

基于盲均衡技术的宽带IQ不平衡补偿设计与实现

唐 婷

(中国西南电子技术研究所,四川 成都 610036)

摘要: 针对宽带信号的IQ不平衡问题,给出了基于盲均衡技术的补偿设计方法。该方法通过改进高速解调器的均衡器设计,采用自适应盲均衡技术计算IQ不平衡补偿滤波器,使得均衡器同时具有IQ不平衡补偿和减小码间串扰的功能。在工程应用中,该方法不会增加额外的资源消耗和硬件设计复杂度。测试结果表明,该方法可适用于多种调制方式信号,能有效补偿IQ不平衡。

关键词: IQ不平衡;盲均衡;宽带信号;高速解调器

中图分类号: TN76

文献标志码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.223242

中文引用格式: 唐婷. 基于盲均衡技术的宽带IQ不平衡补偿设计与实现[J]. 电子技术应用, 2023, 49(2): 72-75.

英文引用格式: Tang Ting. Design and realization of wideband IQ imbalance compensation based on blind equalization[J]. Application of Electronic Technique, 2023, 49(2): 72-75.

Design and realization of wideband IQ imbalance compensation based on blind equalization

Tang Ting

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: In order to solve the wideband IQ imbalance problem, a compensation design based on blind equalization is presented. An improved equalizer design is used in high speed demodulator, which computes IQ imbalance compensation filter by adaptive blind equalization technology, therefore the equalizer has the ability to compensate IQ imbalance and reduce inter symbol interference. In engineering application, this method does not increase additional resource consumption and hardware design complexity. The test result shows this method can compensate IQ imbalance effectively in multiple modulation modes.

Key words: IQ imbalance; blind equalization; wideband signal; high speed demodulator

0 引言

随着无线通信的迅速发展,人类航天活动与日俱增,空间飞行器数量急剧增加,导致空间有限的频率资源大量占用。目前S、X、Ku频段已非常拥挤,高频段^[1-4]卫星通信因其具有可提供的带宽大、通信容量大、波束窄、终端尺寸小等优势成为未来卫星通信的必然趋势。近年来,越来越多的国家和机构相继加入到对更高频段卫星通信系统的开发和使用之中^[5-9]。

高频段调制信号可通过多级变频或直接变频产生。多级变频方式设备体积较大且多级非线性失真相互混叠,各级谐波相互叠加,导致调制信号质量下降;直接变频方式与多级变频相比设备体积较小,但由于频率更高,受到射频模拟器件非理想特性、不一致性影响更为严重,导致IQ支路间信号幅度出现差异、相位出现偏移,即IQ不平衡。对于宽带信号,IQ不平衡尤为突出。

IQ不平衡将降低接收信号的性能,导致误码的产生。

解决IQ不平衡问题,目前常用的技术有优化模拟电路、数字补偿技术。优化模拟电路复杂度高且效果有限;数字补偿技术更为灵活、有效,是目前的主流技术途径。数字补偿技术分为数据辅助算法^[10]和非数据辅助算法^[11-15]。文献[13]通过特殊导频结构,通过训练序列实现参数估计,该方法需要发端信号包含训练序列,接收端根据先验信息完成统计和计算。该方法简单有效但训练序列需要占用有限的信号带宽,降低了信号传输效率。文献[14]通过频谱的共轭对称性进行计算补偿参数,无法适用于高速宽带信号。文献[15]通过二阶统计特性的正定性为目标,通过BP神经网络的动量法进行迭代计算,该方法不依赖训练序列且具有较好的校准性能,但计算复杂度较高,硬件实现需要消耗更多的资源。

本文从宽带信号的解调方案出发,通过对均衡器的改进实现宽带信号IQ不平衡补偿,本方案无需在解调方案中增加IQ不平衡补偿模块,通过原有的均衡器模块实现补偿,因此硬件实现不会增加资源消耗和设计复杂度,有利于工程实现。

1 IQ不平衡模型

受到射频模拟器件非理想特性、不一致性影响,接收到的IQ信号在幅度出现差异,相位上不再正交。IQ不平衡模型如图1所示,其中 g 是幅度不匹配因子, θ 是相位不匹配因子。

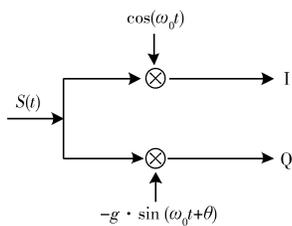


图1 IQ不平衡模型

接收的IQ基带信号如式(1)所示:

$$\begin{cases} \tilde{x}_I(t) = x_I(t) \\ \tilde{x}_Q(t) = -g \cdot \sin \theta \cdot x_Q(t) + g \cdot \cos \theta \cdot x_Q(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $x_I(t)$ 、 $x_Q(t)$ 为理想情况下的基带信号, $\tilde{x}_I(t)$ 、 $\tilde{x}_Q(t)$ 为IQ不平衡时的基带信号。实际接收信号基带信号 $\tilde{x}_I(t)$ 、 $\tilde{x}_Q(t)$ 可以看作是由理想信号 $x_I(t)$ 、 $x_Q(t)$ 叠加组成的。IQ不平衡将带来接收性能的降低,为了消除IQ不平衡对接收信号带来的影响,需要分别计算I路、Q路的补偿滤波器,用于IQ不平衡补偿。

2 高速解调器设计

高速解调器^[16]设计框图如图2所示,包含并行下变频、并行载波环路、并行时钟恢复环路和并行均衡器。

信道的频率响应偏离了理想的均匀幅值和线性相位,已传输的脉冲的两个尾部都会影响相邻的脉冲,这种由于尾部重叠而引起的信号畸变成为码间干扰,它会引起判决的误差。对于高速信号码间串扰影响特别突出,因此高速解调器的设计中都会加入均衡器模块减小码间串扰,减小接收机总的性能损失。

考虑到硬件实现复杂程度,均衡器选用LMS自适应

算法,均衡器输出 $y(n)$ 表示为:

$$y(n) = \mathbf{X}^T(n)\mathbf{W}(n) \quad (2)$$

其中, $\mathbf{X}(n) = [x_n, x_{n-1}, \dots, x_{n-N+1}]^T$ 是均衡器输入信号, $\mathbf{W}(n) = [w_n, w_{n-1}, \dots, w_{n-N+1}]^T$ 是均衡的滤波系数, N 是滤波器阶数。

滤波器系数更新表达式为:

$$\mathbf{W}(n+1) = \mathbf{W}(n) - \mu e(n)\mathbf{X}^*(n) \quad (3)$$

其中, μ 为系数更新步长, $e(n)$ 是输出信号与期望信号的误差。

3 基于均衡的IQ不平衡补偿算法设计

由于上节方案中的均衡器结构IQ共用滤波器系数 $\mathbf{W}(n)$,无法达到对IQ不平衡补偿的效果。对均衡器进行改进,分别对I路数据和Q路数据进行均衡,通过自适应算法分别计算I路和Q路的均衡器系数,从而到达减小码间串扰和补偿IQ不平衡的双重目的,如图3所示。

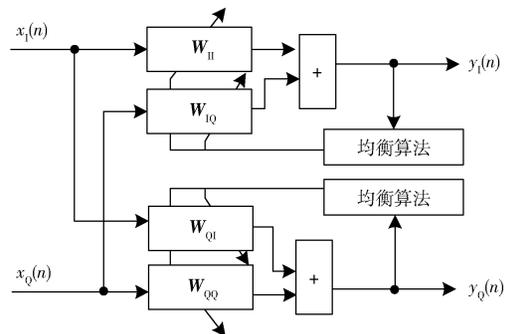


图3 均衡器设计框图

I路均衡器输出 $y_I(n)$ 、 $y_Q(n)$ 表示为:

$$\begin{cases} y_I(n) = \mathbf{X}_I^T(n)\mathbf{W}_{II}(n) + \mathbf{X}_Q^T(n)\mathbf{W}_{IQ}(n) \\ y_Q(n) = \mathbf{X}_I^T(n)\mathbf{W}_{QI}(n) + \mathbf{X}_Q^T(n)\mathbf{W}_{QQ}(n) \end{cases} \quad (4)$$

其中, $\mathbf{X}_I(n)$ 是接收的I路信号, $\mathbf{X}_Q(n)$ 是接收的Q路信号, $\mathbf{W}_{II}(n)$ 和 $\mathbf{W}_{IQ}(n)$ 是I路信号的均衡滤波器系数, $\mathbf{W}_{QI}(n)$ 和 $\mathbf{W}_{QQ}(n)$ 是Q路信号的均衡滤波器系数。

4组均衡滤波器相互独立计算,从而达到对IQ的幅度、相位单独补偿的作用。 $\mathbf{W}_{II}(n)$ 通过I路误差和I路输入迭代更新, $\mathbf{W}_{IQ}(n)$ 通过I路误差和Q路输入迭代更新, $\mathbf{W}_{QI}(n)$ 通过Q路误差和I路输入迭代更新, $\mathbf{W}_{QQ}(n)$ 通过Q路误差和Q路输入迭代更新,系数更新表达式如下:

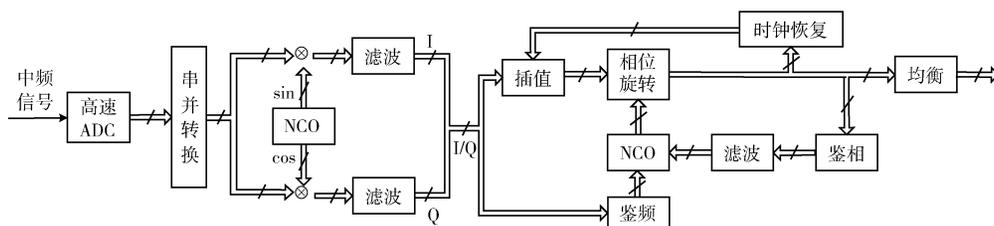


图2 高速解调器设计框图

$$\begin{cases} W_{I1}(n+1) = W_{I1}(n) - \mu e_1(n) X_1(n) \\ W_{IQ}(n+1) = W_{IQ}(n) - \mu e_1(n) X_Q(n) \\ W_{QI}(n+1) = W_{QI}(n) - \mu e_Q(n) X_I(n) \\ W_{QQ}(n+1) = W_{QQ}(n) - \mu e_Q(n) X_Q(n) \end{cases} \quad (5)$$

其中, $e_1(n)$ 是 I 路输出信号与期望信号的误差, $e_Q(n)$ 是 Q 路输出信号与期望信号的误差。

4 测试

本节将对上述补偿算法进行测试验证, 通过任意波形发生器 AWG7122B 发送 16QAM 调制的 IQ 不平衡信号, 幅度不匹配因子 $g=0.9$, 相位不匹配因子 $\theta=20^\circ$ 。通过外接噪声源加噪, 将信噪比调制到 $e_b/n_0 = 16$ 。补偿算法通过 Verilog 语言实现, FPGA 芯片选用深圳国微 SMQ7VX690TFFG1761。本节测试的比较对象分别是采用原均衡器^[16](均衡器 1) 的解调器和经过上述改进后的均衡器(均衡器 2) 的解调器。

测试所得星座图如图 4 所示, 横轴为 I 路数据数值, 纵轴为 Q 路数据数值。进行如均衡器前的星座图如图 4(a) 所示, 解调信号受到码间串扰和 IQ 不平衡的共同影响, 星座点分散且旋转扭曲。经过均衡器 1, 星座图如图 4(b) 所示, 码间串扰补偿后星座点聚集在一起, 但旋转扭曲的问题未得到改善。经过均衡器 2(本文的补偿算法), 星座图如图 4(c) 所示, 码间串扰补偿后星座点聚集在一起, 旋转扭曲的得到改善。

分别对上述两种情况进行性能测试, 测试结果如图 5 所示。均衡器 1 条件下解调器无法补偿 IQ 不平衡, 由于星座图旋转扭曲导致数据判决发生错误, 严重影响了解调器性能。均衡器 2 条件下, 通过补偿 IQ 不平衡, 使得解调器性能迅速提升, 解调损耗在 1 dB 以内。因此到系统中存在较为严重的 IQ 不平衡时, 本文采用的补偿算法能够较好地补偿 IQ 不平衡, 提升解调器性能。

5 结论

本文从工程应用的角度对高速宽带信号的 IQ 不平衡问题进行研究, 通过改进高速解调器的均衡器模块, 采用非正交的均衡器系数达到对 IQ 不平衡进行补偿的

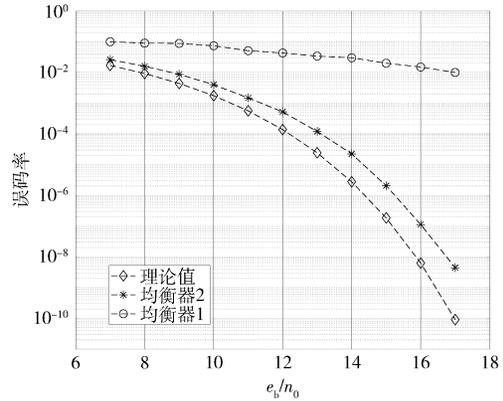


图 5 解调器性能对比

目的。该方法避免了复杂的计算和设计, 不会增加高速解调器的设计难度和资源消耗, 方法简单、易于实现。同时, 由于均衡器可对多种调制方式信号进行均衡, 因此该方法可用于解决多种调制体制信号的 IQ 不平衡问题。

参考文献

- [1] 王中果, 汪大宝, 胡月, 等. 低轨遥感卫星 Ka 频段自适应编码调制应用效能分析[J]. 航天器工程, 2021,30(4): 69-76.
- [2] 张颖, 熊蔚明, 王竹刚. 近地卫星 Ka 频段数传链路抗雨衰自适应模式设计[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(6): 149-155.
- [3] 咸明皓, 刘西川, 姬文明, 等. 降水对 Ku/Ka 频段星地链路衰减特性的影响研究[J]. 电子学报, 2020,48(3): 417-425.
- [4] CHAKRAVARTY K, MAITRA A. Rain attenuation studies over an earth-space path at a tropical location[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2010,72(1):135-138.
- [5] 解玲娜, 王怀. S/X/Ka 频段卫星地面站无人机测试标校设计[J]. 计算机测量与控制, 2020,29(1): 14-19.
- [6] 蒋炜, 李小军, 和新阳, 等. 用于通信卫星的宽带微波光子链路性能研究与验证[J]. 空间电子技术, 2021, 18(1):

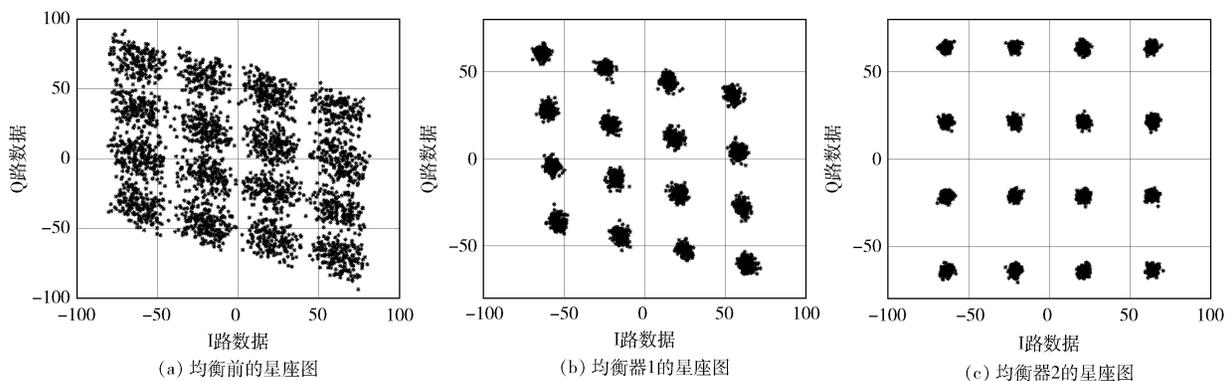


图 4 16QAM 星座图对比

52-58.

- [7] BERCELI T, HERCZFELD P R. Microwave photonics-ahistorical perspective [J]. IEEE Trans. Microw. Theory Tech.,2010, 58:2992-3000.
- [8] 徐扬, 吕立明. Ka 频段模拟预失真线性化器设计[J]. 通信电源技术, 2021,38(2):55-58.
- [9] 翟高伟, 梁晨光, 赵锦瑾, 等. 基于天链卫星的箭载 Ka 频段中继用户终端设计与实现[J]. 宇航总体技术, 2020, 4(4):7-14.
- [10] LUO Y, LI W, HOU X. Implementation of blind I/Q calibration scheme based on FPGA[C]// Proceedings of the 2019 19th IEEE International Conference on Communication Technology. Piscataway: IEEE, 2019:174-178.
- [11] AOKI Y, DAO M T, MIN K, et al. 1.4-GHz bandwidth frequency-dependent I/Q imbalance calibration for 5G mmWave communications[C]//Proceedings of the 2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Piscataway: IEEE, 2019:626-629.
- [12] 陶毅, 丁丽. 利用共轭对称性的数字 IQ 频域校准方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2021,48(2): 181-189.
- [13] 吕方明. IQ 不平衡在 OFDM 系统中的补偿算法研究[D]. 广州:华南理工大学,2020:31-56.
- [14] 陈燕. 宽带数字接收机的 I/Q 通道失配校正[J]. 宁夏大学学报, 2021, 33(1):28-30.
- [15] 马雅男, 徐卫, 刘道煦, 等. 一种新型的宽带接收机 IQ 校正结构[J]. 测控技术,2021,40(2): 118-122.
- [16] 唐婷. 全数字化高速数传解调器的设计与实现[J]. 科学技术与工程, 2016,16(14):32-35.

(收稿日期:2022-08-10)

作者简介:

唐婷(1983-),女,硕士,高级工程师,主要研究方向:高速宽带信号接收技术。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所