

文章编号:1001-9014(2007)03-0222-03

低相噪全相参毫米波频率合成源研究

徐锐敏¹, 姚鸿飞¹, 蔡竟业²

(1. 电子科技大学 电子工程学院, 四川 成都 610054; 2. 电子科技大学 通信与信息工程学院, 四川 成都 610054)

摘要:研制出一种小步进全相参毫米波频率合成源. 本振部分, 对直接数字式合成频率、参考分频比和环路分频比进行三重调节, 抑制了直接数字频率合成的杂散, 提高了频率分辨率; 发射部分, 采用二次混频电路, 避免了调谐电压预置, 简化了电路, 并保证了发射信号和本振信号相参. 该系统输出在 K_a 频段, 带宽 400MHz, 步进 < 1MHz. 测试相噪 < -90dBc/Hz@10kHz、-97dBc/Hz@100kHz, 杂散为 -60dBc, 跳频时间 < 15us.

关键词:毫米波; 频率合成源; 相参
中图分类号: TN52.7 **文献标识码:** A

RESEARCH ON MM-WAVE FREQUENCY SYNTHESIZER WITH LOW PHASE NOISE AND FULL-PHASE-COHERENCE

XU Rui-Min¹, YAO Hong-Fei¹, CAI Jing-Ye²

(1. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054, China;
2. School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054, China)

Abstract: A mm-wave frequency synthesizer with small step and full-phase-coherence was developed. For LO(local oscillator) section, DDS(direct digital frequency synthesis) frequency, reference divider and PLL(phase locked loop) divider are triple tuned, so that spurious components from DDS are suppressed and the frequency resolution is enhanced; For transmitter (TR) section, twice frequency-mixing is used, so the presetting of tuning voltage is avoided, the circuits are simplified, and the phase coherence between TR and LO signals is ensured. The developed synthesizer with channel step below 1MHz achieves low spurious level of -60dBc, phase noise of -90dBc/Hz@10kHz, -97dBc/Hz@100kHz and switching time of 15us. The output frequency is within K_a band.

Key words: mm-wave; frequency synthesizer; phase coherent

引言

毫米波频率源是毫米波系统的关键部分, 一般要求频率源具有低相噪、低杂散等特性. 为了改善雷达在强杂波背景下的动目标显示能力, 要求频率源具有全相参特性, 同时为对抗有源干扰, 还要求其具有快速跳频能力. 研制优质的毫米波频率源已成为改进毫米波雷达系统性能的关键任务之一.

国外毫米波频率源研究起步较早, 现在向更高频率和单片集成化方向发展. 文献[1]给出的毫米波频率源将含有 2 倍频和 16 分频电路的 VCO 单片与商用 PLL IC 相结合, 输出频率 36 ~ 45.5GHz, 功率 -12 ~ -16dBm, 相噪为 -79.5dBc/Hz@1MHz,

跳频时间 $\leq 300\mu\text{s}$.

国内毫米波频率源的研制也取得了一定进展, 但是性能仍待进一步提升. 2005 年, 文献[2]给出的单路输出的毫米波频综输出频率 29.2 ~ 29.7GHz, 步进 10MHz, 跳频时间 < 10us, 相噪 -84dBc@1kHz. 关于全相参毫米波频综的报道却较少.

1 设计原理

考虑直接式频率合成、锁相频率合成和 DDS 各自优点, 将 3 种频率合成方式结合起来设计.

1.1 DDS 杂散的抑制

DDS 输出信号的杂散一般分为相位截断杂散、幅度量化杂散和 DAC(Digital to Analog Conversion,

收稿日期: 2006-09-29, 修回日期: 2007-03-07

基金项目: 国防重点实验室基金项目(SJ03021)

作者简介: 徐锐敏(1958-), 男, 四川夹江人, 电子科技大学教授, 主要研究方向: 微波毫米波集成电路与系统.

Received date: 2006-09-29, revised date: 2007-03-07

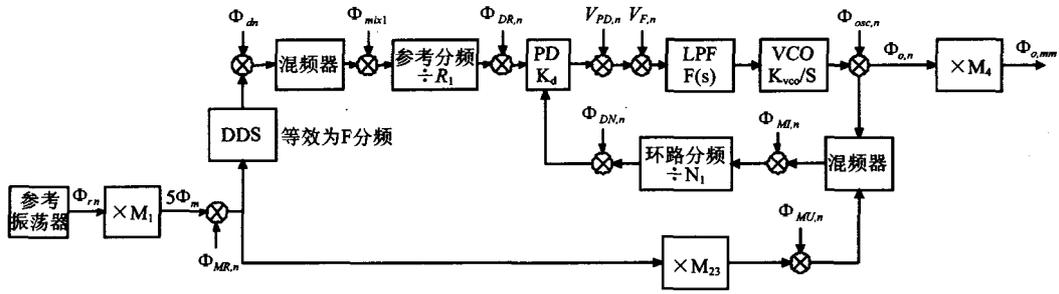


图1 系统本振相位噪声模型
Fig. 1 Phase noise model of local oscillator in system

数模转换)非线性杂散.当主要考虑后者时,期望该杂散能被锁相环路滤除,要求

$$[L \cdot f_{dds} - f_{clock}] \gg B_L, (\text{设 } > N \cdot B_L)$$

$$L = 1, 2, 3, \dots, [4]$$

当连续改变 DDS 频率时,式(1)转化为

$$\frac{f_{clock} + NB_L}{L} < f_{ddsmin} < f_{ddsmax} < \frac{f_{clock} - NB_L}{L - 1}$$

(B_L 为环路带宽)

设计 DDS 近端杂散主要为 DDS 相位截断杂散和幅度量化杂散.选用器件 AD9956,输出信号杂散转化到毫米波信号上为

$$-89 + 20\log(N/R) + 20\log(M_4) = -68.1\text{dBc}$$

1.2 系统的相位噪声

系统发射信号载波远端相噪由第 2 只 VCO 决定,其近端相噪基于本振信号相噪,合理选择环路二分频比,使得环路二引入的相噪远小于本振信号的相噪.因此仅考虑本振信号相噪.

建立起本振环路的相位噪声模型如图 1^[5].其中, $\Phi_{R,n}$ 为基准振荡器的相位噪声, $\Phi_{DR,n}$ 、 $\Phi_{DN,n}$ 分别为分频器 R_1 和 N_1 引入的相位噪声, $\Phi_{MU,n}$ 、 $\Phi_{MI,n}$ 为倍频器及混频器引入的相位噪声, $V_{PD,n}$ 、 $V_{F,n}$ 分别为鉴相器和环路滤波器引入的噪声电压,其他类似.由于上述各种噪声是统计独立的,并且强度均比较弱,应用叠加原理,可得输出相位噪声功率谱密度.

$$S_{\phi_{o,mm}}(f) = \left\{ \left(S_{\phi_{r,n}}(f)(M_1 M_{23})^2 + S_{MR,n}(f) + \left[S_{d,n}(f) \frac{1}{R_1^2} + S_{\phi_{DR,n}}(f) + S_{\phi_{DN,n}}(f) + \frac{S_{V_{F,n}}(f)}{K_d^2} \right] N_1^2 \right) |H(j2\pi f)|^2 + S_{\phi_{vco,n}}(f) |1 - H(j2\pi f)|^2 \right\} \quad (3)$$

结合式(3)考查各器件的相噪贡献,可知参考晶振的相噪决定了毫米波输出信号的相噪.60MHz 参考晶振相噪为 $-140\text{dBc}/\text{Hz}@1\text{kHz}$, $-150\text{dBc}/\text{Hz}@10\text{kHz}$,由此得出输出信号的相噪为 $-83\text{dBc}/\text{Hz}@1\text{kHz}$, $-93\text{dBc}/\text{Hz}@10\text{kHz}$ (按最差点估计).

1.3 环路参数确定及系统跳频时间

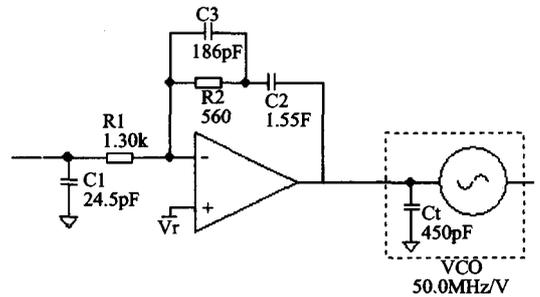


图2 环路滤波器
Fig. 2 Loop filter

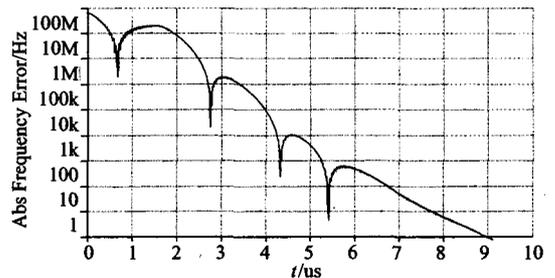


图3 跳频时间仿真
Fig. 3 Simulated frequency hopping time

系统中,DDS 跳频时间在 ns 量级,主要考虑环路锁定时间.系统中,频率改变后,发射环路随着本振环路的锁定而锁定.取发射环路带宽足够大,系统跳频时间接近本振环路的锁定时间.

为提高 VCO 调谐电压及抑制鉴相杂散和消除稳态相差,采用预滤波的有源三阶环路滤波器,如图 2.环路带宽取为 500KHz,仿真得两环路锁定时间均 $< 10\mu\text{s}$,如图 3.

采用高速单片机在跳频前预先置数,跳频时使能脉冲控制各器件控制字同时由缓存器向对应寄存

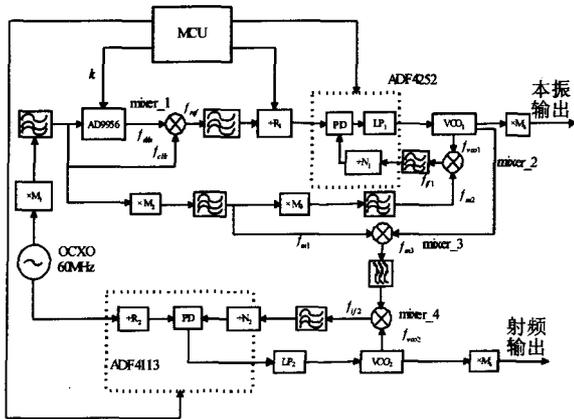


图4 系统方框图
Fig. 4 System block diagram

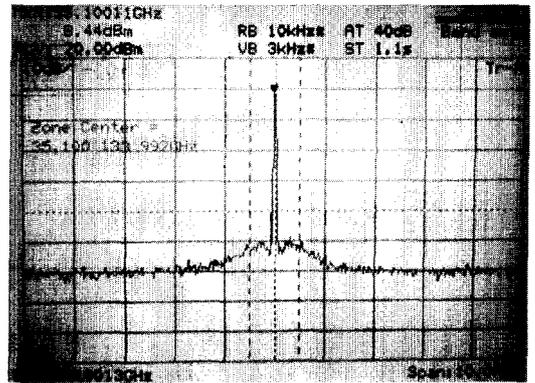


图5 毫米波输出频谱
Fig. 5 Mm-wave signal spectrum

器转移,以消除送数时间对跳频速度的影响.

1.4 发射与本振信号频率、相位关系

如果将 f_{vco2} 与 f_{vco1} (见图4) 直接混频,取中频鉴相来锁定 f_{vco2} ,环路二将难以锁定.传统方法采用频率预置电路,比较麻烦.这里我们采用2次混频,先将 f_{vco1} 下变频到 f_{m3} ,之后在混频器 mixer-4 中与 f_{vco2} 混频,取中频鉴相,使得环路捕获过程中 f_{vco2} 始终大于 f_{m3} ,保证 f_{vco2} 能够入锁.设信号 f_{vco1} 相位为 $2\pi f_{vco1}t + \theta_{vco1}$, f_{vco2} 相位为 $2\pi f_{vco2}t + \theta_{vco2}$,参考信号 f_{osc} 相位为 $2\pi f_{osc}t + \theta_{osc}$,结合图4,两环路锁定时:

$$f_{vco2} - f_{vco1} = (N_2/R_2 - M_1M_2)f_{osc},$$

$$\theta_{vco2} - \theta_{vco1} = (N_2/R_2 - M_1M_2)\theta_{osc}$$

即两 VCO 输出频差恒定,相位同步,4 倍频到毫米波后依然保持这种关系,即本振与发射载波全相参.

2 系统结构

结合上面分析,得到如图4所示的系统方框图.

方案中,DDS 信号上变频后做参考信号,大幅度降低了参考信号相噪及杂散的恶化;同时改变 k, R_1, N_1 ,对 DDS 输出带宽的要求降为 5MHz,避免了大杂散点;鉴相频率取在 20MHz 左右,远大于环路带宽,从而抑制了鉴相杂散;DDS 高分辨率的特性决定了系统的高频率分辨率.本振频率

$$f_{LO} = \left[f_{m2} - \left(\frac{N_1}{R_1} \right) (f_{clk} + f_{dds}) \right] \cdot M_4,$$

发射载波

$$f_{TR} = f_{LO} + M_4 \cdot \left(\frac{N_2}{R_2} - M_1 \cdot M_2 \right) \cdot f_{osc}$$

3 测试结果

用频谱仪对毫米波信号进行测试,频谱如图5

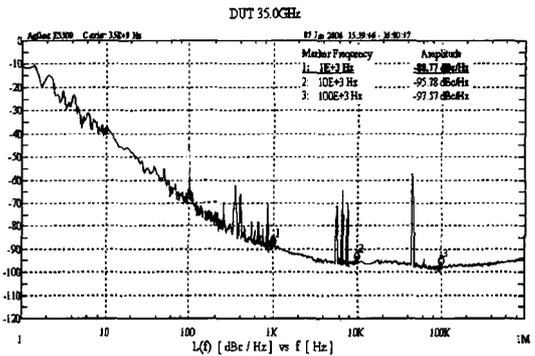


图6 相噪测试曲线
Fig. 6 Measured phase noise curve

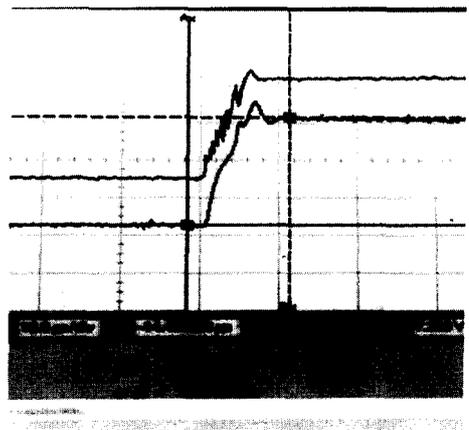


图7 跳频测试曲线
Fig. 7 Measured frequency hopping time

所示.

信号相噪低于 $-90\text{dBc}/\text{Hz}@10\text{kHz}$, $-97\text{dBc}/\text{Hz}@100\text{kHz}$,接近理论值,如图6所示,杂散为 -60dBc .

示波器测得跳频时间 $<15\mu\text{s}$ (从频率最低点跳到最高点),如图7所示(上面的为 VCO 一的 $V_T - t$ 曲线,下面的为 VCO 二的 $V_T - t$ 曲线).

(下转 231 页)

投资强度不高,所建立的地学特征参量遥感模型多数尚不足以承受定量化应用的需要.以地物光谱响应模型为例,从“七五”到“十五”我国开展了大量的数据采集研究,在作物品质与产量估测、矿产资源调查、污染浓度监测^[5,6]等方面发挥了积极作用,但总的来看,过于关注了数据的量,而没有高度重视数据的质,以致数据和模型的可用性存在不少问题.对于面向遥感应用的基础性研究,需要有明确的目标.同时,也应看到,与工程性研究相比,基础性研究的创新性更强,而既然是创新,就可能有风险.在项目未达预期目标时,如果能够弄清原因,知道可为不可为,也是收获,也应该得到肯定,甚至继续给予支持,但目前尚未形成耐心和宽容的气氛.

4 结语

我国遥感信息获取、处理和应用技术已取得重大成就.为此,从政府、管理部门,到广大科技人员,都付出了巨大努力.但发展之中还存在一些问题,有些问题是客观因素造成的,有些问题的解决的确非常困难.自然界五彩缤纷、变幻万千,以此为监测对象的遥感技术能做到看图识字已属不易,定量化更难,非一招一日之功.如何使遥感信息获取、处理和应用技术发展得更快、更好?一家之言,也许片面.需要学界有更多的思考,形成较为全面、客观、切实可行的思路;需要有更踏实的工作,努力尽可能解决

~~~~~

(上接 224 页)

#### 4 结论

合理规划频率,对 DDS 频率、参考分频比和环路分频比三重调节可回避大杂散的 DDS 频率点并覆盖所需带宽;DDS 上变频后驱动 M/N 锁相环路,可兼顾相位噪声、跳频速度和杂散要求;采用二次混频简化了电路并得到了全相参的两路毫米波信号.实测结果与理论预测值相符.

#### REFERENCES

[1] Gunter Ritzberger. 45 GHz highly integrated phaselocked loop frequencysynthesizer in SiGe bipolar technology [C], *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2002, 831—834.

各种问题.本文涉及的文献很多,因篇幅限制,未能一一列出,特此说明.

#### REFERENCES

- [1] SITP (Editor), *Quantitative remote sensing technology* [C]. Expert Group for Information Acquisition and Processing Technology of National Hi-Tech Research & Development Program (中科院上海技术物理所编, *定量化遥感技术*, 国家高技术信息获取与处理技术专家组), 1995.
- [2] Jose A. Sobrino (Editor), *Proceedings of the First International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing* [C]. Auditori de Torrent Spain, 2002, 16—20 September.
- [3] LI Shu-Ka. *Integration technology and its application for space-time information* [M], Beijing: Science Press (李树楷, *时空信息集成技术及其应用*, 北京: 科学出版社), 2003, 41—44.
- [4] TIAN Guo-Lian. Study of radiation properties by remote sensing-present status and expectation [R] (田国良, *遥感辐射特性研究的现状与展望*), <http://www.digitalearth.net.cn/readingroom/specialityartical/tgl.htm>, 2001.
- [5] YIN Qiu. Method of satellite remote sensing of lake water quality and its applications [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (尹球. 湖泊水质卫星遥感方法及其应用. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(3), 40—44.
- [6] GONG Cai-Lan. Study on the spectral reflectivity models of different water quality parameters in huangpu river [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (巩彩兰. 黄浦江不同水质指标的光谱响应模型比较研究. *红外与毫米波学报*), 2006, 25(4), 282—286.
- [2] Sun Lin-Lin. Miniaturized Ka-band low phase noise and fast hopping frequency synthesizer [J]. *Electronic Engineer* (孙琳琳. 小型化 Ka 波段低相噪、快速频率捷变合成器. *电子工程师*), 2005, 31(10): 44—45.
- [3] David Brandon. DDS design [J]. *EDN*, 2004, 71—84.
- [4] Ken'ichi TAJIMA, Yoshihiko IMAI, Yousuke, et al. A 5 to 10 GHz low spurious triple tuned type pll synthesizer driven by frequency convert dds unit [C]. *IEEE MTT-S Digest*, 1997: 1217—1220.
- [5] Kroupa, Venceslav F. Noise properties of PLL Systems [J], *IEEE Trans. on Communications*, 1982, 30(10): 2244—2252.
- [6] TANG Hong-Jun, HONG Wei, Novel millimeterwave substrate integrated waveguide filter with compact configuration [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (汤红军, 洪伟. 一种紧缩结构的新型毫米波基片集成波导滤波器. *红外与毫米波学报*), 2006, 25(2): 140—142.