

面向 5G 毫米波通信系统的本振源设计与实现

Local Oscillator Source Design and Implementation for 5G Millimeter-Wave Communication System

胡蒙筠/HU Mengyun
周健义/ZHOU Jianyi

(东南大学, 江苏 南京 211189)
(Southeast University, Nanjing 211189,
China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 03-0021-005

摘要: 针对 5G 毫米波通信系统对本振源频率、相位噪声、杂散抑制要求的提升, 提出了一种结合 ADF4002 和 2 个 ADF5355 频率合成器芯片, 可同时用于中频和射频电路的高性能本振源。该本振源为系统中频模块提供 5.4 GHz 的单音本振信号并且利用数控衰减器和放大器实现了输出功率可调, 同时也利用 ADF5355 的锁相环 (PLL) 和倍频器为射频模块提供 8.4 ~ 11.2 GHz 宽频带宽、步进为 100 MHz 的可调频本振信号, 最终通过硬件电路的设计与调试, 以及单片机 (SCM) 控制程序的编写, 实现了低相噪、低杂散的稳定频率源。

关键词: 大规模多输入多输出 (MIMO); 本振; 锁相环; 低相位噪声; 频率可调

Abstract: Aiming at the improvement of local frequency, phase noise and spur suppression requirements of 5G millimeter-wave communication system, a high-performance local oscillator source which can be used for both intermediate frequency (IF) and radio frequency (RF) circuits is proposed by combining ADF4002 and two ADF5355 frequency synthesizer chips. The local oscillator source provides a 5.4 GHz single-tone local oscillator signal for the system's IF module and uses a digitally controlled attenuator and amplifiers to achieve adjustable output power. At the same time, the ADF5355 phase-locked loop (PLL) and frequency doubler are also used to provide the RF module with a frequency-adjustable local oscillator signal, which step is 100 MHz in the 8.4 ~ 11.2 GHz wideband. Through the design and debugging of the hardware circuit and the programming of the single chip microcontroller (SCM) control program, a low frequency noise and low spurious stable frequency source is realized finally.

Keywords: massive multiple-input multiple-output (MIMO); local oscillator; PLL; low phase noise; frequency adjustable

在 5G 毫米波通信系统中, 大规模多输入多输出 (MIMO) 技术被用来大幅度提高数据传输速率和信道容量。大规模 MIMO 技术也是 5G 区别于现有系统的核心技术之一^[1]。在大规模 MIMO 场景下, 通过基站配置数百根天线, 可以使大量的终端用户使用同一个时频资源, 因此系统中同时存在多路射频收发信道, 也就需要多路本振信号。本振的研究是毫米波通信系统研究的关键之一^[2]。

本振模块与收发系统相互独立可以有效地抑制本振泄露和射频串扰等问题, 减少收发系统印制电路板 (PCB) 版的面积, 并且可以使每个模块更灵活, 便于调试和后期维护。综合考虑系统性能和成本等方面的因素, 采用外置本振是现代移动通信系统中常见的选择^[2-3]。

1 本振系统设计

频率合成技术主要分为直接合

成技术与间接合成技术。直接合成技术又包括直接模拟合成技术与直接数字合成技术 (DDS)。直接模拟合成技术是最早期的频率合成技术, 其通过一系列的模拟器件进行倍频、混频、分频等算术运算从而合成固定频率, 再利用窄带滤波器滤出所需频率。在这种方式下参考信号的相位噪声直接决定了输出信号的相噪, 因

此容易获得相噪很低的输出信号, 但是这种电路的实现需要大量的模拟器件组合, 集成度低, 体积大, 杂散抑制较差, 成本高昂, 目前该技术主要用于射频微波测试测量仪器中。

直接数字合成技术的特点是通过数字方式累加相位, 再利用相位和去查询正弦函数表从而得到正弦波的离散数字系列, 最终经过数模 (D/

收稿日期: 2018-03-15
网络出版日期: 2018-06-08

A)转换得到模拟正弦波。DDS具有频点转换速率快、频率分辨率高的优点,不过由于输出频率杂散很多,输出频率较低,使其使用范围受限^[4]。

间接频率合成技术即为锁相环式频率合成技术(PLL),它主要是通过相位负反馈的方式来实现对两路信号相位的跟踪,从而用锁相环将压控振荡器(VCO)的频率锁定在所需要的频点上。该种形式结构简单,相位噪声低,杂散抑制较好,成本较低,但是频率转换的时间长,频率分辨率比较低^[5-6]。

结合本设计中需要输出两路频率较高的本振信号,并且其中一路带宽较宽的特点,综合相位噪声、杂散抑制等因素,决定采用锁相环频率合成技术来实现该本振源。

1.1 整体框架

图1是PLL的基本结构,锁相环电路的组成部分主要包括压控振荡器(VCO)、鉴相器(PD)、环路滤波器(LPF)和分频器^[5]。

参考源给出的输入信号 F_r 通过R分频器降低为鉴相器的检测频率 F_{pd} ,而VCO的输出频率经过N分频器后得到输入鉴相器的另一路信号 F_N ,两路信号通过鉴相器进行相位比较,它们产生的相位差转换为电压或电流,经过低通的环路滤波器(LPF)滤除噪声和低频分量后送入VCO用来控制VCO的输出频率。当锁相环稳定后,即 F_{pd} 和 F_N 同频同相的状态下,锁相环的输出频率为:

$$F_{out} = \frac{N}{R} \times F_r \quad (1)$$

相位噪声是衡量本振源的重要指标,收发信机的调制与解调精度(EVM)受系统的相位噪声影响,若相位噪声过大,则系统解调出的星座图会出现旋转,因此首先要降低本振源的相位噪声。影响相位噪声的因素有很多,在近端,相位噪声主要取决于参考信号、N分频器、鉴相器以及电源。通过式(2)可以估算出环路带宽内的相位噪声:

$$PN = PN_{floor} + 10 \log(N) + 10 \log(f_{vco}) \quad (2)$$

在输出频率不变的情况下,降低分频比N可以改善相位噪声。一般来说,本振系统的参考源是全球定位系统(GPS)下行的10 MHz^[9]。由于在此设计中需要较高的输出频率,为了获得良好的相位噪声,故选择提升参考频率。在整个系统前端先设计一个锁相环电路,将10 MHz参考信号提高至100 MHz。由式(2)可知:系统的相位噪声将会降低10 dB;而在环路带宽外,相位噪声主要受VCO影响。为了得到更好的频率稳定性和相位噪声,本设计中用100 MHz的恒温晶体振荡器(OCXO)代替VCO^[6]。

由于两路本振信号在系统中被同时使用,为了保证信号的一致性,需要采用同一个参考源,图2为本振源结构框图。

源结构框图。ADI公司的频率合成器ADF4002,结合外部恒温晶振XO5051以及GPS参考源10 MHz,并且组成PLL频率合成器。该模块输出100 MHz的信号经过集总元件组成的功分器后分成2路,分别作为2个ADF5355的参考频率,ADF5355是集成VCO的宽带频率合成器。第1路参考信号通过ADF5355的锁相环和倍频器后输出8.4~11.2 GHz的信号,以100 MHz步进可调的本振信号,然后经过滤波器和放大器HMC441得到最终所需的射频本振;第2路100 MHz参考信号通过另一个ADF5355的锁相环电路并且再输出5.4 GHz的信号,再经数字衰减器HMC425A和放大器GVA_83+,得到所需功率的中频本振。

1.2 环路滤波器设计

环路滤波器是锁相环电路中的重要组成单元,它可以为VCO提供干净稳定的调谐信号,维持环路稳定性,控制环路带内外噪声,抑制参考边带杂散干扰。环路滤波器的重要参数为环路带宽和相位裕度。环路带宽的减小可以改善杂散的抑制以及VCO近端的相位噪声,但同时增加锁定时间,并导致远端相位噪声的恶

图1 PLL结构框图

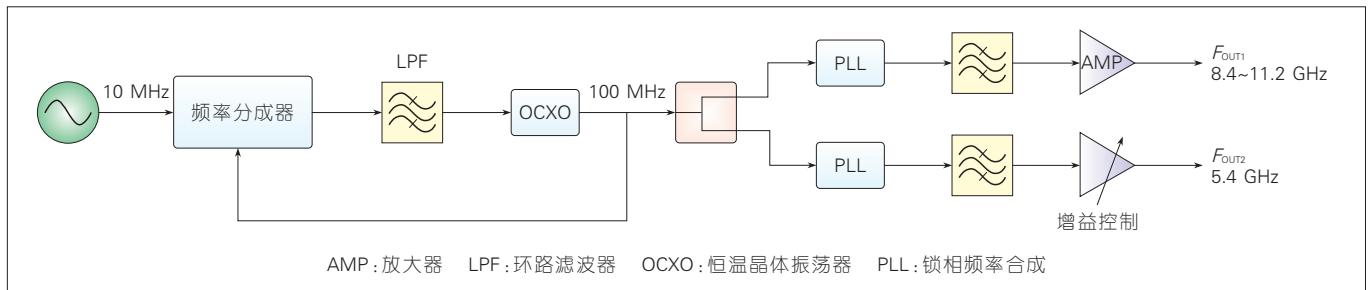
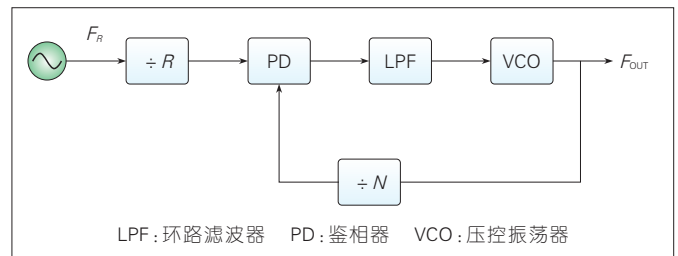


图2 本振源结构框图

化;而环路带宽增大则会减少锁定时间,不过无法保证VCO近端的杂散和相位噪声抑制。此外,当环路带宽为鉴相频率的1/10到1/5时,锁相环会失锁^[4-5]。

综合环路稳定性、杂散抑制、相位噪声、锁定时间等因素,最终确定输出频率为100 MHz的锁相环环路带宽为30 Hz,同时输出5.4 GHz以及8.4~11.2 GHz的PLL环路带宽则为100 kHz。图3给出了两路锁相环电路中四阶滤波器的结构和取值。

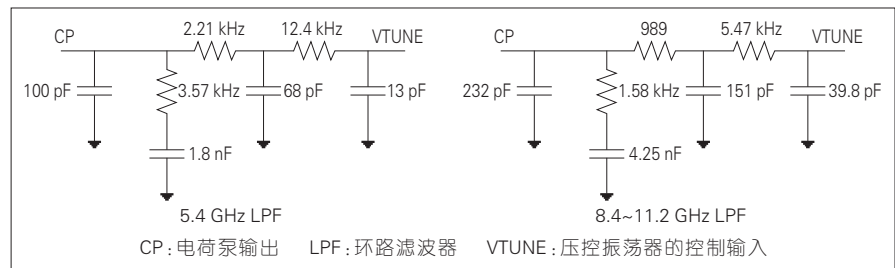
1.3 单片机部分设计

本设计中采用单片机C8051F320对ADF4002、2个ADF5355芯片以及数控衰减器HMC425A进行输出频率和功率的控制,其中两路ADF5355共用数据传输和串行时钟线。图4为单片机控制电路结构图。

2 测试结果与实物图

本设计实现了两路不同频率的本振信号输出,具有较好的相位噪声。利用RS的相位噪声分析仪分别对两路输出信号的相位噪声进行了测量,结果如图5、6所示。在8.4~11.2 GHz频段内选择10 GHz信号的相位噪声测试结果,参考频率源为相噪仪自带的10 MHz。

从图5、6中可以知道:5.4 GHz信号输出功率为12.07 dBm,10 GHz的信号输出功率约为13.8 dBm,并且两路ADF5355锁相环电路的输出信号皆具有良好的相位噪声,具体结果如表1所示。通过上位机进行频率控制,利用相噪仪对频率范围为8.4~11.2 GHz,



▲图3 环路滤波器结构

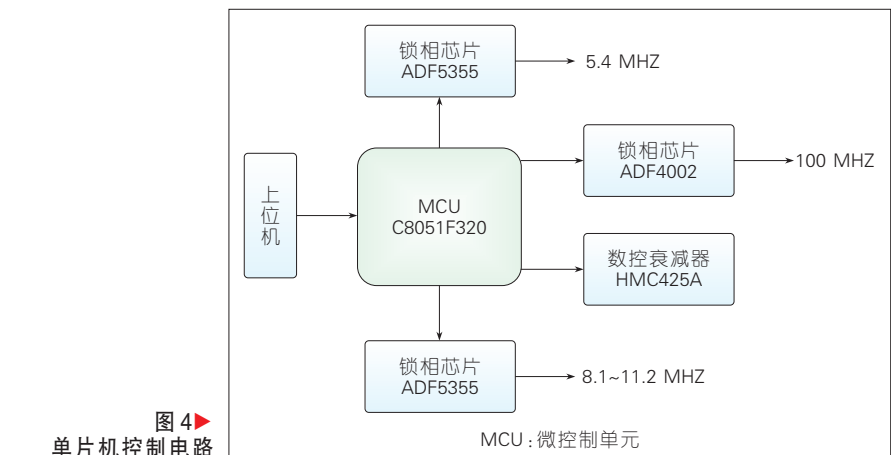
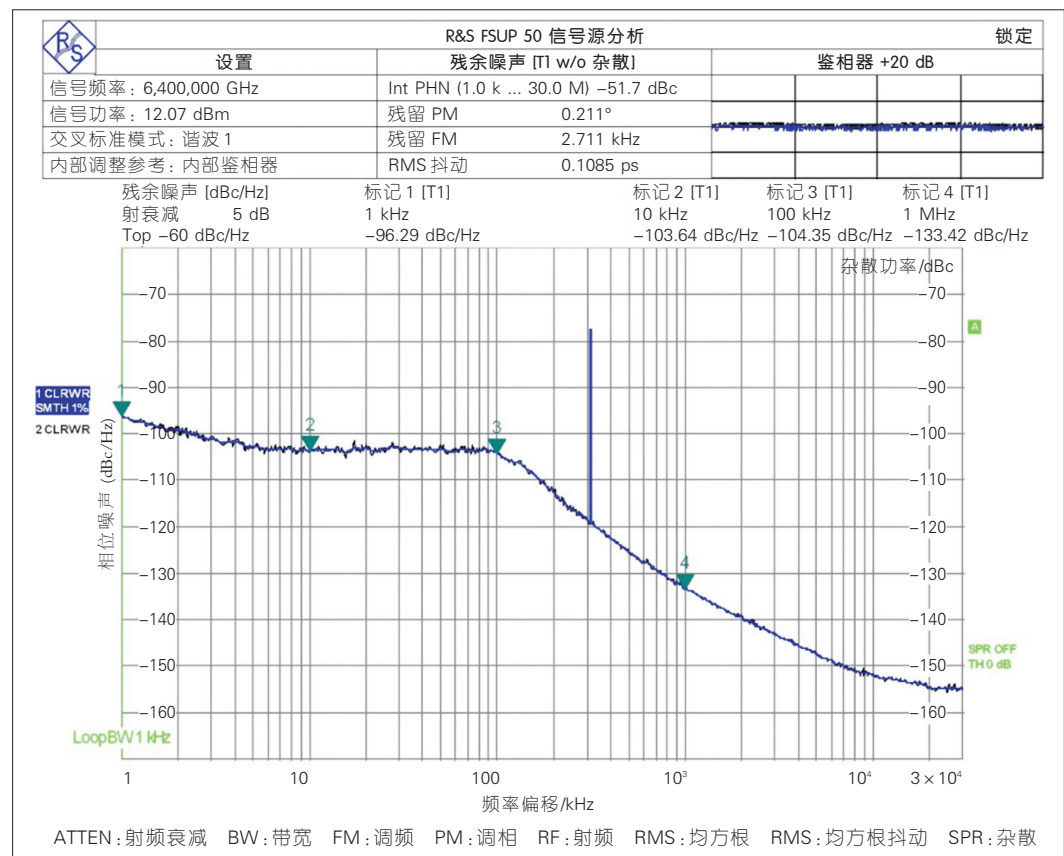
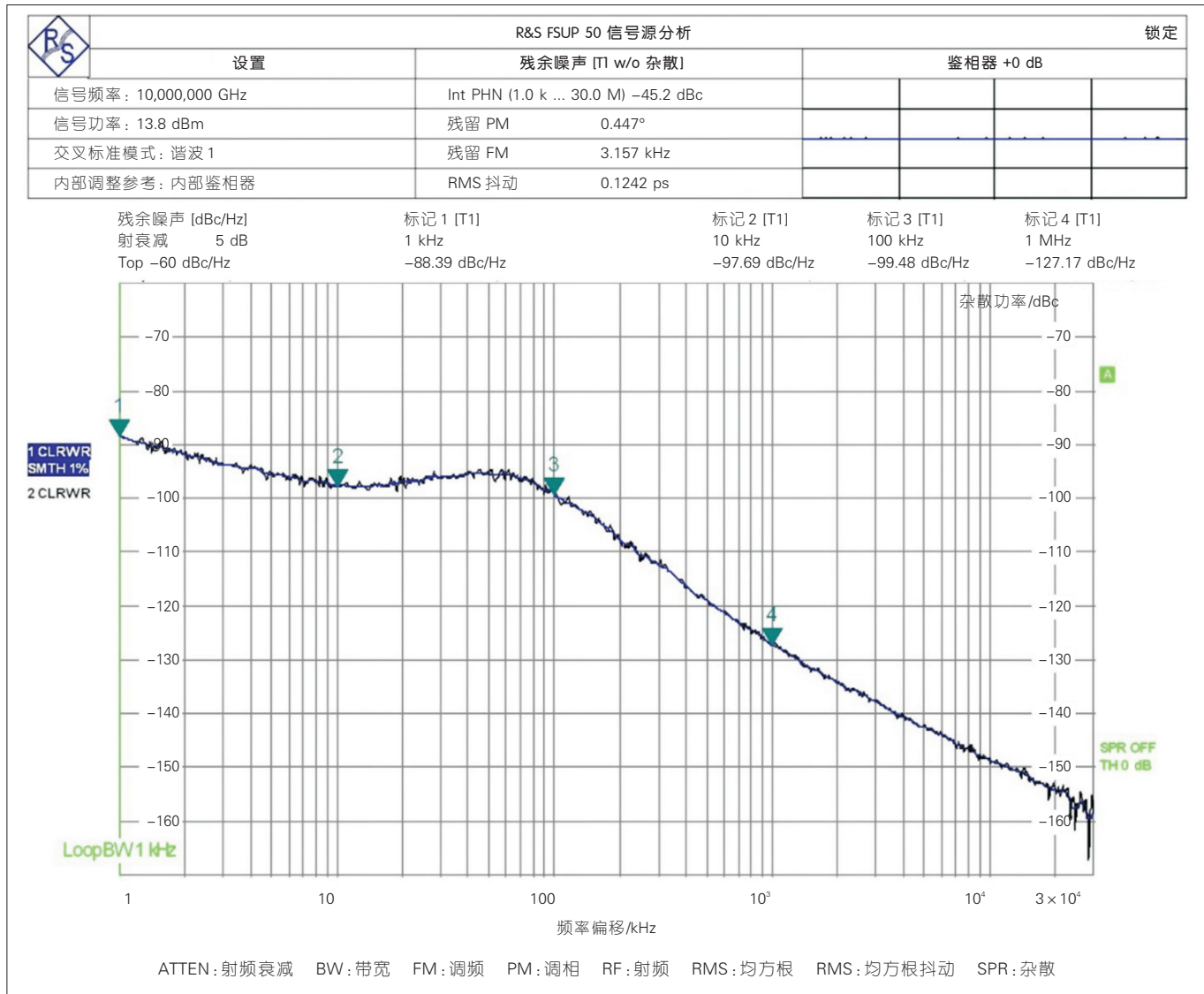


图4
单片机控制电路



▲图5 ADF5355输出5.4 GHz相位噪声



▲图6 ADF5355输出10 GHz相位噪声

▼表1 本振源相位噪声测试结果

频率偏移量/kHz	5.4 GHz 测试结果/(dBc/Hz)	10 GHz 测试结果/(dBc/Hz)
1	-96.29	-88.39
10	-103.64	-97.69
100	-104.35	-99.48
1 000	-133.42	-127.17

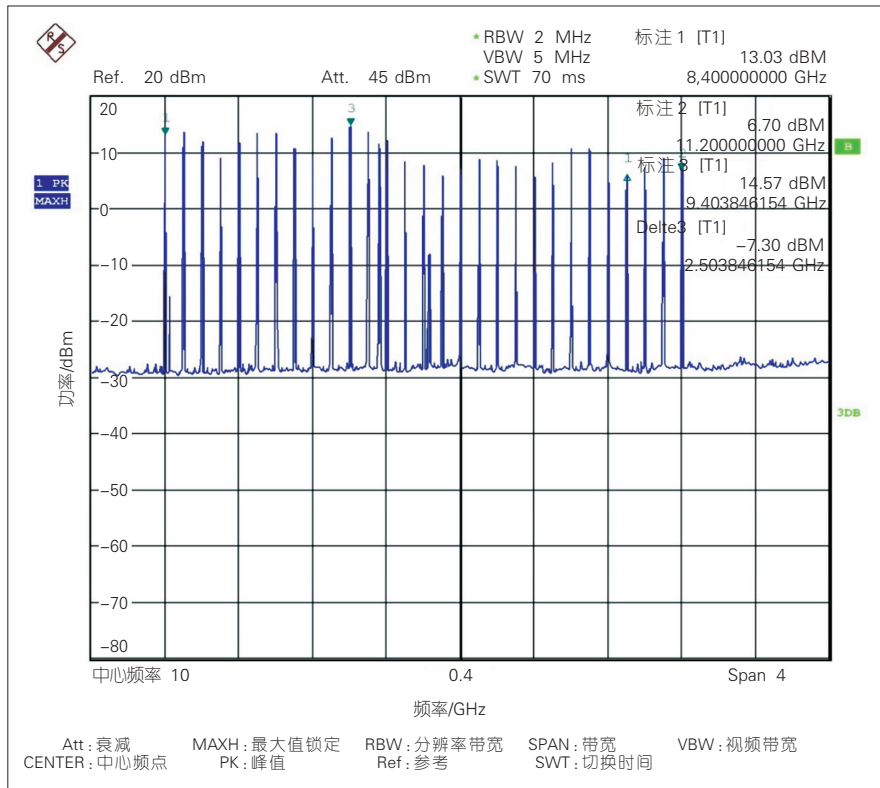
步进 100 MHz 的本振信号输出功率进行了测试,结果如图 7 所示。在该频带内输出最大功率为 14.57 dBm,最小功率为 6.7 dBm。值得注意的是:在该频带内信号输出功率浮动较大,这主要是由于 ADF5355 的输出功

率有 8 dBm 的变化范围。在后续链路设计中可以结合数控衰减器来平衡各个频点的输出功率。此外,图中谱线的不清晰主要是由于上位机变换频率的速度大于本振信号锁定的速度,在实际应用中可以等单个频点

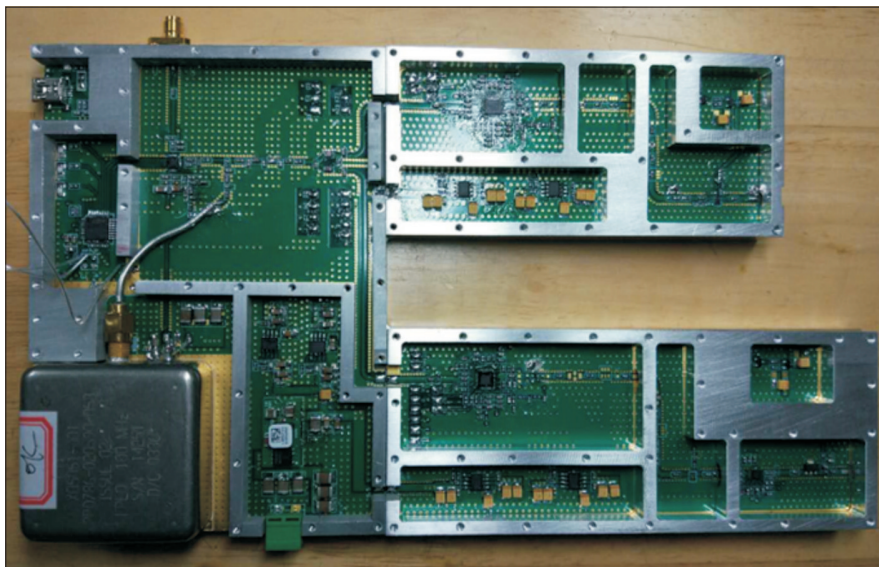
锁定后,再进行频率切换,以保证本振信号良好的性能。图 8 为本振源实物图。

3 结束语

文中通过结合 3 个锁相环结构成功实现了参考频率的提升和 2 个不同频段本振源的输出,可同时用于中频以及射频模块,并且降低了相位噪声。输出的两路本振信号中,一路 5.4 GHz 信号功率可调,另一路 8.4 ~ 11.2 GHz 信号可实现较宽频带内本振源的输出。在后续研究中,我们可以通过功分模块,配合放大器实现多



▲图7 8.4 ~ 11.2 GHz本振信号输出功率



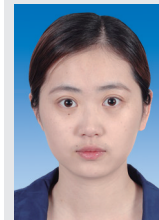
▲图8 本振系统实物图

路同频同相的本振信号的输出以满足大规模MIMO系统对于本振的相关需求。

参考文献

- [1] 尤肖虎. 5G移动通信发展趋势与若干关键技术[J]. 中国科学, 2014, 5(44): 551-563
- [2] 刘兆栋. 面向5G移动通信系统的本振技术研究[C]//2015年全国微波毫米波会议论文集. 合肥: 中国电子学会, 2015
- [3] 单月忠. 基于ADF4351的频率源设计与实现[J]. 无线电通信技术, 2014, 40(6): 85-88
- [4] 赵清潇. 基于宽带多通道微波收发信机的本振源设计与实现[D]. 青岛: 山东大学, 2015
- [5] 褚颖颖. 大规模MIMO系统射频关键技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2015
- [6] 林波. 大规模MIMO外部本振的研究[D]. 南京: 东南大学, 2018
- [7] 黄维辰. 面向下一代移动通信系统的多通道射频收发信机以及频率源的研究[D]. 南京: 东南大学, 2017
- [8] BANERJEE D. PLL Performance, Simulation, and Design 5th Edition [M]. USA: National, 2017: 3-8

作者简介



胡蒙筠, 东南大学博士研究生在读; 主要研究方向为射频系统中的关键技术; 作为主要研究人员参与了面向第5代移动通信系统的大规模MIMO信道模拟器毫米波前端项目。



周健义, 东南大学博士生导师、青年特聘教授; 主要研究方向为移动通信中的射频电路与系统; 参与研发中国第一套MIMO试验系统的射频子系统, 参与完成高频段通信射频与天线的研发, 并在射频电路的非线性行为描述与线性化技术方面开展了深入的研究; 获得2008年江苏省科技进步一等奖; 发表论文50余篇, 获得发明专利多项。