

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.06.024

短波宽带接收信道的优化设计*

李宗强**, 兰设勇, 董小丽

(广州海格通信集团股份有限公司, 广州 510663)

摘要:根据现代短波通信的发展趋势,结合现有技术,提出了适用于高线性大动态范围的短波宽带接收信道电路结构。综合分析了噪声系数的计算、信道增益的确定和动态范围的实现,研究了射频信道各部分的指标分配与整机性能指标优化设计,讨论了对器件选择的考虑,提出了自动增益控制的实现方案。在高线性和大动态范围的具体电路实现上具有一定的创新。实际测试结果表明,该接收信道性能满足设计要求。

关键词:短波通信;宽带接收机;射频信道;动态范围;自动增益控制

中图分类号:TN851 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)06-0791-04

Optimized Design of HF Wideband Receiver Channel

LI Zong-qiang, LAN She-yong, DONG Xiao-li

(Guangzhou Haige Communications Group Incorporated Company, Guangzhou 510663, China)

Abstract: According to the developing trend of modern HF communication, a circuit structure with high linearity and wide dynamic range for wideband receiver is proposed based on the state of engineering implementation techniques. The calculation of noise figure, determination of channel gain and actualization of dynamic range are analyzed. The method of parameters allocation and optimization of every part's circuit are studied. Consideration in selecting devices is discussed. The way to improve dynamic range by means of Automatic Gain Control (AGC) is proposed. There are some innovations in the design of high linearity and high dynamic range. Test result indicates the device meets the design requirements.

Key words: HF communication; wideband receiver; RF channel; dynamic range; automatic gain control

随着通信技术的发展以及电磁环境的日趋变化,现代短波通信要求接收机具有多信号接收、低响应时间、频谱扫描、数据传输速率高、信号存储完整等能力,这就要求接收机朝着数字化、宽带化方向发展。虽然电子器件性能的不断提升,带动 A/D、D/A 的采样速率越来越高,但是要想实现全数字化短波宽带接收机仍有较大难度,需要射频前端辅助完成。中频数字化接收机采用外差式结构,输出中频信号经 AD 变换后,便于数字信号处理。

本文综合考虑宽带接收信道的各项指标,设计出了一种具有宽输入带宽、高灵敏度、大动态范围等特点的短波宽带接收射频前端。

1 接收信道电路结构设计

1.1 技术指标

短波宽带接收信道的主要设计指标如下:工作频段 1.6 ~ 30 MHz,灵敏度不大于 $0.5 \mu\text{V}$,中频频率为 63.078 MHz,无杂散动态范围 (SFDR) 大于等于 85 dB,工作带宽 25 kHz、1 MHz 可切换。

1.2 电路原理结构

根据短波宽带接收信道总体要求,需要研制具有高动态范围的短波宽带数字接收机。工作带宽应具有 25 kHz、1 MHz 可切换功能,射频信道主要功能是对信号接收、变频、宽带放大和抗混叠滤波处理

* 收稿日期:2012-12-12;修回日期:2013-03-14 Received date:2012-12-12;Revised date:2013-03-14

** 通讯作者:lzq-370611@163.com Corresponding author:lzq-370611@163.com

后,输出可供ADC直接采样的中频信号。射频直接采样方案结构简洁,信号经过预选和放大之后即可直接进行AD采样,但性能主要受AD器件限制,因此本文所讨论的宽带接收信道采用超外差一次变频结构^[1]方案,其电路如图1所示。

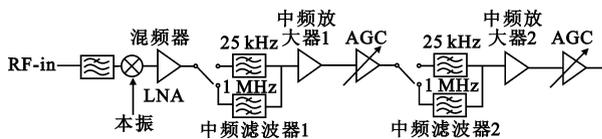


图1 宽带接收信道电路结构

Fig.1 Circuit structure of the wideband receiver channel

由于带宽增加,使得带内信号非常复杂,其带宽、频率分布和功率强弱往往存在较大差别,这样在有较大信号通过时,前置放大器会产生大量的谐波失真和交调失真,这些失真完全可能超出小信号的幅度,将会导致宽带有用信号的频带受损,以及大信号淹没小信号,甚至出现阻塞信道的现象,从而使通信系统的可靠性和有效性严重下降。因此,线性动态范围问题是短波宽带接收机的主要问题,本文将以此作为研究重点。

2 接收信道方案设计

2.1 接收信道拓扑结构的设计

接收信道由混频器、低噪声放大器、中频滤波器、中频放大器和频率合成器^[2]等部分组成,主要完成信号的变频、滤波和放大处理,将射频信号变换为适合于进行ADC直接采样的中频信号。设计中主要考虑了噪声系数、动态范围、增益、AGC控制范围、中频带宽等参数,以保证系统的性能指标。输入端使用了9阶椭圆低通滤波器,以抑制其他频段的干扰,提高中频、镜频抑制比等。

对于短波频段,内部噪声的影响比较小,外界噪声是决定接收机接收小信号能力的主要因素,而前置放大器会降低二阶和三阶交调指标,因此,射频信号经滤波后直接进入混频器。选用IP3值较高的混频器,可以很好减少由此带来的寄生响应,使输出中频信号的交调产物很小,有利于提高动态范围,减小倒易混频,提高抗干扰能力。由于此电路混频器插损较大,导致系统噪声系数增加,灵敏度下降,为了补偿此损耗,紧跟混频器后采用低噪声、高增益的中频放大器降低系统的噪声系数。

与常规设计不同,本文采用两路射频通路,带宽25 kHz信道主要用来进行信号接收解调,而带宽

1 MHz信道主要用来进行频谱扫描。每路信道采用两级中频滤波器,第一级置于低噪放之后,对低噪放的输出进行预滤波,降低对第一级中频放大器的要求,达到较高的三阶截距,具有较低的插入损耗和较高的三阶互调指标;第二级置于第一级中频放大器之后,它具有良好的矩形系数和较高的阻带抑制。

中频滤波器采用声表面波滤波器(SAW)。声表滤波器具有很好的矩形系数,更接近理想特性,具有体积小、一致性好、互调抑制比高等优点。

2.2 噪声系数分析

接收机灵敏度指标取决于接收信道的噪声系数。指标要求灵敏度小于等于 $0.5 \mu\text{V}((S+N)/N=12 \text{ dB})$,在50 Ω 输入阻抗条件下等效为 -113 dBm ,则噪声系数

$$NF = P_{sn} - S_o/N_o - 10\lg(BW) + 174 \text{ dBm/Hz} \quad (1)$$

其中, P_{sn} 为 -113 dBm , $S_o/N_o = 12$, $BW = 3 \text{ kHz}$, 174 dBm/Hz 为电子热噪声。经计算得出 $NF = 14 \text{ dB}$,考虑2 dB的余量,得出信道的噪声系数必须小于12 dB,才能满足设计要求。

2.3 信道增益确定

模拟信道增益^[3]取决于灵敏度(信道噪声系数)和采样AD性能。射频模数转换考虑到转换速度和精度的要求,在此选用16位AD转换器,转换SINAD 81 dBFS,参考电压设为 $2.75 V_{pp}$,输入阻抗50 Ω ,最大不饱和输入功率为12 dBm。

AD的量化噪声为

$$N_q = 10\lg[10^3 \times (V_{pp}/2^n)^2 / (12 \times R)] \quad (2)$$

经计算得出 $N_q \approx -83 \text{ dBm}$ 。则接收机最小模拟信道增益为

$$G(\text{dB}) = N_q + 174 - NF - 10\lg B \quad (3)$$

其中, $NF = 12 \text{ dB}$, B 为检波前的中频带宽,在考核指标时常按照传统窄带接收机的方法进行,带宽选择3 kHz,由此可算出射频信道总增益为 $G = 45 \text{ dB}$ 。考虑一定的冗余量,可以确定出信道增益约为48~50 dB。

2.4 动态范围实现

无杂散动态范围是指接收机在接收多个大信号,随着信号的增大,失真产物增大到等于等效噪声功率时,信号电平与噪声电平之比。从信道的输入三阶互调截距点可以推算出无杂散动态范围,即

$$SFDR = 2/3(IIP3 - 174 - NF - 10\lg B) \quad (4)$$

可见,无杂散动态范围SFDR直接正比于输入截点IIP3,反比于噪声系数NF和中频带宽B,也就是说,噪声系数低,中频带宽窄,输入截点高,则接收机无杂散动态范围就大。要实现系统高线性大动态

范围,可从以下几个方面进行优化设计。

2.4.1 合理分配增益

慎重考虑信道中每一模块的最大功率值,尤其是在放大器前,要满足有源器件的 P_{1dB} 压缩点要求,防止信号压缩。一般为了保证信道的不失真,放大器在 P_{1dB} 压缩点处回退 6~10 dB。

表 1 电路模块设计参数

Table 1 Parameters of the circuit module

模块	噪声系数/dB	增益/dB	OIP ₃ /dBm
低通滤波	1	-1	90
混频器	7	-7	35
低噪放	2	15	45
中频滤波 1	4	-4	40
中频放大 1	1	14	45
中频滤波 2	4	-4	40
中频放大 2	1	14	45

各电路模块参数^[4]依据表 1 的设计,代入软件 AppCAD,计算结果如图 2 所示。由图 2 可知,射频前端各模块按此增益分配,无杂散动态范围在理论上可以达到 97 dB,满足设计要求。

	Stage 1	Stage 2	Stage 3	Stage 4	Stage 5	Stage 6	Stage 7
Stage Name:	FBAR Duplexer	Agilent ATF-36xxx	Image Filter	Agilent MGA-72543	Agilent HPMK-7102	IF Filter	Agilent HPMK-730x
Noise Figure	dB	1	7	2	4	1	4
Gain	dB	-1	-7	15	-4	14	-4
Output IP3	dBm	90	35	45	40	45	40
Input Power	-113 dBm						
Analysis Temperature	25 °C						
Noise BW	0.003 MHz						
Ref Temperature	25 °C						
S/N (for sensitivity)	12 dB						
Noise Source (Ref)	290 °K						
Gain	27.00 dB						
Noise Figure	10.20 dB						
Noise Temp	2747.63 °K						
SNR	16.00 dB						
MDS	-123.00 dBm						
Sensitivity	-117.00 dBm						
Noise Floor	-163.77 dBm/Hz						
Input IP3	17.03 dBm						
Output IP3	44.03 dBm						
Input IM level	-373.05 dBm						
Input IM level	-260.05 dBm						
Output IM level	-346.05 dBm						
Output IM level	-260.05 dBm						
SFDR	97.35 dB						

图 2 无杂散动态范围计算图

Fig.2 Calculation of the SFDR

2.4.2 优选动态范围大的器件

设计高线性度的接收机,通常要选用 P_{1dB} 压缩点高、IIP3 高的中频放大器和混频器。相对小信号放大器而言, P_{1dB} 高的放大器通常都具有较大的噪声系数和功耗,大信号混频器则需要更大的本振信号来驱动,这会使本振泄漏增加,导致内部杂散响应增大,同样功耗也要增加。因此必然会造成设计的难度大大增加,且成本昂贵。

混频器的线性度是直接影响系统高线性实现的关键指标。在此选用 SD5400 系列双平衡混频器,它由 4 个性能完全一致的增强型 MOS 场效应管组成,可获得 +30 dBm 以上的三阶截距,变频损耗约为 7 dB,本振电平高达 +32 dBm,允许最大射频输入的动态范围大,能够确保前端电路的性能要求。

低噪声放大器(LNA)是接收机射频前端的重要

组成部分,首先要求噪声系数越小越好,同时为了抑制后级噪声对射频前端影响,要求有一定的增益,由于 LNA 所处位置,决定它必定是小信号线性放大器,因此要求 LNA 具有足够的线性动态范围^[5]。在此采用型号为 BFP196W 的放大器与输入输出变压器组成的放大电路作为 LNA。该电路简单,噪声系数 2 dB,输出 IP3 为 45 dBm,增益 15 dB,而且可通过调整输入输出变压器匝数比来改变正向功率增益。

ADC 芯片选用凌特公司高速低噪声 16 位数模转换芯片 LTC2217IUP,它的无杂散动态范围为 100 dB,能够满足系统要求。

2.4.3 自动增益控制

要想接收机具有大动态范围,通常需要在射频或中频部分接入自动增益控制电路。本设计中频部分加入数字步进衰减器实现 AGC 功能,选用 Hitite 公司的步进衰减器 HMC470LP3, IIP3 > 50 dBm,可控范围 31 dB/1 dB 步进。这种电路能很好地满足线性动态范围的需求。

接收机射频前端因需设计具有大动态范围,那么保证 ADC 不能工作在饱和状态就成了 AGC 起控点的依据。以 LTC2217IUP 为例,其最大输入电压为 2.75 V_{pp},输入阻抗 50 Ω,最大不饱和输入功率为 12 dBm,为了防止过载,且保证较大的动态范围,最大采样信号输入设为 -16 dBm,然后由数字处理软件将信号调整为 0 dBm。因此,AGC 的起控点为 -16 - 48 dBm = -64 dBm。-113 ~ -64 dBm 由数字处理软件完成,-64 ~ -2 dBm 由数字 AGC 完成,-2 ~ +20 dBm 由天线衰减器完成。

3 主要指标测试结果

选取具有代表性的频点在标准测试环境下,按 GBT 6934-1995 要求进行测试,测试结果如表 2 所示。由表可知主要指标的测试结果符合设计要求。

表 2 测试结果

Table 2 Test result

参数	测量结果	测试条件
增益/dB	48	AGC 未起控
灵敏度/ μ V	< 0.45	SINAD = 12 dB, 带宽 BW = 3 kHz
中频频率/MHz	63.078	中频输出
中频抑制比/dB	> 110	AGC 未起控, 带宽 BW = 3 kHz
镜频抑制比/dB	> 110	AGC 未起控, 带宽 BW = 3 kHz
无杂散动态范围/dBm	> 85	增益 G = 28 dB

4 结 论

本文根据现代短波通信系统的指标要求,研制了具有高动态范围的短波宽带接收机。通过实验测试,该接收信道满足高性能要求,可应用于信息对抗与智能无线通信装备研制,例如新一代水面舰艇短波通信系统等。

参考文献:

- [1] Ludwig R, Bretchko P. 射频电路设计——理论与应用[M]. 王子宇,张肇仪,徐承和,译. 北京:电子工业出版社,2002.
Ludwig R, Bretchko P. RF Circuit Design Theory and Applications[M]. Translated by WANG Zi-yu, ZHANG Zhao-yi, XU Cheng-he. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. (in Chinese)
- [2] 陈邦媛. 射频通信电路[M]. 北京:科学出版社,2005.
CHEN Bang-yuan. Radio Frequency Communication Circuit [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [3] 金国琼. 短波宽带大动态射频信道的设计[J]. 无线电通信技术,2009,35(4):44-46.
JIN Guo-qiong. Design of HF Wideband High Dynamic Range Receiver Channel[J]. Radio Communications Technology, 2009, 35(4): 44-46. (in Chinese)
- [4] 汪玉平. 一种大动态范围射频接收机的设计[J]. 电讯技术,2010,50(7):115-118.

WANG Yu-ping. Design of a RF Receiver with Wide Dynamic Rang[J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(7): 115-118. (in Chinese)

- [5] 刘世刚,葛林东,袁伟. 一种短波数字接收机射频前端模拟前端设计方案[J]. 微计算机信息,2005,21(22):148-150.

LIU Shi-gang, GE Lin-dong, YUAN Wei. Analog Front-End Design of HF Digital Receiver[J]. Microcomputer Information, 2005, 21(22): 148-150. (in Chinese)

作者简介:



李宗强(1982—),男,山东烟台人,2007年获硕士学位,现为工程师,主要研究方向为无线通信;

LI Zong-qiang was born in Yantai, Shandong Province, in 1982. He received the M. S. degree in 2007. He is now an engineer. His research concerns wireless communication.

Email: lzq-370611@163.com

兰设勇(1987—),男,广西柳州人,2010年获学士学位,现为助理工程师,主要研究方向为无线通信;

LAN She-yong was born in Liuzhou, Guangxi Zhuang Autonomous Region, in 1987. He received the B. S. degree in 2010. He is now an assistant engineer. His research concerns wireless communication.

董小丽(1985—),女,河南濮阳人,2011年获硕士学位,现为助理工程师,主要研究方向为无线通信。

DONG Xiao-li was born in Puyang, Henan Province, in 1985. She received the M. S. degree in 2011. She is now an assistant engineer. Her research concerns wireless communication.