

一种W波段无人机微型SAR系统

丁满来 丁赤飏* 唐 跃 王雪梅 温智磊 曲佳萌

(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

(微波成像重点实验室 北京 100190)

摘要: 随着轻小型无人机(UAV)日益发展, 基于UAV平台搭载微型SAR系统的探测手段会给信息获取方式带来革命性的影响, 这也对微型载荷提出了更高的需求。针对这一需求, 该文介绍了一种W波段UAV微型SAR系统, 提出了基于锁相技术的线性调频源的设计方法, 并对毫米波(MMW)介质集成波导天线、3维集成、运动补偿方法等关键问题进行研究, 研制W波段无人机微型SAR系统原理样机, 基于多旋翼无人机平台开展飞行成像应用试验。研究结果表明, 原理样机在系统分辨率、体积、重量等方面具有处于业内领先水平, 飞行试验获得了聚焦效果良好的高信噪比(SNR)图像。

关键词: 无人机; 微型SAR; 调频源; 3维集成

中图分类号: TN955

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)08-1939-07

DOI: 10.11999/JEIT180946

A W Band Mini-SAR System for Unmanned Aerial Vehicle

DING Manlai DING Chibiao TANG Li WANG Xuemei

WEN Zhilei QU Jiameng

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(Science and Technology on Microwave Imaging Laboratory, Beijing 100190, China)

Abstract: With the development of light and small Unmanned Aerial Vehicles (UAV), the detection method of Mini SAR based on UAV platform brings a revolutionary impact on information acquisition mode. In this paper, a W-band Mini SAR system for UAV is proposed, including the system design proposal and composition, high linearity analog phase-locked frequency modulation, MilliMeter Wave (MMW) substrate integrated waveguide antenna, 3D integration and motion compensation methods to solve the key problems of Mini SAR. A W-band Mini SAR prototype is developed and the imaging test based on Multi-rotor UAV is proceeded. The results show that the resolution, volume and the weight of Mini SAR prototype is at the industry-leading level. A high SNR imaging with perfect focusing effect is obtained from flight test.

Key words: Unmanned Aerial Vehicle(UAV); Mini SAR; Frequency modulated source; 3D integration

1 引言

近年来, 轻量化、小型化、低功耗的微型SAR技术是SAR系统的重要发展趋势, 已成为SAR技术领域的研究热点, 并且在对地高分辨率成像、侦查、目标探测、环境监测、动目跟踪等方面获得广泛应用^[1,2]。然而, 随着技术发展, 轻小型无人机平台呈现出微型化和泛在化的发展趋势, 如典型的多旋翼无人机平台, 该平台不需要起飞与降落跑道, 具备随时开展飞行作业的能力, 且在飞行方向上可灵活的操作, 能够实现3维方向的飞行线路, 该类轻小型无人平台对信息获取是极有利的^[3,4]。

可以预见, 载荷能力百克级的轻小型无人机平台与具有高分辨成像能力的传感器配合将给遥感应用和信息获取方式领域带来革命性的影响, 从这一方向出发, 轻量化、低功耗的高分辨率的微型SAR系统的研发已迫在眉睫。

雷达系统在同等性能指标的情况下, 采用毫米波工作频段更容易实现天线的小型化设计, 为此采用毫米波频段进行SAR系统的微型化甚至芯片化的设计是重要的发展趋势。同时W波段电磁波因其独特的反射特性和宽带特性^[5], 可以获取地物的细节纹理特征, 可广泛应用于高分辨率目标识别、微小变化检测等领域, 工作在W波段的无人机微型SAR系统已成为近年来研究的一个热点。然而, 目前基于传统电路设计方案、集成工艺的微小型SAR

系统在体积、功耗、重量等方面瓶颈日益显现,主要表现在两个方面:一是系统设计方案不适用适用于芯片化,高密度芯片化设计会带来发热严重、性能恶化等问题^[6];二是传统的2维平面电路集成度无法进一步提高^[7]。为此,采用新的设计方案与集成方法研制毫米波频段的微型SAR系统具有重要的研究价值。

本文开展了一种W波段无人机微型SAR系统设计,研制了一套W波段无人机微型SAR原理验证系统,基于多旋翼无人机通过外场试验对系统的性能指标进行应用验证,本文结构安排如下:在第2节中,描述了W波段无人机微型SAR系统设计方案,提炼系统关键设计难点与关键技术;第3节对系统关键技术的解决方案进行阐述,第4节介绍了研制及应用试验结果,最后对本文的研究工作进行了总结。

2 SAR系统总体设计方案

2.1 W波段无人机SAR总体方案

与传统的SAR系统设计方法不同,本文为实现W波段SAR系统的微型设计,采用了适用于3维高密度集成的系统设计方案与架构,系统设计方案如图1所示。本文微型SAR系统由参考时钟、线性调频源、毫米波收发前端、天线、中频通道和模数转换器组成。在雷达系统体制方面,系统采用调频连续波(FMCW)体制,且雷达回波信号的接收采用去调频体制,本文方法有效地降低了回波的中频频率,采用低速的数模转换(ADC)即可实现回波信号的采样与量化,并减小了信号处理的数据量;在发射波形产生方面,系统采用了基于模拟锁相环技术的线性调频信号产生方法,该技术充分利用压控振荡器(VCO)的特性可直接产生高频宽带线性调频信号,并且锁相环具有窄带滤波特性,使得系统发射波形信号具有较低的相位噪声、良好的杂散抑制等优点;此外,与传统微型SAR方案相比,系统时钟也极大程度地简化,参考时钟只需为锁相环和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。系统设计方法的改进使得该微型SAR系统方案具有电路结构简单、功耗低等特点,这也使得系统采用3维高密度集成具有了可行性。

2.2 系统核心参数设计

本文微型SAR系统的主要性能指标设计如表1所示。噪声等效散射系数(NESZ)是SAR系统成像质量的核心参数,本文对工作模式为正侧视条带SAR的NESZ进行设计论证,NESZ可表示为

$$NESZ = \frac{2(4\pi)^3 \cdot r^3 \cdot V_a \cdot k \cdot T}{\lambda^3 \cdot G_t \cdot G_r \cdot P_{av} \cdot \rho_r} k_s \quad (1)$$

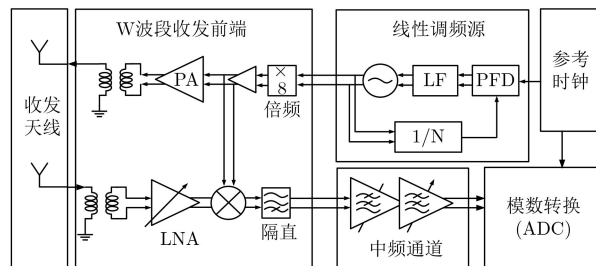


图1 W波段无人机微型SAR系统方案

表1 系统主要性能指标

参数名称	指标
载波频率(GHz)	95
带宽(GHz)	2000
调制方式	线性调频
调频率(MHz·μs)	20(可调)
分辨率(m)	0.075
最大作用距离(m)	500

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, λ 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, ρ_r 系统距离分辨率, k_s 系统损耗等加权。依据式(1)对SAR系统的NESZ进行了仿真分析,仿真结果图2所示。

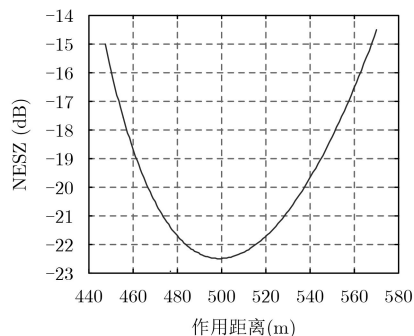


图2 微型SAR的NESZ仿真结果

本文SAR系统在作用距离500 m的条件下, NESZ最大优于-24.5 dB, 其次系统设计理论分辨率0.075 m, 系统具备高分辨率、高信噪比成像的基本条件。

3 关键技术解决方案

3.1 基于模拟锁相技术的线性调频波形产生技术

基于模拟锁相环技术实现线性调频信号的产生会极大地简化系统的电路结构,降低系统功耗。然而模拟方法产生的线性调频信号在频率线性度、脉间相位稳定性等方面无法与数字电路相比,如何设

计锁相线性调频源的电路以满足SAR成像的要求是系统设计的关键技术。为此本文建立了锁相调频源电路的数学模型, 利用锁相调频源输出信号分析SAR系统脉冲压缩质量, 评估成像质量。

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^[8]

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

其中, $\omega_n = \sqrt{\frac{K_0 K_d}{N\tau_1}}$, $\xi = \frac{\omega_n}{2} \tau_2$, ω_n 为自然频率, ξ 为阻尼因子, τ_1 , τ_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。

线性调频信号在脉冲间转换、脉冲内分别为相位阶跃激励和线性调频激励, 激励信号可表示为如式(3), 其中, k 为调频率, 单位为Hz/s, $u(t)$ 为单位阶跃信号, θ_0 为相位阶跃量, 则 θ_i 表示为

$$\theta_i(t) = k \cdot \pi \cdot t^2 \cdot u(t) + \theta_0 \cdot u(t) \quad (3)$$

对式(3)求拉普拉斯变换可得, $\Theta(s) = k \cdot \pi/s^3 + \theta_0/s$, 锁相环在线性调频模式下的相位误差由式(4)给出。

$$\begin{aligned} \Theta_e(s) &= H_e(s)\Theta(s) \\ &= \frac{s^2}{s^2 + 2s\xi\omega_n + \omega_n^2} \cdot (k \cdot \pi/s^3 + \theta_0/s) \end{aligned} \quad (4)$$

通过对式(4)拉普拉斯反变换可获得线性调频源输出信号的频率误差、相位误差随时间的变换关系, 利用该发射输出信号仿真分析系统距离向、方位向的脉冲压缩结果, 优化调频电路参数 τ_1 , τ_2 , k , 可获得接近理想的脉冲压缩结果, 距离向脉冲压缩结果如图3所示, 方位向脉冲压缩结果如图4所示。

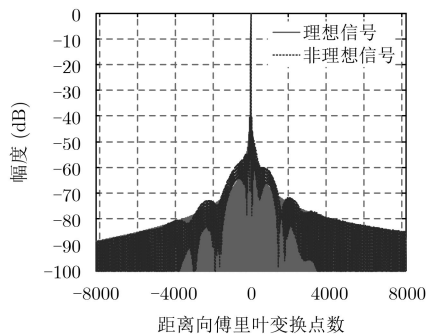


图3 距离向脉冲压缩结果

本文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, 实现了良好的频率线性度

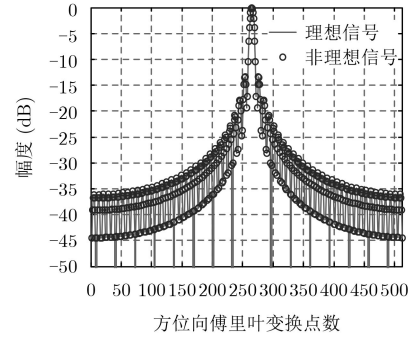


图4 方位向脉冲压缩结果

与脉间相位稳定性, 进而保证系统在距离向与方位向具有良好的脉冲压缩质量。

3.2 高隔离度毫米波介质集成波导天线

随着载荷平台的一体化及微型FMCW SAR的发展, 系统从发射天线直接泄露至接收天线的直达波信号对系统接收性能影响越来越严重, 收发天线的隔离度已经成为制约FMCW SAR系统性能指标的关键因素之一。收发天线之间信号泄露受多方面影响, 其中收发天线之间的表面波串扰是电磁泄露的重要途径之一, 且在毫米波频段更为严重^[9]。传统的解决办法是增加收发天线之间的间距和在收发天线加隔离板以减小表面波和空间绕射波, 但随着系统微型化的发展, 这种方法已经不适用。针对这一问题, 本文采用电磁带隙结构(EBG)来抑制共面收发天线之间的表面波, 从而提高系统收发隔离度^[10]。

EBG是一种低剖面的电磁结构, 通过在介质基板表面刻蚀周期性金属结构, 可产生类似于带滤波器的阻隔效果, 可以抑制收发天线之间的表面波, 从而提高隔离度。本文设计的EBG结构如图5所示, 采用成熟的天线电磁仿真软件完成了天线及EBG隔离结构的设计与仿真, 并分别分析了收发天线之间不加任何隔离措施和收发天线之间加有EBG结构时的隔离度性能, 通过天线实物研制与测试对方案的可行性进行验证, 收发天线隔离度仿真及实测结果如图6所示, 结果表明收发天线之间的隔离度提高了18 dB, 且实测与仿真较为吻合, 证明了该方法对改善收发天线隔离度的有效性。

3.3 毫米波电路3维集成

传统毫米波电路是往往是以2维平面集成技术为核心, 采用毫米波印制电路板(PCB)、低温共烧陶瓷(LTCC)等工艺手段将多个具有不同功能的有源芯片与外围无源器件组合, 进而提高系统集成度。2维平面集成虽然能一定程度缩小系统体积, 但由于主要芯片都需要平面排布, 因此集成度上限不高。同时, 当芯片数量过多时, 信号引线过长带来的阻容延迟和寄生电容会使器件工作速度降低。

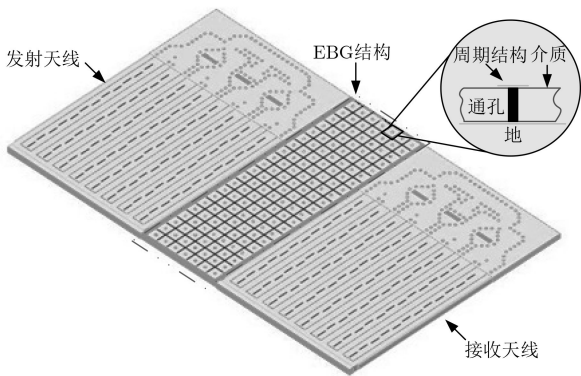


图5 W波段收发天线及EBG结构

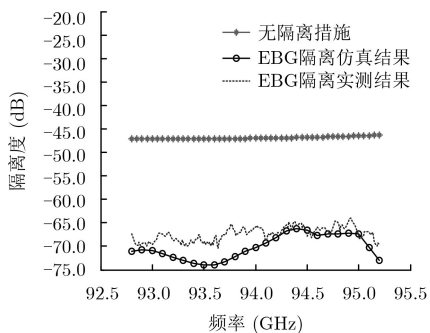


图6 EBG结构隔离度改善对比图(图例边框)

为此，将2维集成向3维集成技术发展是实现毫米波系统集成化、小型化、轻型化、高密度和优良电气性能的有效途径^[10, 11]。一方面，3维集成可以充分利用立体空间，减小电路面积，缩短引线长度，提高传输速度；另一方面，3维集成可以把不同工艺的芯片如硅基、化合物半导体、MEMS等进

行异质集成，有利于实现多功能、更大规模的集成^[12]。本文研制的W波段无人机微型SAR充分采用了3维集成技术，有效提升了系统集成度。如图7所示：

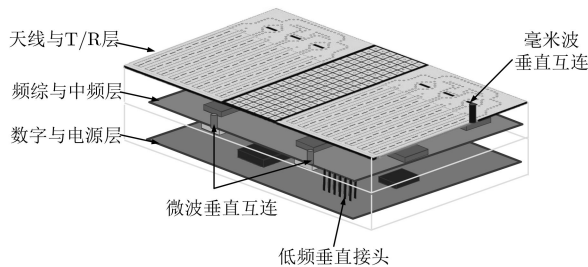


图7 系统3维集成结构图

首先，根据功能和频段进行了系统3维分层，包括工作在W波段的天线与T/R层、工作在微波频段的频综与中频层，以及低频的数字与电源层。各层之间采用3维堆叠进行集成，提高了空间利用效率，同时有利于模块间隔离。其次，层内的信号连接采用了垂直互连的方式，其中，天线与T/R芯片间的毫米波垂直互连，需要将平面的毫米波信号与天线波段口进行垂直过渡，通过大量仿真和验证件测试，实现了良好的匹配和低损耗传输。最后，热与应力设计是高密度3维集成设计的关键，本文对关键部位的热应力特性进行仿真设计。如图8所示，分析了射频芯片与高功率芯片的热传导特性及其造成的结构应力变化，进而优化芯片布局 and 信号传输模式，提高系统中整体热管理效率，弱化热应力影响。

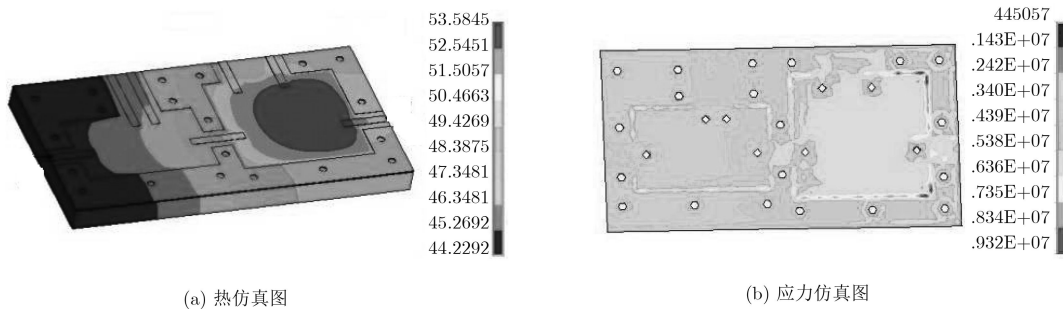


图8 关键部位的热应力仿真

通过上述3维集成的优化设计，最终实现了高集成度的W波段无人机微型SAR原理样机研制，体积为 $60 \times 30 \times 35 \text{ mm}^3$ ，重量仅为140 g，相比于传统的微型SAR，体积重量比降低6倍以上，同时不用额外的散热措施。高集成度设计将会极大地扩展W波段无人机微型SAR应用范围。

3.4 运动补偿方法

W波段无人机SAR运动补偿存在两方面的特殊性，一是W波段波长短(3 mm)，对运动误差更为

敏感，要求短时的相对运动测量精度达到0.2 mm，即使是搭载目前高精度POS测量系统，也难以达到位置和姿态测量精度要求。二是轻小型平台易受大气湍流影响，平台平稳性较差，不利于SAR成像。同时，考虑到系统的成本和重量，本文采用了基于微机电系统技术的惯性测量单元(MEMS-IMU)完成平台的运动误差测量，MEMS-IMU测量精度相对较差，这进一步增加了SAR成像的难度。

因此，本文提出一种MEMS-IMU和SAR数据

信号级融合的运动补偿方法。首先,基于MEMS-IMU运动补偿数据进行初步的成像,基于场地布置的角反射器或强目标点作为图像的特显点,SAR数据在原始数据域和复图像域利用特显点相位历史、多普勒信息、多普勒调频率估计平台相对运动误差和姿态信息;然后,基于MEMS-IMU和SAR信号级数据融合方法分析MEMS惯导随机漂移误差引起的运动误差特征,并结合多旋翼无人机平台的运动特点,构建SAR辅助MEMS-IMU随机误差漂移模型,校正MEMS-IMU长时间随机漂移;最后,基于运动误差估计结果和融合处理方法,确定Kalman滤波的估计状态和量测信息,构建状态方程和量测方程,并联合原始的GPS/INS数据进行双向平滑的Kalman滤波处理。滤波处理结果再次输出给SAR相干成像处理,重复上述处理流程直到运动估计结果稳定为止。最终实现较为理想的运动误差补偿效果,具有良好的聚焦效果。

4 研制结果及应用

4.1 样机研制结果

W波段无人机微型SAR采用3维集成工艺将天线、射频、数字进行一体化集成,样机实物如图9所示。顶层电路板集成了天线与毫米波前端电路,中间层集成了线性调频源与电源模块电路,底层电路集成了中频与数字电路,天线与毫米波前端之间采用毫米波垂直互连技术实现低损耗连接。

样机研制结果表明,系统理论斜距分辨率优于7.5 cm,在45°下视角安装条件下地距分辨率优于10.6 cm,系统重量约140 g,在同类型SAR中处于领先水平^[13],表2给出了国内外典型微小型SAR系统的分辨率及重量情况。与现有的微小型SAR相比,该系统在成像分辨率、体积、重量和功耗方面优势明显,处于业内领先水平。

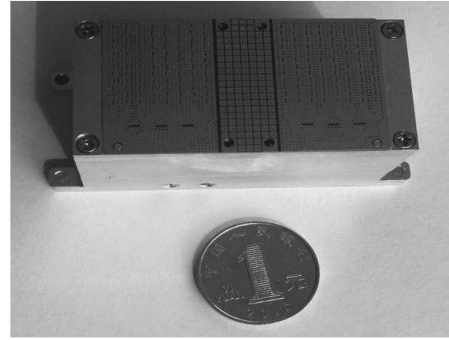


图9 W波段微型SAR样机

表2 典型微小型SAR系统核心指标对比

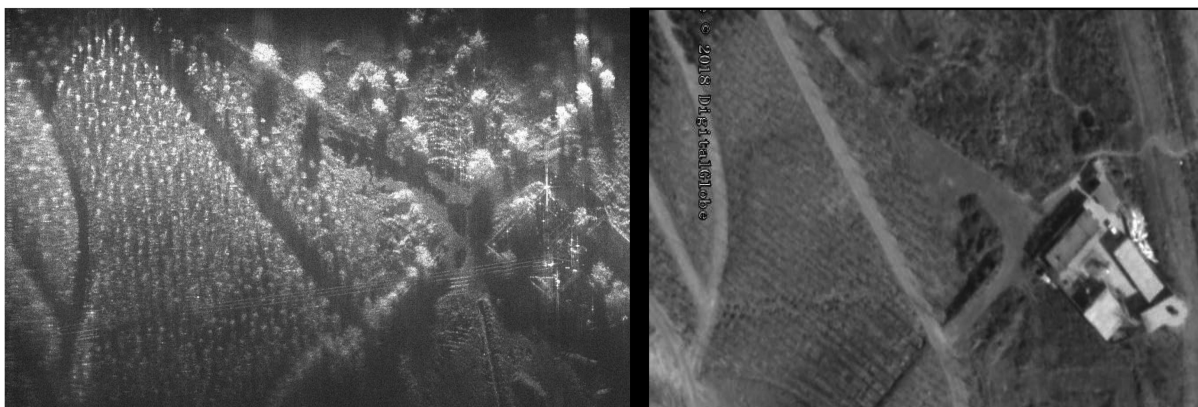
系统名称	工作频段	分辨率(m)	重量(kg)
MicroASAR ^[14]	C	0.750	2.500
AMBER ^[15]	X	0.100	6.000
NanoSAR	X	1.000	0.900
UAV SAR ^[16]	Ka	0.500	4.000
中科院电子所MiniSAR	Ku	0.150	2.500
本文W波段无人机SAR	W	0.075	0.140

4.2 成像试验结果

样机基于多旋翼无人机平台开展了成像应用试验,SAR挂飞实拍如图10所示,无人机平台距地面飞行高度100 m,飞行速度6 m/s,样机安装下视



图10 W波段SAR搭载多旋翼无人机



(a) SAR图像

(b) 光学图像

图11 W波段无人机微型SAR试验结果

角 45° 。SAR系统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 ω K算法对实验数据进行处理，获得了高分辨率的SAR图像，图11(a)给出了成像试验数据处理的SAR图像。试验结果表明，点目标脉冲距离向3 dB波束宽度约0.1 m，图像聚焦效果良好，地物细节清晰可见。图像在距离向旁瓣较差，典型峰值旁瓣比为 -18.1 dB(系数2.5凯塞窗)，该现象主要由雷达系统的频率或相位误差引起，系统的误差补偿是未来主要研究内容之一。

5 结论

本文提出了一种W波段无人机微型SAR系统设计方案，解决了基于锁相技术的线性调频波形产生技术、高隔离度毫米波介质集成波导天线、W波段SAR运动补偿等设计难点，采用毫米波电路高密度3维集成工艺完成系统集成，研制了射频重量小于0.140 kg、体积小于 $3\text{ cm}\times 3\text{ cm}\times 6\text{ cm}$ 的W波段SAR系统，并在多旋翼无人机平台上开展SAR系统的成像试验与技术验证，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。W波段无人机SAR系统在体积、重量、功耗和分辨率等方面具有明显的优势，且该方案具有单片集成的可行性，可为未来芯片级3维集成的SAR系统的研究提供技术支撑。

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] LORT M, AGUASA A, LOPEZ-MARTINEZ C, *et al.* Initial evaluation of SAR Capabilities in UAV multicopter platforms[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2018, 11(1): 1–14.
- [4] YAN Xiaoyu, CHEN Jie, LIYANAGE Biman, *et al.* A lightweight SAR system for multi-rotor UAV platform using LFM quasi-CW waveform[J]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Beijing, CHINA*, 2016: 7346–7349.
- [5] 董勇伟, 李焱磊, 丁满来, 梁兴东. 一种高分辨率W波段SAR系统[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(5): 1266–1270. doi: 10.11999/JEIT170461.
- [6] 丁满来, 梁兴东, 唐跃, 等. 芯片化微型SAR系统方案设计与验证[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(11): 2645–2650. doi: 10.11999/JEIT171203.2018.
- [7] 王喆焱. 三维集成技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014: 2–6.
- [8] BEST R E. Phase-Locked Loops Design, Simulation, and Applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 25–27.
- [9] WILTSE J C. Surface-wave propagation on a single metal wire or rod at millimeter-wave and terahertz frequencies[C]. 2006 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, San Francisco, USA, 2006: 970–973.
- [10] ALTAF A, ALSNUAIDI M A, and ARVAS E. A novel EBG structure to improve isolation in MIMO antenna[C]. 2017 USNC-URSI Radio Science Meeting(Joint with AP-S Symposium), San Diego, USA, 2017: 105–106.
- [11] 赵正平. 微系统三维集成技术的新发展[J]. *微纳电子技术*, 2017, 54(1): 1–10. doi: 10.13250/j.cnki.wndz.2017.01.001.
- [12] 肖庆. 微系统三维异质异构集成与应用[C]. 2018年全国微波毫米波会议, 成都, 中国, 2018: 417–420.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.

[16] 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, 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.

丁赤飏: 男, 1969年生, 研究员, 研究方向包括新体制合成孔径雷

达技术、空间信息大数据处理与分析技术、芯片化雷达.

唐 蹊: 男, 1988年生, 助理研究员, 研究方向为微小型雷达系统关键技术.

王雪梅: 女, 1988年生, 工程师, 研究方向为天线设计.

温智磊: 男, 1988年生, 助理研究员, 研究方向为微波毫米波电路设计.

曲佳萌: 女, 1992年生, 助理研究员, 研究方向为数字信号处理.