

基于快速分解后向投影算法的小天体快速三维成像

胡超然, 韦明川

(哈尔滨工业大学卫星技术研究所, 哈尔滨 150001)

摘要: 雷达成像技术凭借其快速、无损伤以及高分辨率的特点, 在深空探测领域得到了日益广泛的关注。针对合成孔径雷达(Synthetic aperture radar, SAR)三维成像过程中运算效率低的问题, 基于小天体弱引力和快速自旋的特点, 提出了一种适用于慢飞越观测模式的快速分解后向投影(Fast factorized back-projection, FFBP)三维成像算法。首先, 分析了慢飞越模式下的等效运动模型, 基于运动模型将二维极坐标系成像域扩展至三维球坐标系成像域, 对三维FFBP算法中的孔径划分以及图像融合问题进行了深入分析, 推导了子孔径二维划分规则和图像递归融合方法, 并给出了具体实现流程。最后通过数值仿真和实测数据验证了算法的有效性。实验结果表明, 所提成像算法可大幅提升运算效率, 根据不同的孔径划分方式, 相较于后向投影(Back-projection, BP)算法, 可实现30~50倍的加速比, 并获得与经典BP算法近似的成像性能。

关键词: 星载雷达; SAR三维成像; 快速分解后向投影; 太阳系小天体; 深空探测

中图分类号: TN957.52; V11

文献标志码: A

Fast 3D Imaging of Small Solar System Bodies Based on FFBP Algorithm

HU Chaoran, WEI Mingchuan

(Research Center of Satellite Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Radar imaging technology has attracted increasing attention in the field of deep space exploration due to its fast, non-destructive, and high-resolution characteristics. To address the issue of low computational efficiency in synthetic aperture radar (SAR) 3D imaging, a fast factorized back-projection (FFBP) 3D imaging algorithm suitable for slow flyby observation modes is proposed leveraging the weak gravity and rapid spin characteristics of small solar system bodies. Initially, the equivalent motion model under slow flyby mode is analyzed, extending the imaging domain from a 2D polar coordinate system to a 3D spherical coordinate system. An in-depth analysis of aperture division and image fusion issues within the 3D FFBP algorithm is conducted, deriving rules for 2D sub-aperture division and recursive image fusion methods, along with a detailed implementation process. Finally, the effectiveness of the algorithm is validated through numerical simulations and measured data. Experimental results show that the proposed imaging algorithm significantly enhances computational efficiency. Compared to the back-projection (BP) algorithm, it can achieve a speedup ratio of 30–50 times while obtaining imaging performance comparable to the classical BP algorithm.

Key words: space-borne radar; SAR 3D imaging; fast factorized back-projection (FFBP); small solar system body; deep space exploration

引 言

探索太阳系小天体对于深入了解太阳系的形成与演化过程具有重要的科学意义。近年来,随着航天技术的不断发展,空间探测已成为探测小天体的重要技术手段之一^[1]。雷达技术是当前遥感探测领域唯一能够直接观测天体内部信息的方法,与其他探测天体内部特征的技术手段相比,具有高速、无损和高分辨率等优点^[2]。欧洲航天局(European Space Agency, ESA)于2004年发射的罗塞塔任务中^[3-4],首次尝试了搭载雷达仪器探测太阳系小天体,该任务由轨道器和着陆器搭载的雷达设备以双站模式协同工作,旨在探测彗星67P/楚留莫夫-格拉西缅科(67P/Churyumov-Gerasimenko)的内部结构,并已取得一定的成果^[5]。计划在2024年发射的HERA任务将部署两颗搭载低频雷达的6U立方星,以探究双星小行星系统迪迪莫斯(Didymos)的表面特征与内部结构^[6-7]。中国正积极实施的“天问二号”小行星探测任务中^[8],计划对小行星2016HO3进行内部结构成像和着陆采样。得益于这些空间项目的推动,近年来基于雷达技术对太阳系小天体探测的相关研究越来越深入^[9-11]。

合成孔径雷达(Synthetic aperture radar, SAR)在成本、部署方式和分辨率方面均具有显著的优势,相关技术在地球科学探测,以及月球、火星等大型天体的表面测绘、次表层结构探测方面均已有相关应用^[12-16]。对于小天体而言,其较小的尺寸、较弱的引力以及快速自旋等特征,让小天体探测任务面临更复杂的轨道设计,因此也限制了传统星载SAR观测策略对其的有效应用,因此本文基于探测器与待测天体的轨道特性^[17],分析了慢飞越观测模式下的运动模型,并基于这种运动模型设计了三维成像算法。后向投影(Back-projection, BP)算法是一种非常精确的时域成像算法,因其对探测轨迹规则性的宽容度,展现出极高的实用性和应用价值,然而成像过程中需对方向向全孔径数据逐一处理,导致其计算效率极低,因此许多加速成像算法被相继提出^[18-20]。1999年,林肯实验室的研究人员提出了快速后向投影(Fast back-projection, FBP)算法^[21],通过优化计算步骤和算法结构,有效提高了BP算法的效率。相比于只进行一次子孔径划分和相干叠加的FBP方法,快速分解后向投影(Fast factorized back-projection, FFBP)算法^[22]则采用多层次的逐级相干叠加,实现与频域成像算法计算量近似的成像效率。

针对三维成像过程中运算效率低的问题,本文在二维直线SAR和圆迹合成孔径雷达(Circular synthetic aperture radar, CSAR)的FFBP成像算法原理的基础上,深入研究了基于FFBP算法的小天体快速三维成像方法,提出了一种适用于慢飞越观测模式的快速三维成像算法。这种方法首先对全孔径进行二维子孔径划分,并根据运动模型将二维极坐标系成像域扩展到球坐标系中以建立三维子孔径成像网格。完成初级子孔径粗成像后,采用递归融合的方式生成高分辨率三维重建图像。最后,通过数值仿真实验与实测实验验证了算法的有效性,所提成像算法可大幅提升运算效率,并获得与BP算法近似的图像质量。

1 观测模式与信号模型分析

在空间探测任务中,遥感探测通常在飞越、悬停以及着陆等几个阶段展开。当观测目标体积较小时,飞行器相对于目标的自然轨道周期较长,在这种情况下雷达与目标的相对运动主要由小天体本身的自旋所主导。此时,设计飞行器沿与探测目标自转轴平行方向飞行,同时保持雷达天线对目标中心的凝视,在这个过程中利用待测天体的快速自旋特性,可通过一次慢飞越即可获取目标的全球观测信息。

本文基于以上慢飞越模式观测模式进行成像算法设计,观测场景以及坐标系定义如图1(a)所示,飞行器以速度 v 运行,其轨迹可近似为直线,目标中心为原点 O ,旋转轴为 Z 轴,目标自转角速度为 ω 。以目标本体坐标系作为参考系时,雷达与待测星体的相对运动模型可等效为一个螺旋上升轨迹,如图1(b)所示。

假设雷达发射信号为线性调频(Linear frequency modulation, LFM)脉冲,设 t_m 时刻雷达天线与目标上任意一点 N 的距离为 $R_n(t_m)$,则雷达接收到的回波信号在去除无关项后可表示为

$$s(\tau, t_m) = \omega(\tau) \exp \left[j2\pi \left(f_c \left(\tau - \frac{2R_n(t_m)}{c} \right) + \frac{1}{2} \gamma \left(\tau - \frac{2R_n(t_m)}{c} \right)^2 \right) \right] \quad (1)$$

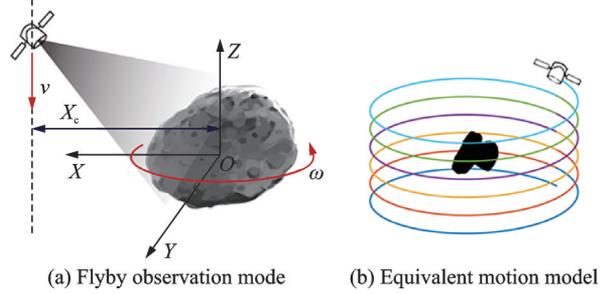


图1 飞越观测模式与等效运动模型

Fig.1 Flyby observation mode and equivalent motion model

式中: $\omega(\tau)$ 表示发射信号距离方向上的相应包络,通常近似为矩形脉冲; $\tau \in [-T_p/2, T_p/2]$; f_c 、 T_p 、 γ 分别表示LFM发射波形的载波频率、脉宽和调频率。

对式(1)中的回波信号进行混频和距离向压缩后,得到的信号可写为

$$s(\tau, t_m) = \text{sinc} \left[B \left(\tau - \frac{2R_n(t_m)}{c} \right) \right] \cdot \exp \left[-jkR_n(t_m) \right] \quad (2)$$

式中: $\text{sinc}(\tau) = \sin(\pi\tau)/\pi\tau$; B 为带宽; k 为真空中波数。

2 三维FFBP成像算法

2.1 初级子孔径成像

FFBP成像算法中,首先需要进行子孔径划分。在慢飞越观测模式下,雷达的方位向分辨率由目标小天体自旋运动产生,高度方向的分辨率由雷达运动产生,为了提高计算效率需同时对两个方向进行孔径划分。

设高度方向全孔径长度为 L_z ,共进行 J 级划分,每一级划分对应的子孔径个数为

$$N^{(j)} = 2^{(J-j)} \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (3)$$

最终得到的最小子孔径(初级子孔径)长度为

$$L_z^{(0)} = L_z / 2^J \quad (4)$$

对于方位向,采用分块处理的方法进行圆周孔径划分。设方位向全孔径长度为 L_r ,首先需确定最大子孔径长度 L_r^{\max} ,最大子孔径个数为

$$M_0 = L_r / L_r^{\max} \quad (5)$$

对每个最大子孔径进行 Q 级划分,每一级方位向子孔径总数为

$$M^{(q)} = 2^{(Q-q)} M_0 \quad q = 1, 2, \dots, Q \quad (6)$$

方位向初级子孔径的长度可以表示为

$$L_r^{(0)} = L_r^{\max} / (2^Q) \quad (7)$$

完成子孔径二维划分后,需基于子孔径局部坐标系对成像域进行三维网格划分。在二维成像域中,高度向与方位向的子孔径成像网格均工作在极坐标系下,扩展至三维空间中时,需要将包含整个成像区域在内的扇形锥体分别沿高度向、方位向划分为立体网格,因此需建立一个新的三维坐标系。如图2所示, O_t 为目标中心点,将全局笛卡尔坐标系 $O_t(x, y, z)$ 平移至子孔径坐标系原点 O' 处,建立子孔径笛卡尔坐标系 $O'(x', y', z')$,同时,以 O' 为原点,以 r, θ, φ 为轴,建立子孔径三维球坐标系 $O'(r, \theta, \varphi)$,子孔径的三维球坐标与三维笛卡尔坐标系的变换关系为

$$(x', y', z') = F(r, \theta, \varphi) \quad (8)$$

笛卡尔坐标系到球坐标系的变换由 $F^{-1}(\cdot)$ 表示,其中 $F(\cdot)$ 满足转换关系

$$\begin{cases} x' = r \sin \theta \cos \varphi \\ y' = r \sin \theta \sin \varphi \\ z' = r \cos \theta \end{cases} \quad (9)$$

对于方位向第 m 个、高度向第 n 个子孔径 (m, n) , 设子孔径中心在全局坐标系 $O_t(x, y, z)$ 中的坐标为 $[x_c^{(m,n)}, y_c^{(m,n)}, z_c^{(m,n)}]$, 假设成像目标区域的最大包络半径为 r_t , 则成像域网格区间应满足

$$\begin{cases} \theta^{(m,n)} \in [\theta_c^{(m,n)} - \theta_t^{(m,n)}, \theta_c^{(m,n)} + \theta_t^{(m,n)}] \\ \varphi^{(m,n)} \in [-\varphi_t^{(m,n)}, \varphi_t^{(m,n)}] \\ r^{(m,n)} \in [r_c^{(m,n)} - r_t, r_c^{(m,n)} + r_t] \end{cases} \quad (10)$$

式中

$$r_c^{(m,n)} = \sqrt{x_c^{(m,n)2} + y_c^{(m,n)2} + z_c^{(m,n)2}} \quad (11)$$

$$\theta_c^{(m,n)} = -\arcsin\left(\frac{z_c^{(m,n)}}{r_c^{(m,n)}}\right) \quad (12)$$

$$\theta_t^{(m,n)} = \varphi_t^{(m,n)} = -\arctan\left(\frac{r_t}{r_c^{(m,n)}}\right) \quad (13)$$

网格划分间隔应满足

$$\begin{cases} \Delta r \leq \frac{c}{2B} \\ \Delta \theta \leq \frac{\lambda_{\min}}{2L_z^{(\min)}} \\ \Delta \varphi \leq \frac{\lambda_{\min}}{2L_r^{(\min)}} \end{cases} \quad (14)$$

式中: c 为光速; λ_{\min} 为载波的最短波长。分别以每个初级子孔径的中心为原点建立局部球坐标系, 在局部网格划分后进行子孔径粗分辨率成像。对于初级子图像中的像素 p , 设雷达天线到像素 p 的距离为 R_p , 则成像过程可以表示为

$$I_{m,n}^{(0)}(r_p^{(0)}, \theta_p^{(0)}, \varphi_p^{(0)}) = \sum_{m=1}^{M^{(0)}} \sum_{n=1}^{N^{(0)}} s(\tau, R_p(m, n)) \exp[jkR_p(m, n)] \quad (15)$$

2.2 图像递归融合

在完成所有初级子孔径粗成像后, 对子图像进行递归融合以生产高分辨率图像。图像融合过程如图 3(a) 所示, 由初级子图像开始, 每一级图像下一级融合时, 将高度、方位两个维度上相邻的 4 个子孔径图像相干叠加为下一级子图像, 直至得到最终的高精度重建图像。在融合过程中子孔径坐标系原点不断变化, 每次需根据新一级子孔径位置重建建立成像网格。对于方位向, 子网格之间为旋转转换关系, 对于高度向, 子网格之间为平移转换关系, 融合处理后距离方向的网格间距不变, 高度和方位方向的角度间隔变为原来的一半, 总网格数变为上一级的二倍, 如图 3(b) 所示。

在进行第 k 级图像融合时, 首先建立 k 级三维成像网格 $[r^{(k)}, \theta^{(k)}, \varphi^{(k)}]$, 对于任意一组 $k-1$ 级子图像

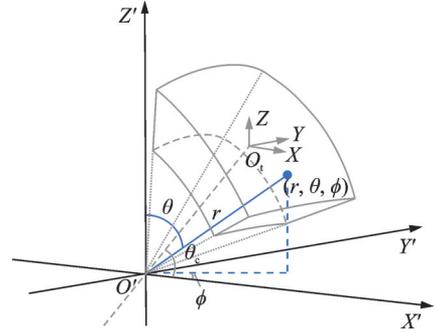


图2 FFBP 三维成像区域网格划分示意图
Fig.2 Schematic diagram of FFBP 3D imaging mesh

(i, j) , 图像融合的过程可以表示为

$$I^{(k)}[r_p^{(k)}, \theta_p^{(k)}, \varphi_p^{(k)}] = \sum_i^{i+1} \sum_j^{j+1} F_i^{i,j} \{ I_{ij}^{(k-1)}[r_{ij,p}^{(k-1)}, \theta_{ij,p}^{(k-1)}, \varphi_{ij,p}^{(k-1)}] \} \quad (16)$$

式中: $r_p^{(k)}$ 、 $\theta_p^{(k)}$ 和 $\varphi_p^{(k)}$ 表示 k 级子图像中像素 p 的局部坐标; $r_{ij,p}^{(k)}$ 、 $\theta_{ij,p}^{(k)}$ 和 $\varphi_{ij,p}^{(k)}$ 表示 $k-1$ 级子图像在 k 级局部坐标系中的坐标; $F_i^{i,j}$ 表示三维插值变换。 $r_{ij,p}^{(k)}$ 、 $\theta_{ij,p}^{(k)}$ 和 $\varphi_{ij,p}^{(k)}$ 由 $r_{i,j}^{(k-1)}$ 、 $\theta_{i,j}^{(k-1)}$ 和 $\varphi_{i,j}^{(k-1)}$ 通过坐标变换得到, 转换关系可以表示为

$$\begin{bmatrix} r_{ij,p}^{(k)} \\ \theta_{ij,p}^{(k)} \\ \varphi_{ij,p}^{(k)} \end{bmatrix} = F^{-1} \left\{ T(\Delta\varphi_i^{(k,k-1)}) \left(F \begin{bmatrix} r_{ij}^{(k-1)} \\ \theta_{ij}^{(k-1)} \\ \varphi_{ij}^{(k-1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -x_c^{(k-1)} \\ 0 \\ z_c^{(k-1)} \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} x_c^{(k)} \\ 0 \\ z_c^{(k)} \end{bmatrix} \right\} \quad (17)$$

式中: $T(\cdot)$ 为旋转矩阵; $\Delta\varphi_i^{(k,k-1)}$ 为 k 级方位向成像网格中心与 $k-1$ 级方位向成像网格中心的夹角, 满足

$$T(\Delta\varphi_i^{(k,k-1)}) = \begin{bmatrix} \cos \Delta\varphi_i^{(k,k-1)} & -\sin \Delta\varphi_i^{(k,k-1)} & 0 \\ \sin \Delta\varphi_i^{(k,k-1)} & \cos \Delta\varphi_i^{(k,k-1)} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\Delta\varphi_i^{(k,k-1)} = \varphi_c^{(k)} - \varphi_c^{(k-1)} \quad (19)$$

值得注意的是, 当两个方向的孔径长度差别较大时, 直接使用相同的划分级数来进行孔径分割会造成子孔径长度失衡, 导致最终成像质量下降, J 、 Q 和 L_r^{\max} 的选取与全孔径的长度、观测距离、期望分辨率以及插值方式等都有关系, 一般需根据实际应用情况进行选择。图4为慢飞越工作模式下FFBP三维成像的详细实施流程。

步骤1 子孔径划分, 对距离向压缩后的回波数据进行子孔径划分, 共生成 $2^J 2^Q M_0$ 个初级子孔径;

步骤2 目标成像域网格划分, 以每一个初级子孔径中心为原点建立球坐标系, 根据式(10, 14)计算 r 、 θ 、 φ , 生成子孔径三维球坐标成像网格, 根据式(15), 对每一个初级子孔径进行三维粗分辨率成像, 得到初级子图像。

步骤3 对子孔径方向进行重定义, 比较 J 和 Q 的大小, 将划分级数较大的方向定义为 i 方向, 较小的方向定义为 j 方向, 即 $K_i = \max[J, Q]$, $K_j = \min[J, Q]$, 从第 $k=1$ 级开始, 对子孔径图像进行 i 级图像融合。

步骤4 根据式(16)和(17), 在球坐标系下进行子图像融合, 更新局部成像网格, 满足 $G^{(k)} = 2G_i^{(k-1)} \times 2G_j^{(k-1)} \times G_r^{(k-1)}$ 。

步骤5 在球坐标系下进行子图像融合, 更新局部成像网格, 满足 $G^{(k)} = 2G_i^{(k-1)} \times G_j^{(k-1)} \times G_r^{(k-1)}$ 。

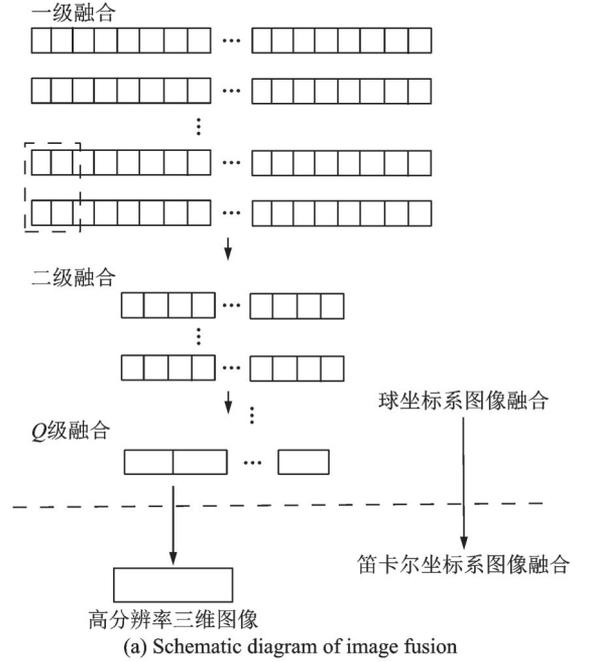


图3 三维FFBP算法图像融合过程示意图

Fig.3 Schematic diagram of image fusion process of 3D FFBP algorithm

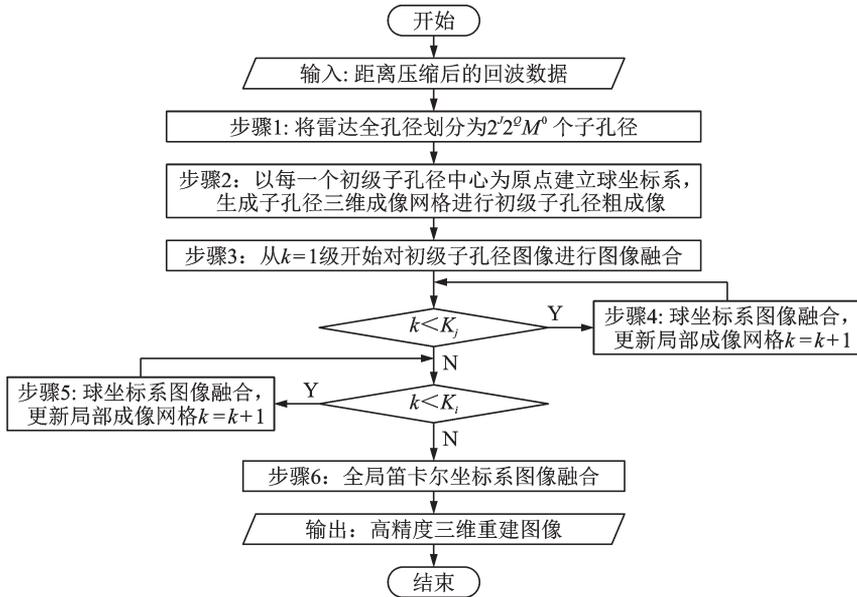


图4 三维FFBP算法成像流程图

Fig.4 Flowchart of 3D FFBP imaging method

步骤6 当 $k > K_i$ 时,说明已融合至末级子图像,通过坐标变换和三维插值运算,将末级子图像转换到全局笛卡尔坐标系下进行融合,即可生成最终的高分辨率三维重建图像。

3 实验验证

本文设计了数值仿真和实验室缩比实测两组实验来验证所提算法的成像性能,数值仿真实验用于模拟真实探测场景,雷达参数参考以往空间探测任务中^[3-4]的雷达设计,频段设置为120~240 MHz。在数值模拟的基础上,为了进一步验证所提方法的有效性,基于电磁波相似理论设计了缩比实验^[23-24],以验证所提算法成像能力,实验平台和待测模型相对于真实探测场景按照电磁模型相似比例关系进行缩放,发射信号为步进频率体制,工作频段为12~24 GHz,在100倍缩放比例情况下实验场景与真实探测场景的参数对应关系如表1所示。

表1 缩比实验平台与真实场景对应关系
Table 1 Size and scaling of experimental system with respect to real scale explorations

实验场景	工作频段/GHz	波长/m	目标尺寸/m	成像分辨率/m
真实场景	0.012~0.024	1.600	40.0	1.250 0
实验场景	12~24	0.016	0.4	0.012 5

3.1 数值仿真实验

本节通过数值仿真实验来验证所提算法的成像性能。雷达在慢飞越观测模式下,沿目标旋转轴方向飞行并对目标进行凝视观测。设置雷达基本参数为:信号类型LFM脉冲,脉冲宽度250 ns,中心频率180 MHz,带宽120 MHz。回波中噪声为加性高斯白噪声,设置SNR=10 dB。雷达到目标中心的参考距离 $R_c=1\ 000\ m$,方位向采样点数为1 024,采样范围为 $[0, 360^\circ]$;高度向采样点数为64,虚拟孔径总长度为200 m;每个脉冲的采样点数为400个,总数据量为 $400 \times 1\ 024 \times 64$ 。选取27个理想散射点作为观察目标进行仿真实验,点目标分布在3个不同的高度($z = -20\ m, 0\ m, 15\ m$)的平面上,详细的位置分布如图5中红色菱形离散点所示,目标成像区域的大小为 $100\ m \times 100\ m \times 100\ m$ 。

用本文的FFBP成像算法进行三维成像,方位向进行4级子孔径划分,共划分为128个初级子孔径,对应初级孔径角约为 2.8° ,最大子孔径 $L_r^{(\max)} = \pi/4$;在高度向上进行3级划分,共划分为8个初级子孔径,对应子孔径长度25 m,生成二维初级子孔径的大小为 128×8 ,对每个子孔径中的回波数据进行粗成像生成初级子图像。图像融合过程中,共进行4级球坐标系图像融合,以及1次球坐标系到笛卡尔坐标系融合。最终得到的目标三维重建结果如图5中蓝色圆形散点所示。从仿真结果可以看出,27个目标点全部被重建出来,且重建的点目标位置与真实位置相吻合度高,验证了所提算法的有效性。

FFBP算法三维成像结果与BP算法三维成像结果的对比如图6所示,结果中展示了重建目标点(10,0,0)在 XOY 切面和 XOZ 切面的局部二维图像,图像幅度做归一化处理,动态显示范围为 $[-50, 0]$ dB。从结果中可以看出,两种算法均可以对目标进行准确重建,但FFBP算法的成像结果略差于BP算法,这是由于FFBP算法在进行递归融合的过程中使用了插值算法进行位置转换,从而引入了计算误差,导致成像精度略微下降,但这部分成像精度的牺牲可以换取计算效率的大幅提高。

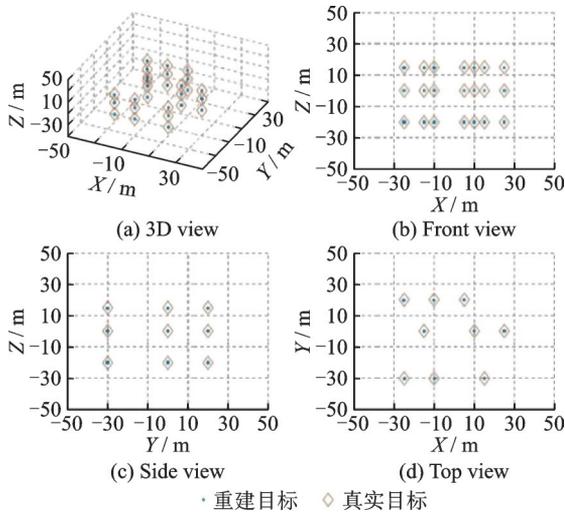


图5 FFBP算法点目标三维成像结果

Fig.5 3D imaging results for point scatterers with FFBP

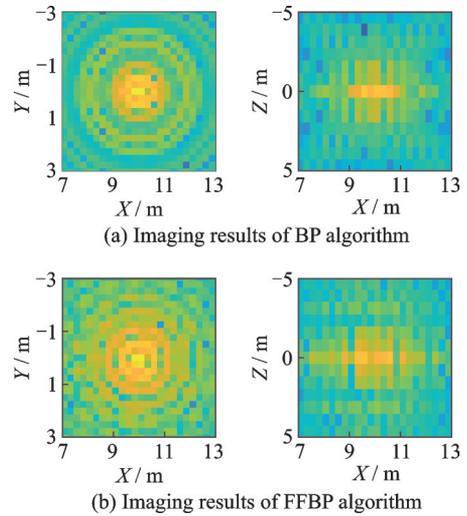


图6 点目标成像结果二维切面图

Fig.6 2D slices of point scatterers imaging results

图7用成像中的部分中间结果展示了所提FFBP算法的成像过程,为了便于观察,每一级融合结果均转换至对应子孔径局部笛卡尔坐标系中进行展示。如图7(a)所示,在初级子孔径图像中,由于成像口径较小,图像分辨率较低;经过图7(b~e)逐级融合后,图像分辨率逐渐提高;图7(f)为最终球坐标系到笛卡尔坐标系融合后的高分辨率成像结果。

为了进一步分析孔径划分对成像效果的影响以及对计算效率的提升能力,对比了不同子孔径划分方式下FFBP算法对同一组回波数据的处理结果,并与BP算法进行比较,利用重建点目标与真实点目标位置的均方根差(Positioning root mean square error, PRMSE)来定量评估成像效果, ϵ_x 、 ϵ_y 、 ϵ_z 和 ϵ_r 分别表示 x 、 y 、 z 方向以及总距离的均方根差,PRMSE越小,说明重建点目标位置与实际目标位置越接近,成像效果越好。实验中所有数据处理过程先后在同一台工作站上进行,实验结果如表2所示。

从结果中可以看出,相较于BP算法,FFBP算法的计算效率实现了大幅提升,且整体成像性能十分接近。成像效率主要取决于子孔径划分数量, $M^{(0)}$ 和 $N^{(0)}$ 分别表示方位向和高度向划分的初级子孔径数量,初级子孔径数量越多,对运算效率的提升能力越强,但图像质量会随之下降。方位向最大子孔径 $L_r^{(\max)}$ 的长度同样会对成像质量产生影响,过大的孔径长度会导致信号频谱发生弯曲从而影响成像质

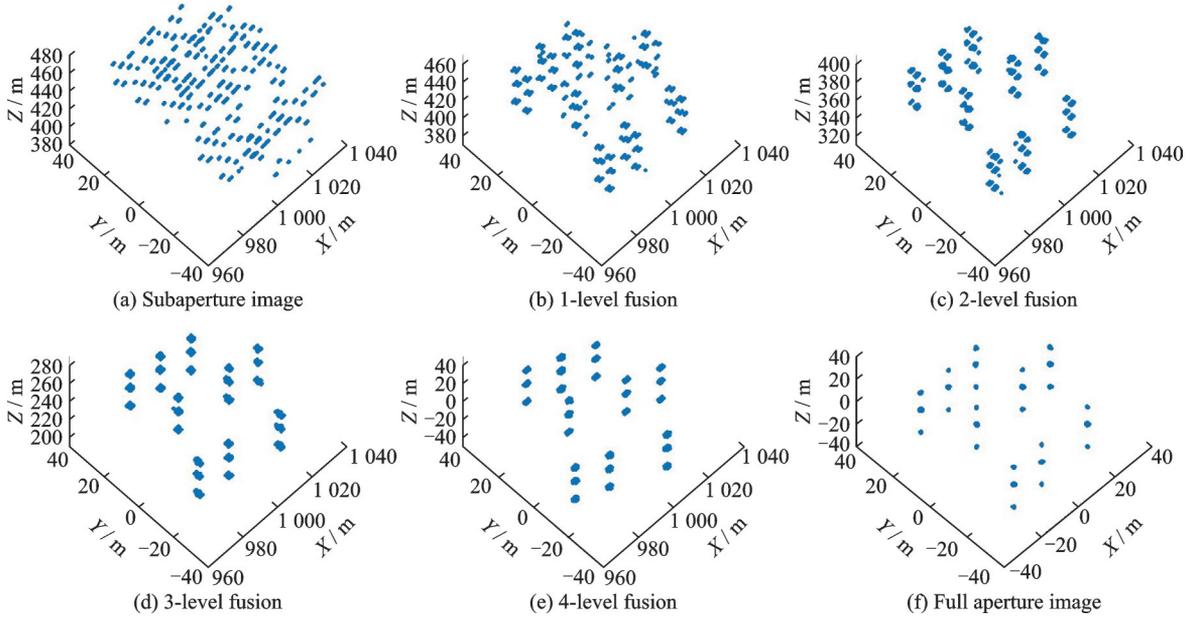


图7 FFBP算法子图像递归融合

Fig.7 Image recursive fusion of FFBP algorithm

表2 BP算法和FFBP算法在成像精度和成像效率方面的对比

Table 2 Comparison of imaging accuracy and imaging efficiency for BP and FFBP algorithms

成像方法		PRMSE/m					计算时间/s			加速比	
$M^{(0)}$	$N^{(0)}$	L_r^{\max}	ϵ_x	ϵ_y	ϵ_z	ϵ_r	Imaging	Fusion	Total		
FFBP	128	16	$\pi/4$	0.292 5	0.311 6	0.306 1	0.525 7	355	226	581	58.1
	256	8	$\pi/4$	0.302 2	0.316 9	0.286 6	0.523 3	379	331	710	47.5
	128	8	$\pi/8$	0.326 6	0.330 1	0.285 0	0.544 9	646	217	863	39.9
	128	8	$\pi/4$	0.284 7	0.306 8	0.284 1	0.505 9	645	205	850	39.7
	128	8	$\pi/2$	0.297 4	0.314 7	0.291 4	0.521 9	649	197	846	39.1
BP			0.266 3	0.301 9	0.237 6	0.467 5	—	—	33 761	1.0	

量,从表中可以看出, $L_r^{(\max)} = \pi/2$ 时,相较于 $L_r^{(\max)} = \pi/4$ 和 $L_r^{(\max)} = \pi/8$ 成像质量有较为明显的下降。

3.2 实测实验

实测实验在微波暗室中进行,发射信号为步进频体制,扫频范围为12~24 GHz。使用PVC树脂材料的3D打印模型模拟待测小天体,材料的相对介电常数 $\epsilon_r \approx 2.7$,模型基于彗星67P/CG^[4]的三维结构设计,如图8所示,尺寸包络为0.330 m×0.313 m×0.210 m。实验平台的结构示意图以及坐标系定义如图9所示,目标模型放置在水平转台上模拟小天体的自旋运动,水平转台的转动范围为0~360°。收发天线的滑动范围为 $L = 1.6$ m,用来模拟探测器的直线飞越轨迹;天线与水平转台中心的水平距离 $R_c = 1.5$ m,原点距离地面高度 $H_1 = 0.99$ m。测量过程中采用一步一悬停的工作方式,天线由 $z = 0.736$ m处开始,以0.023 m为步进,沿+z方向滑动,每个前进时间对应一个水平转台的旋转周期,高度向采样点共64个,方位向每个周期进行512次采样,总数据量为 $400 \times 512 \times 64$ 。

用本文FFBP算法对实验数据进行三维成像,划分方位向初级子孔径数量为16,方位向最大子孔径的孔径角为 $L_r^{(\max)} = \pi/4$,高度向初级子孔径的数量为8。在三维成像结果中,每个方向选取两个与采

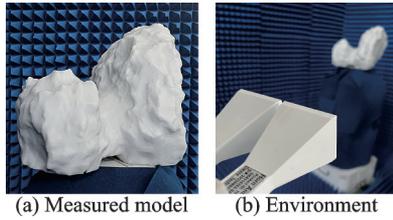


图8 实验模型与测试环境

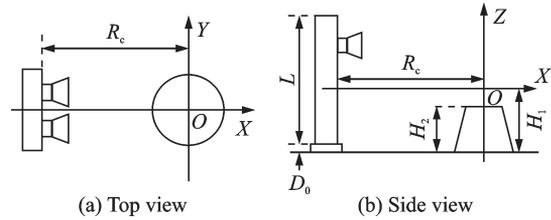
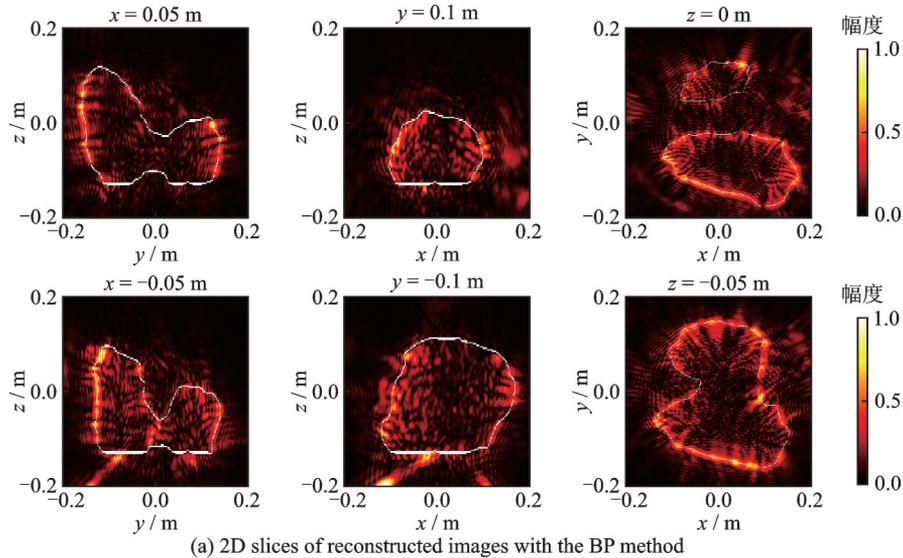
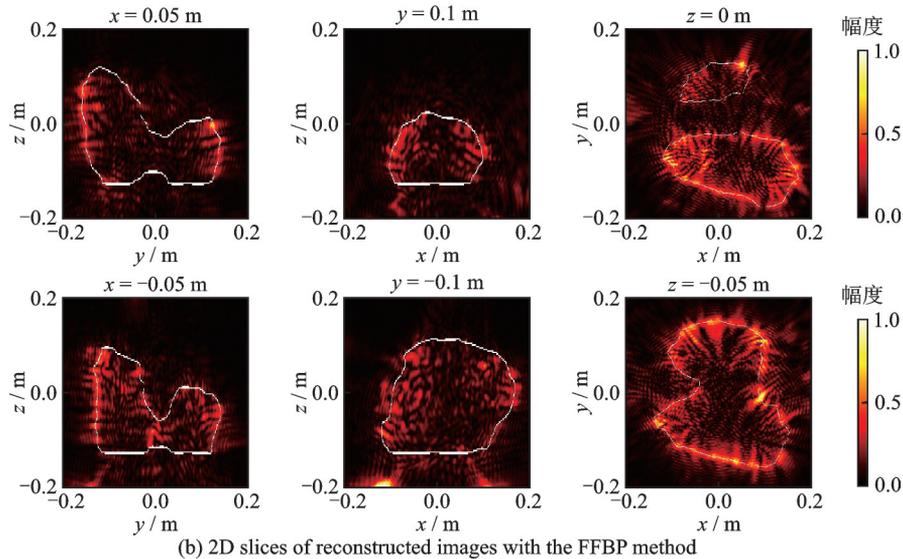


图9 实验系统示意图及坐标系定义

Fig.8 Measured model and experimental environment Fig.9 Experimental setup and coordinate system definition
 标轴垂直平面绘制二维切面图,并与真实模型进行比较,图10为FFBP成像结果与BP成像结果的二维切面图,其中白色曲线为真实目标轮廓。从结果中可以看出,FFBP算法的成像结果与BP算法成像结果近似,且重建图像与真实模型结构有良好的匹配性。



(a) 2D slices of reconstructed images with the BP method



(b) 2D slices of reconstructed images with the FFBP method

图10 成像结果的二维切面图

Fig.10 2D slices of the reconstructed image

从三维图像中按幅度提取特征点,重建出目标的三维点云图,如图 11 所示。从结果中可以看出, BP 算法与 FFBP 算法均能有效重建目标的三维结构,且与目标真实形状相吻合。以上实验结果进一步验证了所提算法的三维重建能力。

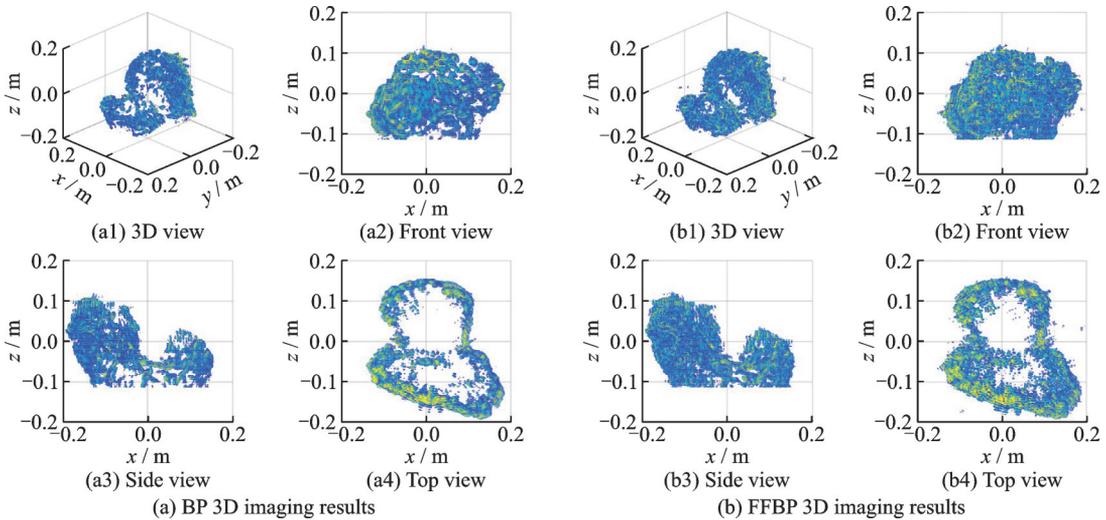


图 11 重建结果的三维点云图

Fig.11 3D point cloud of the reconstructed result

通过计算重建图像相对于真实模型的峰值信噪比(Peak signal-to-noise ratio, PSNR)、幅度均方根误差(Amplitude root mean square error, ARMSE)、位置均方根差和相对重叠度(Relative overlap, RO)来定量评估算法的成像性能,并与 BP 算法的成像结果进行比较。PSNR 的值越高,表示重建图像越接近原始图像,即噪声越小;ARMSE 的值越小,表示重建图像与原始图像之间的差异越小,相似度越高;PRMSE 越小,表示重建图像与原始图像的结构越接近,位置偏差越少;RO 的取值范围在 0~1 之间,0 表示没有重叠,1 表示完全重叠。结算结果如表 3 所示,从结果中可以看出,三维 FFBP 算法可获得与 BP 算法近似的成像性能,同时极大地缩减了计算时间,三维 FFBP 算法较 BP 算法的加速比为 37.6。

表 3 BP 与 FFBP 算法成像性能定量评估

Table 3 Quantitative evaluation of imaging performance between BP and FFBP algorithms

方法	PSNR/dB	ARMSE	PRMSE/m	RO/%	计算时间/s
BP	18.568 3	0.117 9	0.008 3	85.28	13 028
FFBP	18.696 9	0.116 2	0.011 8	86.42	346

4 结束语

本文基于深空探测器慢飞越太阳系小天体的观测场景,对星载雷达的观测模式和回波模型进行分析,提出了一种基于 FFBP 算法的适用于慢飞越观测模式的三维成像方法,对算法中的子孔径二维划分问题、图像递归融合问题进行了分析,推导了算法的详细实现方式,并通过数值仿真实验与实测实验验证了算法的有效性。实验结果表明,所提出的方法能够成功重建目标的高分辨率三维图像,并有效提高计算效率。根据不同的孔径划分方式,计算效率较传统 BP 算法可提升 30~50 倍,计算效率与孔径划

分个数呈正相关。该算法可为未来空间探测中的雷达数据在轨实时处理提供合理化方案。

参考文献:

- [1] 李春来, 刘建军, 严韦, 等. 小行星探测科学目标进展与展望[J]. 深空探测学报, 2019, 6(5): 424-436.
LI Chunlai, LIU Jianjun, YAN Wei, et al. Overview of scientific objectives for minor planets exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(5): 424-436.
- [2] 王玉军, 刘涛, 郑适. 基于次表层雷达技术的小天体结构层析成像[J]. 雷达科学与技术, 2023, 21(2): 184-188.
WANG Yujun, LIU Tao, ZHENG Shi. Internal structure tomography of asteroid based on subsurface penetrating radar[J]. Radar Science and Technology, 2023, 21(2): 184-188.
- [3] KOFMAN W, HÉRIQUE A, GOUTAIL J P, et al. The comet nucleus sounding experiment by radiowave transmission (CONSERT): A short description of the instrument and of the commissioning stages[J]. Space Science Reviews, 2007, 128: 413-432.
- [4] BARBIN Y, KOFMAN W, NIELSEN E, et al. The CONSERT instrument for the ROSETTA mission[J]. Advances in Space Research, 1999, 24(9): 1115-1126.
- [5] KOFMAN W, HÉRIQUE A, BARBIN Y, et al. Properties of the 67P/Churyumov-Gerasimenko interior revealed by CONSERT radar[J]. Science, 2015, 349(6247): aab0639.
- [6] GOLDBERG H R, KARATEKIN Ö, RITTER B, et al. The juvenas cubesat in support of ESA's hercules mission to the asteroid didymos[C]//Proceedings of Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites. [S.l.]: AIAA, 2019.
- [7] HÉRIQUE A, PLETTEMEIER D, KOFMAN W, et al. A low frequency radar to fathom asteroids from Juventas Cubesat on HERA[C]//Proceedings of EPSC-DPS Joint Meeting. Switzerland: AAS, 2019, 13: 807.
- [8] JIANG Xiuqiang, YANG Bin, LI Shuang. Overview of China's 2020 Mars mission design and navigation[J]. Astrodynamics, 2018, 2: 1-11.
- [9] HAYNES M S, FENNI I, GIM Y, et al. Angular and radial sampling criteria for monostatic and bistatic radar tomography of solar system small bodies[J]. Advances in Space Research, 2021, 68(9): 3903-3924.
- [10] DUFAURE A, EYRAUD C, SORSA L I, et al. Imaging of the internal structure of an asteroid analogue from quasi-monostatic microwave measurement data I: The frequency domain approach[J]. Astronomy & Astrophysics, 2023, 674: A72.
- [11] SORSA L I, EYRAUD C, HÉRIQUE A, et al. Complex-structured 3D-printed wireframes as asteroid analogues for tomographic microwave radar measurements[J]. Aerials & Design, 2021, 198: 109364.
- [12] LI Chunlai, YAN Su, PETTINELLI E, et al. The Moon's farside shallow subsurface structure unveiled by Chang'E-4 Lunar Penetrating Radar[J]. Science Advances, 2020, 6(9): eaay6898.
- [13] ZOU Yongliao, ZHU Yan, BAI Yunfei, et al. Scientific objectives and payloads of Tianwen-1, China's first Mars exploration mission[J]. Advances in Space Research, 2021, 67(2): 812-823.
- [14] NOZETTE S, SPUDIS P, BUSSEY B, et al. The Lunar Reconnaissance Orbiter miniature radio frequency (Mini-RF) technology demonstration[J]. Space Science Reviews, 2010, 150: 285-302.
- [15] RANEY R K, SPUDIS P D, BUSSEY B, et al. The lunar mini-RF radars: Hybrid polarimetric architecture and initial results [J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 99(5): 808-823.
- [16] 黎湘, 高勋章, 刘永祥. 复杂运动目标 ISAR 成像技术进展与展望[J]. 数据采集与处理, 2014, 29(4): 508-515.
LI Xiang, GAO Xunzhang, LIU Yongxiang. Research advances in ISAR imagery of complex motion target[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2014, 29(4): 508-515.
- [17] 李翔宇, 乔栋, 黄江川, 等. 小行星探测近轨操作的轨道动力学与控制[J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2019, 49(8): 084508.
LI Xiangyu, QIAO Dong, HUANG Jiangchuan, et al. Dynamics and control of proximity operations for asteroid exploration mission[J]. SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica, 2019, 49(8): 084508.
- [18] VU V T, PETTERSSON M I. Fast backprojection algorithms based on subapertures and local polar coordinates for general bistatic airborne SAR systems[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 54(5): 2706-2712.
- [19] ZHANG Lei, LI Haolin, QIAO Zhijun, et al. A fast BP algorithm with wavenumber spectrum fusion for high-resolution

- spotlight SAR imaging[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(9): 1460-1464.
- [20] RADECKI K, SAMCZYŃSKI P, GROMEK D. Fast barycentric-based back projection algorithm for SAR imaging[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(22): 10635-10643.
- [21] YEGULALP A F. Fast backprojection algorithm for synthetic aperture radar[C]//Proceedings of the 1999 IEEE Radar Conference. [S.l.]: IEEE, 1999: 60-65.
- [22] ULANDER L M H, HELLSTEN H, STENSTROM G. Synthetic-aperture radar processing using fast factorized back-projection[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(3): 760-776.
- [23] BLACKSMITH P, HIATT R E, MACK R B. Introduction to radar cross-section measurements[J]. Proceedings of the IEEE, 1965, 53(8): 901-920.
- [24] SINCLAIR G. Theory of models of electromagnetic systems[J]. Proceedings of the IRE, 1948, 36(11): 1364-1370.

作者简介:



胡超然(1992-),女,博士研究生,研究方向:基于雷达数据的深空小天体探测、卫星测控通信与信息处理,E-mail:hcr_hit@hit.edu.cn。



韦明川(1991-),通信作者,男,研究员,博士生导师,研究方向:深空微纳卫星总体技术、卫星测控通信与信息处理,E-mail:mcwei@hit.edu.cn。

(编辑:刘彦东)