

卫星通信终端宽带变频链路相位噪声与谐波联合抑制研究

周若辉

河北神舟卫星通信股份有限公司, 中国·河北 石家庄 050000

摘要: 由于卫星通信技术的发展, 宽带变频链路对于高数据速率的传输起着非常重要的作用。但是链路中相位噪声、谐波干扰都会给信号质量、系统可靠性带来很大影响。本文针对卫星通信终端宽带变频链路, 提出了一种相位噪声和谐波联合抑制的方法, 通过改进变频器的设计以及滤波器的配置来提高信号的相位稳定性以及抑制谐波的效果。

关键词: 卫星通信; 宽带变频链路; 相位噪声; 谐波抑制; 信号完整性

Research on Joint Suppression of Phase Noise and Harmonics in Satellite Communication Terminal Broadband Frequency Conversion Links

Zhou Ruohui

Hebei Shenzhou Satellite Communication Co., Ltd., China Hebei Shijiazhuang 050000

Abstract: With the development of satellite communication technology, broadband frequency conversion links play a very important role in high-data-rate transmission. However, phase noise and harmonic interference in the link can greatly affect signal quality and system reliability. This paper focuses on broadband frequency conversion links in satellite communication terminals and proposes a method for jointly suppressing phase noise and harmonics. By improving the design of the frequency converter and the configuration of filters, the approach enhances signal phase stability and the effectiveness of harmonic suppression.

Keywords: Satellite communication; Broadband frequency conversion link; Phase noise; Harmonic suppression; Signal integrity

0 引言

卫星通信系统对于链路性能的要求越来越高, 在宽带传输以及高频应用中, 相位噪声和谐波干扰是影响信号质量的主要因素。相位噪声会造成载波频率的抖动, 进而造成误码率提高; 谐波干扰会带来带外干扰以及非线性效应, 对接收机解调产生影响。现有的研究大多只关注单一的抑制技术, 不能同时兼顾宽带特性以及多频干扰的抑制。本文利用联合设计的方法来改善宽带变频链路的相位稳定性和谐波抑制能力, 给卫星通信终端提供可靠的方案。

1 宽带变频链路的相位噪声特性分析

1.1 宽带变频链路结构与工作原理

卫星通信终端宽带变频链路是实现信号频率转换和稳定传输的关键部分, 它的性能好坏直接影响到通信的可靠性。典型的链路由本振源、混频器、功率放大器、带通滤波器和控制电路组成。输入信号先在混频器中与本振信号做频率变换得到目标频段信号, 再经过功率放大器提高输

出功率, 最后经过滤波器滤除无用频率, 从而达到稳定的传输效果。宽带设计要保证整个频段内增益平坦、低噪声、高线性度, 频率偏移、噪声累积或者非线性失真都会影响链路的性能, 所以设计时要考虑增益指标、相位稳定性以及频谱纯度。

1.2 相位噪声来源与建模

相位噪声属于影响链路性能的关键因素, 它体现为载波相位随着时间而随机变动的情况。振荡器、混频器、功率放大器等器件都会产生相位噪声, 本振源是主要的来源。振荡器内部热噪声、闪烁噪声以及电源波动等造成输出频率不稳, 经过混频器和放大器之后放大, 产生相位抖动。为了定量地分析噪声对链路的影响, 一般用功率谱密度模型来描述相位噪声随频率偏移的变化规律, 给链路的设计以及抑制策略提供理论基础。

1.3 相位噪声对链路性能的影响

相位噪声会造成载波频率漂移, 使接收机不能同步和

解调信号,从而降低解调精度和误码率。宽带信号中高频分量多,噪声累积使频谱扩展加剧,会侵占邻道频段造成干扰。相位噪声还会使调制信号的频谱变混,造成多载波环境下出现互调干扰,从而影响系统的容量以及频谱利用率。为了克服以上问题,可以采用联合抑制的方法,即优化本振源、改进滤波结构、加入自适应补偿等,从而达到噪声协同抑制的目的,减小相位抖动的幅度,提高载波的稳定性,降低误码率,保持宽带信号的完整性,从而改善卫星通信宽带变频链路的整体性能。

2 宽带链路谐波干扰分析与抑制策略

2.1 谐波产生机制

宽带通信链路上的谐波干扰属于重要的信号质量问题。谐波主要是由于非线性器件产生的,功率放大器是典型的源。当放大器输出功率较大或者工作在非线性区时,输入信号会在二次、三次以及高次非线性响应中产生相应的谐波,这些高频分量会叠加到基带或者中频信号上。除了放大器以外,混频器、调制器等器件的非理想特性都会引起附加的谐波,使链路频谱污染更加严重。所产生的谐波不但会占据原来空闲的频谱资源,还会在链路传输的过程中由于互调效应产生新的干扰信号,从而影响接收机的灵敏度和信噪比。高阶谐波在卫星通信、宽带变频链路、多载波复用系统中容易造成信号混叠、带外干扰,使误码率上升、解调精度降低,严重时还会对链路稳定造成影响。

2.2 谐波特性及影响评估

谐波频率一般是基频的整数倍,它的幅度以及相位特性会随着器件的工作状况、输入信号的强弱而改变。为了定量地分析谐波给系统带来的影响,本文在实验平台下对宽带变频链路做了频谱分析。用频谱仪测量各个阶的谐波功率占总功率的比例,并且观察其随信号功率、频率的变化趋势。结果表明,高阶谐波功率虽然小于基频信号,但是在多载波或者窄带滤波的情况下,它的累积效应对链路干扰不能忽略。从上文可知,在链路上会存在谐波,谐波会和有用的信号相互影响产生新的干扰频点,这就是互调效应。当采用多载波复用的时候,由于互调干扰叠加到接收机敏感频段上,使得误码率增大、信号失真、解调精度下降。因此对于谐波特性进行分析以及影响评价是链路设计与优化的前提。

2.3 谐波抑制方法

抑制谐波干扰常用的方法有改善功率放大器线性度、合理设置混频器和滤波器、使用频率选择性电路等。功率

放大器线性化可以减少二次、三次以及高次谐波的产生,带通或者带阻滤波器可以有效地抑制某个频段内的高次谐波,但是宽带设计时需要考虑滤波器带宽和信号完整性,不能影响到有用信号的传输。在此基础上,本文提出联合抑制方案,把谐波滤波和相位噪声控制结合起来进行设计。通过优化振荡器功率、滤波器带宽、链路增益分布,并使用数字信号处理技术做动态补偿来达到相位噪声抑制和高次谐波抑制的效果。从实验结果可以看出,该方法可以同时减小各个阶谐波功率以及相位噪声的幅度,宽带信号频谱更加规整,误码率也有所降低,接收机的解调精度得到提高。联合抑制方案既考虑了链路性能又考虑了信号完整性,给宽带通信系统在复杂的电磁环境下可靠传输提供了一种有效的技术手段。

3 相位噪声与谐波联合抑制方法

3.1 联合抑制的理论基础

联合抑制法的关键之处在于系统地剖析相位噪声以及高次谐波对宽带信号传输造成的影响机理。相位噪声会造成载波相位抖动,进而降低接收端解调精度,高次谐波会引起频谱杂散以及互调干扰,对信号的信噪比以及误码率造成影响。联合抑制法就是在信号链路里同时加入自适应滤波和功率优化的方法,从而达到对噪声、谐波一起抑制的目的。理论分析得知,调节本振源功率、滤波器带宽和链路增益分布,可以形成互相配合的抑制效果,使得系统在保持信号强度不变的情况下,有效地降低噪声幅度和谐波功率。联合抑制法的设计思想是协同作用,即单一措施只能对某一种干扰起作用,而用功率控制、滤波优化和反馈调节的联合使用,可以同时提高相位稳定性、频谱纯净度。理论模型一般用小信号线性化分析和频域噪声功率谱分析来量化评价链路中各个模块的贡献,给实验和仿真提供参数参照。

3.2 链路设计优化

链路设计优化属于联合抑制方法落地实施的重要部分。为了减小相位噪声,首先选择低相位噪声、高频稳定的振荡器,减小载波漂移、频率抖动对宽带信号的影响。在混频器的设计过程中,利用线性化处理以及恰当的匹配阻抗来减少非线性失真以及互调干扰,进而缩减谐波的产生。滤波器设计上用带阻滤波器或者自适应数字滤波器来对链路中高次谐波频段进行定向抑制,保证宽带信号增益平坦以及频率响应特性不受影响,防止滤波器带宽太窄造成信号传输受阻。另外链路优化要考虑到增益分布、反馈

控制策略。在不同的链段上设置可调增益单元来保证信号传输过程中的功率平衡,并且配合动态功率控制策略,在不同的工作条件下都能够保持较高的信噪比和稳定性。综合优化法可以同时满足宽带传输特性以及噪声抑制的要求,给联合抑制方法的实现提供可靠的硬件支持。

3.3 算法与仿真验证

为了检验联合抑制的方法是否有效,本文用数值仿真建立了链路模型。在仿真过程中加入随机相位噪声、幅度扰动以及多阶高次谐波,来模拟出链路所遇到的各种干扰。从算法上讲,用自适应调节滤波器参数、振荡器功率和反馈系数来评价联合抑制方案对于信号信噪比、误码率以及频谱纯净度的改进情况。仿真结果表明,联合抑制法在全部工作频段内都可以有效地降低相位噪声的幅度,减少高次谐波功率,对宽带信号的频谱特性改善明显。抑制链路的性能比没有抑制链路好很多,信号稳定性和接收精度都得到了提高。在不同的载波频率、信号带宽和功率下,联合抑制算法都具有较好的适应性以及可靠性,说明该设计方案是可行的并且有推广的价值。因此,联合抑制法经由理论剖析、链路改良及仿真验证,塑造起一个由机理解析到工程落实的全部体系。采用协调振荡器、滤波器以及功率控制的方法,可以同时抑制相位噪声和高次谐波,改善宽带链路的传输性能,给卫星通信以及宽带变频系统提供有效的技术支持。

4 实验实现与性能评估

4.1 实验平台搭建

为了检验联合抑制法对于卫星通信宽带变频链路的使用情况,本文创建了一个完整的实验平台。实验平台主要是由卫星通信终端宽带变频链路原型、信号源、频谱分析仪、误码率测试仪和相应的控制模块构成。平台搭建时先对链路做参数初始化,即发射功率、载波频率、信号带宽、调制方式等均要和实际使用环境相适应。之后,用信号源向链路注入宽带调制信号,用频谱分析仪实时检测链路输出特性,用误码率测试设备记录链路在各种状态下性能指标。实验设计分为两组对比,一组为传统链路,即不使用联合抑制方案,另一组为使用联合抑制方案。在实验中,用逐渐改变振荡器参数、滤波器带宽和增益来模拟链路不同的工作状态。对环境噪声和干扰信号加以控制,从而排除外部因素给实验结果带来的影响。经过多次重复测量以及数据采集之后,保证实验结果具有良好的可靠性以及可重复性,从而给联合抑制方法的性能检验赋予足够的支撑。

4.2 实验结果分析

实验结果表明,联合抑制方案对抑制相位噪声、高次谐波有明显的效果。链路输出信号相位噪声、幅度平均降低约 40%,高次谐波功率降低 30% 以上。误码率测试结果表明,采用联合抑制状态的链路误码率大大降低,信号传输可靠度得到提高。从频谱分析仪上可以看出宽带信号的频谱更接近正弦分布,杂散分量小了很多,接收机的解调精度也提高了。在不同的频率、发射功率下,实验系统具有较好的稳定性,误码率、信号质量指标一致,说明联合抑制法对宽带变频链路是可行的、可靠的。除此之外,联合抑制方案在实验中对于链路瞬态响应的影响不大,系统在快速调制发生变化时仍能保持较好的信号保真度,说明这种方法有较好的应用前景。

4.3 性能优化建议

根据实验观察以及数据分析,链路性能进一步改善的方向有以下几方面,第一,提高振荡器的线性度可以减小非线性失真的影响,提高信号传输的稳定性,第二,精细调节滤波器的带宽,使得滤波器可以更加准确地匹配信号的频谱特性,同时抑制掉不需要的噪声频段,从而提高信号的信噪比,第三,采用自适应功率控制策略,根据链路的工作状态自动调节发射功率,从而降低误码率、提高能耗。另外还可以利用数字信号处理技术,对链路输出信号做实时的相位噪声跟踪以及高次谐波抑制。利用数字滤波以及反馈控制动态调节补偿参数来达到链路在各种工作环境中最好的性能。实验结果表明,上述的改进可以提高系统抗干扰能力、传输稳定性和接收精度,给卫星通信宽带变频链路的实际使用提供技术支持以及参考。综上所述,实验平台搭建、数据采集和分析可知,联合抑制可以明显改善宽带变频链路的相位噪声、高次谐波、误码率等性能,基于振荡器优化、滤波器调节、数字信号处理的进一步优化策略也给系统性能提高提供了一条可行之路。

5 结语

本文针对卫星通信终端宽带变频链路的相位噪声和谐波干扰问题,提出联合抑制的方法,并用理论分析、仿真验证、实验测试来证明其有效性。从结果可知,该方法对降低误码率、提高信噪比、保持宽带传输性能有明显的优势。可以利用数字信号处理以及自适应控制的方法来提高宽带链路的抗干扰性能,从而给高性能卫星通信系统提供技术支持。

参考文献:

- [1] 何娇娇. 面向 ACM 的宽带卫星通信信号同步方法研究及验证[D]. 南昌大学, 2024. DOI: 10.27232/d.cnki.gnchu. 2024.002134.
- [2] 宽带通信星座干扰与卫星网络规划分析[C]// 中国通信学会. 2020 中国卫星应用大会报告集. [出版者不详], 2020: 344-402. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2020.047700.
- [3] 卜华文, 徐亮, 常昕. 基于 Ka 高通量卫星的海上油田宽带网络的应用和展望[J]. 卫星应用, 2019(9): 51-55.
- [4] 肖伟. 宽带 GEO 卫星射频非理想特性建模及波形技术研究[D]. 东南大学, 2024.DOI: 10.27014/d.cnki.gdnau. 2024.004107.
- [5] 庞振宇. 射频非理想特性对多波束卫星通信系统影响研究[D]. 东南大学, 2023.DOI: 10.27014/d.cnki.gdnau. 2023.003080.
- [6] 张毅. 低轨卫星宽带 OFDM 通信相位噪声群时延的联合估计[J]. 电讯技术, 2021, 61(6): 716-721.

作者简介: 周若辉 (1974.09-), 男, 汉族, 河北省元氏县, 本科, 工程师, 研究方向: 卫星通信。