

丁宗华, 唐志美, 代连东, 等. 非相干散射雷达的高信噪比空间物体距离测量方法 [J]. 电波科学学报, 2016, 31(6): 1081-1086. DOI: 10.13443/j.cjors.2016092702

DING Z H, TANG Z M, DAI L D, et al. The range measurement of space object with high signal to noise ratio based on the Incoherent Scatter Radar [J]. Chinese journal of radio science, 2016, 31(6): 1081-1086. (in Chinese). DOI: 10.13443/j.cjors.2016092702

非相干散射雷达的高信噪比空间物体距离测量方法

丁宗华 唐志美 代连东 吴健 许正文

(中国电波传播研究所 电波环境特性及模化技术重点实验室, 青岛 266107)

摘 要 非相干散射雷达是目前地基电离层探测的强大手段, 同时在空间物体探测方面也具有重要应用前景. 当空间物体回波信噪比很高时, 可以利用单个脉冲进行目标检测, 而无需相干积累. 非相干散射雷达常采用相位编码脉冲, 在单个相位编码脉冲内存在多次相位翻转, 此相位翻转在接收机滤波后显示一定坡度, 通过搜索此坡度曲线上具有最大斜率的坡度点可高精度确定发射-接收回波脉冲内各对应相位翻转的时间差以及对应的距离, 对这些距离值进行加权最小二乘拟合, 即可给出该回波脉冲对应的空间物体距离及误差估计值. 利用欧洲非相干散射科学联合会 (European Incoherent Scatter Scientific Association, EISCAT) 实测数据分析发现, 距离误差可达数十米量级, 远优于以往的基于发射-接收回波脉冲前沿时间差方法.

关键词 非相干散射雷达; 空间物体; 高信噪比; 距离; 相位翻转

中图分类号 TN958

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2016)06-1081-06

DOI 10.13443/j.cjors.2016092702

The range measurement of space object with high signal to noise ratio based on the incoherent scatter radar

DING Zonghua TANG Zhimei DAI Liandong WU Jian XU Zhengwen

(National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research

Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107, China)

Abstract The incoherent scatter radar (ISR) is a main tool for monitoring the ionosphere on the ground, and can also be used to detect the space objects. When the signal to noise ratio is a bit high, only one pulse is needed to detect the space object and the coherent integration is unnecessary. There usually exist many phase flips in the radar phase-modulated pulses. When the echo pulse with phase flips is filtered by the receiver, the resulting phase flips are not sharp but consist of many slopes. By investigating the echo amplitude variation within this slope, the time difference between the transmission and reception sub-pulse and then the range measurements are known. Then all these range measurements during one pulse are applied to a weighted least-square fitting, which gives the range and its error estimation. By analyzing the EISCAT raw data, it is found that the range error is about several tens of meters, which is far better than that from the frequently-used method based on time difference between the transmission and reception pulse.

Keywords incoherent scatter radar; space object; high signal to noise ratio; range; phase flip

收稿日期: 2016-09-27

资助项目: 十二五民用航天预研基金

联系人: 丁宗华 E-mail: zhdingmou@163.com

引 言

随着人类航天活动的日益频繁,空间碎片等空间物体数目日益增多,对人类空间活动和国家安全等带来了严重影响,同时为空间和天文科学研究提出了更多机遇和挑战,也对空间物体探测提出了更高要求.在诸多探测方法中,地基雷达具有探测精度高、探测覆盖区域广、不受气象条件限制等优点,一直是空间物体探测的主要探测手段.但是我国目前专用的地基空间物体探测手段十分有限,需要不断加强.

电离层非相干散射雷达具有发射功率强(大于 1 MW)、天线增益高(高于 40 dB)、系统噪声温度低(约 100 K)等特点,是目前地基电离层观测的强大手段,同时在空间碎片等空间物体硬目标探测方面具有重要应用价值.2012 年初,中国电波传播研究所在云南曲靖建成了我国首套非相干散射雷达^[1],为有关实验研究提供了条件.

由于研究条件所限,国内外的非相干散射雷达空间物体探测实验工作较少,日本、欧洲和俄罗斯等学者均开展过有关研究^[2-5].欧洲非相干散射科学联合会(European Incoherent Scatter Scientific Association, EISCAT)从 1990 年后期开始全面系统地开展了非相干散射雷达的空间碎片探测实验研究,研制了专门的空间碎片信号处理与数据终端机,实现了对低地球轨道小尺寸空间碎片的波束驻留探测能力,近年来以 Markkanen 为代表不断改进探测实验、数据分析和处理方法,推动了非相干散射雷达和空间物体探测技术的发展^[6-7].国内相关工作甚少,中国电波传播研究所参照 EISCAT 的工作,详细介绍了非相干散射雷达空间物体探测中的匹配滤波方法,并利用 EISCAT 非相干散射雷达原始采样数据,提取了空间碎片距离、速度、目标散射截面等参数,初步分析了北极地区空间碎片参数的统计分布特征^[8-11].

非相干散射雷达的空间物体回波被接收后,通过匹配滤波方法^[9-10]测量接收回波脉冲相对发射脉冲的时延来计算空间物体距离,其精度与信号采样时间间隔、信噪比等有关,比如对 1 μs 采样间隔,其对应的距离测量精度约 150 m,这对空间物体的精确定轨来说是不够的.实际上发射和接收脉冲的前后沿常被噪声和干扰信号所污染,发射机自身相位漂移等都对脉冲相位和幅度产生影响,这些给基于发射-接收脉冲前沿/后沿时延差的距离测量带来了

更多误差.

对于较大尺寸的空间物体目标,其回波信噪比较高,此时不需相干积累即可从单个回波脉冲实现空间物体的检测和参数提取.另外非相干散射雷达常采用相位编码脉冲(如交替码、巴克码),在单个相位编码脉冲内存在多次相位翻转(从 -180° 变为 180° 称为正相位翻转,反之为负相位翻转),每次发射-接收相位翻转的时间差可给出一个距离测量,因此从单个相位编码脉冲即可得到多个距离测量及其误差估计.鉴于此,Markkanen^[7]提出了基于发射-接收回波脉冲各相位翻转时间差的高精度距离测量方法.本文利用自主的实验数据(2015 年 10 月利用 EISCAT 非相干散射雷达开展了自主的空间碎片实验),国内首次对该方法进行了详细分析和验证,同时探讨了该方法的不足.

1 信号处理与分析方法

1.1 脉冲校准

为了精确获得非相干散射雷达发射脉冲与接收回波脉冲内各相位翻转之间的时间差,首先需要对发射和接收脉冲进行校准.

发射脉冲幅度通常会出现轻微变化(EISCAT 实验发现,发射脉冲幅度是线性下降的,通常约百分之几),同时相位漂移对发射脉冲相位具有一定影响,这等效为一个额外的多普勒频移.为了校准这些影响,对发射脉冲进行如下模拟:

$$z(t) = A \cdot (1 - \beta t) \cdot E(t) \cdot \exp(2\pi i v_d t) + \epsilon(t). \quad (1)$$

式中: A 是复幅度; β 是实常数; v_d 为等效多普勒频移; $E(t)$ 为理想交替码的调制包络(取值为 1 或 -1); $\epsilon(t)$ 为噪声.由非线性最小二乘拟合法可确定以上模型系数(在拟合时靠近相位翻转处的数据点被忽略),当模型参数确定后,即可得到理想的交替码发射脉冲.

对于接收回波脉冲的校准,首先利用通常的匹配滤波方法^[7-8]确定空间物体的距离和速度初值,此处的距离初值用于从原始数据中提取空间物体回波脉冲数据,速度初值用于回波脉冲的多普勒频移校准.回波脉冲具有相似的调制包络以及幅度相位变化特征,但是它具有目标运动产生的多普勒频移.可采用类似办法对接收回波脉冲进行校准.由于回波信噪比很高,因此可以精确地校准其幅度和相位变化.

1.2 脉冲相位翻转

发射或接收回波脉冲的相位发生翻转表明相邻

采样数据的相位发生了显著变化,为此需定义一个相位变化的门限值(如1弧度),超过此门限表明可能发生了相位翻转,由此初步确定发射或接收回波脉冲中的相位翻转位置.图1为EISCAT非相干散射雷达发射脉冲和接收脉冲采样实部,脉冲宽度为1920 us,采样时延间隔为1 us,因此数据采样点数为1920.由于采用了交替码相位调制,在一个脉冲内出现了多次相位翻转,图1中共出现27次相位翻转.

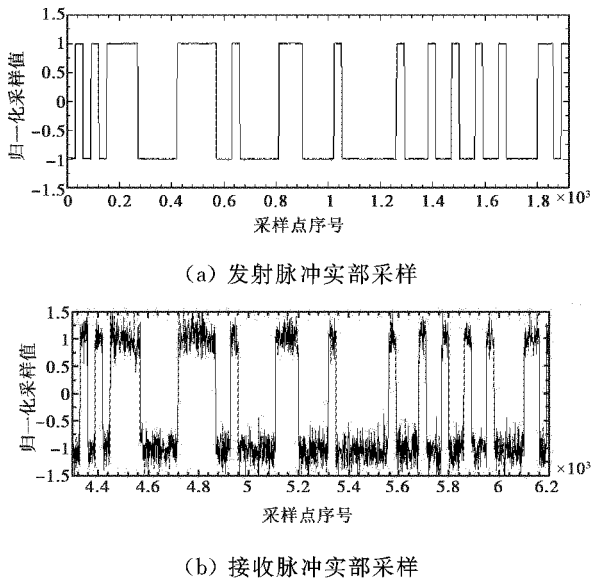
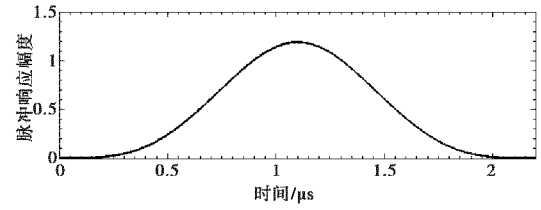


图1 非相干散射雷达发射和接收脉冲采样

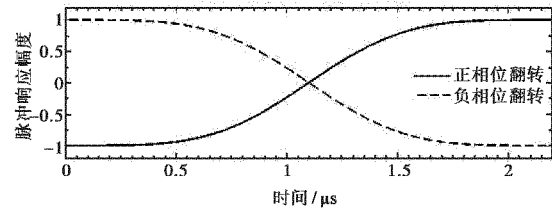
1.3 脉冲相位翻转时间的确定

雷达接收机实际上是一个滤波器,其滤波特性可由脉冲响应函数来表示,接收机输出信号就是脉冲响应和回波信号的卷积.对相位翻转来说,滤波过程就相当于脉冲响应和阶梯函数的卷积(即滤波器的阶梯响应),从而使得滤波后的相位偏移呈一定斜坡度变化,而不是尖锐变化.数据采样间隔应略小于脉冲响应的长度,这样保证至少一个数据点位于斜坡曲线内,称为斜坡点,此斜坡点对应的的时间即为相位翻转时间.对理想的接收机脉冲响应,正负相位翻转中的斜坡点将关于零对称.图2为非相干散射雷达接收机脉冲响应和正负相位翻转的阶梯响应,可见在脉冲响应最大值附近的相位翻转阶梯响应具有最大斜率.从非相干散射雷达实测数据确定相位翻转时间的具体步骤是:1)首先确定发射或接收回波脉冲中相位变化(两个相邻采样数据相位之差的绝对值)超过一定门限的数据点,搜索这些数据点附近幅度变化最大的数据点,视为初值斜坡点.2)在阶梯响应函数曲线上搜索与此初值斜坡点幅度对应的时

间,视为修正量.3)初值斜坡点与修正量一起确定了最终的斜坡点时间,也就是最终的相位翻转时间.



(a) 接收机脉冲响应



(b) 相位翻转对应的阶梯脉冲响应

图2 非相干散射雷达接收机脉冲响应和相位翻转阶梯响应

下面分析相位翻转时间的误差,它包括系统误差(阶梯响应函数模型误差)和随机噪声误差.假设接收机滤波器的阶梯响应为 $p(t)$,相位翻转时间 τ_s 对应的信号值为 s ,设时延 τ 和信号值 s 为随机变量, ϵ 为零均值高斯噪声, R_{SN} 为信噪比, σ_ϵ 为噪声标准偏差,则

$$s = p(\tau) + \epsilon. \quad (2)$$

既然 $p(\tau)$ 是脉冲响应 $h(\tau)$ 和阶梯函数(假设为2阶)的卷积,则 $\left(\frac{dp}{d\tau}\right)_{\tau_s} = 2h(\tau_s)$, $p(\tau)$ 的泰勒级数一级近似为

$$p(\tau) = p(\tau_s) + \left(\frac{dp}{d\tau}\right)_{\tau_s} (\tau - \tau_s). \quad (3)$$

当 s 已知时, τ 满足条件概率密度分布,可表示为

$$D(\tau | s_s) \propto \exp\left[-\frac{(\tau - \tau_s)^2}{2\sigma_\tau^2}\right]. \quad (4)$$

当信噪比很高时(通常对于大尺寸空间物体) σ_ϵ 很小, $D(\tau | s)$ 具有窄的尖峰.这里 σ_τ 为相位翻转时间的标准偏差,可表示为

$$\sigma_\tau = \frac{\sigma_\epsilon}{2h(\tau_s)} = \frac{1}{2h(\tau_s) \sqrt{2 \cdot R_{SN}}}. \quad (5)$$

式(5)表明已知信噪比时,若斜坡点时间对应于脉冲响应最大值,则可高精度地确定相位翻转时间.这也对应于阶梯响应的最大斜率处,此时阶梯响应变化引起的相位翻转时间变化量最小.

1.4 距离测量

对非相干散射雷达常用的交替码来说,一组完整的脉冲集包含多个具有不同调制模式的脉冲,在各脉冲内相位翻转次数不同.对某个脉冲来说,若第 n 个相位翻转对应的发射脉冲时间和接收回波脉冲时间分别为 $t_n^{(TX)}$ 和 $t_n^{(RX)}$,则该脉冲内第 n 个相位翻转对应的空间物体距离测量值为:

$$R_n = \frac{c}{2} (t_n^{(RX)} - t_n^{(TX)}) . \quad (6)$$

假定在单个脉冲反射期间(脉冲宽度为 1 920 us)的空间物体视线速度不变,则单个脉冲反射期的空间物体距离随时间满足线性变化,对单个脉冲内多次相位翻转对应的多个距离测量值进行加权最小二乘拟合,通过拟合可得到一个距离及误差估计值,此距离估计值相对于以往的接收-发射脉冲时延法来说精度具有很大提高.

2 实测数据分析与讨论

2015 年 10 月我们利用 EISCAT 500 MHz 非相干散射雷达(海拔 445 m,地理经度 16°01' E,地理纬度 78°09' N)开展了首次北极空间物体凝视观测实验,实验中采用 64 位交替码,码元宽度 30 us,脉冲宽度 1 920 us,脉冲重复周期为 20 ms,数据采样率为 1 MHz,雷达波束方位角和仰角分别固定为 90°和 75°,天线增益约 42.5 dB,半功率波束宽度为 1.1°,系统噪声温度约 70 K,每个脉冲周期内所有数据均被连续采样,这样单个重复周期内的数据为 20 000 个复采样点,接收机滤波器脉冲响应为高斯型,其脉冲长度为 2.2 us.

图 3 为某个脉冲内的原始采样数据,从中可见在第 4 300 个采样位置处(通过匹配滤波检测,计算其距离约 644.40 km)出现强散射回波,其信噪比约 130,可认为此处存在高信噪比的空间物体目标.

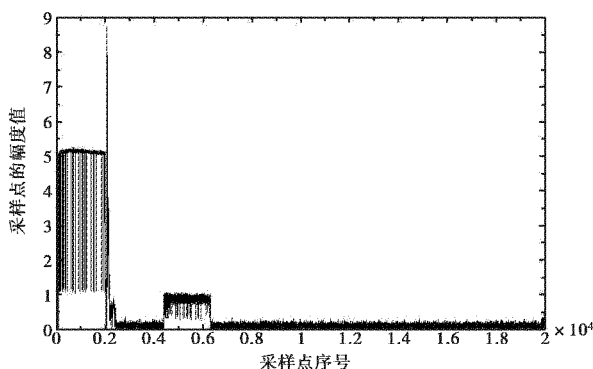


图 3 单个脉冲周期内的采样数据

图 4 为单个发射和接收脉冲内的 27 个斜坡点的位置修正量,其中圆圈代表正相位翻转,星号为负相位翻转.

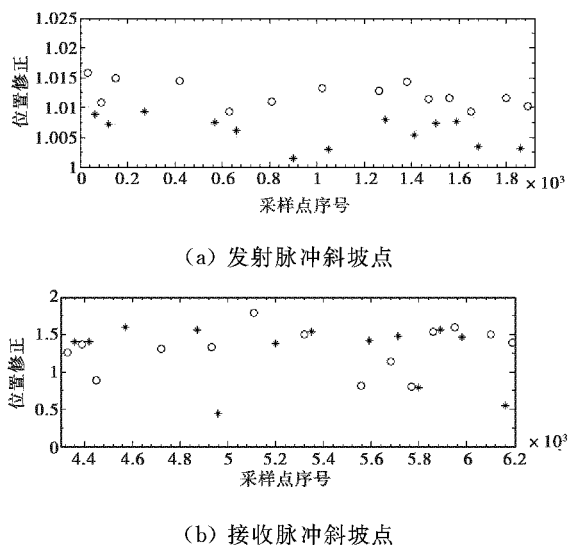


图 4 发射和接收脉冲的斜坡点位置

从图 4 中 27 个相位翻转可计算 27 个距离测量值,对这些测量值采用加权最小二乘拟合,见图 5,可得到此脉冲内的空间物体距离拟合值及其误差估计.横坐标零时刻表示具有最小拟合误差的某相位翻转对应的空间物体反射时间(它对应最终距离),纵轴表示测量值相对最终距离的偏差,不带误差棒表示该测量值对应的斜坡点离阶梯响应最大斜率处较远(即误差较大),拟合时舍弃不带误差棒的数据,由此可得该脉冲对应的空间物体最终距离(644 337.4 m)和误差估计(18.50 m).

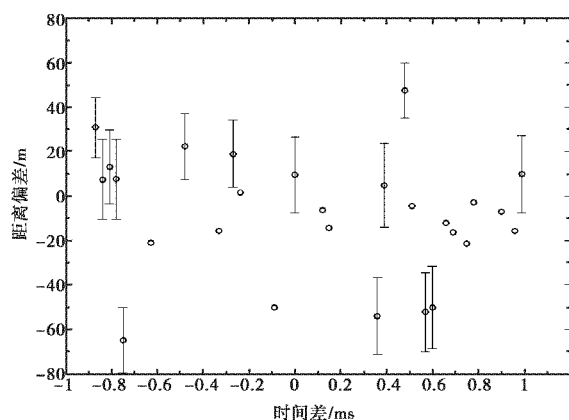


图 5 由单个脉冲内各相位翻转计算的距离及其误差

图 6 为采用以往的匹配滤波方法^[9-10]分析上文相同数据得到每个脉冲内的信噪比和空间物体距离,脉冲宽度 1 920 us,脉冲重复周期为 20 ms.空间

物体穿越雷达波束期间的回波信噪比和距离一般满足平稳、连续变化特征,我们取空间物体穿越整个波束期间的最大信噪比时刻(图6(a)中圆圈表示)对应的距离643.35 km作为空间物体距离估计值。由于单个脉冲重复周期内仅得到一个距离测量值,因此无法给出其误差估计。此处计算信噪比时,我们利用每个脉冲重复周期内远离空间物体回波的采样数据(数据长度为1 920点)计算背景噪声。由于原始数据中存在干扰信号等原因,影响了对空间物体的检测、信噪比和距离计算,甚至出现目标的错误检测(虚警)和参数的错误计算。

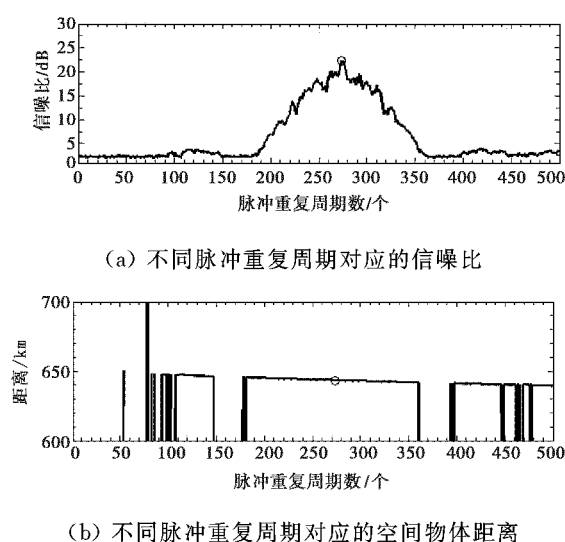


图6 采用以往匹配滤波方法提取的空间物体参数

从图4~6可知,以往匹配滤波方法利用发射-接收脉冲的时间差作为空间物体距离测量值,不能对其误差进行定量估计,其测量误差由脉冲波形、信噪比和采样间隔等决定,一般为数百米以上。而本文方法首先利用单个脉冲内各发射-接收相位翻转时间差计算其对应的空间物体距离及其误差,对高的信噪比其均方根误差为十米量级,因此本文方法不仅测量精度高,而且可给出定量的误差估计。

以上结果表明本方法得到的距离精度可达数十米量级,远优于以往的基于发射-接收脉冲前沿时间差的距离测量方法。但是若将本方法用于空间物体精密定轨和碰撞预警等,尚需进一步考虑和修正以下误差。首先,由于非相干散射雷达主要用于电离层观测,对雷达站地理坐标、天线三轴中心等精度要求不高,这直接影响了空间物体距离、位置等测量精度。其次,空间物体散射信号在电离层和接收机系统里的传播时延等可能导致数十米以上误差,特别是在电离层剧烈扰动和较低仰角探测时,雷达至空间

物体的信号传播路径不再是直线,由电离层折射产生的距离误差更大,可到数百米。再次,有一些因素会影响到距离拟合误差,比如,假定信号模型中幅度为常数或规则变化,这仅适用于无尺寸点目标。较大尺寸的不规则目标具有多个强的散射中心,干涉效应会对回波脉冲幅度和相位产生调制。此外,本文方法的实际距离测量精度还需结合空间物体精确轨道数据进行分析验证。

3 结论

非相干散射雷达是目前地基电离层监测的强大手段,在空间碎片等探测方面也具有重要应用潜力。以往的非相干散射雷达空间碎片探测研究中,主要利用发射和接收脉冲前后沿时间差来测量距离,其测量精度受脉冲前/后沿波形、采样间隔等影响,测量精度一般为数百米量级。

本文参照EISCAT的最新工作,结合自主实测数据详细介绍了基于相位编码脉冲内多次相位翻转的高信噪比空间物体距离测量方法。该方法基于两点考虑:1)相位编码脉冲内存在多次相位翻转,因此基于发射-接收脉冲之间的多次相位翻转时间差测量可实现多次距离测量。2)假定单个相位编码脉冲(本文脉冲宽度为1 920 us)内空间物体速度为常数,其距离随时间线性变化。因此对单个脉冲内的多次距离测量进行最小二乘拟合,可得到单个脉冲内的最佳距离估计值和误差估计值。

本方法可一定程度克服以往方法中由于噪声和干扰所致脉冲波形畸变引起的较大误差,距离误差可达数十米量级,这对利用我国曲靖非相干散射雷达开展空间物体的高精度探测,提升我国的空间物体监测预警能力具有重要现实指导意义。下一步,需结合空间物体精确轨道数据进一步分析非相干散射雷达的空间物体测量误差以及修正方法,以期逐步提高非相干散射雷达的空间物体参数实际测量精度。

参考文献

- [1] 丁宗华,代连东,董明玉,等.非相干散射雷达进展:从传统体制到EISCAT 3D[J].地球物理学进展,2014,29(5):2376-2381.
DING Z H, DAI L D, DONG M Y, et al. Progress of the incoherent scattering radar: from the traditional radar to the latest EISCAT 3D [J]. Progress in geophysics, 2014, 29(5): 2376-2381. (in Chinese)
- [2] SATO T, IKEDA K, KIMURA I, et al. Shape of

- space debris estimated from radar cross section variation[J]. Journal of spacecraft and rocket, 1994, 31(4): 665-670.
- [3] MARKKANEN J, LEHTINEN M, HUUSKONEN A, et al. Measurements of small-size debris with backscatter of radio waves [R]. Kiruna: EISCAT, 2002.
- [4] MARKKANEN J, LEHTINEN M, LANDGRAF M. Real time space debris monitoring with EISCAT[J]. Advances in space research, 2005, 35: 1197-1209.
- [5] MARKKANEN J, POSTILA M, VAN EYKEN A. Small size space debris data collection with EISCAT radar facilities[R]. Kiruna: EISCAT, 2006.
- [6] NYGREN T, MARKKANEN J, AIKIO A, et al. High-precision measurement of satellite velocity using the EISCAT radar[J]. Annales geophysicae, 2012, 30: 1555-1565.
- [7] MARKKANEN J, NYGREN T, MARKKANEN M, et al. High-precision measurement of satellite range and velocity using the EISCAT radar [J]. Annales geophysicae, 2013, 31: 859-870.
- [8] 金旺, 吴振森, 吴健, 等. 非相干散射雷达探测空间碎片实验研究[J]. 电波科学学报, 2011, 26(5): 956-960.
- JIN W, WU Z S, WU J, et al. Space debris experiment study using the incoherent scatter radar[J]. Chinese journal of radio science, 2011, 26(5): 956-960. (in Chinese)
- [9] 丁宗华, 许正文, 赵振维. 非相干散射雷达的空间碎片参数提取[J]. 现代雷达, 2014, 36(2): 1-5.
- DING Z H, XU Z W, ZHAO Z W. The parameter estimation of space debris from the incoherent scatter radar [J]. Modern radar, 2014, 36(2): 1-5. (in Chinese)
- [10] 丁宗华, 代连东, 赵振维, 等. 非相干散射雷达的空间碎片信号处理与参数估算方法研究[J]. 电波科学学报, 2014, 29(3): 417-423.
- DING Z H, DAI L D, ZHAO Z W, et al. The investigation of space debris's signal processing and parameter estimation based on the incoherent scattering radar[J]. Chinese journal of radio science, 2014, 29(3): 417-423. (in Chinese)
- [11] 丁宗华, 代连东, 付伦, 等. 曲靖非相干散射雷达空间碎片初步探测结果[C]//第八届全国空间碎片学术交流会论文集, 北京, 2015.
- DING Z H, DAI L D, FU T, et al. The preliminary results of the space debris observation by the Qujing incoherent scatter radar[C]// Proceedings of the 8th space debris, Beijing, 2015. (in Chinese)

作者简介

丁宗华 (1978—), 男, 湖北人, 博士, 高级工程师, 研究方向为电离层非相干散射探测与电波传播.

唐志美 (1993—), 女, 贵州人, 硕士研究生, 研究方向为空间碎片信号处理与数据分析.

代连东 (1988—), 男, 河北人, 硕士, 工程师, 研究方向为非相干散射探测与实验.