

高精度自动增益控制接收机的设计与实现

朱银霞, 张剑, 田湘, 胡婧, 程剑

(陆军工程大学 通信工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 自动增益控制(AGC)电路在接收机中起着非常重要的作用, 它能够实现在输入信号幅度变化较大的情况下使输出信号幅度保持恒定或仅在较小范围内变化。为提高接收机的自动增益控制动态范围、控制速度以及降低外部信号对控制精度的影响等, 提出了一种高精度自动增益控制接收机, 利用数字AGC电路控制集成电路内部的可变增益放大器(VGA)方式来实现, 并进行了硬件加工。测试结果表明提出的接收机可实现高精度的自动增益控制。

关键词: 自动增益控制(AGC); 高精度; 接收机

中图分类号: TN96

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.222523

中文引用格式: 朱银霞, 张剑, 田湘, 等. 高精度自动增益控制接收机的设计与实现[J]. 电子技术应用, 2022, 48(10): 135–138.

英文引用格式: Zhu Yinxia, Zhang Jian, Tian Xiang, et al. The design and implementation of high precision automatic gain control receiver [J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(10): 135–138.

The design and implementation of high precision automatic gain control receiver

Zhu Yinxia, Zhang Jian, Tian Xiang, Hu Jing, Cheng Jian

(College of Communication Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

Abstract: Automatic gain control (AGC) circuit plays a very important role in the receiver. It can keep the output signal amplitude constant or only change in a small range when the input signal amplitude changes greatly. In order to improve the AGC dynamic range, control speed and reduce the influence of external signals on control accuracy, this paper presents a high-precision AGC receiver, which is realized by using digital AGC circuit to control the variable gain amplifier (VGA) in Integrated circuit. The test results show that the receiver proposed in this paper can realize high-precision automatic gain control.

Key words: automatic gain control (AGC); high-precision; receiver

0 引言

随着电子技术的发展, 接收机在整个电子领域占有越来越重要的地位^[1]。由于受发射功率、电波传播衰落、接收信号条件以及其他一些干扰因素的影响, 导致接收机输入端的信号动态范围较大, 而接收机的输出功率是随着输入信号的大小而变化的, 因此接收机的输出端会出现强弱非常悬殊的信号功率^[2–6]。如果信号放大增益过大, 将导致接收机处于非线性状态, 可能产生谐波; 如果放大不足, 又可能导致接收的信号太小, 不利于后续解调^[7–10]。因此, 必须要设计动态范围大、控制精度高的自动增益控制(AGC)电路, 在接收机输入信号功率发生变化的情况下保证接收机输出信号幅度的稳定性^[11–13]。

目前, 自动增益控制电路被广泛应用于各种接收机接收系统中^[14]。控制方法主要有两种: 一种是改变放大器本身的参数, 使其增益发生变化; 另一种是在放大器级间插入可变衰减器, 控制衰减量, 使增益发生变化^[15]。两种方法均需检测信号的功率大小。

本文利用数字自动增益控制电路辅助调整模拟接收机, 实现高精度的自动增益控制。

1 接收机结构

本文提出的高精度自动增益控制接收机的原理框图如图1所示。

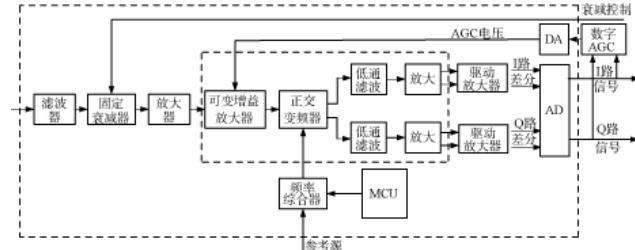


图1 高精度自动增益控制接收机原理框图

该接收机由模拟电路及数字电路共同组成。

为了适应不同增益的LNB设备, 滤波器后插入一个15 dB固定衰减器, 若LNB设备输出信号功率大于-25 dBm则将入信号衰减, 若小于-25 dBm则不衰减; 经射频

(RF) 放大器放大后与频率综合器产生的本地载波正交下变频后变为低中频信号，经驱动放大器放大和 A/D 采样后送给数字电路部分进行功率检测，检测信号与预先设定的参考值进行比较得出误差信号，该信号经 D/A 转换为模拟控制电压用于控制可变增益放大器(VGA)，使其输出的信号维持在固定的电平。该结构适合各种类型的通信系统。

本文提出的接收机的主要设计指标如下：

- (1) 输入信号频率：900~2 250 MHz
- (2) 输入信号电平：-70~-5 dBm
- (3) 通道 AGC 增益控制范围：65 dB
- (4) 输出信号频率：低中频

2 模拟电路设计

2.1 正交下变频

图 1 中可变增益放大器、正交下变频器、低通滤波器、输出放大器为接收机模拟部分的核心，在本文中采用单片 AD8347 来实现^[16]。AD8347 是 ADI 公司的一款集成有可控增益放大器、正交下变频混频器、差分放大电路等模块的宽带直接下变频正交解调器。其能够接收 800~2 700 MHz 范围内的射频输入信号，只需单芯片及少量的外围器件即可完成射频信号到基带至低中频 IQ 信号的变换。

该芯片能够提供 69.5 dB 的可变增益范围，增益和控制电压之间具有较好的线性关系，该芯片可轻松实现宽动态范围的接收设计，符合本文设计的接收机指标。其主要引脚外部设计如图 2 所示。

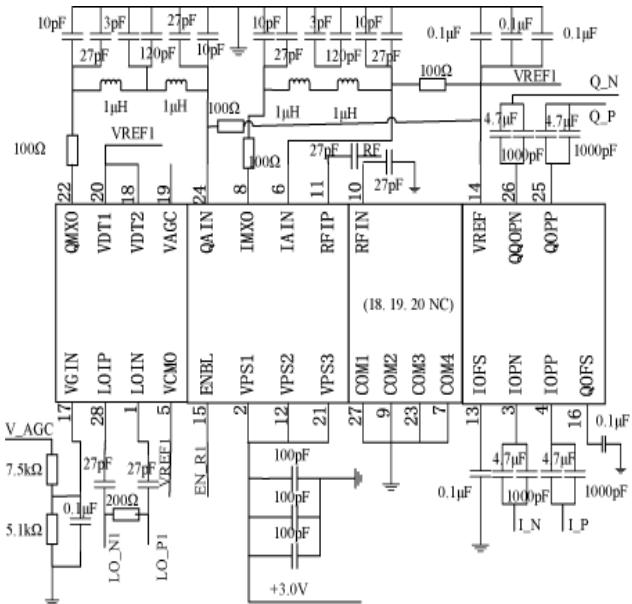


图 2 射频正交下变频模块电路图

正交下变频的基本原理是以本振频率为 f_0 的一对正交载波与接收信号相乘，再通过滤波，可得到低中频 IQ 两路信号。其原理框图如图 3 所示。

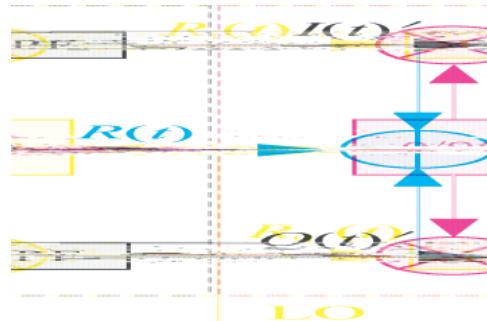


图 3 正交下变频原理框图

设射频信号为：

$$R(t) = I(t)\cos(2\pi f_c t) - Q(t)\sin(2\pi f_c t) \quad (1)$$

式中 f_c 为接收信号射频频率。

射频信号与本地产生的差分载波相乘后得到的 IQ 两支路信号分别为：

$$\begin{aligned} R_i(t) &= R(t)\cos(2\pi f_0 t) \\ &= \frac{I(t)}{2} \{\cos[2\pi(f_c + f_0)t] + \cos[2\pi(f_c - f_0)t]\} \\ &\quad - \frac{Q(t)}{2} \{\sin[2\pi(f_c + f_0)t] + \sin[2\pi(f_c - f_0)t]\} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} R_q(t) &= R(t)\sin(2\pi f_0 t) \\ &= -\frac{I(t)}{2} \{\sin[2\pi(f_c + f_0)t] - \sin[2\pi(f_c - f_0)t]\} \\ &\quad + \frac{Q(t)}{2} \{\cos[2\pi(f_c - f_0)t] - \cos[2\pi(f_c + f_0)t]\} \end{aligned} \quad (3)$$

通过低通滤波器滤波将和频分量滤除，得到低中频信号为：

$$I(t)' = \frac{I(t)}{2} \{\cos[2\pi(f_c - f_0)t] - \frac{Q(t)}{2} \sin[2\pi(f_c - f_0)t]\} \quad (4)$$

$$Q(t)' = \frac{I(t)}{2} \{\sin[2\pi(f_c - f_0)t] + \frac{Q(t)}{2} \sin[2\pi(f_c - f_0)t]\} \quad (5)$$

低中频信号的中心频率为：

$$f_{IF} = f_c - f_0 = 5 \text{ MHz} \quad (6)$$

正交下变频不存在频谱混叠，可以更灵活地选择中频频率。

由于接收信号频率范围较宽，为 900~2250 MHz，同时接收信号频率已知，文中的本振频率 f_0 为可变的，随着输入信号的变化不同。频率配置关系满足下式：

$$f_{IF} = f_c - f_0 = 5 \text{ MHz} \quad (7)$$

2.2 频率综合器

RF2052 是 RFMD 公司推出的一款低功耗、高性能的宽带频率合成器，供电电压为 2.7~3.6 V，供电 3 V 时电流约 55~75 mA，功耗低，本设计中采用 3.3 V 电压供电。该芯片将本振(LO)和射频混频器集成在内。本振是由 N 分数锁相环和压控振荡器组成，能够产生一个相位噪声低、频率分辨率高的本振信号。本振信号可在 300 ~ 2 400 MHz 内连续可调。参考源可接 10 ~ 52 MHz 的外部晶振，也可以接 10 ~ 104 MHz 的外部参考源，以满足

多种参考频率的选择，本设计参考源选用 10 MHz 晶振。

RF2052 包含了 2 个内部和 1 个外部 VCO，外部 VCO 外接约 1 nH 电感实现 1 200~1 600 MHz 的频率输出，三个 VCO 通过寄存器的控制字来选择，VCO 的输出可直接输出或进行 2、4 分频输出，共同实现 300~2 400 MHz 的频率输出。VCO 覆盖范围如表 1 所示。

表 1 VCO 的覆盖频率范围

VCO	电感	VCO 输出频率/MHz	2 分频/MHz	4 分频/MHz
VCO1	内部	1 800~2 400	900~1 200	450~600
VCO2	内部	1 500~2 100	750~1 050	375~525
VCO3	外部	1 200~1 600	600~800	300~400

本文中设计的频率合成器输出频率为 905~2 255 MHz，与输入信号正交下变频后输出 5 MHz 的低中频信号，在 905~1 200 MHz 使用的是内部 VCO1 的二分频，在 1 200~1 500 MHz 使用的是 VCO3 的直接输出，在 1 500~2 100 MHz 使用内部 VCO2 的直接输出，在 2 100~2 255 MHz 使用内部 VCO12 的直接输出，其中 VCO3 使用的是外部电感。频率合成器的实现框图如图 4 所示，外围结构简单，主要包括环路滤波器、控制电路及滤波器。芯片的系统控制部分由 NXP 公司的 LPC3250 来完成，芯片的所有寄存器均采用三线串行总线对其进行读写操作，利用示波器捕捉的写时序如图 5 所示。

```

graph TD
    MCUC[MCU] -- "控制" --> RF[RF2052]
    REF[10 MHz参考] --> RF
    RF --> Loop[环路滤波器]
    Loop --> Filter[滤波器]
    Filter --> Output[输出]
  
```

图 4 频率合成器框图

图 5 时序图

3 数字 AGC 电路设计

虽然 AD8347 芯片内部集成了检波电路，可实现自动增益控制，但由于模拟 AGC 易受干扰，在控制精度上会受影响。数字 AGC 具有处理灵活、不会引入附加噪

声、可靠性高等优点。故本文提出的高精度自动增益控制接收机采用数字 AGC 来实现。其实现过程如图 6 所示，其中标深色为数字 AGC 部分。

图 6 AGC 实现模型

数字 AGC 电路首先估计信号的功率，并与预先设计的功率参考值进行比较，利用误差信号产生控制信号调整 VGA 增益，从而保证进入 A/D 芯片的信号大小保持恒定。

数字 AGC 的具体实现原理框图如图 7 所示。

```

graph LR
    I[IQ信号] --> SquareI[平方]
    Q[Q路信号] --> SquareQ[平方]
    SquareI --> Adder[加法器]
    SquareQ --> Adder
    Adder --> Limiter[限幅器]
    Ref[参考值] --> Limiter
    Limiter --> Subtractor[减法器]
    Subtractor --> Accumulator[累加器]
    Subtractor --> Control[控制信号]
  
```

图 7 数字 AGC 的原理框图

数模转换芯片的输出为 2 路 10 bit 的 IQ 数字信号，IQ 信号接数字 AGC 的输入，分别对 IQ 两路信号求平方和得到信号的功率，实现功率检测；平方和后信号的比特位数由 10 bit 变为 20 bit，其后接限幅器将信号位数变为 8 bit，该信号与预设的参考值相减得到差值信号，比较器即通过限幅器与减法器来实现，参考值的大小则根据需要的 IQ 信号的幅度来确定；相减后的误差信号通过累加器平滑滤波得到数字控制信号。

在具体实施中，数字检测电路利用 Xilinx 公司芯片 XC6SLX100-2FGG484C 来实现。该芯片为数字可编程的 FPGA 芯片，因此具有较强的应用灵活性，可以根据需要更改运算的比特位数，同时具有硬件电路运算实时快捷的优势，使得数字检测电路具有快速准确的检测运算能力。并且，通过数字信号处理的方式对信号功率进行检测，比对信号功率进行模拟检测的方式更具有稳定性。

4 接收机版图设计

本文根据图 1 的接收机框图中完成了接收机的加工制作，如图 8 所示。

图 8 接收机实物图

《电子技术应用》2022 年第 48 卷第 10 期—137
《电子技术应用》<http://www.chinaaet.com>

为提高接收信号的动态范围，在接收机入口处增加一个15 dB固定衰减器，在接收机输入信号-70~-20 dBm范围内不插入15 dB固定衰减器，在接收机输入信号-20~-5 dBm范围内插入15 dB固定衰减器，确保进A/D前的基带信号峰值保持在1 V的前提下，通过合理优化设计数字AGC的预先设置参考值，得到模拟控制电压及放大器增益情况如表2所示。A/D入口处实测电压幅度波形如图9所示。A/D入口处实测电压幅度波形如图9所示。

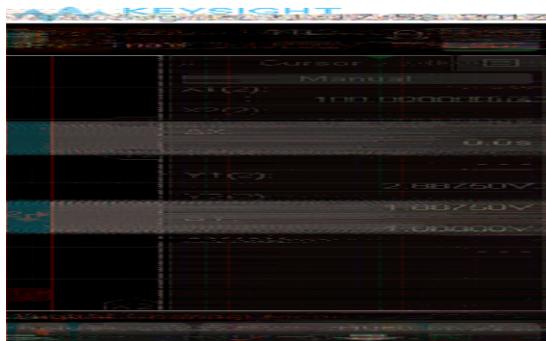


图9 恒定的IQ差分信号

表2 输入信号功率与增益之间的关系

序号	输入信号电平/dBm	实测模拟AGC电压/V	VGA增益/dB	是否插入15 dB衰减器
1	-70	0.392	29.5	否
2	-65	0.447	24.5	否
3	-60	0.507	19.5	否
4	-55	0.570	14.5	否
5	-50	0.622	9.5	否
6	-45	0.672	4.5	否
7	-40	0.727	-0.5	否
8	-35	0.777	-5.5	否
9	-30	0.827	-10	否
10	-25	0.887	-14.5	否
11	-20	0.772	-5.5	是
12	-15	0.825	-10	是
13	-10	0.886	-14.5	是

实测结果表明本文设计的接收机在输入信号-70~-10 dBm范围内输出信号功率为±0.5 dB，其增益控制在±0.5 dB范围内，控制精度高，动态范围大。

5 结论

本文设计了一种由数字AGC电路辅助控制模拟可变增益放大器实现高精度高动态的接收机，并对其进行了硬件实现。实测结果表明在输入信号动态范围为-70~-20 dBm时，驱动放大器输出峰值1 V左右，控制精度误差小于0.5 dB，实现了高精度的自动增益控制。

参考文献

- [1] 傅鹏鑫.论AD8367在自动增益控制系统中的应用[J].信息通信,2018(3): 196~197.
- [2] 宋静亮.基于AD9361的宽频段接收机及其AGC算法研究及实现[J].电子质量,2018(8): 17~21.
- [3] 吴佳,邹芳,邓新蒲.AD8347在接收机前端设计中的应用[J].微处理机, 2008(3): 30~32.
- [4] 杨康.基于FPGA的自动增益控制算法的设计与实现[J].卫星电视与宽带多媒体,2020(7): 1~2.
- [5] 程龙香,徐建华.实现接收机大动态范围的中频AGC电路设计[J].电子与封装,2018,18(9): 26~28.
- [6] 阎世宇.无线接收机射频前端自动增益控制电路研究[D].大连:大连海事大学,2019.
- [7] 刘恒,刘畅,孙晋,等.自动增益控制电路实验设计[J].实验技术与管理,2018,35(8): 55~59.
- [8] 王一冰,杨亚博.射频自动增益控制系统的实现[J].西南民族大学学报(自然科学版),2016,42(4): 452~456.
- [9] 于磊,王冰.接收机变频器自动增益控制技术实现[J].自动化与仪器仪表,2020(4): 60~64.
- [10] 邓满兰.微波检波信号增益自动控制实现路径[J].南昌师范学院学报,2018,39(3): 9~11,41.
- [11] 陈彭鑫,仲思东.基于FPGA和自动增益控制技术的宽带数字频率计[J].仪表技术与传感器,2017(12): 105~109.
- [12] 李雨洋,张涛,关汉兴,等.双信道模型下的自动增益控制策略设计[J].电子技术应用,2019,45(4): 87~91.
- [13] ZHANG N K, WEN Z P, HOU X P, et al. Digital automatic gain control design with large dynamic range in wireless communication receivers[C]//2017 IEEE 17th International Conference on Communication Technology (ICT), 2018: 1402~1406.
- [14] 吕余清,张松柏.一种基于滑动滤波的数字AGC应用[J].舰船电子对抗,2014,37(4): 54~56.
- [15] 李书恒.接收机的一种自动增益控制电路[J].电子世界,2021(11): 49~50.
- [16] Analog Device.0.8 GHz~2.7 GHz direct conversion quadrature demodulator AD8347[Z]. www.analog.com, 2001.

(收稿日期:2022-01-04)

作者简介:

朱银霞(1986-),女,硕士,讲师,
主要研究方向:卫星通信与射频前端。

张剑(1980-),男,博士,讲师,
主要研究方向:卫星通信与导航。

田湘(1982-),女,硕士,讲师,
主要研究方向:卫星通信与导航。



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