次序, 并寻找更多使用IBFD无线通信的机会。测试结果表明, 文献[19]提出的MAC层调度机制可为IBFD无线通信带来高出半双工70%的吞吐量增益。之后基于文献[19], 文献[89]添加了第四个设计准则, 即: 4) RTS/CTS交换: 在RTS/CTS帧中添加能够被网络节点识别的IBFD传输模式标识, 使用媒体接入建立IBFD无线通信链路并告知邻居节点网络通信状态。

文献[6]充分利用RTS和CTS, 在标准802.11 DCF协议基础上添加了IBFD无线通信功能, 设计了IBFD节点之间数据交换的调度机制, 并对IBFD数据包发现和传输方式、ACK管理机制和串音节点行为进行设计, 将其内容与标准802.11协议进行对比和总结, 如表3所示。OPNET仿真结果表明, 文献[6]的IBFD无线通信MAC协议使得IBFD多节点单AP网络同基于DCF协议的传统半双工网络相比, 吞吐量提高了近一倍。

表3 IBFD无线通信MAC层调度机制^[6]与802.11标准对比

调度机制	通信状态	802.11 标准	IBFD MAC 协议	IBFD 优势
数据包发现	建立连接后目的节点侦听到源节点数据	目的节点按照传输缓冲区队列顺序依次发送(队列最前端不一定是源节点所需数据)	目的节点检查传输缓冲区队列, 优先并立刻向源节点发送所需数据	节约通信节点占用信道时间
数据包传输	发送数据的同时有数据包需要接收	判定碰撞并停止发送, 等待时机重新发送	不判定碰撞, 且在 NAV 持续时间内接收来自互通信节点的数据包	缓解隐藏终端问题
ACK 管理	等待 ACK	除非 ACK 接收超时, 否则不允许节点发送数据	允许节点发送数据(包括 ACK), 完成发送后返回等待 ACK 状态	缩短 ACK 确认时间
串音节点行为	接收到错误数据包	等待 EIFS 后重发, 等待时长大于网络中其他竞争节点(等待 DIFS 时长)	不检查错误数据包, 等待 DIFS 后重发, 等待时长与网络中其他竞争节点相同	增加公平性

注: DIFS: DCF inter frame space, 标准帧间间隔; EIFS: extended inter frame space, 扩展帧间间隔, EIFS时长大于DIFS时长。

4.3 其他相关研究

IBFD无线通信允许在一定范围内更多的数据并行传输, 在提高无线网络吞吐量方面具有很大潜力。可以灵活地组建一个部分甚至所有节点支持IBFD的无线网络, 由此对现有的网络拓扑、路由结构等提出新的挑战。

目前, IBFD无线通信关于网络高层的研究内容相对较少。以网络层研究为例, IBFD无线通信的路由算法无需避免交叉路由, 从而缩短了路由数据报长度并减小全局干扰。文献[90-91]提出IBFD无线通信中使用路由算法处理双向数据流, 并充分利用网络编码技术, 也能够进一步提高吞吐量。文献[92]为其提出的D-FDW网络设计了一种按需绕行路由协议, 减少通信数据流中交叉点的数量, 消除了隐藏终端的影响, 使多跳网络端到端吞吐量提高了86.4%。

5 IBFD无线通信研究应用

目前, IBFD无线通信在国际上已成为研究热点。随着PHY层自干扰消除技术和MAC层协议及调度机制的研究逐渐深入, IBFD在无线通信领域的应用越来越广泛。IBFD与半双工、MIMO技术的结合, 以及其在5G、认知无线网络(cognitive radio networks, CRN)中的应用也是今后的研究重点。

1) IBFD与半双工技术

目前且在今后的几年, 主导无线通信仍是半双工技术, 研究人员需要考虑全双工与半双工的兼容与结合问题。文献[11]提出的虚拟全双工允许节点在物理层同时进行半双工和全双工无线通信, 并显著简化高层网络协议栈的设计, 实现更高的频谱效率。

文献[12]提出的分布式全双工在一个全双工设备节点与两个半双工移动节点之间的三节点网络通信模型中, 允许同一频段上行链路和下行链路的同时传输, 提高网络吞吐量。文献[59]提出一种在IBFD和半双工中继模式间适时切换的混合技术, 通过适时切换选择与传输功率自适应相结合的方式最大化瞬时平均频谱效率, 显著提高了系统的性能增益。

2) IBFD与MIMO技术

文献[93]将MIMO和全双工结合, 提出MIDU(MIMO full Duplex)的概念, 使用了发送天线和接收天线位置对称的天线消除技术和射频消除技术。WARP平台验证结果显示, MIDU能够做到两阶消除且自干扰消除量可达到45 dB, 提供至少20%的平均速率增益。文献[94]提出收发节点端口设置多天线时能够在增加半双工MIMO链路容量的同时为系统带来全双工的容量。分别模拟了点对点和对多点的IBFD MIMO无线通信过程, 测试结果表明, IBFD节点RF链路数量一定时, 在收发节点处放置额外的天线可以获得更高容量增益, 但此方法会使系统吞吐量有所下降。

3) IBFD在5G中的应用

5G的研究工作已经展开, 其中一个主要技术指标是峰值传输速率增长至4G的100倍^[95], 考虑到IBFD无线通信频谱利用率高的特点, IBFD技术已成为5G技术的重要候选方案。Stanford大学Sachin教授认为IBFD自干扰消除技术的研究成果能够有效应用于5G研究中, 指出目前琐碎分散的频谱资源对未来5G的发展非常不利, IBFD自干扰消除技术具有增加链路容量和虚拟化光谱等功能, 支持多种双工通信, 在实现和支撑5G技术向密集异构网络的演进方

向存在可能性^[17]。

4) IBFD在CRN中的应用

CRN可有效解决固定频谱分配带来的频谱利用率低问题,但次用户何时可以使用频谱引发的动态频谱访问问题成为其发展的主要阻碍之一^[96]。文献[16]将IBFD同CRN结合,使次用户在传输的同时还能够检测主用户的动态,一旦检测到主用户的存在,次用户会立刻释放频谱以避免同主用户之间产生干扰。非理想IBFD CRN仿真结果表明,高信噪比时尽管很多因素会破坏IBFD的理想状态,但主用户丢包率仍然比半双工CRN低得多。

6 结束语

IBFD无线通信同一频段同时发送和接收的优势突破了传统双工无线网络设计的束缚,理论上最大可成倍提高频谱利用率,为频谱资源的有效利用提供了新的思路和方法,同时也对无线网络的设计和管理提出了挑战。本文针对IBFD无线通信,从主要技术难题、研究现状、通信模型和研究技术等方面做了详细归纳和描述,并着重分析了自干扰消除方法、MAC层协议及调度机制等研究内容。综合IBFD无线通信研究现状与挑战,对今后IBFD无线通信的研究与发展趋势展望如下:

1) 优化IBFD无线通信的自干扰消除方法。构建无线自干扰传播信道模型,研究与自干扰消除相关的信道估算方法和信号处理技术;研究高效协同天线消除、模拟消除和数字消除三者的方法,改善影响自干扰消除的元器件,提高自干扰消除性能,进而优化IBFD整体硬件电路。

2) 研究适合IBFD无线通信的信号处理和通信调度机制。传统的无线通信机制已经不再完全适合IBFD,以硬件电路实现为基础,可以针对IBFD同一频段同时收发特性进行网络通信机制的设计。在发送和接收信号处理等方面可以考虑调制解调方式、信道代码、信号处理方式的设计;在无线通信调度等方面可以考虑资源管理、MAC层及高层协议、调度机制和跨层优化的设计。

3) 分析IBFD无线通信系统容量和性能。目前IBFD研究主要集中于技术实现和改进,关于系统可获得的容量和性能增益的研究尚属空白。IBFD无线通信的深入研究还需要对系统拓扑结构进行设计,对实际IBFD系统的信道容量、网络吞吐量等性能参数也需要做进一步分析。

4) 研究IBFD无线通信系统级问题。可以考虑将

IBFD设备应于CRN、D2D(device-to-device)、M2M(machine-to-machine)和HetNet(heterogeneous networks)等网路的构建,例如虚拟全双工和分布式全双工等IBFD与半双工结合的无线通信系统,对未来实际系统中IBFD节点的增加和替换提供有效的研究思路。

5) 解决IBFD无线通信工程性问题。当前用于IBFD研究的实验平台主要有Rice大学的WARP平台和Ettus Research公司的USRP(universal software radio peripheral)平台,系统较为复杂且体积较大。随着IBFD无线通信技术研究的日益深入,将其实际应用于手机等小型移动通信设备,还需要解决硬件电路复杂度和尺寸等工程性问题。

参 考 文 献

- [1] HERRANZ C, OSA V, MONSERRAT J F. Cognitive radio enabling opportunistic spectrum access in LTE-Advanced femtocells[C]//2012 IEEE ICC. Ottawa: IEEE, 2012: 5593-5597.
- [2] DUARTE M, SABHARWAL A. Full-duplex wireless communications using off-the-shelf radios: Feasibility and first results[C]//Proc of ASILOMAR. Pacific Grove, CA: IEEE, 2010: 1558-1562.
- [3] LI Q, WU G, HU Q Y. Analytical study on network spectrum efficiency of ultra dense networks[C]//2013 IEEE 24th International Symposium on PIMRC. London: IEEE, 2013: 2764-2768.
- [4] WANG X, KUANG K, WANG S. Dynamic routing and spectrum allocation in elastic optical networks with mixed line rates[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2014, 6(12): 1115-1127.
- [5] SABHARWAL A, SCHNITER P, GUO D N. In-band full-duplex Wireless: challenges and opportunities[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 32(9): 1637-1652.
- [6] DUARTE M, SABHARWAL A, AGGARWAL V, et al. Design and characterization of a full-duplex multi-antenna system for WiFi networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 63(3): 1160-1177.
- [7] ZHANG L, LUO J, GUO D N. Neighbor discovery for wireless networks via compressed sensing[EB/OL]. [2015-01-21]. <http://arxiv.org/abs/1012.1007>, Performance Evaluation, 2013, 70(7-8): 457-471.
- [8] RADUNOVIC B, GUNAWARDENA D, KEY P, et al. Rethinking indoor wireless: Low power, low frequency, full duplex[R]. Beijing: Microsoft Research, 2009.
- [9] CHOI J I, JAIN M, SRINIVASAN K, et al. Achieving single channel, full duplex wireless communication[C]//Proc of ACM MobiCom. Chicago, USA: ACM, 2010: 1-12.
- [10] RIIHONEN T, WERNER S, WICHMAN R, et al. On the feasibility of full-duplex relaying in the presence of loop interference[C]//Proc of IEEE 14th Workshop on SPAWC'09. Perugia: IEEE, 2009: 275-279.

- [11] GUO D N, ZHANG L. Virtual full-duplex wireless communications via rapid on-off-division duplex[J]. *Mathematics*, 2010: 412-419.
- [12] BAI J, SABHARWAL A. Distributed full-duplex via wireless side-channels: bounds and protocols[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(8): 4162-4173.
- [13] CADAMBE V, JAFAR S. Can feedback, cooperation, relays and full duplex operation increase the degrees of freedom of wireless networks?[C]//Proc of IEEE ISIT. Toronto: IEEE, 2008: 1263-1267.
- [14] VAZE C S, VARANASI M K. The degrees of freedom of MIMO networks with full-duplex receiver cooperation but no CSIT[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2014, 60(9): 5587-5596.
- [15] SAHAI A, DIGGAVI S, SABHARWAL A. On degrees of freedom of full-duplex uplink/downlink channel[C]//2013 IEEE ITW. Sevilla: IEEE, 2013: 1-5.
- [16] CHENG W, ZHANG X, ZHANG H. Full duplex wireless communications for cognitive radio networks[EB/OL]. [2015-01-21]. <http://arxiv.org/abs/1105.0034v1>.
- [17] HONG S, BRAND J, CHOI J I, et al. Applications of self-interference cancellation in 5G and beyond[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(2): 114-121.
- [18] SCHACHERBAUER W, SPRINGER A, OSTERTAG T, et al. A flexible multiband frontend for software radios using high IF and active interference cancellation[C]//IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Phoenix, USA: IEEE, 2001, 2: 1085-1088.
- [19] SAHAI A, PATEL G, SABHARWAL A. Pushing the limits of full-duplex: Design and real-time implementation [EB/OL]. [2015-01-21]. <http://arxiv.org/abs/1107.0607v1>.
- [20] JAIN M, CHOI J I, KIM T. Practical, real-time, full duplex wireless[C]//Proc of ACM MobiCom. Las Vegas, USA: ACM, 2011: 301-312.
- [21] DUARTE M. Full-duplex wireless: design, implementation and characterization[D]. Texas, USA: Rice University, 2012.
- [22] 杜武林. 干扰抵消技术的原理和应用[J]. *电信科学*, 1988(5): 51-55.
DU Wu-lin. Theory and application of interference cancellation technology[J]. *Telecommunications Science*, 1988(5): 51-55.
- [23] PURSULA P, KIVIRANTA M, SEPPA H. UHF RFID reader with reflected power canceller[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2009, 19(1): 48-50.
- [24] LIN K, MESSERIAN R, WANG Y. A digital leakage cancellation scheme for monostatic FMCW radar[J]. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2004, 2: 747-750.
- [25] ANDERSON C, KRISHNAMOORTHY S, RANSON C, et al. Antenna isolation, wideband multipath propagation measurements, and interference mitigation for on-frequency repeaters[C]//Proc of IEEE Southeast Con. Greensboro, USA: IEEE, 2004: 110-114.
- [26] Rice University. WARP Project[EB/OL]. [2015-01-25]: <http://warpproject.org/trac/>.
- [27] DUARTE M, DICK C, SABHARWAL A. Experiment-driven characterization of full-duplex wireless systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(12): 4296-4307.
- [28] RIIHONEN T, WICHMAN R. Analog and digital self-interference cancellation in full-duplex MIMO-OFDM transceivers with limited resolution in A/D conversion[C]//Proc of ASILOMAR. Pacific Grove, CA: IEEE, 2012: 45-49.
- [29] SAHAI A, PATEL G, DICK C, et al. On the impact of phase noise on active cancellation in wireless full-duplex[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(9): 4494-4510.
- [30] ANTTILA L, KORPI D, SYRJALA V. Cancellation of power amplifier induced nonlinear self-interference in full-duplex transceivers[C]//Proc of ASILOMAR. Pacific Grove, CA: IEEE, 2013: 1193-1198.
- [31] SINGH N, GUNAWARDENA D, PROUTIERE A, et al. Efficient and fair MAC for wireless networks with self interference cancellation[C]//Proc of WiOpt. Princeton, NJ: IEEE, 2011: 94-101.
- [32] RAMIREZ D, AAZHANG B. Optimal routing and power allocation for wireless networks with imperfect full-duplex nodes[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(9): 4692-4704.
- [33] ZHANG L, GUO D N. Neighbor discovery in wireless networks using compressed sensing with reed-muller codes[C]//Proc of WiOpt. Princeton, NJ: IEEE, 2011: 154-160.
- [34] BHARADIA D, MCMILIN E, KATTI S. Full duplex radios[C]//Proc of ACM SIGCOMM. Hong Kong, China: ACM, 2013.
- [35] ZHANG L, GUO D N. Virtual full duplex wireless broadcasting via compressed sensing[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2010, 22(5): 1659-1671.
- [36] KORPI D, VENKATASUBRAMANIAN S, RIIHONEN T, et al. Advanced self-interference cancellation and multi-antenna techniques for full-duplex radios[C]//Proc of ASILOMAR. Pacific Grove, CA: IEEE, 2013: 3-8.
- [37] RADUNOVIC B, GUNAWARDENA D, PROUTIERE A, et al. Efficiency and fairness in distributed wireless networks through self-interference cancellation and scheduling[EB/OL]. [2015-03-21]. <http://131.107.64.14/pubs/79933/MSR-TR-2009-27>.
- [38] JU H, OH E, HONG D. Improving efficiency of resource usage in two-hop full duplex relay systems based on resource sharing and interference cancellation[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(8): 3933-3938.
- [39] JU H, CHANG K, LEE M S. In-band full-duplex wireless powered communication networks[C]//17th International Conference on Advanced Communication Technology. Seoul: GIRI, 2015: 23-27.
- [40] 张志亮, 罗龙, 邵士海, 等. ADC量化对同频全双工数字自干扰消除的误码率性能分析[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(6): 1331-1337.
ZHANG Zhi-liang, LUO Long, SHAO Shi-hai, et al. Analysis of ADC quantizing affection on SER performance of self-interference canceling common-frequency full-duplex system[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2013, 35(6): 1331-1337.
- [41] 吴翔宇, 沈莹, 唐友喜. 屏蔽室收发天线分离全双工自干扰信道测量与建模[J]. *电子科技大学学报*, 2016,

- 45(3): 344-349.
- WU Xiang-yu, SHEN Ying, TANG You-xi. Measurement and modeling of co-time co-frequency full-duplex self-interference channel with separate TX and RX antennas in shielded room environment[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2016, 45(3): 344-349.
- [42] ZHOU M, SONG L, LI Y. Joint transmit and receive antennas selection for full duplex MIMO systems[C]//IEEE Global Communications Conference. Austin, TX: IEEE, 2014: 3838-3843.
- [43] ZHOU M, SONG L, LI Y, et al. Simultaneous bidirectional link selection in full duplex MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(7): 4052-4062.
- [44] CHENG W, ZHANG X, ZHANG H. RTS/FCTS mechanism based full-duplex MAC protocol for wireless networks[C]//Proc of 2013 IEEE GLOBECOM. Atlanta, GA: IEEE, 2013: 5017-5022.
- [45] ZHANG X, CHENG W, ZHANG H. Full-duplex transmission in phy and mac layers for 5G mobile wireless networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2015, 22(5): 112-121.
- [46] ZHONG B, ZHANG D, ZHANG Z, et al. Opportunistic full-duplex relay selection for decode-and-forward cooperative networks over Rayleigh fading channels[C]//2014 IEEE International Conference on Communications. Sydney, NSW: IEEE, 2014: 5717-5722.
- [47] ZHANG Z, CHAI X, LONG K, et al. Full duplex techniques for 5 G networks: Self-interference cancellation, protocol design, and relay selection[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(5): 128-137.
- [48] LIU G, YU F R, JI H, et al. In-band full-duplex relaying: a survey, research issues and challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(2): 500-524.
- [49] LIU G, YU F R, JI H, et al. Energy-efficient resource allocation in cellular networks with shared full-duplex relaying[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(8): 3711-3724.
- [50] IMT-2020 (5G)推进组. 5G无线技术架构白皮书[EB/OL]. [2015-05-28]. <http://www.imt-2020.org.cn/> IMT-2020 (5G) Promotion Group. White paper on 5G wireless technology architecture[EB/OL]. [2015-05-28]. <http://www.imt-2020.org.cn/>
- [51] EVERETT E, DUARTE M, DICK C, et al. Empowering full-duplex wireless communication by exploiting directional diversity[C]//Proc of ASILOMAR. Pacific Grove, CA: IEEE, 2011: 2002-2006.
- [52] AHMED E, ELTAWIL A, SABHARWAL A. Self-interference cancellation with nonlinear distortion suppression for full-duplex systems[C]//Proc of ASILOMAR. Pacific Grove, CA: IEEE, 2013: 1199-1203.
- [53] EVERETT E, SAHAI A, SABHARWAL A. Passive self-interference suppression for full-duplex infrastructure nodes[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(2): 680-694.
- [54] EVERETT E, SABHARWAL A. A signal-space analysis of spatial self-interference isolation for full-duplex wireless[C]//Proc of IEEE ISIT. Honolulu, HI: IEEE, 2014: 661-665.
- [55] 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.
- [56] BHARADIA D, KATTI S. Full duplex MIMO radios[C]//Proc of the 11th USENIX Symposium on NSDI'14. Seattle, WA, USA: USENIX Association, 2014: 359-372.
- [57] GUDIPATI A, PEREIRA S, KATTI S. AutoMAC: Rateless wireless concurrent medium access[C]//Proc of ACM MobiCom. Istanbul, Turkey: ACM, 2012: 5-16.
- [58] BHARADIA D, KATTI S. FastForward: Fast and constructive full duplex relays[C]//Proc of ACM SIGCOMM. Chicago: ACM, 2014: 199-210.
- [59] RIIHONEN T, WERNER S, WICHMAN R. Hybrid full-duplex half-duplex relaying with transmit power adaptation[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(9): 3074-3085.
- [60] RIIHONEN T, WERNER S, WICHMAN R. Mitigation of loopback self-interference in full-duplex MIMO relays[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(12): 5983-5993.
- [61] RIIHONEN T, MATHECKEN P, WICHMAN R. Effect of oscillator phase noise and processing delay in full-duplex OFDM repeaters[C]//Proc of ASILOMAR. Pacific Grove, CA: IEEE, 2012: 1947-1951.
- [62] SYRJALA V, VALKAMA M, ANTTILA L, et al. Analysis of oscillator phase-noise effects on self-interference cancellation in full-duplex OFDM radio transceivers[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(6): 2977-2990.
- [63] KORPI D, ANTTILA L, SYRJALA V, et al. Widely-linear digital self-interference cancellation in direct-conversion full-duplex transceiver[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, 32(9): 1674-1687.
- [64] 徐强, 全欣, 潘文生, 等. 同时同频全双工LTE射频自干扰抑制能力分析及其实验验证[J]. *电子与信息学报*, 2014(3): 662-668.
- XU Qiang, QUAN Xin, PAN Wen-sheng, et al. Analysis and experimental verification of RF self-interference cancellation for co-time co-frequency full-duplex LTE[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2014(3): 662-668.
- [65] 何昭君, 沈莹, 邵士海, 等. 多径瑞利衰落信道条件下射频干扰抵消误差对CCFD系统中OFDM性能的影响[J]. *电子与信息学报*, 2014(2): 358-363.
- HE Zhao-jun, SHEN Ying, SHAO Shi-hai, et al. Impact of RF self-interference cancellation errors on OFDM based on CCFD system in multipath Rayleigh fading channel[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2014(2): 358-363.
- [66] 吴翔宇, 沈莹, 唐友喜. 室内环境下2.6 GHz同时同频全双工自干扰信道测量与建模[J]. *电子学报*, 2015, 43(1): 1-6.
- WU Xiang-yu, SHEN Ying, TANG You-xi. Measurement and modeling of co-time co-frequency full-duplex self-interference channel of the indoor environment at 2.6 GHz[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2015, 43(1): 1-6.
- [67] XU Q, QUAN X, ZHANG Z, et al. Analysis and

- experimental verification of digital self-interference cancellation for co-time co-frequency full-duplex LTE[J]. *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, 2014, 7(1): 299-312.
- [68] 王俊, 赵宏志, 卿朝进, 等. 同时同频全双工场景中的射频频域自适应干扰抵消[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(6): 1435-1440.
- WANG Jun, ZHAO Hong-zhi, QING Chao-jin, et al. Adaptive self-interference cancellation at RF domain in co-frequency co-time full duplex systems[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2014, 36(6): 1435-1440.
- [69] SHAO S, LIU D, DENG K, et al. Analysis of carrier utilization in full-duplex cellular networks by dividing the co-channel interference region[J]. *IEEE Communications Letters*, 2014, 18(6): 1043-1046.
- [70] ALEXANDRIS K, BELANOVIC P, BURG A, et al. On self-interference suppression methods for low-complexity full-duplex MIMO[C]//Proc of ASILOMAR. Pacific Grove, CA: IEEE, 2013: 992-997.
- [71] KHOJASTEPOUR M A, SUNDARESAN K, RANGARAJAN S, et al. The case for antenna cancellation for scalable full-duplex wireless communications[C]//Proc of ACM Workshop on HotNets. Cambridge, MA: ACM, 2011.
- [72] ANTONIO-RODRIGUEZ E, LOPEZ-VALCARCE R, RIIHONEN T, et al. Adaptive self-interference cancellation in wideband full-duplex decode-and-forward MIMO relays[C]//Proc of IEEE 14th Workshop on SPAWC'13. Darmstadt: IEEE, 2013: 370-374.
- [73] ASHARIF F, TAMAKI S, ALSHARIF M R, et al. Application of full-duplex wireless communication system on echo cancellation[C]//2013 IEEE WCNC. Shanghai, China: IEEE, 2013: 3626-3631.
- [74] KIM J, SHAMAILEH K, ADUSUMILLI S, et al. Digital interference cancellation for multimedia transmission in full duplex communication link[C]//2013 IEEE International Symposium on BMSB. London: IEEE, 2013: 1-5.
- [75] ZHUO Y Q, GE M, JI S Z. Echo cancellation research of channel estimation based on PN sequence[C]//Proc of 6th IFOST. Harbin, China: IEEE, 2011: 871-875.
- [76] ZHAN Z W, VILLEMAUD G, GORCE J M. Analysis and reduction of the impact of thermal noise on the full-duplex OFDM radio[C]//IEEE Radio Wireless Symposium. Newport Beach, CA: IEEE, 2014: 220-222.
- [77] DAY B P, MARGETTS A R, BLISS D W, et al. Full-duplex MIMO relaying: achievable rates under limited dynamic range[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2012, 30: 1541-1553.
- [78] DAY B P, MARGETTS A R, BLISS D W, et al. Full-duplex bidirectional MIMO: Achievable rates under limited dynamic range[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, 60: 3702-3713.
- [79] LI S, MURCH R D. Full-duplex wireless communication using transmitter output based echo cancellation[C]//Proc of GLOBECOM. Houston, USA: IEEE, 2011: 1-5.
- [80] SEN S, CHOUDHURY R R, NELAKUDITI S. CSMA/CN: Carrier sense multiple access with collision notification [C]//Proc of ACM MobiCom. Chicago, USA: ACM, 2010: 25-36.
- [81] CHOI W, LIM H. Immediate acknowledgement for single-channel full-duplex wireless networks[C]//Proc of IEEE 9th International Conference on MASS. Las Vegas, NV: IEEE, 2012: 477-478.
- [82] KIM S, STARK W E. On the performance of full duplex wireless networks[C]//Proc of 47th CISS. Baltimore, MD: IEEE, 2013: 1-6.
- [83] ASKARI E, AISSA S. Single-band full-duplex MAC protocol for distributed access networks[J]. *IET Communication*, 2014, 8(10): 1663-1673.
- [84] WANG X D, TANG A M, HUANG P F. Full duplex random access for multi-user OFDMA communication systems[J]. *Ad Hoc Networks*, 2015, 24(A): 200-213.
- [85] GOYAL S, LIU P, GURBUZ O, et al. A distributed MAC protocol for full duplex radio[C]//Proc of ASILOMAR. Pacific Grove, CA: [s.n.], 2013: 788-792.
- [86] KIM J Y, MASHAYEKHI O, QU H, et al. Janus: a novel MAC protocol for full duplex radio[EB/OL]. [2015-01-25]. <http://hci.stanford.edu/cstr/reports/2013-02>.
- [87] DOOSTMOHAMMADY R, NADERI Y, CHOWDHURY K. Performance analysis of CSMA/CA based medium access in full duplex wireless communications[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2015, 15(6): 1457-1470.
- [88] TAMAKI K, ARI R H, SUGIYAMA Y, et al. Full duplex media access control for wireless multi-hop networks[C]//IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Dresden: IEEE, 2013: 1-5.
- [89] 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.
- [90] FRAGOULI C, BOUDEC J Y L, WIDMER J. Network coding: an instant primer[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2006, 36: 63-68.
- [91] KATTI S, RAHUL H, HU W, et al. XORs in the air: Practical wireless network coding[J]. *IEEE Transactions on Networking*, 2008, 16(3): 243-254.
- [92] KATO K, BANDAI M. Routing protocol for directional full-duplex wireless[C]//IEEE 24th International Symposium on PIMRC. London: IEEE, 2013: 3239-3243.
- [93] ARYAFAR E, KHOJASTEPOUR M A, SUNDARESAN K, et al. MIDU: Enabling MIMO full duplex[C]//Proc of ACM Mobicom. Istanbul, Turkey: ACM, 2012: 257-268.
- [94] BARGHI S, KHOJASTEPOUR A, SUNDARESAN K. Characterizing the throughput gain of single cell MIMO wireless systems with full duplex radios[C]//Proc of WiOpt. Paderborn, Germany: IEEE, 2012: 68-74.
- [95] RAPPAPORT T S, SHU S, MAYZUS R, et al. Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work![J]. *IEEE Access*, 2013, 1: 335-349.
- [96] TAN L T, LE L B. Distributed MAC protocol for cognitive radio networks: Design, analysis, and optimization[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(8): 3990-4003.