

## 芯片化微型SAR系统方案设计与验证

丁满来<sup>①②③</sup> 梁兴东<sup>\*①②</sup> 唐 跃<sup>①②</sup> 温智磊<sup>①②</sup> 王逸潇<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>②</sup>(微波成像重点实验室 北京 100190)

<sup>③</sup>(中国科学院大学 北京 100049)

**摘要:** 传统分立器件设计的微型合成孔径雷达(SAR)系统,在体积、功耗、重量、成本方面的发展瓶颈日益显现,且系统设计方案不利于单片集成,无法满足未来微型化和泛在化的无人平台对低成本微型载荷的需求。该文针对微型雷达载荷的迫切需求,开展高分辨率微型SAR系统研究,提出了全相参的调频连续波(FMCW)系统设计方案,解决了系统高脉间相位稳定性及高隔离度设计难题,并利用K波段高密度硅基芯片对该微型SAR方案进行技术验证,研制了原理样机并开展成像应用试验。该微型SAR系统斜距分辨率7.5 cm,系统总功耗仅为1.5 W,相比传统SAR系统在体积、重量、功耗等方面取得了显著的进步,同时为微型SAR系统的硅基单片集成奠定技术基础。

**关键词:** 微型SAR; 单片集成SAR; 调频连续波; 锁相环

中图分类号: TN955

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)11-2645-06

DOI: 10.11999/JEIT171203

## Design and Verification of Monolithic Integrated SAR System

DING Manlai<sup>①②③</sup> LIANG Xingdong<sup>①②</sup> TANG Li<sup>①②</sup>

WENG Zhilei<sup>①②</sup> WANG Yixiao<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

<sup>②</sup>(*Science and Technology on Microwave Imaging Laboratory, Beijing 100190, China*)

<sup>③</sup>(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** The micro Synthetic Aperture Radar (SAR) system based on the traditional GaAs and GaN devices is not conducive to the monolithic integration, and the development bottleneck of volume, power consumption, weight and cost is becoming increasingly apparent, which is impossible to meet the needs of the miniaturized and ubiquitous unmanned platforms in the future. A new scheme for the design of a fully coherent Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) SAR with high resolution is proposed. The design method of high pulse phase stability and high isolation is studied and realized. The prototype of micro SAR is developed based on silicon chip and experimentally demonstrated. The micro SAR operates at K band, producing a signal bandwidth of wider than 2 GHz, enabling a range resolution of 7.5 cm. The system has made remarkable progress in terms of size, weight, power consumption and lay technical foundation for the monolithic integration of micro SAR system in a silicon chip.

**Key words:** Mini SAR; Monolithic integrated SAR; Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW); Phase Locked Loop (PLL)

### 1 引言

随着无人机(UAV)技术的发展,微型化和泛在化是其发展趋势,轻小型无人机因其具有良好的机动性能和无伤亡风险等优势已经成为复杂环境下快速响应和近距侦测的有力手段。目前,搭载微型光学、红外传感系统的轻小型无人机已获得广泛的应

用,但其容易遭受云、雨、自然光辐射源的影响,因此具有全天时、全天候感知能力的小型微波载荷成为近年来的研究热点,在对地高分辨率成像、侦查、目标探测、环境监测、动目跟踪等方面具有广泛的应用需求<sup>[1-4]</sup>。小型化SAR通过引入FMCW体制降低了系统复杂度,相对于传统脉冲体制雷达能够降低体积、重量、功耗和成本<sup>[5,6]</sup>,然而轻小型无人机对微波载荷的体积、重量、功耗等提出更严格的要求,需突破10 g量级的微型SAR系统以满足

轻小型无人机的应用需求, 现有小型化SAR系统的设计方法局限性逐渐显现。首先, 现有小型SAR系统采用分立器件设计, 系统集成度不高, 使得系统在低功耗、低成本方面优化空间殆尽, 体积、重量、功耗无法满足轻小型无人机对微型载荷的要求。传统设计方案中射频器件多采用GaAs, GaN等工艺, 数字采用COMS工艺, 系统集成度低, 且未来在单个芯片内射频与数字一体化集成难以实现, 研究采用硅基工艺实现SAR系统单片集成是未来微型载荷发展的重要趋势。其次, 现有小型化SAR核心电路的设计方案不适于单芯片集成。以波形产生与发射通道为例, 现有方案采用数模转换技术(DAC)或直接频率合成技术(DDS)结合频率变换(或倍频)来实现雷达发射信号(如线性调频信号)的产生<sup>[7,8]</sup>, 一方面DAC会带来系统功耗大的问题, 另一方面DAC带宽有限, 为满足SAR系统高分辨率的需求, 发射通道需采用多次倍频技术实现宽带信号的产生, 这会造成发射信号的杂散恶化、新交调信号产生等问题, 影响系统的性能指标, 同时发射通道链路中的一些低频无源器件也不利于小型化集成, 因此, 从系统方案层面上也需要寻求适用于片上集成的微小型化SAR设计方案。此外, 大规模分布式、多节点雷达也急需解决雷达单元的微型化和低成本问题<sup>[9]</sup>, 同样提出了对低成本芯片化雷达系统的迫切需求。

本文开展了全新架构的芯片化SAR系统设计, 研制了一套K波段芯片化SAR原理验证系统, 并通过外场试验对系统的性能指标进行验证, 本文结构安排如下: 在第2节中, 对传统小型化SAR系统设计弊端进行分析, 并给出了芯片化微型SAR设计方案, 提出了设计难点; 第3节对系统设计难点的解决方案进行阐述, 第4节给出了研制及试验结果, 最后对本文的研究工作进行了总结。

## 2 芯片化SAR系统方案及难点

### 2.1 传统微型SAR方案的弊端

传统的微小型SAR设计方案中包含了DAC(或

DDS)、上变频、时钟等单元, 方案结构复杂、功耗大, 且采用芯片化集成时存在指标严重恶化等风险。例如图1给出了典型的传统小型SAR系统设计方案。

传统设计方案直接进行单片集成存在系统功耗大、性能指标恶化、时钟单元复杂等弊端。系统方案中的高频DAC消耗功率、倍频损耗、混频损耗、滤波损耗等因素都会造成系统功耗较大, 这会带来小体积与高热耗的设计难点, 热耗散是该方案实现芯片化SAR系统的技术瓶颈之一; 其次, 混频及倍频方法会产生新的交调信号, 该方案的芯片化实现会造成发射信号杂散指标的严重恶化, 极大地影响系统的性能指标; 同时, 系统需产生ADC时钟、DAC时钟、本振时钟等信号, 系统时钟单元相对较为复杂, 不利于系统芯片化的实现。

### 2.2 芯片化微型SAR系统方案

为实现微型SAR系统的单片集成, 本文提出了全新的设计架构与方案, 如图2所示。该微型SAR系统架构由线性调频源、发射通道、接收通道、天线和模数转换器组成。在系统新的设计方案中, 线性调频信号基于锁相环技术产生, 该技术可直接产生高频宽带线性调频信号, 并且利用VCO的低噪声特性与锁相环的窄带滤波特性可实现系统发射信号具有良好的杂散抑制特性和远端低噪声优点。雷达回波信号的接收采用去调频体制, 有效地降低了ADC的采样速率, 并减小了数字信号处理量。同时, 系统时钟也极大程度地简化, 只需为锁相环和ADC提供较低频率的参考信号, 如采用50 MHz的固定频率晶振, 即可满足雷达系统的全相参工作。这些系统设计方法的改进使得该微型SAR系统方案具有结构简单、功耗低等特点, 且方案中的线性调频源、发射通道、接收通道和模数转换器均可采用硅基工艺完成芯片化设计与实现, 因此采用该方案实现微型SAR系统在硅基上一体化单片集成是可行的。然而, 新的技术方案及系统高的集成度也会给微型SAR带来新的技术难题。

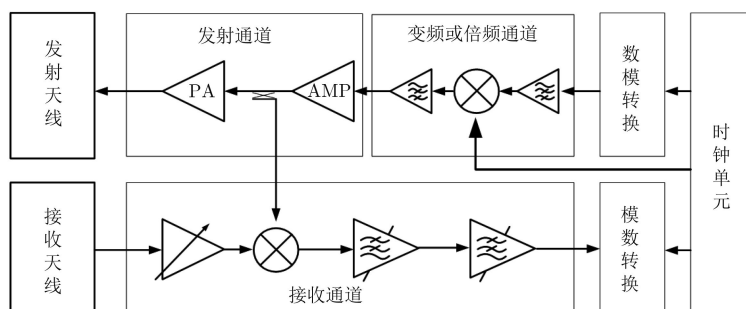


图1 传统小型SAR系统方案

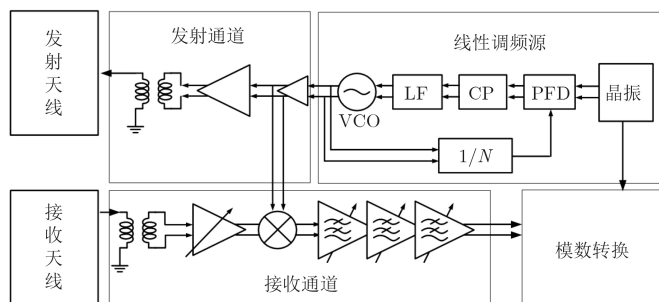


图2 芯片化微型SAR系统方案

### 2.3 芯片化微型SAR系统设计难点

本文提出的芯片化微型SAR系统方案在实现SAR系统片上集成时存在以下几个技术难点。

首先，SAR系统对发射的线性调频信号有严格的要求，要求发射信号在脉内与脉间都应具有较高的相位稳定性。该方案中采用锁相环(PLL)实现线性调频信号的产生，在单个脉冲内锁相环输出频率变化缓慢，锁相环容易保持在跟踪锁定状态，输出信号相位稳定，可保证单个脉冲内发射信号的相位稳定性<sup>[10,11]</sup>。然而，在相邻脉冲间转换时信号频率变化较大，锁相环输出信号频率容易脱离环路捕获带，造成锁相环失锁，锁相环发生自由振荡，进而造成脉间相位不满足SAR数据处理对脉间相位稳定性的要求，该方案需解决脉间相位稳定性的设计难题。

其次，隔离度问题一直是FMCW雷达的设计难题，在高集成度、小尺寸电路条件下收发泄露问题尤其严重。以典型的硅基收发通道芯片为例，芯片在有限面积内集成了大量的有源、无源器件，芯片设计虽已采取隔离措施，但发射信号通过空间辐射、硅衬底串扰、电路耦合等途径泄露至接收通道仍然不可避免，在ADS中建模仿真分析该芯片隔离度随收发间距的变化关系，结果如图3所示，结果表明收发间距(电路尺寸)越小泄露越严重，通常受限于芯片面积要求，收发链路主信号间距设计是有限的，该芯片权衡芯片面积及性能后收发间距设计300  $\mu\text{m}$ ，收发隔离度仿真结果约40 dB，流片后实测约36 dB，发射至接收泄露较为严重，不能满足系统要求。同时，受载荷体积与系统平台尺寸的约束，收发天线的隔离度也是有限的，系统直达波也较为严重。系统低的收发隔离会导致系统作用距离、目标检测概率等性能指标严重下降，因此芯片化SAR系统必须解决系统的高隔离度设计的难题。

## 3 关键技术解决方案

### 3.1 高脉间相位稳定性设计

微型SAR系统的相位稳定性主要受线性调频

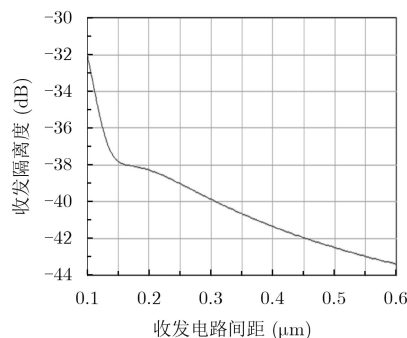


图3 收发隔离度与通道间距关系

源、ADC、接收本振、参考时钟的影响。ADC、接收本振、参考时钟的相位稳定性与传统的雷达相同，高脉间相位稳定性设计的核心是解决参考时钟与PLL输出信号之间的稳定性。为此，首先对锁相环线性调频工作模式下的数学模型进行分析。

锁相环采用有源积分环路滤波器，锁定状态时锁相环参考时钟与输出信号的误差传输函数可表示为

$$H_e(s) = \frac{s^2}{s^2 + 2s\xi\omega_n + \omega_n^2} \quad (1)$$

其中， $\omega_n = \sqrt{\frac{K_0 K_d}{N\tau_1}}$ ， $\xi = \frac{\omega_n}{2} \tau_2$ ， $\omega_n$ 为自然频率， $\xi$ 为阻尼因子， $\tau_1$ ， $\tau_2$ 为有源滤波器的时间常数。 $K_0$ 为锁相环VCO调谐增益， $K_d$ 为鉴相增益， $N$ 为锁相环倍数。

线性调频信号相位变化与时间的关系如式(2)，其中 $\Delta\omega$ 为角速度变化率。

$$\theta(t) = \Delta\omega \cdot t^2 / 2 \quad (2)$$

对式(2)求拉普拉斯变换可得， $\Theta(s) = \Delta\omega / s^3$ ，锁相环在线性调频模式下的相位误差由式(3)给出。

$$\Theta_e(s) = H_e(s)\Theta(s) = \frac{s^2}{s^2 + 2s\xi\omega_n + \omega_n^2} \frac{\Delta\omega}{s^3} \quad (3)$$

通过对式(3)拉普拉斯反变换可获得相位误差随时间的变换关系，可知相位误差大小受 $\tau_1$ ， $\tau_2$ ， $\Delta\omega$ 影响，通过优化环路参数，并通过仿真优化锁

相环频率误差,结果如图4所示,确保环路始终工作在跟踪状态时具有较小的相位误差,最终实现系统相位稳定性优于10°(10 min内),如图5所示。

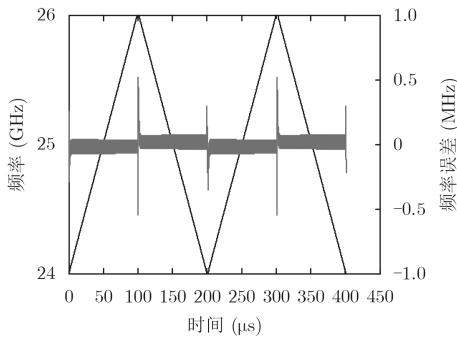


图4 调频源输出频率误差仿真

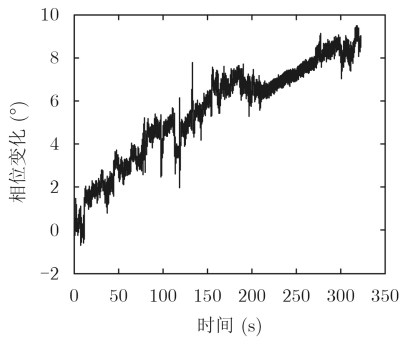


图5 系统相参性及相位稳定性

高脉间相位稳定性设计建立了锁相环线性调频模式下数学模型,通过锁相环仿真与实测,对环路参数进行迭代优化,实现锁相环路在线性调频信号产生的整个过程中工作于跟踪锁定状态,实现输出信号与参考时钟的精确动态跟踪,保证输出信号与参考时钟具有良好的相参性及相位稳定性。

### 3.2 高隔离度设计

本文通过设计新型的自适应对消方法实现了系统高隔离度的设计,满足了芯片化验证系统对隔离度的要求,也为未来微型SAR系统在单片集成中提高泄露信号的抑制制度奠定技术基础。该微型SAR电路中,因发射至接收的泄露(收发天线泄露、收发前端电路泄露)严重,经测试可得系统自身隔离度约45 dB,泄露的发射信号及噪声已对接收系统性能造成影响,收发隔离度不满足系统要求,为提高隔离度系统设计采用了基于数字锁相环的射频自适应对消方法。通过研究数字锁相环的高精度相位控制与实现,采用数字锁相环、高精度数控衰减器分别实现对对消信号相位与幅度的精确控制,并建立自适应对消策略、算法及流程,射频对消方案如图6所示,在系统自身隔离度45 dB的基础上,通过射频自适应对消方法进一步提高系统的隔离度至约

70 dB,隔离度实测结果如图7所示。SAR系统发射功率20 dBm,经过70 dB隔离后,发射信号泄露功率-50 dBm小于前端饱和功率-30 dBm,不会造成系统饱和,满足系统对隔离度的要求。此外,对消电路具有低功耗、结构简单等优势,有利于在硅基上单片集成。

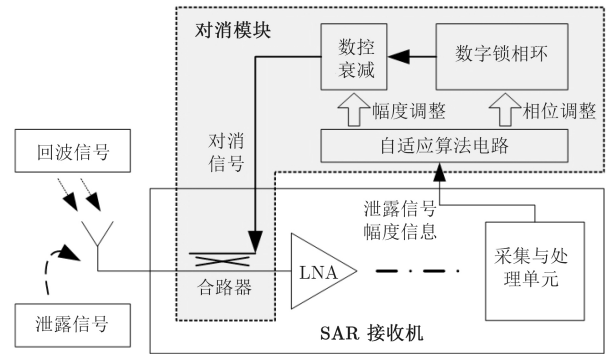


图6 射频对消方案

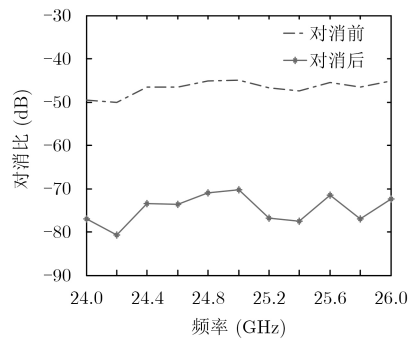


图7 系统隔离度测试结果

## 4 研制结果

### 4.1 系统主要指标设计

表1给出了该微型SAR系统设计的主要性能指标。系统带宽不小于2 GHz,具有7.5 cm的理论斜距分辨率,脉宽可控,可适应不同的工作距离。工作模式为正侧视条带SAR系统的噪声等效散射系数(NESZ)可表示为

$$NESZ = \frac{2 \cdot (4 \times \pi)^3 \cdot r^3 \cdot V_a \cdot k \cdot T}{\lambda^3 \cdot G_t \cdot G_r \cdot P_{av} \cdot \rho_r} k_s \quad (4)$$

表1 系统主要性能指标

参数名称	指标
工作频率	K 波段
带宽	≥2 GHz
脉冲宽度	100 μs(可调)
分辨率	7.5 cm
作用距离	2~1000 m

其中，NESZ为噪声等效散射系数， $r$ 为作用距离， $V_a$ 为平台运动速度， $k$ 为玻尔兹曼常数， $T$ 为接收机等效噪声温度， $\lambda$ 为雷达工作波长， $G_r$ 和 $G_t$ 分别为天线的收发增益， $P_{av}$ 为雷达发射平均功率， $\rho_r$ 为系统距离分辨率， $k_s$ 为系统损耗等加权。依据式(4)对SAR系统的NESZ进行了仿真分析，仿真结果如图8所示。

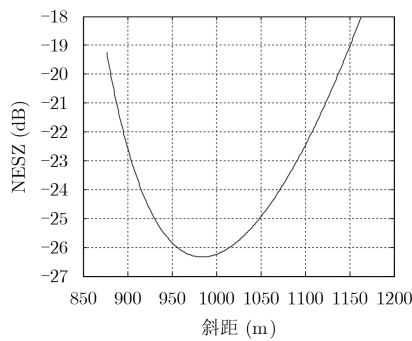


图8 微型SAR的NESZ仿真结果

该SAR系统在作用距离1000 m的条件下，NESZ最大优于-26 dB，系统具备高信噪比成像的基本条件。

### 4.2 原理样机及性能优势

微型SAR系统采用微波多层电路板将天线、射频、数字进行一体化集成。顶层电路板集成了天线与微波电路，天线采用微带阵列天线，该类型天线具有重量轻和易集成的优点。高频微波电路采用高集成度的硅基芯片实现，电路设计于天线的背面，芯片与天线之间采用垂直互连技术实现低损耗连接。底层电路板集成了中频通道、数字、电源管理、晶振等。

样机研制结果表明，该微型SAR系统理论斜距分辨率优于7.5 cm，系统重量约150 g，在同类型SAR中处于领先水平<sup>[12]</sup>，表2给出了国内外典型微

小型SAR系统的成像分辨率及重量情况。

其次，该微型SAR系统在尺寸、重量和功耗方面取得了显著的进步，如表3所示。射频系统功耗约为1.5 W，系统的体积为80 mm×80 mm×10 mm，微型SAR系统的重量小于150 g。与现有的微小型SAR相比，该系统在体积、重量和功耗方面优势明显，且具有较高的成像分辨率。

表2 典型微小型SAR系统核心指标对比

系统名称	工作频段	分辨率(m)	重量(kg)
MicroASAR <sup>[13]</sup>	C	0.75	2.5
AMBER <sup>[14]</sup>	X	0.1	6
NanoSAR	X	1	0.9
UAV SAR <sup>[15]</sup>	Ka	0.5	4
中科院电子所MiniSAR	Ku	0.15	2.5
本文原理样机	K	0.075	0.150

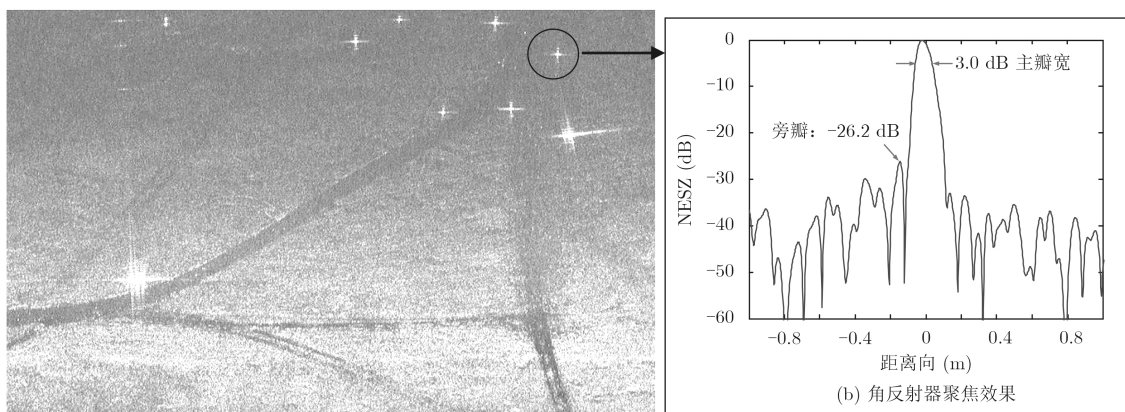
表3 微型SAR原理样机体积、重量和功耗指标

参数名称	指标
体积	80 mm×80 mm×10 mm
重量	150 g
射频系统功耗	<1.5 W

### 4.3 成像试验结果

本文基于该高分辨率芯片化微型SAR系统开展了外场成像试验，对系统功能和性能指标进行了验证。

成像试验中该微型SAR工作在正侧视条带模式，同时获取了原始回波数据、IMU数据和GPS数据，通过距离多普勒算法(RDA)对实验数据进行处理，获得了高分辨率的微型SAR图像，图9(a)给出了成像试验数据处理的SAR图像，在成像试验的目标区域放置角反射器，角反射器成像的距离向切面



(a) SAR 图像

(b) 角反射器聚焦效果

图9 微型SAR试验结果

如图9(b)所示,角反射器点目标脉冲距离向3 dB波束宽度约0.08 m,峰值旁瓣比-26.2 dB(系数2.5凯塞窗)。试验结果表明,图像聚焦效果良好,地物细节清晰可见,成像分辨率约0.08 m,符合设计目标。然而,图像信噪比相对较差,主要原因是发射信号的噪声比传统雷达的较差,这与锁相环工作在动态跟踪锁定状态密切相关,系统噪声性能的改善以及锁相环的噪声杀除技术是未来的重点研究内容之一。

## 5 结论

本文提出了芯片化全相参微型SAR系统设计方案,解决了系统高脉间相位稳定性、高隔离度等设计难点,面向硅基集成开展系统设计及电路优化,基于全硅基芯片对微型SAR系统进行可行性验证,研制了体积80 mm×80 mm×10 mm、重量小于0.150 kg、射频系统功耗小于1.5 W的芯片化微型SAR原理验证系统,并通过外场成像试验对系统功能和性能指标进行验证,成像数据处理结果表明,系统成像分辨率优于7.5 cm,聚焦效果良好。该芯片化微型SAR在体积、重量、功耗和成本等方面具有明显的优势,且该方案具有单片集成的可行性,可为未来全硅基集成微型SAR系统的研究提供有力的技术支撑。

## 参 考 文 献

- [1] ESSEN H, STANKO S, SOMMER R, *et al.* Millimetre wave SAR for UAV operation[C]. IEEE Asia-Pacific Microwave Conference, Melbourne, Australia, 2011: 963–966.
  - [2] JOHANNES W, ESSEN H, STANKO S, *et al.* Miniaturized high resolution Synthetic Aperture Radar at 94 GHz for microlite aircraft or UAV[C]. IEEE Sensors 2011, Limerick, Ireland, 2011: 2022–2025.
  - [3] AGUASCA A, ACEVOHERRERA R, BROQUETAS A, *et al.* ARBRES: Light-Weight CW/FM SAR sensors for small UAVs[J]. *Sensors*, 2013, 13(3): 3204–3216. doi: [10.3390/s130303204](https://doi.org/10.3390/s130303204).
  - [4] EDRICH M. Ultra-lightweight synthetic aperture radar based on a 35 GHz FMCW sensor concept and online raw data transmission[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2006, 153(2): 129–134. doi: [10.1049/ip-rsn:20045080](https://doi.org/10.1049/ip-rsn:20045080).
  - [5] 张明友,汪学刚. 雷达系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 36–44.  
ZHANG Mingyou and WANG Xuegang. Radar System[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 36–44.
  - [6] STOVE A G. Linear FMCW radar techniques[J]. *IEE Proceedings F: Radar and Signal Processing*, 1992, 139(5): 343–350. doi: [10.1049/ip-f-2.1992.0048](https://doi.org/10.1049/ip-f-2.1992.0048).
  - [7] STANKO S, JOHANNES W, SOMMER R, *et al.* SUMATRA—A miniaturized millimetre wave SAR[C]. 2013 14th International Radar Symposium (IRS), Dresden, German, 2013: 37–40.
  - [8] EDWARDS M, MADSEN D, STRINGHAM C, *et al.* MicroaSAR: A small, robust LFM-CW SAR for operation on UAVS and small aircraft[C]. 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Boston, USA, 2008, 5: V514–V517.
  - [9] BROOKNER E. Developments and breakthroughs in radars and phased-arrays[C]. IEEE Radar Conference, Philadelphia, USA, 2016: 1–6. doi: [10.1109/RADAR.2016.7485273](https://doi.org/10.1109/RADAR.2016.7485273).
  - [10] 贝斯特, 著, 李永明, 译. 锁相环设计、仿真与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 29–33.
  - [11] ZHAO Zhiyong, LI Xiangyang, and CHANG Wenge. LFM-CW signal generator based on hybrid DDS-PLL structure[J]. *Electronics Letters*, 2013, 49(6): 391–393. doi: [10.1049/el.2012.2852](https://doi.org/10.1049/el.2012.2852).
  - [12] 王岩飞, 刘畅, 詹学丽, 等. 无人机载合成孔径雷达系统技术与应用[J]. 雷达学报, 2016, 5(4): 333–349. doi: [10.12000/JR16089](https://doi.org/10.12000/JR16089).  
WANG Yanfei, LIU Chang, ZHAN Xueli, *et al.* Technology and applications of UAV synthetic aperture radar system[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(4): 333–349. doi: [10.12000/JR16089](https://doi.org/10.12000/JR16089).
  - [13] ZAUGG E, EDWARDS M, LONG D, *et al.* Developments in compact high-performance synthetic aperture radar systems for use on small Unmanned Aircraft[C]. Aerospace Conference, Montana, USA, 2011: 1–14.
  - [14] VAN DER GRAAF M W, OTTEN M P G, HUIZING A G, *et al.* AMBER: An X-band FMCW digital beam forming synthetic aperture radar for a tactical UAV[C]. IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, Waltham, USA, 2013: 165–170.
  - [15] EDRICH M and WEISS G. Second-generation Ka-band UAV SAR system[C]. European Radar Conference, Amsterdam, Holland, 2008: 479–482.
- 丁满来: 男, 1982年生, 博士, 主要研究方向包括微波毫米波电路与系统、高分辨率合成孔径雷达系统、信号与信息处理。
- 梁兴东: 男, 1973年生, 研究员, 研究领域包括高分辨率合成孔径雷达系统、干涉合成孔径雷达系统、成像处理及应用和实时数字信号处理。
- 唐 跃: 男, 1988年生, 助理研究员, 主要研究方向为微小型雷达系统关键技术。
- 温智磊: 男, 1988年生, 研究实习生, 主要研究方向为微波毫米波电路设计。
- 王逸潇: 男, 1986年生, 助理研究员, 主要研究方向为射频毫米波芯片及系统设计。