

ADF4351 在机载导航设备通用模拟器中的应用

李文海¹ 唐曦² 白惠文³ 陈明强⁴

(1. 海军航空工程学院科研部 研究生四队 烟台 264001; 2. 海军航空工程学院科研部 研究生四队 烟台 264001;

3. 海军航空工程学院 接改装训练大队 烟台 264001; 4. 中国人民解放军 92514 部队 烟台 264007)

摘要: 为解决机载导航设备模拟器数量繁多,不利于自动测试系统集成的问题,设计了一种通用化的信号模拟器,以 ADF4351 为核心构成本振信号源,实现了宽频带、频率可调的功能。首先,分析了 ADF4351 的基本原理和工作特性;然后,介绍了频率合成器的详细设计,通过 USB 外设控制器芯片 CY7C68013A,上位机控制 ADF4351 产生特定频率的射频输出;最后,以高度表信号模拟器本振为例,用频谱仪测试了 4.3 GHz 射频输出下的相位噪声和杂散抑制。实验表明,设计的频率合成器可以实现 35 MHz~4.4 GHz 的低相噪、稳定频率输出。

关键词: 本振信号源;ADF4351;CY7C68013A;频率合成器

中图分类号: TN742 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

ADF4351 in airborne radio navigation equipment application of general purpose simulator

Li Wenhai¹ Tang Xi² Bai Huiwen³ Chen Mingqiang⁴

(1. Department of Scientific Research, Naval Aeronautical and Astronautic University, Yantai 264001, China;

2. Graduate Student Team Four, Naval Aeronautical and Astronautic University, Yantai 264001, China;

3. Modified Equipment Training Team, Naval Aeronautical and Astronautic University, Yantai 264001, China;

4. Unit 92514 of the PLA, Yantai 264007, China)

Abstract: For the purpose of solving the problems that the quantity of airborne navigation equipment simulator is large, which is not conducive to the integration of automatic test system, a generalized signal simulator is designed, and the ADF4351 is used as the core to constitute the local oscillator signal source, realizing wide frequency band and frequency adjustable function. First, the basic principles and working characteristics of the ADF4351 are analyzed. Then, the detailed design method of the frequency synthesizer is introduced. Through the USB peripheral controller chip CY7C68013A, the host computer controls the ADF4351 to produce the specific frequency RF output. At last, with altimeter signal simulator for example, the phase noise and spurious suppression of the 4.3 GHz RF output are measured by a spectrum analyzer. Experiments show that the designed frequency synthesizer can achieve low phase noise and stable frequency output from 35 MHz to 4.4 GHz.

Keywords: local oscillator signal source; ADF4351; CY7C68013A; frequency synthesizer

0 引言

当前机载导航设备的信号模拟器多为专用的,即一种信号模拟器对应一种导航设备,导致信号模拟器数量繁多,不利于自动测试系统(automatic test system, ATS)的集成。微电子与计算机技术的飞速发展为无线电导航设备信号模拟器的深入研究提供了技术条件,一个稳定度高、适应性强、综合性能优良的本振信号源对通用信号模拟器来说尤为重要。

通用信号模拟器的本振信号源本质上就是一个宽频

带、频率可调的频率合成器,目前用于频率合成的技术主要有 3 种:直接模拟频率合成(direct analog frequency synthesis, DAS)、直接数字频率合成(direct digital frequency synthesis, DDS)、锁相环式频率合成(phase locking loop, PLL)。DAS 是一种传统的频率合成方法,其原理简单,易于实现,但是结构复杂、体积庞大、成本昂贵,且容易产生过多的杂散分量,故目前发展活力不足^[1]。DDS 具有频率稳定度好、分辨率高以及频率转换时间短的优点,但输出信号频率范围相对较小,难以满足无线电导航设备信号模拟器的射频输出要求^[2-4]。PLL 可实现理想的

频率控制,具有良好的窄带跟踪和调制跟踪特性,输出频率范围大^[5],且随着芯片技术的快速发展,可以将锁相环的功能集成在单一的芯片上,大大简化了电路的结构,有利于设备的集成化和小型化^[6-7]。

传统导航设备信号模拟器都是专用的,其本振信号源是由厂家根据特定测试对象的需求定制的^[8],不具有通用性。文献[9]采用频率合成芯片 ADF4113,实现了稳定点频输出和扫频功能,但该设计结构冗余且最高输出频率仅为 4 GHz,难以满足某型无线电高度表的测试需求。文献[6]、[10]和[11]分别基于 ADF4350、ADF4351 和 CDCE912 的锁相环设计的频率合成器,结构简单,容易调试,但缺少上位机的控制功能,控制不灵活,输出频率范围也较窄。文献[12]基于 ADF4351 设计的频率合成器,功能较强,但是结构过于复杂,不利于实现。综上所述,本文基于锁相环式频率合成技术,设计了一种基于 ADF4351 的频率合成器,该设计结构简单,实用性强,具有输出频率高、频率稳定度高、低相噪、低杂散等优点。

1 设计需求分析

机载无线电导航设备通用信号模拟器的本振模块,是射频电路中一个非常重要的组成部分,用于为上变频模块和下变频模块提供稳定的本振信号。机载无线电导航设备信号模拟器作为一种高精度的电子设备,对信号频率的稳定性有着较为严苛的要求,频率源的不稳定会使设备的性能存在隐患。机载无线电导航设备有多种,其工作频段不尽相同、有高有低(例如塔康 962~1 213 MHz;高度表 4.2~4.4 GHz;仪表着陆系统 108~112 MHz 和 328.6~335.4 MHz),要满足对多种设备的测试需求,产生的通用本振信号必须要满足以下 3 个要求。频率范围宽,适应不同导航设备的工作频段;频率准确度高,与导航设备工作频率对准;频率控制方便灵活。为实现测试系统的小型化,通用信号模拟器需要将多种信号模拟器的功能集成在一起,压缩测试系统体积,故本振模块必须易于集成。

综上所述,设计的基于 ADF4351 的频率合成器必须满足以下条件:

- 1) 输出 100~4 400 MHz 范围内的任意频率的射频信号;
- 2) 输出频率稳定度高(10 kHz)、频率分辨率高(小于 20 kHz)、低相噪、低杂散的射频信号;
- 3) 结构简单,易于小型化、集成化。

2 基本原理介绍

2.1 锁相环基本原理

锁相环是频率源的核心部分,主要由鉴相器(phase detector, PD)、环路滤波器(loop filter, LF)和压控振荡器(voltage controlled oscillator, VCO)构成,如图 1 所示。鉴相器将压控振荡器输出信号和频率稳定的参考信号 f_R 进

行相位比较,输出一个与相位差有某种关系的误差电压 u_d 。当压控振荡器的振荡频率 f_v 由于某种不稳定因素发生变化时,两种信号的相位差必然发生变化,误差电压 u_d 也跟着变化,此电压经过环路滤波器后作为控制电压 u_c 加到压控振荡器使其振荡频率逐渐回到稳定值上(即参考信号频率),此时误差电压 u_d 也稳定下来, f_v 将不发生变化,锁相环频率锁定。

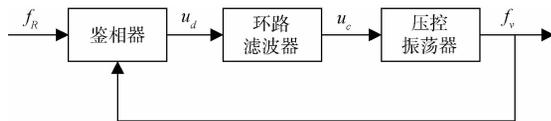


图 1 锁相环原理框图

2.2 ADF4351 芯片简介

ADF4351 是一款基于锁相环结构的频率合成芯片,采用 3.0~3.6 V 电源供电,具有一个集成电压控制振荡器(VCO),其基波输出频率范围为 2 200~4 400 MHz,结合外部环路滤波器和外部参考频率使用时可实现小数 N 分频或整数 N 分频锁相环(PLL)频率合成。利用 1/2/4/8/16/32/64 分频电路,可以产生 35~4 400 MHz 频率范围的 RF 信号,所有片内寄存器均通过简单的三线式接口进行控制,其结构如图 2 所示。

3 总体设计

3.1 设计思路

设计从小型化、频率可调、控制方便灵活 3 个角度出发。在小型化方面,采用集成化频率合成芯片 ADF4351,相比传统的分立式结构大大地压缩了体积^[4,11]。在频率可调方面,通过相关公式可计算出设定输出频率所对应各个寄存器的值,并将其写入到 ADF4351 寄存器,便可实现输出频率的变换。由于 ADF4351 的所有参数(例如:输出频率、通道分辨率、输出功率等)都是由其内部寄存器的控制字来控制的,所以通过内部寄存器就可以很好地控制 ADF4351。为了控制方便灵活,采用 LabVIEW 编写上位机程序,通过 CY7C68013A 将上位机与 ADF4351 连接起来,USB 信号经过 CY7C68013A 的转换可直接写到 ADF4351 的内部寄存器里,仅仅在上位机进行简单的操作就能实现输出信号的精准控制^[13]。

3.2 结构组成

设计的频率合成器主要由 USB 外设控制器芯片 CY7C68013A、频率合成芯片 ADF4351、三阶环路滤波器、晶体振荡器等部分构成,原理如图 3 所示。其中射频信号的产生以 ADF4351 为核心,晶体振荡器为其提供 50 MHz 的参考信号,三阶环路滤波器滤除信号中的高频部分。参数的灵活设置以上位机为核心,用 LabVIEW 编写上位机控制程序,由 CY7C68013A 实现 USB 格式信号到 SPI 信号的转换,通过 SPI 三线式接口将上位机的指令发送到

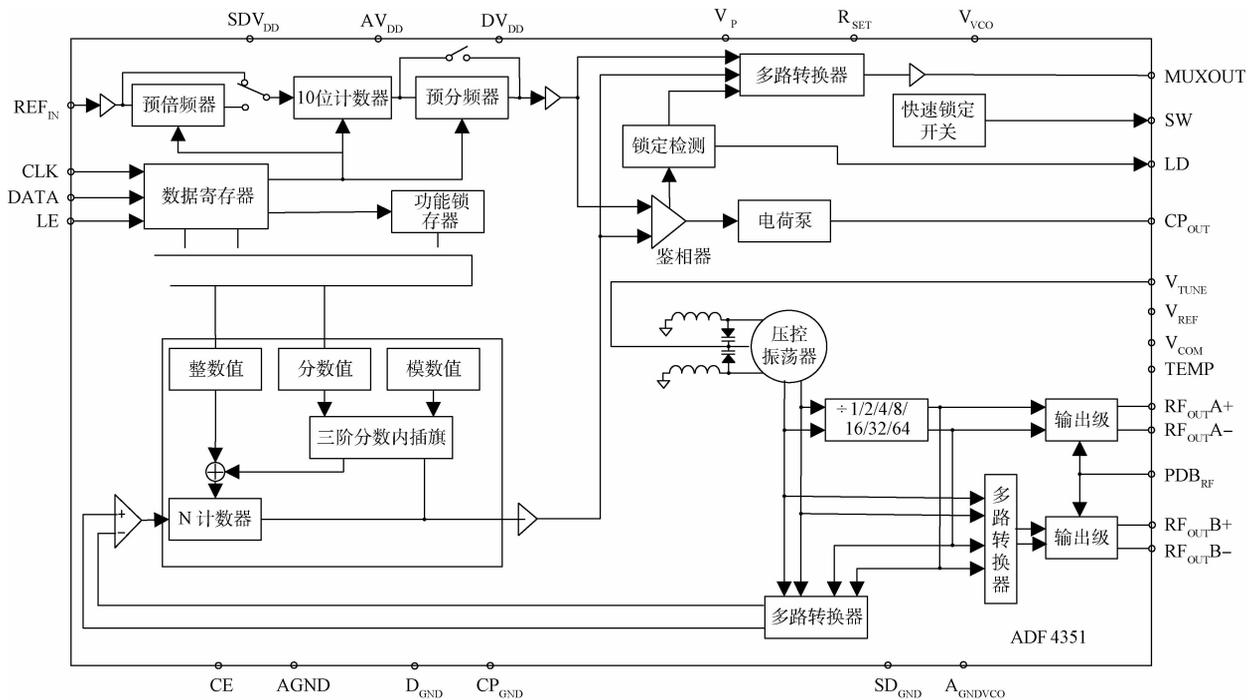


图 2 ADF4351 的功能框图

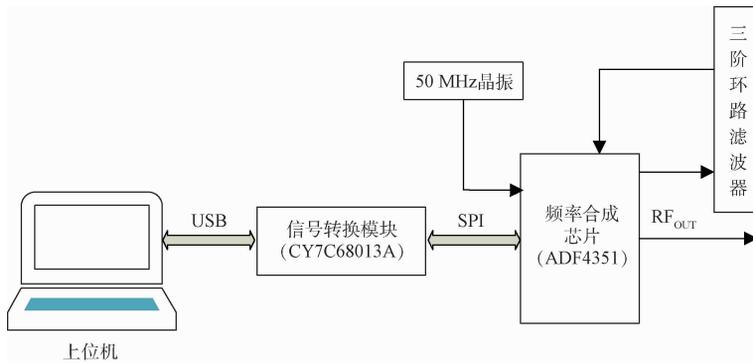


图 3 频率合成器的原理

ADF4351 的各个寄存器,实现对芯片的控制。

4 硬件设计

4.1 信号转换模块设计

信号转换模块的核心是一个 USB 外设控制器,主要用来实现上位机对 ADF4351 的控制。目前,上位机的接口多为 USB 接口,而 CY7C68013A 芯片可通过 USB 接口实现上位机与外设的通信,适用性强、可移植性好。CY7C68013A 具有专门的 USB 接口与上位机进行通信,可将其 3 个双向 I/O 端口 P_{A0} 、 P_{A1} 、 P_{A2} 作为 SPI 三线接口,经 ADF4351 的端口 CLK、DATA、LE 将上位机生成的寄存器字写到其内部寄存器中。其中 CLK 是串行时钟输入,DATA 是串行数据输入,LE 是加载使能,数据在 CLK 上升沿时以 MSB 优先方式逐个输入 32 位移位寄存器中,

3 个 LSB 用作控制位,当 LE 变为高电平时,存储在 32 位移位寄存器中的数据载入 3 个控制位所选择的寄存器, CY7C68013A 及其外围电路设计如图 4 所示。

4.2 环路滤波器设计

锁相环中的环路滤波器是线性低通滤波器,用来滤除推拉电流中的高频分量和噪声。环路滤波器设计的好坏直接影响到环路的相位噪声、稳定性和锁定时间等,对锁相环的整体性能起到决定性的作用。由于有源滤波器结构复杂,直流功耗大且工作频率较低,因此目前多采用三阶无源环路滤波器^[3]。由于参考频率每增大一倍对应相位噪声降低 3 dB^[14],因此采用 50 MHz 的晶振作为参考频率,环路带宽设计为 20 kHz。通过 ADIsimPLL 仿真软件设计,经过优化后的环路滤波器的原理图如图 5 所示。

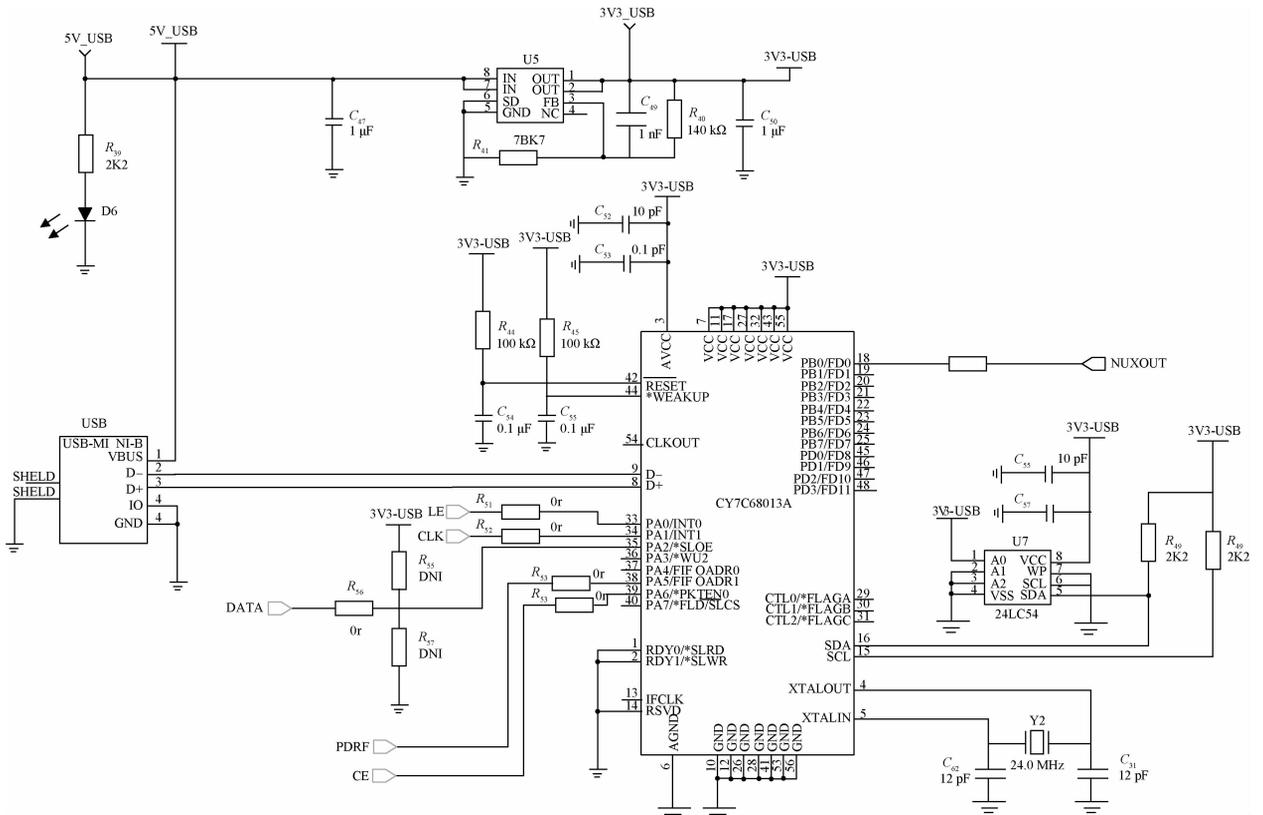


图 4 CY7C68013A 的电路设计图

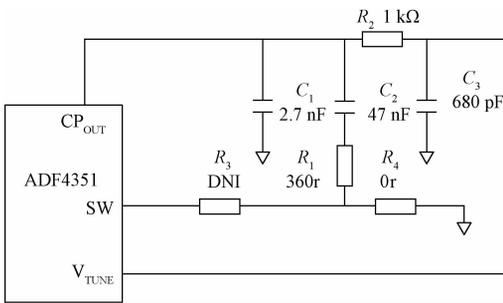


图 5 三阶环路滤波器

式中: REF_{IN} 是参考频率输入; D 是 $RF REF_{IN}$ 倍频器位 (0 ~ 1, 一般取 0); R 是 RF 参考分频系数 (1 ~ 1 023); T 是参考 2 分频位 (0 或 1, 一般取 0)。

由 (3) 式来确定预设的小数模数 MOD :

$$MOD = f_{PFD} / f_{RES} \quad (3)$$

式中: f_{RES} 是 VCO 输出的通道分辨率。

由式 (4) ~ (5) 确定细分 VCO 频率的输出分频器分频值 $RF Divider$

$$2\ 200 \leq RF_{set} \times 2^N \leq 4\ 400 \quad (4)$$

$$RF\ Divider = 2^N \quad (5)$$

式中: RF_{set} 为设定的输出信号频率, 单位为 MHz; $N = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$ 。

利用上述 5 个公式并结合 ADF4351 参考手册可得寄存器的控制字。

5.2 上位机程序设计

基于上述参数配置方法采用 LabVIEW, 开发了上位机软件, 软件流程如图 6 所示。软件主要由参数设置、寄存器值解算和寄存器字输出等 3 部分构成。参数设置部分是 1 个人机界面友好的设置窗口, 可方便灵活地对 ADF4351 的各种参数进行设置。根据设置的参数值计算出 INT 、 $FRAC$ 、 MOD 、 $RF Divider$ 的值并由 ADF4351 的参考手册得出相对应的 6 个寄存器的值。最后将解算出的寄存器的值通过 USB 接口输出给 CY7C68013A。

5 软件设计

5.1 参数配置方法

ADF4351 频率合成器的编程控制基于式 (1):

$$RF_{OUT} = [INT + (FRAC/MOD) \times (f_{PFD}/RF\ Divider)] \quad (1)$$

式中: RF_{OUT} 是 RF 频率输出; INT 是整数分频系数; $FRAC$ 是小数分频的分子 (0 ~ $MOD - 1$); MOD 是预设的小数模数 (2 ~ 4 095);

$RF Divider$ 是细分 VCO 频率的输出分频器分频值。

其中鉴相频率 f_{PFD} 用式 (2) 来确定。

$$f_{PFD} = REF_{IN} \times [(1 + D)/(R \times (1 + T))] \quad (2)$$

LabVIEW 程序前面板如图 7 所示。

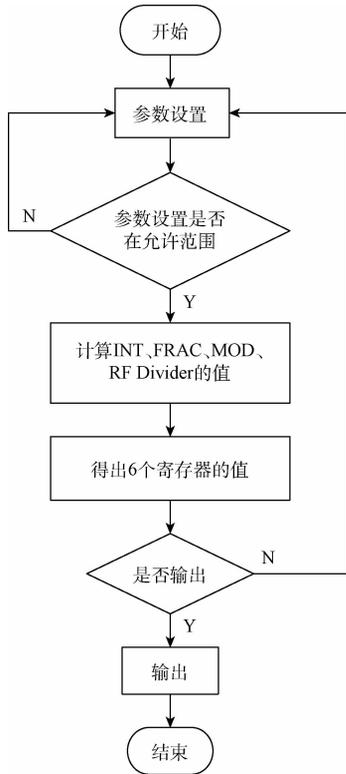


图 6 上位机程序流程



图 7 上位机程序

6 实验验证

设定输出频率为 4.3 GHz,通道分辨率为 20 KHz,晶振为 50 MHz,倍频器位 D 与 2 分频器位 T 都取 0,参考分频系数 R 取 1,可得 6 个寄存器的值,如表 1 所示。

表 1 ADF4351 的寄存器值

寄存器	控制码	寄存器	控制码
R0	2B0000	R3	4B3
R1	8008011	R4	8FF03C
R2	4E42	R5	58005

用频谱仪测得 4.3 GHz 射频输出的相位噪声和杂散抑制分别如图 8、9 所示。频谱仪中心频率设为 4.3 GHz。测试杂散时将 RBW 设为 1 MHz,SPAN 设为 100 MHz,测得的杂散为 -50.12 dBm。测试相位噪声时,将 RBW 设为 1 kHz,SPAN 设为 500 kHz,选择 MARKER 中的差量模式并调节为 10 kHz,测得频谱仪读数为 -50.42,由式(6)计算可得相位噪声为 -80.42 dBm/Hz。

$$PN = PN_{mkr} - 10\lg(RBW) \quad (6)$$

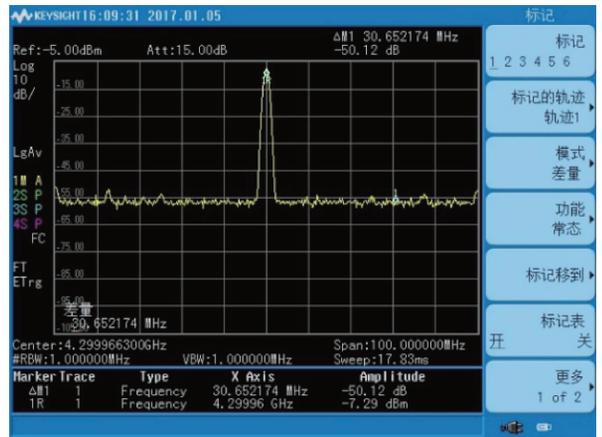


图 8 4.3 GHz 的杂散抑制

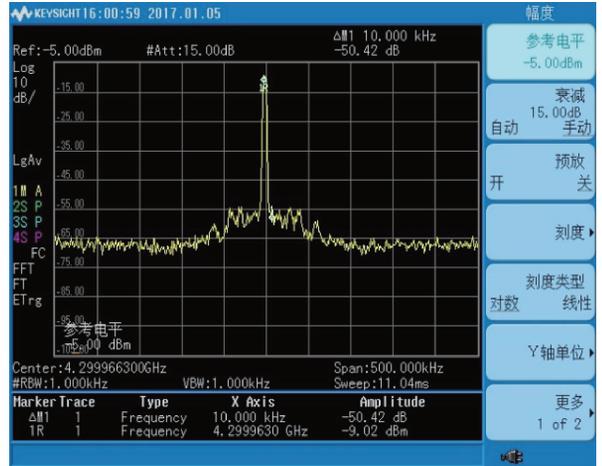


图 9 4.3 GHz 的相位噪声

7 结 论

本文针对机载导航设备通用模拟器的研究,介绍了一种基于频率合成芯片 ADF4351 的通用模拟器本振信号源的设计方法。上位机通过 USB 外设控制器 CY7C68013A 对 ADF4351 芯片进行控制,可输出 35 MHz~4.4 GHz 频率范围内的任意频率。实验结果表明,该频率合成器的整体性能良好,控制灵活,能满足模拟器总体设计需求。

(下转第 26 页)