

1-3-2019

Channel Modeling and Networking Simulation of Full Duplex Communication

Zhimin Liu

EECS of Peking University, Beijing 100871, China;

Sun Jie

EECS of Peking University, Beijing 100871, China;

Jiarui Ding

EECS of Peking University, Beijing 100871, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Channel Modeling and Networking Simulation of Full Duplex Communication

Abstract

Abstract: Full duplex communication is a new wireless communicating technology for improving the spectrum efficiency substantially. Few researches study full duplex networking technology now nationally and internationally. *The architecture and implementation approach of full duplex communication system are introduced to describe the main model and functions of the platform in detail. After analyzing different kinds of self-interference cancellation technology, the self-interference cancellation module and channel model of full duplex system in the platform is built based on C language, which lays a foundation for prospective full duplex networking technology. Simulation results verify the platform's effectiveness, and present the spectrum efficiency and its major factors.*

Keywords

wireless communication, full duplex, channel model, system simulation

Recommended Citation

Liu Zhimin, Sun Jie, Ding Jiarui. Channel Modeling and Networking Simulation of Full Duplex Communication[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(5): 1631-1640.

同频同时全双工系统信道建模及组网仿真研究

刘志敏, 孙婕, 丁家瑞

(北京大学信息科学技术学院, 北京 100871)

摘要: 同频同时全双工技术是一种有效提高频谱效率的新型无线通信技术, 而目前国内外尚缺少对于全双工系统信道建模以及组网技术的研究。给出了同频同时全双工系统级仿真平台的体系框架, 描述了全双工系统级仿真平台的主要模块的功能及实现方法。分析了多种同频同时全双工系统的自干扰消除技术并建立了自干扰消除模型和传输信道模型, 基于 C 语言搭建了同频同时全双工系统级仿真平台, 为全双工系统的组网研究奠定了基础。仿真结果验证了同频同时全双工系统级仿真平台的有效性, 并给出了同频同时全双工系统的频谱效率及其主要影响因素。

关键词: 无线通信; 同频同时全双工; 信道模型; 系统仿真

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 05-1631-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201805002

Channel Modeling and Networking Simulation of Full Duplex Communication

Liu Zhimin, Sun Jie, Ding Jiarui

(EECS of Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Full duplex communication is a new wireless communicating technology for improving the spectrum efficiency substantially. Few researches study full duplex networking technology now nationally and internationally. The architecture and implementation approach of full duplex communication system are introduced to describe the main model and functions of the platform in detail. After analyzing different kinds of self-interference cancellation technology, the self-interference cancellation module and channel model of full duplex system in the platform is built based on C language, which lays a foundation for prospective full duplex networking technology. Simulation results verify the platform's effectiveness, and present the spectrum efficiency and its major factors.

Keywords: wireless communication; full duplex; channel model; system simulation

引言

第五代移动通信系统(通称 5G)是继 4G 移动通信技术 LTE 后的下一代技术的延伸和发展。中国、韩国、日本以及欧盟均投入了相当的资源研发 5G

相关技术和相应标准。目前, 5G 备选技术包括滤波组多载波、大规模天线阵列以及全双工复用^[1]等, 其中同频同时全双工技术作为一种新型的双工技术, 也受到关注。

蜂窝系统包括基站和用户, 传统的双工技术分为 TDD 和 FDD, 基站与用户同频不同时(TDD)或同时不同频(FDD), 而同频同时全双工是指发射信号和接收信号在相同的时间和频率上进行传输。由于使用相同的时频域资源, 因而存在发射信号对接收信号的干扰。其中, 基站发射信号对接收信号的



收稿日期: 2016-07-15 修回日期: 2016-08-27;
基金项目: 国家 863 计划(2012AA011401);
作者简介: 刘志敏(1963-), 女, 辽宁, 硕士, 副教授, 研究方向为无线通信与网络; 孙婕(1992-), 女, 北京, 硕士生, 研究方向为无线通信与信号处理; 丁家瑞(1989-), 男, 河南商丘, 硕士, 研究方向为无线通信与信号处理。

<http://www.china-simulation.com>

• 1631 •

干扰称之为自干扰。单基站情形下,若能完全消除自干扰,同频同时全双工系统的带宽频谱效率是 TDD 系统的两倍^[2]。

近十年来,学术界研究了多种自干扰消除技术。北京大学提出了同频同时全双工的概念及干扰消除方法并已获得发明专利^[2]。斯坦福大学综合分析了天线、射频及基带等三种干扰消除技术,总干扰消除能力达到 60 dB,并提出了天线干扰消除的新技术^[3]以及采用 Balun 方法的射频干扰消除技术^[4],使干扰消除能力提升至 70 dB;之后,又将天线消除技术拓展到多天线^[5]。莱斯大学将全双工系统由窄带拓展到宽带,分析了宽带全双工系统的性能^[6]。

综合运用天线、射频及基带信号处理等多种干扰消除技术,同频同时全双工系统的自干扰消除能力可以达到 100 dB^[7],使得全双工基站组网成为可能。因此,有必要针对同频同时全双工基站系统的组网问题进行研究。

目前,国内外针对这一问题进行的研究包括:纽约大学将全双工技术应用于微小区场景,提出了半双工和全双工混合调度机制,相对于传统半双工,该混合调度机制使系统容量提升 80%^[8];坦佩雷大学与哥伦比亚大学研究了半双工和全双工混合调度机制下的混合信道估计及最大数据传输速率范围^[9];俄亥俄州立大学建立了全双工网络仿真模型^[10]。

1 全双工系统级仿真平台框架

如图 1 所示,同频同时全双工系统组网环境下,除了存在传统 LTE 系统的各项干扰外,还存在基站与基站之间、用户与用户之间的相邻干扰,以及基站的发送信号对其接收信号的自干扰。基站的自干扰消除能力会影响全双工系统的频率效率,特别是系统上行链路的频谱效率。由于全双工系统信号间干扰的复杂性,需要通过系统仿真的方法,对同频同时全双工系统的组网性能及其影响因素进行研究。

通信系统的仿真平台一般分为链路级和系统级,链路级仿真对物理层进行建模,研究发射机到接收机点到点的链路;系统级仿真研究多基站、多用户,模拟分组调度和无线资源管理过程,分析系统吞吐量等参数。目前国内外还没有建立基于全双工基站组网的系统级仿真平台,也缺少综合多种干扰消除技术的自干扰消除模型以及全双工系统的信道模型。因此,本文在综合了已有的国内外关于同时同频全双工技术的论文和研究资料上,抽象出全双工技术的基本信道模型和设计参数,增设了全双工基站的自干扰消除模块,建立了同频同时全双工技术的系统级仿真平台,并以此为基础对全双工系统与传统的 LTE 系统的组网性能进行对比分析。

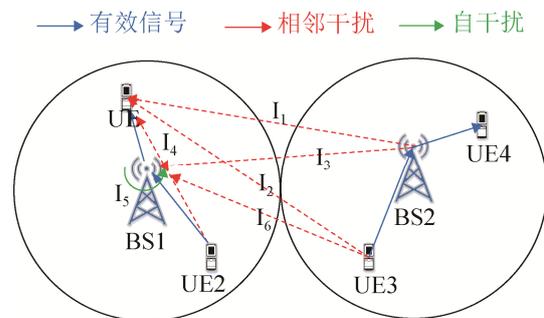


图 1 同时同频全双工系统干扰模型
Fig. 1 Interference model of full-duplex system

同频同时系统级仿真平台使用 C 语言编写,采用蒙特卡洛方法的半静态仿真。仿真是基于 drop, 在一个 drop 内,信道的大尺度衰落、UE 的移动速度和方向等是不变的,而在各个 drop 之间,信道是独立的。基站为全双工模式,用户为半双工模式。参考 3GPP TR 25.814 的 LTE 系统框架^[11]以及维也纳大学的基于 MATLAB 的 LTE 系统级仿真平台^[12],所设计的全双工系统级仿真平台的模块交互如图 2 所示,主要包括 eNodeB 配置模块、UE 配置模块、信道模块、MAC 子层模块、链路层映射模块、业务模块、接入控制模块、功率控制模块、结果处理模块。

上述各程序模块及功能如下:

(1) eNodeB(基站)配置。根据设定的小区数以

及仿真场景进行 eNodeB 配置, 生成各 eNodeB 的绝对坐标和相对位置关系。同频同时全双工系统小区采用六边形蜂窝结构, 各小区包含三个扇区, 位于某一小区的 UE 被认为受到外围小区的同频干扰。我们利用 wrap around 方法^[13], 为每个小区模拟外围的两层干扰, 用于计算邻区干扰。

(2) UE 配置。采用随机撒点方法确定 UE 的位置, 以及与移动模型有关的参量。

(3) 信道模块。基于几何统计建模的方法, 采用 ITU-R M.2135 协议中规定的信道模型。首先, 信道模块通过读取 eNodeB 和 UE 的信息获得其地理位置, 然后进行一般参数设定, 包括大尺度参数生成、小尺度参数生成、随机相位生成、时域系数生成和频域系数生成, 再将频域信道响应传输给链路映射模块。对 eNodeB 基站到 UE 的各个链路, 生成各个子载波上的频域响应, 并存储于信道矩阵变量中。针对同时同频全双工系统上行链路的基站自干扰项, 添加综合天线、射频以及基带的基站自干扰消除模型。

(4) 链路层映射模块。分为信道测量和 ACK 反馈两个子模块, 计算用户在各个资源块上的 SINR, 再根据用户调度的资源块计算用户的最佳 CQI。ACK/NACK 模块对该数据块进行 ACK/NACK 的反馈。信道测量周期进行信道测量, 反馈 CQI/PMI/RI。

(5) 业务模块: 生成业务请求及分配数据包。

(6) 接入控制模块。对接入请求队列中的用户进行接入控制; 如果允许接入, 则将该用户从接入请求队列中删除, 加入到接入成功队列。

(7) MAC 子层模块。同频同时全双工系统 MAC 层采用动态资源调度的方式, 保证边缘用户的数据速率, 提高系统容量。常用的调度算法有最佳载干比(Max-C/I)、随机轮转(RR)和比例公平(PF)算法。eNodeB 的 MAC 子层下行调度, 使对接入成功队列中用户的下行业务进行资源分配。如果某一数据块此前传输失败, 则重传该数据块直到达到最大重传次数 3 次; 如果某一数据块传输成功, 则

传输新的数据块。eNodeB 的 MAC 子层上行调度, 是对接入成功队列中的用户的上行业务进行资源分配。各个 UE 针对上行业务, 在其发送时隙向所在扇区的基站发出业务请求, 在相对应的接收时隙进行资源分配。

(8) 功率控制模块。上行业务传输时需要进行功率控制, 功率控制模块根据测量的 UE 的 SINR 进行开环或闭环功率控制。

(9) 结果处理模块。平台输出的统计结果包括用户的频谱效率、扇区频谱效率、系统丢帧率和数据帧的重传率。其中, 归一化扇区频谱效率为所有小区频谱效率的平均值。

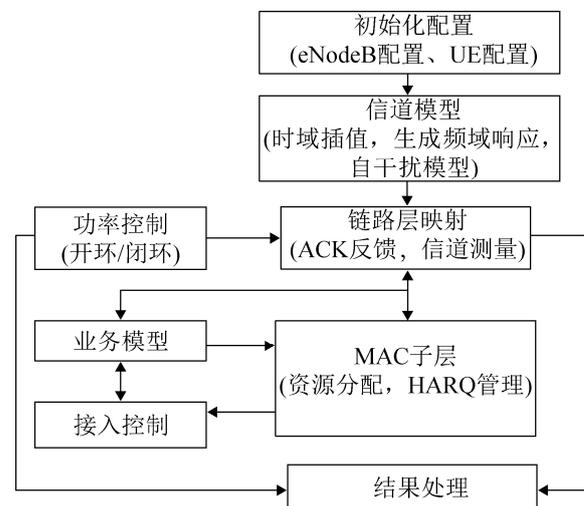


图 2 全双工仿真平台模块交互图

Fig. 2 Interaction diagram of modules of full-duplex simulation platform

其中, 各模块间的交互关系如下:

1. 信道模块通过调用 eNodeB 和 UE 距离计算函数, 读取 eNodeB 和 UE 配置参数, 计算路径损耗所需要的传输距离;

2. 信道模块生成信道矩阵全局变量, 可以让链路层映射等模块获得任意链路在任意子载波上的信道值;

3. 功率控制模块和链路层映射模块通过 UE 配置矩阵中的 SNR 测量变量进行交互: 链路层映射模块修改 SNR 测量值, 功率控制模块根据 SNR 测量值调节 UE 配置矩阵中的上行传输功率;

4. MAC 子层模块生成资源分配表，显示任意扇区在任意 RB 上的用户分配情况，用于链路层映射模块进行干扰分析和 ACK 反馈；剩余资源情况和平均传输速率表用于接入控制模块的资源利用分析；

5. 用户队列需要接入控制模块和业务模块共同维护，针对不同的业务，用户队列分为未请求用户队列、请求但未接入用户队列、接入成功(活动)队列三种。MAC 子层模块为接入成功的用户进行资源分配。

同频同时全双工系统仿真是由时间驱动的，仿真步长为 1 个子帧(TTI)，系统流程如图 3 所示。与传统的 LTE 系统相比，同频同时全双工系统的信道模型有所不同。其中，针对信道传输过程中会对基站信号接收产生严重干扰的基站自干扰项，所研究的自干扰消除技术，是同频同时全双工系统的技术核心模块。因此。本平台在北京大学“TD-LTE 系统级仿真平台”基础上^[13]，通过修改 LTE 系统的信道模型，并添加基站的自干扰消除模块实现建模仿真。关于自干扰消除模型和信道模型的有关内容，本文的后续部分将对之进行深入的分析。

2 同频同时全双工系统信道模型

2.1 非理想自干扰消除模型

自干扰是系统内部干扰，对于线性时不变系统，理想的自干扰是可以完全消除的。对于同频同时全双工设备来说，由于发射信号是已知的，接收机可以利用导频信号对收发信道进行估计。对于时不变系统，随着导频信号持续时间的增长，导频序列累计的能量增加，信道估计精度可以趋近于无穷高。因此，当接收机具备理想的发射信号和信道估计后，可以重建干扰信号，并将其从接收信号中减掉，以完全消除双工干扰。全双工干扰消除的实际困难主要在于实际系统并非线性时不变系统，并且发射机噪声包括热噪声及相位噪声等因素，恶化了接收机的信噪比。

同频同时全双工系统中自干扰消除是必要的，主要分为三个过程：天线自干扰消除、射频自干扰消除以及基带自干扰消除。平台的信道建模过程整合这三方面的自干扰消除，计算全双工系统的自干扰消除水平。

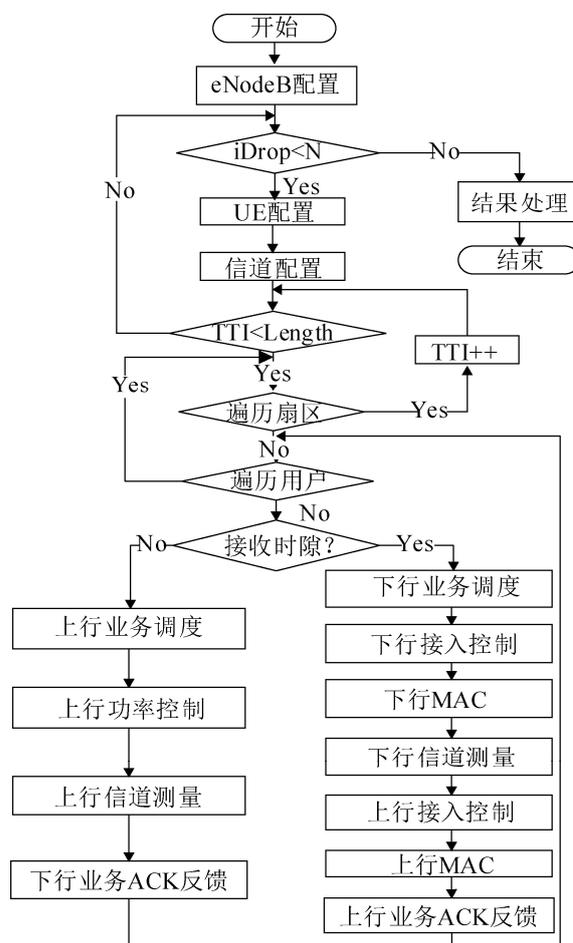


图 3 同频同时全双工仿真流程
Fig. 3 Simulation process of full-duplex system

自干扰抑制能力 G 定义为：

$$G = -10 \lg \frac{E_I + E_N}{E_r + E_N} \quad (1)$$

式中： E_I 为自干扰的能量， E_r 为残余干扰的能量， E_N 为噪声能量。

假设起始信噪比(也即干扰噪声比)为 S/N ，首先天线自干扰抑制能力为 $G_{Antenna}$ (正数)，则根据天线干扰消除技术的两发一收天线消除模型^[3]，天线自干扰消除水平为

$$G_{Antenna} = 10 \lg \frac{2A_{ant} (A_{ant} + \varepsilon_{ant}^A) \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} \left(\varepsilon_{ant}^d + \frac{1}{4} \left(\frac{c}{f_0 - BW/2} - \frac{c}{f_0} \right) \right) \right) \right)}{2A_{ant}^2} + (\varepsilon_{ant}^A)^2 \quad (2)$$

式中: A_{ant} 是基带信号幅度; ε_{ant}^A 是两根发射天线的信号强度的差值; ε_{ant}^d 代表实际天线放置情况与理想状态相比位置误差; f_0 为中心频率; BW 代表带宽; c 是指光速。

经过天线干扰消除, 进入射频自干扰消除模块的噪声干扰比 NIR_{PF} 可以表示为:

$$NIR_{PF} = \left(10^{-\frac{G_{Antenna}}{10}} (1 + S/N) - 1 \right)^{-1} \quad (3)$$

假设射频自干扰抑制能力为 G_{PF} , 射频域的自干扰消除模型^[14]原理是将发射天线发出的信号在时延和幅度上进行调整, 重建该发射(自干扰)信号, 然后在接收端进行相减以达到自干扰消除效果, 则射频部分可达到的自干扰消除能力 G_{PF} 满足

$$G_{PF} = -10 \lg \frac{1 + \left(10^{-\frac{G_{Ant}}{10}} (1 + S/N) - 1 \right)^{-1}}{\frac{E_r}{E_l} + \left(10^{-\frac{G_{Ant}}{10}} (1 + S/N) - 1 \right)^{-1}} \quad (4)$$

经过天线和射频两端的自干扰消除, 到达基带的自干扰信号已经很小, 从射频模块进入基带模块的噪声干扰比 NIR_{BB} 可以表示为:

$$NIR_{BB} = \left(10^{-\frac{G_{Ant} + G_{PF}}{10}} (1 + S/N) - 1 \right)^{-1} = \frac{1}{INR_{BB}} \quad (5)$$

最后, 数字基带部分根据^[15], 自干扰消除水平为:

$$G_{BB} = \begin{cases} \max \left(\min \left(-NIR_{BB} (dB), \frac{1}{2} (33 - G_{PF}) \right), 0 \right) \\ \text{if } G_{PF} \leq 40 \\ \max \left(\min \left(-NIR_{BB} (dB), \frac{1}{2} (33 - (G_{PF} - 40)) \right), 0 \right) \\ \text{if } G_{PF} > 40 \end{cases} \quad (6)$$

式中: INR 表示干扰噪声比 (Interference Noise Ratio)。

总干扰抑制能力为:

$$G = 10 \lg \frac{E_{l, Ant} + E_N}{E_{r, BB} + E_N} = G_{Ant} + G_{PF} + G_{BB} \quad (7)$$

这里主要讨论非理想情况下自干扰消除模型, 综合天线、射频、基带三部分的非理想自干扰消除的结果, 研究天线距离、频率、功率等参数对自干扰消除的效果。

2.2 信道模型

全双工系统信道模型通过描述无线通信系统的空间信道环境, 模拟出信道的基本特性。信道模块首先根据基站和用户信息模拟出空间信道环境的基本地理特征, 然后根据相应的参数生成对应的大尺度模型、小尺度模型、随机相位和相关时频域系数, 再将其交付链路层映射。

链路级映射根据信道模块提供的各链路响应, 首先计算各个子载波的 $SINR$, 并确定 CQI 等级。全双工系统中, 影响子载波的干扰除了 LTE 系统已有干扰外, 还包括本基站用户干扰、相邻基站发射干扰、相邻基站用户干扰以及基站的自干扰等。同时同频全双工系统干扰模型如图 1 所示。

设第 i 个基站发射的信号功率为 $P_{BS,i}$, 信号为 $S_{BS,i}$, 到达接收端所在基站的信号链路信道在该子载波上的频域响应为 h_{BS_i, BS_i} , 到达接收端的信号链路信道在该子载波上的频域响应为 $h_{BS_i, UE_{j'}}$, i' 表示目标基站的编号, j' 表示目标用户的编号。 $P_{BS,i'}$ 表示目标基站的发射功率, $S_{BS,i'}$ 表示目标基站的发射信号。第 j 个用户发射的信号功率为 $P_{UE,j}$, 信号为 $S_{UE,j}$, 到达所在基站信号链路的信道在该子载波上的频域响应为 $h_{UE_j, BS_{i'}}$, 到达接收端信号链路的信道在该子载波上的频域响应为 $h_{UE_j, UE_{j'}}$ 。 $P_{UE,j'}$ 表示目标用户的发射功率, $S_{UE,j'}$ 表示目标用户的发射信号, SIC 表示自干扰信号功率消除能力。由于上下行信道具有对称性, 目标信号的信道

频域响应为 h_0 。下面依据这些参数分别对上下行 $SINR$ 进行计算。

上行基站端接收信号可以表示为：

$$y = h_0 S_{UE,j} + \sum_{i \in N_{sector}} h_{BS_i, BS_i'} S_{BS,i} + \sum_{j \in interfUE} h_{UE_j, BS_i'} S_{UE,j} + S_{BS,i'} / SIC_{Amp} + n \quad (8)$$

则接收信号通过检测后得到：

$$y' = S_{UE,j'} + \sum_{i \in N_{sector}} \frac{h_{BS_i, BS_i'}}{h_0} S_{BS,i} + \sum_{j \in interfUE} \frac{h_{UE_j, BS_i'}}{h_0} S_{UE,j} + \frac{S_{BS,i'}}{h_0 \cdot SIC_{Amp}} + \frac{n}{h_0} \quad (9)$$

式中：等式右侧第一项为接收目标信号，第二项为其它基站干扰，第三项为所有其它扇区内的上行用户的干扰信号，第四项为次干扰消除信号，第五项为噪声，因此可得信噪比为：

$$SINR = \frac{|h_0|^2 P_{UE,j'}}{\sigma^2 + \sum_{i \in N_{sector}} |h_{BS_i, BS_i'}|^2 P_{BS,i} + \sum_{j \in interfUE} |h_{UE_j, BS_i'}|^2 P_{UE,j} + P_{BS,i'} / SIC} \quad (10)$$

式中： σ^2 为噪声功率。

设下行用户接收信号可以表示为：

$$y = h_0 S_{BS,i'} + \sum_{i \in N_{sector}} h_{BS_i, UE_j'} S_{BS,i} + \sum_{j \in interfUE} h_{UE_j, UE_j'} S_{UE,j} + n \quad (11)$$

接收信号经过检测后得到：

$$y' = S_{BS,i'} + \sum_{i \in N_{sector}} \frac{h_{BS_i, UE_j'}}{h_0} S_{BS,i} + \sum_{j \in interfUE} \frac{h_{UE_j, UE_j'}}{h_0} S_{UE,j} + \frac{n}{h_0} \quad (12)$$

式中：等式右侧第一项为接收目标信号，第二项为其它基站对接收端下行干扰，第三项为全双工条件下，扇区内上行用户的干扰，第四项为噪声。由于其他小区内用户的发射干扰功率较小，非视距路损较大，故该干扰项此处暂忽略不计。

由此得到信噪比为：

$$SINR = \frac{|h_0|^2 P_{BS,i'}}{\sigma^2 + \sum_{i \in N_{sector}} |h_{BS_i, UE_j'}|^2 P_{BS,i} + \sum_{j \in interfUE} |h_{UE_j, UE_j'}|^2 P_{UE,j}} \quad (13)$$

式中： σ^2 为噪声功率。

已知各子载波的 $SINR$ ，根据指数有效信噪比映射算法^[13]，计算 AWGN 信道下的等效 SNR ，如公式(14)。

$$SNR_{awgn} = -\beta \ln \left(\frac{1}{K_{sub}} \sum_{i=1}^{K_{sub}} \exp \left\{ -\frac{1}{\beta} SINR_i \right\} \right) \quad (14)$$

式中： K_{sub} 为子载波数， β 由 CQI 等级确定。

采用文献[16]给出的结果实现 SNR 到 CQI 的映射。图4是在 AWGN 环境中 $BLER=10\%$ 的情况下， SNR 到 CQI 的映射曲线。通过对图4中的曲线进行量化，可以实现将某一 SNR 映射到对应的某一 CQI 上。

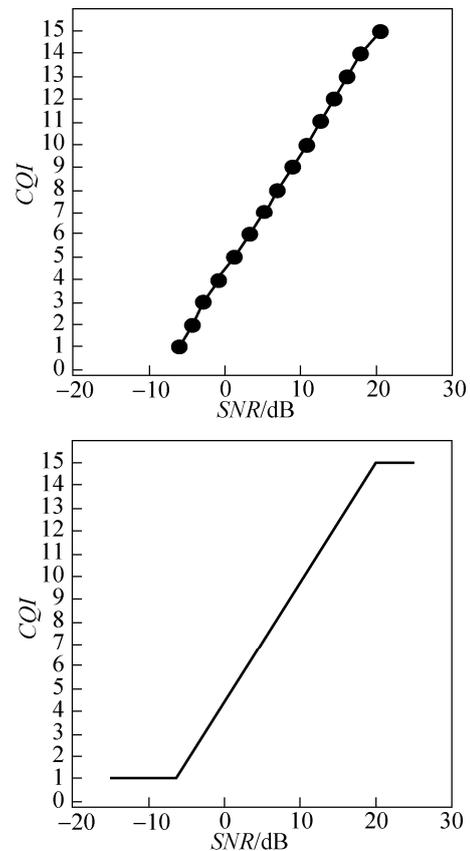


图4 SNR 和 CQI 映射关系^[16]

Fig. 4 Mapping relation between SNR and CQI ^[16]

此外, 文献[16]还给出了通过系统仿真得到的 AWGN 物理层信道中不同 CQI 水平上 SNR 和误块率 $BLER$ 的对应曲线, 如图 5 所示。对图中曲线上的数据点进行量化并存储, 由此建立从 SNR 到 $BLER$ 的映射关系。

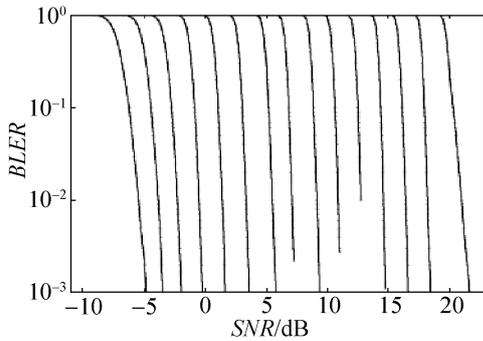


图 5 误块率和 SNR 曲线($CQI1$ (左)~ $CQI15$ (右))
Fig. 5 $BLER$ and SNR curves($CQI1$ (L)~ $CQI15$ (R))

3 典型场景的性能分析

同频同时全双工系统级仿真界面采用 WINDOWS 控制台, 操作界面如图 6 所示, 可以人工选择仿真时间、基站类型、站间距、基站用户发射功率比以及用户数等参数, 以测试不同参数对系统频谱效率的影响。

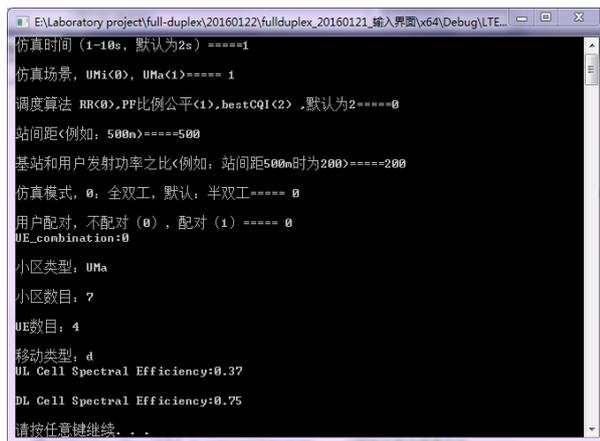


图 6 同频同时全双工系统级仿真平台操作界面
Fig. 6 Operation interface of full-duplex system simulation platform

同频同时全双工系统的组网性能, 主要指标是系统的频谱效率, 而非理想的自非理想的自干扰能力是影响频谱效率的主要因素, 通过仿真方法, 设

置天线位置偏差、天线信号功率以及基带干扰器件性能等, 仿真分析干扰消除技术与组网性能之间的关系。

同时同频全双工仿真场景如表 1 所示, 其中天线采用 2×1 SIMO 模式。

表 1 全双工仿真典型场景
Tab. 1 Typical scene of full-duplex simulation

参数	数值
系统带宽	10 MHz
小区个数	7
扇区用户数	4
信道模型	3GPP 36.828
HARQ 时延	3 ms
小区半径	200 m
业务模型	FULLBUFFER

首先, 我们给出了同频同时全双工系统中用户的信干噪比的 CDF 分布, 并与 TD-LTE 系统用户 $SINR$ 分布进行对比, 仿真结果如图 7 和图 8 所示。

由图 7 可以看出, 同频同时全双工系统中, 用户上行信号由于受到相邻基站发射信号的干扰, 导致 $SINR$ 整体性的下降。同时, 处于小区边缘的用户受到同一地区相邻基站的用户发射信号的干扰, 令边缘用户信噪比进一步恶化, 从而导致系统整体上行频谱效率的降低。

图 8 是同频同时全双工系统的用户下行 $SINR$ 分布。由图中可以看出, 由于下行链路中存在用户间发射信号的同频干扰, 导致用户 $SINR$ 有不同程度的下降, 这一点在文献[17]中有充分论述。部分用户由于受到邻近用户发射信号严重的同频干扰, 导致 $SINR$ 大幅下降。用户间干扰通过有效的分组和资源分配策略, 理论上是可以进行有效抑制的。

其次, 仿真分析了同频同时全双工系统的频谱效率, 并与 TD-LTE 系统的频谱效率进行对比。仿真共进行三次, 结果如表 2 所示。

通过表 2 可以看出, 同频同时全双工系统的频谱效率为 1.15 bps/Hz, 而 TD-LTE 系统的上下行归一化频谱效率为 $1.00 \times 0.4 + 1.02 \times 0.6 = 1.01$ bps/Hz (TDD 系统的上下行时隙配比为 4: 6), 系统频谱

效率与 3GPP TR 36.814 给出的参数一致，满足标准要求。相比 TD-LTE 系统，同时同频全双工系统频谱效率提升 13.9%。

于全双工系统中的上下行链路干扰更为复杂，导致边缘用户信道质量进一步恶化，进而造成用户频谱效率下降。

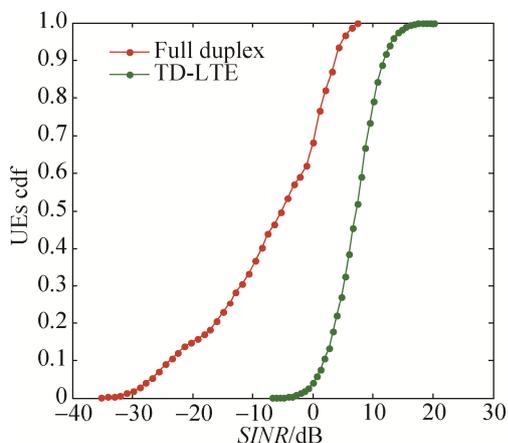


图 7 用户上行 SINR 分布
Fig. 7 Uplink SINR distribution of users

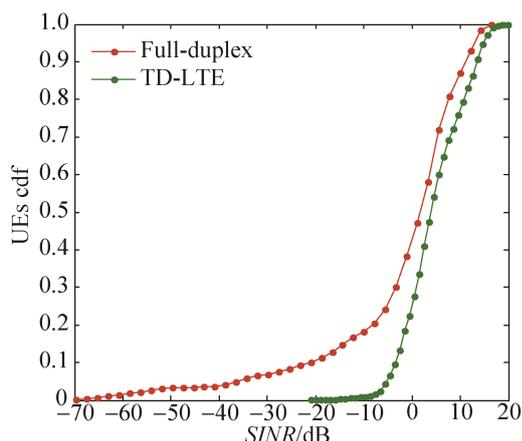


图 8 用户下行 SINR 分布
Fig. 8 Downlink SINR distribution of users

表 2 系统频谱效率比较

Tab. 2 Comparison of system spectrum efficiency

模式	频谱效率 (bps/Hz)			
	第一次	第二次	第三次	平均
TD-LTE 上行	1.08	0.98	0.94	1.00
TD-LTE 下行	1.08	0.95	1.02	1.02
全双工	1.23	1.07	1.15	1.15

图 9 是同频同时全双工系统用户频谱效率分布与 TD-LTE 系统用户归一化频谱效率分布的对比。从中可以看出，同频同时全双工系统用户的频谱效率相对于 TD-LTE 系统整体有所提高，但是部分信道质量较差的用户频谱效率有所下降。这是由

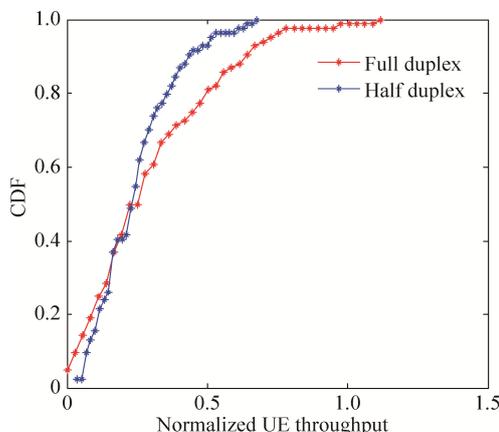


图 9 全双工与 TD-LTE 系统用户频谱效率分布对比
Fig. 9 Comparison of spectrum efficiency distribution of users between full-duplex and TD-LTD

单基站情形下，同频同时全双工通信系统不存在 7 小区情形下的相邻基站干扰。理论上，单基站同频同时全双工系统频谱效率是 TD-LTE 基站系统的两倍。因此，我们针对这一情形进行了仿真。仿真结果表明，单基站情形下，同频同时全双工系统上行频谱效率 1.03 bps/Hz，下行频谱效率为 1.09 bps/Hz，系统整体频谱效率为 2.12 bps/Hz，约为 TD-LTE 系统频谱效率的两倍。这与理论分析的结果相吻合，证明同频同时全双工系统级仿真平台的仿真结果是可靠而有效的。

另一方面，在自干扰消除模型中，自干扰抑制能力 G 是影响系统频谱效率的重要参数，而影响自干扰抑制能力 G 的主要参数是天线位置误差、信号幅度误差。因此，这里首先对天线位置误差和信号幅度误差对自干扰抑制能力 G 进行仿真分析，然后分析天线位置误差和信号幅度误差对系统频谱效率的影响，最后分析了自干扰抑制能力 G 的干扰消除水平对系统频谱效率的影响。

图 10 的 X 轴坐标是发射天线间距与半波长之差，纵坐标是接收信号的自干扰消除能力 G 。图 11 的 X 轴坐标是发射天线信号幅度的误差比例，纵坐标是自干扰抑制能力 G 。由两图可以看出，随

随着天线位置误差以及信号幅度误差的增加, 自干扰消除能力 G 随之下降。在带宽为 10 MHz 时, 信号幅度误差在 0%~15% 区间或天线位置误差在 1~4 mm 时自干扰消除能力处于 85~115 dB 之间, 基本满足了基站自干扰消除水平的要求。

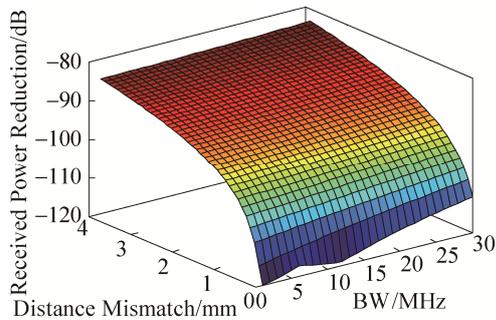


图 10 天线位置误差对自干扰抑制能力的影响
Fig. 10 Influence of deviation of antenna position on self-interference suppression ability

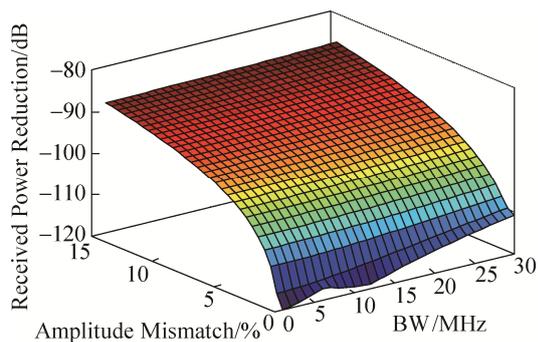


图 11 信号幅度误差对自干扰抑制能力的影响
Fig. 11 Influence of deviation of signal amplitude on self-interference suppression ability

图 12 是不同的天线位置与信号幅度误差对同频同时全双工系统上行频谱效率的影响。从图 12 可以看出, 随着天线位置误差以及幅度误差的增大, 系统自干扰消除量逐渐降低, 系统频谱效率也随之逐渐降低。

最后, 我们分析不同水平的自干扰抑制能力 G 对于同频同时全双工系统频谱效率的影响。图 13 是同频同时全双工系统上下行频谱效率随着不同的自干扰抑制能力 G 水平的变化曲线。

由图 13 可以看出, 上行频谱效率随着自干扰消除能力的增加而不断提高, 逐渐趋近于一定稳定值。在基站小区覆盖半径 200 m 的情况下, 当自干

扰消除能力在 75~85 dB 范围, 频谱效率增长得较为明显, 而后增长速度减缓趋于稳定。

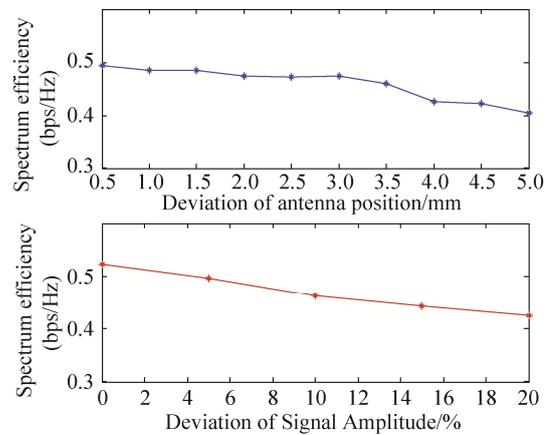


图 12 天线位置与信号幅度误差对上行频谱效率影响
Fig. 12 Influence of deviation of antenna position and signal amplitude on uplink spectrum efficiency

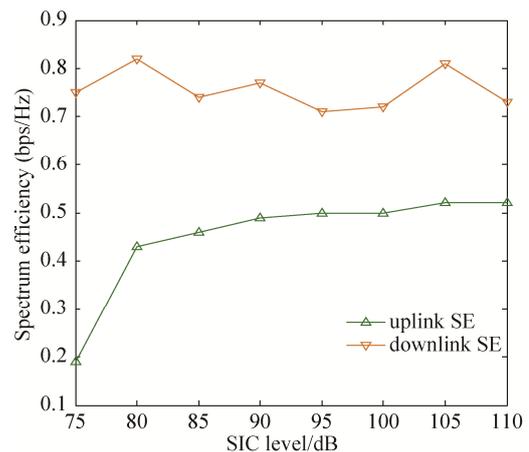


图 13 自干扰消除水平与系统频谱效率变化
Fig. 13 Relation between self-interference suppression ability and system spectrum efficiency

4 结论

同频同时全双工技术作为 5 G 移动通信标准的重要候选技术, 无论是技术本身或是组网策略都有着相当的复杂度, 处于需要进一步研究探索的状况。因此, 全双工系统级仿真平台对其性能的评估以及相关技术的研究具有重要意义。本文参考 LTE 系统模型, 融合同频同时全双工干扰消除技术的特点, 搭建了全双工系统级仿真平台, 分析了测试模式下仿真得到的结果并将其与 3 GPP 给出的指标进行验证, 证明了平台的有效性。同时, 根据同频

同时全双工技术的技术特点,通过理论分析,提出了全双工系统组网的典型场景,并分析了不同条件下系统仿真的性能结果。

本平台对研究同频同时全双工技术具有重大意义,利用本平台可分析不同的组网方案、自干扰消除能力对频谱效率的影响以及 TD-LTE 和全双工之间的转换策略,以提高全双工系统的频谱效率。对于未来竞争 5G 移动通信标准也能起到促进作用。

参考文献:

- [1] 尤肖虎, 潘志文, 高西奇, 等. 5G 移动通信发展趋势与若干关键技术[J]. 中国科学·信息科学. 2014, 44(5): 551-563.
You xiao-hu, Pan zhi-wen, Gao xi-qi, et al. The Development Trend of 5G Mobile Communication and Some Key Technologies[J]. Science Chinese-Information Science, 2014, 44(5): 551-563.
- [2] 焦秉立, 马猛. 同频同时全双工技术浅析[J]. 电信网技术, 2013, 11(11): 29-32.
Jiao bing-li, Ma meng. Analysis of Co-frequency Co-time Full Duplex Technologies[J]. Telecommunications Network Technology. 2013, 11(11): 29-32.
- [3] JI CHOI, M JAIN, K SRINIVASAN, et al. Achieving Single Channel, Full Duplex Wireless Communication[C]// Proceedings of the 16th annual international conference on Mobile computing and networking, Chicago, 2010, 49(1): 1-12.
- [4] M JAIN, J CHOI, T KIM, et al. Practical, real-time, full duplex wireless[C]// Proceedings of the 17th annual international conference on Mobile computing and networking, Las Vegas, 2011: 301-312.
- [5] J CHOI, S HONG, P LEVIS, et al. Beyond Full Duplex Wireless[C]// Proceedings of Asilomar, Pacific Grove CA, 2012: 40-44.
- [6] A SAHAI, G PATEL, A SABHARWAL. Pushing the limits of Full-duplex: Design and Real-time Implementation[R]. Arxiv preprint arXiv: 1107.0607, 2011.
- [7] 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 & Information Technology. 2014, 36(6): 1435-1440.
- [8] S GOYAL, Pei LIU, S PANWAR, et al. Improving small cell capacity with common-carrier full duplex radios[C]// IEEE International Conference on Communications (ICC), Sydney, 2014: 4987-4993.
- [9] D KORPI, T RIIHONEN, M VALKAMA. Achievable Rate Regions and Self-interference Channel Estimation in Hybrid Full-Duplex/Half-Duplex Radio Links[C]// Information Sciences and Systems (CISS), 2015: 1-6.
- [10] W ZHOU, K SRINIVASAN. SIM+: A simulator for full duplex communications[C]// Signal Processing and Communications (SPCOM), 2014: 1-6.
- [11] 3GPP TR25.814 V9.0.0. Physical layer aspects for evolved Universal Terrestrial Radio Access[S]. 2010: 83-86.
- [12] 周文安, 陈微, 陈思, 等. 基于 MATLAB 的 LTE 仿真平台 CoMP 功能的设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(11): 2260-2263.
Zhou Wen-an, Chen Wei, Chen Si, et al. Design and Implementation of CoMP Function Based on LTE Simulation Platform Running on MATLAB[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(11): 2260-2263.
- [13] 何金薇, 丁璐, 刘志敏. LTE 系统级仿真建模实现及其优化[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(22): 104-107.
He jin-wei, Ding lu, Liu zhi-min. Realization and Optimization of LTE System Level Simulation Modeling[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(22): 104-107.
- [14] 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 & 实验验证[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(3): 662-668.
Xu qiang, Quan xin, Pan wen-sheng, et al. Analysis and Experimental Verification of RF Self-interference Cancellation for Co-frequency Co-time Full Duplex LTE[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2014, 36(3): 662-668.
- [15] M Duarte, C Dick, A Sabharwal. Experiment-Driven Characterization of Full-Duplex Wireless Systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication (S1536-1276), 2012, 11(12): 4296-4307.
- [16] Mehlhfuhrer C, Wrulich M, Ikuno J C, et al. Simulating the long term evolution physical layer[C]// Signal Processing Conference 17th European, 2009: 1471-1479.
- [17] Yang-Seok Choi, Hooman Shirani-Mehr. Simultaneous Transmission and Reception: Algorithm, Design and System Level Performance[J]. IEEE Transactions On Wireless Communications (S1536-1276), 2013, 12(12): 5992-6010.