

DOI: 10.7652/xjtuxb201809009

应用于同频带全双工中的宽带 自干扰射频抵消技术

许江涛, 唐炳俊, 翟羽健, 伍民顺

(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对同频带全双工通信系统存在的自干扰问题,设计完成了一款可集成的单天线同频带全双工自干扰射频抵消系统。同频带全双工系统最关键的问题是:收发机内部发射信号经过不同的路径反射后,通过天线耦合到接收端给接收机带来的强自干扰。由于干扰信号和接收信号位于同一频带内,传统的滤波技术无法将干扰信号滤除,基于正交矢量合成原理,所提可集成自干扰射频抵消技术采用单天线模式,通过自适应控制从发射机获取的两路正交参考信号幅值,合成与自干扰信号幅值相同、相位相同的抵消信号,最后在接收机的射频前端进行相减从而实现自干扰射频抵消。该方法摒弃了限制带宽的相移元件,使得抵消带宽不再严格受限,而且结构简单,易于片上集成,并且采用了自适应控制算法,使得系统工作的适应性更广。系统仿真结果表明,在 60 MHz 频带内,自干扰射频抵消比均大于 41 dB。

关键词: 同频带全双工;自干扰;射频抵消;正交矢量合成

中图分类号: TN432 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)09-0071-05

Wide Bandwidth Self-Interference Radio Frequency Cancelling Technique for Single-Channel Full Duplex

XU Jiangtao, TANG Bingjun, ZHAI Yujian, WU Minshun

(School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The realization of single-channel full duplex helps ease the contradiction between the ever-growing requirement for data rate and the extremely scarce spectrum resource. However, the biggest barrier is the strong self-interference when the transmitting signal reflected by different paths is coupled into the weak receiving signal through the antenna. Moreover, traditional filtering techniques cannot filter the interference signal because the interference signal and the received signal reside in the same frequency band. In this paper, a single antenna mode is adopted and an integratable self-interference radio frequency cancelling technique is proposed based on the principle of orthogonal vector synthesis. The cancelling signal that has the same magnitude and phase as the self-interference signal is produced by adaptively controlling the magnitudes of the quadrature reference signals obtained from the transmitter. Finally, the synthesized cancelling signal and the self-interfering signal are subtracted at the radio frequency front end of the receiver to achieve the cancellation effect. This scheme excludes the use of band-limited components, such as phase shifter, so the cancelling bandwidth limitation is completely

broken. In addition, it has the advantages of simple architecture and easy single-chip integration. Since this technique uses the adaptive control algorithm, it is more adaptable to different working circumstances. System simulation shows that self-interference rejection up to 41 dB or more could be achieved over a wide bandwidth of 60 MHz.

Keywords: single-channel full duplex; self-interference; radio frequency cancelling; orthogonal vector synthesis

在通信领域,为了防止发射和接收信号之间的干扰,通常采用频分双工(FDD)或时分双工(TDD)的双工方式。无论哪种方式,在同一时间、同一频带上均只存在单一方向的信号,如果能够实现同一时间同一频带上的双向通信,即同频带全双工,将在不增加额外频带的基础上,使网络吞吐量加倍,因而可提高频谱的利用率^[1-3]。然而,同频带全双工技术最大的障碍源于收发机内部发射信号耦合到接收端而给接收机带来的自干扰(SI)。目前,解决同频带全双工通信中的自干扰问题无一例外地采用了天线分离^[4]和3种抵消技术^[5-10]。天线分离依靠电磁波在自由空间的衰减来降低自干扰信号,限制了设备体积和应用场合。3种自干扰抵消技术根据接收通道的不同阶段分为天线抵消、射频抵消和基带抵消。天线抵消利用至少两个发射天线,通过天线空间位置的布置在接收天线处抵消掉自身节点的发射信号,但天线位置一旦确定就仅能抵消固定频率的自干扰信号,抵消带宽受限。射频抵消技术则是通过获取发射信号作为参考信号,并控制其幅值和相位,在接收机前端与接收到的信号相减,以抵消其中的自干扰部分。基带抵消则在接收机将降频信号转换到数字域后,通过信道估算减去自干扰信号^[10-11]。天线抵消除了受物理空间和抵消带宽限制之外,其所能达到的自干扰抵消比较有限,不能完全满足同频带全双工系统对射频自干扰抑制的要求,而基带抵消无法解决强自干扰信号对射频前端的影响,过大的自干扰如果不在进入接收机射频前端前进行有效的抑制,会使射频前端饱和或产生无法接受的非线性^[12]。因此,在同频带全双工通信系统中,射频自干扰抵消是不可缺少的关键环节。

本文提出的自干扰射频抵消技术基于正交矢量合成原理,通过获取相互正交的发射参考信号,并分别控制其幅值,从而合成与自干扰信号幅值和相位相同的抵消信号,最终在接收机前端抵消接收信号中的自干扰信号。正交参考信号通过复制上变频支路来获得,如此则完全摒弃了限制带宽的元件,使得抵消带宽不受限制。正交矢量合成时的幅值则通过

梯度下降算法自动控制。此外,文中射频抵消方案基于CMOS集成理念设计,适于将该自干扰抵消系统集成到现有收发机集成电路中,从而实现小型化、低成本和更广的适用性。

1 自干扰射频抵消系统

1.1 系统结构

本文基于正交矢量合成的原理,提出了自干扰射频抵消方案,如图1所示,方案通过精确控制的方式将耦合到接收端的发射信号从接收机射频输入中反相位抵消。该方案与已有多天线方案不同之处在于,其采用单天线模式,利用环形器提供发射到接收近27 dB的隔离度。该环形器仅能在发射机输出到天线以及天线到接收机输入两个方向上导通,显示出较低的插入损耗,而在其他方向提供一定的隔离度。正交合成的抵消信号样本 I_s 从发射机的上变频电路直接获取,另一样本 Q_s 由复制上变频电路获得。通过复制的方式获得两路正交信号,避免了和频率相关的移相器的使用,而且在CMOS集成电路中可通过匹配获得足够的精度。 I_s 、 Q_s 的幅值由控制器自动控制,产生和自干扰信号幅值相同相位相同的抵消信号。抵消信号最后在接收机输入端与接收到的信号进行相减,从而抵消掉通过天线环形器路径耦合的发射信号。

降频后的残余信号可通过参考电压可变的比较器电路检测,比较结果输入控制器来处理。控制器采用梯度递减算法产生两路正交合成信号的幅度控制码,依次调整正交合成通路上放大器 VGA_I 、 VGA_Q 的幅值 g_i 、 g_q 。若比较结果较低,说明此时合成的抵消信号可以获得更低的残余信号,那么控制器将进一步调低比较器的参考电压,进行下一轮残余信号判定,最终控制器将产生精确的正交合成幅度控制码,满足系统对自干扰信号的抵消要求。

该方案采用正交矢量合成技术的最大优点是解决了带宽限制的问题,如果系统中所采用的环形器、电压控制可变增益放大器等都具有足够的带宽,那么自干扰射频抵消也可以在更大的带宽内实现。正

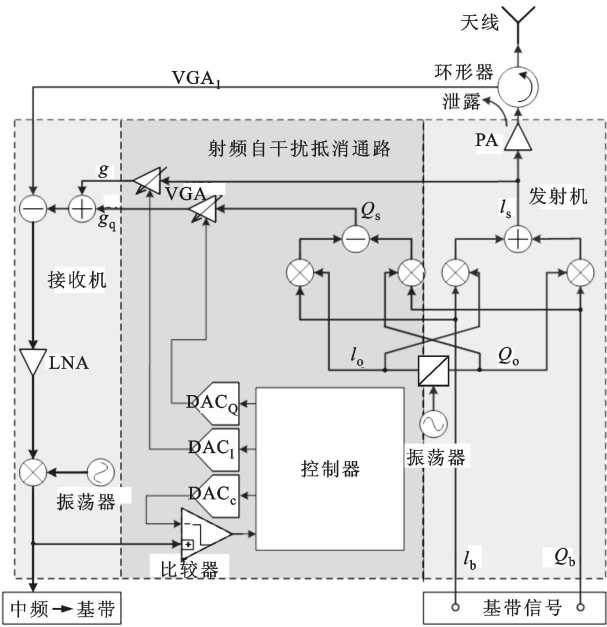


图 1 自干扰射频抵消方案的系统图

交矢量合成技术仅通过控制两个正交矢量的幅值来合成所需的抵消信号,相对于同时控制幅值和相位的方法,控制方法更简单,正交合成信号相角的精度由幅值控制的精度来决定。

1.2 正交矢量合成原理

自干扰抵消方案采用正交矢量合成原理控制正交信号的幅值,从而控制合成信号的幅值与相位,使合成信号与干扰信号幅值、相位相等,来抵消自干扰信号。图 1 中的两路压控增益可变放大器 VGA_1 、 VGA_Q 分别控制正交的两路信号的幅值,从而控制了合成信号的幅值与相位,使其与耦合进入接收机的自干扰信号的幅值、相位相等。

正交矢量合成技术控制抵消信号的幅值和相位的原理如图 2 所示。正交参考信号 I 、 Q 的幅值变换范围和符号根据环形器耦合进来的自干扰信号的幅值、相位变化情况确定。通过控制正交参考信号 I 、 Q 的幅值合成所需要的抵消信号,只要合成后的抵消信号能够匹配自干扰信号的幅值和相位,在接收机前端相减后,就可以完全抵消自干扰信号。

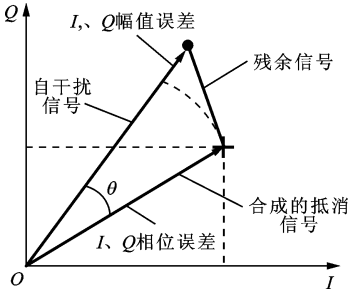


图 2 正交矢量合成技术的原理

受残余信号检测和控制精度的影响,正交合成后的信号与自干扰信号间存在幅值和相位误差,自干扰抑制比随幅值和相位误差变化的曲线如图 3 所示。自干扰抑制比对于相位误差的依赖并不大,而对于幅值误差却很敏感。对于大于 40 dB 自干扰抑制比的研究目标,只要幅值误差控制在 0.07 dB 以内,相位误差在 5° 以内,自干扰抑制比都将大于 40 dB。该精度一方面要求可变增益放大器的增益调节步长满足要求,另一方面要求控制器输出(DAC)的控制电压能够满足该精度,同时决定了 DAC 的位数。

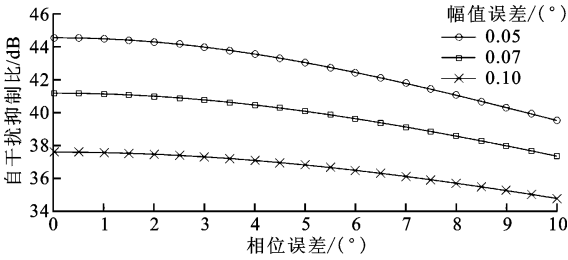


图 3 自干扰抑制比随幅值和相位误差的变化

2 自干扰射频抵消系统建模与仿真

本文采用硬件描述语言 VerilogHDL 编写控制器的代码,实现检测残余信号的梯度递减算法,产生控制正交幅值的控制信号。整体系统则采用安捷伦先进设计系统(ADS)实现数模混合仿真,ADS 带有 ModelSim 的端口,可调用 ModelSim 对 Verilog 代码进行仿真。

自动控制算法的控制逻辑如图 4 所示,图中 V_{ref} 为比较器的参考电压, R 为自干扰抵消后的残余信号, C_{comp} 为比较器输出的比较结果, $C[8:0]$ 为控制 V_{ref} 的 DAC 数字输入信号, $X[7:0]$ 与 $Y[7:0]$ 为控制正交幅值的两路 DAC 的输入数字信号,主要控制 VGA_1 、 VGA_Q 的幅值 g_i 、 g_q 。梯度递减算法通过改变正交参考信号的幅值控制码 $X[7:0]$ 、 $Y[7:0]$ 来依次改变正交合成两路信号的幅值 g_i 、 g_q ,可获得越来越接近自干扰信号的抵消信号,从而抵消后检测到的残余信号 R , R 逐渐变小,控制算法通过 $C[8:0]$ 进一步降低比较器的 V_{ref} ,进行下一轮的梯度递减判定,通过迭代来实现越来越好的抵消效果。图 5 给出了抵消后残余信号 R 的功率随幅值 g_i 、 g_q 变化的三维图,可知存在 g_i 、 g_q 的最优值,即控制信号 $X[7:0]$ 、 $Y[7:0]$ 的最优值,使抵消后的自干扰信号最小。

梯度下降算法从选定的初值开始,该初值是根

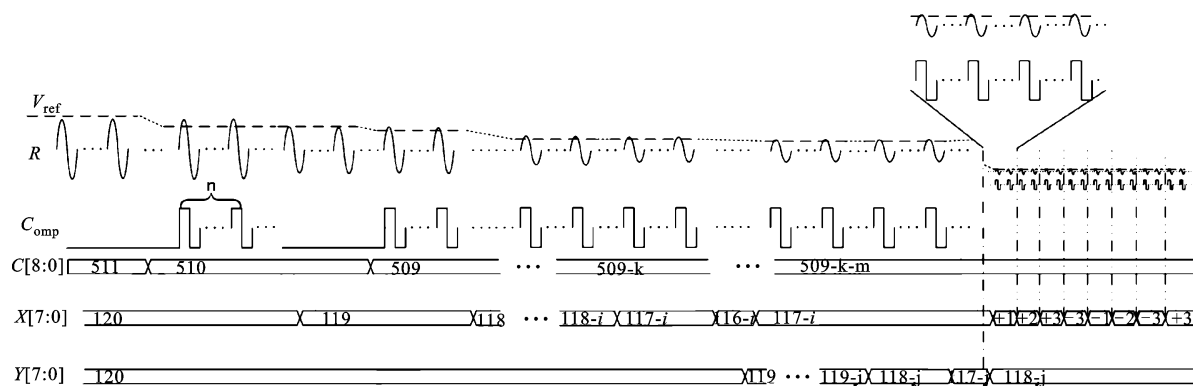
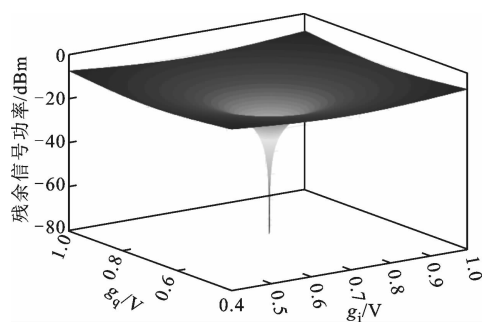
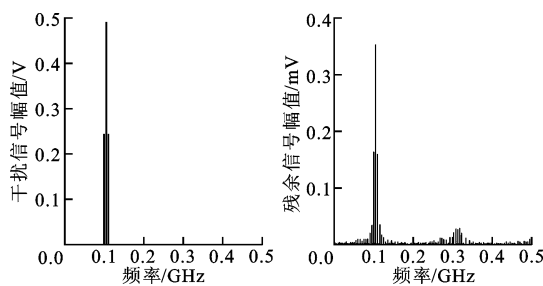


图4 数字控制器控制逻辑

图5 残余信号功率随幅值 g_i 、 g_q 的变化

(a) 干扰信号 (b) 抵消后的残余信号

图7 干扰信号和抵消后残余信号的频谱

据测试结果预估的较优值,初值选择的优劣决定该算法的迭代次数。对于下一个 g_i 、 g_q 的调整值,如果计算所得抵消后残余信号功率更低,即相对于初值结果梯度下降,说明选择正确,则 g_i 、 g_q 更新为新调整值,否则再次调整 g_i 、 g_q 。如果初值选择得当,该算法通过 28~45 次迭代可找到最优的 g_i 、 g_q 。

在系统仿真中,发射机发射的信号功率为 60 mW,并经过功率放大器放大 10 dB,频率为 1 040 MHz,基带输入信号是峰值为 1.414 V、频率为 30 MHz 的正弦波,自干扰射频抵消系统仿真结果如图 6、7 所示。由图 6 可知,残余信号幅值变化总体呈递减趋势,最后收敛时间约为 56 μ s。图 7a 为自干扰射频抵消方案模型中泄漏到接收机接收端的干扰信号频谱,图 7b 为自干扰射频抵消后残余信号的频谱,通过幅值之比可得自干扰抑制比达到了 62 dB。

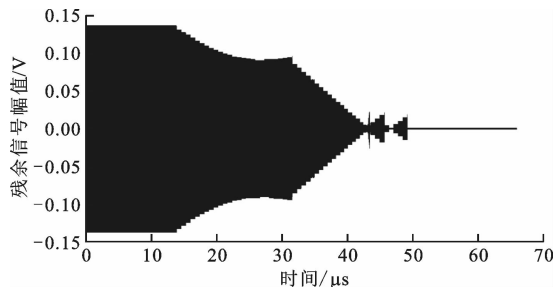


图6 残余信号收敛过程

5 组不同自干扰信号相移,即发射机发射的信号经过环形器后产生不同相移变化自干扰抵消比的关系如图 8 所示。由图 8 可知,在干扰信号相移为 $29^\circ \sim 61^\circ$ 、干扰信号频率在 1 010~1 070 MHz 的 60 MHz 带宽内,其自干扰抑制比总能满足大于 40 dB 的要求。同时,采用正交幅值调制带宽为 50 MHz 的调制信号替代正弦信号作为基带输入信号来检验,自干扰抑制比也达到了 62 dB。

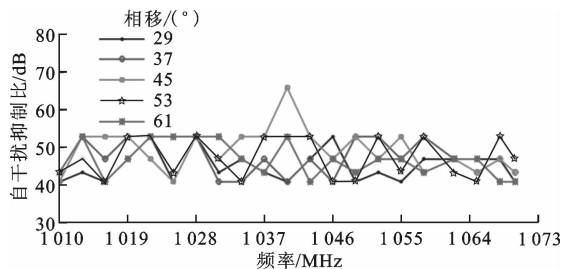


图8 自干扰抑制比随频率的变化

本文将研究方案与现有技术进行对比,结果如表 1 所示。本文自干扰射频抵消研究方案采用递减的算法并用数字控制方式实现自干扰抵消,能在 60 MHz 带宽以上实现自干扰抑制比为 41 dB。文献 [5] 实测得到的总抵消比为 73 dB,总抵消包括射频模拟和数字抵消,但基于信号翻转技术的模拟前端采样的射频模拟抵消方案也只能实现在 40 MHz 带

表 1 性能总结及对比表

方案	算法	控制方式	适应频率范围/MHz	干扰抑制比/dB
本文	梯度下降法	数字	1 010~1 070	≥41
文献[13]	最小均方(LMS)	模拟	225~400	50
文献[5]	最小二乘法	数字	2 400~2 483	73 *

注: * 表示模拟抵消+数字抵消

宽内约 40 dB 的抑制比,本文研究方案却能实现在带宽大于 40 MHz 时,自干扰抵消比能达到 40 dB 以上。文献[13]的实测结果表明,该系统只能在低频处实现很好的自干扰抑制比,并不能适用于频率大于 1 GHz 的情况。本方案采用单天线实现同频带全双工收发功能也异于文献[5,13]采用的多天线技术,能够减小体积并节省硬件开支。

3 结 论

针对同频带全双工通信系统存在的自干扰问题,本文设计完成了一款可集成的单天线同频带全双工自干扰射频抵消系统,打破抵消带宽的限制,可实现自适应控制过程,且具有可片上集成、适用单天线系统等特点。

本文对该方案采用原理与控制算法进行分析,使用 VerilogHDL 硬件语言编写了数字控制器代码,并在 ModelSim 仿真软件中验证了算法的正确性。正交合成的方法摒弃了移相器等设计复杂且限制带宽的元件,通过相互匹配的两路正交参考信号合成相位和幅值满足要求的自干扰抵消信号,在打破带宽限制的同时,也更加适应片上集成实现。通过对抵消后残余信号的识别来自动调整正交信号的幅值,从而实现了自干扰信号的自适应抵消。

系统仿真结果表明,本文设计的自适应射频自干扰抵消系统在超过 60 MHz 的带宽上,自干扰抑制比达到 41~66 dB,该抵消比和抵消带宽可满足多数全双工收发机对射频自干扰抵消的要求,所采用的自适应控制算法使得系统工作的适应性更广。

参考文献:

[1] DUARTE M, SABHARWAL A. Full-duplex wireless communications using off-the-shelf radios: Feasibility and first results [C]// The 44th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 1558-1562.

[2] EVERETT E, SAHAI A, SABHARWAL A. Passive self-interference suppression for full-duplex infrastructure nodes [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(2): 680-694.

[3] HONG S, BRAND J, CHOI J I, et al. Applications of self-interference cancellation in 5G and beyond [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 114-121.

[4] CHOI J I, JAIN M, SRINIVASAN K, et al. Achieving single channel, full duplex wireless communication [C]// Proceedings of the 16th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York, USA: ACM, 2010: 1-12.

[5] JAIN M, CHOI J I, KIM T, et al. Practical, real-time, full duplex wireless [C] // Proceedings of the 17th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York, USA: ACM, 2011: 301-312.

[6] PRADEEP C W, MARIAN C, MATTI L, et al. On the effect of self-interference cancelation in multihop wireless networks [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2010(1): 81.

[7] LIOLIOU P, VIBERG M, COLDREY M, et al. Self-interference suppression in full-duplex MIMO relays [C]// The 44th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 658-662.

[8] EVERETT E, DASH D, DICK C, et al. Self-interference cancellation in multi-hop full-duplex networks via structured signaling [C]// The 49th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 1619-1626.

[9] RADUNOVIC B, GUNAWARDENA D, KEY P, et al. Rethinking indoor wireless mesh design: low power, low frequency, full-duplex [C]// The 15th IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 1-6.

[10] 唐友喜. 同时同频全双工原理与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2016: 36-60.

[11] GHEORMA I L, GOPALAKRISHNAN G K. RF photonic techniques for same frequency simultaneous duplex antenna operation [J]. IEEE Photonics Letters, 2007, 19(13): 1014-1016.

(下转第 108 页)