

无人机载单比特 NanoSAR 系统

王伟^{1,2}, 龙天尧^{1,2}, 黄磊^{1,2}

(1. 深圳大学电子与信息工程学院, 广东深圳 518060; 2. 射频频质异构集成全国重点实验室, 广东深圳 518060)

摘要: 本研究旨在开发一种基于调频连续波的无人机载单比特微型合成孔径雷达 (NanoSAR) 系统。该系统具有微型化和低功耗等优势,能够在低空遥感作业中快速获取高分辨率图像。在保持成像质量的前提下,为了降低系统功耗,本文对单比特成像技术进行研究,通过一位量化减少数据量,并结合频谱偏移技术有效抑制高次谐波对成像质量的影响。我们将 NanoSAR 系统搭载于中小型无人机进行数据采集,采用基于距离徙动校准的距离多普勒算法对回波数据进行成像处理,并对单比特数据的 SAR 成像效果进行了验证。

关键词: 调频连续波; 微型合成孔径雷达; 单比特量化; 雷达信号处理

中图分类号: TN958

文献标志码: A

文章编号: 1672-2337(2025)01-0032-07

引用格式: 王伟, 龙天尧, 黄磊. 无人机载单比特 NanoSAR 系统[J]. 雷达科学与技术, 2025, 23(1): 32-38.

WANG Wei, LONG Tianyao, HUANG Lei. UAV-Mounted 1-bit Nano Synthetic Aperture Radar System [J]. Radar Science and Technology, 2025, 23(1): 32-38.

UAV-Mounted 1-bit Nano Synthetic Aperture Radar System

WANG Wei^{1,2}, LONG Tianyao^{1,2}, HUANG Lei^{1,2}

(1. College of Electronics and Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

2. State Key Laboratory of Radio Frequency Heterogeneous Integration, Shenzhen 518060, China)

Abstract: This study aims to develop a UAV-mounted 1-bit nano synthetic aperture radar (NanoSAR) system based on frequency-modulated continuous wave (FMCW) technology. The system offers advantages such as miniaturization and low power consumption, enabling rapid acquisition of high-resolution images in low-altitude remote sensing operations. To reduce system power consumption while maintaining the image quality, 1-bit imaging technology is explored by applying 1-bit quantization to reduce data volume and employing spectral shifting techniques to effectively suppress the influence of higher-order harmonics on image quality. The NanoSAR system is mounted on a small-to-medium-sized UAV for data collection, and the range-Doppler algorithm, calibrated for range migration, is applied to process the echo data. The SAR imaging performance of 1-bit data is validated, and the system demonstrates a resolution capability of 0.1 m.

Key words: FMCW; NanoSAR; 1-bit quantization; radar signal processing

0 引言

合成孔径雷达(SAR)^[1]因其具备全天候、全天时的工作能力以及分辨率优势,被广泛应用于战场侦察和地理测绘。星载^[2]和机载^[3]SAR凭借远程探测和大带宽的特点,成为高效的战略侦察和地球测绘工具。然而,星载和机载SAR的调度过程较为复杂,无法应对快速变化的战场环境或灾害救援。

近年来,随着国家对低空经济的积极推动,无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)行业得到了迅速发展。如图1所示,将微型SAR(NanoSAR)^[4-5]系统搭载于中小型无人机上能够充分发挥它们各自的优势。无人机载 NanoSAR 通常用于低空遥感作业,能够快速便捷地获取高分辨率 SAR 图像,其便利性和灵活性远超传统的星载和机载 SAR 系统^[6]。

传统 SAR 系统基于高精度 ADC 采样,具有数

据量大、功耗高的缺点。我们利用频移单比特成像算法进行 SAR 成像,在保持成像质量的同时,大大降低了数据量,简化了 SAR 系统的软硬件资源,使得本文设计 NanoSAR 系统的重量更小、功耗更低。

1 频移单比特成像

对于距离雷达为 R_t 的目标,调频连续波(FM-CW)的接收回波可建模为

$$s(t_r) = \sigma \text{rect}\left(\frac{t_r - \tau}{T_p}\right) \exp[j2\pi f_c(t_r - \tau)] \times \exp[j\pi K_r(t_r - \tau)^2] \quad (1)$$

式中: T_p , f_c 和 K_r 分别是所发射信号的脉冲宽度、载波频率和调频斜率; σ 和 τ 分别表示散射体的散射系数和时间延迟; t_r 表示快时间;目标的回波延迟 $\tau = 2R_t/c$ 。接收机中的参考信号为

$$s_{\text{ref}}(t_r) = \text{rect}\left(\frac{t_r}{T_p}\right) \exp[j(2\pi f_c t_r + \pi K_r t_r^2)] \quad (2)$$

通过对 $s(t_r)$ 与 $s_{\text{ref}}(t_r)$ 混频处理可以得到中频信号:

$$s_{\text{if}}(t_r) = s(t_r) \cdot s_{\text{ref}}^*(t_r) = \sigma \text{rect}\left(\frac{t_r - 2R_t/c}{T_p}\right) \times \exp(-j\frac{4\pi K_r R_t}{c} t_r) \times \exp(-j\frac{4\pi f_c R_t}{c} t_r) \exp(j\frac{4\pi K_r R_t^2}{c^2}) = \sigma \text{rect}\left(\frac{t_r - 2R_t/c}{T_p}\right) \times \exp(j\varphi) \quad (3)$$

其中 φ 表示相位项:

$$\varphi = -\frac{4\pi R_t}{c} (K_r t_r + f_c - \frac{K_r R_t}{c}) \quad (4)$$

根据文献[7],对中频信号 $s_{\text{if}}(t_r)$ 进行单比特量化:

$$s_1(t_r) = \text{sign}[s_{\text{if}}(t_r)] = \text{sign}(\sigma \cos \varphi) + j \cdot \text{sign}(\sigma \sin \varphi) = \frac{j}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(j\xi \sigma \cos \varphi)}{\xi} d\xi - \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(j\xi \sigma \sin \varphi)}{\xi} d\xi \quad (5)$$

式中, $\text{sign}(\cdot)$ 表示取数据符号的符号函数。单比特量化导致数据的实部在 1 和 -1 之间变化,虚部在 j

和 $-j$ 之间变化,从而产生高阶谐波分量。式(5)可以进一步表示为

$$s_1(t_r) = \frac{1}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m A_m \times \left\{ (-j)^m \cos\left[m\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right)\right] - j^{m+1} \cos(m\varphi) \right\} \quad (6)$$

式中, $A_m = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{J_m(\sigma\xi)}{\xi} d\xi$ 表示 m 阶谐波的幅值, $J_m(\cdot)$ 为 m 阶贝塞尔函数,其中 $m \neq 0$ 时 $\varepsilon_0 = 1$, $\varepsilon_m = 2$ 。当 m 为偶数时 $A_m = 0$,式(6)可重建模为

$$s_1(t_r) = \sum_{m=1}^{\infty} \varepsilon_m A_m (-1)^{\frac{m+3}{2}} \times \exp\left(j(-1)^{\frac{m+3}{2}} m\varphi\right) \quad (7)$$

单比特量化信号由原信号的奇次谐波组成。

一般来说,在许多应用中,三次谐波和五次谐波的能量较大,是不可忽略的。为此,可使用频谱搬移的方法将三次和五次谐波推到更高的频段,保留有效频率信息。定义基带范围为 $0 \sim f_{\text{max}}$, 采样率为 f_s 。从上述分析中可以看出中频信号的基带频率范围为 $0 \sim f_{\text{max}}$, 五次谐波的频率范围为 $0 \sim 5f_{\text{max}}$, 三次谐波的频率范围为 $0 \sim 3f_{\text{max}}$ 。五次谐波的频带与原始频带重叠,会对 SAR 成像造成影响。因此,我们考虑添加一个固定的频偏 f_{Δ} , 使用该频偏对中频信号进行调制,最后再进行单比特采样。这个过程可以表示为

$$s_1(t_r) = \text{sign}[s(t_r) \cdot s_{\text{ref}}^*(t_r) \cdot \exp(j2\pi f_{\Delta} t_r)] \quad (8)$$

增加采样率以确保采样带宽足够宽就能将三次和五次谐波的频谱移动到远离基带的位置。考虑到混叠的情况,频率偏移和采样率应满足以下条件:

$$\begin{cases} 5f_{\Delta} \geq f_{\Delta} + f_{\text{max}} \\ 5(f_{\Delta} + f_{\text{max}}) - \frac{f_s}{2} \leq f_{\Delta} + \frac{f_s}{2} \end{cases} \quad (9)$$

在随后的信号处理中,丢弃 $0 \sim f_{\Delta}$ 的带宽,保留 $f_{\Delta} \sim f_{\Delta} + f_{\text{max}}$ 的带宽。如上所述,适当的参数设置使我们能够保留单比特量化的优势的同时,抑制单比特量化带来的谐波对成像的影响。

无人机载 SAR 成像的几何关系如图 1 所示,无人机平台在距离地面高度为 H 的空中,以速度 v 沿规划的航线飞行,进行侧视成像。

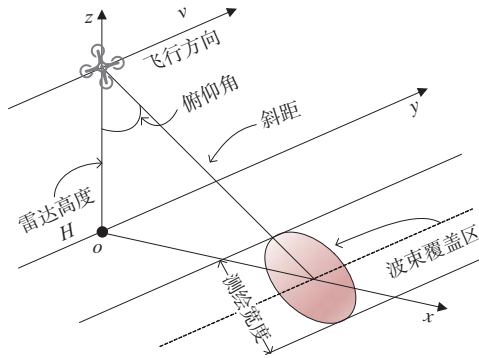


图1 无人机载SAR成像几何示意图

2 单比特 NanoSAR 总体设计方案

2.1 设计指标

单比特 NanoSAR 是一款专门为中小型无人机设计的雷达系统,其核心技术参数详见表 1。该雷达采用 FMCW 体制,工作频段位于 Ka 波段,中心频率为 35 GHz。选择该频段是为了减小射频相关硬件的尺寸和重量,同时更容易提升雷达的带宽,从而增强雷达的距离分辨能力。这款雷达样机支持最高达 2 GHz 的射频带宽,距离分辨率能够达到 7.5 cm。此外,该雷达通过 FPGA 和 DAC 生成基带线性调频信号,使其能够根据使用场景和预设无人机的飞行速度,灵活调整调频斜率和脉冲重复频率等雷达参数。

表 1 雷达样机主要设计指标

名称	数值
雷达体制	LFMCW
中心频率	35 GHz
带宽	2 GHz(可调)
分辨率	7.5 cm
探测距离	500~1 000 m
重量	1.85 kg
无人机飞行高度	120~500 m

2.2 硬件组成

NanoSAR 系统的硬件结构如图 2 和图 3 所示,主要包括数字板、射频板、电源板、收发天线以及惯性导航设备(惯导)。整个系统的结构支撑材料为碳纤维和铝合金,兼顾了轻量化和强度。

数字板是系统的核心控制单元,负责与地面控制设备通信,接收地面发出的指令并回传雷达

的工作状态信息。同时,数字板还负责生成基带信号、采集中频回波信号、数据打包、存储以及传输等功能。

射频板的功能包括为雷达系统提供工作时钟,将数字板输出的基带信号上变频至 Ka 波段,经过滤波和放大后传输至发射天线。此外,射频板负责将天线接收的回波信号与发射端的信号进行混频和滤波,生成中频信号并输出给数字板进行处理。

SAR 成像理想情况下要求平台进行匀速直线运动,但在实际应用中,无人机平台的运动往往存在不稳定性,主要表现为运动速度和欧拉角的变化。这种不稳定性会对 SAR 成像产生干扰,导致图像失真。为此,该雷达样机配备了具备实时动态测量(Real Time Kinematic, RTK)定位功能的惯导模组,可以提供厘米级的定位精度和精确的角度变化信息,为成像算法中的运动补偿步骤提供了数据支持。

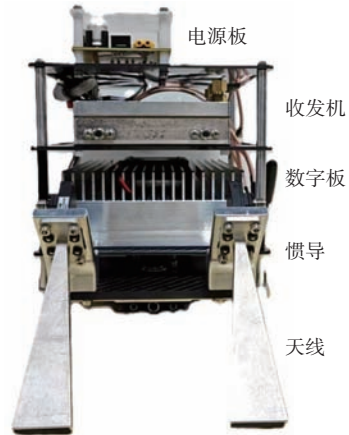


图2 雷达系统实物照片

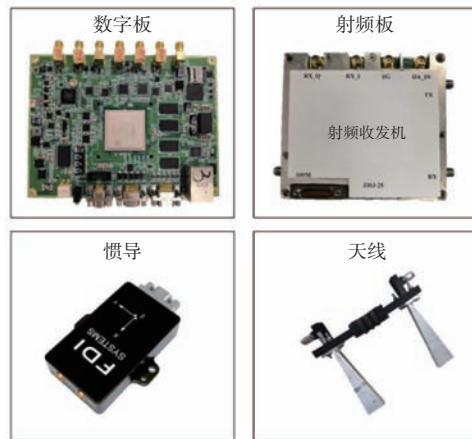


图3 雷达系统的主要硬件构成

雷达样机的重量和功耗分配如表2所示,雷达样机包括机械结构在内的总体重量约1 850 g,雷达开启探测时功耗达到峰值,峰值功耗约60 W,雷达系统使用无人机提供电源,不需要额外的储能单元。

表2 雷达样机的重量和功耗

名称	描述	重量	功耗
数字电路板 (含散热外壳)	生成、采集、存储、 传输基带信号	750 g	46 W
射频收发机 (含散热外壳)	发射和接收 射频信号	450 g	12 W
收发天线	两个喇叭天线	180 g	
电压转换板	输入 12~48 V, 输出 12 V 和 5 V	100 g	2 W
雷达吊舱框架	固定其他组件的 碳纤维板和铝合金	370 g	

2.3 硬件接口

雷达样机的硬件接口方案如图4所示。数字板作为雷达系统的控制和数据处理中枢,通过多种接口与其他组件进行通信。具体来说,数字板与射频板之间通过SMA接口传输时钟和雷达模拟信号,通过J30J-25接口控制收发增益。此外,射频板通过2.92 mm接口与收发天线相连。

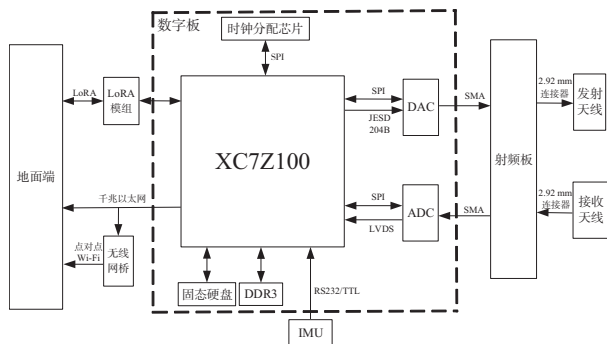


图4 硬件接口方案示意图

数字板通过LoRA与地面控制设备传输控制命令和工作状态信息,通过千兆以太网或无线网桥传输雷达数据。此外,数字板通过RS232/TTL接口与惯导通信,通过M2接口与板载固态硬盘通信。

在数字板内部,时钟芯片、DAC芯片以及ADC芯片均通过SPI接口进行寄存器配置。FPGA通过JESD204B接口向DAC传输雷达基带信号,通过LVDS接口接收ADC采集的中频信号。

3 雷达系统设计

3.1 数字板

数字板的设计示意图如图5所示,数字板的主控芯片是XC7Z100系列SoC,该SoC由FPGA(称为PL)以及ARM子系统(称为PS)组成,该ARM子系统的核心是Cortex A9处理器。FPGA部分控制时钟分配芯片、DAC、ADC、DDR3、固态硬盘以及IMU等外设并进行数据传输。Cortex A9处理器负责解析来自上位机的控制指令、传输雷达数据以及控制雷达系统的工作参数与功能开关。

在雷达开始采集数据之前,地面端通过LoRA向数字板发送一系列配置参数和初始化指令。数字板上的处理器(PS)接收到这些指令后,会将其解析并传递给FPGA执行。为了优化能耗管理,数字板中一些功耗较高的芯片默认处于断电状态,FPGA根据使用需求动态控制电源管理芯片,对这些芯片进行上电和断电,并保证上电时序。

雷达开启探测时,其发射端的工作流程如下:首先,数字板上的FPGA根据预设的调频斜率、起始频率和脉冲重复频率等参数,利用多路并行DDS生成带宽为500 MHz、等效采样率为2 GS/s的LFMCW数字信号。

FPGA产生的基带数字信号通过JESD204B接口传输至DAC。在DAC内部,基带信号进行上采样,并根据设定的参数进行数字IQ调制,将信号调制至2.5~3 GHz频段。经过滤波和DA转换后,信号被输出至射频板。

雷达接收端的工作流程如下:ADC负责采集来自射频板的中频信号,并将采样数据传输至FPGA。FPGA将这些采样数据与惯导数据及雷达工作参数结合,构建完整的雷达数据包,并将其临时缓存在DDR3内存中。同时,FPGA构建NVMe的提交队列(Submission Queue, SQ)请求,并通过门铃寄存器(Doorbell Register, DB)通知固态硬盘从DDR3中读取雷达数据包进行存储。在存储过程中,雷达会将起始扇区和结束扇区的信息回传至地面端,以便后续读取。

当进行雷达数据回传时,地面端首先依据记录中的扇区地址范围,通知雷达回传指定扇区范围的数据。数字板中的PS接收到数据回传指令

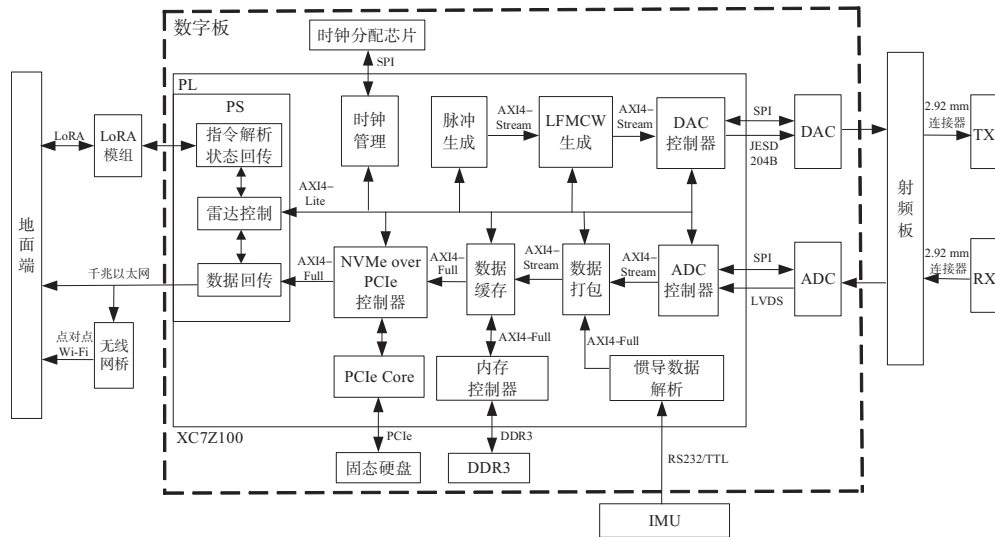


图5 数字板的设计示意图

后,会尝试通过有线或无线链路与地面端建立TCP连接。TCP连接建立成功后,PS指示FPGA从固态硬盘中读取雷达数据包并缓存在DDR3中,并响应来自FPGA的中断请求将这些数据包回传给地面端。地面端的数据处理软件则基于雷达数据包中记录的雷达参数、采样数据以及无人机平台的运动信息进行成像处理,生成SAR图像。

3.2 射频频板

射频频板的设计示意图如图6所示,该射频频板支持输入雷达基带信号的频率范围为2.5~3 GHz。其发射功率大于18 dBm,接收增益约50 dB。

与传统的FMCW架构的收发机不同,该射频频板内部使用两路本振信号同时与数字板中DAC输出的信号进行混频,混频的结果其中一路用于发射,另一路用于与接收端进行混频,从而实现将中频信号的起始频率从零频移动至5 MHz或15 MHz,这有利于在进行单比特采样时减少三次和五次谐波分量的干扰。

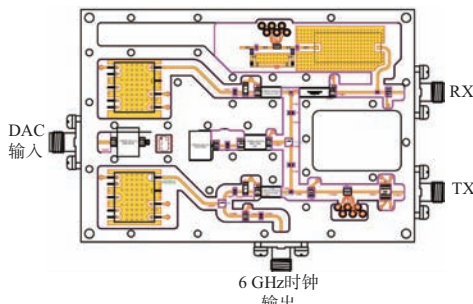


图6 射频频板的设计示意图

4 雷达系统测试

4.1 发射和接收测试

使用KEYSIGHT公司N9040B频谱分析仪对雷达样机的收发性能进行测试。图7展示了射频频板发射端的测试结果,测试中使用的发射带宽是1.8 GHz,测量结果表明发射信号的频率范围是34.1~35.9 GHz,发射功率大于18 dBm,通带的频谱平坦度较好,峰值旁瓣比大于23 dB。图8展示了射频频板输出的中频信号频谱,该频谱的通带范围是5~16 MHz,带宽约11 MHz。

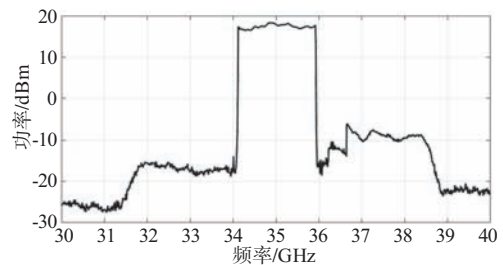


图7 发射功率和带宽测试

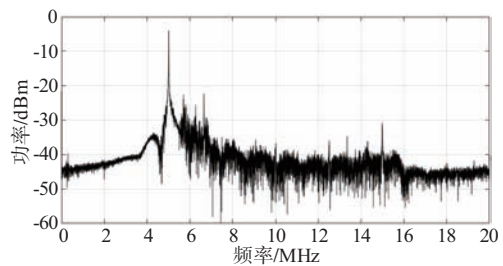


图8 中频信号频谱

4.2 天线方向图测试

雷达天线的水平辐射方向图和俯仰辐射方向图的测试结果分别如图9和图10所示,该天线的频率范围是34~38 GHz,测试中使用的频率是35 GHz。测试结果表明,雷达天线水平方向的3 dB波束宽度是 15° ,俯仰方向的3 dB波束宽度是 50° ,水平方向的旁瓣低于 -12 dB,俯仰方向的旁瓣低于 -20 dB。

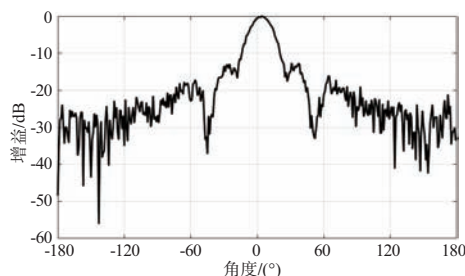


图9 水平辐射方向图

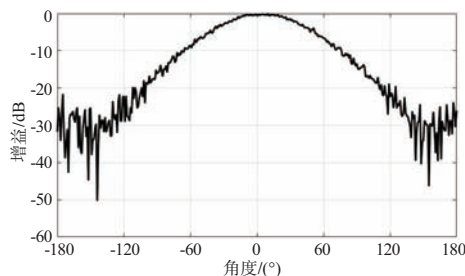


图10 俯仰辐射方向图

4.3 平台运动补偿

无人机载SAR的运动补偿相较于传统星载和机载SAR存在两个主要的挑战:1)由于无人机平台对载荷体积和功耗的限制,无人机载SAR通常选用较高的雷达波段,更短的波长会导致成像结果对平台非规则运动产生的相位误差更敏感;2)无人机平台飞行的稳定性较差,易受气流等环境因素的干扰。

本文采用能同时提供卫星导航与RTK定位功能的惯导模组采集无人机平台的运动信息。在成像过程中,首先使用卡尔曼滤波对惯导模组采集的位置信息进行平滑处理,滤波后的位置信息作为粗略的运动补偿用于初步成像,随后使用相位梯度自聚焦方法对初步的成像结果做进一步聚焦处理,对于子图像之间的配准和拼接,本文结合使用了平台的运动信息与图像特征点的匹配信息来

估计子图像间的几何变化关系,从而提高图像配准的精度。

4.4 SAR成像测试

为了测试雷达样机的成像效果,我们将其安装在Matrice 600 PRO无人机上进行成像测试。挂飞实验的照片如图11所示,测试中使用的无人机运动参数和雷达系统参数详见表3。图12展示了测试场景的卫星光学图像,图13(a)和图13(b)分别展示了高精度(16-bit)和单比特(1-bit)数据的SAR成像结果,图14展示了两种采样数据成像结果的局部对比。SAR成像结果表明,本文设计的雷达样机具备对较大场景进行SAR成像的能力,成像场景中的草坪、树木、人行天桥和篮球场等目标均具有较高的辨识度。

对于图13中展示的成像结果,以高精度数据得到的SAR图像作为评价基准,使用结构相似度(Structural Similarity, SSIM)作为评价指标,单比特数据成像结果的SSIM为88.57%,与高精度SAR图像质量十分接近。使用不同倍数的过采样频率,单比特成像所需的数据量可降低到高精度的1/3甚至1/5,可以有效降低雷达系统对数据存储和传输的性能要求,降低雷达系统的功耗和成本等方面存在优势。

此外,对于需要实时SAR成像的应用场景,高精度量化数据由于数据率大,无法实时无线传输雷达数据,需要在雷达系统中部署成像单元,将成像结果传回地面端。而单比特量化后的数据由于数据率的降低,雷达系统能无线实时回传采样数据,在地面端进行成像处理,避免在雷达系统中部署成像单元,有利于简化雷达系统的结构,并降低系统的成本和功耗。

表3 成像测试参数

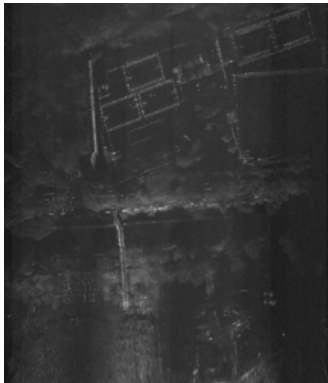
参数	参数值
飞行高度/m	120
飞行速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	7.5
擦地角/ $^\circ$	45
带宽/GHz	1.5
中心频率/GHz	35
脉冲宽度/ μs	450
采样率/MHz	20
脉冲重复频率/Hz	2 000



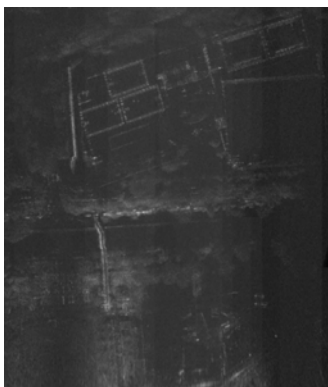
图 11 雷达样机挂飞照片



图 12 卫星光学图像



(a) 高精度数据的成像结果



(b) 单比特数据的成像结果

图 13 SAR 成像测试结果



(a) 高精度数据的成像结果(局部)



(b) 单比特数据的成像结果(局部)

图 14 SAR 成像测试结果(局部)

5 结束语

将本文设计的 NanoSAR 挂载在无人机上单比特成像实验,取得与预期相符的成像效果,验证了本系统设计的可行性和稳定性。相较于传统 SAR 系统,单比特 NanoSAR 大幅减少采样数据量,降低了传输和处理的负担,降低了对无人机载重量的要求,在低空地质测绘,资源勘探等领域有着十分广泛的前景。

参考文献:

- [1] HOVANESSIAN SEVAK A. Introduction to Synthetic Array and Imaging Radars[M]. USA:Artech House, 1980.
- [2] STOFAN E R, EVANS D L, SCHMULLIUS C, et al. Overview of Results of Spaceborne Imaging Radar-C, X-Band Synthetic Aperture Radar (SIR - C/X - SAR) [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33 (4): 817-828.

(下转第 66 页)