

国家自然科学基金重点项目 (项目编号: 61631009) 支持出版

No Division Duplex

同时同频全双工 原理与应用

唐友喜 著



科学出版社

国家自然科学基金重点项

)支持出版

同时同频全双工原理与应用

唐友喜 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

目前,无线通信、雷达、无线电导航等电子设备工作的稳定性主要取决于其电磁波频谱资源指标是否满足设计要求。然而,随着单位面积内电磁波发射设备的不断增加,原本有限的电磁波频率资源越发枯竭,极大地限制了相关技术的发展与应用。同时同频全双工技术等相当于将现有的电磁波频谱量增加一倍,是解决当前电磁频谱资源匮乏的一种有效方案。

全书共7章,内容包括需求与挑战、自干扰信道、空域自干扰抑制、模拟域自干扰抑制、数字域自干扰抑制、自干扰抑制链路优化及同时同频全双工的典型应用。

本书可作为高等院校无线通信、雷达、电子等通信与电子系统专业高年级本科生、研究生的教材或参考书,同时适合从事相关专业教学与研究的教师与科技工作者阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

同时同频全双工原理与应用/唐友善著. — 北京:科学出版社, 2016.3

ISBN 978-7-03-046919-9

I. ①同… II. ①唐… III. ①双工传输—研究 IV. ①TN919.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 004884 号

责任编辑:杨 岭 黄明冀 / 责任校对:杨悦蕾

责任印制:余少力 / 封面设计:墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

成都创新包装印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年3月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2016年3月第一次印刷 印张:12

字数:240千字

定价:109.00元

序

近半个世纪以来，通信理论和技术飞速发展，不断演进的通信系统不论是给人们的工作还是生活都带来了极其深刻的变革。然而，全球通信用户爆炸式地增长以及对通信需求的不断提高，使得原本就不可再生的频谱资源变得极其紧张。因此，提高频谱效率以更好地满足日益增长的数据速率的需求是新一代无线通信系统迫切需要解决的问题。

令人振奋的是，在先进的传输、天线和信号处理技术的推动下，一种可以在同一时间使用同一频率发送和接收信号的全双工技术应运而生。全双工技术克服了传统设备只能在相互正交的频率或者时间资源上分别发送和接收信号所带来的资源利用率低的缺点，直接将资源利用率提升了一倍，在实际通信系统中更好地逼近了香农容量。这种优势，在一定程度上解决了未来通信技术对于高频谱效率的需求，具有广阔的应用前景。例如，在中继系统中，传统的半双工技术由于使用正交的资源分别发送和接收信号，使得系统的容量与直接端到端的传输相比有所降低。而全双工技术，在同一时间复用同一频率，能够更加有效地实现端到端之间的通信，提供更高的频谱效率，并且理论上可以使中继系统的容量提高一倍，这在以基站作为中继的蜂窝系统中是极其关键且值得关注的。

然而，全双工技术带来的一个核心的问题就是自干扰的消除。这是一种设备自身发送信号对其接收信号造成的干扰。理论上，设备知道发送信号，是可以将干扰消除的，但实际上，由于发送信号比接收信号强几十甚至上百个 dB，同时又有同步等问题，精确地干扰消除实现难度较大。因而，全双工自干扰的消除技术需要大量的理论研究和实验测试验证。庆幸的是，唐友喜教授带领其团队走到了国际的前沿，他花费了大量精力对其成果进行了总结，所撰写的这本《同时同频全双工原理与应用》对全双工技术特别是自干扰消除技术进行了详尽的论述和总结，从理论研究和工程实践两方面给出了定性和定量的分析，弥补了国内甚至国际在这一研究领域的缺失。因此，本书的问世对于该领域的研究者和工程师就显得尤为珍贵。

本书从通信系统的需求和挑战入手，详细分析了全双工技术的应用背景，给出了全双工自干扰信道模型，清晰地阐述了在空域、模拟域和数字域中自干扰的抑制问题。同时，作者结合实际场景，全面地给出了全双工技术的典型应用。相

信这本专著会对全双工技术的研究和应用产生积极的推动作用。我们期望并相信这本专著给我们的工作带来惊喜。

任品毅

2016年3月3日

前 言

好用的频谱资源近乎枯竭。当前,研制一套新型的电磁波发射接收设备,最关键的不是用户是否需要,也不是技术指标,而是是否能从国家无线电管理委员会申请到这种新型电磁波收发设备的使用频率。

同时同频全双工在相同的时间及频率上,使用相同的传播介质和同一套设备,同时发射、接收电磁波信号。同时同频全双工与已有的双工方式相比,频谱效率提高了一倍,等效于把现有的频率资源提高了一倍,具有广阔的应用前景!

作者从 2003 年开始从事同频自干扰抑制的理论研究与工程验证。2012 年之后,先后完成蜂窝移动通信、微波接力、同轴电缆等多个同时同频全双工通信原型实验验证系统,多次受大学、研究所、专业工厂邀请做同时同频全双工的理论与应用方面的报告。也受多位好友、同行催促,希望能尽早出版一本有关同时同频全双工的书。

经电子科技大学通信抗干扰技术国家重点实验室唐友喜团队 10 位教师、9 位博士研究生的共同努力,拟以 7 章内容解析同时同频全双工的原理,分析工程误差对同时同频全双工性能的影响,并给出了一些可能的应用案例。

(1)第 1 章,需求与挑战。分析当前无线通信面临的频谱资源背景与需求,讨论需要解决哪些问题。从理论上,非线性信号的解析、重建与抵消是同时同频全双工最关键的三个难题。

(2)第 2 章,自干扰信道。针对收发天线共用、独立两种方式,分析同时同频全双工自干扰信道的特征。

(3)第 3 章,空域自干扰抑制。当收发天线共用时,依靠环形器进行收发天线隔离。主要讨论收发天线独立时如何有效实施收发天线隔离。

(4)第 4 章,模拟域自干扰抑制。讨论了单抽头、多抽头模拟域自干扰抑制方法,分析数字预处理辅助的模拟域自干扰抑制,给出了一种自混频模拟自干扰抑制方法,并介绍了模拟域自干扰抑制涉及的移相器、延时器、衰减器及放大器这 4 个关键部件的机理。

(5)第 5 章,数字域自干扰抑制。讨论时域、频域自干扰抑制方法,分析幅度、时延、相位误差对数字域自干扰抑制能力的影响。

(6)第 6 章,自干扰抑制链路优化。分析 DAC、ADC 量化误差及相位噪声对自干扰抑制链路的影响,讨论自干扰抑制的非线性问题,给出一种同时同频全双工自干扰抑制链路的优化方法。

(7)第7章,典型应用。分析同时同频全双工在无线通信、超级线缆、电子战、电磁测量、电磁兼容等方面的应用。

本书从提纲到成稿,用时两年。感谢所有对本书出版做出贡献的人。

邵士海教授负责本书的审校。沈莹副教授、潘文生博士、徐强博士为本书提供了部分实验结果。黄川教授、赵宏志副教授、符初生副教授、王传丹副教授、马万治博士校正了本书部分章节。

刘东林博士负责材料的收集、整理,花费了大量的时间与精力;何昭君、鲁宏涛、吴翔宇、全欣、刘颖、王俊、张志亮、梁青鹏等几位博士的研究为本书提供了关键内容。

由于作者水平有限,不妥之处在所难免,望读者批评指正,反馈意见,以便本书再版时补充及修改。邮箱: tangyx@uestc.edu.cn。

唐友喜

2015年6月6日

目 录

第 1 章 需求与挑战	1
1.1 场景与需求	1
1.2 同时同频全双工	2
1.3 历史与现实	3
1.4 问题与挑战	6
1.5 内容与安排	9
参考文献	10
第 2 章 自干扰信道	12
2.1 收发天线共用	12
2.2 收发天线独立	13
2.3 自干扰信道模型	14
参考文献	15
第 3 章 空域自干扰抑制	16
3.1 收发天线共用	16
3.2 收发天线独立	17
3.2.1 非对称天线布置	18
3.2.2 对称天线布置	21
3.3 小结	22
参考文献	23
第 4 章 模拟域自干扰抑制	25
4.1 引言	25
4.2 单抽头自干扰抑制	26
4.2.1 自干扰抑制性能	28
4.2.2 等效移相器自干扰抑制	30
4.2.3 工程误差影响	33
4.3 多抽头自干扰抑制	37
4.4 数字预处理辅助自干扰抑制	39
4.4.1 系统模型	40
4.4.2 自干扰抑制过程	41
4.5 自混频自干扰抑制	43

4.5.1	系统模型	43
4.5.2	性能分析	45
4.5.3	工程误差影响	47
4.5.4	数字与仿真结果	48
4.5.5	多径自干扰抑制	50
4.6	关键部件	51
4.6.1	移相器	51
4.6.2	衰减器	59
4.6.3	延时器	65
4.6.4	信号放大器	67
	参考文献	73
第5章	数字域自干扰抑制	75
5.1	时域自干扰抑制	76
5.1.1	系统模型	76
5.1.2	自干扰抑制能力	79
5.1.3	自干扰信道估计特点	81
5.1.4	自干扰信道估计	82
5.2	自干扰重建误差影响	87
5.2.1	延时误差	88
5.2.2	幅度误差	88
5.2.3	相位误差	88
5.3	频域自干扰抑制	90
5.3.1	系统模型	90
5.3.2	自干扰抑制效果	93
5.3.3	结果讨论	94
	参考文献	97
第6章	自干扰抑制链路优化	98
6.1	自干扰抑制的目标	99
6.1.1	自干扰信号的影响	99
6.1.2	自干扰抑制能力需求	101
6.1.3	目前工程上的自干扰抑制能力	102
6.2	量化误差影响	104
6.2.1	DAC 量化误差影响	105
6.2.2	ADC 量化误差影响	105
6.3	相位噪声影响	113
6.3.1	自干扰信号中的相位噪声模型	114

6.3.2	相位噪声对自干扰抑制能力的影响	116
6.3.3	相位噪声对自干扰信道估计的影响	120
6.4	非线性效应	127
6.4.1	非线性失真功率	128
6.4.2	非线性信号抑制	133
6.5	自干扰抑制链路优化	137
6.5.1	链路模型	137
6.5.2	发射通道	137
6.5.3	传播信道	140
6.5.4	自干扰重建通道	142
6.5.5	接收通道	143
6.5.6	发射机输出采集通道	146
6.5.7	链路预算	146
6.6	可重构实验与测试	147
6.6.1	实验平台简介	147
6.6.2	1T1R CCFD	152
6.6.3	极限自干扰抑制能力验证	155
6.6.4	MIMO CCFD	157
	参考文献	160
第7章	典型应用	163
7.1	无线通信	163
7.1.1	蜂窝移动通信	163
7.1.2	卫星通信	165
7.1.3	微波接力通信	167
7.1.4	无线通信电台	167
7.1.5	无线通信 4STR 一例: 准互盲无线通信	168
7.2	超级线缆	169
7.3	电子战	170
7.3.1	连续波雷达	170
7.3.2	干扰聚焦	171
7.3.3	实时干扰效果评估	172
7.3.4	电子战 4STR 一例: 扰中通电子攻击飞机	173
7.4	电磁测量	174
7.4.1	距离测量	174
7.4.2	速度测量	174
7.4.3	成像	175

7.5 电磁兼容 175

 7.5.1 舰船 175

 7.5.2 飞行器 178

 7.5.3 陆基指挥控制中心 178

参考文献 180

索引 181

第 1 章 需求与挑战

随着通信技术的不断发展,移动电话、互联网等新兴技术在人类生活中开始扮演越发重要的角色,快捷、自由、便利的无线通信技术已经成为人们首选的通信方式。而作为铺设无线通信信号所必需的“道路”,无线频谱在构建信息社会和国防建设中发挥着不可替代的作用。然而,目前可供人类开发应用的无线通信频谱仍局限于 3000GHz 以下,面对现实社会无线通信需求的爆炸性增长,有限且不可再生的无线频谱资源逐渐成为一个亟待解决的焦点问题。

本章将结合实例阐述当前无线频谱资源的使用现状,并针对这一社会问题,提出同时同频全双工技术的概念、定义、发展过程、主要挑战及研究现状。

1.1 场景与需求

随着无线通信的发展,无线通信业务量在逐年递增。以中国移动通信集团公司(以下简称中国移动)为例,2004~2013 年的 10 年间,中国移动的年总通话分钟数增长了 6.5 倍^[1],如图 1-1 所示;近年来,移动数据业务更是呈爆炸性增长,中国移动 2012~2014 年的移动数据业务对比如图 1-2 所示。

无线通信业务量逐年增加,其所需要的无线频率资源也相应地逐年增加。但是,目前可用的无线频率资源已接近枯竭。图 1-3 为我国无线电频率划分图,6GHz 以下无线频率资源已被用完。

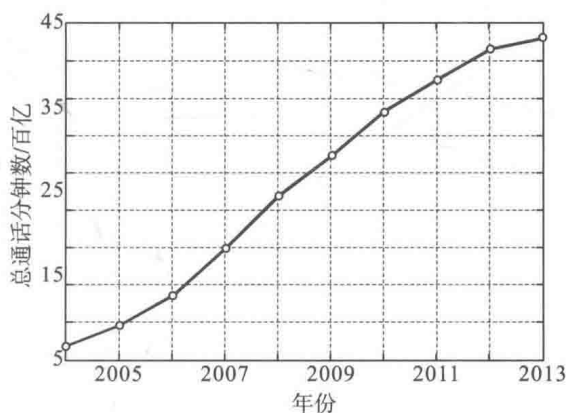


图 1-1 2004~2013 年中国移动年总通话分钟数^[1]

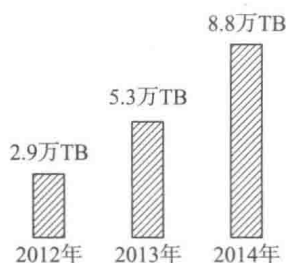


图 1-2 2012~2014 年中国移动的年移动数据流量^[1]

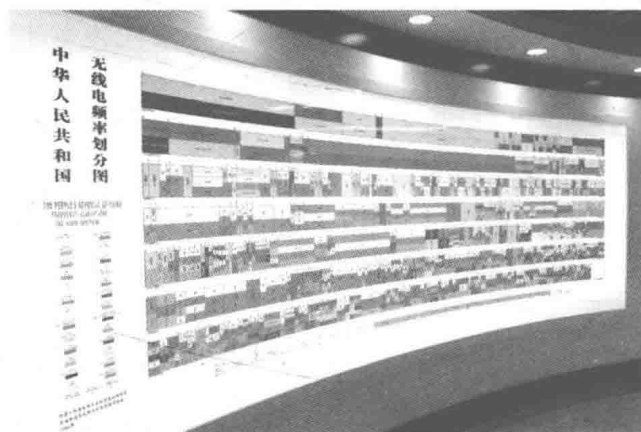


图 1-3 中国无线电频率划分图^[2]

放眼全球，一样的形式，一样的场景。从结果上看，全球好用的频率资源已被用完。从需求上看，全球蜂窝移动通信、卫星通信、无线局域网、业余无线电等无线通信市场似乎正在无边际地扩大，需要的频率资源似乎正在无止境地增加。

1.2 同时同频全双工

为了解决现实社会无线业务发展的需要与可用频谱资源近乎枯竭的矛盾，近年来，同时同频全双工(co-time co-frequency full duplex, CCFD)无线通信^[3,4] [或称为 FD(full duplex)，或称为 NDD(no division duplex)]相关的技术研究越来越深入。

同时同频全双工是指一套通信设备或装置，在相同的介质资源中使用相同的时间和频率资源，同时发射并接收电磁信号。

在名称上，同时同频全双工英文中使用较多的是“full duplex”。但是，中文与“full duplex”对应的“全双工”一词已被对讲机及电台大量使用，其意思是“自己说话时还能听到对方所说的话”。目前的无线通信，如 TD-SCMA 蜂窝移动通信标准，满足“自己说话时还能听到对方所说的话”的功能，但其意思与大家

公认的“full duplex”无关。

为了与中文已有的“全双工”一词区别，本书以“同时同频全双工”或CCFD来表达英文中的FD或NDD所对应的内容。

一种同时同频全双工无线通信设备模型如图1-4所示^[3,4]，其中ADC、DAC分别为模数、数模转换器。

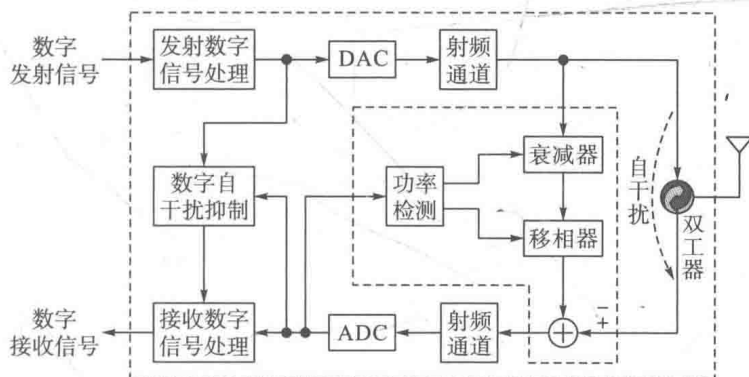


图 1-4 一种同时同频全双工无线通信设备模型^[3,4]

目前已有的无线通信，要么采用的是时分双工无线通信，要么采用的是频分双工无线通信；时分双工再加上其所需要的保护时隙，或频分双工再加上其所需要的保护频带，两种方式的时间资源或频率资源相对于同时同频全双工均浪费了一半或一半以上。也就是说，采用同时同频全双工或是另一些称呼的FD或NDD，可以将目前的无线通信频率总资源等效翻一倍或一倍以上。

1.3 历史与现实

同时同频全双工是一种自然的、应用广泛的需求。最常见的例子是，一位健康的正常人，在他(她)说话的时候，他(她)的耳朵同时也在工作，仍能同时听到周围的声音信号，如图1-5所示。也就是说，这位健康的人随时随地在使用同时同频全双工技术。



图 1-5 健康的人说话并不影响耳朵听声音信息的基本功能

健康成人正常谈话的声音约在 60dB 以下，一般健康成人的听力为 25dB。这说明一个健康正常的人，其一边说话一边听别人说话的过程中，自干扰抑制能力可达到 35dB。

1. 最早的同时同频全双工装置

同时同频全双工技术最早的应用是在电话机上。20 世纪 60 年代卫星电话出现，电话中的回音令人难以忍受，不得不采用回声抵消技术。

一种模拟回声抵消器的系统模型如图 1-6 所示^[5]。国际电信联盟(以下简称国际电联)1993 年版的 G. 165 标准强制要求国际电话的回音抵消能力必须大于等于 26dB^[5]。

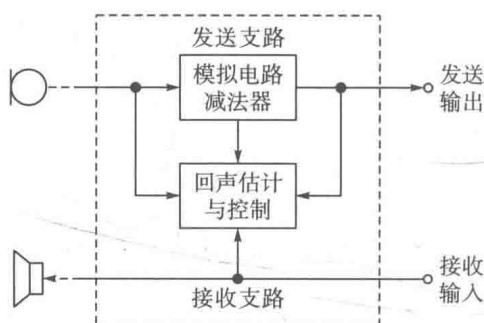


图 1-6 一种模拟回声抵消器的模型^[5]

1971 年，文献[6]采用了一种中心限幅法，以抑制卫星等长途电话的回声。实验结果显示，该技术最大可抵消 18dB 的回声干扰。1976 年，文献[7]采用抽头延迟线滤波器的方法抵消回声干扰，仿真结果表明 8 抽头延迟线滤波器能抑制 30dB 的回声干扰。

图 1-7 为文献[7]的抽头延迟线滤波器回声抵消模型。采用抽头延迟线滤波器抑制自干扰，是目前同时同频全双工最经典的方法。现有同时同频全双工无线通信自干扰抑制实验结果较好，例如，通过模拟域、数字域自干扰抑制，可以

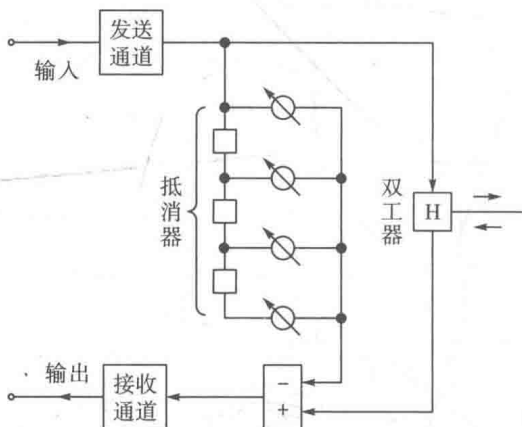


图 1-7 一种抽头延迟滤波器回声抵消模型^[7]

达到 100dB 量级自干扰抑制效果,所采用的方法均为与文献[7]类似的多抽头延迟线滤波器原理。

2. 短波电台

20 世纪 30~70 年代,短波电台是军队最主要的无线通信工具。但是,如果多个短波电台相距较近,如多部电台装在一部汽车上,电台间的干扰会十分严重。一部短波电台发射机工作时会影响其他电台的正常使用。文献[8]采用射频自适应干扰抵消技术,以解决或减轻这种自干扰问题的影响。短波电台射频自干扰抵消模型如图 1-8 所示^[8]。

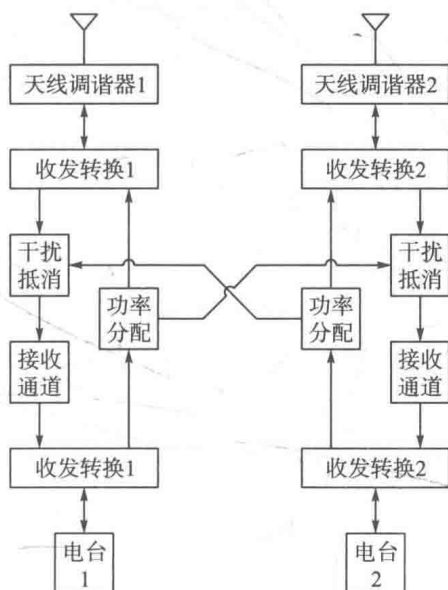


图 1-8 一种短波电台射频自干扰抵消模型^[8]

在 1.6~30MHz 范围内,当电台 1 的发射机与电台 2 的接收频率偏差大于等于 200kHz 且电台 1 的天线与电台 2 的天线距离为 24m 时,最大可抑制 35dB 的射频自干扰^[8]。

文献[8]采用了自干扰抑制法抑制自干扰,试图解决异频电台共存时不能正常工作的问题,但该技术仍不是同时同频全双工无线通信。

3. 同时同频全双工

随着无线通信的快速发展,频谱需求量与现实可提供频谱量之间的矛盾越来越尖锐,而同时同频全双工可以使目前的无线通信频谱资源等效翻一倍或以上,因此,同时同频全双工自然地受到了工业界与学术界广泛而深入的关注。

同时同频全双工无线通信的早期文献为 1997 年 Chen 的博士学位论文 *Division-free Duplex for Wireless Applications*。Chen 指出,为了得到足够高的发射机、

接收机隔离度,需要在模拟域、基带域同时进行自干扰抑制^[9]。在载波中心频率为 1.8GHz、信号带宽为 200kHz 的条件下,Chen 的实验结果表明能获得 72dB 的自干扰抑制量^[10]。

同时同频全双工无线通信的早期专利为 1995 年欧洲专利。1997 年美国专利 *Self-cancelling Full-duplex RF Communication System* 针对无线通信收发信机,采用天线布置、模拟射频、数字自适应滤波三种方法,抑制发射机的自干扰^[11]。

2014 年,斯坦福大学的同时同频全双工 3 发 3 收 MIMO 实验床采用载波频率为 2.4GHz、带宽为 20MHz 的 WiFi 信号,环形器自干扰抑制 15dB,射频域自干扰抑制 65dB,数字域自干扰 35dB,加上环形器的收发隔离度 15dB,实验床的最大总自干扰抑制能力为 115dB^[12]。

电子科技大学的同时同频全双工 2 发 2 收 MIMO 实验床^[13-15]的系统模型如图 1-9 所示,其中,“射频干扰重建参数控制”单元的输出,控制各“射频干扰重建”单元的时延、增益及相位。采用载波频率为 2.6GHz、带宽为 20MHz 的第四代移动通信 LTE 信号,天线域发射信号与接收信号的隔离度为 45dB,射频域自干扰抑制能力为 45dB,数字域自干扰抑制能力为 40dB,实验床总的自干扰抑制能力为 115dB。

一般无线通信场景中的同时同频全双工,自干扰抑制能力为 117~210dB。典型的 WiFi 无线通信,自干扰抑制能力需达到 117dB;典型的数十千瓦功率远距离短波通信电台,自干扰抑制能力需达到 210dB。

1.4 问题与挑战

在享受同时同频全双工无线通信带来好处的同时,会面临哪些问题?可能的解决途径是什么呢?最核心的挑战是什么?

1. 存在的问题

同时同频全双工通信面临的最大问题是大功率的同频发射信号会影响接收机的弱信号接收能力。同时同频全双工通信发射机发射的信号,传输到接收机接收支路中的信号,本书统称为“自干扰”信号,如图 1-4 所示。

下面以一个典型场景来说明自干扰信号的强弱。如图 1-4 所示,考虑第四代蜂窝移动通信系统,宏小区基站发射信号功率为 46dBm,即 40W,某用户带宽配置为 1.4MHz,调制方式为 QPSK,这时基站接收灵敏度为 -107dBm,20℃ 常温下基站接收机底噪为 -112dBm;发射信号相对接收信号功率的大小对比如图 1-10 所示。考虑到基站需保证在最弱的接收信号环境中仍能正常通信,可以计算出基站发射信号功率比接收的远端弱有用信号强 153dB,比基站接收通道噪声高 158dB。这说明为了正确接收远端弱信号,典型的同时同频全双工基站至少需要