



未来移动通信论坛
FUTURE MOBILE COMMUNICATION FORUM

5G 关键技术系列丛书

5G 同频同时 全双工技术

Co-frequency Co-time Full Duplex for 5G Communication Systems

◆ 焦秉立 刘三军 张建华 辛永超 编著



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

5G 关键技术系列丛书

5G 同频同时 全双工技术

Co-frequency Co-time Full Duplex for 5G Communication Systems

◆ 焦秉立 刘三军 张建华 辛永超 编著



人民邮电出版社

北京

图书在版编目 (C I P) 数据

5G同频同时全双工技术 / 焦秉立等编著. — 北京 :
人民邮电出版社, 2017. 6
(5G关键技术系列)
ISBN 978-7-115-45907-7

I. ①5… II. ①焦… III. ①无线电通信—移动通信—通信技术 IV. ①TN929.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第135400号

内 容 提 要

本书从同频同时全双工技术的产生背景和研究现状出发, 阐述同频同时全双工技术的基本概念, 描述全双工通信系统的基本结构和几种典型通信系统的容量, 并重点分析同频同时全双工的自干扰问题, 以及从全双工节点和全双工系统等层面, 详细介绍自干扰消除和自干扰抑制技术。本书还介绍全双工通信系统中的一些相关技术, 包括全双工与 MIMO 结合技术、全双工功率控制技术、全双工多用户检测技术、全双工系统的资源管理和频谱规划策略以及全双工蜂窝系统中中继转发技术。在此基础上, 重点介绍全双工组网和全双工安全通信设计方案。最后, 探讨同频同时全双工 D2D 系统和无线局域网等新应用场景, 展望该技术在无线安全通信和认知无线电等领域中的应用。

本书适合信息科学领域的技术人员, 也可作为高等院校信息与通信工程专业硕士和博士研究生的参考书。

◆ 编 著 焦秉立 刘三军 张建华 辛永超

责任编辑 代晓丽

执行编辑 刘 琳

责任印制 彭志环

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

三河市潮河印业有限公司印刷

◆ 开本: 880×1230 1/32

印张: 5.25

2017年6月第1版

字数: 141千字

2017年6月河北第1次印刷

定价: 59.00元

读者服务热线: (010)81055488 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

前 言

第五代（5G）移动通信系统是面向 2020 年的新一代移动通信系统，它对频谱利用率和能效提出了较高要求，同时在无线覆盖性能、传输速率及时延、系统安全和用户体验等方面将有显著提升。5G 将与垂直应用网络密切结合，构成新一代无所不在的移动信息网络，满足未来 10 年移动互联网流量增加 1 000 倍的发展需求。5G 的发展是全球移动通信领域新一轮技术竞争的开始，力争在未来技术与商业竞争中获得领先优势，已成为我国信息技术与产业发展的重要目标。

同频同时全双工（Co-frequency Co-time Full Duplex, CCFD）是一种能在相同频带和时间内，发射和接收电磁波信号的技术。由于 CCFD 技术能够显著提高通信系统频谱效率，它已经成为 5G 的关键技术之一，并得到国内外移动通信研究领域的广泛关注。同频同时全双工技术要解决的核心问题是自干扰抑制，这个问题关系到如何进行同频同时全双工组网，如何与 MIMO 结合共同发挥优势之关键，因此，这个新技术的实际应用还有待进一步研究。本书内容基于北京大学研究团队多年来在全双工技术领域的研究成果和工作积累，详细介绍了同频同时全双工技术的基本概念和自干扰抑制技术，以及系统组网和系统安全通信等设计方案。对信息科学领域技术人员，以及高等院校信息与通信工程专业的硕士和博士研究生在相关领域的研究具有重要参考价值。

本书第 1 章介绍同频同时全双工技术的提出背景和研究现状。第 2 章阐述同频同时全双工技术的基本概念，分析全双工系统的基本结构和几种典型全双工系统的容量。第 3 章在分析全双工通信自

干扰问题的基础上,从全双工节点和全双工系统等层面,详细介绍各种自干扰消除技术。第4章介绍全双工系统中的一些关键技术,包括同频同时全双工与 MIMO 结合技术、上下行联合功率控制技术、对抗用户间干扰的多用户检测技术、TDD 系统信道获取与功率控制技术、全双工系统的资源管理和频谱规划策略以及全双工蜂窝系统中继转发技术。第5章重点介绍全双工组网设计方案。第6章重点介绍全双工安全通信设计方案。这两章的内容都是基于北京大学研究团队的最新研究成果,其中第5章还介绍全双工蜂窝组网演示系统的设计和实现。本书最后一章探讨全双工 D2D 系统和全双工无线局域网等新应用场景,展望全双工技术在无线安全通信和认知无线电研究领域中的应用。

这里首先感谢未来移动通信论坛(FuTURE论坛)组织5G关键技术丛书的编写,让作者有机会总结在同频同时全双工技术领域的研究成果,同时感谢人民邮电出版社对本书出版的大力支持。

作者还要感谢近年来参与同频同时全双工技术研究并对本书内容做出贡献的多位博士研究生和硕士研究生,他们当中有些人已经毕业走上工作岗位,成为我国信息科学领域的新生力量。在此特别感谢北京大学李斗老师和史亚博、陈颖琦、田树一、张竞枢等同学为本书的整理及校对而付出的辛勤工作。

最后,感谢国家自然科学基金重点项目(编号:61531004)和港澳台科技合作专项项目(编号:2014DFT10290)对本书的资助。

作者

2017年4月于北京

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 全双工技术的提出	2
1.2 国内外研究现状	6
参考文献	10
第 2 章 全双工系统基本概念	17
2.1 全双工系统结构	18
2.2 全双工系统容量	20
2.2.1 点对点通信系统容量	20
2.2.2 多用户系统容量	21
2.2.3 全双工中继系统容量	24
参考文献	28
第 3 章 全双工自干扰消除技术	31
3.1 全双工通信的自干扰问题	32
3.2 全双工节点的自干扰消除方案	33
3.2.1 天线干扰隔离	33
3.2.2 天线干扰对消	38
3.2.3 射频干扰消除	39
3.2.4 数字干扰消除	46
3.3 全双工系统的自干扰消除方案	48
3.3.1 空间隔离法	48

3.3.2	利用天线方向性	49
3.3.3	天线波束成形法	50
3.4	器件非理想特性的影响与解决方法	51
	参考文献	55
第4章	全双工系统关键技术	61
4.1	全双工与 MIMO 结合技术	62
4.1.1	多流 MIMO	62
4.1.2	空间调制技术	65
4.2	上下行联合功率控制技术	67
4.3	对抗用户间干扰的多用户检测技术	75
4.4	TDD 系统信道获取与功率控制技术	79
4.5	全双工系统资源管理技术	84
4.5.1	全双工与 TDD 混合系统	84
4.5.2	天线分集增益	85
4.5.3	最优功率分配	86
4.6	全双工系统频率规划技术	86
4.6.1	基于频率规划的干扰抑制方法	87
4.6.2	基于 FFR 的全双工频率规划方案	89
4.7	全双工蜂窝系统中继转发技术	96
	参考文献	106
第5章	全双工系统组网	109
5.1	全双工蜂窝系统中的干扰问题	110
5.1.1	全双工蜂窝系统中的干扰分类	110
5.1.2	全双工蜂窝系统中的干扰强度	113
5.2	全双工蜂窝系统组网方案	115
5.2.1	收发分置原理	115
5.2.2	波束成形原理	116
5.3	基于约束的波束成形算法	117

5.3.1	约束方程原理	118
5.3.2	基于约束的 LMS 和 RLS 算法	119
5.3.3	接收天线阵的切换	122
5.3.4	基于约束的 RLS 算法仿真	123
5.4	全双工蜂窝组网演示系统	126
5.4.1	演示系统设计	127
5.4.2	演示系统实现	127
	参考文献	128
第 6 章	全双工安全通信	131
6.1	全双工安全通信系统原理	132
6.2	单点检测下的安全通信	133
6.2.1	理论分析	134
6.2.2	仿真分析	136
6.3	单点多时刻联合检测下的安全通信	138
6.3.1	理论分析	138
6.3.2	仿真分析	141
	参考文献	143
第 7 章	全双工技术的其他应用	145
7.1	全双工 D2D 系统	146
7.2	全双工无线局域网	147
7.3	全双工无线安全通信	150
7.4	全双工认知无线电技术	152
	参考文献	153
	中英文对照	155
	名词索引	158



第1章

绪论

1.1 全双工技术的提出

1.2 国内外研究现状

同频同时全双工 (Co-frequency Co-time Full Duplex, CCFD) [1,2] 亦称为同带全双工 (In-Band Full Duplex, IBFD) [3,4]、单信道全双工 (Single Channel Full Duplex, SCFD) [5-7], 或者简称为全双工 (Full Duplex, FD), 是一种能在相同的频率资源、相同的时刻, 同时发射和接收电磁波信号的技术, 能将现有的频谱效率提高一倍, 具有广泛的应用价值和研究意义。

1.1 全双工技术的提出

在过去的二三十年里, 随着移动通信技术的飞速发展, 无线通信的用户数和数据流量迅速增长。根据爱立信的公司报告, 2012 年全球有 62 亿部移动终端在使用, 这个数字在 2017 年将会增加到 90 亿部, 即超过世界的总人口数 [8]。2010~2016 年, 中国移动互联网流量发展情况比较如图 1-1 所示 [9], 在这 6 年中, 移动互联网接入的流量由 3.9 亿 G 增长至 93.6 亿 G, 移动互联网每月户均接入流量由 66.1 M 增长至 772 M。



图 1-1 2010~2016 年移动互联网流量发展情况比较

无线通信的业务需求在迅速膨胀, 人们需要更多的频谱资源。但由于电磁波传播特性的制约, 尽管通信技术在进步, 可用于支持移动环境下的无线频谱资源却无法增加。在密集组网情况下, 频率

资源显得尤为重要。由于干扰问题，宽带通信的频率规划和重复使用进一步凸显用户通信的频带占有和资源之间的矛盾，其中同频干扰成为最根本的问题^[10]。

为解决现实生活中无线业务需求不断增长与频谱资源日益匮乏之间的矛盾，通信界在理论和技术上进行的长期研究，其核心问题是如何提高频谱效率。同频同时全双工技术正是这样一种新型的空口技术，它将传统通信节点的发射和接收信号设置在相同频点和相同时间内，因此，该技术可以将频谱效率增加一倍。

为了区别传统通信中全双工节点的描述，我们把上述技术称为同频同时全双工。将同频同时全双工用于移动通信基站是一个大胆而富有创新的想法，该专利由北京大学于2006年提交专利^[11]。它将移动通信系统中基站的发射和接收信号设置在同频点和同时间上。无论比较传统频分双工（Frequency Division Duplex, FDD）系统还是时分双工（Time Division Duplex, TDD）系统，同频同时全双工系统都可以将频谱效率提高一倍，然而，新技术带来的挑战需要克服上行链路和下行链路在基站处的强干扰，这种干扰称为自干扰（Self-Interference, SI），上述专利描述的基站干扰消除器需要消除的干扰就是自干扰。在同频组网的情况下，基站干扰消除器不仅需要消除本机站干扰，而且需要消除来自邻基站的干扰。

为简单明了，我们接收一个全双工节点自干扰消除场景如图1-2所示。目前，同频同时全双工的自干扰消除通常采用以下3种技术的组合：天线隔离技术、模拟自干扰消除技术和数字干扰消除技术。其中，天线隔离技术是一种利用电磁波传播和衰减特性的方法，指的是通过天线设计，降低发射天线与接收天线之间的电磁耦合或者使电磁波在天线上实现反向抵消，使通信节点发射信号在其接天线处尽可能小；模拟自干扰消除指的是，从接收机的模拟信号中减去其中包含发射机信号的部分；数字干扰消除指的是，从接收机的A/D转换器输出的数字信号中减去数字的自干扰部分。上述干扰消除方法中，第一种属于被动干扰消除方法，而后两种方法属于

主动自干扰消除方法。而两种主动干扰消除方法的区别在于，一种工作在模拟域，另一种工作在数字域。由于3种方法工作在信号处理的不同器件上，它们的效果在一定范围内具有累加性。理论上讲，自干扰是可以被完全消除的，因此该技术在理论上可以将频谱效率提高一倍。但在实际工作中，由于信号处理技术的精确性和数字采用的量化限制，我们尚无法彻底消除这种自干扰。因此，同频同时全双工系统的容量提升尚无法达到传统系统的两倍。就目前技术能力，点对点同频同时全双工的容量能达到传统系统的1.8倍以上。这个指标标志着同频同时全双工的点对点通信技术已经基本成熟。

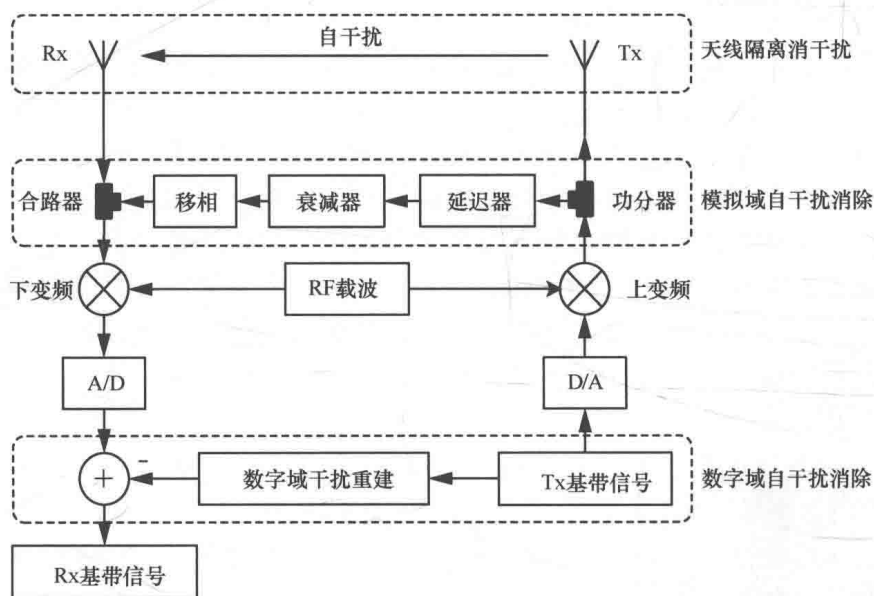


图 1-2 CCFD 系统自干扰消除

深入研究干扰消除，我们必须认识到全双工系统的自干扰实际上是本通信节点同节点的发射机信号，因此对于接收机而言，自干扰是完全已知的干扰。不难理解，理论上这种干扰是可以完全消除的。然而实际中最大的困难是：同频同时全双工的自干扰发射天线距接收天线很近，其干扰强度很强；而节点需要接收的通信信号来

自较远地方,因此极其微弱。这个巨大差异要求自干扰消除器具有超级消干扰能力^[12]。以微蜂窝小区(Femto-Cell Cellular, FCC)系统^[13]为例,设基站的发射功率为21 dBm,接收本底噪声功率为-100 dBm;假设基站发射机和接收机天线之间的隔离度为20 dB,那么进入模拟和数字干扰消除器的自干扰功率尚有大约为1 dBm。考虑实际通信情况,我们尚需消除大约101 dB才能较好地发挥系统通信能力,即使得同频同时全双工的容量可能接近半双工的两倍容量。如果应用于宏蜂窝,那么就需要更大的自干扰消除能力。目前普遍认为,基站应用的同频同时全双工自干扰消除能力需要达到120~130 dB。为了实现这样的优质干扰消除器,可能使得信号处理进入非线性区域,它表现在非线性的相位噪声、IQ路不平衡、功放的非线性等各个方面。它是新系统干扰消除器实现方法的最大挑战之一。

然而随着近年来电子工艺、技术以及通信信号处理水平的提高,自干扰消除能力正在逐渐提升。比如美国斯坦福大学于2014年利用多抽头技术实现了115 dB的SI消除能力,北京大学实现了同频同时全双工点对点500 m距离的视频通信,消干扰能力超过120 dB等;这些演示系统对CCFD技术走向应用打下坚实的基础。

相对于传统的TDD或者FDD,CCFD具有的优势有如下几个方面。

(1) 可以使频谱效率提高一倍

在CCFD系统中,收发可以同时使用所有的可利用频带,只要CCFD的自干扰消除能力足够强,CCFD的容量可达到半双工容量的两倍^[14,15]。

(2) 能减少中继系统中的端到端延迟

将同频同时全双工技术用于系统中继,其同时发射和接收信号,在不增加频率的条件下,减少中继辅助下端到端之间通信的延迟时间^[16,17]。

(3) 能够增加网络安全

当两个节点同时传送信息,而信息又处于同一频带时,这就意

意味着窃听者收到的是两路信号的叠加；当窃听者企图窃取一路信号时，另一路信号则相当于同频干扰，这样窃听者就不容易解调出目标信号，因而网络的安全性得到提高^[18,19]。

(4) 能够使频谱的利用模式更加灵活

传统的通信系统中，频谱的利用模式只能是半双工的，比如 TDD 或者 FDD；CCFD 可以让通信系统的上、下行链路中增加一项新的可选模式。当系统的 SI 消除效果比较好、CCFD 的频谱效率高于半双工模式时，设定系统工作在 CCFD 模式；反之，设定系统工作在传统的 FDD 或者 TDD 模式。CCFD 给系统的双工模式提供了一项新的选项，系统的双工模式更加灵活^[20,21]。

1.2 国内外研究现状

虽然，同频同时全双工技术由于其在移动通信中的频谱效率提升潜力而得到广泛重视，并成为当今技术的一个热点。但是，从技术发展的角度看，它并不是近几年才产生的。此前，由于受电子元器件、器材和信息技术的制约，消干扰能力比较弱，其应用的想法受到很大限制，在移动通信中甚至被认为是禁忌技术。戈德史密斯在《无线通信》教材中讲到：“一般来说，无线电设备不能在相同的频段内同时发射和接收电磁波，因为这样会产生强烈的自干扰。”^[22]可见 CCFD 面向应用的最大的挑战是自己发射机发出的 SI。如何更好地消除 SI，这伴随着 CCFD 技术的整个发展历程。

自干扰消除的需求可以追溯至 1940 年之前的连续波雷达系统，它的发射机和接收机连续地使用相同的频率，这样发射机就会对接收机产生强干扰^[23,24]。对于雷达来说，接收远端目标反射的信号是实现目标探测的关键之一。由此可知，SI 消除技术十分重要。传统的连续波雷达系统主要利用发射天线和接收天线的空间隔离，或者在收发共享同一天线时使用环路器来实现隔离。这两种方式的隔离

能力都比较有限,其中环路器的隔离度只有 20 dB,而收发使用不同天线时的空间隔离在天线距离比较小时也只有 30~45 dB。此外,在中继系统中也较早地应用了全双工技术。例如,直放站为了增大无线通信系统的覆盖范围,将接收信号放大后再以同样的频率发射,因此也需要隔离发射机与接收机间的信号。

类似自干扰消除的技术还出现在 20 世纪 60 年代卫星电话的回声消除中,由于卫星电话实验回声较大,人们感受的回声效果十分明显,所以不得不采用回声抵消技术,文献[25]提出了一种基于回声估计的模拟回声抵消结构,能提供大约 15 dB 的消除能力。1971 年,文献[26]提出了一种基于中心限幅法的回声抑制技术,可以更好地消除卫星等长途电话中的回声。实验结果表明,该技术的最大回声信号消除能力为 18 dB。1976 年文献[27]使用多抽头延迟滤波的方法来消除回声干扰,结果发现 8 抽头的延迟滤波器已经能抑制 30 dB 的回声干扰,其模型如图 1-3 所示,这种模型是当前 CCFD 系统中模拟自干扰消除的一种方法。回声消除最终形成了标准,即在国际电信联盟推出的 G165 标准中,要求国际电话的回音消除能力必须不低于 26 dB^[25]。

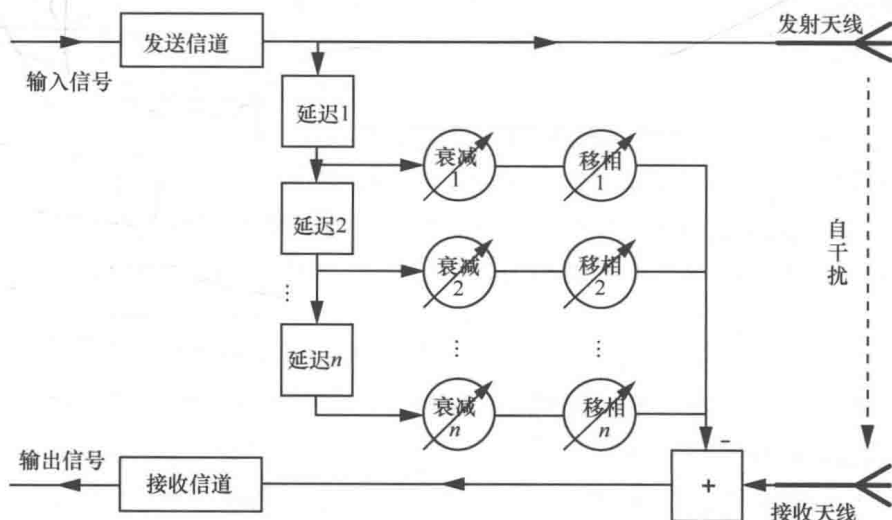


图 1-3 多抽头延迟滤波器结构的回声抵消电路

在随后的研究开发中,CCFD 技术在系统设计和理论上得到进一步深入、广泛的研究。1998 年 Chen 在博士论文中指出要想使接收机和发射机之间的 SI 隔离度增强,需要同时在模拟域和数字基带域内进行自干扰消除^[28]。Chen 当时设计的 CCFD 系统中使用的载波频率为 1.8 GHz,信号带宽为 200 kHz,测试结果表明,通过联合使用模拟消干扰和数字消干扰,他的系统能获得 72 dB 的干扰抑制能力,这比之前的自干扰消除能力有了较大的提升。与此同时,美国的专利“Self-cancelling Full-duplex RF Communication System”在无线通信系统的全双工中继的收发机中也综合采用了天线布置、模拟射频消除和数字消除 3 种方法的结合来抑制 SI,以实现中继功能^[29]。

最近几年,同频同时全双工技术引起了国内外学者的广泛兴趣,较早的实验方面的报道见于 2010 年斯坦福大学的 SCFD 演示。该实验基于 IEEE 802.15.4 (ZigBee) 协议开发了点对点的全双工双向通信系统,测试结果表明,节点的 SI 消除能力达到 73 dB,通信距离达到 2 m 左右^[30]。2011 年,斯坦福大学通过采用巴伦(Balun,非平衡变压器)器件设计干扰消除电路使得全双工系统获得了较好的宽带信号干扰消除效果,在 40 MHz 带宽内实现了 45 dB 的射频干扰消除^[31]。

2011 年,美国莱斯大学的研究人员也报道了 SCFD 的研究结果^[32-34],他们利用射频与数字联合的消除方法,实现了 39 dB 的干扰消除,并利用天线隔离技术增加了 39 dB 的干扰衰减,总的干扰抑制为 78 dB。莱斯大学的进一步研究表明,当双工干扰增大时,射频技术与数字技术的联合消除干扰能力也随之增强;但是,在射频干扰消除已经足够好的情况下,再加入基带干扰消除,反而可能导致残余干扰加大。由此得到一个重要结论,即射频干扰消除能力与基带消除能力并非总是相加的。他们将这个现象解释为基带干扰消除技术中的信道估计误差所致,为此提出一种自适应的基带干扰消除技术^[34]。他们的实验基于 IEEE 802.11 协议,实现了 64 个子载波、带宽为 10 MHz 的正交频分多址(Orthogonal Frequency Division Multiplexing,

OFDM) 系统, 总的干扰消除能力达到 80 dB。

2013 年斯坦福大学实现了高达 110 dB 的自干扰消除能力, 其中采用了射频多径的干扰消除技术。他们用环路器做收发共用的天线, 隔离度为 15 dB, 通过在电路板上蚀刻多条延迟线来实现延迟滤波器的结构, 通过程序来自动控制各个抽头幅度和相位, 使得射频模拟消干扰能力达到 65 dB, 再加上 30 dB 的数字消干扰能力, 总的干扰消除能力达到 110 dB^[35]。2014 年, 斯坦福大学又开发了 CCFD 方式的三发三收多入多出 (Multiple Input Multiple Output, MIMO) 系统, 实现了 20 MHz 带宽的 Wi-Fi 信号, 载波频率为 2.4 GHz, 环行器的自干扰抑制能力为 15 dB, 射频自干扰消除能力为 65 dB, 数字消干扰能力为 35 dB, 总的干扰消除能力达到 115 dB^[36]。这是目前公开发表的论文中最高的消干扰能力。

由于北京大学是最早 (2006) 提出 CCFD 方法的单位之一^[11], 这项技术在国内也得到较早的开发, 并实际见于 2009 年北京大学牵头的重大专项研发中。之后, 经过华为的传播, 国内出现了数家研发 CCFD 的单位。北京大学的室内 CCFD 演示系统于 2012 年完成, 它实现在 35 m² 房间内载波为 1.92 GHz, 带宽为 10 MHz 的可移动 CCFD 点对点的双向通信。在室外通信研发上, 北京大学设计了一种基于 GPS 同步的全双工基站, 并于 2013 年实现了 CCFD 的基站演示系统, 小区覆盖半径达到 50 m。为了进一步增到覆盖半径, 2014 年 11 月北京大学开发了当时通信距离最远的 CCFD 双向通信系统, 该系统由一个全双工基站和一个全双工终端组成, 通信距离达到 500 m, 其自干扰消除能力达到 120 dB 以上, 实际测试结果表明, 接收信号星座图清晰, 视频播放流畅^[37]。

2016 年北京大学的的全双工 Wi-Fi 系统演示成功, 能够将 Wi-Fi 系统的容量提升一倍, 而通信距离和传统 Wi-Fi 一样。同年, 北京大学提出一套 CCFD 同频组网方法, 它基于收发分置和波束成形的同频同时全双工无线蜂窝通信网络系统。该系统通信节点物理层基于 Wi-Fi 协议。系统由两个全双工基站和一个全双工移动站组成, 它在 2016 国际 NGMN (Next Generation Mobile Networks, 下一代