

文章编号:1001-893X(2012)06-0969-05

软件无线电跳频电台接收机射频前端设计*

王燕君

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘 要:基于软件无线电的基本要求和发展趋势,提出了一种应用在软件无线电跳频电台中接收机射频前端电路结构,分析了接收机射频前端的总体设计方案,包括前端各部分增益的分配、动态范围的分配、噪声系数及灵敏度的计算,讨论了对器件选择的考虑。实际测试结果表明,该射频前端性能指标满足设计要求。

关键词:软件无线电;跳频电台;接收机射频前端;灵敏度;噪声系数;动态范围

中图分类号:TN802 **文献标志码:**A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2012.06.028

Design of RF Front-end for Frequency-hopping Radio Receiver Based on Software Defined Radio

WANG Yan-jun

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

Abstract: Based on the basis requirements and developing trend of software defined radio(SDR), a circuit structure of receiver RF front-end is proposed for the receiver of SDR-based frequency-hopping(FH) radio. The system design scheme of the receiver RF front-end is analysed, including distribution and calculation of every part's gain and dynamic rang, and computation of noise figure and sensitivity. Consideration of selecting devices is discussed. Test result indicates the RF front-end meets the design requirements.

Key words: software defined radio; FH radio; receiver RF front-end; sensitivity; noise figure; dynamic rang

噪声系数低、线性度好等特点。

1 引 言

随着数字信号处理技术的发展以及电子器件制作工艺的提升,A/D、D/A 的采样速率越来越高,数字处理不断往射频推进,采样频率已从基带进入到了较高的频率,信道可重构能力不断得到提升,系统可以从中频直接采样,继而进行信号处理^[1]。本文所研究的接收机射频前端是基于软件无线电理论来设计和实现的,以达到建立一个通用化、标准化、模块化的接收机射频前端的目标。

本文综合考虑了接收机射频前端的各项指标,设计出了一种用于跳频通信系统的接收机射频前端,该接收机射频前端具有灵敏度高、动态范围大、

2 接收机射频前端电路结构设计

本文所讨论的接收机射频前端采用超外差体系结构,其电路如图 1 所示^[2]。

该接收机射频前端的工作频率范围为 100 ~ 400 MHz,一中频频率 900 MHz,二中频频率 70 MHz,天线馈送的射频信号经过电调放大单元完成低噪声放大后,与高本振混频得高中频 900 MHz,然后通过两级声表面波滤波器滤波、放大,再与低本振混频后产生 70 MHz 的中频信号,中频信号滤波、放大处理后送信号处理模块。

* 收稿日期:2012-03-27;修回日期:2012-04-24

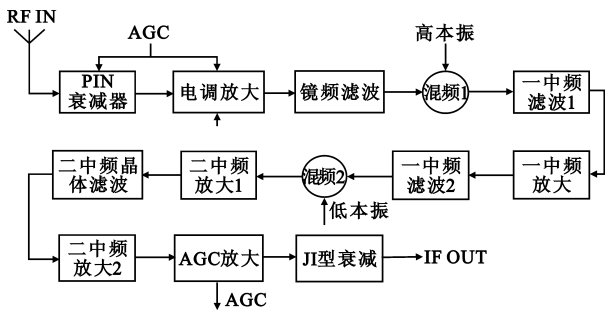


图 1 接收机射频前端电路结构

Fig.1 Circuit structure of the receiver RF front - end

该接收机射频前端主要指标如下:灵敏度小于 - 113 dBm;动态范围大于等于120 dB;中频输出功率范围 - 20 ~ - 10 dBm;中频抑制比大于等于90 dB;镜频抑制比大于等于80 dB;中频选择性:6 dB带宽时大于等于68 kHz,60 dB带宽时小于等于170 kHz。

3 接收机射频前端总体方案设计

接收机射频前端的设计,主要是根据所给出的接收机射频前端性能指标,重点考虑灵敏度与动态范围,而其他性能指标,如镜像抑制比、中频抑制比、倒易混频、三阶截获点以及带外衰减等都受灵敏度和动态范围的影响,并与具体器件的性能有关,在做总体方案设计时可暂不考虑。灵敏度和动态范围的设计主要涉及到前端的总体增益、总的噪声系数和 AGC 动态范围的确定。

3.1 接收机射频前端增益分配与计算

增益分配的原则是有利于接收机射频前端灵敏度及抗阻塞和抗干扰能力的提高。在对接收机射频前端灵敏度及动态范围都有要求时,电路设计时必须两个指标间作折衷考虑。根据技术指标:接收机射频前端灵敏度为 - 113 dBm,中频输出功率范围为 - 20 ~ - 10 dBm,计算中取 - 15 dBm,因此,总增益为

$$G = (-15 \text{ dBm}) - (-113 \text{ dBm}) = 98 \text{ dB} \quad (1)$$

考虑到一定的冗余量和级联匹配网络,设计时将总增益确定为100 dB,100 dB的总增益在接收机射频前端中的分配如图 2 所示^[2]。

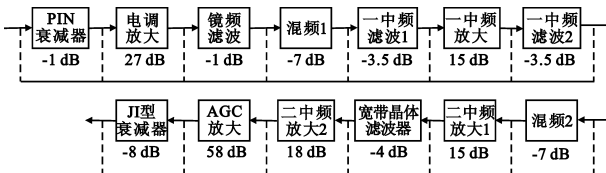


图 2 接收机射频前端增益分配

Fig.2 Gain distribution of the receiver RF front-end

3.2 接收机射频前端动态分配与计算

考虑一种极端的情况,发射机输出功率60 W,两天线距离仅100 m,此时接收机收到信号强度为

$$P_R = P_T + G_T + G_R - (32.44 + 20 \lg f + 20 \lg L) \quad (2)$$

式中, P_T 为发射机发射功率,此处取 $P_T = 10 \lg(60 \times 10^3) = 47.78 \text{ dBm}$; G_T 为发射天线增益,此处取 $G_T = 3 \text{ dB}$; G_R 为接收天线增益,此处取 $G_R = 3 \text{ dB}$; f 为通信频率,单位为 MHz; L 为通信距离,单位为 km。

式(2)表明,在相同距离及其他参数相同的情况下,频率越低,其电波在空气中传播时自由衰减就越小。取 $f = 100 \text{ MHz}$,由已知数据计算得

$$P_R = 1.34 \text{ dBm} (\approx 261 \text{ mV})$$

当从天线接收到的信号进入接收机后,还要经过收发开关等无源有耗器件,因此将接收机射频前端的动态上限定为282 mV(2 dBm)。接收机射频前端的动态范围为

$$DR_F = 2 \text{ dBm} - (-113 \text{ dBm}) = 115 \text{ dB} \quad (3)$$

考虑到一定的余量,设计时将接收机射频前端的动态范围确定为120 dB。

在电路的设计过程中,为确保要求接收机射频前端的动态,采用射频 AGC 和中频 AGC 相结合的原则。为获得120 dB的动态范围,采用三组 AGC 级联的方式。第一组 AGC 用来处理大信号,工作频段高的 AGC,采用 PIN 管结构的 AGC 来获取30 dB的动态范围。第二组采用两级双栅场效应管构成 AGC,双栅场效应管的一栅级用作 RF 输入端,另一栅级作为 AGC 控制电压的输入端。由于双栅分别连接,当 AGC 电压控制放大器增益时,双栅场效应管的输入输出阻抗基本不变,这组 AGC 可获得20 dB的动态范围。第三组 AGC 在 IF 级,由于频率较低,用 VGA - AGC 来获得70 dB的动态范围^[2]。

3.3 噪声系数及灵敏度计算

高灵敏度实现依赖于整机噪声系数的降低。系统噪声系数可以由级联系统的总噪声系数公式计算。同样,计算时需要把各级的增益换算为实际的倍数,再将计算出来的总噪声系数换算成分贝值。噪声系数计算公式为

$$F_{\Sigma} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \cdots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 \cdots G_{n-1}} \quad (4)$$

由式(4)可知,前端噪声系数对接收机的贡献最大。接收机射频前端采用高增益、低噪声系数的器件有利于提高系统灵敏度。电调放大单元选用了低

噪声双栅场效应管作放大管,该器件噪声系数极低(近 1 dB)。但由于设计中根据需要采用了功率匹配的输入、输出网络、PIN 管开关以及衰减器等,整个电调放大部分电路的噪声系数在5 dB左右。接收机射频前端各单元的增益与噪声系数分布如表 1^[2]所示。

表 1 接收机射频前端各单元增益与噪声系数分布(分贝数)
Table 1 Each unit gain and noise figure distribution(dB number)

名 称	增益/dB								噪声系数/dB							
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
衰减器及电调放大	26								5							
镜频滤波		- 1								1						
混频 1			- 7								7					
一中频滤波 1				- 3.5								3.5				
一中频放大					15								4.3			
一中频滤波 1						- 3.5								3.5		
混频 2							- 7								7	
二中频放大								15								4.3

将表 1 中的接收机射频前端各级网络增益和噪声系数的分贝数换算为自然数,如表 2 所示。

表 2 接收机射频前端各单元增益与噪声系数分布(自然数)
Table 2 Each unit gain and noise figure distribution(natural number)

名 称	增益/dB								噪声系数/dB							
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
衰减器及电调放大	398								3.16							
镜频滤波		0.794								1.259						
混频 1			0.199								5.012					
一中频滤波 1				0.446								2.238				
一中频放大					31.622								2.691			
一中频滤波 1						0.446								2.238		
混频 2							0.199								5.012	
二中频放大								31.622								2.691

根据公式(4)有
$$F_{\Sigma} = 3.16 + \frac{1.259 - 1}{398} + \frac{5.012 - 1}{398 \times 0.794} \cdots = 3.286366$$

换算为分贝数为

$$NF = 5.167 \text{ dB}$$

要达到接收灵敏度的要求,接收机射频前端中频输出的 SNR 至少应达到12 dB。

根据灵敏度计算公式:
$$S = -174 + NF + 10 \lg B + SNR \quad (5)$$

式中, S 为接收机射频前端灵敏度,单位 dBm; NF 为接收机射频前端噪声系数,单位 dB; B 为检波前的中频带宽,单位 Hz; SNR 为信号检波所需的 $(S + N)/N$,单位 dB。
$$S = -174 + 5.167 + 10 \lg 10000 + 10 = -118.83$$

从理论结果可看出,此方案满足技术指标的灵敏度要求。

4 接收机射频前端主要器件的选择

在选择器件时主要考虑的性能指标是噪声性能、三阶截点以及对各种干扰的抑制性能等。下面主要讨论几个主要器件的选择。

4.1 低噪声放大器

低噪声放大器(Low Noise Amplifier,LNA)是接收机射频前端的重要组成部分。首先,LNA 位于接收机射频前端的前端,要求噪声系数越小越好;同时,为了抑制后面各级器件噪声对接收机射频前端的影响,要求有一定的增益,但为了避免混频器过载产生

非线性失真,增益又不能过大。其次,LNA 所接收的信号很弱,因此低噪声放大器必定是小信号线性放大器,但是受传输路径的影响,信号的强弱又是变化的,接收小信号的同时又可能伴随许多强干扰信号混入,因此要求 LNA 有足够的线性动态范围^[3]。

基于以上几点考虑,本设计采用型号为 CX661D 的双栅 MOSFET 场效应管作为低噪声放大器。该放大器具有极小的噪声系数(1 dB),工作频带可达 1 GHz,最高增益为 17 dB,1 dB 压缩点 13 dBm,器件指标满足设计要求。通过改变增益控制栅对栅极的电压,可使 LNA 的增益在 0~20 dB 范围内变化。

4.2 混频器

混频器是接收机射频前端的关键器件,混频器是非线性器件,其动态范围、变频损耗、隔离度、交调性能等对接收机射频前端的灵敏度、动态范围、各种干扰抑制性能等有着非常大的影响。混频器分为有源混频器和无源混频器,有源混频器隔离度高且对本振的要求低,但是动态范围、噪声性能远不如无源混频器。

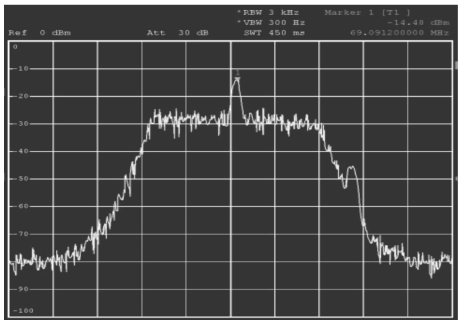
本方案两次变频混频器均采用 Mini - Circuits 公司的 TUF - 5X 型双平衡混频器。该混频器的 RF/LO 频率范围为 20~1 500 MHz,输出中频范围可从直流到1 000 MHz;变频损耗约为7 dB;LO - RF 隔离度为42 dB,LO - IF 隔离度为32 dB;当本振注入为 7 dBm 时,可以承受1 dBm 的 RF 信号。

4.3 AGC 放大器

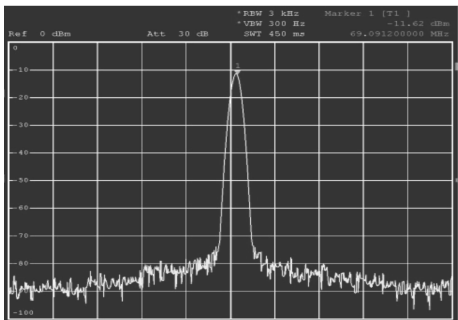
模拟前端的增益及动态范围主要靠 AGC 放大器提供。本方案所采用的中频 AGC 放大器 AD8367 是 AD 公司推出的一款可变增益单端 IF 放大器。它使用 AD 公司先进的 X - AMP 结构,具有优异的增益控制特性。由于在片上集成了律方根检波器,因此它也是全球首枚可以实现单片闭环 ACC 的 VGA 的芯片。该芯片带有可控制线性增益的高性能 45 dB 可变增益放大器,并可以在任意低频到 500 MHz 的频率范围内稳定工作。采用级联两片 AD8367 可达到70 dB 的 AGC 控制范围。

5 实测结果

选取两个有代表性的频点对接收机射频前端进行测试,图 3 和图 4 为各频点接收机射频前端所要求的最小可接收信号和最大可接收信号输入时的输出频谱图。

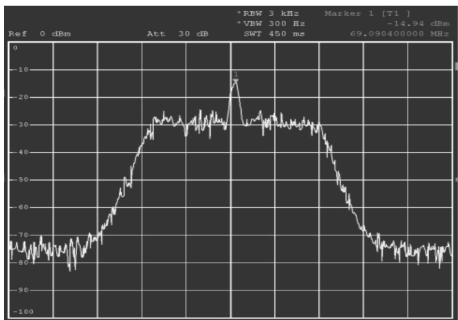


(a)108 MHz@ - 118 dBm 输入

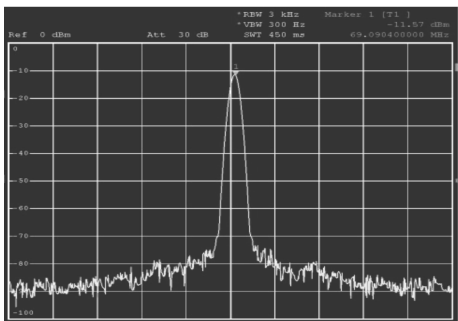


(b)108 MHz@ 10 dBm 输入

图 3 中频信号频谱图 @ 108 MHz
Fig.3 IF signal @ 108 MHz



(a)399.5 MHz @ - 119 dBm 输入



(b)399.5 MHz @ 10 dBm 输入

图 4 中频信号频谱图 @ 399.5 MHz
Fig.4 IF signal spectrum @ 399.5 MHz

由图 3 和图 4 可看出,接收机射频前端灵敏度

指标、动态范围及中频输出功率范围指标满足指标要求。其他指标测试结果见表 3。

表 3 实测结果 Table 3 Test result			
镜频抑制比 /dB	中频抑制比 /dB	中频选择/kHz	
		6 dB 带宽	60 dB 带宽
85	108	82	134

从表 3 可看出,所有指标均满足要求。

6 结 论

本文在软件无线电理论上,对接收机射频前端采用超外差式二次混频结构,从实际测试得到的数据分析,在整个工作频段内,接收机射频前端灵敏度高、动态范围大、抑制性能好,达到了预期的设计要求。

参考文献:

[1] 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)

[2] 王燕君.超短波电台接收机射频前端研制[D].成都:电子科技大学,2009.
WANG Yan-jun. Reserch of Receiver RF Front-end for Super-short Waves Radio[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009. (in Chinese)

[3] 刘世刚, 葛临东, 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(11-2): 148-150.
LIU Shi-gang, GE Lin-dong, YUAN Wei. Analog Front-End Design of HF Digital Receiver[J]. Microcomputer Infor-

mation, 2005, 21(11-2): 148-150. (in Chinese)

[4] 施永热, 陈霁月. VHF 跳频电台接收机射频前端的仿真设计与研究[J]. 杭州电子科技大学学报, 2009, 22(9): 34-38.
SHI Yong-re, CHEN Ji-yue. Design and Application of High Frequency Amplifier in the VHF Frequency-hopping Radio Receiver[J]. Journal of Hangzhou Electronic Technology University, 2009, 22(9): 34-38. (in Chinese)

[5] 王康年. 高频电子线路[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2009.
WANG Kang-nian. High Frequency Electron Circuit [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2009. (in Chinese)

[6] 莫程建, 周胜源. 基于软件无线电宽带接收机射频前端研究与仿真[J]. 电子设计工程, 2010, 18(8): 13-15.
MO Cheng-jian, ZHOU Sheng-yuan. Research and Simulation of Wideband Receiver Based on Software Radio[J]. Electronic Design Engineering, 2010, 18(8): 13-15. (in Chinese)

[7] 朱洪亮, 葛临东, 刘世刚. 新型短波窄带接收机射频前端的设计与实现[J]. 信息工程大学学报, 2006, 7(2): 182-185.
ZHU Hong-liang, GE Lin-dong, LIU Shi-gang. Design and Implementation of One New Type Short Wave Narrow Band Receiver RF Front End[J]. Journal of Information Engineering University, 2006, 7(2): 182-185. (in Chinese)

作者简介:

王燕君(1974—),女,山西祁县人,2009 年于电子科技大学获硕士学位,现为工程师,主要从事射频通信的研究。

WANG Yan-jun was born in Qixian, Shanxi Province, in 1974. She received the M.S. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2009. She is now an engineer. Her research concerns RF communication.

Email: wyj_cx@sohu.com