

# 天基毫米波空间碎片观测雷达系统分析与设计

李道京<sup>1</sup>, 刘 波<sup>1,2</sup>, 尹建凤<sup>3</sup>, 乔 明<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院电子学研究所微波成像技术国家重点实验室, 北京 100190;  
2. 中国科学院研究生院, 北京 100190; 3. 中国空间技术研究院, 北京 100094)

**摘 要:** 介绍了天基毫米波空间碎片观测雷达的难点和关键技术, 提出了解决问题的思路。将同时多波束天线引入到高速目标探测中, 分析了雷达天线和发射机的形式, 采用多频信号处理方法解决多普勒模糊问题。给出了空间站载天基毫米波雷达的系统参数, 分析了测距、测角、测速精度。在天球坐标系下建立了雷达平台坐标系, 通过速度分解和坐标转换, 结合雷达成像的方法分析了雷达和碎片间的相对速度、位置的几何关系, 在此基础上对空间站载天基毫米波雷达系统空间碎片轨道预测性能进行了分析。

**关键词:** 天基雷达; 毫米波雷达; 空间碎片; 运动目标探测; 空间站; SAR/ISAR

中图分类号: TN958 文献标识码: A 文章编号: 1000-1328(2010)12-2746-08

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2010.12.019

## Analysis and Design of Spaceborne MMW Radar for Space Debris Observation System

LI Dao-jing<sup>1</sup>, LIU Bo<sup>1,2</sup>, YIN Jian-feng<sup>3</sup>, QIAO Ming<sup>1,2</sup>

(1. National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Institute of Electronics,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
3. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Key techniques of spaceborne millimeter-wave (MMW) radar and some probes for space debris observation are introduced in this paper. First, the simultaneous multi-beam antenna is introduced into high-speed object detection and the modes of the radar antenna and transmitter is analyzed. In order to reduce the Doppler ambiguity, a multi-frequency signal processing method is used. The space station MMW radar parameters are given, and ranging, angle resolving and velocity measurement accuracies are analyzed. And then the radar platform coordinate system is created in celestial coordinate system. The relative position and velocity between radar and debris as well as the corresponding accuracies are investigated by velocity decomposition and coordinates conversion combined with radar imaging method. At last space station MMW radar parameters are given and the performance of space debris orbit prediction is also analyzed.

**Key words:** Spaceborne radar; MMW radar; Space debris; Moving target detection; Space station; SAR/ISAR

## 0 引 言

天基空间碎片观测雷达是指装载在天基平台上用于空间碎片探测、运动参数测量和轨道预测的雷达系统。天基空间碎片观测雷达特别适合工作在毫米波段,一方面,毫米波段雷达波长较短,易于观测

尺寸较小的空间碎片<sup>[1]</sup>,而其体积和重量较小的特点,也适用于天基平台。最近几年,有文献[2]提出将天基雷达用于观测尺度范围为0.5cm-5cm的空间碎片,以弥补地基雷达对小尺度空间碎片观测能力的不足。

从应用需求看,一个完整的空间目标观测概念,

应包括目标探测、成像和定轨三个方面的重要内容。对空间碎片观测而言,如果不解决其轨道预测问题,天基雷达就失去了它的意义,这也许是迄今为止仍然没有一个用于空间碎片观测的在轨测量雷达系统的重要原因。

我国在天基雷达空间目标观测领域开展了一些理论研究工作<sup>[3-5]</sup>,提出了一些对高速运动空间目标(包括碎片)的探测、成像和测速方法,本文在此基础上进一步系统地研究了天基毫米波空间碎片观测雷达中的相关问题,以空间站作为天基工作平台,对雷达系统的方案和参数进行了论述和分析。

## 1 面临问题和关键技术

### 1.1 空间碎片观测区域的覆盖

从空间碎片普查观测的角度讲,雷达探测区间能覆盖天基平台前进方向半球空域最好,可解决多方向碎片探测问题。基于天基平台的毫米波雷达观测区域如图 1 所示,其中大球表示地球,小球表示某时刻雷达的可观测区域,筒状结构内包含的区域即为所有可被雷达观测到的区域集合。

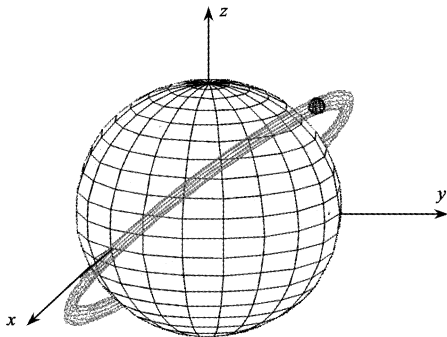


图 1 天基雷达探测区域示意图

Fig. 1 Spaceborne radar detection area

为在一定数据率下,实现上述探测区间的覆盖,雷达探测方式和天线的形式都需深入研究。可取的是不过度复杂的具有同时多波束的宽覆盖天线。同时,根据天基平台周围空间碎片的尺寸和其径向速度的大小来划分目标的威胁等级,确定天基雷达在某个时间段的观测方向,插入目标确认和重复观测任务,研究观测过程中雷达和碎片的时空关系也十分必要。

### 1.2 低信噪比空间碎片的探测和运动参数估计

尺度在厘米级的空间碎片由于其雷达横截面积

很小,要达到探测所需的信噪比,需要较大尺寸的雷达天线和大发射功率。在天基环境下,这两个条件很难保证。脉冲积累尤其是脉冲相干积累是提高雷达探测信噪比的一个有效方法。从理论上讲,1000 个脉冲的相干积累可获得 30dB 的信噪比提升,可大大提升雷达对目标的探测性能。但由于目标和雷达处于高速运动状态,目标大范围的距离徙动,使传统相干积累的效果极为有限,需要研究新的运动目标探测技术。

解决上述问题的一个办法是降低雷达的距离分辨率,降低分辨率会给随后其它信号处理工作如目标速度在三维空间求解带来很多困难。由于提高距离分辨率会增大系统信号处理的压力但并不会影响目标信噪比,为同时解决目标速度的测量问题,系统使用宽带信号并具有高分辨率成像模式是有意义的。

和传统的目标探测雷达相比,以 SAR 和 ISAR 为代表的成像雷达对目标成像时都实施了运动补偿,通过长时间的相干积累,获得了较大的目标信噪比改善,这体现在 SAR 雷达方程中的信噪比和目标距离的 3 次方成反比。可考虑将 SAR 和 ISAR 的一些成像处理方法引入空间目标的探测过程,用来提高检测目标的信噪比。在此基础上,雷达对远距离目标信号可采用长时间相干积累,对近距离目标信号可采用短时间相干积累,并自动实现一定的灵敏度时间控制(STC)功能<sup>[6]</sup>。由于在成像处理过程中,获得目标径向速度的同时,也可获得目标的横向速度,故雷达成像可获得更多的运动目标信息。

参数估计是运动补偿的基础,对高速运动目标进行参数估计,可采用多频信号解决回波信号的多普勒模糊问题<sup>[4]</sup>,在这过程中,Keystone 变换和 Radon 变换可作为对运动目标进行距离徙动校正的主要方法。

### 1.3 空间碎片的轨道测量

在天基条件下,雷达和空间碎片间存在高速径向和横向运动,传统的搜索-捕获-跟踪-目标运动参数估计-轨道测量过程很难建立。另一方面由于雷达的作用距离有限,基于天线波束顺序扫描通过连续跟踪从目标较短的轨迹获取轨道信息比较困难,需研究新的目标轨道测量方法。

雷达容易获取某时刻目标的三维位置以及径向速度,通过成像处理,也能获得目标的横向速度,但

只有将径向速度和横向速度分解到平台坐标系三维空间并转入天球坐标系,才可能解决目标的轨道预测问题。在天基平台上,由于空间正交布局天线的基线较短,传统地基方法<sup>[7]</sup>对目标在三维空间的测速精度很低不能满足轨道预测的要求。解决问题的一个办法是,提高雷达的分辨率并对目标进行成像处理,在高分辨率成像模式下利用图像配准<sup>[5]</sup>将获得的目标速度分解到雷达平台的三维空间,获取目标三维运动参数,为其轨道预测创造条件。

设平台坐标系和天球坐标系的关系如图 2 所示,平台坐标系原点  $O'$  到地心的方向可设为  $x'$  轴方向, $z'$  轴方向垂直于平台的轨道平面, $y'$  轴与  $x'$  轴  $z'$  轴构成右手坐标系,同时定义  $y'$  轴为平台前进方向, $x'O'y'$  平面为天线波束俯仰扫描平面, $y'O'z'$  平面为天线波束方位扫描平面。当天线波束任意指向时,为求解目标三维速度,需在坐标系原点  $O'$  和  $x'$ 、 $y'$  和  $z'$  三轴上正交布设四个天线;当天线波束指向在  $x'O'y'$  平面时,需在坐标系原点  $O'$  和  $x'$  和  $z'$  两轴上正交布设三个天线,其基线长度可设为  $l_{x'}$  和  $l_{z'}$ 。

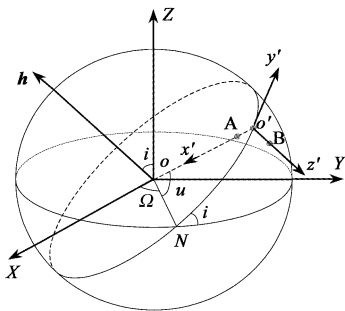


图 2 平台坐标系和三天线雷达几何关系

Fig. 2 Platform coordinate system and the three-antenna radar geometry

由于需使用多天线结构,且在有限基线数目下准确分解目标速度,雷达还需具有较高的分辨率,这样的空间碎片观测雷达系统实际上较为复杂。

## 2 空间站载雷达系统

空间站是天基毫米波空间目标观测雷达的一类重要应用平台。一方面,空间站体积大、在轨运行时间长,难免会受到空间碎片的撞击。故对它周围的近距离空间碎片进行观测预警,根据碎片轨道预报实施机动规避,对载人空间站自身安全具有重要意义。

另一方面,载人空间站较大的功率和质量载荷能力也为天基毫米波空间目标观测雷达的使用提供了条件。

### 2.1 雷达的探测方式

在航天器轨道上空间碎片一般不会垂直上下飞过,和空间站同高度近  $180^\circ$  反向运动的碎片少,同高度近  $0^\circ$  同向运动的碎片较多,但由于径向速度小威胁不大,从安全预警的角度讲,空间站载毫米波雷达主要需观测以一定夹角横穿其轨道的空间碎片,有限的碎片数量和长时间的观测机会,也为分区域时分观测提供了条件。在此基础上,碎片普查所需的半球状观测区域可简化为一空间站前进方向俯仰方位窄的扇形观测区域,可考虑由一俯仰向具有同时多波束的天线,并利用波束时分扫描的方式覆盖整个扇形观测区,经初步分析俯仰波束扫描范围可设置为  $\pm 45^\circ$ ,进一步考虑到目标确认和重复观测任务,天线的方位波束也需小角度扫描。

### 2.2 天线和发射机的形式

俯仰向具有同时多波束的两维扫描天线有有源相控阵、无源相控阵和同时多波束阵列等多种形式可供选择,但由于其涉及目标探测、成像和轨道预测等多个问题,天线系统复杂度也决定未来在天基平台的使用效果,其具体方案需认真研究并进行折中处理。

从技术角度讲,使用毫米波有源相控阵天线,容易实现宽波束发射,多窄波束同时接收,也容易实现两维波束扫描,但由于其发射效率较低,技术也较为复杂,目前空间应用风险还较大。近年 Ka 波段的功率放大器得到快速发展,利用功率合成和空间合成技术固态功率放大器的功率已达到百瓦量级,但其效率仅有 10%,其空间应用还有一定的差距。与之相比,空间 TWT 的效率已达到 50%,输出功率也较大,因此现阶段可考虑使用高效空间 TWT 放大器。

基于上述情况,系统可考虑使用收发天线分置方案,发射采用由多个宽波束子天线组成的阵列天线,覆盖较大的观测区间,子波束的切换可利用开关网络实现;利用基于 LTCC 技术的阵元带有 LNA 单元的相控阵天线实现多窄波束信号同时接收,该方案的不足在于发射波束在空间连续布设困难。

为表述方便,将上述天线称之为发射和接收天线阵列。雷达和目标存在高速相对运动时,雷达在

单脉冲信噪比较低的情况下在距离向和角度上建立常规概念的“跟踪”是困难的,而且天基平台对信号实现实时处理满足目标跟踪所需也不容易。从这个角度讲,在大范围的观测区间尤其是在方位向布设数量较多的发射波束,并使用二维波束扫描相控阵天线连续跟踪运动目标的意义不大。

假定发射和接收天线波束指向始终处于  $x'O'y'$  平面,为解决目标轨道预测所需的目标速度测量问题,需在天基平台坐标系原点  $O'$  布设由多个宽波束子天线组成的俯仰向宽覆盖发射天线阵列,在坐标系原点  $O'$ 、 $x'$  和  $z'$  两轴上布设三个可俯仰向扫描的同时多波束接收天线阵列。

2.3 雷达体制和信号处理方法

为实现系统全部功能,系统天线收发体制确定为一发三收,与之相对应,系统将配置三组接收通道的信号记录和数据处理设备。前期的研究工作<sup>[4-6]</sup>表明,多频组合的信号波形和双频共轭处理结合,可较好地解决回波信号的多普勒模糊问题。多频组合信号的形成,可利用线性调频+多点频信号/宽带线性调频信号子带分割/中心频率不同的子带线性调频信号快时间拼接等方式实现。与之对应的信号处理过程具有目标探测和二维成像处理一体化的特点,而信号相干处理时间或处理脉冲数则由目标的横向速度和某距离段的波束覆盖宽度决定<sup>[6]</sup>。

假定采用三个中心频率  $f_1, f_2, f_3$  的子带线性调频信号快时间拼接信号波形,其波形如图 3 所示,其中  $f_1$  信号和  $f_2$  信号间的频差较小,每个子带信号的带宽为  $B_r$ ,整个信号带宽为  $3B_r$ 。

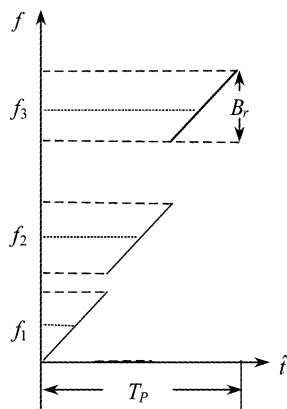


图 3 雷达信号波形

Fig. 3 Radar signal waveform

系统每组接收通道信号处理流程如图 4 所示,距离走动校正主要涉及 Keystone 变换,较低距离分辨率时目标探测可在距离-多普勒时频域完成;利用长短两个等效波长解除多普勒模糊,分粗精两级进行径向速度和横向速度估计;利用合成宽带信号在距离-多普勒域对目标完成二维高分辨率成像。

对在空间正交的三组接收通道的高分辨率目标图像进行干涉处理,获取目标三维空间位置和速度信息,在此基础上可对其实施轨道预测。

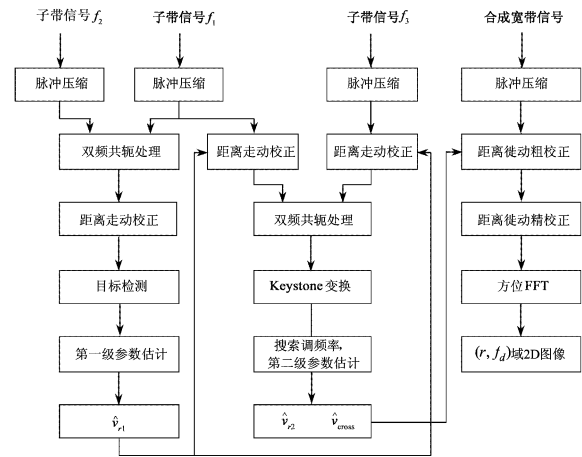


图 4 每组接收通道信号处理流程

Fig. 4 Signal processing flow chart for each receive channel

3 雷达系统参数

初步考虑空间站载毫米波雷达工作在 Ka 波段,对 3-5cm 尺度碎片(平均 RCS 按 0.01m<sup>2</sup> 考虑)最大作用距离为 15km。经多方折中考虑确定雷达系统参数和性能指标如表 1 所示。

3.1 工作频率选择

按文献[4]的频率选取原则,频差较小的两载频用于解原载频空间目标信号的多普勒中心频率模糊和多普勒带宽模糊,频差较大的两载频用于解原载频空间目标信号的多普勒带宽模糊,给出的系统工作频率约束条件如下

$$B_r \leq |f_2 - f_1| < \min\left(\frac{1}{4} \frac{\text{PRF} \cdot c}{v_{r\_max}}, \frac{\text{PRF} \cdot R_0 c}{2v_{c\_max}^2 \cdot T_s}\right) \quad (1)$$

$$|f_3 - f_1| < \frac{\text{PRF} \cdot R_0 c}{2v_{c\_max}^2 \cdot T_s} \quad (2)$$

其中,  $c$  为光速,  $R_0$  为雷达到目标的参考距离。目标参数估计步骤详见文献[4]。

表 1 天基毫米波雷达参数和性能指标

Table 1 Spaceborne MMW radar parameters and performance

项目	参数	项目	参数
标称中心频率 $f_0$	35GHz	接收天线同时波束数(俯仰向)	4
标称波长 $\lambda$	0.0086m	接收天线俯仰向扫描范围	$\pm 45^\circ$
子带中心频率 $f_1$	35GHz	接收天线俯仰向波驻位置数	30
子带中心频率 $f_2$	35.07GHz	探测时最小信号相干处理时间 $T_s$	0.1024s
子带中心频率 $f_3$	36.5GHz	探测时最小相干处理脉冲数 $N$	1024
子带信号带宽 $B_r$	100MHz	普查探测时系统覆盖俯仰区间时间	3.072s
合成宽带信号带宽	300MHz	接收机噪声系数 $F_n$	4dB
脉冲重复频率 PRF	10kHz	子带信号距离分辨率	1.5m
发射脉冲宽度 $T_p$	30 $\mu$ s	合成宽带信号距离分辨率	0.5m
峰值发射功率 $P_t$	300W	目标最大径向速度 $v_{r\_max}$	10000m/s
发射子天线尺寸(方位 $\times$ 俯仰)	0.15m $\times$ 0.15m	目标最大横向速度 $v_{c\_max}$	7500m/s
发射子天线波束宽度	$3^\circ \times 3^\circ$	目标雷达截面积 $\sigma_0$	0.01m <sup>2</sup>
发射子天线增益 $G_t$	32.5dB	检测信噪比 $D$	10dB
发射子天线数量(俯仰向)	30	系统总损耗 $L$	7dB
接收天线尺寸(方位 $\times$ 俯仰)	0.15m $\times$ 0.6m	最大探测距离 $R_{max}$	15km
接收子天线波束宽度	$3^\circ \times 0.75^\circ$	空间正交布设天线阵列基线 $l$	3-10m
接收子天线增益 $G_r$	38.5dB	系统接收通道数	3 $\times$ 4

### 3.2 天线尺寸选择

本文雷达要处理速度很高的空间目标,当雷达天线不能连续跟踪目标时,目标和雷达间的相对转角可由目标穿过雷达波束形成,此时的横向分辨率由雷达天线波束宽度决定。系统的成像分辨率确定为 0.5m,为保证足够的天线增益同时获得较高的横向分辨率,天线子波束宽度应不少于  $0.5^\circ$ 。与此同时,由于较长的信号相干处理时间对获得高精度的速度估计极为重要,从这个意义上讲,在保证天线尺寸获得足够增益的同时,选择方位向波束较宽的天线也具有意义。

目标探测时最小信号相干处理时间由波束宽度、斜距和目标的横向(方位向)速度决定,其最长信号相干处理时间由最大作用距离和目标的径向速度决定。根据表 1 参数,系统最长信号相干处理时间可达 1.5s;在 15km 处,系统可获得的最小信号相干处理时间为 0.1s;普查时系统覆盖所有俯仰探测区间的时间约为 3s。

### 3.3 探测距离分析

雷达的最大探测距离为

$$R_{max} = \left( \frac{P_t T_p G_t G_r \lambda^2 \sigma_0 N}{(4\pi)^3 K T_0 F_n D L} \right)^{1/4} \quad (3)$$

其中  $K$  为玻尔兹曼常数,  $T_0$  为噪声温度。

雷达目标探测过程中的信号相干处理时间或脉冲数由目标的横向速度和某距离段的波束覆盖

宽度决定。依据上表中的参数,在 15km 处,雷达可处理的脉冲数约为 1000 个,利用文献[4-5]的方法,对高速目标的回波信号进行距离徙动校正并实施运动补偿处理,假定其信号处理损失为 3dB,仍可获得 27dB 左右的信噪比提升。在表 1 探测距离分析中,由于目标首次检测仅使用  $f_1$  和  $f_2$  信号,有效脉冲宽度按 20 $\mu$ s 考虑,全系统其它损耗按 4dB 考虑。

### 3.4 测距和测角精度分析

本文目标探测时的检测信噪比设在 10dB,但精度分析时的信噪比拟设在 15dB 以上。

本文分析的高速运动空间目标在 15km 处的单脉冲信噪比约为 -15dB,传统的探测和单脉冲跟踪测量过程不能建立。本文毫米波雷达通过多脉冲相干处理提高信噪比至约 10dB 后,再实施目标检测,然后再对目标进行定位处理。由于目标的运动和检测是在一个较长的时间完成的,此时要确定的目标位置已变为由径向速度和横向速度决定的成像平面上的等效空间位置,这个等效空间位置可与某参考时刻的参考空间位置相对应。根据文献[5],假定信号的持续时间范围为  $[-T_s/2, T_s/2]$ ,等效空间位置对应的参考时间可设为零时刻。

雷达测距精度主要取决于距离分辨率和信噪比,其表达式详见文献[8]。一般来讲,在热噪声环境下,当信噪比在 15dB 时,雷达的测距精度在理论上约为其距离分辨率的十分之一。对本文,考虑到

距离单元量化的影响,其测距精度可优于 0.5m。与之相近,雷达的测角精度主要取决于波束宽度和信噪比,即使用波束宽度度量,在斜距 15km 处俯仰向的位置精度约为 200m,方位向的位置精度约为 800m。在此基础上,对主要在方位向横穿波束的空间碎片,一方面利用俯仰向四波束的比幅处理,可使 15km 处俯仰向的位置测量精度至少优于 40m,这意味着系统对目标轨道高度的测量精度优于 40m,这对于以轨道高度精度为主要指标的轨道预测来讲具有重要意义;另一方面,利用在方位向横穿波束的空间碎片产生的多普勒信息,还可提高其方位向的位置测量精度。

### 3.5 径向和横向速度精度分析

在本文条件下,目标的回波信号可看作一线性调频信号,采用去调频处理,可同时估计线性调频信号的中心频率和调频率,此时信号的中心频率和目标的径向速度相对应,信号的调频率和目标的横向速度相对应。根据文献[8],目标径向速度测量精度可写为

$$\sigma_{v_r} = \frac{\lambda}{2\pi T_s} \sqrt{\frac{3}{N \cdot \text{SNR}}} \quad (4)$$

其中,SNR 为单脉冲信噪比,  $N$  为脉冲数。

当多脉冲信噪比在 15dB 时,在本文参数下,公式(4)给出的目标径向速度测量精度优于 0.004m/s。实际应用中,考虑到多普勒频率量化的影响,其径向速度测量精度也可达到 0.04m/s。

文献[9]给出了线性调频信号调频率测量精度的公式,经转化得目标横向速度精度为

$$\sigma_{v_c} = \sqrt{\frac{\lambda}{8}} \times \sqrt{\frac{R_0}{f_{rm}} \frac{96(1 + \frac{1}{2\text{SNR}})}{NT_s^4 \text{SNR}} + \frac{f_{rm}}{R_0} \sigma_R^2} \quad (5)$$

其中  $f_{rm} = \frac{2v_c^2}{\lambda R_0}$  为调频率,  $\sigma_R$  为测距精度。

公式(5)本质上是基于相位估计的,不适用于在低信噪比下使用,仅可用于横向速度估计精度的参考。在本文条件下,当多脉冲信噪比在 15dB 时,可采用去调频处理估计信号的调频率,并求解目标的横向速度。仿真表明:

假定目标距离 15km,横向速度为 7500m/s,处理脉冲数为 1024 时,目标横向速度测量精度可达 0.3m/s;横向速度为 2500m/s,处理脉冲数为 1024 时,目标横向速度测量精度可达 0.7m/s。

显然,目标横向速度较低时,其估计精度也较

低。由于目标横向速度的精确估计是在目标探测后实施的,雷达的处理脉冲数可由目标的横向速度和该距离段的波束覆盖宽度决定。当目标横向速度为 2500m/s 时,处理脉冲数通过拼接可达到 3000 个,此时其横向速度的测量精度可提高至 0.07m/s。

当目标距离 7.5km,多脉冲信噪比可上升至约 27dB,目标横向速度为 7500m/s 时,可处理脉冲数为 512,其横向速度的测量精度约为 0.3m/s;目标横向速度为 2500m/s 时,可处理脉冲数为 1500,其横向速度的测量精度约为 0.09m/s。

## 4 目标轨道测量

### 4.1 速度分解和坐标转换方法

在雷达极坐标测得的目标位置和速度矢量需转换到平台坐标系,再从平台坐标系转换到地球坐标系<sup>[10]</sup>。假定雷达天线波束在  $x'O'y'$  平面内扫描,目标位置、速度和平台坐标系的几何关系如图 5 所示。

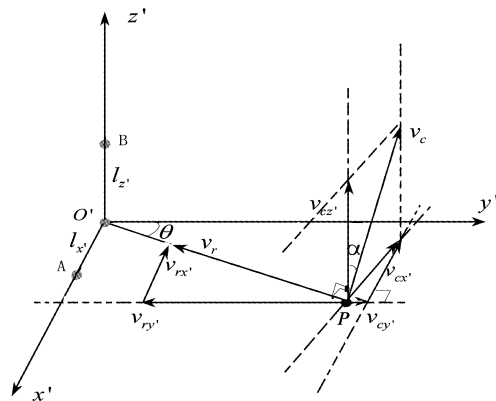


图 5 目标位置、速度和平台坐标系的几何关系  
Fig. 5 Geometry of target's position and velocity in platform coordinate system

设  $x'O'y'$  平面上目标  $P$  和  $y'$  轴夹角为  $\theta$ (可理解为俯仰向扫描角),目标  $P$  相对雷达的速度  $v$  由径向速度  $v_r$  和横向速度  $v_c$  合成。根据几何关系,径向速度  $v_r$  和横向速度  $v_c$  在平台坐标系内可以分解成

$$\begin{aligned} v_{rx'} &= -v_r \sin\theta \\ v_{ry'} &= -v_r \cos\theta \\ v_{rz'} &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} v_{cx'} &= v_c \sin\alpha \cos\theta \\ v_{cy'} &= -v_c \sin\alpha \sin\theta \\ v_{cz'} &= v_c \cos\alpha \end{aligned} \quad (7)$$

根据公式(7)式有

$$v_{cy'} = -v_{cx'} \tan\theta \quad (8)$$

对目标成像处理后,将天线A和天线B的图像分别与位于原点 $O'$ 的天线图像进行配准处理,可获得目标的位置偏移量 $\Delta x'_{nx}$ 和 $\Delta x'_{nz}$ ,并有如下关系式<sup>[5]</sup>

$$\frac{\Delta x'_{nx}}{\Delta x'_{nz}} = \frac{v_{cx'} l_x \cos\theta}{v_{cz'} l_z} \quad (9)$$

$$v_{cz'} = \frac{l_x \cos\theta}{l_z} \frac{\Delta x'_{nz}}{\Delta x'_{nx}} v_{cx'} \quad (10)$$

根据已知,目标相对雷达的横向速度 $v_c$ 可以通过对回波信号处理得到,并且有

$$v_c^2 = v_{cx'}^2 + v_{cy'}^2 + v_{cz'}^2 \quad (11)$$

联立公式(8)、(10)和(11)可求得

$$|v_{cx'}| = \frac{|v_c|}{\sqrt{1 + \tan^2\theta + \left(\frac{l_x \Delta x'_{nz}}{l_z \Delta x'_{nx}} \cos\theta\right)^2}} \quad (12)$$

其方向可以通过比较A和 $O'$ 两图像偏移量的方向来确定。

由此可完成目标速度矢量从雷达极坐标系到平台坐标系转换,并有

$$\begin{aligned} v_{x'} &= v_{rx'} + v_{cx'} \\ v_{y'} &= v_{ry'} + v_{cy'} \\ v_{z'} &= v_{rz'} + v_{cz'} \end{aligned} \quad (13)$$

#### 4.2 干涉定位和测速精度分析

根据波束指向,雷达很容易将目标的位置和速度矢量从极坐标系转换到平台坐标系,其在平台坐标系的位置精度取决于距离分辨率、波束宽度、信噪比和波束指向精度。由于本文雷达实际上工作在成像方式,成像处理后目标的位置不仅要求处在 $x'O'y'$ 平面,而且要求具有足够的精度,以保证径向速度和横向速度的精确分解,因为一个波束指向 $0.01^\circ$ 的误差就可能较大的速度分解误差。

解决上述问题的方法就是利用在方位向和俯仰向正交布设的天线,对图像进行干涉处理,提高对目标的测角和定位精度,此时的定位精度和系统分辨率相当。在干涉测角的实际应用过程中,干涉基线长度的选择,一方面要考虑干涉测角精度,另一方面要考虑通过图像配准得到的目标位置偏移量测量精度,还要考虑干涉天线在天基平台上物理布局的可行性。

在本文条件下,天线干涉基线长度可在3-10m间选择,由于天线在俯仰向有 $\pm 45^\circ$ 扫描角,为保证和方位向相近的等效基线长度,俯仰向天线干涉基

线长度应为方位向的2倍;当系统分辨率为0.5m时,图像10倍插值下3m基线可产生60个图像单元以约1.7%的精度分解横向速度。

当信噪比15dB时,干涉相差的估值精度约为 $0.16\text{rad}(9.4^\circ)$ 。当天线干涉基线3m,雷达对目标获得的测角精度约为 $0.004^\circ$ ,在15km处对应的位置精度约为1m。采用干涉测角方法的问题是存在相位模糊。当天线干涉基线3m时,其模糊角度约为 $0.16^\circ$ ,在15km处的不模糊波束覆盖范围约为43m;当天线干涉基线6m时,其模糊角度约为 $0.08^\circ$ ,在15km处的不模糊波束覆盖范围约为21.5m。

假定本文在俯仰向天线干涉基线选为3m,采用半角跟踪器干涉处理方案<sup>[11]</sup>,在15km处俯仰向的最高位置精度约为1m。由于本文利用俯仰向四波束的比幅处理,已使15km处俯仰向的位置测量精度优于40m,俯仰向的干涉测角不存在模糊问题。

对在方位向运动的横穿波束的空间目标,利用多普勒信息得到的方位向位置精度为<sup>[5]</sup>

$$\sigma_A = \frac{(\lambda\sigma_{fd} + 2\sigma_{vr})R_0}{2v_c} \quad (14)$$

其中, $\sigma_{fd} = 1/T_s$ 为多普勒频率分辨率, $\sigma_{vr}$ 为目标径向速度的测量精度。

根据公式(14)知道,在斜距15km处,当目标的横向速度为7500m/s时,目标在方位向的位置精度约为0.2m;在斜距15km处,当目标的横向速度为75m/s时,目标在方位向的位置精度约为20m。

由于运动目标自身的径向运动和其在方位向的位置偏移都可产生多普勒频率,公式(14)给出的方位向位置精度还是相对的,通过对在方位向布设的两个天线图像进行干涉处理,可获得目标在方位向的位置偏移信息,并可判断成像后的目标位置是否在 $O'x'y'$ 平面,当方位向天线干涉基线为3m时,其在15km处方位向的位置精度约为1m。在方位向横穿波束的空间目标,如成像后的目标位置不在 $O'x'y'$ 平面,可通过对其信号处理时间范围的重新选取,减少目标方位向位置偏移量的影响,使之满足本文速度分解模型要求。

本文在斜距15km处方位向波束覆盖范围约为800m,方位向的干涉测角虽存在模糊问题,但本文多频信号的使用,也可为解除相位模糊提供有利条件。

基于上述参数的计算分析表明,当雷达对目标的测角精度为 $0.004^\circ$ ,在15km处对应的位置测量精度约为1m,在平台坐标系获得的目标速度精度有

可能达到  $0.5\text{m/s} - 1\text{m/s}$ 。

### 4.3 轨道预测精度分析

在平台直角坐标系获得目标位置和速度矢量,可转换到天球坐标系三维空间并实施轨道预测。目前空间站平台已具有较高的自主定位、定姿和测速精度,平台坐标系到天球坐标系坐标转换误差不大。雷达对目标具有较高精度的测距、测角和径向速度测量能力,但对目标横向速度的测量误差较大,故雷达对目标的测速精度主要由其横向速度的测量精度决定。

空间目标的轨道预测精度主要取决于对目标的测速精度,在协议天球坐标系下以国际空间站轨道参数为例的仿真实验表明,当目标速度误差为  $0.5\text{m/s}$  时,其轨道半长轴的预测误差约为  $0.7\text{km}$ ;当目标速度误差为  $1\text{m/s}$  时,其轨道半长轴的预测误差约为  $1.4\text{km}$ ;当速度误差为  $3\text{m/s}$ ,其轨道半长轴预测误差约为  $4.2\text{km}$ 。

由此看来,空间目标的速度测量精度不高,会产生轨道预测误差,增加了对目标进行威胁判断的难度,将迫使雷达增大对空间碎片的探测范围,进一步提高对空间目标的测速精度肯定是未来重要的研究内容。

## 5 结束语

本文介绍了天基毫米波空间碎片观测雷达的难点和关键技术,提出了解决问题的思路,讨论了雷达系统的体制和方案,给出了雷达系统参数并对其空间碎片轨道预测性能进行了分析。尽管单次观测只能获得空间碎片粗略的轨道信息,但通过编目处理和多次重复观测,对空间碎片也能实现较高精度的轨道预测,相关研究工作值得注意。用天基雷达观测空间碎片是一项难度很大的工作,本文对此做了一些探索性的研究,对我国天基毫米波空间碎片观测雷达的发展应具有一定的参考价值。

### 参 考 文 献

[ 1 ] 张光义. 毫米波空间目标探测雷达[J]. 电子工程信息, 2003(6):1-7. [Zhang Guang-yi. Millimeter-wave space target detection radar[J]. Electronic Engineering Information, 2003

(6):1-7.]

- [ 2 ] 谭莹. 天基空间目标探测技术探讨[J]. 空间电子技术, 2006(3):5-10. [Tan Ying. Space-based space target detection technology[J]. Space Electronic Technology, 2006(3):5-10.]
- [ 3 ] 吕洁,吴季,孙波. 利用天基雷达观测低地轨道上的危险空间碎片[J]. 遥感技术与应用,2006,21(2):103-108. [Lv Jie, WU Ji, SUN Bo. Space debris detection by spaceborne radar in low earth orbit[J]. Remote Sensing and Application, 2006,21(2):103-108.]
- [ 4 ] 尹建凤,李道京,吴一戎. 基于星载毫米波雷达的空间目标探测与成像[J]. 宇航学报, 2007,28(6):1683-1688. [Yin Jian-feng, Li Dao-jing, Wu Yi-rong. Space target detection and imaging based on spaceborne millimeter-wave radar[J]. Journal of Astronautics, 2007,28(6):1683-1688.]
- [ 5 ] 尹建凤. SAR 高速运动目标检测与成像方法研究[D]. 北京:中国科学院电子学研究所博士论文,2009. [Yin Jian-feng. Research on the method of SAR high-speed moving target detection and imaging[D]. Beijing: Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2009.]
- [ 6 ] 李道京,尹建凤,吴一戎,等. 雷达成像与目标探测[J]. 现代雷达,2006,28(10):5-8. [Li Dao-jing, Yin Jian-feng, Wu Yi-rong, et al. Radar imaging and target detection[J]. Modern Radar, 2006,28(10):5-8.]
- [ 7 ] 郭伟,崔海英. 一种新型电磁篱笆设计方案[C]. 第五届全国空间碎片专题研讨会. 烟台, 2009年7月. [Guo Wei, Cui Hai-ying. A new NAVSPASUR-type design[C]. Proceedings of Fifth National Conference on Space Debris. Yantai, July, 2009.]
- [ 8 ] Skolnik M I. 雷达系统导论[M]. 林茂庸等,译. 北京:国防工业出版社,1992:335-344.
- [ 9 ] Plege S, Porat B. Linear FM signal parameter estimation from discrete time observations[J]. IEEE Trans. On AES. 1991, 27(4):607-616.
- [ 10 ] 王威,于志坚. 航天器轨道确定——模型与算法[M]. 北京:国防工业出版社,2007:40-44.
- [ 11 ] Mahafza B R. Radar system analysis and design using MATLAB, second edition[M]. Taylor & Francis Group LLC, 2005.

作者简介:李道京(1964-),男,中国科学院电子学研究所研究员,主要研究方向为雷达系统和信号处理。

通信地址:北京市海淀区北四环西路19号主楼341室(100190)

电话:(010)58887120

E-mail:lidj@mails.ie.ac.cn

(编辑:余 未)