

引用格式:张琦,张雷,郭俊栋,等.基于无人飞行平台的小型Ka波段合成孔径雷达系统研制[J].地球信息科学学报,2019,21(4):524-531. [Zhang Q, Zhang L, Guo J D, et al. Development of Ka-band miniature synthetic aperture radar based on UAV[J]. Journal of Geo-information Science, 2019,21(4):524-531.] DOI:10.12082/dqxxkx.2019.180453

基于无人飞行平台的小型Ka波段合成孔径雷达系统研制

张琦,张雷,郭俊栋,胡建民

中国科学院电子学研究所, 北京 100190

Development of Ka-band Miniature Synthetic Aperture Radar based on UAV

ZHANG Qi*, ZHANG Lei, GUO Jundong, HU Jianmin

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

Abstract: Unmanned Aerial Vehicle (UAV) is widely used in military investigation and attack, land and resources survey, disaster monitoring and other fields because of its advantages such as long stay time and easy maintenance. Synthetic aperture radar (SAR) is a kind of two-dimensional imaging radar, which can obtain radar images similar to optical images. It has the advantages of all-weather, high resolution, wide detection range and so on. It is one of the important loads of UAV. However, due to the relatively small space and load capacity of UAV, radar load must be small volume, light weight and low power consumption. Ka-band electromagnetic wave signal has the characteristics of short wavelength, wide bandwidth and small size of key microwave devices. It is suitable for high resolution miniature radar load. In 2015, the Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, developed a kind of high resolution Ka-band synthetic aperture radar for small or medium UAV. The performance of the SAR was verified by flight test. In this paper, the key technologies of Ka-band SAR radar system are studied. The design scheme of radar system and key modules, the parameter of each working mode and real-time imaging algorithm are introduced. The radar weight is less than 10 Kg, and the peak power consumption is less than 100 W. It is suitable for small or light UAV. The high-resolution flight images obtained by the radar on light flight platform are displayed, and the performance of the images are analyzed. The experimental results show that the Ka-band SAR system can generate clear radar image and meets the design requirements. For example, the image resolution is better than 0.2 m and the detection distance is greater than 10 km. The rapid progress of microwave device technology represented by solid-state high power amplifier is the foundation of the success of this project. The project is a new attempt to develop Ka-band SAR and apply it to UAV. It also makes a useful exploration for the further development of Ka-band synthetic aperture radar and has important application value. The development of small Ka-band synthetic aperture radar in the future depends on the maturity of semiconductor technology and the improvement of the performance of Ka-band microwave devices. On the other hand, it also depends on the research of new style SAR which has high duty cycle and

收稿日期:2018-09-10;修回日期:2019-03-18.

基金项目:国家自然科学基金项目(61471340);国家重点研发计划项目(2017YFB0503001)。[**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.61471340; National Key Research and Development Program of China, No.2017YFB0503001.]

作者简介:张琦(1977-),男,四川绵阳人,博士,研究方向为信号与信息处理。E-mail: zhangq-7@126.com

pulse agility, which can improve the average power of radar and solve the problem of ambiguity of detection range.

Key words: UAV; SAR; Ka-band; millimeter wave; radar Image; chirp-scaling algorithm

***Corresponding author:** ZHANG Qi, E-mail: zhangq-7@126.com

摘要: 无人飞行平台具有滞空时间长、使用维护方便等优点,在军事侦查打击、国土资源普查、灾害监测等领域的应用日益广泛。合成孔径雷达是一种二维成像雷达,能够得到类似光学图片的雷达图像,具有全天候、高分辨率、宽检测范围等优点,是无人飞行平台的重要载荷之一。然而,受限于无人飞行平台相对较小的空间与负载能力,雷达载荷必须向小型、轻量以及低功耗等方面发展。Ka波段电磁波信号具有波长短、带宽大、关键微波器件的体积小等特点,适合应用于高分辨率微小型雷达载荷。2015年中国科学院电子学研究所面向中小型无人飞行平台,开展了研制的小型高分辨率Ka波段合成孔径雷达工作,并通过试飞验证了雷达性能。本文研究了Ka波段SAR雷达系统各项关键技术,介绍了雷达系统及关键模块设计方案、雷达各工作模式的参数设计和实时成像算法,展示了该雷达在轻型飞行平台上获得的高分辨率飞行图像,并对图像进行了指标分析。试验结果表明:该Ka波段雷达系统成像清晰,图像分辨率优于0.2 m,满足设计指标要求;实测雷达重量低于10 Kg,峰值功耗小于100 W,适用于轻小型无人飞行平台。

关键词: 无人飞行平台;合成孔径雷达;Ka波段;毫米波;雷达成像;线性调频变标算法

1 引言

无人飞行平台(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)是利用无线链路设备远程控制的不载人飞行平台,综合了智能控制技术、传感器技术、通信技术、信息处理技术等,是信息时代的高科技产物,以其高安全性、低成本、长航时等优点,在侦查打击、国土勘察、灾害监测等军民领域被广泛应用。合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种二维高分辨率成像雷达,利用雷达与目标的相对运动把尺寸较小的真实天线孔径用数据处理的方法合成为一个较大的等效天线孔径获取类似光学照相的雷达图像,其特点是分辨率高、宽绘制带并且能全天候工作,可以大大地提高无人飞行平台的信息获取能力,特别是战场感知能力^[1],因此合成孔径雷达正日益成为无人飞行平台的重要载荷。例如,美国研制的察打一体型捕食者(MQ-1)配备了“山猫”合成孔径雷达,在中东地区被广泛应用于反恐作战。近几年,国产无人机(如彩虹系列、翼龙系列)均将合成孔径雷达作为标配载荷,提升了无人机平台的整体作战能力。然而,合成孔径雷达通常体积功耗较大,而中小型无人飞行平台受限于较小的安装空间和较低的功率输出,限制了合成孔径雷达的应用。因此,迫切需要研制一款具备高分辨率、体积小、重量轻、低功耗等特点,适用于中小型无人飞行平台的合成孔径雷达。

毫米波泛指频率在20~300 GHz范围内的微波信号。随着微波技术的不断进步,毫米波在5G移动通信、卫星通信^[2]、雷达导引头^[3-4]、安全检查^[5]以及合

成孔径雷达等方面的应用范围日益扩大。毫米波雷达的主要优势是可用频带宽,同时应用小口径天线即可获得比更窄的天线波束以及更高的天线增益,而窄波束具有高分辨率和高抗干扰能力^[6]。由于合成孔径雷达距离向分辨率依赖于发射信号带宽、方位向分辨率依赖于天线口面的特点,可以利用上述优势以较大的带宽实现高距离向分辨率,以较小的天线口径实现较高的方位分辨率。Ka代表着K的正上方(K-above),Ka波段微波信号属于毫米波信号,其频率范围为26.5~40 GHz,也被称作30/20 GHz波段。总的来说,Ka波段SAR具有如下优势^[7-8]: ① 雷达图像分辨率高。Ka波段雷达工作频段高,一般中心频率为35 GHz,相对于Ku、X等波段的雷达,能够实现更大的系统带宽,也就能得到相对较高的SAR距离分辨率。同时,由于其较小的天线尺寸,便于实现较高的方位向分辨率。② 雷达小型化。由于Ka波段雷达信号为毫米波,雷达系统的天线、微波器件的体积也相应减小。例如实现同样增益的天线,Ka波段的的天线孔径面积只有Ku波段天线孔径面积的四分之一。因此,Ka波段SAR雷达便于实现小型化设计,更加适合在小型无人机平台应用^[9]。③ 图像效果更好。Ka波段中心频率35 GHz,其波长更短,更接近可见光波段。因此,Ka波段的SAR雷达图像细节更为清晰细腻,图像效果更好。

与其他波段SAR相比,Ka波段SAR的核心关键技术在于Ka波段射频收发技术、低功率信号收发技术以及天线技术等。射频收发技术包括高功率发射技术^[10-11]与低噪声放大技术^[12-13];低功率信号收发技术包括信号发送和接收通道的调制解调技

术^[14]与干扰抑制技术^[15];天线技术包括宽带天线技术^[16]以及高透波率宽带天线罩技术^[17]等。以往大功率Ka波段微波信号器件不成熟,技术难度大,成本高昂,而Ka波段多被应用于近距探测,如防撞雷达,交通监测等领域。2000年以来,高频率微波技术发展迅猛,砷化镓(GAAs)、氮化镓(GaN)等技术的逐渐成熟,为研制工作在Ka波段的合成孔径雷达提供了必要条件。因此,本文研究了一种小型轻量Ka波段合成孔径雷达系统,实现了10 km以上的探测距离,满足了中小型无人飞行平台的要求,在应用Ka波段微波信号进行雷达成像方面进行了有益的探索。

2 Ka波段SAR系统设计与实现

2.1 系统设计

Ka波段在电磁波频带内所处的位置如表1所示^[18]。雷达工作中心频点选择35 GHz,采用全相参脉冲工作体制。合成孔径雷达的工作原理是:在侧视条带成像条件下,雷达发射宽带线性调频信号并接收反射回波,通过脉冲压缩体制,获得距离向高分辨率分辨率;利用信号相参特性和合成孔径技术,实现方位向高分辨率。雷达具备有条带成像与聚束成像2种SAR成像方式,具体使用时可根据任务要求进行选择。

表1 常用的电磁波频带划分

Tab. 1 Frequency division of electromagnetic wave

波段符号	标称频率/GHz	波长范围/mm	波段符号	标称频率/GHz	波长范围/mm
UHF	0.30~1.12	1000.0~267.9	Ka	26.5~40.0	11.3~7.5
L	1.12~1.70	267.9~176.5	Q	30.0~50.0	10.0~6.0
LS	1.70~2.60	176.5~115.4	U	40.0~60.0	7.5~5.0
S	2.60~3.95	115.4~75.9	M	50.0~75.0	6.0~4.0
C	3.95~5.85	75.9~51.3	E	60.0~90.0	5.0~3.3
XC	5.85~8.20	51.3~36.6	F	90.0~140.0	3.3~2.1
X	8.20~12.4	36.6~24.2	G	140.0~220.0	2.1~1.4
Ku	12.4~18.0	24.2~16.7	R	220.0~325.0	1.4~0.9
K	18.0~26.5	16.7~11.3			

侧视条带成像方式适用于在一定区域范围内,侦察和监视大中型设施和目标,如机场、港口、海岸线桥梁、大型飞机、大中型舰船等。侧视条带模式分2种分辨率,高分辨率图像分辨率0.3 m,测绘带宽不小于2 km;低分辨率模式分辨率1 m,测绘带宽不小于4 km。聚束成像适用于对小区域范围的目标进行精细侦察。聚束工作模式下,天线持续照射目标,提升目标侦察图像质量。

在条带和聚束成像模式下,通过对天线波束的机械控制,可实现左右侧功能,可提高无人机系统执行任务的灵活性与效率。各模式工作状态如图1所示,性能指标如表2所示。

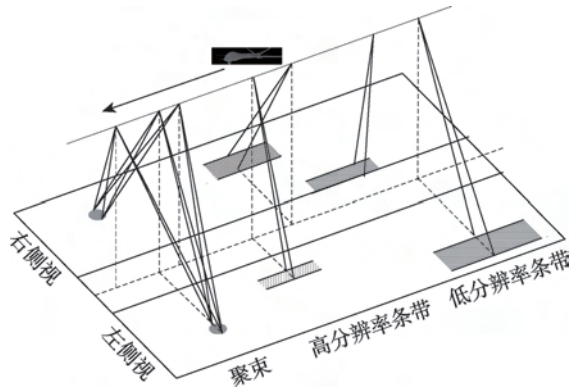


图1 合成孔径雷达工作模式示意

Fig. 1 Work for each mode of SAR

表2 合成孔径雷达各模式设计指标

Tab. 2 Performance for each mode of SAR

、	极化	分辨率/m	测绘带宽/km	距离/km	供电/V	功耗/W	重量/kg	
Ka	垂直极化	聚束	0.3	0.5×0.5	≥ 10	DC24 ~ 30	< 100	< 10
		条带	0.3	≥2	≥ 8			
			1	≥4	≥ 10			

在雷达系统中,发射功率的大小决定雷达的作用距离,进而决定了雷达对地观测范围。因此,SAR发射功率设计是系统设计中的重要环节,必须全面考虑影响发射功率以及雷达波极化方式等各种因素。极化是指电磁波在一个振荡周期内电磁矢量在空间的方向。水平极化波(H, H)和垂直极化波(V, V)在地物或海洋上的后向散射系数 σ_0 和相位特性均不相同。结果表明,低擦地角条件下,VV极化通常可以获得更高的RCS^[19],因此本

系统采用VV极化方式。对于正侧视SAR,雷达方程为^[20]:

$$SNR_{\text{image}} = \frac{P_{av} G^2 \lambda^3 \sigma_0 \rho_s / \sin \gamma}{2(4\pi)^3 R^3 k T_0 F_n L_{sp} L_{a_w} v_a} \quad (1)$$

式中: P_{av} 为雷达系统中平均发射功率; G 为天线增益; λ 为信号波长; ρ_s 为斜距分辨率; L 为信号损失。相比于Ku、X等其他波段电磁波,Ka波段电磁波的传输损失最大,如表3所示。在本系统中,雷达各模式的最小平均功率 P_{av} 如表4所示。

表3 不同波段信号的大气衰减比较^[21]

Tab. 3 Pass attenuation rate of signal Transmission in different wavelength

	X波段		Ka波段		W波段	
	晴天低空	中雨/(4 mm/h)	晴天低空	中雨/(4 mm/h)	晴天低空	中雨/(4 mm/h)
衰减/(dB/km)	0.02	0.30	0.24	1.00	0.80	3.00

表4 合成孔径雷达各模式功率需求

Tab.4 Power Requirement for each mode of SAR

工作模式	分辨率/m	Rmax/km	P_{av} /W
高分辨率条带	0.3	6	1.6
低分辨率条带	1.0	10	2
聚束模式	0.3	10	3

本系统采用的固态发射机峰值功率为20 W,峰值功率较小,但固态发射机相比传统行波管发射机,其优点在于发射占空比可达20 %以上,因此在发射峰值功率受限制的情况下,采用增大发射脉冲占空比来提高系统平均发射功率,满足作用距离的要求。

2.2 系统实现

SAR系统主要由3部分组成:处理单元、收发单元、发射单元,如图2所示。雷达发射时,雷达将射频激励信号发送至固态发射机进行功率放大;雷达接收时,天线接收目标反射的回波信号经过低噪声放大,并传输给接收机。接收机进一步将信号变换为视频信号,经高速模数转换模块采集后,将得到的数字信号送至处理模块完成成像处理。

处理单元由系统监控模块、高速信号采集模块、高速信号处理模块以及记录模块等组成,主要完成对雷达的完整在线监测与控制、回波信号的数字采集,根据天线姿态与位置信息进行实时运动补偿,对平

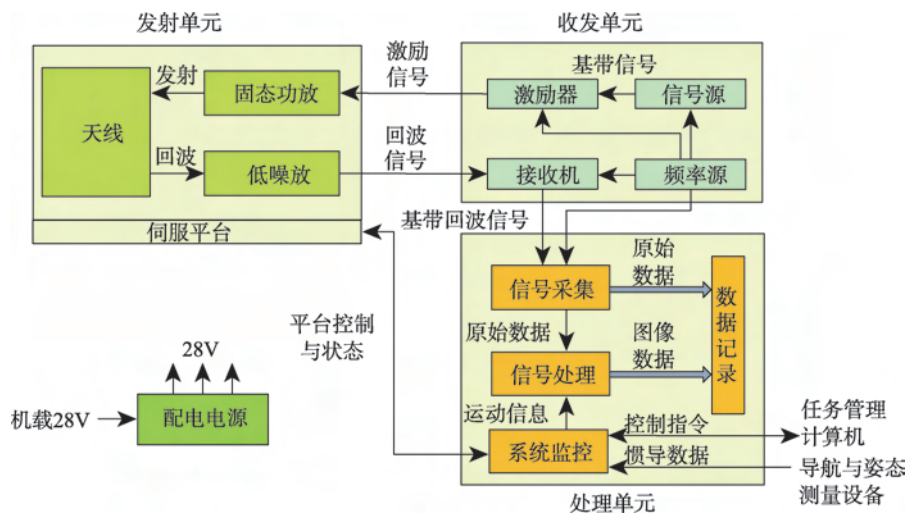


图2 合成孔径雷达组成

Fig. 2 Overview of SAR

台的姿态角度进行稳定控制,实现高分辨率实时图像生成等处理工作,同时记录原始回波和图像数据。

收发单元由本振单元、发送通道和接收通道组成。由于从 35 GHz 到基带信号的频率跨度过大,因此采用两级变频的方法实现信号的调制解调,设计中需要着重考虑两级调制解调的频点选择,避开各级混频产生的谐波与交调信号位于信号带宽之内。其中,发射通道的激励器由基带信号源和上变频组件组成。基带信号源根据不同的工作模式产生互相正交的 I、Q 两路线性调频信号,由上变频组件进行正交调制和两次上变频至 Ka 波段,最终输出中心频率 35 GHz 的宽带线性调频信号提供给功放,再由功放进行高功率放大;接收机完成对回波信号的两级下变频和正交解调,并完成视频频段的滤波和放大,将信号提供给处理单元信号采集模块。频率源产生系统所需的基准信号、时钟信号和上下变频本振信号。收发单元的实现原理如图 3、图 4 所示。

发射单元由固态发射机、低噪声放大器和抛物面天线以及伺服平台组成,用于发射雷达探测信号和接收目标的反射信号。使用 GaN 技术的固态发射机,具有输出功率高、工作电压低、响应速度快、

体积小重量轻以及易于维护等优点。低噪放大器采用较为成熟的 GaAs PHEMT 技术,同时特殊设计了波导转微带接口,有效降低了插入损耗,及系统噪声系数。相对于微带天线和波导缝隙天线,抛物面天线虽然比较占用空间,但因其具有发射频率高,信号带宽宽,天线增益大、成本低等优点,被大量应用于雷达系统。尤其在 Ka 波段的雷达系统中,由于其较短的波长,更有利于以小尺寸天线阵面获得较高的方位分辨率,如表 5 所示^[23]。雷达天线罩采用石英玻璃纤维为基本材质,雷达波双程最大损耗小于 1 db。伺服平台用于实现 SAR 天线的波束指向稳定,隔离由于大气紊流造成飞机颠簸对天线波束指向的影响。

2.3 雷达控制和成像

雷达的工作方式为通过无线链路地面遥控,并接收实时图像,如图 5 所示。地面控制接收系统将指令通途地面遥测系统上传至机载无线链路,链路转发命令到雷达,雷达根据收到的指令进行工作,并下传雷达工作状态等实时信息供地面监测。同时,雷达生成的 SAR 图像经压缩后通过无线链路下传至地面遥测遥控系统,最终由地面控制系统接收并显示。飞行任务结束后,地面回放与图像处理设

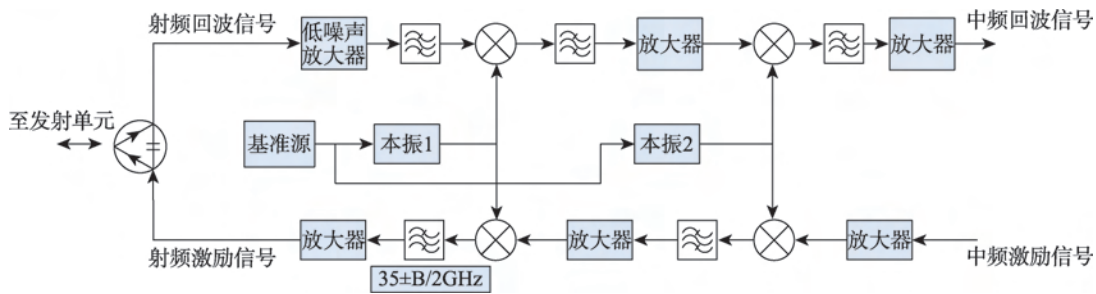


图 3 Ka波段收发单元内 Ka波段模块设计

Fig.3 Design of Ka-band module in transceiver unit with Ka band

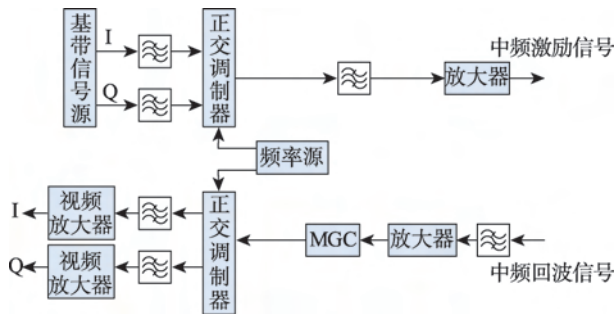


图 4 Ka波段收发单元中频模块设计

Fig. 4 Design of IF band module in transceiver unit with Ka band

表 5 典型频段天线尺寸与理论方位向分辨率对比^[22]

Tab. 5 Cross-range resolution and the diameter of antenna in typical frequency bands

频段范围/GHz	天线口径/mm	方位向分辨率/m
10	3046	2.132
10.67	1827	1.279
35	870	0.609
94	324	0.227
140	218	0.152
220	138	0.097

注:波束宽度 0.5°,展宽因子 1.4。

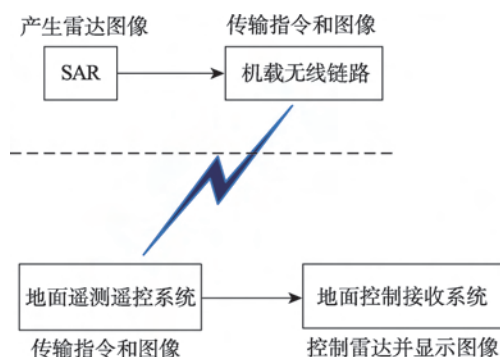


图5 地面对无人飞行平台合成孔径雷达的遥控遥测

Fig. 5 Ground control of SAR in UAV

备可以将机上记录器记录的雷达原始回波数据进行快速回放与精细成像处理。

SAR成像通常采用距离-多普勒(Range-Doppler, RD)和线性调频变标(Chirp-Scaling, CS)算法。本系统采用CS算法,其优点在于以较小的运算量获得较高的距离徙动校正精度,适合机上实时成像处理,同时解决了二次距离压缩(SRC)对方位频率的依赖问题。雷达图像处理的基本处理流程如图6所示。

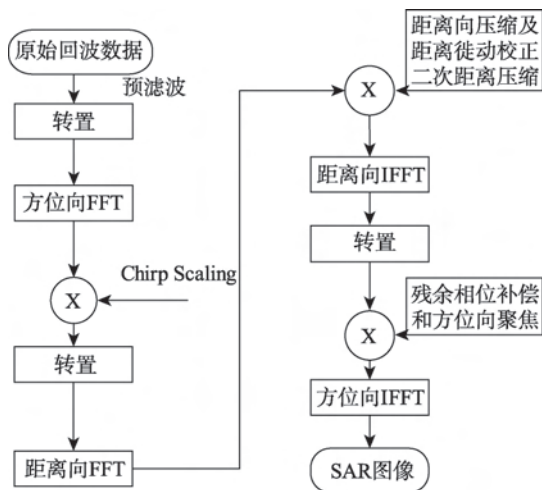


图6 合成孔径雷达实时图像处理流程

Fig. 6 Process of Image in SAR

3 实验结果分析

Ka波段合成孔径雷达系统最大平均功耗小于100 W,总重量小于10 kg,如表6所示。尤其是天线和功放单元的体积小,重量轻,便于安装在轻型飞行平台上。该系统以三角翼轻型飞行器为平台进行了各工作模式的飞行验证工作。经对所获得图像进行指标分析,各指标均达到或优于设计值,如

表6 Ka波段合成孔径雷达系统完成情况

Tab. 6 Completion of Ka band SAR

	外形(长×宽×高)/mm	重量/kg	功耗/W
天线	300×150×20	0.5	
功放单元	150×150×100	1.5	16
收发单元	300×250×250	5.2	35
处理单元	250×250×110	2.3	47
系统	-	9.5	98

表7所示。图7是以高分辨率图像为例进行飞行验证试验得到的图像以及局部放大图。雷达与图像中心位置距离大于8 km,图像幅宽大于4 km。提取图7中圆圈标出的点目标,分别对其距离和方位分辨率进行分析,得到实际的SAR图像分辨率等于或优于0.2 m,如图8所示。

表7 Ka波段合成孔径雷达系统飞行试验达到的性能指标

Tab. 7 Performance of Ka band SAR when flying test

工作模式	飞行时作用距离/km	测绘带宽/km	图像分辨率/m
高分辨率条带	8	>4	<0.2
低分辨率条带	12	>6	<0.5
聚束	10	0.5×1.5 (方位×距离)	<0.2

4 结语

本文探讨了毫米波段合成孔径雷达应用于无人飞行平台的技术优势,研究了Ka波段合成孔径雷达系统各项关键技术,设计并实现了一种面向无人飞行平台的小型低功耗Ka波段合成孔径雷达,在实际飞行中获取了高分辨率图像,并对图像指标进行了分析。本文取得的主要成果如下:

(1)根据研制需求,设计了Ka波段合成孔径雷达的整体方案;

(2)采用二次变频技术解决了毫米波段信号调制解调的问题;

(3)利用新工艺的固态发射机,使用高占空比工作模式解决了低峰值功耗要求与远探测距离指标之间的矛盾;

(4)进行飞行验证试验,测试了雷达性能各方面的性能指标。测试结果证明,该系统具有分辨率高、体积小、重量轻等特点,适用于中小型无人飞行平台。

合成孔径雷达作为无人飞行平台重要载荷,可以充分发挥合成孔径雷达全天候、宽探测范围、高

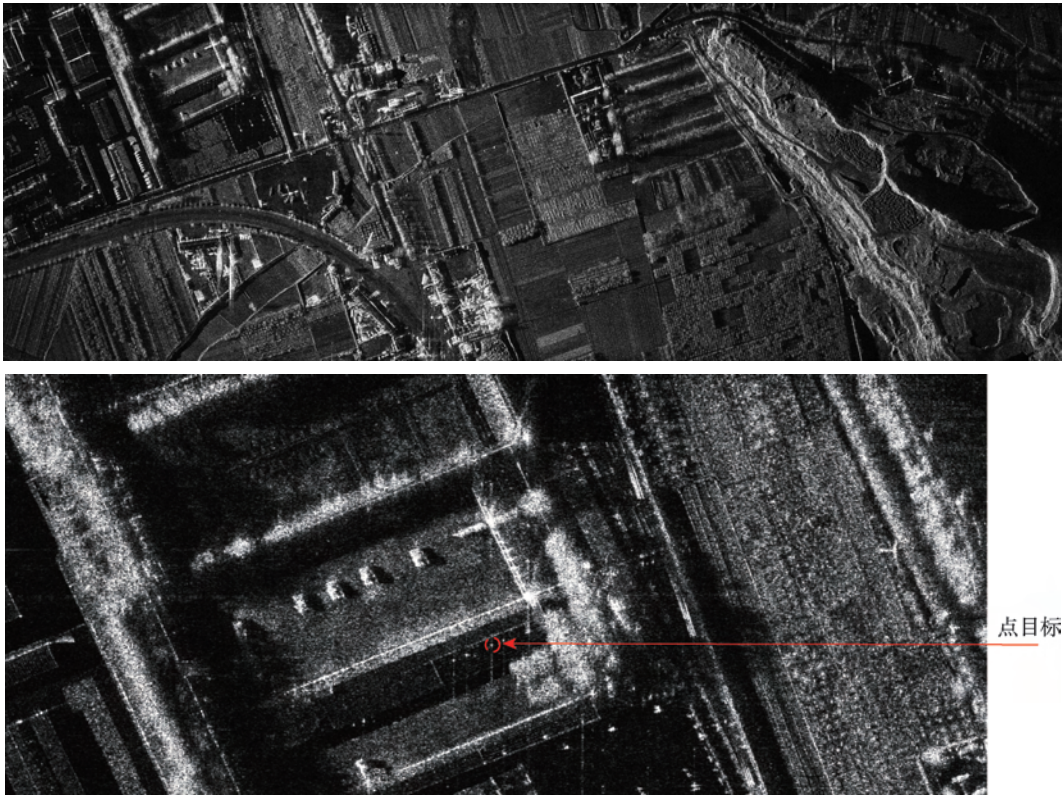


图7 飞行成像试验得到的高分辨率图像及局部细节
Fig.7 The high resolution image and its detail show

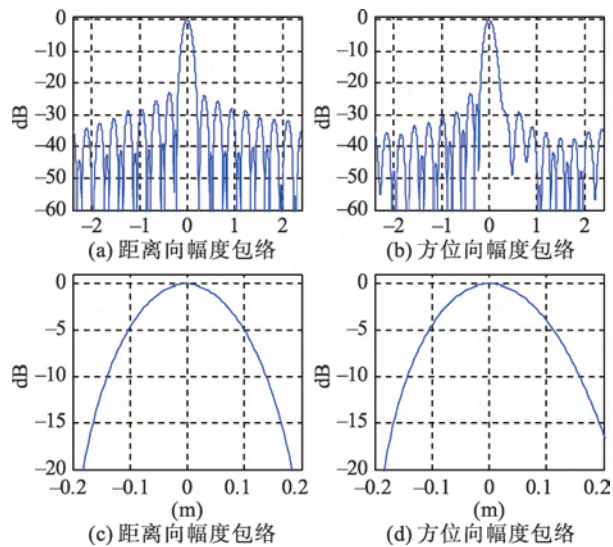


图8 Ka波段合成孔径雷达高分辨率图像内
点目标距离向和方位向的分辨率
Fig. 8 Range and azimuth resolutions of point
target in high resolution image of Ka band SAR

分辨率以及远作用距离等优势,拓展无人飞行平台的应用领域,提升无人飞行平台的应用价值。Ka波段合成孔径雷达因其高分辨率和便于实现小型化

设计,是机载合成孔径雷达的重要发展方向之一。开展该项目研究,在SAR领域是一个新的尝试,为Ka波段合成孔径雷达的进一步发展做了有益的探索,具有重要的应用价值。然而,相比于较为成熟的X、Ku波段,目前Ka波段微波器件的性能和成本依然有大改善的空间。例如,Ka波段高功率固态功放的成本到达万元/瓦特,代价高昂。未来Ka波段合成孔径雷达的进一步发展,一方面依赖于半导体技术的不断成熟,Ka波段微波器件性能得到提升;另一方面也取决于新体制高占空比脉冲捷变雷达的研究,在提高雷达平均功率的同时,解决探测距离模糊的问题。

参考文献(References):

[1] 鲁健彬. Ka波段连续波多普勒雷达总体设计[D].南京:南京信息科技大学,2011. [Lu J B. The overall design of Ka-band continous doppler radar[D]. Nanjing: Nanjing university of science and technology, 2011.]
[2] 谢丰弈.蓬勃发展中的Ka波段宽带卫星通信[J].卫视传媒,2010,25(20):16-17.[Xie F Y. Booming satellite communication based on Ka-band[J]. Satellite TV and IP Multimedia, 2010,25(20):16-17.]

- [3] 王志诚, 高峰. Ku波段与Ka波段主动雷达导引头之比较[J]. 制导与引信, 2011, 32(2): 11-12. [Wang Z C, Gao F. The Comparison between Ku band active radar seeker and Ka-band active radar seeker[J]. Guidance and Fuze, 2011, 32(2): 11-12.]
- [4] 李道京, 张麟兮, 俞卞章. 主动雷达成像导引头几个问题的研究[J]. 现代雷达, 2003, 20(5): 12-13. [Li D J, Zhang L X, Yu B Z. Research on active radar imaging seeker[J]. Modern Radar, 2003, 20(5): 12-15.]
- [5] 许杰, 关福宏, 杨明辉, 等. 用于安检应用的Ka波段毫米波成像平台研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2009(S1): 150-151. [Xu J, Guan F M, Yang M H, et al. Research on the Ka-band millimeter wave imaging platform for security check application[J]. Journal of Electronic Measurement and Information, 2009 (S1): 150-151.]
- [6] 同武勤, 凌永顺, 蒋金水, 等. 军用毫米波雷达的应用及其发展趋势[J]. 飞航导弹, 2004, 12(5): 48. [Tong W Q, Ling Y S, Jiang J S, et al. Application and development trend of military millimeter wave radar[J]. Cruise Missile, 2004, 12(5): 48.]
- [7] Cumming I G, Wong F H. Digital processing of synthetic aperture radar data[M]. Boston: Artech House, 2005
- [8] 夏宏亮. Ka波段功率放大器研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008. [Xia H L. Research on Ka-band power amplifier [D]. Chengdu: Master degree thesis of university of electronic science, 2008.]
- [9] 廖小罕, 周成虎, 苏奋振, 等. 无人机遥感众创时代[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(11): 1439-1447. [Liao X H, Zhou C H, Su F Z, et al. 2016. The mass innovation era of UAV remote sensing[J]. Journal of Geo-information Science, 2016, 18(11): 1439-1447.]
- [10] 刘志红, 武华锋, 李兵. Ka波段高效紧凑型功率放大器设计[J]. 火控雷达技术, 2013, 42(2): 59-60. [Liu Z H, Wu H F, Li B. Design of a Ka-band high efficiency compact power amplifier[J]. Fire Control Radar Technology, 2013, 42(2): 59-60.]
- [11] 刘晓莉, 郝金中. Ka多通道发射组件的设计[J]. 舰船电子对抗, 2015, 38(3): 99-100. [Liu X L, Hao J Z. Design of Ka-band multi-channel transmitting module[J]. Ship-board Electronic Countermeasure, 2015, 38(3): 99-100.]
- [12] 郭桂美, 邓磊, 唐高弟. Ka波段低噪声放大器的研制[J]. 信息与电子工程, 2008, 6(4): 245. [Guo G M, Deng L, Tang G D. Design of Ka-band low noise amplifier[J]. Information and Electronic Engineering, 2008, 6(4): 245.]
- [13] 沈天宇. 硅基毫米波Ka波段全RF相控阵接收前端芯片的研究与设计[D]. 上海: 华东师范大学, 2017: 19-21. [Shen T Y Research and design of silicon-based millimeter wave Ka-band full-RF phased-array receiver front-end [D]. Shanghai: Master Degree Thesis of East China Normal University, 2017: 19-21.]
- [14] 吴小帅, 王贵德, 马占刚. Ka波段一体化收发信机设计[J]. 电子科技, 2013, 26(5): 84-86. [Wu X S, Wang G D, Ma Z G. Integration of the Ka-band transceiver[J]. Electronic Science and Technology, 2013, 26(5): 84-86.]
- [15] 薛小乾. Ka波段雷达收发系统电磁兼容性分析与干扰抑制技术[J]. 火控雷达技术, 2002, 31(3): 10-13. [Xue X Q. Electromagnetic compatibility analysis and interference suppression techniques of Ka-band radar transceiver [J]. Fire Control Radar Technology, 2002, 31(3): 10-13.]
- [16] 夏步刚, 张德海, 赵鑫, 等. 基于石英晶片镀膜工艺的Ka波段天线副反射面设计与实现[J]. 物理学报, 2013, 63(20): 204130-1. [Xia B G, Zhang D H, Zhao X, et al. Design and implementation of sub-reflector for Ka-band antenna based on quartz wafer coating technology[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 63(20): 204130-1.]
- [17] 王琦, 王毅凡. Ka波段通信卫星发展应用现状[J]. 卫星与网络, 2010, 30(8): 20. [Wang Qi, Wang Y F. Development and application status of Ka-band Communication Satellite[J]. Satellite and Network, 2010, 30(8): 20.]
- [18] 唐亮, 王贵军, 孙宝华. Ku~Ka波段地面雷达天线罩应用展望及设计要点[J]. 纤维复合材料, 2008, 9(3): 11-14. [Tang L, Wang G J, Sun B H. Application perspective and design factor of Ku~Ka band ground radome[J]. Fiber Composites, 2008, 9(3): 11-14.]
- [19] Cumming Ian G, Wong Frank H. Digital processing of synthetic aperture radar data algorithms and implementation[M]. Boston: Artech House, Inc. 2005.
- [20] 胡云. 均匀平面电磁波极化的应用研究[J]. 大学物理, 2012, 31(12): 40. [Hu Y. Study on the application of uniform plane electromagnetic wave polarization[J]. College Physics, 2012, 31(12): 40.]
- [21] 苏宏艳, 朱淮城. 毫米波精确制导技术及其发展趋势[J]. 制导与引信, 2008, 29(2): 1-2. [Su H Y, Zhu H C. The technology and development trend of millimeter wave precision guidance[J]. Guidance and Fuze, 2008, 29(2): 1-2.]
- [22] 张国强, 王洁. 一种Ka波段微带-波导转换的设计[J]. 火控雷达技术, 2014, 43(2): 82-85. [Zhang G Q, Wang J. Design of a Ka-band microstrip-waveguide converting structure[J]. Control Radar Technology, 2014, 43(2): 82-85.]
- [23] 林华. 无人机载太赫兹合成孔径雷达成像分析与仿真[J]. 信息与电子工程, 2010, 8(4): 374. [Lin H. Analysis and simulation of UAV terahertz wave synthetic aperture radar imaging[J]. Information and Electronic Engineering, 2010, 8(4): 374.]