

学校编码: 10384

分类号 _____ 密级 _____

学号: 2312101152960

UDC _____

厦门大学

硕士学位论文

应用于北斗导航的射频前端
放大系统研究

Study of RF Front-end

Applied for BeiDou Navigation System

陈慕雄

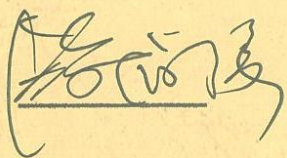
指导教师: 周建华 教授

专业名称: 电子与通信工程

论文提交日期: 2013 年 5 月

论文答辩日期: 2013 年 6 月

学位授予日期: 2013 年 月

答辩委员会主席: 

评阅人: _____

2013 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为（微波与光子技术）课题（组）的研究成果，获得（同上）课题（组）经费或实验室的资助，在（同上）实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）：陈慕雄

2013 年 06 月 06 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

陈慕雄

2013年06月06日

摘要

射频前端放大技术是北斗卫星导航系统的核心技术之一，它决定着系统终端接收机接收信号的质量，也是后端基带信号处理电路能够很好处理从北斗卫星发送的微弱信号的重要条件。本论文是在广泛调研了近年国内外在射频前端放大系统研究现状的基础上，采用自上而下的设计思路，通过系统级-模块级的层次化步骤进行方案设计，根据北斗卫星导航信号的特点采用了带高放的超外差的系统结构，并由其所要求的系统性能指标要求确定各个模块参数如噪声级联、增益分配及其器件的选择，借助仿真分析进一步验证并实现了可应用在北斗导航终端接收中的射频前端放大电路。论文主体内容由如下三个部分组成：

1. 北斗导航射频前端放大系统的链路仿真和分析。首先介绍了表征系统性能优劣的三个关键参数指标要求：级联噪声系数、灵敏度和动态范围，并根据北斗导航体系公布的射频前端所要求达到的参数指标确定本论文所设计射频前端放大系统的结构方案和关键参数分配。为了使北斗导航接收机适应更多的应用环境，还对自动增益控制（AGC）电路做了一些有益探索和仿真分析。

2. 设计仿真了应用于北斗导航射频前端放大系统的级联 LNA、探索了一种北斗导航串行双频滤波器的设计、应用于该系统的有源混频器设计及参数优化，并采用数字预失真技术优化 LNA 的非线性参数，对比分析了优化前后 LNA 的线性度改善程度，由此验证了数字预失真技术在线性优化上的优势。

3. 由北斗导航前端放大电路系统仿真和模块仿真选择合适的实现对应功能的芯片和元器件，绘制出射频前端放大系统的原理版图，并通过外协方法制作出电路板，最后实施元器件的焊接完成系统的硬件实现。此外，还分别基于频谱仪和矢量网络分析仪探讨了具体测试各个模块的关键参数和系统的性能指标的方案，以便验证硬件系统符合北斗导航射频前端放大系统的指标要求。

关键词 北斗导航；射频前端放大；双频滤波；数字预失真；动态范围

ABSTRACT

For signals from the terminal receivers of Beidou satellite navigation systems, the quality was determined by RF front-end amplification, which is one of the core technologies of satellite navigation systems and also an important condition for maintaining the work performances of back-end baseband signal processing circuits. Based on the extensive investigation about newest progress of RF front-end amplification at home and abroad, the paper adopted the top-down design idea and the hierarchical design steps of system-level-to-module-level. According to the characteristics of Beidou satellite navigation signals, a superheterodyne receiver structure is applied at first. Then, according to the performance requirements of RF front-end amplification systems for Beidou navigation, some parameters of each module such as noise allocation, gain allocation and device selection are determined. Finally, the circuit connection is improved and completed by the impedance matching between two modules and the meeting of bias voltage and current requirements. With further simulation analysis and validation, a RF front-end amplification system is designed for the application in Beidou navigation terminal receives. The main contents of the thesis consist of the following three parts:

1. The RF system link simulation and analysis of the front-end amplification. Firstly, three key parameters to characterize the merits of system performances are introduced, including the cascaded noise factor, sensitivity, and dynamic range. Determining the structure and parameter index of the designed RF front-end, the achievable power gain, noise figure and other indicators for each module are allocated through the system budget simulation. In order to enhance the anti-jamming, some useful exploration and simulation on automatic gain control (AGC) circuit have been also done.

2. Modules design. Based on the determined indicators of each module, a cascade LNAs is designed and simulated. Then using the digital pre-distortion

technology for the optimization of LNA linearization, the improvement of its linearity before and after is compared. Finally, the design methods for dual-band-pass filter and microstrip layout have been discussed with an active mixer design and parameter optimization.

3. Hardware implementation and measurement discussion. After determining the module chip and external matching circuit, component values for the designed system, the RF front-end amplification schematics and layouts were drawn out. Then by the association, the sample of circuit board was fabricated with the components welding. At last, the measurement scheme for key parameters of each module and system indicators was discussed, so as to verify the proposed RF front-end amplification system in line with Beidou navigation indicators.

Keywords: Beidou Satellite Navigation; RF Front-end; Dual-band-pass Filter; Digital Pre-distortion; Dynamic Range

目 录

第一章 绪论	1
1.1 课题的研究背景及意义	1
1.2 国内外的研究现状和进展	2
1.2.1 国内外卫星导航系统的发展现状.....	2
1.2.2 射频前端放大系统国内外研究现状.....	4
1.3 论文主要工作及内容安排	7
1.4 论文创新点.....	9
参考文献.....	9
第二章 北斗导航射频前端放大系统非线性理论分析	12
2.1 射频 LNA 的主要性能参数及影响因素.....	12
2.1.1 1-dB 压缩点 (P-1dB)	12
2.1.2 三阶交调点 (IP3)	14
2.1.3 邻信道功率比 (ACPR)	16
2.2 无记忆 LNA 功率放大非线性模型.....	18
2.2.1 Saleh 模型.....	18
2.2.2 Ghorbani 模型.....	19
2.3 数字预失真原理	20
2.3.1 数字预失真器的结构.....	20
2.3.2 自适应算法数学原理.....	21
2.4 本章小结.....	23
参考文献.....	23
第三章 北斗导航射频前端系统链路仿真	25
3.1 北斗导航射频前端系统指标	25
3.1.1 级联噪声.....	25
3.1.2 灵敏度.....	26

3.1.3 动态范围.....	26
3.2 射频前端放大系统指标预算分析	27
3.2.1 射频前端指标要求.....	27
3.2.2 设计方案.....	28
3.2.3 射频前端系统行为级仿真.....	28
3.3 AGC 自动增益控制.....	35
3.3.1 无导频模式 AGC	36
3.3.2 有导频模式 AGC	38
3.3.3 链路参数扫描仿真.....	39
3.4 本章小结.....	42
参考文献.....	42
第四章 北斗双频射频前端系统模块设计.....	44
4.1 LNA 的仿真设计及线性优化.....	44
4.2.1 LNA 的仿真设计	45
4.2.2 LNA 的数字预失真线性优化	49
4.2 北斗导航串行双频滤波器的设计	52
4.2.1 北斗双频滤波器的设计方案.....	52
4.2.2 串行双频滤波器的仿真设计.....	53
4.2.3 串行双频滤波器的微带线实现.....	55
4.3 混频器的设计仿真	56
4.3.1 混频器的参数指标.....	57
4.3.2 有源混频器的仿真设计.....	58
4.3.3 有源混频器参数指标优化.....	61
4.4 小结.....	65
参考文献.....	65
第五章 北斗射频前端放大系统的硬件实现.....	66
5.1 射频前端放大系统实现	66
5.1.1 LNA 的器件选择	66
5.1.2 中频放大器的器件选择.....	67

5.1.3 有源混频器的器件选择.....	69
5.1.4 系统的版图实现.....	70
5.2 射频前端放大系统测试方案的探讨	71
5.2.1 基于射频信号源、频谱仪的系统测试方案.....	71
5.2.2 基于矢量网路分析仪的系统测试方案.....	72
5.3 本章小结.....	72
参考文献.....	72
第六章 总结与展望.....	73
附录一 北斗射频前端放大系统原理图和版图	76
附录二 数字预失真 LMS 自适应算法	78
致 谢	83

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Background and Significance of Subject	1
1.2 Status and Progress of Subject at Home and Abroad	2
1.2.1 Development Status of Satellite Navigation System.....	3
1.2.2 Research Status of RF Front-end Amplification Systems.....	7
1.3 Main Works and Content Arrangements	7
1.4 Innovative Points	9
References 1.....	9
Chapter 2 Nonlinearity Parameter and Theoretical Analysis of RF front-end.	12
2.1 LNA's Main Performance Parameters and Influencing Factors	12
2.1.1 1-dB Power Compression Point (P-1dB)	12
2.1.2 IIP3	13
2.1.3 Adjacent Channel Power Ratio (ACPR)	16
2.2 No memory Nonlinear Model of LNA.....	18
2.2.1 Saleh Model	18
2.2.2 Ghorbani Model.....	19
2.3 Digital Pre-distortion Theory.....	20
2.3.1 Structure of Digital Predistorter.....	21
2.3.2 Mathematical Principles of Adaptive Algorithm	22
2.4 Summary.....	23
References 2.....	23
Chapter 3 Link Simulation of Compass RF front-end.....	25

3.1 Metrics of RF front-end Applied for Beidou Navigation System.....	25
3.1.1 Cascaded Noise	25
3.1.2 Sensitivity	26
3.1.3 Dynamic Range	26
3.2 Budget Analysis of RF front-end`s Indicators.....	27
3.2.1 Index Requirements of RF Front-end	27
3.2.2 Scheme of Design.....	28
3.2.3 System-level Simulation of RF Front-end.....	28
3.3 Automatic Gain Control (AGC)	35
3.3.1 No Pilot Pattern of AGC	36
3.3.2 Pilot Pattern of AGC.....	38
3.3.3 Link Parameter Sweep Simulation.....	39
3.4 Summary.....	42
References 3.....	42
Chapter 4 Dual-band module design of Beidou RF front-end.....	44
4.1 Design and Linear Optimization Simulation of LNA	44
4.2.1 Design of LNA	45
4.2.2 LNA`s Digital Predistortion Linear Optimization.....	50
4.2 Compass Serial Dual-band Filter Design.....	53
4.2.1 Design Scheme of Serial Dual-band Filter	53
4.2.2 Simulation of Serial Dual-band Filter.....	54
4.2.3 Implementation of Serial Dual-band Filters Microstrip Layout.....	56
4.3 Design of Active Mixer	57
4.3.1 Parameter Index of Active Mixer	58
4.3.2 Simulation of Active Mixer	59
4.3.3 Parameter Optimization of Active Mixer	62
4.4 Summary.....	66
References 4.....	66
Chapter5 Hardware Implementation of Compass RF Front-end	67

5.1 Implementation of Compass RF Front-end.....	67
5.1.1 Device Selection of LNA	68
5.1.2 Device Selection of IF Amplifier	70
5.1.3 Device Selection of Active Mixer.....	70
5.1.4 Implementation of System`s Layout.....	71
5.2 Discuss of Measurement Scheme for RF Front-end	72
5.2.1 Based on RF signal source, spectrum analyzer	72
5.2.2 Based on Vector Network Analyzer	73
5.3 Summary	74
References 5.....	74
Chapter 6 Conclusion and Expectation	75
Appendix 1 Schematic and Layout of Compass RF front-end . . .	78
Appendix 2 LMS Adaptive Digital Predistortion Algorithm	80
Acknowledgements.....	83

第一章 绪论

1.1 课题的研究背景及意义

GNSS(Global Navigation Satellite System)是欧盟与 20 世纪 90 年代中期提出的一种综合星座系统,是所有在轨工作的卫星导航系统的统称^[1]。它通过以人造地球卫星作为导航台,对有导航定位接收终端的设备提供导航服务,全球卫星导航系统一般由多个导航卫星、地面控制站以及各种卫星导航定位设备组成。其特点是全球性、连续性、实时性、全天候和高精度,已经广泛应用于陆地、海洋、天空和太空的各类军事和民用领域中,它是目前最普遍的导航定位技术。因此,世界各国对该领域的研究都极大重视,成为继互联网和移动通信之后发展速度最快的信息产业之一^[2]。

卫星信号具有如下主要特点^[3]: ①由于星地之间遥远的传输距离,自由空间存在较大损耗,再考虑大气衰减等影响,终端接收到的卫星信号功率微弱,有用的信号幅度范围一般为-130 ~ -100 dBm; ②接收到的信道中存在干扰信号,其带内一般包含压制性或欺骗性等干扰。对于功率较大的压制性干扰,需要在接收机中加入抗干扰模块,将干扰信号降低到与噪声接近的水平,使得接收信号满足正常解扩信号的要求。由于卫星信号的上述特点,卫星接收终端设备具有以下必须性能: ①高灵敏度所需的最小化的前端噪声系数,以处理卫星微弱信号的特性; ②基带部分滤波器的良好选择特性,以应对接收到的干扰信号; ③具有高的动态范围,以防止接收到大信号造成接收机过载,因此接收机通常都加入自动增益控制(AGC, Automatic Gain Control)电路来实现^[4]。

全球卫星导航系统目前主要包括美国 GPS 全球定位系统,俄罗斯 GLONASS 全球导航卫星系统,欧盟 Galileo 卫星导航系统,以及我国北斗卫星导航系统(Compass)^[5]。GPS 是研究最早、发展最成熟的卫星导航系统。但是近年来,随着 Galileo、Compass 的迅速发展、GLONASS 系统的恢复重建,卫星导航正在从 GPS 时代向 GNSS 时代转变,形成 GPS 与 Galileo、GLONASS 和 Compass 中的一种或多种组合的多模式并存局面。中国在大力参加伽利略计划的同时,始终没有放弃开发自有卫星导航系统的努力,即北斗卫星导航系统。中国的北斗卫星导航系统分别于 2000 年 10 月、12 月,2003 年 5 月发射了 3 颗“北斗导航试

验卫星”，被称为“北斗一代”。2007年4月发射的第五颗北斗卫星开启了中国第二代北斗系统的建设阶段，被称为“北斗二代”^[6]。

射频前端放大系统通过选择性接收空间传播电磁波信号并放大、滤波供基带电路处理，在现代无线通信系统中占据重要的地位，并广泛应用在小到传呼机、手机、导航设备等民用射频产品，大到通信卫星、商业航空以及通信电台等电子通信领域；此外，依赖于射频技术的无线局域网 WLAN、Wi-Fi 以及 WiMax 系统可以提供更高的速率的数据传输，并且具有便携式的特点，其相关产品和射频部件设计也成为目前发展和应用的关键^[7]。随着电子产品小型化、低功耗、多功能的需求，对射频前端放大系统的工作带宽、效率、功耗等提出了更高的要求。

虽然我国卫星导航事业发展迅速。但是由于在 GNSS 终端应用设计上起步较晚以及工艺的限制，其终端产品的核心功能芯片，特别是射频前端芯片的可替换性、适应环境性等其他指标发达国家存在着较大的差距。同时，美国等一些国家出于技术保护，禁止出口一些比较敏感的军用芯片，这就大大的限制了我国国防事业和高精度卫星导航设备产业的发展。因此对北斗导航终端的射频前端放大系统的关键技术进行研究和解决具有一定的研究意义。

1.2 国内外的研究现状和进展

卫星导航系统已成为作为一个国家重要的信息基础设施，俄罗斯、欧盟、美国不惜从国民收入中取出巨资建设发展卫星导航系统。目前，美国 GPS、俄罗斯的 GLONASS 和中国的“北斗一号”卫星导航系统均已投入商业运行。由中国和欧洲 15 国共同参与建设的“伽利略计划”民用卫星导航系统以及中国的“北斗二号”也在积极推进中。下面分别简要介绍下国内外这几个卫星导航系统的发展现状。

1.2.1 国内外卫星导航系统的发展现状

GPS 导航系统是美国的第二代卫星导航系统，它由美国陆、海、空三军在 20 世纪 70 年代联合研制，其主要目的是为这三大军事领域提供实时、全天候和全球性的导航服务，并用于核爆监测、情报收集和应急通讯等一些军事目的，到 1994 年 3 月，24 颗 GPS 卫星星座已布设完成，全球覆盖率高达 98%。20 进入

世纪 90 年代中期，认识到现有 GPS 系统改造的必要性，美国于 1999 提出“GPS 现代化”的提法，通过增加 3 个新信号的频率扩展计划和启动 GPS Block III 卫星的计划对 GPS 系统的现代化改造来进一步提高系统的整体性能^[8]。

GLONASS (Global Navigation Satellite System) 是前苏联从 20 世纪 80 年代初开始建设的全卫星定位系统，它采用频分多址 (FDMA) 方式，根据载波频率来区分不同卫星。截止到 2011 年 11 月，该系统已形成有 28 颗卫星的在轨卫星群。随着地面设施的完善发展，整个卫星导航系统预计将在 2015 年完全建成。届时，其定位和导航误差范围将从目前的 5 米至 6 米缩小为 1 米左右，就精度而言该系统将处于全球领先地位^[9]。

伽利略定位系统 (Galileo Positioning System) 是欧盟正建造中的卫星定位系统，是继美国现有的 GPS 及俄罗斯的 GLONASS 导航系统外，第三个可提供民用服务的定位系统。它是一个独立于 GPS 又能够对其兼容的全球系统。“伽利略”计划于 1999 年初提出并于 2002 年 3 月正式启动。2011 年 10 月，欧洲在法属圭亚那用联盟号火箭首次发射正式运行的伽利略卫星，伽利略卫星导航系统进入全面部署阶段^[10]。

上个世纪的 60 年代，中国就开始了在卫星定位导航等方面探索研究，如陈芳允院士提出了通过两颗地球静止轨道卫星来测定用户位置的定位系统的概念，并称之为“双星快速定位系统”。1989 年，“双星快速定位”的设想在两颗“东方红二号”对地静止通信卫星的使用上得到证实。在 2000 年 10 月、12 月成功发射了两颗“北斗”导航卫星，从而构建了中国第一代卫星导航定位系统——“北斗一代”。在 2003 年 5 月又发射了第三颗北斗导航卫星，此后系统进入稳定运行。“北斗一代”建成初期具有投资小、卫星数量少、用户设备简单价廉和实现一定区域导航定位、通讯等优点。然而就性能来说，和美国 GPS 相比差距甚大^[11]。

我国在该系统的基础上发展了“北斗二代”卫星导航定位系统。根据“先区域，后全球”的建设思路，“北斗二代”系统建设分为两个阶段。“北斗二代”一期工程计划于 2012 年前实现 12 颗“北斗二代”星的组网、区域覆盖，“北斗二代”二期工程则是继续发射 5 颗地球静止轨道卫星和 30 颗非静止轨道卫星，从而组成“北斗二代”卫星导航定位系统，实现全球覆盖。截至 2011 年 12 月，已成功将十颗北斗导航卫星送入太空预定轨道。

1.2.2 射频前端放大系统国内外研究现状

自 1901 年马可尼成功的把无线电信号通过电磁波传输到了大西洋对岸以来,无线电技术正逐渐替代有线通信技术实现通信。无线通信射频信号的频段覆盖从几十千赫兹到几十吉赫兹之间,不同频段信号在空间辐射的特性各不相同。为了避免信号间相互串扰,各种无线通信系统都独占不同的通信频段,比如:GSM 工作在中心频率 900 MHz 和 1800 MHz 两个频段;蓝牙信号工作频点为 2.4 GHz;而卫星导航系统的工作频段一般在 1200 MHz 和 1500 MHz 附近^[11]。

无线通信系统一般都可以用如图 1-1 所示的图形来表示,接收前端通过天线接收从卫星下来的信号,然后下变频送入基带电路进行数字处理。相反地,基带信号通过发射前端上变频到射频频段再发射出去。可以看出收发射频前端的性能决定着一个通信系统质量。

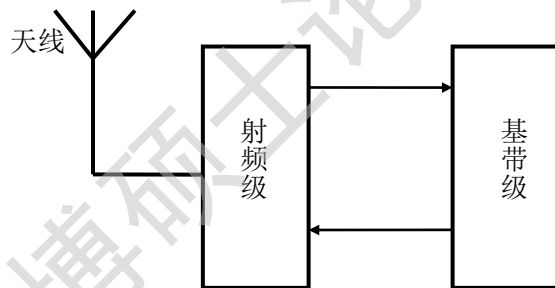


图 1-1 无线通信系统简图

无线射频接收前端电路主要包括滤波器、低噪声放大器、中频放大器、混频器等,把需要传送图像、文字和声音信号等信号尽量不失真或较小的失真接收下来,再对信号的放大和变频处理。输出的信号要满足一定的信噪比的要求,后面的数字信号处理才能进行。以人的声音信号为例,其频率 200 Hz ~ 2000 Hz 范围内。根据天线的理论,要把声音信号辐射到空间,需要的天线长度和声音信号波长相比拟,大概是 300 km 长度以上的天线,这不仅实现困难而且成高本。因此,为了能有效辐射声音信号,在发射端需要通过由频率源产生本振信号对信号进行上变频处理。

无线通信中传输的是射频信号,不同的频段在无线信道中传播的方式会有很大的不同。选取合适的调制方式和功率大小不仅能有效的利用频带,而且接收机能利用滤波等功能进行频带的选择而有效的接收到有用信号,避免其他信号的干

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库