

# 同时同频全双工非线性自干扰

Research on Nonlinear Self Interference Cancellation  
Techniques of CCFD Radios

## 抑制研究

肖尚辉<sup>1</sup>,张梦瑶<sup>1</sup>,全欣<sup>2</sup>,刘颖<sup>1</sup>,邵士海<sup>1</sup>,唐友喜<sup>1</sup>(1. 电子科技大学,四川成都611731;2. 西南交通大学,四川成都611756)

Xiao Shanghui<sup>1</sup>,Zhang Mengyao<sup>1</sup>,Quan Xin<sup>2</sup>,Liu Ying<sup>1</sup>,Shao Shihai<sup>1</sup>,Tang Youxi<sup>1</sup>(1. UESTC,Chengdu 611731,China;2. South-west Jiaotong University,Chengdu 611756,China)

### 摘要:

同时同频全双工在相同频率资源上同时进行信号的收发,频谱利用率理论上可以提升1倍,因此受到广泛关注。然而,全双工设备在接收信号的同时,也会遭受本地信号发射带来的强干扰。针对强干扰信号的非线性典型特征,分析了非线性自干扰抑制技术,并探讨大功率发射和阵列天线场景中,可能的非线性自干扰抑制方法,为大功率、多天线全双工设备研制提供架构和算法层面的设计指导。

### 关键词:

同时同频全双工;自干扰;干扰抑制;非线性

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2021.12.007

文章编号:1007-3043(2021)12-0032-08

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Abstract:

Co-time and Co-frequency Full Duplex (CCFD) technique enables a radio to transmit and receive signals simultaneously using the same frequency resources, and hence doubles the spectrum efficiency theoretically. However, a CCFD radio will suffer from severe self-interference (SI) caused by local signal transmission during signal reception procedure. According to the inherent nonlinear characteristics of the self-interference signals, it analyzes the nonlinear self-interference cancellation (SIC) techniques, and discusses possible nonlinear interference suppression methods in high-power transmission and array antenna scenes, which would provide some architecture and algorithm design guidance for the development of high-power, multi antenna CCFD equipment.

### Keywords:

Co-time and co-frequency full duplex; Self-interference; Self-interference cancellation; Nonlinearity

**引用格式:**肖尚辉,张梦瑶,全欣,等.同时同频全双工非线性自干扰抑制研究[J].邮电设计技术,2021(12):32-39.

## 1 概述

同时同频全双工是指一套通信设备使用相同的频率资源,同时发射并接收电磁信号。理论上它可以将无线通信频谱资源利用率翻一倍,因此受到了工业界与学术界的广泛深入关注<sup>[1-2]</sup>。

同时同频全双工在发射信号的同时会对本地接收机造成强干扰,称为“自干扰”。因此,同时同频全双工在实际应用中需要解决的最大问题就是自干扰的抑制问题。如图1所示,在第4代蜂窝移动通信系统中,自干扰的总抑制能力需要达到158 dB量级<sup>[1]</sup>。因此,为了使同时同频全双工无线通信走向实用化,自干扰抑制是需要首先解决的问题。

目前广泛采用的同时同频全双工自干扰抑制技术主要可以分为三大方面:空间域、模拟域以及数字域的自干扰抑制<sup>[2]</sup>。空间域自干扰抑制是指通过天线布置等方法提高收发通道的隔离度,实现对自干扰信号的抑制,主要方法包括发射和接收(TR)分离、电磁

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(62071094, 61901396, U19B2014, 61771107, 61601064);中央高校基本科研业务费专项资助(2682020CX83);四川科技项目(2020YFH0101)

**收稿日期:**2021-11-03

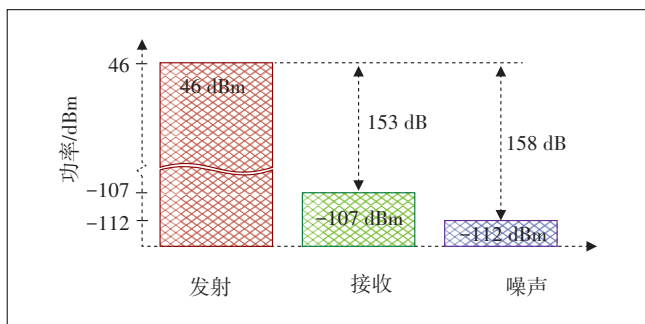


图1 同时同频全双工无线通信发射与接收信号强度对比<sup>[1]</sup>

波隔离和天线模式分集。模拟域自干扰抑制是利用发射机基带或者射频自干扰信号作为参考源,在接收机射频前端产生模拟自干扰信号的副本并进行抵消。数字域自干扰抑制是利用数字自干扰信号作为参考源,在接收机数字域估计自干扰信号的多径信道、非线性特征等参数并抑制。一种典型的自干扰抑制案例如图2所示。

针对强干扰信号的非线性典型特征,本文分析了非线性自干扰抑制技术,研究了针对发射端、接收端以及收发联合非线性自干扰抑制的方法,并探讨大功率发射和阵列天线场景中,可能的非线性干扰抑制方法。本文研究成果,可以为大功率、多天线全双工设备研制提供架构和算法层面的设计指导。

## 2 同时同频全双工系统及非线性自干扰抑制

### 2.1 同时同频全双工系统模型

2种同时同频全双工的典型系统结构如图3所示

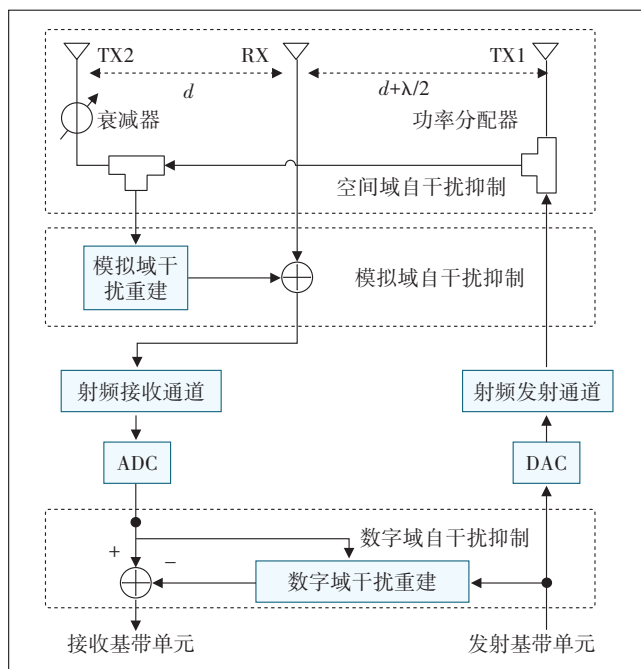


图2 一种典型的同时同频全双工自干扰抑制架构<sup>[1]</sup>

示,分别是收发天线共用和收发天线独立2种典型结构。2种结构中都存在严重的自干扰:收发天线共用结构中,由于环形器的隔离度并不理想,发射机的发射信号一部分泄漏到了接收机输入支路;收发天线独立系统中,发射信号通过近场耦合效应,直接耦合到接收通道中去,形成自干扰。此外,2种场景中,近场和远场的反射和散射信号,也会被本地天线接收,从而对目标接收信号产生多径干扰。

经实验验证,全双工自干扰总是难以消除到接收

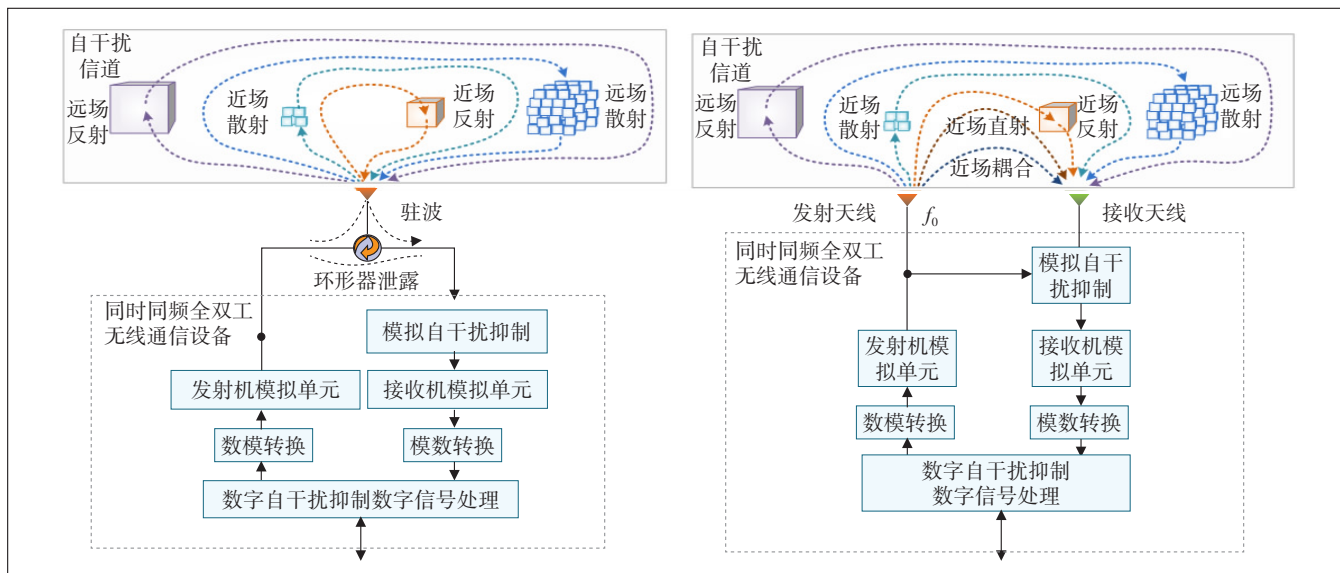


图3 同时同频全双工的典型系统<sup>[1]</sup>

机底噪的水平,研究表明发射机和接收机射频器件的非线性失真是一种重要的限制因素。因此,本文将详细进行非线性干扰抑制技术的分析。

## 2.2 非线性自干扰抑制思路

从图 1 所代表的 4G 移动通信典型应用场景可以看出,一个基站实现正常通信需要抑制 158 dB 的线性信号<sup>[1]</sup>,如图 4 所示,其中包含 128 dB 的非线性信号。因此,128 dB 量级非线性自干扰信号的抑制方法与理论,是同时同频全双工走向工程实用的最大挑战<sup>[1]</sup>。

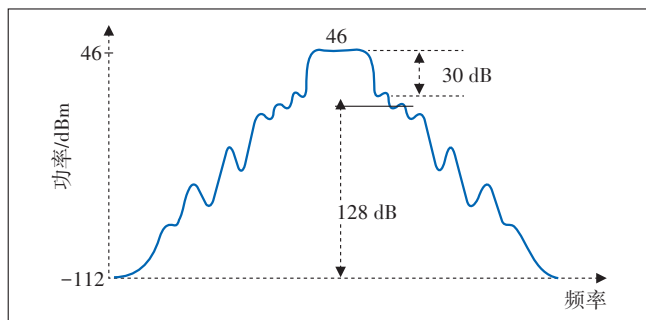


图 4 同时同频全双工典型自干扰信号中的非线性分量大小<sup>[1]</sup>

同时同频全双工中目前针对非线性自干扰抑制的研究路线如图 5 所示,本文将分别从全双工发射端、接收端以及收发联合的非线性自干扰抑制 3 个主要方面进行分析与探讨。

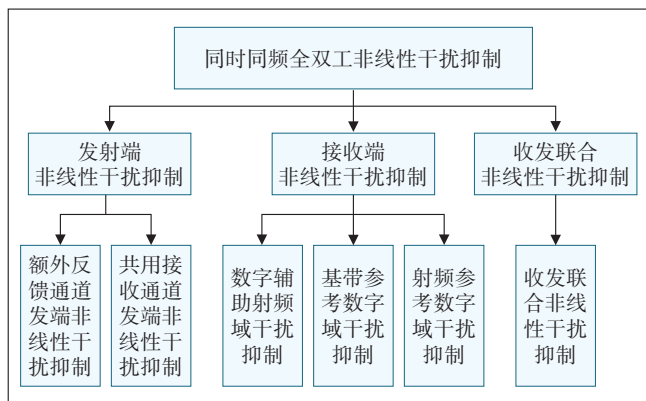


图 5 非线性自干扰抑制方法图谱

## 3 同时同频全双工非线性干扰抑制

### 3.1 发射端非线性干扰抑制

#### 3.1.1 技术原理

针对全双工发射机射频功率放大器产生的非线性失真,可以利用数字预失真技术进行抑制。数字预失真的基本思想如图 6 所示,需要在发射信号源和放大器之间插入一个数字预失真模块,对发射信号在送入

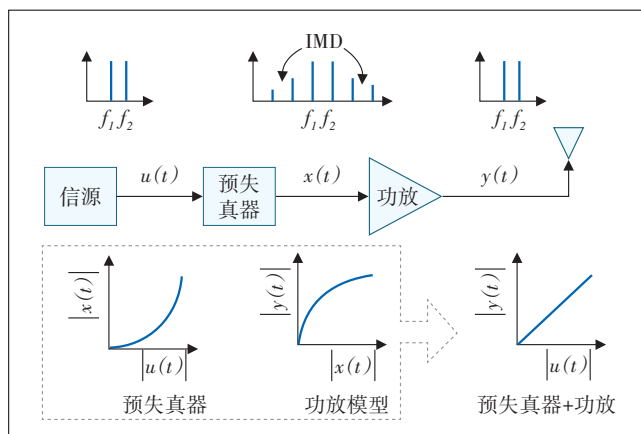


图 6 数字预失真原理示意<sup>[3]</sup>

功率放大器前进行预处理,使其产生具有与功率放大器非线性失真幅度相同相位相反的“逆”失真。该失真可以抵消经过放大产生的非线性失真,降低带外频谱增生,从而实现功率放大器的线性化<sup>[3]</sup>。

根据反馈通道的形式,可以把目前全双工发射端非线性校正技术分为 2 类,下面分别进行介绍。

#### 3.1.2 额外反馈通道发端非线性干扰抑制

文献[4]和[5]均在全双工发射通道加入了一种发端非线性校正的干扰对消架构,如图 7 所示。在发射通道的数字基带部分加入 DPD 模块以校正发射机非线性失真,同时在干扰对消链路中加入 DPD 模块以抵消对消通道的非线性失真。经过数字预失真的基带 OFDM 信号通过发射链路和抵消链路后,送至接收端通过对自干扰信道估计产生自干扰信号实现对消。该方法采用了记忆多项式(Memory Polynomial, MP)模型来校正放大器的非线性失真,如式(1)所示:

$$y[n] = \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{q=0}^{Q-1} \omega_{kq} x[n-q] |x[n-q]|^k \quad (1)$$

式中:

$K$ ——MP 模型非线性阶数

$Q$ ——记忆深度

$\omega_{kq}$ ——MP 模型参数

实测结果表明,针对 5 MHz 带宽的 OFDM 信号,平均发射功率为 20 dBm 时,与不采用预失真技术相比,可以获得 13 dB 的自干扰抑制能力提升。

#### 3.1.3 共用接收通道发端非线性干扰抑制

与文献[4]和[5]不同,文献[6]提出一种共用接收通道的发端非线性干扰抑制方法(见图 8),在训练 DPD 校正系数时,复用了全双工的接收通道。该方法中非线性模型采用了 Wiener-Hammerstein 模型,如式

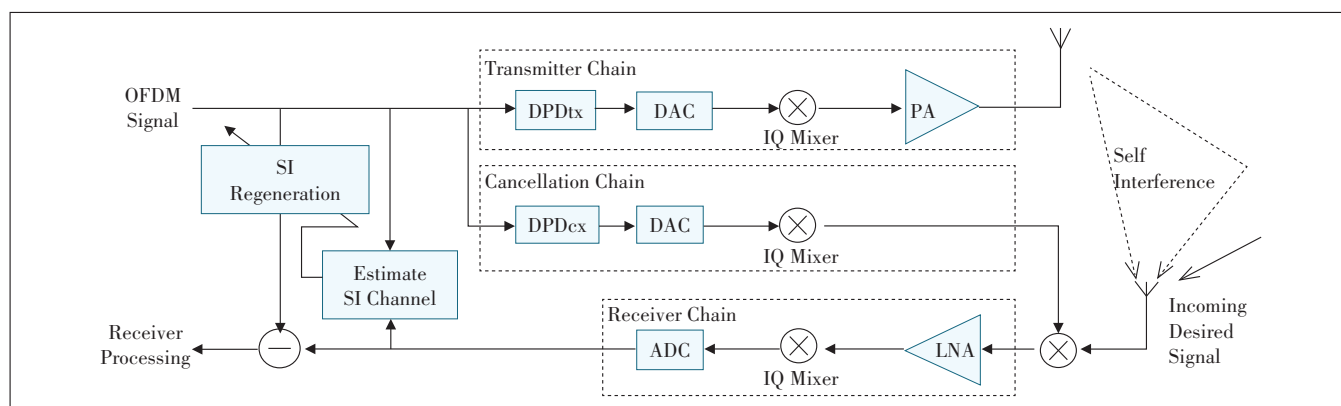


图7 额外反馈通道发端非线性干扰抑制全双工系统框图<sup>[2]</sup>

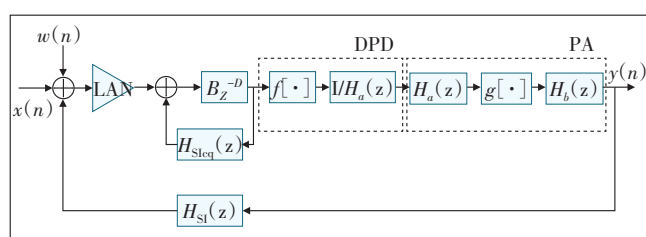


图8 共用接收通道发射端非线性干扰抑制<sup>[6]</sup>

(2)所示:

$$y_R(n) = \sum_{m=0}^{L_a} h_b(m) g[\tilde{r}(n-m)] \quad (2)$$

其中:  $y_R(n) = \tilde{r}(n) \sum_{m=0}^{L_a} h_a(m) r(n-m)$ ,

$g[r(n)] = \sum_{k=0}^K g_{2k+1} \varphi_{2k+1}[\tilde{r}(n)]$ ,  $g_{2k+1}$  为  $P$  阶多项式的

系数,  $\varphi_{2k+1}[\tilde{r}(n)] = \tilde{r}(n) |\tilde{r}(n)|^{2k}$  为非线性算子。模型参数训练过程中需要暂停全双工模式,并采用低功率序列先训练模型中的线性部分,再使用正常功率序列来训练非线性参数。实测结果表明,针对 10 MHz 带宽的 OFDM 信号,平均发射功率为 0 dBm 时,与传统线性抑制方法相比,自干扰抑制能力提高约 11 dB。

### 3.2 接收端非线性干扰抑制

#### 3.2.1 数字辅助射频域干扰抑制

数字辅助的射频域非线性干扰抑制方法主要是在基带重建出发射通道的非线性与信道特征,然后通道 DAC 转换为射频信号后,在接收通道中进行干扰抑制<sup>[2,7,8,9]</sup>。

文献[7]提出了一种数字辅助模拟干扰消除结构,如图 9 所示。基带信源通过一个非线性模型和一个线性模型后,送往 DAC 产生非线性抵消信号,用来抵消接收信号中的自干扰。为了保证抵消信号与自干扰信号接近,在发射端增加一个额外的观测通道来

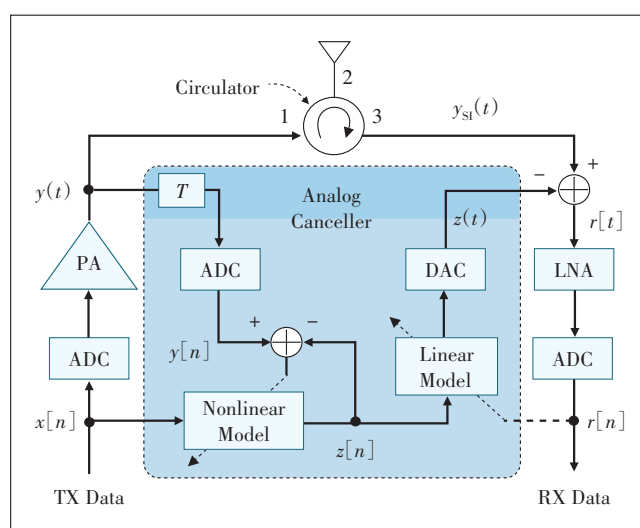


图9 数字辅助的模拟域干扰抑制架构<sup>[7]</sup>

提取发射机的非线性失真模型,文中采用了记忆多项式(Memory Polynomial, MP)模型,如式(3)所示:

$$y[n] = \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{q=0}^{Q-1} \omega_{kq} x[n-q] |x[n-q]|^k \quad (3)$$

式中:

$K$ ——MP 模型非线性阶数

$Q$ ——记忆深度

$\omega_{kq}$ ——MP 模型参数

实测结果表明:针对 20 MHz 带宽的 LTE 信号,当发射功率为 31 dBm、ACLR 为 -35 dBc 时,线性抵消方法仅消除了 32 dB 的 SI,而数字辅助的非线性抵消方法有效消除了 41 dB 的 SI 信号和 20 dB 的非线性畸变;当发射功率增加到 38 dBm、ACLR 为 -18 dBc 时,线性的方法最多只能抵消 16 dB,而所提出的非线性的方式能够消除 38 dB,抑制的非线性分量也能超过 20 dB。该方式比线性的方法具有更好的抵消性能,尤其适用

于高输出功率和强非线性畸变的全双工发射机。

与文献[7]类似,文献[8]也采用数字辅助模拟干扰消除方法,不同之处在于对发射机非线性建模过程中,采用了并行 Hammerstein (Parallel Hammerstein, PH)模型,如式(4)所示:

$$x_n^{PA} = \sum_{p=1}^P \sum_{k=0}^{M-1} f_{p,k} \psi_p(x_{n-k}) \quad (4)$$

其中,定义  $\psi_p(x_n) = |x_n|^{p-1} x_n$  为非线性基函数,  $f_{(p,k)}$  为 PH 分支的 FIR 滤波器脉冲响应,  $M$  表示记忆长度,  $P$  表示 PH 模型的非线性阶数。实验结果表明:针对 LTE-Advanced 下行信号,当 PAPR 为 8 dB、发射功率为 35 dBm、带宽为 20 MHz 时,论文提出的非线性抵消方法比线性抵消方案改善了 23 dB。

文献[9]提出一种 2 级模拟自干扰抑制架构如图 10 所示,通过结合 2 种典型的模拟自干扰消除方法,即射频抽头方法和基带抽头方法,分 2 步抑制全双工收发器产生的自干扰。在对消过程中,同时考虑了射频抵消残余非线性和接收通道非线性,采用了如式(5)所示非线性级联模型:

$$c[n] = \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \omega_{kp} x[n-p] x[n-p]^{2k} + \sum_{q \in Q} \sum_{m \in M} \sum_{l \in L} \theta_{qml} x[n-q] x[n-m] x^*[n-l] \quad (5)$$

该模型能够高精度地重建多径自干扰传播信道、发射机非线性和接收机非线性的联合效应。实测结果表明:对于传输功率 27 dBm 的 100 MHz LTE 信号,第 1 级抵消将自干扰信号的功率衰减近 34 dB,第 2 级线性抵消则将多径自干扰信号的功率再衰减 19 dB。当采用第 2 级非线性射频抵消后,残余自干扰功率可

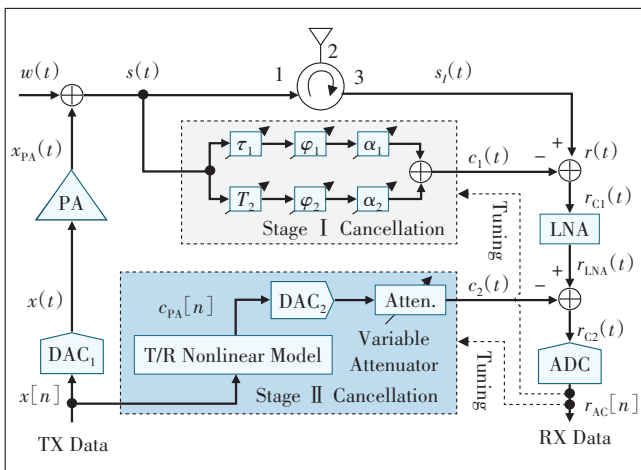


图 10 2 级自干扰消除结构的全双工收发器基带等效模型<sup>[9]</sup>

以再降低 13 dB。通过上述非线性建模的 2 级模拟抵消结构可提供高达 66 dB 的整体模拟抵消,比传统只采用射频抽头抵消结构高出约 13 dB,可以对全双工自干扰实现高效抑制。

### 3.2.2 基带参考数字域干扰抑制

基带参考数字域非线性干扰抑制在数字域重建自干扰信号时采用发端基带信号源作为参考信号,研究成果主要可以分为 2 类:非线性模型辨识抑制方法<sup>[10-14]</sup>和非线性盲估计抑制方法<sup>[15]</sup>。

文献[10]提出一种并行 Hammerstein 模型的非线性干扰抑制架构如图 11 所示。该架构采用了如式(4)所示并行 Hammerstein 非线性模型对自干扰进行建模并抑制。文献[11]在其基础上提出了适用于零中频收发机的宽线性数字自干扰消除架构,如图 12 所示。该架构中考虑了多径天线耦合、射频抵消、IQ 不平衡和线性数字基带抵消方案,然后对输出的残余自干扰依然采用并行 Hammerstein 非线性模型进行拟合并抑制。仿真结果表明:针对 12.5 MHz 带宽的 OFDM 信号,只使用线性模型的数字自干扰抑制能力低于 25 dB,而宽线性的数字自干扰抑制能力高达 35 dB。文献[12]和[13]在文献[11]基础上,针对 5G 移动设备,提出实时干扰抑制架构和基于 LMS 迭代的非线性参数自适应干扰抑制方法。通过模型基函数正交化提高模型参数辨识的稳定性,利用 LMS 快速迭代来动态跟踪自干扰信道变化。文献[14]则在高通 Adreno 430 平台上进行了实现与测试。测试结果表明,采用了实时干扰抑制架构和 LMS 快速迭代方法后,数字自干扰抑制能力可达 25~35 dB。

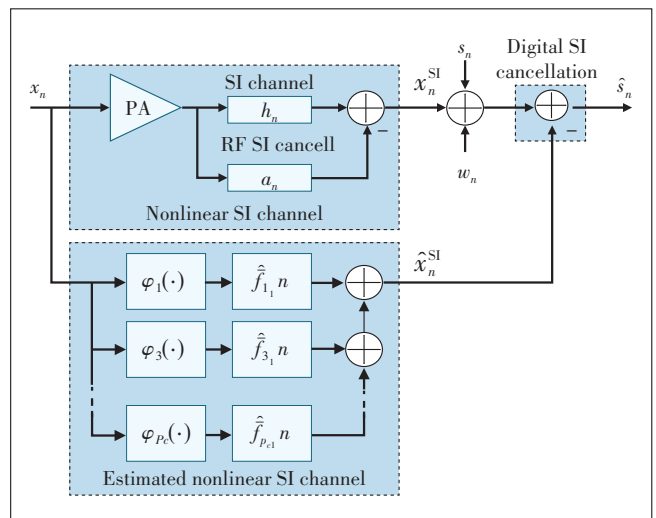


图 11 一种非线性模型与数字域自干扰抑制架构

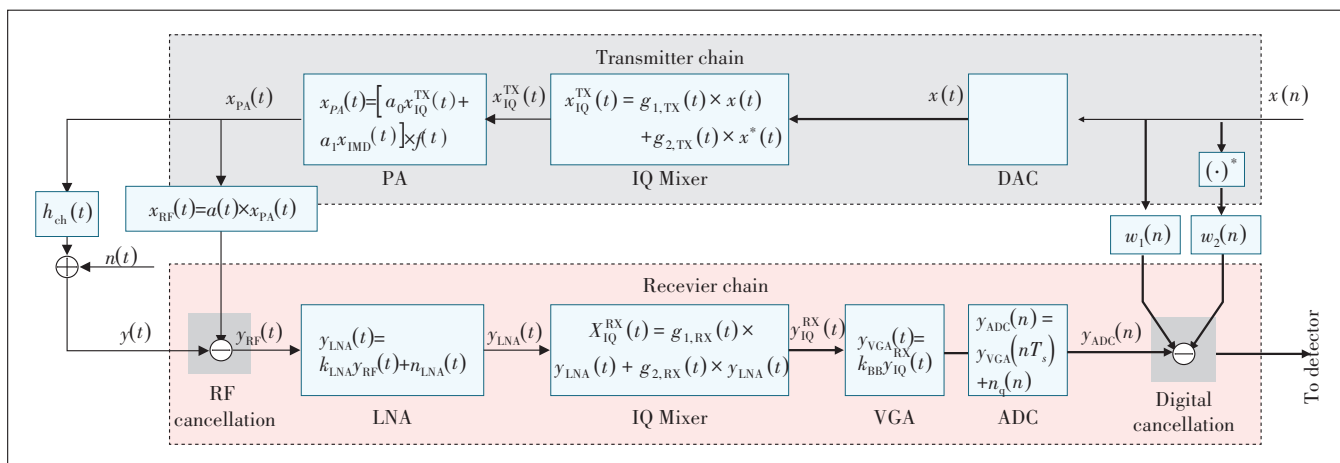


图 12 宽线性数字自干扰抑制架构

与上述文献不同,文献[15]针对 OFDM 调制全双工收发机提出一种盲非线性自干扰抵消架构,如图 13 所示,包括自干扰消除过程和期望信号的恢复过程,不需要任何训练就可以实现非线性抵消。该体系结构首先将一个 OFDM 符号中相邻子载波上连续接收的符号组合在一起,使用简单的消除过程来消除线性和非线性自干扰分量。随后,使用恢复过程对经过自干扰抵消的信号进行恢复,消除抵消过程对期望信号的影响。在对消和恢复过程中,不需要估计线性自干扰信道响应和 PA 非线性模型系数,具有复杂度低、实现简单的特点。

### 3.2.3 射频参考数字域干扰抑制

射频参考的数字域干扰抑制方法从发射机功率放大器输出端口耦合参考信号到接收机并采集到数字域作为参考信号,该参考信号中天然具备发射机的非线性失真,因此可以有效抵消发射机的非线性失真。然而,当发射功率增加时,全双工所采用的射频干扰对消模块中射频器件的非线性失真逐渐凸显。

文献[16~19]针对此问题进行了相关研究。

文献[16]针对射频域自干扰对消器件带来的非线性失真(见图 14),对模拟自干扰对消器建立反馈链路,以功率放大器的输出信号作为参考,建立模拟自干扰对消器的非线性失真模型,重构自干扰信号的非线性分量,在接收信号中减去相应非线性分量的近似即可有效缓解模拟自干扰对消器件带来的非线性失真。该架构采用 two-box 非线性模型对自干扰对消器的非线性效应建模如式(6)所示:

$$y_{ij}^{AC}[n] = \sum_{k=0}^{K_{ij}^{off}-1} w_{ij}^{(k)} x_i[n] |x_i[n]|^k + \sum_{k=0}^{K_{ij}^{on}-1} \sum_{q=0}^{Q_{ij}^{on}-1} w_{ij}^{(k,q)} x_i[n-q] |x_i[n-q]|^k \quad (6)$$

其中第 1 项为静态非线性项,用来拟合非线性强失真;第 2 项为动态非线性项,用来跟踪信道变化带来的非线性特征的变化。文献[17]在文献[16]的基础上提出了 2x2 MIMO 全双工非线性抑制方法。文中在 2.35 GHz 频点用 20 MHz 带宽 LTE 信号进行了实验

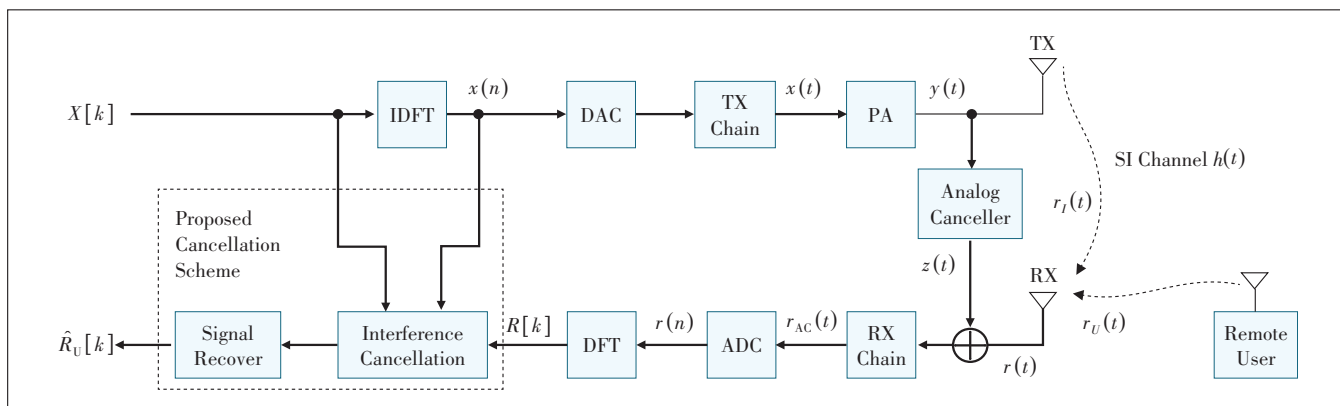


图 13 一种盲非线性抑制架构<sup>[15]</sup>

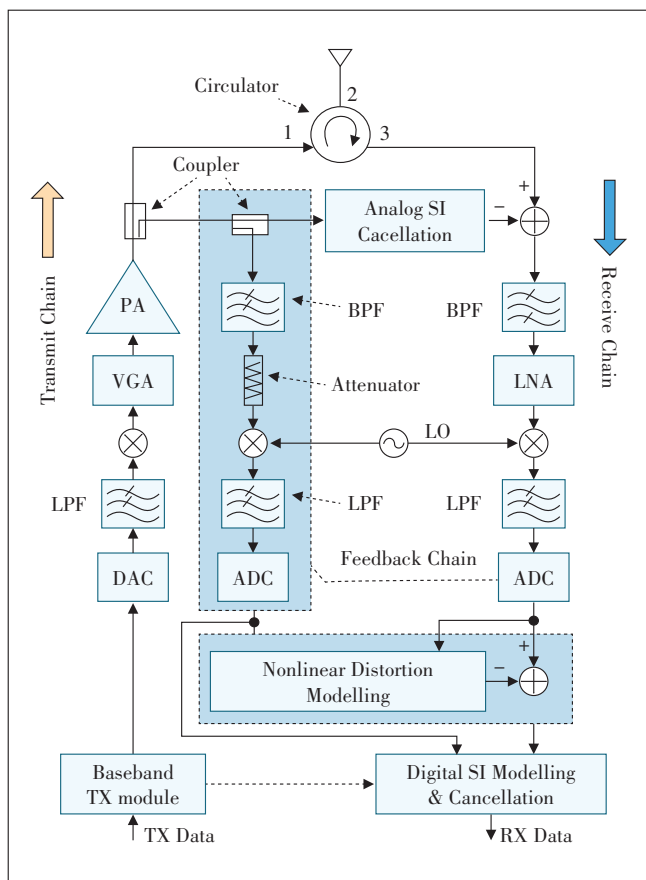


图 14 一种射频参考的数字非线性干扰抑制架构<sup>[16]</sup>

证,结果表明:当接收自干扰功率从 $-23\text{ dBm}$ 线性增加至 $5\text{ dBm}$ 时,线性干扰抑制能力却不能随着自干扰功率线性增加,尤其在功率端呈现逐渐恶化趋势;而非线性干扰抑制能力则随自干扰功率增加近似线性增加,在 $5\text{ dBm}$ 处较线性干扰抑制能力提升 $13\text{ dB}$ 。

文献[18]提出了一种观测体系结构,通过部署与模拟对消器(AC)相同的辅助链和线性抵消方法来捕获 AC 的非线性失真。捕获的非线性失真可作为数字领域的参考,以减轻 AC 引起的接收机非线性干扰。实验结果表明,在发射功率小于 $25\text{ dBm}$ 的情况下,自干扰信号功率可以被成功抑制在接收机底噪之下。

文献[19]在文献[16]所提架构的基础上设计了一种前馈型神经网络用于数字域干扰对消方法。首先将从发射反馈通道获取的含有发射机非线性成分的对消参考信号送入特征提取器,获取参考信号与干扰信号之间的时延特征,然后将时延后的参考信号送入神经网络作为网络的输入特征,将接收自干扰信号的实部与虚部作为网络的输出,网络的损失函数定义为期望输出与目标输出的均方误差值。对 $20\text{ MHz}$ 的

QPSK-OFDM 信号进行实验测试发现,利用预先训练好的网络进行泛化测试,当干噪比为 $30\text{ dB}$ 时,该网络可以实现 $29\text{ dB}$ 的数字域对消性能。

### 3.3 收发联合非线性干扰抑制

收发联合非线性干扰抑制既要在发端考虑非线性校正还要在收端考虑非线性干扰抑制,代表文献有[2]和[5]。

文献[5]提出一种单天线全双工发端和收端联合抑制非线性的架构。在发射通道中引入数字预失真 DPD 模块,接收通道引入数字辅助的射频干扰抑制模块,并且 DPD 和 SIC 模块共用一个射频反馈通道,用来给 DPD 提供观测数据用以训练 DPD 校正参数,同时给 SIC 模块提供非线性自干扰训练信号。发端 DPD 模块采用间接学习架构,使用记忆多项式 MP 模型来抑制发射链路中的非线性。基带 SIC 模块主要包含一个非线性模型和自干扰多径信道辨识部分。SIC 模块中,首先利用射频反馈通道获取的非线性数据训练非线性失真模型,重建出基带非线性自干扰,然后通过一个多径信道模型拟合发射信号的多径效应,最后利用 DAC 重建出多径非线性自干扰射频信号,并在接收机 ADC 前进行抵消。特别之处在于,该架构中发射端 DPD 模型和接收端非线性模型的建立与提取均参考了文献[20]中的欠采样方法来降低反馈通路的采样率要求。结果表明:当发射信号带宽为 $100\text{ MHz}$ 时,反馈通道仅需要 $25\text{ MSps}$ 采样率条件即可实现 $55\text{ dB}$ 的非线性抑制效果。

## 4 存在的问题

当前的研究结果均表明:与传统线性干扰抑制技术相比,非线性干扰模型在高发射功率( $30\sim 40\text{ dBm}$ )区域具有更显著的增益。随着发射功率的增大,PA 引起的非线性失真变得更加明显,非线性模型获得的增益增大。

然而随着发射功率和自干扰功率的持续增加,非线性与功率放大器特征不匹配将导致自干扰抑制能力的下降,当前功率放大器模型往往借鉴数字预失真理论中的模型,而数字预失真理论在强失真区域出现性能恶化,因此大功率强失真场景下,非线性模型及其抑制方法有待进一步研究。同时,在大功率场景中射频干扰抵消器本身引入的非线性失真也必须纳入考虑范围。

另一方面,面向阵列天线的全双工通信场景中,

首先将面临多个功率放大器如何线性化的问题,需要进一步研究低复杂度的线性化技术;同时,如何表征多天线、多路径、多干扰源的非线性自干扰信道也是一大难题。

## 5 结论

本文主要对同时同频全双工中的非线性自干扰抑制技术进行了系统的梳理,对非线性干扰抑制技术原理方案进行了分类、分析与总结,并结合未来全双工发展趋势,分析了当前非线性抑制所面临的问题与挑战。本文研究成果可以为大功率、多天线全双工设备研制提供架构和算法层面的设计指导。

### 参考文献:

- [1] 唐友喜. 同时同频全双工原理与应用[M]. 北京:科学出版社, 2016.
- [2] KOLODZIEJ K E, PERRY B T, HERD J S. In-band full-duplex technology: techniques and systems survey[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(7): 3025-3041.
- [3] 刘颖. 宽带无线通信数字预失真关键技术[D]. 成都:电子科技大学, 2016.
- [4] AUSTIN A C M, BALATSOUKAS-STIMMING A, BURG A. Digital predistortion of power amplifier non-linearities for full-duplex transceivers [C]//2016 IEEE 17th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). IEEE, 2016.
- [5] XIA X J, SHI C Z, LIU Y, et al. A full duplex transceiver with low feedback sampling rate [C]//ICC 2021 - IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2021.
- [6] GREGORIO F H, GONZÁLEZ G J, COUSSEAU J, et al. Predistortion for power amplifier linearization in full-duplex transceivers without extra RF chain [C]//2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2017.
- [7] LIU Y, QUAN X, PAN W S, et al. Digitally assisted analog interference cancellation for In-Band Full-Duplex radios[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(5): 1079-1082.
- [8] KIAYANI A, WAHEED M Z, ANTTILA L, et al. Adaptive nonlinear RF cancellation for improved isolation in simultaneous transmit-receive systems[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(5): 2299-2312.
- [9] LIU Y, ROBLIN P, QUAN X, et al. A full-duplex transceiver with two-stage analog cancellations for multipath selfinterference [J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2017, 65(12): 5263-5273.
- [10] ANTTILA L, KORPI D, SYRJÄLÄ V, et al. Cancellation of power amplifier induced nonlinear self-interference in full-duplex transceivers [C]//2013 Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. IEEE, 2013.
- [11] KORPI D, ANTTILA L, SYRJÄLÄ 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.
- [12] KORPI D, AGHABABAEETAFRESHI M, PIILILA M, et al. Advanced architectures for self-interference cancellation in full-duplex radios: Algorithms and measurements [C]//2016 50th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. IEEE, 2016.
- [13] KORPI D, CHOI Y S, HUUSARI T, et al. Adaptive nonlinear digital Self-Interference cancellation for mobile inband full-duplex radio: algorithms and RF measurements [C]//2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). IEEE, 2015.
- [14] TAFRESHI M A, KOSKELA M, KORPI D, et al. Software defined Radio implementation of adaptive nonlinear digital self-interference cancellation for mobile inband full-duplex radio [C]//2016 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP). IEEE, 2016.
- [15] QUAN X, LIU Y, CHEN D, et al. Blind nonlinear self-interference cancellation for wireless full-duplex transceivers [J]. IEEE Access, 2018, 6: 37725-37737.
- [16] QUAN X, LIU Y, SHEN Y, et al. Suppression of analog self-interference canceller nonlinearities in MIMO full duplex [C]//2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). IEEE, 2015.
- [17] LIU Y, QUAN X, PAN W S, et al. Nonlinear distortion suppression for active analog self-interference cancellers in full duplex wireless communication [C]//2014 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). IEEE, 2014.
- [18] LIU Y, MA W Z, QUAN X, et al. An architecture for capturing the nonlinear distortion of analog self-interference cancellers in full-duplex radios [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2017, 27(9): 845-847.
- [19] SHI C Z, HAO Y F, LIU Y, et al. Digital self-interference cancellation for full duplex wireless communication based on neural networks [C]//2019 4th International Conference on Communication and Information Systems (ICCIS). IEEE, 2019.
- [20] WANG Z H, CHEN W H, SU G Z, et al. Low feedback sampling rate digital predistortion for wideband wireless transmitters [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64(11): 3528-3539.

### 作者简介:

肖尚辉,电子科技大学博士研究生在读,主要研究方向为协作无线通信与分布式光纤传感信号处理研究;张梦瑶,电子科技大学硕士研究生在读,主要研究方向为数字预失真与非线性抑制;全欣,西南交通大学博士后,主要研究方向为非线性数字信号处理、无线通信信号处理;刘颖,电子科技大学副教授,博士生导师;邵士海,电子科技大学教授,博士生导师;唐友喜,电子科技大学教授,博士生导师,主要研究方向为同时同频全双工通信无线通信信号处理。