



评述

全双工通信关键技术研究

张丹丹^①, 王兴^①, 张中山^{①②*}

^① 北京科技大学融合网络与泛在业务工程技术研究中心, 北京 100083

^② 东南大学移动通信国家重点实验室, 南京 210096

* 通信作者. E-mail: zhangzs@ustb.edu.cn

收稿日期: 2014-04-04; 接受日期: 2014-05-20

国家自然科学基金 (批准号: 61172050)、新世纪优秀人才计划 (批准号: NECT-12-0774) 和东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金 (课题编号: 2013D12) 资助项目

摘要 传统的半双工 (half-duplex, HD) 无线系统利用正交的时隙进行信号的发送和接收, 造成无线频谱资源的极大浪费. 而全双工 (full-duplex, FD) 通信技术以其链路容量倍增及其潜在的频谱资源利用率提升能力得到学术界和工业界的广泛关注. 本文首先将全双工与半双工的模式性能进行比较, 详细列举了现有全双工技术的优缺点. 作为全双工系统的核心难题, 自干扰 (self-interference, SI) 消除技术可以采用两类主要技术加以实现: 被动自干扰抑制和主动自干扰消除. 本文对相应技术的优缺点进行了比较. 此外, 针对复杂时变的无线频谱环境以及动态变化的无线网络结构, 本文讨论了全双工媒体接入控制层 (medium access control, MAC) 协议的设计. 本文还进一步论述了实际系统环境下的全双工算法设计与实现, 包括中继网络编码、中继选择以及动态资源分配等. 最后, 本文对全双工通信未来研究方向进行了探讨, 并总结全文.

关键词 无线网络 全双工 自干扰消除 关键技术 未来研究方向

1 引言

当前无线通信系统通常采用半双工 (half-duplex, HD) 模式. 由于半双工模式不能在同一频率上实现无线信号的同时收发, 导致无线频谱资源的极大浪费^[1]. 尽管一些半双工增强技术 (如: 连续解码^[2]、缓存辅助中继^[2]等) 被相继提出, 半双工模式本身所导致的信道容量减半因素始终不能彻底消除. 全双工 (full-duplex, FD) 通信技术从根本上避免了半双工通信中由于信号发送/接收之间的正交性所造成的频谱资源浪费, 从而可能实现通信系统信道容量的倍增. 相对于半双工通信而言, 全双工通信具有显著的性能优势, 包括: (1) 数据吞吐量增益; (2) 无线接入冲突避免能力; (3) 有效解决隐藏终端问题; (4) 降低拥塞; (5) 降低端到端延迟; (6) 提高认知无线电环境下的主用户检测性能等.

由于全双工通信在提高频谱资源利用率以及用户数据吞吐量方面具有的巨大潜力, 国际上多个研究机构 (包括: 美国莱斯大学^[1]、美国斯坦福大学^[3]、韩国信息技术研究中心-ITRC^[4]、赛灵思公司等) 已经开始了相关研究与探索. 此外, 我国的多家研究机构如北京大学^[5]、电子科技大学^[6]、北京科技大学^[7]、北京邮电大学^[8]、中国移动、华为、中兴、工信部电信研究院等也对该领域的基础理论与关键技术进行了研究.

表 1 全双工与半双工技术指标对比

Table 1 Performance comparison between half-duplex and full-duplex schemes

Technical content	Half-duplex	Full-duplex
Spectral efficiency	Low	Nearly double compared to HD
Collision avoidance	Requires carrier sensing	Does not require carrier sensing
Hidden terminal problem	Not well addressed	Solved
Congestion	Higher	Lower due to FD MAC scheduling
End-to-end delay	Higher	Lower
Primary receiver detection	Unreliable	Reliable
Suitable SNR region	High-SNR region	Low-to-medium SNR region
Queue size requirement	Smaller	Larger
Outage probability	Lower with high SNR	Lower with low-to-medium SNR
BER	Lower with high SNR	Lower with low-to-medium SNR
PLR	Lower	Higher
DoF	Lower	Higher
Link reliability	Higher	Lower

国内外研究结果表明, 实现全双工通信必须有效地解决以下几个核心问题: (1) 高性能自干扰消除; (2) 全双工设备最优运行环境建立与信道容量优化; (3) 全双工 MAC 层/高层协议设计. 尽管学术界和工业界已经就上述关键问题开展了多项研究, 目前无线全双工通信基础理论与关键技术的发展仍然处于起始阶段, 还有许多关键问题亟需解决, 包括: (1) 低复杂度软/硬件全双工系统设计与实现; (2) 模拟自干扰 (self-interference, SI) 消除算法与数字自干扰算法之间的相互依存性; (3) 移动终端设备尺寸的限制; (4) 全双工模式在实际应用场景下的有效性; (5) 全双工 (medium access control, MAC) 协议设计面临的新挑战; (6) 认知无线电环境下的全双工协作通信面临的新挑战.

本文第 2 节将全双工模式与半双工模式性能简要地进行对比; 第 3 节从自干扰消除、全双工 MAC 层协议设计以及实际系统环境下的全双工算法设计与实现 3 个部分对全双工通信中的关键技术进行介绍; 第 4 节探讨全双工未来的研究方向; 最后总结全文.

2 全双工与半双工模式性能对比

为了有效地发掘全双工技术的潜力、充分发挥全双工模式的技术优势, 学术界以及工业界对全双工技术的关键技术指标, 包括: 信道容量、中断概率、误比特率、分集复用增益, 等等, 进行了系统的分析, 并与半双工模式进行了性能比较^[9~17]. 全双工模式与半双工模式技术指标对比如表 1 所示. 相关研究表明, 全双工模式性能增益的获得不仅取决于自干扰信号强度, 而且受其他多种现实因素的影响. 尽管全双工模式在理论上可以实现比半双工模式高出一倍的信道容量, 然而这一性能增益的获得取决于理想的自干扰消除^[9]. 当自干扰功率较大时, 半双工模式的性能往往超过全双工模式. 更重要的是, 半双工模式具有比全双工模式更低的硬件复杂度.

(1) 全双工与半双工信道容量对比: 尽管自干扰信号严重影响着全双工模式性能增益的获得, 然而现有的全双工系统能够容忍一定程度的自干扰功率, 在此范围内仍然能够获得比半双工模式更高的

信道容量^[9]. 现有研究表明, 在放大转发 (amplify-forward, AF) 中继转发模式下, 全双工模式在任何信噪比环境下都可以取得较之半双工模式的性能增益, 前提条件是抑制后的自干扰信号功率必须低于背景加性白高斯噪声功率. 然而, 当源节点到中继节点间的信道信噪比非常小的情况下, 中继节点的信干比 (signal to interference ratio, SIR) 将主要受限于自干扰功率的大小, 在此情况下, 半双工模式的信道容量将高于全双工模式. 在解码转发 (decode-and-forward, DF) 中继转发模式下, 现有研究对单入单出 (single input single output, SISO)^[10] 与多入多出 (multiple input multiple output, MIMO)^[11] 两种中继节点性能均进行了深入分析. 在实际系统环境下, 相关研究结果显示: 中继节点缓存容量将严重影响全双工中继系统的性能. 考虑到中继节点使用有限容量的缓存, 全双工 DF 中继模式在低信噪比环境下能够取得相对于半双工模式更大的性能优势, 但在高信噪比的环境下其性能将低于半双工模式. 此外, 由于自干扰信号制约着全双工中继节点缓存长度以及数据包的发送速率, 因此全双工节点的丢包率明显高于半双工节点. 然而, 最新研究结果表明^[11], 如果全双工中继节点的缓存空间设置得足够大, 全双工模式即便在高信噪比环境下也能够获得比半双工模式更高的信道容量.

(2) 全双工与半双工中断概率对比: 在全双工模式下, 频谱资源利用率与网络节点对自干扰信号强度的容忍度之间形成了一对矛盾. 为了优化全双工系统性能, 必须有效地解决上述矛盾. 当前很多研究侧重于对全双工系统中断概率进行优化. 在 AF 中继转发模式下^[12], 当考虑非理想的信道反馈信息时, 全双工模式仍然能够获得比半双工模式更好的中断概率性能, 前提条件是中继节点必须借助于传统的自干扰消除算法 (如: 最小均方差算法 — minimum mean square error, MMSE) 将自干扰信号强度控制在可容忍界限内. 由于全双工中继节点对噪声的放大效应比半双工节点更为严重, 因此, 在高信噪比环境下, 半双工中继始终能够获得比全双工中继更好的中断概率性能. 在 DF 中继转发模式下, 当多个全双工 DF 中继节点串联起来构成一个多跳链路时, 最优的中继节点跳数可以通过对多跳链路的中断概率性能进行优化来实现^[13]. 研究表明, 在 Nakagami-m 信道下^[14], 全双工 DF 中继在低信噪比的环境下可以获得相对于半双工 DF 中继的性能增益, 并且其中断概率将随着中继节点跳数的增加而降低.

(3) 全双工与半双工误码率 (bit error rate, BER) 性能对比: 全双工通信系统的 BER 性能已经得到广泛研究. 例如, 文献 [15] 对全双工 MIMO 中继系统的 BER 性能进行了研究, 并采用波束赋形技术对信噪比进行有效提升. 在 AF 中继转发模式下, 文献 [16] 对全双工与半双工模式 BER 性能进行了研究比较, 并借助于 MMSE 算法对源节点 — 目的节点波束赋型向量进行了优化. 当考虑理想信道估计的情况, 还可以采用自干扰消除技术对全双工节点性能进行进一步优化. 研究表明, 全双工模式在低信噪比的环境下能够获得比半双工模式更低的 BER, 但在高信噪比的环境下其性能优势将逐渐消失. 在 DF 中继转发模式下, 考虑到二进制相移键控 (binary phase shift keying, BPSK) 调制, 文献 [17] 对全双工与半双工中继 BER 性能进行了对比. 研究表明, 和 AF 中继转发模式不同, 在 DF 模式下, 即使将大部分自干扰信号成功消除, 全双工模式的 BER 性能始终劣于半双工模式.

3 全双工通信若干关键技术

3.1 自干扰消除

3.1.1 自干扰信道测量

自干扰消除是全双工通信的核心问题. 在全双工模式下, 现有研究表明, 如果自干扰信号的强度能够得到成功抑制, 使得剩余自干扰强度比背景噪声功率低 3 dB 以上, 则剩余自干扰信号不会

对系统端到端吞吐量造成显著影响^[9].

在本节中, 我们主要介绍当前学术界和工业界对自干扰信道测量方面的研究进展, 自干扰消除技术将在 3.1.2 小节进行详细介绍. 现有自干扰测量技术大体上可以分为天线分离测量法与联合测量法两大类:

(1) 天线分离测量法^[18]: 在室外 — 室内通信场景下, 多天线中继器可以用于室内外信号的转发. 当全双工中继节点的发送天线和接收天线之间的距离足够大时, 中继站可以进行全双工测量与干扰消除操作. 该中继站工作于 2.6 GHz 频段, 工作带宽为 100 MHz, 发送天线与接收天线之间的距离为 20 mm. 研究表明, 在多径信道下, 发送天线和接收天线间的功率差可达 48 dB, 并且该数值随着天线间距离的增加而增加. 如果将发送天线和接收天线间的距离增大到 5 m, 则收发天线间的功率差为 70 dB. 这一结果可以有效地应用于空间自干扰消除技术中.

(2) 联合测量法^[19]: 在全双工 MIMO 设备中, 自干扰测量可以通过联合测量方法将多项技术 (包括足够大的天线分离、模拟与数字自干扰消除等) 有效地结合在一起, 从而达到更好的测量效果. 该方法工作于 2.4 GHz 频段, 发送功率限定在 $[-5 \text{ dBm}, 15 \text{ dBm}]$ 范围内, 收发天线间的距离设定为 20 cm 和 40 cm, 并且考虑窄带信号传输 (即: 信号带宽为 625 kHz). 实验结果表明, 该方法可以将自干扰信号精确地近似为一个传输功率的线性函数, 并且该近似函数能够达到 3% 以下的错误概率.

3.1.2 自干扰抑制与消除

自干扰抑制与消除是全双工通信的核心技术, 现有技术可以分为被动自干扰抑制与主动自干扰消除两大类.

被动自干扰抑制技术的原理是: 通过调整全双工设备发送天线与接收天线之间的距离, 利用收发天线间干扰信号的路径损耗来达到自干扰抑制的目的^[1]. 借助于该项技术, 自干扰信号能够在其达到接收天线之前被有效地衰减. 同时, 被动干扰抑制技术可以借助于多天线波束赋型技术将发送信号和接收信号的波束对准不同的方向^[20], 从而造成收发信号的物理隔离. 典型的被动干扰抑制策略包括: 去耦合天线¹⁾、极化去耦合^[21]以及循环隔离^[22]等. 去耦合天线和极化去耦合天线技术可以有效减小全双工设备中的天线互耦合, 循环隔离技术可以实现单一全双工天线发送信号和接收信号间的隔离, 从而实现高性能被动自干扰抑制.

(1) 方向性自干扰抑制: 该项技术的基本原理是将发送信号与接收信号的波束方向进行分离, 从而在二者之间造成最小的干扰^[20]. 在蜂窝移动通信系统中, 基站可以采用上述策略首先进行收发信号物理隔离, 然后采用射频自干扰消除技术对残存自干扰信号进行消除. 如果剩余自干扰信号功率仍然很高, 还可借助于传统的信道估计技术对自干扰信道进行有效估计, 并在数字域进行进一步的自干扰消除. 文献^[20]对宽带正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 系统自干扰抑制性能进行了实验分析. 该研究采用 2.048 GHz 中心频率、20 MHz 信号带宽、12 dBm 传输功率, 并且传输天线具有 5 dB 的增益以及 85 度的半角带宽. 实验结果表明, 借助于有效的方向性自干扰抑制技术, 全双工模式能够获得比半双工模式更高的性能增益. 当发送天线和接收天线间的距离为 10 m 并且天线隔离角不小于 45 度时, 全双工模式能够获得比半双工模式高 60%~90% 的增益.

(2) 基于天线隔离的自干扰抑制: 天线隔离技术^[19]能够对自干扰信号造成有效的衰减, 从而很大程度上抑制了自干扰信号对接收前端信号质量的影响. 发送天线与接收天线之间的距离越大, 天线隔离的效果就越好. 目前, 天线隔离技术有纯天线隔离 (antenna-separation-only, AS) 以及与主动自干扰消

1) Khandani A. Shaping the future of wireless: two-way connectivity, Jun. 2012. [Online]. Available: <http://www.nortel-institute.uwaterloo.ca/content/Shaping Future of Wireless Two-way Connectivity 18June2012.pdf>.

除相结合的天线隔离技术, 后者包括天线隔离及数字消除 (antenna separation and digital cancellation, ASDC)、天线隔离及模拟消除 (antenna separation and analog cancellation, ASAC)、天线隔离及模数消除 (antenna separation, analog and digital cancellation, ASDC)。

- 纯天线隔离: 该方法可以采用增大发送天线与接收天线距离的策略来提高自干扰抑制效果. 研究表明, 当发送天线与接收天线间的距离达到 40 cm 时, 45 dB 的自干扰信号可以得到有效衰减.

- 天线隔离及数字消除: 该方法除了采用天线物理隔离策略对自干扰信号进行衰减外, 同时通过对自干扰信道进行精确的信道估计, 从而提高数字域的自干扰消除性能. 实验结果证明, 当发送天线与接收天线间的距离达到 40 cm 时, 该方法可以获得 76 dB 的自干扰信号衰减.

- 天线隔离及模拟消除: 该方法在模拟域生成一个自干扰消除信号, 从而有效避免了 ASDC 算法中的量化噪声问题. 研究表明, 当发送天线与接收天线间的距离达到 20 cm 时, 该方法可以获得 72 dB 的自干扰信号衰减.

- 天线隔离及模数消除: 该方法结合了天线隔离及数字消除与天线隔离及模拟消除这两种算法的优点, 当发送天线与接收天线间的距离达到 40 cm 时, 该方法可以获得 80 dB 的自干扰消除能力.

主动自干扰消除技术主要包括模拟干扰消除与数字干扰消除两大类. 模拟消除算法的目的是为了消除射频或基带域的自干扰信号. 数字消除算法则借助于精确的自干扰信道估计技术来实现数字域的自干扰消除. 实际场景测试结果表明^[23], 在模拟域, 如果射频干扰消除与基带干扰消除联合使用的话, 能够在衰落信道下获得 40 到 50 dB 的性能增益. 如果将模拟消除与数字消除技术联合使用的话, 能够达到更高的自干扰消除能力.

(1) 模拟自干扰消除: 在全双工模式下, 为了降低基带信号量化噪声, 必须保证自干扰信号到达接收机模数转换器之前得到大规模衰减或消除. 因此, 模拟自干扰消除技术发挥了重要作用. 按照全双工设备天线数量来划分, 现有的模拟自干扰消除技术可以分为两类, 即 SISO 自干扰消除与 MIMO 自干扰消除. 典型时域自干扰消除算法, 如带调零发射天线的 Quellan 消除法 (quellan canceller with nulling transmit antenna, QCNTA)^[24]、比例消除信号注入法 (scaled cancelling signal injection, SCSI)²⁾等, 可以有效地应用于 SISO 和 MIMO 设备中.

(i) 全双工 SISO 信道时域自干扰消除: 借助于经典的时域训练序列可以有效地解决自干扰信道估计问题. 在此基础上, 自干扰信号可以有效地得到消除. 典型算法包括:

- 基于时域训练序列的 Z 信道模型^[25]: 在 Z 信道模型中, 时域训练序列可以有效地进行信道估计. 此外, 借助于反馈信道, 该模型可以得到近似理想全双工信道的容量.

- QCNTA^[24]: 该算法中, 传输天线的信号通过有线连接的方式反馈到 QHx220 噪声消除芯片进行自干扰消除. 该芯片同时连接接收天线, 可以将接收天线中的自干扰信号成功抵消. 借助于调零传输技术, 该算法可以获得 55 dB 的自干扰消除能力.

- SCSI²⁾: 通过向接收天线加载一个反相自干扰信号, 该算法可以有效地将接收前端的自干扰信号进行抵消. 结合天线隔离技术, 该算法能够获得 80 dB 的自干扰消除能力.

(ii) 全双工 MIMO 信道空域自干扰消除: 随着多天线技术的广泛应用, 多根天线所提供的空间自由度也为全双工设备自干扰消除带来了便利. 为此, 多个空域自干扰消除技术被相继提出. 该项技术中, 多天线设备既可以进行天线分类操作^[26] (即: 一部分天线用于信号发送, 另一部分天线用于信号接收), 也可以采用天线共享模式^[27] (即: 所有天线同时进行信号收发). 由于空域自干扰消除技术即

2) Sahai A, Patel G, Sabharwal A. Pushing the limits of full-duplex: design and real-time implementation. Rice Univ, Houston, TX, USA, Tech. Rep. TREE1 104. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1107.0607>.

可以有效利用天线隔离带来的增益, 又可以结合时域与空域消除的技术优势, 因而能够提供更好的自干扰消除能力. 现有典型空域自干扰消除算法包括:

- 天线消除算法^[3]: 在大多数基本的研究中, 全双工多天线设备配置 3 根天线, 其中两根天线用于信号发送, 1 根天线用于信号接收. 当两根发送天线到接收天线的距离差为半波长的奇数倍时, 两个发送信号的相位相反, 因此可以相互抵消, 从而造成接收天线零干扰. 这一方法操作简单, 同时无需复杂的信号调制. 实验结果证明, 天线消除算法结合射频消除奇数与数字基带消除奇数可以实现 60 dB 的自干扰消除能力. 同时, 和半双工模式相比, 采用天线消除算法的全双工设备吞吐量可以提升 84%.

- 预调零算法^[28]: 该算法首先进行全双工中继自干扰信道估计, 在此基础上借助于多天线设备的信号预处理能力进行自干扰信号预消除. 通常, 预调零算法可以有效地应用于多入单出 (multi input single output, MISO) 信道, 算法复杂度较低.

- 自适应反馈消除算法^[29]: 在传统的基于反馈的自干扰消除算法中, 由于有用信号与自干扰信号之间存在很强的相关性, 因而限制了该算法的应用. 在自适应反馈消除算法中, 考虑到 MISO 信道, 发送天线采用一个相位调制向量对发送信号进行调制优化, 同时采用最小方差无偏响应 (minimum variance distortionless response, MVDR) 等手段来降低有用信号与自干扰信号之间的相互影响.

- 预编码/解码技术^[30]: 在全双工 MIMO 设备中, 当自干扰信道被精确估计时, 可以采用预编码与解码技术来进一步提高自干扰信号的消除效果. 该算法需要对预编码与解码矩阵进行计算, 通常采用特征值分解 (如: 矩阵奇异值分解 —singular value decomposition, SVD) 等技术手段对编码信道的特征值与特征向量进行解析. 文献 [31] 提出一种全双工多用户 MIMO 通信的预编码设计, 该文献对优化的预编码问题进行数学建模, 并且提出不同计算复杂度的迭代优化算法来计算预编码矢量, 分别使得频谱效率最大化和能量效率最大化. 针对分布式的两用户双向通信, 文献 [32] 提出了一种全双工 MIMO 通信中的预编码设计, 并且特别考虑低复杂度算法. 该算法有助于推进全双工 MIMO 无线系统的实用化. 该技术不仅能够有效地抑制自干扰信号, 同时可以显著提高全双工 MIMO 信道容量.

- 零迫式 (zero forcing, ZF) 滤波器辅助的空空间映射技术^[33]: 采用 SVD 技术, 自干扰信道矩阵可以被有效地分解为预编码矩阵与解码矩阵. 采用空空间映射技术, 发送信号向量可以被映射到接收信号向量的空空间. ZF 滤波器可以为空空间映射提供一种有效的、低复杂度解决方法.

- 块对角化算法^[34]: 在全双工 MIMO 下行中继系统中, 中继信道矩阵可以采用离散傅里叶变换 (discrete Fourier transformation, DFT) 技术来有效地分解为多个对角分块矩阵. 当自干扰信道矩阵维度较高时, 块对角化算法将发挥明显优势, 可以将高复杂度的矩阵运算分解为多个低复杂度的运算. 同时, 与零迫使算法相比, 块对角化预编码技术需要较低的传输功率, 并能获得 26% 的信道容量增益.

- 最优特征波束赋型算法^[35]: 在 MIMO 中继系统中, 采用特征波束赋型算法可以实现高性能空域自干扰消除. 当发送信号的向量空间对准自干扰向量空间的最小特征向量时, 该算法可以最大化的抑制自干扰信号. 除了频域波束赋型技术外, 时域波束赋型方法也可以有效地应用于宽带接收机的射频前端, 并可在 30 MHz 带宽环境下实现 50 dB 的自干扰消除能力. 除此之外, 该算法还可以应用于多用户 MIMO 系统的分布式波束赋型, 成功抑制多用户之间的干扰.

- 基于最大信干比 (SIR) 准则的自干扰抑制^[36]: 该算法中, 全双工中继节点采用发送和接收滤波器来抑制自干扰信号, 并力求 SIR 最大化. 通过合理优化发送和接收矩阵, 自干扰信号可以得到成功抑制. 因此, 该算法既可实现中继节点输入 SIR 的最大化, 也可实现输出 SIR 的最大化.

- MMSE 滤波器^[37]: 多天线设备所提供的高自由度增益可以被有效地加以利用并提高有用信号功率. 基于 MMSE 准则, 全双工设备不仅可以成功抑制自干扰信号, 同时还可以减小背景噪声的影响,

因而得到比 ZF 算法更好的 BER 性能.

- 传输天线选择算法^[38]: 为了避免传统空域自干扰信号消除算法的一些弊端, 如: 低信噪比环境下的性能损失、高复杂度、时变环境下的受限自干扰消除能力, 等等, 传输天线选择算法可以有效的降低算法复杂度, 同时获得较高的空间分集增益. 该算法选择最优或次优的天线子集合 (选择天线的数量取决于复杂度与干扰消除能力之间的折衷) 进行数据传输, 同时实现自干扰信道信噪比的最小化.

(2) 数字自干扰消除: 在全双工系统中, 由于仅仅依靠模拟算法所获得的自干扰消除能力有限, 因此剩余自干扰信号需要进一步在数字域进行消除, 即: 数字自干扰消除^[1,39]. 现有研究表明, 模拟和数字自干扰消除算法之间存在“跷跷板效应”, 即: 当模拟消除算法和数字消除算法二者串联使用时, 当其中一个算法自干扰消除能力提高时, 另一个算法的消除能力随之降低.

目前, 数字自干扰消除技术在学术界已经引起关注, 如干扰重建抵消法和自适应滤波法^[29,40]. 当前典型的数字自干扰消除算法是 ZigZag 协议^[39]. ZigZag 协议的设计原理是: 当网络中不存在接入冲突时, ZigZag 算法不对现有 MAC 协议做任何改动. 当一对网络节点竞争无线接入资源时, 如果节点 N1 的数据包与 N2 的数据包发生碰撞, 两个节点采取随机退避策略进行重传, 接入点 (access point, AP) 则计算相应的退避时间, 从而避免后续数据包的碰撞. ZigZag 算法能够对无碰撞数据包部分进行解码, 然后利用这些解码信息对碰撞污染部分数据进行恢复. ZigZag 不仅能够有效地解决传统半双工通信系统中的隐藏终端问题, 而且可以显著降低网络中的数据丢包率. 与传统的连续干扰抵消 (successive interference cancellation, SIC) 算法相比, ZigZag 能够在高碰撞干扰环境下进行有效的干扰消除. 此外, ZigZag 的性能独立于调制方式, 并且与现有的 MAC 层协议相兼容. 实验结果表明, 当存在隐藏终端的情况下, ZigZag 能够将传统算法的丢包率从 72.6% 降低为 0.7%, 同时与传统的 IEEE 802.11 协议相比, ZigZag 能够提高 25.2% 的数据吞吐量.

3.2 全双工 MAC 层协议设计

全双工 MAC 协议能够有效地解决传统无线网络中的较高端到端延迟、网络拥塞以及隐藏终端等问题. 然而, 由于全双工设备必须支持同时的数据收发, 因此, 全双工 MAC 协议的设计与优化面临巨大挑战^[3]. 目前, 比较典型的全双工 MAC 层协议是 FD-MAC 协议²⁾, 该协议适用于 WiFi 等无线网络. 在分布式无线接入网络中, 全双工 MAC 层协议设计的主要挑战来自于网络节点公平性以及网络吞吐量优化等方面的要求. 为了满足上述要求, FD-MAC 协议设计遵从以下 3 个机制:

(1) 共享随机避让 (shared random backoff, SRB): 当两个节点各自有数据包需要发送给对方时, 每个节点需要维护一个临时避让计数器. 如果这对节点发现对方有更多的数据包发给自己, 这两个节点在各自的全双工数据包头中维护一个 10 比特长度的 SRB 域用来协调双方的退避间隔, 从而维持双方的同步, 同时释放无线信道资源, 使得其他节点可以进行无线接入.

(2) 窥探 (snooping): 即便网络节点暂时冻结其计数器, 窥探机制也要求该节点检查其射频覆盖范围内的所有到达数据包的包头. 该机制要求相关节点对其本地网络连接拓扑进行发现, 从而发现隐藏终端.

(3) 虚拟竞争解决 (virtual contention resolution): 当 AP 发现其缓存中有多个数据包需要发送时, 它需要决定哪个数据包优先发送. 为了减低缓冲区首的数据包发送延迟, FD-MAC 协议偶尔发送非缓冲区首数据包.

FD-MAC 协议能够保证全双工节点无缝无线接入并优化全双工性能增益. 实验结果表明, 相对于传统半双工模式, FD-MAC 协议能够获得超过 70% 的数据吞吐量增益.

3.3 实际系统环境下的全双工算法设计与实现

随着全双工理论与技术的发展, 国际上已经有多个全双工设备原型系统被相继开发出来. 借助于自干扰消除算法, 相关原型系统均在一定程度上证明了全双工模式的有效性与可行性. 此外, 传统通信系统中的一些关键技术, 如: 信道编码、中继选择、资源分配等, 也在全双工实验平台上得到了优化与验证.

3.3.1 全双工中继网络编码

先进的网络编码技术已经被广泛应用于协作通信系统中. 例如, 联合网络编码机制结合了信道编码与网络编码的特点, 并在协作通信系统中的到了较好的应用. 然而, 目前网络编码多应用于半双工模式, 针对全双工系统设计的新的网络编码将有助于充分挖掘全双工系统的性能增益.

(1) 全双工协作通信系统中的分布式空时码设计: 文献 [41] 提出两种应用于全双工异步协作通信系统的分布式线性卷积空时码. 第一种编码考虑理想的自干扰消除, 第二种编码能够容忍一定程度的剩余自干扰信号. 当中继节点能够获取精确的自干扰信道信息时, 第一种编码性能明显优于第二种编码性能. 然而, 当自干扰信道估计误差的方差与背景噪声方差相当时, 第二种编码将获得更好的性能.

(2) 异或 (XOR) 网络编码 [42]: 当中继节点采用 XOR 编码时, 可以有效地提高协作通信系统的分集增益, 尤其是当系统中存在多个全双工中继节点. XOR 编码能够保证网络数据包的正交非干扰传输, 因而在 (additive white Gaussian noise, AWGN) 信道以及衰落信道下都能够显著提高全双工系统的 BER 性能. 此外, XOR 编码性能明显优于传统的重传机制.

(3) 分块马尔可夫低密度奇偶校验码 (Markov LDPC) 码 [43]: 该编码方式能够有效地提高全双工二进制可擦除中继信道的传输性能.

(4) 联合网络编码与信道编码 [44]: 与传统的网络编码 (即: 网络编码与信道编码分别考虑) 相比, 联合编码方式能够结合二者的优点. 在全双工多接入中继信道中, 联合网络编码采用分块 Markov 网络编码与递归联合解码相结合的方式, 能够有效地获得优于半双工模式的性能增益. 采用十六进制正交振幅调制 (16QAM) 调制方式, 在误码率为 10^{-2} 的情况下, 联合网络编码全双工模式能够获得相对于半双工模式 6 dB 的性能增益.

3.3.2 全双工中继选择

在多中继协作通信系统中, 半双工中继选择算法得到了广泛研究. 由于中继选择技术具有高性能增益、低复杂度等特点, 因而该技术在全双工系统也得到了充分的关注.

(1) AF 模式中继选择 [9]: 在多中继协作通信系统中, 当源节点 $\rightarrow$ 目的节点间的信道遭受深度衰落时, 可以考虑采用中继转发模式获得数据传输的可靠性. 在实际系统中, 最优的中继 (如: 该中继与源节点间的信道最好) 将被选择做为信号的转发设备. 当该中继工作于全双工模式时, 必须进行自干扰消除以提高信号转发质量. 研究表明, 最优中继选择算法能够有效地优化系统信道容量. 同时, 次优中继选择算法具有复杂度低、易于操作等特点, 将在非理想信道状态下获得较好的性能增益. 此外, 最优中继选择操作还可以支持全双工一半双工模式切换, 根据当前信道状态以及自干扰情况来决定采用哪种双工模式;

(2) DF 模式中继选择 [7]: 在 DF 模式下, 最优中继可以采用机会选择机制加以选择, 即: 选择当前最大信噪比的中继做为最优中继. 当最优中继节点确定之后, 该中继节点的功率分配可以采取最优功率分配模式, 并考虑单一节点功率受限或总功率受限两种情况. 仿真结果表明, 采用中继选择的全

双工协作通信系统信道容量高于半双工模式, 并且在高信噪比的情况下, 全双工模式可以容忍更高的自干扰信号强度; 在低信噪比的环境下, 全双工模式数据吞吐量比半双工模式提高 33.1%~87.6%。

3.3.3 动态资源分配

为了满足多种用户服务质量 (QoS) 需求, 必须建立合理的动态资源分配机制。然而, 全双工系统的信道干扰环境比半双工模式更加复杂, 相关设备承受严重的自干扰信号影响。全双工系统干扰区域的大小由节点的发射功率决定。因为不完善的自干扰消除技术, 全双工操作需要限制发射功率。这会减少单个节点的干扰区域, 同时也导致全双工系统的传输距离减少^[45,46]。与半双工的无线自组织网络比较, 单信道全双工的多跳网需要更多的跳数, 从而导致“长跳与短跳的困境”^[47]。因此, 动态资源分配、尤其是功率分配将在全双工通信系统中发挥重要作用, 优化功率分配将有助于降低自干扰信号的影响。目前, 全双工系统动态资源分配尚未得到深入研究。

(1) 最优功率分配^[48~50]: 该类算法的原则是尽量分配最小的功率, 使得所分配的功率刚好能够满足用户的 SINR 需求。由于全双工系统中自干扰信号导致整个系统性能不稳定, 因此最优功率分配算法将有效地优化全双工中继节点的信干噪比 (SINR)。这类算法对 AF 模式尤其重要, 因为 AF 中继的噪声放大作用在一定程度上降低了中继节点的 SINR。现有研究^[48]通过对全双工多接入系统信道容量进行分析, 在最优功率分配的原则下将非凸优化问题成功转化为凸优化问题, 从而可以获得功率分配的闭式解。此外, 在蜂窝协作通信系统中^[49], 考虑到多个全双工 AF 节点的场景, 当一个源节点进行功率优化时, 可以将其他源节点的信号当作干扰, 持续上述操作, 直到所有节点都获得最优的稳定功率分配。此外, 在认知无线电环境^[50], 考虑到非理想信道状态信息的情况, 可以采用终端概率受限的功率分配策略进行最优功率分配。研究结果表明, 认知用户采用最优功率分配, 其数据吞吐量高于采用等功率分配策略的用户。

(2) 天线资源共享^[27]: 相比传统的正交资源分配机制, 采用资源共享与干扰消除技术的全双工设备能够更好地利用系统资源, 包括天线资源。在 MIMO 系统中, 天线资源可以被有效利用并进行同时的数据传输与接收。新的预编码与解码技术能够更有效的提高全双工 MIMO 系统的信道容量, 同时有效地消除自干扰信号。此外, 选择天线分集技术还能够将全双工设备的功率效率提高 3 dB。

(3) 动态频谱资源分配^[51]: 在全双工正交频分多址接入 (OFDMA) 系统中, 资源优化问题可以被分解为资源分配与调度。考虑到多载波系统中资源优化的多维度本质, 上述复杂优化过程主要包括功率分配与子载波分配。其中, 推导出最优功率分配闭式解至关重要。在蜂窝移动通信系统中, 基站系统借助其强大的运算能力进行最优算法运算, 而中继节点则主要依靠本地化参数解决动态资源分配的次优化问题。研究结果表明, 在中、低自干扰功率的环境下, 如果中继节点传输功率较低, 则 AF 转发模式的性能明显优于 DF 模式。随着自干扰功率的增加, DF 模式将逐渐获得其性能优势。此外, 预编码与解码矩阵的对角化也在动态资源分配技术中发挥重要作用, 有助于将复杂的多维优化问题分解为简单的多个标量优化问题。再者, 动态资源分配策略在混合双工模式中也发挥了重要作用, 选择何种双工模式取决于系统自干扰消除的能力。当自干扰消除能力较强时, 通信节点优先选择全双工模式以提高系统频谱效率, 相应的动态资源分配策略必须充分考虑全双工通信的特点, 从而充分发挥其技术优势。

3.3.4 多用户 MIMO 全双工中继

在全双工多用户 MIMO 系统中, 中继节点可以为基站信号覆盖范围外的用户提供服务^[52]。在此环境下, MIMO 中继节点可以进行分布式波束赋型操作, 从而提高单一用户的 SINR。基站可以借助于 ZF 波束赋型技术来进行传统的多用户 MIMO (MU-MIMO) 传输。研究结果表明, 当自干扰信号强度

在允许范围内时, 采用分布式波束赋型的全双工中继节点可以显著提高系统性能, 相对于半双工中继节点, 其信道容量更高.

3.3.5 动态资源分配

由于实际系统无线环境十分复杂, 全双工模式并非总是优于半双工模式. 因此, 在实际场景下, 混合全双工/半双工模式可以有效地提升整个系统的信道容量. 目前, 相关研究包括:

(1) 混合双工模式下的用户调度: 时域混合双工调度协议能有效地提高混合双工系统性能. 文献[53] 针对一个包含一个源节点、一个中继和两个目的节点的多用户下行系统提出一种调度策略. 当系统中存在多个目的节点时, 该混合双工模式下的用户调度协议能够很好地保证用户间的公平性, 同时保证用户总的传输速率最大化. 相对于传统的等机会调度策略, 混合双工调度协议能够在获得最大化的总传输速率的同时避免打破用户间的公平性.

(2) 机会混合双工模式^[45]: 考虑到全双工通信系统中广泛存在的频谱效率与自干扰抑制能力之间的折衷, 机会混合双工模式能够有效地提高系统资源利用率. 该模式中, 当信道情况趋向于某种双工模式时, 系统资源优先分配给该模式; 当信道情况发生转变时, 该机会混合双工模式能够在两种双工模式间自适应切换, 从而在全双工与半双工模式间达到一种动态平衡, 并最终优化整个网络的频谱效率.

(3) 认知无线电环境下的混合双工模式^[54]: 混合双工模式无论在基于蜂窝移动通信系统的认知环境还是基于自组织的认知环境中都能够显著提高系统性能. 该模式要求认知传输用户配置多个天线来支撑其全双工通信能力. 无需改变射频链路, 该混合双工模式即可获得三倍于半双工模式的认知用户数据速率. 考虑到 AF 认知中继节点, 当其传输功率为 25 dBm 时, 混合双工模式能够达到低于 40% 的中断概率, 这一性能远远高出半双工模式所能达到的性能.

4 全双工通信未来研究方向

全双工通信技术以其链路容量倍增及其潜在的频谱资源利用率提升能力而得到学术界和工业界的广泛关注. 然而, 现有研究结果表明, 全双工技术可以在显著提高系统信道容量的同时有效降低系统 BER, 但上述需求对通信设备的软/硬件复杂度以及接收机的多维信号处理能力提出了更高的要求. 此外, 全双工通信并非在任何应用场景下都能获得比半双工模式更好的性能增益, 半双工模式借助于有效的缓存技术或者空一时处理技术同样能够达到全双工模式所能达到的性能指标, 甚至有所超越. 因此, 混合半双工—全双工模式可以有效地解决全双工通信所面临的高复杂度以及高信噪比环境下的高终端概率等问题.

综合来看, 未来全双工通信理论与技术需要提高设备自干扰消除能力, 提升高信噪比环境下的性能增益, 提高网络协议的跨层优化能力, 降低全双工设备的软硬件复杂度. 未来研究中必须重点攻克以下难题: (1) 复杂射频环境下的多用户全双工通信系统信道容量, 通过研究新的有效的干扰抑制手段, 使得抑制后的自干扰功率在背景噪声功率以下, 从而使信道容量得到有效提升; (2) 建立多天线全双工通信系统高效自干扰消除机制, 实现高精度、低复杂度多维自干扰信号有效抑制与消除; (3) 针对复杂时变的无线频谱环境以及动态变化的无线网络结构, 研究全双工 MAC 层以及高层协议, 并实现全双工协议与现有半双工协议间的兼容; (4) 全双工协作通信与中继选择技术, 通过选择最优的中继节点进行多跳传输, 从而有效地提升信号的抗衰落能力, 扩大信号的覆盖范围.

5 结束语

全双工技术能够显著提高频谱效率以满足未来移动通信场景中指数增长的用户数据与多样化的业务需求,从根本上避免了半双工通信中由于信号发送/接收之间的正交性所造成的频谱资源浪费,进而实现潜在的频谱效率倍增.然而,自干扰信号功率严重制约着全双工技术优势的发挥.本文从全双工通信的国内外研究现状的视角出发,对全双工与半双工的模式性能进行了比较,详细阐述了全双工的关键技术要素及其亟待解决的技术瓶颈,并对现有自干扰消除技术进行分类与比较.全双工技术将成为下一代移动通信系统中的一个重要研究热点.

参考文献

- 1 Duarte M. Full-duplex wireless: design, implementation and characterization. Dissertation for Ph.D. Degree. Houston: Rice University, 2012
- 2 Rankov B, Wittneben A. Spectral efficient protocols for half-duplex fading relay channels. *IEEE J Sel Area Comm*, 2007, 25: 379–389
- 3 Choi J I, Jain M, Srinivasan K, et al. Achieving single channel, full duplex wireless communication. In: *Proceedings of the 16th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, Chicago, 2010. 1–12
- 4 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. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2009, 8: 3933–3938
- 5 Zhou M, Cui H, Song L, et al. Transmit-receive antenna pair selection in full duplex systems. *IEEE Wirel Commun Lett*, 2014, 3: 34–37
- 6 He Z, Shao S, Shen Y, et al. Impact of analog cancellation error on full-duplex wireless communications system over Rayleigh fading channel. In: *Proceedings of International Conference on Communications, Circuits and Systems (ICCCAS)*, Chengdu, 2013. 26–28
- 7 Zhong B, Zhang D, Zhang Z, et al. Opportunistic full-duplex relay selection for decode-and-forward cooperative networks over Rayleigh fading channels. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Sydney, 2014. 1–6
- 8 Li W, Chen X, Wang Y, et al. Full-duplex fast estimation of echo and channel responses in the presence of frequency offsets in both far echo and far signal. *IEEE Trans Signal Process*, 1997, 45: 2401–2404
- 9 Riihonen T, Werner S, Wichman R, et al. On the feasibility of full-duplex relaying in the presence of loop interference. In: *Proceedings of IEEE 10th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC'09)*, Perugia, 2009. 275–279
- 10 Riihonen T, Werner S, Wichman R. Transmit power optimization for multiantenna decode-and-forward relays with loopback self-interference from full-duplex operation. In: *Proceedings of Conference Record of the 45th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, 2011. 1408–1412
- 11 Day B P, Margetts A R, Bliss D W, et al. Full-duplex MIMO relaying: achievable rates under limited dynamic range. *IEEE J Sel Area Comm*, 2012, 30: 1541–1553
- 12 Riihonen T, Wichman R, Hamalainen J. Co-phasing full-duplex relay link with non-ideal feedback information. In: *Proceedings of IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS'08)*, Reykjavik, 2008. 263–267
- 13 Baranwal T K, Michalopoulos D S, Schober R. Outage analysis of multihop full duplex relaying. *IEEE Commun Lett*, 2013, 17: 63–66
- 14 Sharma P K, Garg P. Outage analysis of full duplex decode and forward relaying over Nakagami-m channels. In: *Proceedings of National Conference on Communications (NCC)*, New Delhi, 2013. 1–5
- 15 Lee K, Kwon H M, Jo M, et al. MMSE-based optimal design of full-duplex relay system. In: *Proceedings of Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, Quebec City, 2012. 1–5

- 16 Joung J, Sayed A H. Design of half-and full-duplex relay systems based on the MMSE formulation. In: Proceedings of IEEE/SP 15th Workshop on Statistical Signal Processing (SSP'09), Cardiff, 2009. 281–284
- 17 Michalopoulos D S, Schlenker J, Cheng J, et al. Error rate analysis of full-duplex relaying. In: Proceedings of International Waveform Diversity and Design Conference (WDD), Niagara Falls, 2010. 165–168
- 18 Haneda K, Kahra E, Wyne S, et al. Measurement of loop-back interference channels for outdoor-to-indoor full-duplex radio relays. In: Proceedings of the 4th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Barcelona, 2010. 1–5
- 19 Duarte M, Sabharwal A. Full-duplex wireless communications using off-the-shelf radios: feasibility and first results. In: Proceedings of Conference Record of the 44th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, 2010. 1558–1562
- 20 Everett E, Duarte M, Dick C, et al. Empowering full-duplex wireless communication by exploiting directional diversity. In: Proceedings of Conference Record of the 45th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, 2011. 2002–2006
- 21 Everett E. Full-duplex infrastructure nodes: achieving long range with half-duplex mobiles. Dissertation for M.Sc. Degree. Houston: Rice University, 2012
- 22 Knox M E. Single antenna full duplex communications using a common carrier. In: Proceedings of 13th Annual IEEE Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON 2012), Cocoa Beach Florida, 2012. 1–6
- 23 Suzuki H, Itoh K, Ebine Y, et al. A booster configuration with adaptive reduction of transmitter-receiver antenna coupling for pager systems. In: Proceedings of IEEE VTC 50th Vehicular Technology Conference (VTC Fall), Amsterdam, 1999. 1516–1520
- 24 Raghavan A, Gebara E, Tentzeris E M, et al. Analysis and design of an interference canceller for collocated radios. *IEEE Trans Microw Theory*, 2005, 53: 3498–3508
- 25 Thangaraj A, Ganti R K, Bhashyam S. Self-interference cancellation models for full-duplex wireless communications. In: Proceedings of International Conference on Signal Processing and Communications (SPCOM), Bangalore, 2012. 1–5
- 26 Chen S, Beach M A, McGeehan J P. Division-free duplex for wireless applications. *Electron Lett*, 1998, 34: 147–148
- 27 Ju H, Lee S, Kwak K, et al. A new duplex without loss of data rate and utilizing selection diversity. In: Proceedings of Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Singapore, 2008. 1519–1523
- 28 Chun B, Jeong E R, Joung J, et al. Pre-nulling for self-interference suppression in full-duplex relays. In: Proceedings of Asia-Pacific Signal and Information Processing Association, Annual Summit and Conference (APSIPA ASC 2009), Sapporo, 2009. 91–97
- 29 Lopez-Valcarce R, Antonio-Rodriguez E, Mosquera C, et al. An adaptive feedback canceller for full-duplex relays based on spectrum shaping. *IEEE J Sel Area Comm*, 2012, 30: 1566–1577
- 30 Krikidis I, Suraweera H A, Yang S, et al. Full-duplex relaying over block fading channel: a diversity perspective. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2012, 11: 4524–4535
- 31 Nguyen D, Tran L N, Pirinen P, et al. Precoding for full duplex multiuser MIMO systems: spectral and energy efficiency maximization. *IEEE Trans Signal Process*, 2013, 61: 4038–4050
- 32 Kim T M, Yang H J, Paulraj A J. Distributed sum-rate optimization for full-duplex MIMO system under limited dynamic range. *IEEE Trans Signal Process*, 2013, 20: 555–558
- 33 Riihonen T, Werner S, Wichman R. Spatial loop interference suppression in full-duplex MIMO relays. In: Proceedings of Conference Record of the 43rd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, 2009. 1508–1512
- 34 Stankovic V, Spalevic P. Cooperative relaying with block DFT processing and full-duplex relays. *Electron Lett*, 2013, 49: 300–302
- 35 Riihonen T, Balakrishnan A, Haneda K, et al. Optimal eigenbeamforming for suppressing self-interference in full-duplex MIMO relays. In: Proceedings of 45th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS), Baltimore, 2011. 1–6
- 36 Lioliou P, Viberg M, Coldrey M, et al. Self-interference suppression in full-duplex MIMO relays. In: Proceedings of Conference Record of the 44th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, 2010. 658–662

- 37 Riihonen T, Werner S, Wichman R. Mitigation of loopback self-interference in full-duplex MIMO relays. *IEEE Trans Signal Process*, 2011, 59: 5983–5993
- 38 Gore D A, Paulraj A J. MIMO antenna subset selection with space-time coding. *IEEE Trans Signal Process*, 2002, 50: 2580–2588
- 39 Gollakota S, Katabi D. Zigzag decoding: combating hidden terminals in wireless networks. In: *Proceedings of the ACM SIGCOMM Conference on Data Communication*, Seattle, 2008. 159–170
- 40 Jain M, Choi J I, Kim T, et al. Practical, real-time, full duplex wireless. In: *Proceedings of the 17th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, Las Vegas, 2011. 301–312
- 41 Liu Y, Xia X G, Zhang H. Distributed space-time coding for full-duplex asynchronous cooperative communications. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2012, 11: 2680–2688
- 42 Li Z, Peng M, Wang W. A network coding scheme for the multiple access full-duplex relay networks. In: *Proceedings of 6th International ICST Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM)*, Harbin, 2011. 1132–1136
- 43 Ivashkina M, Andriyanova I, Piantanida P, et al. Erasure-correcting vs. erasure-detecting codes for the full-duplex binary erasure relay channel. In: *Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings (ISIT)*, Cambridge, 2012. 945–949
- 44 Hatefi A, Visoz R, Berthet A O. Joint network-channel distributed coding for the multiple access full-duplex relay channel. In: *Proceedings of International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, Moscow, 2010. 321–326
- 45 Riihonen T, Werner S, Wichman R. Hybrid full-duplex/half-duplex relaying with transmit power adaptation. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2011, 10: 3074–3085
- 46 Meng Q, Feng W, Zheng G, et al. Fixed full duplex relaying for wireless broadband communication. In: *Proceedings of International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, Huangshan, 2012. 1–5
- 47 Hanzo L, Tafazolli R. A survey of QoS routing solutions for mobile ad hoc networks. *IEEE Commun Surv*, 2007, 9: 50–70
- 48 Mesbah W, Davidson T N. Optimal power allocation for full-duplex cooperative multiple access. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2006 Processings)*, Toulouse, 2006. IV–IV
- 49 Song Y K, Kim D. Convergence of distributed power control with full-duplex amplify-and-forward relays. In: *Proceedings of International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP 2009)*, Nanjing, 2009. 1–5
- 50 Kim H, Lim S, Wang H, et al. Optimal power allocation and outage analysis for cognitive full duplex relay systems. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2012, 11: 3754–3765
- 51 Ng D W K, Schober R. Dynamic resource allocation in OFDMA systems with full-duplex and hybrid relaying. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kyoto, 2011. 1–6
- 52 Lee C H, Lee J H, Kwak Y W, et al. The realization of full duplex relay and sum rate analysis in multiuser MIMO relay channel. In: *Proceedings of IEEE 72nd Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall)*, Ottawa, 2010. 1–5
- 53 Miyagoshi M, Yamamoto K, Haneda K, et al. Multi-user transmission scheduling for a hybrid of full-and half-duplex relaying. In: *Proceedings of 8th International Conference on Information, Communications and Signal Processing (ICICS)*, Singapore, 2011. 1–5
- 54 Wong K K. Maximizing the sum-rate and minimizing the sum-power of a broadcast 2-user 2-input multiple-output antenna system using a generalized zeroforcing approach. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2006, 5: 3406–3412

Key techniques research on full-duplex wireless communications

ZHANG DanDan¹, WANG Xing¹ & ZHANG ZhongShan^{1,2*}

¹ Technology Research Center for Convergence Networks and Ubiquitous Services, University of Science and Technology Beijing (USTB), Beijing 100083, China;

² National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China

*E-mail: zhangzs@ustb.edu.cn

Abstract Traditional half-duplex (HD) wireless systems transmit and receive signals adopting orthogonal time-slots, resulting in a great waste of frequency resources. And full-duplex (FD) wireless communication techniques have drawn extensive attention from academia and industry for the attractive abilities of doubling the channel capacity and promoting the utilization of spectrum resources. We frame the paper by first comparing the performance of HD and FD modes and addressing the advantages and disadvantages of the existing FD techniques. As the core problem of FD systems, self-interference (SI) cancellation will be realized by two main techniques: passive self-interference suppression and active self-interference cancellation. In this paper, we also present the advantages and disadvantages of respective techniques. Besides, the design of FD media access control (FD-MAC) layer is carried out based on the complex time-varying wireless spectrum environment and the dynamic wireless network structure. Furthermore, the design and implement of FD algorithms are presented in this paper, including relay network coding, relay selection and dynamic resource allocation. Finally, we summarize the future research directions and conclude the whole paper.

Keywords wireless networks, full-duplex, self-interference cancellation, key techniques, future research directions



cooperative communications. She is a student member of IEEE Communications Society.

ZHANG DanDan was born in 1990. She received her B.Sc. degree in Communication Engineering from the University of Science and Technology Beijing (USTB), Beijing, China in 2013. She is currently working toward the M.Sc. degree with the Technology Research Center for Convergence Networks and Ubiquitous Services, USTB. Her current research interests include wireless communications theory, full-duplex communication, diversity and



mobile wireless communication theory, deep space communication and cooperative relay communication.

WANG Xing was born in 1984. He received his B.Sc. degree in Electronic Information Engineering from Electronic Engineering Institute (EEI), Hefei, China in 2007. After six-years' work associated with astronautics, he is currently working toward the M.Sc. degree with the Technology Research Center for Convergence Networks and Ubiquitous Services, University of Science and Technology Beijing (USTB). His current research interests include



engineering in the University of Science and Technology Beijing (USTB). His main research interests include statistical signal processing, synchronization and channel estimation in MIMO OFDM systems, and cooperative communications. Dr. Zhang is a Fellow of IEEE.

ZHANG ZhongShan was born in 1974. He received his B.E. and M.S. degrees in computer science from the Beijing University of Posts and Telecommunications (BUPT) in 1998 and 2001, respectively, and received Ph.D. degree in electrical engineering in 2004 from BUPT. From February 2006, he joined University of Alberta, Edmonton, AB, Canada, as a postdoctoral fellow. He is currently a Professor of the School of Computer and Communication Engineering