

文章编号: 2095-4980(2024)01-0046-08

## W 波段机载视频合成孔径雷达系统

陈庆铎, 刘亚波, 王露豪, 喻忠军

(中国科学院 空天信息创新研究院, 北京 100094)

**摘要:** 合成孔径雷达(SAR)能够全天时全天候工作, 在对地遥感领域具有广泛和深入的应用。视频 SAR 将 SAR 成像获得的空间维度信息拓展到时-空维度, 可以获取更加丰富的遥感信息。传统 SAR 频段较低, 导致合成孔径时间长, 数据计算量大, 高帧频输出难度很大; 而低频段太赫兹波对目标细节感知能力强, 合成孔径短, 特别适合于微弱目标的视频感知。本文设计了一种工作在 W 波段的视频 SAR 系统, 采用收发分置连续波固态前端体制, 输出峰值功率 1 W, 最大发射带宽可达 1 GHz; 采用极坐标格式算法(PFA)结合 GPU 架构实现高帧率低延时成像。仿真试验表明, 系统成像分辨力可达 0.15 m, 成像帧率约 5 Hz。

**关键词:** 合成孔径雷达; 视频 SAR; W 波段; 极坐标格式算法; 成像

中图分类号: TN958.94

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022118

## W-band airborne video synthetic aperture radar system

CHEN Qingxin, LIU Yabo, WANG Luhao, YU Zhongjun

(Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Synthetic Aperture Radar(SAR) works all day and all weather, and has a wide application in the field of earth remote sensing. Video SAR expands the spatial dimension information obtained by SAR imaging to the space-time dimension to obtain richer remote sensing information. The low frequency band of traditional SAR leads to long synthetic aperture time, large amount of data calculation, and great difficulty in high frame rate output. However, the low frequency terahertz wave has strong perception on target details and short synthetic aperture, which is especially suitable for video perception of weak targets. A video SAR system working in the W-band is designed, which adopts the solid-state front end system of bistatic continuous wave, with peak output power of 1 W and maximum transmission bandwidth of 1 GHz. The Polar Format Algorithm(PFA) along with Graphics Processing Unit (GPU) processing architecture is employed to realize high frame rate and low delay imaging. The simulation results show that the imaging resolution of the system can reach 0.15 m and the imaging frame rate is 5 Hz.

**Keywords:** Synthetic Aperture Radar; video SAR; W-band; Polar Format Algorithm; imaging

在探测与成像方面, 传统光电红外(Electro-Optical-Infrared, EO/IR)设备受天气影响显著, 在复杂环境下难以实现对微弱目标的探测。传统 SAR 受限于波长的影响, 对目标的细节描述过于粗糙。相比之下, W 波段具有波长短, 载荷尺寸小, 描述目标细节能力更强, 对运动物体的多普勒更加敏感的特点, 因而特别有利于高分辨力高帧率成像<sup>[1-4]</sup>。

德国弗朗霍夫高频物理与雷达研究所(Fraunhofer Institute for High Frequency Physics and Radar Techniques, FHR)于 2012 年研制了一款 W 波段机载 SAR 系统<sup>[5]</sup>, 该系统载频为 94 GHz, 系统的前端输出功率大于 100 mW, 产生 1 GHz 带宽。系统实现了快速的机载预处理、数字数据链和实时 SAR 处理的有机结合, 是无人机载 SAR 的一大亮点。美国雷神公司于 2017 年首次完成视频 SAR 搭载于 DC-3 运输机的飞行试验<sup>[6]</sup>, 该雷达工作频率 235 GHz, 采用真空行波管放大器, 平均功率稳定在 50 W, 对地面目标成像分辨力达到了 0.2 m, 作用距离 2 km。系统体积较小, 雷达安装在光电球内。韩国延世大学<sup>[7]</sup>也设计了一款 94 GHz SAR 系统, 该系统收发模块

由天线、前后端和锁相回路构成，天线增益为 25 dBi，3 dB 波束宽度为  $10^\circ$ ，成像分辨力达到 0.15 m。国内公开报道的视频 SAR 系统由航天科工二院二十三所研制，并进行了飞行试验，成功获取国内第一组太赫兹视频 SAR 影像成果<sup>[8]</sup>。

本文设计了一种工作在 94 GHz 载频下基于固态前端的视频 SAR 系统，开展了视频 SAR 系统性能仿真、连续波系统收发隔离度分析，并进行了视频 SAR 成像算法设计和验证，最后给出了成像仿真结果，为之后的系统研制和验证试验奠定了理论基础。

## 1 W 波段视频 SAR 系统设计

### 1.1 总体方案考虑

视频 SAR 技术前期研究表明，实现低延迟 SAR 成像是可能的，且视频 SAR 成像帧率与波长成正比。但现有的微波、毫米波 SAR 由于波长较长，成像时间一般长于 1 s，成像帧率较低。为实现不低于 5 fps 的视频 SAR 成像，需要综合考虑载波波段、成像分辨力、系统灵敏度和动态范围等因素。下面逐一分析各参数对视频 SAR 的影响以及本方案针对各参数的选择依据。

#### 1) 波段选择

W 波段的频率在 80~100 GHz 之间，这个区段内的电磁波传输受大气中水蒸汽和氧气等物质的影响<sup>[9]</sup>。如图 1 所示，80~100 GHz 频段电磁波的传输损耗随着频率的提高而减小。综合考虑目前市场上各波段的元器件水平和质量，对标国际上典型的视频 SAR 雷达系统，本文设计的系统波段为 94 GHz。

#### 2) 几何分辨力选择

选择 SAR 空间分辨力时，必须考虑以下因素：

- a) 在视频 SAR 成像模式中，由于要保证成像帧率，成像分辨力不能太高，应选择适中的方位向分辨力；
- b) 在高分辨成像模式中，需要考虑目标识别需求。分辨力达到 0.6 m，可分辨典型地物目标；分辨力达到 0.3 m，可确定绝大多数目标；达到 0.15 m，可描述大部分中小型战术目标。故 SAR 需要设计分辨力高于 0.15 m 的成像模式。

#### 3) 成像帧率选择

根据美国 DARPA 论证，在 SAR 图像中，能够精确区分地面移动部队、车辆，甚至单人移动目标所需的距离向及方位向分辨力均需达到 0.2 m/s<sup>[10]</sup>。视频 SAR 主要探测跟踪对象是小型机动目标，其速度范围为 1~10 m/s，横向加速度范围为 0.98~9.8 m/s<sup>2</sup>。采用视频图像技术要实现 1 m/s 的目标进行检测跟踪，成像速率应不低于 5 Hz。

#### 4) 系统灵敏度选择

地物目标的有效探测必须保证一定的 SAR 图像信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)，信噪比由后向散射系数( $\sigma^0$ )和系统灵敏度( $NE\sigma^0$ )决定<sup>[10]</sup>：

$$R_{SN} = \frac{\sigma^0}{NE\sigma^0} \quad (1)$$

针对确定的图像信噪比要求，系统灵敏度需求取决于后向散射系数。对于地物目标探测，则取决于地物对电磁波的后向散射特性。图像信噪比越高，图像中目标信息越丰富，越利于发现弱小目标。一般而言，一幅清晰的 SAR 图像中的 SNR 应在 5~10 dB 之间<sup>[11]</sup>，在相同地物后向散射条件下，提高系统灵敏度，能提高图像信噪比。根据 Ulaby 著作<sup>[12]</sup>，W 波段下典型地物后向散射系数大都在 -3 dB 左右。因此，为了更高精确观测地物目标以及对目标进行视频 SAR 成像，本文设计的系统灵敏度性能指标优于 -13 dB。

#### 5) 动态范围选择

SAR 接收到的信号是地物目标弱小信号与地杂波相互调制的回波，对回波接收增益调理及信号采集提出了更高的要求。不同于常规雷达探测，需要将地物目标的弱小信号及杂波背景噪声电平置于接收机最佳线性区，并采用更高有效量化比特数的模数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)，拓展数据采集的动态范围，以减小量化噪声及低比特位采样对弱小信号线性度的影响，保证弱小信号的高精确度采样，有利于视频 SAR 的高精

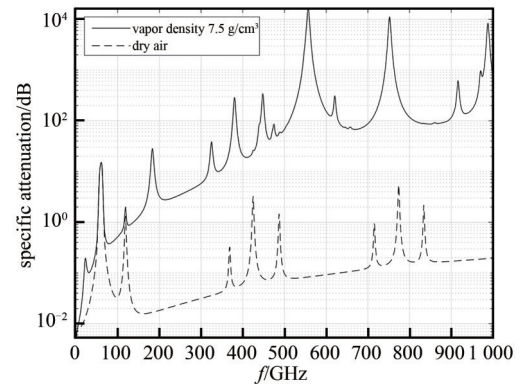


Fig.1 Absorption curves of atmosphere for electromagnetic waves with different frequencies

图 1 大气对不同频率电磁波的吸收曲线

准确度成像。本文选用 14 bit ADC 进行数据采集，并选用 16 bit 或更高比特数量化输出视频图像。

1.2 系统设计

考虑到目前的元器件水平还无法实现大功率太赫兹电磁波发射，SAR 系统采用调频连续波体制，以获取尽可能高的平均发射功率，实现更远的作用距离，避免该波段脉冲体制雷达因发射峰值功率大导致成本高和实现困难；采用去调频(Dechirp)的接收模式，大大降低了回波信号的采样频率和数据率。设计的系统组成框图如图 2 所示。

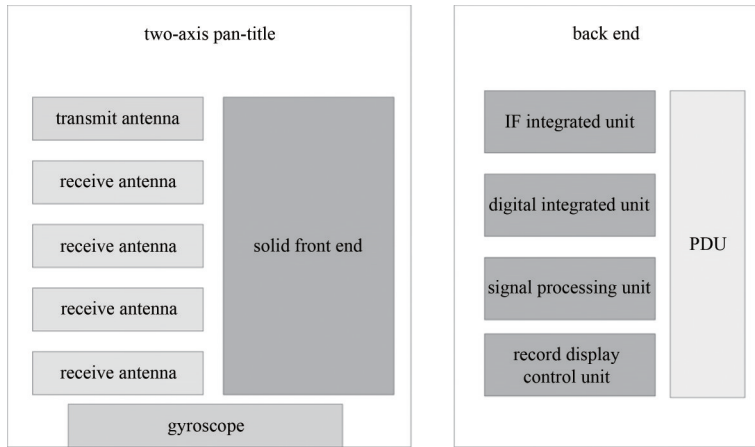


Fig.2 Overall block diagram of systems  
图2 系统总体框图

W 波段机载视频合成孔径雷达系统的主要组成包括：收发天线单元、固态前端单元、中频综合单元、数字综合单元、信号处理单元、记录显控单元、配电单元及陀螺仪。其中天线单元和固态前端单元安装在载机舱外机腹的两轴云台内，其他单元设备安装在载机舱内的设备机柜上。

现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)(Ultrascale+VU9P)产生线性调频基带数字信号，经数模转换器(Digital-to-Analog Converter, DAC)转换成基带宽频模拟信号，经滤波、放大、上变频后产生 94 GHz 发射信号。4 个接收天线分别接收 4 路中心频率为 94 GHz 的回波信号，经放大、滤波、下变频后形成中频信号，并在此中频上进行去调频解调处理，经滤波后产生最大 1~60 MHz 带宽的低频信号，输出给 ADC 芯片转换成数字信号，在 FPGA(Ultrascale+VU9P)内做 PFA 成像处理后，经 Camerlink 或光纤口输出。

为满足不低于 5 Hz 的视频 SAR 成像能力，同时兼顾高分辨力要求，系统带宽设计为 1 GHz，视频 SAR 模式下系统指标见表 1。

表1 视频 SAR 模式系统设计指标  
Table1 System design indicators of video SAR mode

carrier frequency/GHz	bandwidth /GHz	pulse length /μs	Pulse Repetition Frequency(PRF)/Hz	geometric resolution/m	operating distance/m	plotting width /m	bandwidth after dechirp/MHz	sampling points	radar speed /(m·s <sup>-1</sup> )	radar altitude /km
94	1	200	4 000	0.15	2	300	3.5	1 000	70	1

在图像质量上，由于后向散射系数  $\sigma^0$  随地形的变化较大，因此通常采用  $NE\sigma^0$  进行评估。系统灵敏度  $NE\sigma^0$  计算公式如下：

$$NE\sigma^0 = \frac{2(4\pi)^3 R^3 k T_0 N_F L_s V}{P_t \eta G_t G_r \lambda^3 \rho_{rg}} \tag{2}$$

式中： $R$ 为雷达作用距离； $k$ 为玻兹曼常数； $T_0$ 为标准大气噪声温度； $N_F$ 为系统噪声系数； $L_s$ 为系统损耗； $V$ 为平台飞行速度； $P_t$ 为雷达峰值功率； $\eta$ 为系统发射占空比； $G_t$ 为天线发射增益； $G_r$ 为天线接收增益； $\lambda$ 为雷达工作波长； $\rho_{rg}$ 为地距分辨率。

将各参数代入式中可以得到，在作用距离 2 km 的条件下， $NE\sigma^0$  最大值优于 -13.7 dB，满足高分辨力、高信噪比成像的要求。

系统合成孔径时间由  $T_a = \frac{k_a \lambda R}{2\rho_a V}$  计算得到，其中： $k_a$  为方位向分辨率余量， $\rho_a$  为方位向分辨率，代入相关参数可得  $T_a=0.20$  s，因此满足 5 Hz 的成像需求。

## 2 信号耦合分析

由于系统采用连续波体制，收发分置，在信号接收的同时发射信号可能从天线端或射频链路耦合进来，影响接收信号的信噪比，因此需要对系统进行隔离度分析，从而有针对性地削弱耦合信号对回波的影响。以其中某一条接收回路为例，分析耦合信号的影响，接收链路见图 3。

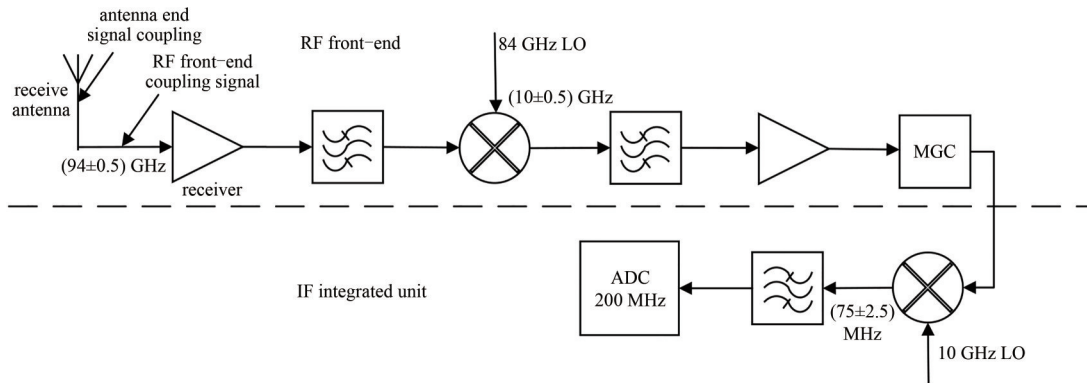


Fig.3 Connection diagram of receive branch  
图3 接收支路连线图

系统天线端收发隔离度可达 80 dB 以上，实测射频前端的收发隔离度为 89 dB。从接收机出来的信号功率可表示为：

$$P = P_r + P_{\text{coupling,ant}} + P_{\text{coupling,radi}} + P_n \quad (3)$$

式中： $P_r$  为从地面散射回来的回波信号功率； $P_{\text{coupling,ant}}$  为从天线端耦合进来的信号功率； $P_{\text{coupling,radi}}$  为从射频前端耦合进来的信号功率； $P_n$  为接收机产生的噪声功率。下面对 4 类信号进行逐一分析。

### 1) 回波信号功率

雷达系统作用距离为 2 km，对于后向散射系数为  $\sigma^0$  的地物，其回波信号功率可表示为：

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^3 \sigma^0 c \tau G_a}{2(4\pi)^3 R^3 D_a L_s} \quad (4)$$

式中： $P_t$  为信号发射功率； $G$  为天线增益； $\lambda$  为波长； $c$  为光速； $\tau$  为发射脉宽； $R$  为作用距离； $D_a$  为方位向天线长度； $L_s$  为传输损耗，此处取为 3 dB； $G_a$  为接收机增益，此处取为 24 dB，代入计算可得  $P_r=-71.49$  dBW。

### 2) 天线端耦合信号功率

天线端耦合信号功率可表示为：

$$P_{\text{coupling,ant}} = P_t - I_{\text{ant}} + G_a \quad (5)$$

式中  $I_{\text{out}}$  为天线隔离度。代入式(5)可得  $P_{\text{coupling,ant}}=-56$  dBW。

### 3) 射频前端耦合信号功率

射频前端耦合信号功率可表示为：

$$P_{\text{coupling,radi}} = P_t - I_{\text{radi}} + G_a \quad (6)$$

式中  $I_{\text{radi}}$  为射频前端隔离度。代入式(6)可得  $P_{\text{coupling,radi}}=-65$  dBW。

### 4) 噪声功率

噪声功率可表示为：

$$P_n = kT_0 N_F B + G_a \quad (7)$$

代入相关参数计算可得  $P_n=-83.93$  dBW。



注意到回波信号经过处理后获得二维脉压增益, 耦合信号获得了距离脉压增益, 噪声无增益。其中距离脉压增益  $I_r=B\tau$ , 经计算为 53 dB; 方位脉压增益为  $I_a=PRF \times T_a$  (PRF 为脉冲重复频率), 经计算为 29 dB, 因此经过处理后回波信号的功率为 -73.87 dBW; 噪声经过处理后功率仍为 -83.93 dBW。由于天线端耦合信号功率高于射频链路来的耦合信号, 主要考虑天线端耦合信号经过处理后的功率。耦合信号、回波经过去斜处理后对应的频点分别为 120 MHz 和 75 MHz, 经分析可知, 耦合信号主要通过 -45 dB 的旁瓣影响成像质量, 因此若不经过滤波处理, 耦合信号的功率为 -48 dBW, 远高于回波功率, 需要在去斜电路后加一滤波器来减弱其影响。滤波器衰减可取为 35 dB, 此时耦合信号的功率为 -83 dBW, 图像信噪比可达到 9 dB, 满足成像要求。

### 3 高性能实时成像算法设计

#### 3.1 去斜处理分析

通过去斜处理能将回波频谱从中频搬移到基带, 并取得脉冲压缩的效果。去斜的具体操作是使用一个与发射信号同频率的线性调频信号作为参考信号, 参考信号时延固定。然后, 将回波信号和参考信号进行差频处理, 即得到去斜后的信号, 如图 4(a) 所示<sup>[13]</sup>。若参考信号距目标回波中心的距离为  $R_{ref}$ , 则参考信号的表达式为:

$$s_{ref}(t_r, t_a) = \text{rect}\left(\frac{t_r - 2R_{ref}/c}{T_{ref}}\right) \exp\left\{j2\pi\left[f_c\left(t_r - \frac{2R_{ref}}{c}\right) + \frac{1}{2}\left(t_r - \frac{2R_{ref}}{c}\right)^2\right]\right\} \quad (8)$$

式中:  $T_{ref}$  为参考信号的脉宽;  $t_r$  为距离向时间;  $t_a$  为方位向时间;  $f_c$  为发射载频。若点目标到 SAR 的距离为  $R$ , 则其与参考信号的斜距差为  $R_\Delta = R - R_{ref}$ , 差频输出为:

$$s_{rf}(t_r, t_a) = \text{rect}\left(\frac{t_r - 2R_\Delta/c}{\tau}\right) \exp\left(-j\frac{4\pi}{c}f_c R_\Delta\right) \exp\left(j\frac{4\pi}{c^2}R_\Delta^2\right) \exp\left[-j\frac{4\pi}{c}\left(t_r - \frac{2R_{ref}}{c}\right)R_\Delta\right] \quad (9)$$

图 4(b) 为去斜后的回波信号, 远近距和中心回波存在固定的相位差, 需要补偿后才能进行成像处理。对该相位项进行分析, 对式(8)中的  $t_r$  作傅里叶变换可得

$$S_{rf}(f_r, t_a) = \tau \text{sinc}\left[\tau\left(f_r + 2\frac{R_\Delta}{c}\right)\right] \exp\left(-j\frac{4\pi}{c}f_r R_\Delta\right) \exp\left(j\frac{4\pi}{c^2}R_\Delta^2\right) \quad (10)$$

式中  $f_r$  为距离向频率。分析式(10)的构成可知, 回波信号进行去斜处理后, 获得频域内宽度为  $1/\tau$  的窄脉冲, 频移为  $-2R_\Delta/c$ , 且除多普勒相位项外还有固定的相位项  $4\pi R_\Delta^2/c^2$ , 称其为视频残余误差 (Residual Video Phase Error, RVP) 项。RVP 误差的原因是由于目标与参考点之间的距离差在时域上的变化导致信号的相位不一致。为消除 RVP 误差, 需进行 RVP 补偿处理, 一般通过与频域的共轭参考信号相乘完成, 补偿流程如图 5 所示。RVP 补偿的目的是使距离维的信号包络统一, 并去除信号相位中的二次项。

#### 3.2 极坐标格式算法

由于视频 SAR 工作在聚束模式下, 该模式下较长的照射时间加强了回波距离徙动的影响, 若直接对回波进行二维傅里叶变换, 难以获得聚束区域内良好的成像结果, 且会导致严重的几何畸变。极坐标算法是一种较为成熟的聚束式 SAR 成像算法<sup>[14]</sup>, 以图像中心为补偿参考点, 补偿 RVP 项后直接对数据进行坐标变换的二维插值, 再进行二维傅里叶逆变换即可重建图像, 算法处理流程见图 6。

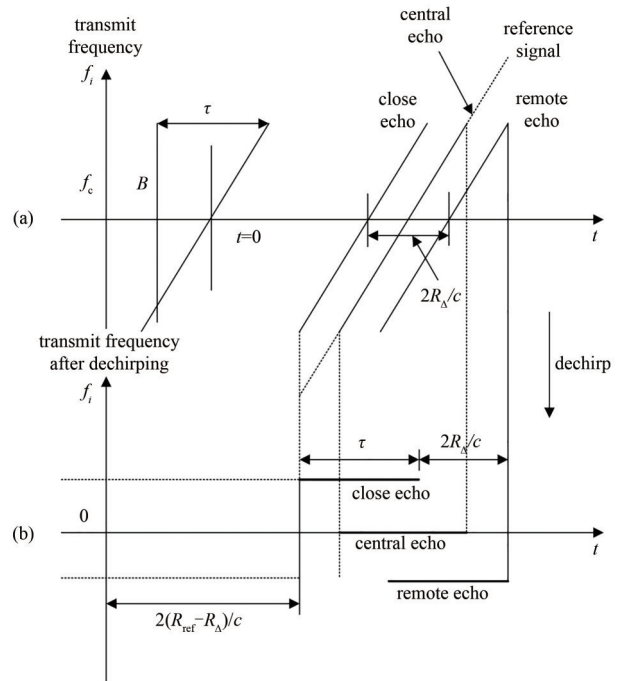


Fig.4 Dechirp flow  
图 4 去斜流程

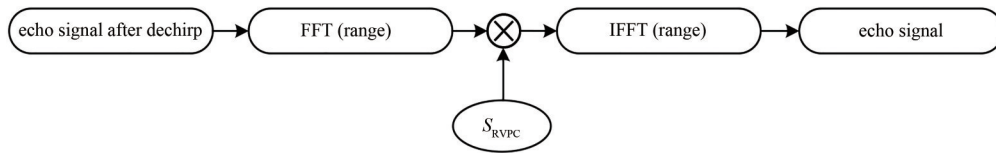


Fig.5 RVP compensation flow  
图 5 RVP 项补偿流程

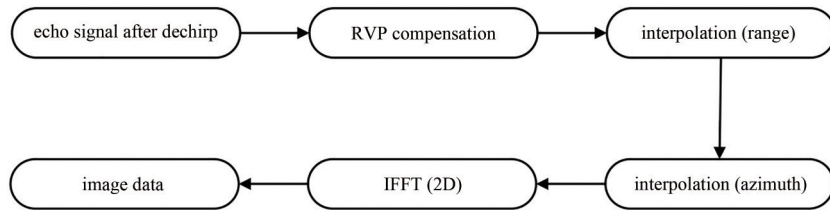


Fig.6 Polar format algorithm  
图 6 极坐标格式算法

### 3.3 处理平台

为产生高帧率 SAR 图像，必须减少成像处理时间。传统 SAR 实时处理主要基于 FPGA 架构，但在 FPGA 平台上实现具体算法的部署和并行优化的难度较大，且遗传代码适应性不够灵活<sup>[15]</sup>。近年来，随着集成电路技术的飞跃发展，多核、众核成为芯片设计的潮流，与之对应的并行处理技术，尤其是 GPU 并行处理技术被广泛应用。与 CPU 相比，GPU 明显具有成本低、性能高的特点，各种复杂的处理算法在 GPU 上得到加速实现。SAR 成像处理具有计算密集型、易于并行等特点，适合利用 GPU 加速。对于本系统，单帧图像合成孔径时间为 0.2 s。为减少方位模糊，PRF(Pulse Repetition Frequency)取为 4 000 Hz，方位向数据长度 1 024(1k)点，距离向采用去斜处理，幅宽 300 m 对应的距离向数据长度为 2 048(2k)点，回波数据率约为 160 Mbps。GPU 采用 NVIDIA 公司开发的 Tesla P100，该 GPU 的主要参数如表 2 所示。

表 2 Tesla P100 主要参数  
Table2 Main parameters of Tesla P100

single-precision performance	GPU memory/GB	memory bandwidth/(GB·s <sup>-1</sup> )	NVIDIA CUDA cores	max power consumption/W
10.6 TeraFLOPS	16	732	300	300

将 3.2 节中的极坐标格式算法进行针对性改写和实现，整个并行化程序搭建在 CUDA 9.0 版本，所用代码编译器为 VS2019。对于 1 k×2 k 的回波数据处理延时实测为 0.165 s，可以满足 5 Hz 的成像帧率需求。

## 4 视频 SAR 成像仿真试验

为验证该视频 SAR 的成像性能，以景中心为参考零点，针对点阵目标设置表 3 仿真参数，开展视频 SAR 仿真实验，通过 PFA 的仿真结果如图 7 所示。

表 3 视频 SAR 目标仿真参数  
Table3 Simulation parameters of video SAR target

squint angle/(°)			point array target coordinate(range,azimuth)									
-5	0	5	(-1,-2)	(0,-2)	(1,-2)	(-1,0)	(0,0)	(1,0)	(1,2)	(0,2)	(2,2)	

上述仿真是针对静止点阵目标，视频 SAR 在不同平台视角下得到的结果。而针对动目标识别多采用阴影检测技术，这是由于视频 SAR 的高频工作机制，极小的目标运动也会引起强烈的多普勒效应，进而会在对应的位置和状态留下实时阴影<sup>[16]</sup>。该阴影能作为视频 SAR 中动态目标识别成像的依据，本文在录取到回波数据后通过多帧 SAR 图像联合检测的方式发现和检测运动目标。

## 5 结论

视频 SAR 系统通过灵活波束指向能力和极高效的实时成像处理能力，将传统 SAR 成像获得的空间维度信息拓展到时-空维度，特别有利于战场环境动态监视，低、小、慢目标探测及识别和船只动态监视及运动参数提取等方面的应用。本文设计了一种工作在 94 GHz 的视频 SAR 系统，最大带宽 1 GHz，可实现 0.15 m 的分辨力，分

析了连续波体制雷达的耦合信号影响,并开展了系统设计,针对设计的系统参数进行了成像仿真实验,由于实物系统尚在研制阶段,目前无法进行视频 SAR 成像,后续将开展机载飞行试验,全面验证系统的功能性能指标,为工程化、实用化的视频 SAR 系统奠定技术基础。

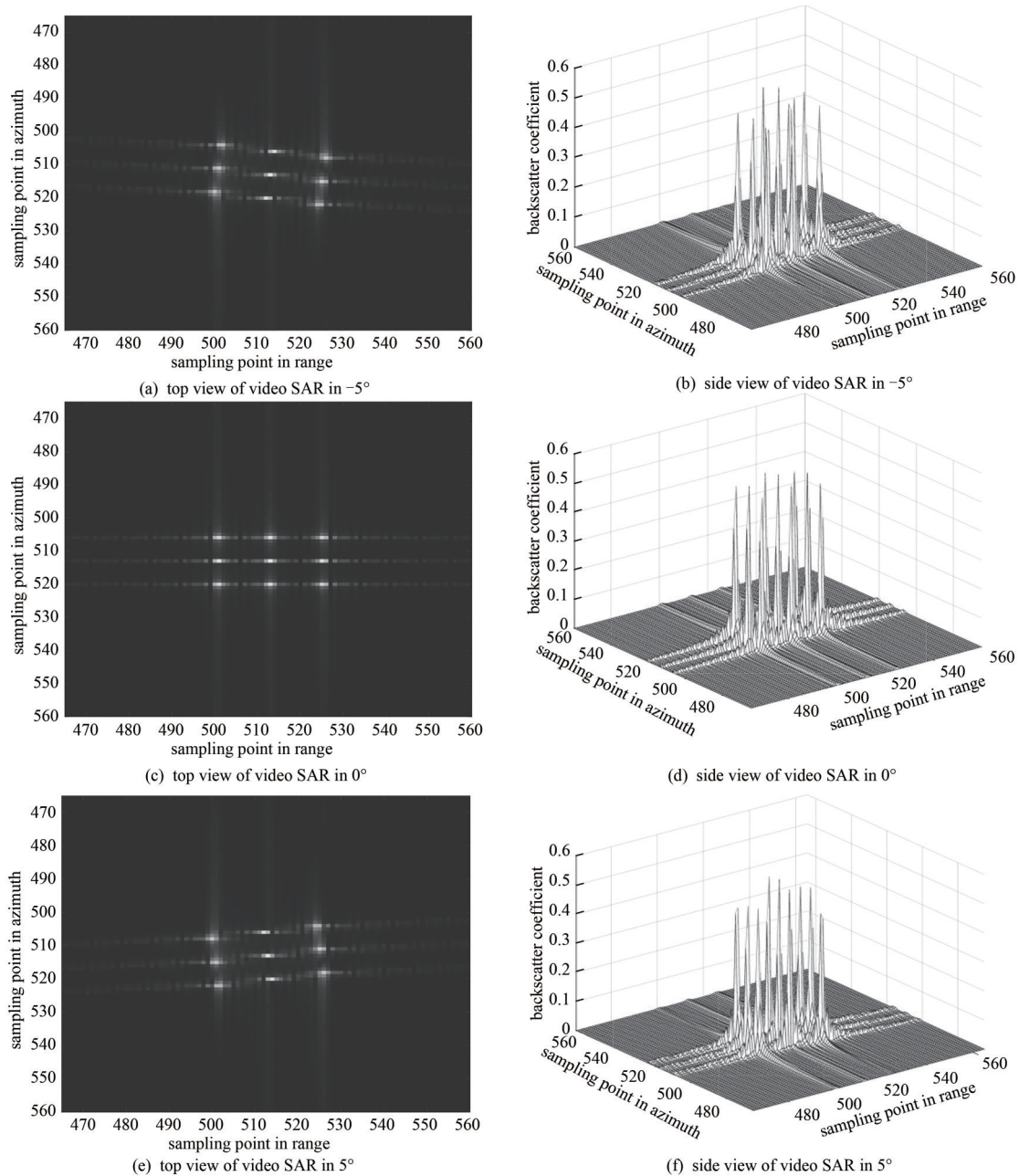


Fig.7 Simulation results of video SAR

图7 视频 SAR 仿真结果

#### 参考文献:

- [1] 李大圣,吴福伟,孙俊,等.一种 220 GHz 波段太赫兹合成孔径成像雷达[J].微波学报,2018,34(4):55-59. (LI Dasheng,WU Fuwei,SUN Jun,et al. Terahertz synthetic aperture imaging radar based on 220 GHz band[J]. Journal of Microwaves, 2018,34(4): 55-59.) doi:10.14183/j.cnki.1005-6122.201804010.
- [2] 董勇伟,李焱磊,丁满来,等.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. (DONG Yongwei,LI Yanlei,DING Manlai,et al. High resolution W-band SAR[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018,40(5):1266-1270.) doi:10.11999/JEIT170461.

- [3] 姜漫,王辉,孙志强,等. W 波段 FMCW SAR 系统实现与试验[J]. 上海航天, 2018,35(6):12–17. (JIANG Man,WANG Hui,SUN Zhiqiang,et al. Realization and experimental result of W–band FMCW SAR system[J]. Aerospace Shanghai, 2018,35(6):12–17.) doi:CNKI:SUN:SHHT.0.2018–06–004.
- [4] 杨琪,邓彬,王宏强,等. 基于 Simulink 的太赫兹 SAR 成像算法仿真[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(5):670–674. (YANG Qi,DENG Bin,WANG Hongqiang,et al. Simulation of a terahertz–SAR imaging algorithm based on Simulink[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(5):670–674.) doi:10.11805/TKYDA201305.0670.
- [5] CARIS M,STANKO S,SOMMER R,et al. SARape–synthetic aperture radar for all weather penetrating UAV application[C]// 2013 IEEE International Radar Symposium. Dresden,Germany:IEEE, 2013:41–46.
- [6] KIM S H,FAN R,DOMINSKI F. ViSAR:a 235 GHz radar for airborne applications[C]// 2018 IEEE Radar Conference. Oklahoma City,OK,USA:IEEE, 2018:1549–1554.doi:10.1109/RADAR.2018.8378797.
- [7] YU J,KIM S,KA M H. A 94 GHz frequency modulation continuous wave radar imaging and motion compensation[M]// Graham Weinberg. Topics in Radar Signal Processing, 2018.
- [8] 侯茜. 国内首款太赫兹视频 SAR 研制成功[EB/OL]. (2018–12–18). [https://www.cas.cn/kj/201812/t20181218\\_4674067.shtml](https://www.cas.cn/kj/201812/t20181218_4674067.shtml). (HOU Qian. China's first terahertz video SAR has been successfully developed[EB/OL]. (2018–12–18). [https://www.cas.cn/kj/201812/t20181218\\_4674067.shtml](https://www.cas.cn/kj/201812/t20181218_4674067.shtml).)
- [9] ITU–R. Recommendation ITU–R P.676–3. Attenuation by atmospheric gases[S]. 1998.
- [10] 杨晓波,皮亦鸣. 太赫兹雷达[M]. 北京:国防工业出版社, 2017. (YANG Xiaobo,PI Yiming. Terahertz radar[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017.)
- [11] 沙利文. 成像与先进雷达技术基础[M]. 北京:电子工业出版社, 2009. (SULLIVAN R J. Radar foundations for imaging and advanced concepts[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2009.)
- [12] ULABY F T,SARABANDI K,MCDNALD K,et al. Michigan microwave canopy scattering model[J]. International Journal of Remote Sensing, 1990,11(7):1223–1253.
- [13] 保铮,邢孟道,王彤. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2005. (BAO Zheng,XING Mengdao,WANG Tong. Radar imaging technology[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2005.)
- [14] CARRARA W G,GOODMAN R S,MAJEWSKI R M. Spotlight Synthetic Aperture Radar:signal processing algorithms[M]. Boston: Artech House, 1995.
- [15] 张彦彬,丁晟,高雁,等. 基于 CPU+GPU 混合架构的实时成像系统设计与实现[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(1): 146–151. (ZHANG Yanbin,DING Sheng,GAO Yan,et al. Design and implementation of a real–time imaging system based on CPU+GPU hybrid architecture[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(1):146–151.) doi:10.11805/TKYDA201901.0146.
- [16] 丁金闪. 视频 SAR 成像与动目标阴影检测技术[J]. 雷达学报, 2020,9(2):321–334. (DING Jinshan. Focusing algorithms and moving target detection based on video SAR[J]. Journal of Radars, 2020,9(2):321–334.) doi:10.12000/JR20018.

#### 作者简介:

陈庆铎(1994–), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为合成孔径雷达系统设计 .email:chenqx01@aircas.ac.cn.

刘亚波(1984–), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为合成孔径雷达成像算法研究.

王露豪(2000–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为合成孔径雷达成像算法研究.

喻忠军(1980–), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为相控阵微系统研究.