DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2024.05.007

# 高速机动平台SAR成像PRF设计方法

### 杨 琳,朱国辉,汪 洋,胡 虹

(中国电子科技集团公司第三十八研究所孔径阵列与空间探测安徽省实验室,安徽合肥 230088)

摘 要:在高速机动平台合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)成像系统中,现有脉冲重复频率 (Pulse Repetition Frequency, PRF)设计方法基于方位向信号带宽计算出的下限值过高,且忽视了雷达的工作占 空比因素。针对上述问题,首先推导了一组避开发射脉冲干扰、平台正下方回波干扰以及距离向模糊等因素的 关联PRF和雷达工作占空比的约束方程,然后提出了一种距离向分段 SAR成像处理情况下的 PRF 下限值设计 方法。仿真结果表明,在机动平台高速运动大前斜视聚束 SAR成像时所提方法能够得到较小的 PRF 下限值,有 效扩展了 PRF 可选择的范围,可以更好地满足实际工程应用。

关键词:机动平台;合成孔径雷达;脉冲重复频率;距离模糊;方位模糊

中图分类号:TN957 文献标志码:A 文章编号:1672-2337(2024)05-0524-08

引用格式:杨琳,朱国辉,汪洋,等.高速机动平台SAR成像PRF设计方法[J].雷达科学与技术,2024,22(5): 524-531.

YANG Lin, ZHU Guohui, WANG Yang, et al. PRF Design Method for SAR Imaging of High-Speed Maneuvering Platform[J]. Radar Science and Technology, 2024, 22(5):524-531.

### **PRF** Design Method for SAR Imaging of High-Speed Maneuvering Platform

YANG Lin, ZHU Guohui, WANG Yang, HU Hong

(Key Laboratory of Aperture Array and Space Application, the 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230088, China)

**Abstract:** In the synthetic aperture radar (SAR) imaging system of high-speed maneuvering platform, the existing design methods of pulse repetition frequency (PRF) have some shortcomings including that the lower bound for the PRF calculated based on the azimuth signal bandwidth is too high, and the factor of radar's duty ratio is neglected. In view of the above problems, firstly, a set of constraint equations that related to PRF and duty ratio are derived to avoid the factors such as transmitting pulse interference, echo interference directly below the platform and range ambiguity. Then, a new design method for the lower bound of PRF in the case of range sectioned SAR imaging is proposed. The simulation results show that the proposed method can achieve a smaller PRF lower limit when highly squinted spotlight SAR imaging seeker moves at a high speed, which effectively expands the range of PRF selection and can better meet the need of practical engineering applications.

Key words: maneuvering platform; synthetic aperture radar (SAR); pulse repetition frequency (PRF); range ambiguity; azimuth ambiguity

0 引 言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR) 是一种微波成像雷达,它通过雷达装载平台和目 标间的相对运动,将雷达在不同位置处接收的回 波信号进行相干处理获得二维图像,具有全天时、 全天候的特点,在军事和民用领域得到了非常广 泛的应用<sup>[14]</sup>。高速无人机及临近空间高速机动平 台具有灵活多样的飞行轨迹,它的飞行速度快、实时性要求高,给SAR成像系统实时成像处理带来了很大的困难<sup>[5-6]</sup>,其工作时序设计也与机载、星载平台SAR等有较大的区别<sup>[7-8]</sup>。

在脉冲体制雷达系统设计中,脉冲重复频率 (Pulse Repetition Frequency, PRF)是最重要参数之 一,它的选取与雷达工作频率、飞行速度、天线波 束、测绘带宽、视角等参数密切关联,不但影响雷

收稿日期: 2024-04-21; 修回日期: 2024-06-11

基金项目:陆装预研基金(No.30105030203)

达发射信号脉宽、平均功率以及处理数据率等参 数的设计,还决定了观测距离和多普勒频率的模 糊程度<sup>[9-11]</sup>。文献[12]针对SAR成像过程中高度 不断变化给PRF设计带来的困难,提出了按高度 变化分段调整 PRF 的解决方法。文献[13]提出了 一种基于穷举法的聚束 SAR 成像的 PRF 设计方 法,但是存在PRF下限值过大导致PRF参数无法 选取的问题。文献[14]通过场景点遍历的方式得 到天线波束覆盖地面场景区域多普勒频率的最大 值与最小值,进而计算出多普勒带宽和准确的PRF 下限值。文献[15]以距离向分辨率为间隔,提出 了基于等距离环的PRF下限值计算方法,需要通 过遍历距离环的方式计算最大多普勒带宽,该方 法有效降低了PRF下限值。由于上述两种方法均 需遍历整个波束覆盖的地面场景区域,均存在PRF 下限值计算量较大的问题,难以满足平台实时计 算需求。另外文献[12-15]中方法均是在假定发射 信号脉宽已知的前提下来推导关于PRF的发射脉 冲干扰、平台正下方回波干扰以及距离向无模糊 等约束方程,由此设计出的PRF,与假定的脉宽以 及峰值功率计算得到的平均发射功率可能无法满 足SAR成像作用距离需求。实际上,应先根据 SAR 成像雷达方程计算出所需的平均发射功率, 而平均发射功率等于峰值功率和工作占空比之 积,相当于要先计算出工作占空比;在设计出合适 的PRF后,基于工作占空比与PRF、信号脉宽的关 系式再确定信号脉宽。基于此,本文将信号脉宽 表示为占空比与PRF之比的形式,并将其代入发 射脉冲干扰、平台正下方回波干扰以及距离向模 糊限制等关于 PRF 的约束方程,得到 PRF 关于工 作占空、回波近距以及回波远距的约束关系式;然 后针对高速机动平台SAR成像系统PRF下限值较 高的问题提出距离向分段SAR成像处理情况下的 PRF设计方法。通过仿真实验验证了本文方法能 更好地满足实际工程应用。

## 1 SAR图像信噪比

SAR 成像系统的一个重要参数是雷达图像信 噪比,由雷达方程导出<sup>[16]</sup>:

$$SNR = \frac{P_{av}G^2\lambda^3\sigma_0c}{256\pi^3R^3kTB_{\rm T}F_{\rm n}L_{\rm s}v\sin(\theta)}$$
(1)

式中, $P_{av}$ 为雷达平均发射功率,G为天线收发增 益, $\lambda$ 为发射信号波长, $\sigma_0$ 为归一化后向散射系数, c为光速,R为作用距离,k为玻耳兹曼常数,T为接 收机温度, $B_T$ 为发射信号带宽, $F_a$ 为噪声系数, $L_s$ 为系统损耗,v为平台速度, $\theta$ 为波束入射角。平均 发射功率 $P_{av}$ 可表示为 $P_{av} = P_td_t$ ,其中 $P_t$ 为峰值发 射功率, $d_t$ 为工作占空比,而占空比又取决于系统 发射信号脉宽与 PRF,即 $d_t = \tau \times PRF$ ,发射信号 脉宽 $\tau$ 与 PRF 有着关联性,在进行 SAR 成像 PRF 设 计时若先假定脉宽为固定值,再进行 PRF 选择设 计,得到的占空比不一定合理,此时须进行解耦, 下文将 $\tau = d_t/PRF$ 代入发射脉冲干扰、平台正下 方回波干扰以及距离模糊限制等约束方程进行 PRF设计。

## 2 PRF设计原则

### 2.1 避开发射脉冲干扰

相控阵雷达通常采用收发共用天线,在天线 发射脉冲时间窗口内,无法接收回波信号,PRF的 设计需使地物场景回波信号的返回时间窗口与发 射脉冲时间窗口错开,同时要满足波束覆盖地面 场景区域的近距与远距回波信号落在同一个脉冲 重复周期接收窗口时间内,得到以下约束关系<sup>[12]</sup>:

$$\frac{2R_{\rm n}}{c} > \frac{m}{PRF} + \tau + t_{\rm p} \tag{2}$$

$$\frac{2R_{\rm f}}{c} + \tau + t_{\rm p} < \frac{m+1}{PRF} \tag{3}$$

式中, $R_n$ 和 $R_f$ 分别为天线波束覆盖地面场景区域 近端和远端斜距,m为距离模糊数, $\tau$ 为发射信号 脉宽, $t_p$ 为发射与接收时序保护时间。根据第1节 分析将 $\tau = d_t/PRF$ 代入上述两个约束方程,经整 理可得PRF关于占空比 $d_i$ 的约束关系式为

$$\frac{2R_{\rm n}}{c} > \frac{m+d_{\rm t}}{PRF} + t_{\rm p} \tag{4}$$

$$\frac{2R_{\rm f}}{c} + t_{\rm p} < \frac{m+1-d_{\rm t}}{PRF}$$
(5)

### 2.2 避开平台正下方回波干扰

平台正下方回波是雷达天线从平台下方接收 到的旁瓣回波,其覆盖区域内的各散射点到雷达的 时间差异比较小。平台正下方回波干扰距离假定 为平台高度*H*,PRF设计应使平台正下方回波落入 发射脉冲时间窗口内,应满足以下约束关系式[11]:

$$\frac{2H}{c} + \tau + \frac{k}{PRF} < \frac{2R_n}{c} \tag{6}$$

$$\frac{2H}{c} + \frac{k+1}{PRF} > \frac{2\Lambda_{\rm f}}{c} + \tau \tag{7}$$

式中, k 为主瓣回波近距对应的距离模糊数与平台 正下方旁瓣回波远距对应的距离模糊数之差。

将 τ = d<sub>1</sub>/PRF代入上述两个约束方程式,经整理可得 PRF关于占空比 d<sub>1</sub>的避开平台正下方旁 瓣回波干扰的约束方程式为

$$\frac{2H}{c} + \frac{k+d_{\scriptscriptstyle 1}}{PRF} < \frac{2R_{\scriptscriptstyle n}}{c} \tag{8}$$

$$\frac{2H}{c} + \frac{k+1-d_{i}}{PRF} > \frac{2R_{f}}{c}$$

$$\tag{9}$$

### 2.3 距离模糊限制

雷达天线波束照射地面时有一定的覆盖范 围,覆盖地面场景区域的近距点*R*<sub>n</sub>和远距点*R*<sub>r</sub>对 应的回波信号延时会有差异,PRF设计时需要考虑 天线主瓣覆盖地面场景区域回波信号的时间宽 度。设回波距离模糊数为*m*,近距*R*<sub>n</sub>和远距*R*<sub>f</sub>对 应的回波延时分别为2*R*<sub>n</sub>/*c*和2*R*<sub>t</sub>/*c*,雷达发射与接 收信号的时序关系如图1所示。





图 1 中, PRT 是脉冲重复周期, 发射脉冲 1 的回 波信号在第 *m*+1 个 PRT 后被接收。PRF 需满足

$$PRF \leq \frac{1}{2\tau + 2t_{\rm p} + 2\left(R_{\rm f} - R_{\rm n}\right)/c} \tag{10}$$

将 
$$\tau = d_t / PRF$$
代人上式,经整理可得  

$$PRF ≤ \frac{1 - 2d_t}{2t_p + 2(R_f - R_n)/c}$$
(11)

**2.4 方位模糊限制** PRF相当于方位向回波信号的采样率,它的取

值应大于方位向多普勒	<b>盲号带宽的主要部分</b> [15],即
$PRF \ge lB$	(12)

式中,*l*为方位向过采样率,一般取为1.1~1.4,*B*为 方位向多普勒带宽。

聚束 SAR 成像模式的方位向多普勒带宽由瞬时多普勒带宽和多普勒中心频率的变化<sup>[15]</sup>两部分组成,如下式所示:

 $B = B_{d} + B_{a}$  (13) 式中: $B_{d} = 2v \Big[ \cos(\rho_{m}) - \cos(\rho_{n}) \Big]_{max} / \lambda$ 为雷达天线 波束覆盖地面场景区域内的瞬时多普勒带宽, $\rho_{m}$ 和 $\rho_{n}$ 分别表示波束覆盖地面场景区域内任意两点 m和n对应的等效斜视角; $B_{a} = 2v_{a}^{2}\sin^{2}(\psi)T_{a}/\lambda R_{c}$ 为多普勒中心频率变化范围, $v_{a}$ 为方位向速度, $\psi$ 为速度矢量和斜距矢量的夹角, $T_{a}$ 为方位向积累 时间。

# 3 基于距离向分段的PRF设计和SAR 成像处理

### 3.1 PRF设计

对于机动平台飞行速度快、SAR 成像作用距离远、雷达天线波束宽的情况,现有文献[12-15]中的PRF设计方法根据方位模糊限制计算出的PRF 下限值会出现大于距离模糊限制计算出的PRF上限值的情况,这时无法选择合适的PRF值。需设法降低PRF下限值,这里将雷达回波信号沿距离向按子段进行划分,对每个子段分别进行SAR成像处理,然后进行拼接得到完整的SAR图像<sup>[17]</sup>,这样只需考虑距离子段内的多普勒中心频率变化和瞬时多普勒带宽用于PRF下限值计算,能够有效降低PRF下限值,扩展PRF可选择的区间。下面首先进行PRF下限值设计。

SAR成像几何场景如图2所示,0为成像系坐标原点,P为平台位置,天线波束覆盖地面场景区域近似为椭圆,椭圆长径和短径分别为天线方位与俯仰波束覆盖地面场景区域的方位向与距离向宽度的一半<sup>[15]</sup>,即椭圆长径和短径为

$$a = \frac{1}{2} \left[ \frac{H}{\tan\left(\beta - \theta_{\rm el}/2\right)} - \frac{H}{\tan\left(\beta + \theta_{\rm el}/2\right)} \right] \quad (14)$$

(15)

$$b = R\theta_{m}$$

式中,H为平台高度, $\theta_{ax}$ 和 $\theta_{el}$ 分别为雷达天线方位 与俯仰波束宽度, $\beta$ 为天线波束擦地角。图中,前 斜角 $\varphi$ 为天线波束指向矢量在地面上的投影与X轴的夹角, $R_e$ 为中心斜距, $R_e$ 为地距。



图2 前斜SAR成像几何模型

步骤1 以地面距离向分辨率为间隔,将天线 波束覆盖地面椭圆区域分成等距离分辨率线,如 图2所示,椭圆长径所在距离线对应的椭圆区域交 点为 $A_i$ 和 $B_i$ , $i = -M, \dots, -1, 0, 1, \dots, M$ ,其中 $A_0$ 和 $B_0$ 为椭圆中心点所在距离线对应的交点。首先求出 点 $A_0$ 和 $B_0$ 对应的多普勒频率差,椭圆中心点对应 的地距为

$$R_{g0} = \frac{1}{2} \left[ \frac{H}{\tan\left(\beta - \theta_{el}/2\right)} + \frac{H}{\tan\left(\beta + \theta_{el}/2\right)} \right] (16)$$

矢量 **OA**<sub>0</sub>(**OB**<sub>0</sub>)与天线波束指向矢量在地面 上投影之间的夹角为

$$\xi_0 = a \tan\left(b / R_{g0}\right) \tag{17}$$

令 $|\overline{OA_0}| = |\overline{OB_0}| = \sqrt{R_{g0}^2 + b^2}$ ,则点 $A_0$ 与 $B_0$ 的 坐标可求解为

$$A_{0} = \left| \overline{OA}_{0} \right| \left[ \cos\left(\varphi - \xi_{0}\right), 0, \sin\left(\varphi - \xi_{0}\right) \right]^{\mathrm{T}}$$
(18)

$$B_{0} = \left| \overline{OB_{0}} \right| \left[ \cos\left(\varphi + \xi_{0}\right), 0, \sin\left(\varphi + \xi_{0}\right) \right]^{T}$$
(19)

平台速度矢量与矢量 **P**A<sub>0</sub> 和 **P**B<sub>0</sub> 的夹角分 别为

$$\rho_{A_0} = a \cos\left(\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}} \overline{\boldsymbol{P} \boldsymbol{A}_0} / \left(\boldsymbol{v} \cdot \left| \overline{\boldsymbol{P} \boldsymbol{A}_0} \right| \right)\right)$$
(20)

$$\rho_{B_0} = a \cos\left(\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}} \overline{\boldsymbol{PB}}_0 / \left(\boldsymbol{v} \cdot \left| \overline{\boldsymbol{PB}}_0 \right| \right)\right)$$
(21)

式中,**v**为平台速度矢量,上标T代表转置,||表示2-范数。

则椭圆中心点所在距离线所对应的多普勒带 宽可以近似用下式求解:

$$B_{d0} = 2v \left[ \cos\left(\rho_{A_0}\right) - \cos\left(\rho_{B_0}\right) \right] / \lambda$$
 (22)

步骤2 以椭圆中心点为起始点、地面距离向 分辨率为步进间隔,令i = 0,以远距端为例,沿长 径向椭圆远端方向计算交点 $(A_{i+1}, B_{i+1})$ 多普勒带 宽 $B_{d_{1,1}}$ (计算方式同 $B_{d_{1,0}}$ )

$$B_{d_{i+1}} = \left[ 2v \cos\left(\rho_{A_{i+1}}\right) - \cos\left(\rho_{B_{i+1}}\right) \right] / \lambda$$
 (23)

将  $B_{d_{i+1}}$  与  $B_{d_i}$ 进行比较, 若  $B_{d_i} < B_{d_{i+1}}$ , 令  $B_{d_i} = B_{d_{i+1}}$ , i = i + 1, 重新计算  $B_{d_{i+1}}$ , 直到出现  $B_{d_i} > B_{d_{i+1}}$ , 则  $B_{d_i}$ 即为以距离分辨率为间隔对应的最大多普勒 带宽。

步骤3 将天线波束覆盖地面椭圆区域沿距 离向等间隔划分为2N个距离子段,首先找到步骤 2得到的最大多普勒带宽对应距离线所在距离子 段N<sub>i</sub>,然后计算该距离段内最大多普勒带宽:

$$B_{\mathrm{d}N_{j}} = 2v \left[ \cos\left(\rho_{N_{j}}\right)_{\mathrm{max}} - \cos\left(\rho_{N_{j}}\right)_{\mathrm{min}} \right] / \lambda \qquad (24)$$

式中 $\rho_{N_j}$ 为距离子段 $N_j$ 椭圆区域点对应的等效斜视角。

步骤4 将 $B_{dN_j}$ 代入式(13),可得到所有距离 子段的最大方位向多普勒带宽 $B = B_a + B_{dN_j}$ ,进而 根据式(12)求得距离向子段的方位模糊限制约束 的PRF下限值为

$$PRF_{\min} = l \left( B_{a} + B_{dN_{j}} \right) \tag{25}$$

综上,可得PRF具体设计步骤如下:

1)根据式(11)确定距离模糊约束的PRF上 限值;

2)根据式(25)确定方位模糊约束的PRF下 限值;

3)根据发射脉冲干扰约束关系式(4)、(5)和 平台正下方回波干扰关系式(8)、(9)绘制斑马图, 其横坐标表示的脉冲重复频率的范围由 PRF 的上 限值和下限值确定;

4) 根据斑马图以及雷达回波近距和远距的波 束入射角选择相应的 PRF 值,这里要遵循的一个 原则是尽可能选择较低的PRF值,以减少处理数据量。

### 3.2 SAR 成像处理

基于距离向分段的SAR成像处理流程主要包括距离向回波子段划分、子块成像、图像拼接和几何校正等步骤<sup>[17]</sup>,如图3(a)所示;图3(b)给出了子块成像处理流程,分为距离压缩、距离走动补偿、距离弯曲补偿和方位压缩4个步骤。距离向分段的好处是只需考虑每个子段内的最大多普勒带宽,降低系统PRF下限值。



4 仿真实验

设置仿真实验参数同文献[14]:雷达波长为 0.015 m,平台高度为16832 m,运动速度为1724.2 m/s, 天线方位和俯仰波束宽度分别为4°和5°,发射与 接收保护时间为0.5 μs。设置作用距离为40 km对 应的占空比为0.2,距离分段数为32。

首先分析本文所提基于距离分段的PRF下限 值,并将其与文献[14]中的基于天线波束覆盖地 面场景区域遍历点的方式(简称"遍历法")、文献 [15]中的基于等距离环方法计算的PRF下限值结 果进行对比。图4给出了3种方法PRF下限值和 距离模糊约束PRF上限值随前斜角 *q*变化的结果。



图4 3种方法PRF下限值随前斜角变化曲线

从图4可以看出,距离模糊限制PRF上限值为 11.61 kHz;在前斜角 $\varphi$ =5°时,遍历法的PRF下限值 达到10.92 kHz,很接近上限值;本文方法和中等距离 环法的PRF下限值比较接近,分别为2.43 kHz和 2.11 kHz;随着前斜角的变大,3种方法PRF下限值 均快速增加,在前斜角为15°时,遍历法的PRF下 限值超过距离模糊限制的PRF上限值,而本文方 法和等距离环法的PRF下限值分别在35°和36°时 超出PRF上限值。

图5给出了前斜角为20°时3种方法PRF下限 值和距离模糊限制的PRF上限值随平台运动速度 v变化的曲线,可以看出,PRF上限值仍为11.61 kHz, 3种方法PRF的下限值随着运动速度v的增加均快 速增加,遍历法PRF下限值在运动速度为1600 m/s 时即超出上限值,本文方法和等距离环法PRF下 限值分别在运动速度分别为2750 m/s和2850 m/s 时超出PRF上限值。



图5 3种方法PRF下限值随运动速度变化曲线

在雷达天线俯仰向波束宽度增大或者中心斜距增加时,天线波束覆盖地面椭圆区域相应增加,会导致距离模糊约束PRF上限值大幅下降。图6和图7分别给出了PRF上限值和3种方法PRF下限值随天线俯仰向波束宽度和中心斜距变化的曲线。可以看出,随着俯仰向波束宽度增大或者作用中心距离的增加,PRF上限值迅速减小,遍历法PRF下限值在俯仰波束宽度为5.4°和中心斜距为44km时超出PRF上限值,而本文方法和等距离环法PRF下限值均变化很小,分别保持在6kHz和5.75kHz左右。



图6 3种方法PRF下限值随俯仰波束宽度变化曲线





从上述仿真结果可知,遍历法的PRF下限值 受前斜角、平台运动速度、天线波束宽度以及中心 斜距等因素影响很大,比较容易超出距离模糊限 制的PRF上限值,从而导致无法选择有效的PRF 值;与之相比,同等条件下本文方法与等距离环方 法PRF下限值比较相近,明显比遍历法小,能够适 用于更大的前斜角、波束宽度以及更快的平台速 度等较为复杂的成像场景。

接下来将本文方法计算PRF下限值耗时与遍 历法、等距离环法所用的计算耗时进行比较。文 中计算耗时为在 Matlab2017a 虚拟环境下进行 1000次仿真实验所用总时间除以总次数得到的平 均值。表1给出了几种方法的计算耗时情况。

表1 计算耗时比较

算法	耗时/ms
文献[14]方法	38.0
文献[15]方法	38.4
本文方法	1.6

从表1可以看出,遍历法和等距离环法两种方 法和等距离环法能够有效降低 PRF 下限值, 能适 应更大的前斜角、运动速度、波束宽度和中心斜 距,有效扩展了PRF可选择的区间。方法耗时相 当,均接近40 ms,而本文方法计算耗时仅为1.6 ms。 这是因为:文献[14]遍历法首先通过遍历的方式 得到波束覆盖地面椭圆区域内所有散射点等效斜 视角余弦值的最大值和最小值,然后根据最大值 与最小值之差求出多普勒中心偏移带宽,进而得 到PRF下限值;文献[15]等距离环法将椭圆区域 以距离向分辨率为间隔划分为等距离环,通过遍 历的方式求出所有距离环的最大多普勒带宽以得 到PRF下限值,两种方法均要通过遍历所有点以 至于计算耗时长;而本文将椭圆区域划分为若干 距离段,利用椭圆区域中间部分距离字段上点相 对于边缘部分距离子段上点与平台运动速度矢量 形成等效前斜角余弦值差异大、多普勒带宽也大 的特点,以椭圆区域中间部分距离子段为起始,往 椭圆区域两边缘递推比较相邻距离子段的多普勒 带宽,当出现当前距离子段多普勒带宽大于远近 两相邻距离段的多普勒带宽时,即取当前距离子 段多普勒带宽参与PRF下限值计算。由于椭圆区 域中间部分距离子段上多普勒带宽相对边缘距离 段大,实际上递推过程只需要计算较少的距离子 段迭代就停止了。

为说明距离子段的多普勒带宽,将距离分段 数设为64,对前斜角10°~50°情况下不同距离段的 多普勒带宽进行计算,结果如图8所示。从图中可 以看出,不同前斜角下距离分段多普勒带宽曲线 呈现出中间部分距离子段多普勒带宽大、边缘部 分距离子段多普勒带宽小的现象,只需递推迭代 中间部分几个距离子段的多普勒带宽值,这样计 算耗时就少很多。



最后对比本文方法与等距离环法的PRF设计 值,仿真实验参数设置同文献[15]中参数,根据式 (11)计算的距离模糊限制的PRF上限值为6963 Hz。 图9给出了占空比为20%时的PRF斑马图(由于作 用距离较远,雷达通常要工作在较高的占空比), 在选择PRF时需要避开发射脉冲干扰和平台正下 方回波干扰,同时需要大于PRF下限值,小于PRF 上限值。图中空白区域为非干扰区,可将PRF选 择为设计为5920 Hz,这时信号脉宽约为33.8 µs。 而文献[14]在设定脉宽为10 µs的基础上得到PRF 为5500 Hz,对应占空比仅为5.5%,难以满足远距 离SAR成像威力需求。



对基于点阵目标的距离向分段回波进行 SAR 成像处理仿真,为便于说明将距离向回波划分为4 段,子块图像拼接和校正后输出图像结果如图10

(a)和(b)所示,可以看出图中每个距离子段内和 校正后图像中的点目标均得到了很好的聚焦 效果。



图10 距离向分段SAR成像处理结果

# 5 结束语

本文研究了高速机动平台SAR成像PRF设计 方法。首先分析了雷达聚束SAR成像发射脉冲干 扰、平台正下方回波干扰以及距离向模糊限制等关 联PRF与占空比的约束方程式,然后针对高速、远 距离聚束SAR成像长径现有PRF设计方法不适用 的问题,提出了距离向分段处理情况下的方位模糊 限制多普勒带宽计算方法,有效地扩展了PRF可选 择的区间,能够适应更复杂的场景,设计出的PRF结 果与相应的信号脉宽能更好地满足实际工程应用。 通过仿真分析证实了所提方法的有效性和可行性。

# 参考文献:

- [1] 金秋,王雨晗,杨果,等.高速平台SAR脉内多普勒效应 误差分析和校正[J].雷达科学与技术,2023,21(3):237-246.
- [2] 张丽丽,蔡健楠,刘雨轩,等.用于SAR图像舰船目标检 测的MAF-Net和CS损失[J].雷达科学与技术,2024,22 (1):14-20.
- [3] 王岩飞,李和平,韩松.天线阵列编码合成孔径成像[J]. 雷达学报,2023,12(1):1-12.
- [4] 姚佰栋,盛磊,孙光才,等.大椭圆轨道SAR系统设计及 关键技术研究[J].雷达科学与技术,2020,18(4):373-380.
- [5] 郭媛,索志勇,王婷婷,等.弹载SAR系统参数优化设计 方法[J].系统工程与电子技术,2020,42(7):1478-1483.
- [6] 郭媛.弹载平台单/双基SAR系统设计及成像处理技术 [D].西安:西安电子科技大学,2022.
- [7] LI Yachao, DENG Huan, QUAN Yinghui, et al. Sequence Design for High Squint Spotlight SAR Imaging on Manoeuvring Descending Trajectory[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2017, 11(2): 219-225.
- [8] 杜林鹏.毫米波制导雷达成像系统参数设计及方法研究[D].西安:西安电子科技大学,2021.
- [9] 陈粤,禹卫东.星载SAR方位多通道TOPS成像模式参数设计[J].雷达科学与技术,2022,20(2):142-149.
- [10] 王志.低轨星载多模式 SAR 系统设计与成像处理技术 [D].西安:西安电子科技大学,2021.
- [11]周鹏,赵家兴,吕伟强,等.星载SAR系统参数设计过 程自动化方法研究[J].雷达科学与技术,2023,21(4):

### (上接第523页)

- 场低频测试频率的时域测试方法[J].数字通信世界, 2022(12):68-69.
- [7] 张金涛.X波段电大尺寸目标RCS近场测试[D].成都: 电子科技大学,2022.
- [8] MENG Chenkai, WANG Xiangchuan, MA Cang, et al. Fast and Multi-Band RCS Measurement Based on a Microwave Photonic Inverse Synthetic Aperture Radar [C]// 2022 20th International Conference on Optical Communications and Networks, Shenzhen, China: IEEE, 2022:1-3.
- [9] 刘依纯,朱莉,王斌.基于分辨率增强的亚毫米波RCS 成像分析[J].微波学报,2023,39(S1):333-337.
- [10] 毕志超,张依轩,杨玉禾,等.基于ISAR 成像与改进聚 类算法的部件 RCS 测量方法[C]//2023 年全国天线年 会论文集(下),哈尔滨:中国电子学会,2023:19-21.
- [11] 袁正阳.高温 RCS 近场测试技术[D].成都:电子科技 大学,2024.
- [12] 李南京,徐志浩,胡楚锋,等.基于成像提取的RCS

440-446.

- [12] 郑陶冶,俞根苗.弹载SAR脉冲重复频率设计研究[J]. 雷达科学与技术,2010,8(3):217-222.
- [13] 谢华英,卢再奇,周剑雄,等.弹载平台聚束SAR 成像 脉冲重复频率设计[J].系统工程与电子技术,2010, 32(11):2294-2298.
- [14] 邓欢,李亚超,全英汇,等.弹载下降段大前斜聚束
   SAR成像时序设计[J].系统工程与电子技术,2016, 38(5):1032-1038.
- [15]党彦锋,梁毅,张罡,等.机动平台俯冲大斜视SAR脉冲重复频率设计[J].系统工程与电子技术,2020,42
   (3):575-581.
- [16] CUMMING I G, WONG F H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data Algorithms and Implementation[M]. USA: Artech House, 2005.
- [17] 耿旭朴,董纯柱,殷红成.一种分段处理的大斜视SAR 成像算法[J].微波学报,2012,28(S2):455-458.

### 作者简介:

**杨**琳女,硕士,高级工程师,主要研究方向为雷达 数据处理。

- **朱国辉** 男,博士,高级工程师,主要研究方向为多站 无源定位与跟踪技术。
- **汪 洋** 男,博士,研究员,主要研究方向为极化干涉 SAR。

**胡** 虹 女,博士,高级工程师,主要研究方向为SAR 成像算法。

精确测量方法研究[J].仪器仪表学报,2017,38(1): 74-82.

- [13]梁大伟.雷达目标RCS成像测量系统测控软件设计与 开发[D].西安:西安电子科技大学,2022.
- [14] OTSU N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms [J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, 1979,9(1): 62-66.

### 作者简介:

**程人民** 男,硕士研究生,主要研究方向为目标 RCS 测量技术、雷达成像技术。

谢 荣 男,博士,副教授,主要研究方向为阵列信号 处理,雷达信号处理的理论与系统设计。

**冉** 磊 男,博士,副教授,主要研究方向为雷达成像 技术。

**刘 峥** 男,博士,教授,主要研究方向为雷达精确制 导技术、多传感器融合技术。