

曲靖非相干散射雷达探测空间碎片初步成果

金旺^{1,2,3}, 刘拥军^{1,2}, 孙明国³, 吴健^{1,2}

- (1. 中国电波传播研究所昆明站, 云南 曲靖 655333;
2. 电波环境特性及模化技术国家重点实验室, 云南 曲靖 655333;
3. 中国科学院国家天文台, 北京 100012)

摘要: 在介绍曲靖非相干散射雷达的基本情况和工作参量的基础上, 给出了雷达探测空间碎片的灵敏度, 报道了 2014 年 11 月 18 日空间碎片探测的实验结果, 与理论轨道计算值比较, 目标的距离值有很好的 consistency, 确认了 7 个编目碎片, 证实了利用曲靖非相干散射雷达开展空间碎片探测的可行性。经过进一步的技术革新, 曲靖非相干散射雷达有望观测直径为 5 cm 左右的空间碎片, 并通过组网等技术手段进一步扩充空间碎片和其他自然天体目标的跟踪能力。

关键词: 空间碎片; 非相干散射雷达; 雷达参数

中图分类号: P165 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0229003

Preliminary results of space debris observations using Qujing incoherent scattering radar

Jin Wang^{1,2,3}, Liu Yongjun^{1,2}, Sun Mingguo³, Wu Jian^{1,2}

- (1. Kunming Station, Chinese Research Institute of Radiowave Propagation, Qujing 655333, China;
2. National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, Qujing 655333, China;
3. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: To contribute to the improvement of China's radar debris tracking capability and capacity, efforts have been made to make the newly built Qujing incoherent scattering radar capable of LEO debris surveillance, in addition to its standard space environment observations. Firstly, a brief introduction of the Qujing radar and its operational parameters were given, followed by the discussion of the debris tracking sensitivity. The modified radar system was operated on November 18, 2014, to experiment its debris tracking capability. The experiments show that the measured ranges agree well with external values, and this confirms the debris tracking feasibility of the Qujing radar. After the planned system upgrades, the Qujing radar is expected to track debris objects as small as 5 cm, and the tracking capability and capacity, including the natural celestial bodies, would be greatly enhanced through the networking with other radars.

Key words: space debris; incoherent scattering radar; radar parameter

收稿日期: 2015-12-01; 修订日期: 2015-12-30

基金项目: 电波环境特性及模化技术国家级重点实验室基金(201400003)

作者简介: 金旺(1976-), 男, 博士, 主要从事雷达天文学方面的研究。Email: jinwang0410@163.com

0 引言

自 1957 年第一颗人造卫星发射至今,人类已向太空发射了近 6 000 个航天器。截至 2014 年底,被例行跟踪且进行编目的地球轨道目标已达 16 906 个,其中只有约 5%是工作卫星,其余全是空间碎片^[1]。这些被跟踪监测的目标绝大部分大于 10 cm,而尺寸 1 cm 以上的空间碎片据估计超过 50 万个^[2-3],并且碎片的数量还在快速增加,地球近地空间的可持续应用面临严峻的挑战。

不断增长的空间碎片数量对在轨运行航天器的威胁日益严重,对于直径大于 1 cm 位于低地球轨道的空间碎片,地基雷达是最有效的监测技术^[4-5]。美国的 Haystack 雷达、Goldstone 雷达,隶属于欧洲非相干散射雷达协会的 UHF 雷达等都承担着空间碎片观测的重要任务。由于雷达不受外部环境因素的影响,能够全天候工作,探测能力较强的雷达能够对高度 1 000 km 左右,尺度在厘米量级的空间碎片形成监测能力,使得空间碎片地基雷达探测具有重要的应用价值和现实意义。

2012 年,中国电波传播研究所在云南曲靖建成了国内首套非相干散射雷达,作为有着强大发射功率和灵敏接收能力的地面大型科学装置,成为一个多学科的开放研究平台,将在日地空间环境和空间探测等方面发挥重要作用,其涵盖的研究内容非常丰富,从中高层大气、电离层、到月亮、小行星和陨石等。与此同时,该雷达也可以作为地面探测器进行空间碎片的观测。

曲靖非相干散射雷达工作频率为 500 MHz,有全方位可动天线和有限可变脉冲宽度和脉冲重复频率,提供了一个在国内中低纬地区利用地基雷达探测空间碎片的机会。该文将概述曲靖非相干散射雷达基本参数及获得的最初空间碎片探测实验结果。

1 曲靖非相干散射雷达概况及能力分析

1.1 非相干散射雷达概况

曲靖非相干散射雷达利用原旧有雷达站址和基础设施,包括天线和天线伺服系统、供电系统和专用供电线路、供水、道路房屋等建设而成。它是世界上唯一一部位于低纬度地区电离层异常区的非相干散

射雷达,由中国电波传播研究所承建,利用国内拥有的自主知识产权设计,在原有雷达基础上按照空间物理研究的技术指标要求改造建设。其关键技术如大功率雷达反射机、信号处理技术、冷参放大接收机和雷达控制系统等均由国内设计研发。

目前的非相干散射雷达在原卡塞轮式天线 25 m 口径的基础上扩展到了 29 m,增加了天线增益,提高了天线接收灵敏度,雷达的近似大地经纬度为 (103.7°, 25.6°),海拔高度 2 072 m,图 1 为曲靖非相干散射雷达外观天线罩。

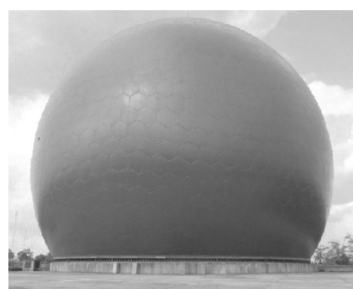


图 1 曲靖非相干散射雷达

Fig.1 Qijiang incoherent scattering radar

曲靖非相干散射雷达是一部大功率、高精度测量雷达,由发射系统、接收系统、天线及其伺服驱动系统等组成,其主要参数如表 1 所示。在实验时可以

表 1 曲靖非相干散射雷达观测参数

Tab.1 Observation parameters of Qijiang incoherent scattering radar

Parameter	Value
Location	Qijiang city, Yunnan Province, China
Coordinates	103.7°E, 25.6°N
Height above sea level	2 072 m
Radar system	Monostatic pulse radar
Operational frequency	500 MHz
Antenna	29 m steerable parabolic dish
Beam width	1.6°
Polarization	Circular
Gain	42 dB
Transmitter	
Peak power	2 MW
Average power	100 kW
Pulse duration	20-500 μs
Duty ratio	≤5%
Phase coding	Binary
Pulse repetition frequency	50 Hz-1 kHz
Receiver bandwidth	30 MHz
Range resolution	1.2 km

针对不同的研究对象和所需要的积分时间,选择相应的工作模式,可以选择脉冲重复频率、脉冲时宽、编码类型和占空比。

曲靖非相干散射雷达工作频率为 500 MHz,工作波长 60 cm,可调发射峰值功率为 2 MW,脉冲重复频率为 50~1 000 Hz,接收系统噪声温度为 130 K,接收带宽为 30 MHz,天线为 29 m 口径卡塞格伦全方位可动式。

目前,曲靖非相干散射雷达的工作模式为电离层探测而设计。而该次碎片探测实验是在电离层观测模式下进行的,发射编码为二相码,为巴克码和交错码。由于是在电离层探测模式下进行碎片探测,其距离分辨率目前只有 1.2 km。表 1 给出了曲靖非相干散射雷达观测参数。

1.2 探测能力分析

雷达通过发射含有已知特征的电磁波,接收视场波束内目标的反射信号,计算收发时间间隔获知目标的距离信息。这里关键的一项是含有目标特征的接收信号强度,这是限制雷达观测能力的重要因素。

从点目标雷达方程出发,分析非相干散射雷达的观测能力。对于点目标来讲,雷达接收机接收到的信号功率可以表示为:

$$P_r = \frac{P_t G \sigma}{4\pi R^2} \frac{A_{\text{eff}}}{4\pi R^2} \quad (1)$$

式中: P_r 为接收机接收到的功率; P_t 为发射功率; G 为天线增益; R 为散射点到天线的距离; A_{eff} 为天线有效面积; σ 为目标的雷达散射截面,雷达天线的有效面积与增益之间的关系为:

$$A_{\text{eff}} = \frac{G \lambda^2}{4\pi} \quad (2)$$

式中: λ 为工作波长。

为了便于表征雷达的探测能力,通常采用目标尺寸作为一个量度,而目标尺寸是根据雷达散射截面理论模型推导得到的。目标雷达散射截面 σ 是指目标在雷达接收方向单位立体角的散射功率与入射功率之比。由于 σ 是随雷达照射的视界角和频率变化而变化的,也与目标姿态和雷达工作极化方式有关,因此测量目标散射截面准确值是比较困难的。

在评估曲靖非相干散射雷达空间碎片探测能力时,为理解方便,假设观测对象为理想导体球,散射

截面换算成目标直径大小来描述,分析目标的散射截面和尺寸进行简单模型计算。假设目标为微粒球形金属导体,且传播路径是理想无损耗的,按照信噪比为 25,积分时间为 0.1 s,根据雷达方程,曲靖非相干散射雷达可以在距离雷达 1 000 km 的地方观测到直径为 5 cm 的理论导体球状目标,与国际上现有非相干散射雷达探测能力相当。

1.3 空间碎片探测原理

雷达接收机接收到的信号实际上是发射信号经过时间延迟后和频率偏移量变化之后的含有接收系统噪声的发射波形,一旦接收系统滤波器输出信噪比超过预设门限,就认定回波信号中含有目标信息。研究接收信号和发射信号的时延信息和频率信息的变化就可以得到目标的参量。在计算上一般采用匹配滤波方法,通过信噪比(SNR)的测量还原观测目标的实际参数。

为了在回波信号功率谱中获取空间碎片参数信息,构造了匹配滤波方程,使得 SNR 最大化。接收信号功率,是包括噪声的目标回波复信号可以写为:

$$z(t) = s(t) + \gamma(t) \quad (3)$$

式中: $s(t)$ 为接收信号; $\gamma(t)$ 为噪声。 $x(t)$ 为发射信号,经碎片目标调制后的函数,一般含有目标的距离和速度信息,对于后向散射测量,设目标的距离为 R_0 ,径向速度为 v_0 ,则:

$$s(t) = b_0 x(t - 2R_0/c) \exp[-i2\pi v_0 t / (2/\lambda)] \quad (4)$$

式中: c 为光速; b_0 与目标的散射系数有关。根据雷达信号处理中的匹配滤波原理:当接收滤波器的响应 $h(t)$ 为发射信号的复共轭时,接收信号的信噪比最大,构造匹配函数,对于离散采样后的数据,匹配函数是距离门 $R_i = j\tau_s c/2$ (τ_s 为采样间隔)和多普勒速度 v 的函数,其主要原理表述如下:

$$MF(v, R_i) = \frac{\sum_n \overline{z_n^*} x_n \exp[i2\pi v / (\lambda/2) n \tau_s]}{\|x\|} \quad (5)$$

公式(5)右边的分子即匹配滤波后的结果,其中:

$$\|x\| = \left(\sum_n |x_n|^2 \right)^{1/2} \quad (6)$$

如果忽略噪声的影响,则 MF 的最大值的位置由公式(4)、(5)可知,就是目标的距离和径向速度的位置。即:

一般情况下是有噪声影响的, MF 的最大值的位置是目标的距离和径向速度的估计值:

$$(\hat{v}, \hat{R}) = \underset{v, R}{\operatorname{argmax}} MF(v, R) \quad (8)$$

假设噪声采样 γ_n 符合均值为 0、方差为 σ^2 的高斯分布, 则 MF 的最大值平方的数学期望:

$$E(\max MF^2) \approx \frac{E|\langle b_0 x_0 + \gamma, x_0 \rangle|^2}{\|x_0\|^2} = \frac{\|b_0 x_0\|^2 + E|\langle \gamma, x_0 \rangle|^2}{\|x_0\|^2} = \|s\|^2 + \sigma^2 \quad (9)$$

除去噪声后的接收信号的能量为:

$$\|\tilde{s}\|^2 = \max MF^2 - \sigma^2 \quad (10)$$

据雷达信号处理中的匹配滤波原理, 滤波器输出的信噪比为信号的能量 E_s 与噪声功率谱密度 N 的比值, 即:

$$ENR = E_s / N \quad (11)$$

则利用 MF 的最大值可得到信噪比 ENR 的估计值 \tilde{ENR} :

$$\tilde{ENR} = \frac{\max MF^2}{\sigma^2} - 1 \quad (12)$$

此次试验中, 曲靖非相干散射雷达检测门限能量噪声比值取为 25, 即 $\tilde{ENR} = 25$, 可以得到最小可检测信号:

$$\max MF^2 \geq 25\sigma^2 \quad (13)$$

式中: σ^2 为噪声能量的估计值。噪声能量是系统噪声温度和接收带宽的函数, 当接收带宽确定后, 系统噪声能量取决于雷达接收系统的噪声温度, 其系统噪声温度随外界天空背景噪声微小变化, 一般取平均值。

2 空间碎片探测初步成果

基于地基雷达的非相干散射探测已获得几十至数千千米范围的电子密度、电子温度等参量, 并发展成为地面探测技术中最精确、获得参量最多的一种探测方法^[6-7]。在电离层探测中应用的现代电子和计算机方法、脉冲编码、脉冲压缩、调频调相等技术实现一次探测获得电离层全信息方向发展的同时, 通过对所测信号的针对性处理, 可以同时获取空间碎

片的一些基本参量信息。一般来讲, 非相干散射雷达不具备跟踪功能, 碎片的观测采用波束驻留式, 即观测过程中, 雷达指向不变, 捕捉穿越雷达波束的碎片信息。

基于国内 2010 年 3 月 25 日在欧洲非相干散射雷达协会 UHF 雷达^[8]开展的成功观测经验, 于 2014 年 11 月 18 日利用曲靖非相干散射雷达开展了空间碎片探测试验。整个实验过程中采用波束驻留模式, 天线指向俯仰角 75° , 方位角 90° 固定不变, 发射编码为二相码, 距离分辨率优于 1.2 km, 接收原始采样数据, 运用匹配滤波函数和雷达方程计算目标的距离参量, 获得了部分碎片数据, 经与碎片理论轨道预测计算值比较, 最后确认了 7 个空间碎片, 其探测结果列于表 2。

表 2 给出的目标编目数据是经过轨道计算证实是卫星或空间碎片在给定时间内经过云南曲靖非相干散射雷达波束。从表中给出的数据可以看出, 距离偏差最大值为 1.2 km (雷达观测值与预报轨道值之差), 对应的碎片编目有两个, 一个是编目为 959 的目标, 另一个是编目为 30597 的目标。该距离项误差 1.2 km 符合雷达系统的测量范围。根据轨道预报模型的测算, 959 号碎片(国际识别号 1964-083C)在 09 点 40 分 06 秒(北京时间)经过曲靖非相干散射雷达上空被雷达波束捕获时, 此刻偏离雷达波束中心 0.8° , 超过了雷达的主瓣范围。这说明了对于雷达散射截面较大的碎片, 由于反射能力较强, 其反射功率较大, 反射信号可以被雷达旁瓣捕获。在此次试验中, 捕获的目标还有 11 点 30 分 51 秒(北京时间)经过雷达波束的 14209 号(国际标识号 1983-075C)碎片, 此刻位于偏离雷达波束中心 0.8° 位置处, 是美国公布的该目标的 RCS 为 0.0043 m^2 。

30597 号碎片(国际识别号 1999-025AMC)在 11 点 26 分 57 秒(北京时间)经过偏离雷达主波束中心 0.3° 时被脉冲信号捕获。22079 号碎片(国际标识号 1992-052D)在 10 点 29 分 03 秒(北京时间)穿越雷达波束主瓣时被雷达脉冲信号照射到, 此刻偏离雷达波束中心 0.1° , 实测距离为 1 393.2 km, 与理论预测计算值相差 0.7 km。

和其他的现有非相干散射雷达一样, 国内的非相干散射雷达主要探测对象是空间物理环境, 其中以电离层为主, 针对的是区域目标的整体统计特性,

表 2 曲靖非相干散射雷达 2014 年 11 月 18 日碎片观测结果
Tab.2 Identified debris tracked by the Qujing radar on November 18, 2014

Time(Beijing)	Catalog	Measured value/ km	Prediction value/ km	RCS value/m ²	Range deviation/ km	Angle from centre of radar beam/(°)
09:40:06	959	1087.9	1 089.1	1.681 3	1.2	0.8
10:01:50	29 836	697.2	698.3	0.014	1.1	0.7
10:03:10	10 462	1 099.8	1 100.9	0.488	1.1	0.6
10:29:03	22 079	1 393.2	1 393.9	13.0	0.7	0.1
11:26:57	30 597	750.1	748.9	0.014	1.2	0.3
11:30:51	14 209	522.9	522.4	0.004 3	0.5	0.8
11:39:97	18 313	975.7	976.3	6.46	0.6	0.4

更强调一个剖面的变化趋势和整体漂移变化量,所以曲靖非相干散射雷达对天线指向和大地坐标的精确要求较低,能够完成在波束驻留模式下探测电离层区域特性的雷达在探测空间碎片时,给探测实验结果的分析及理论预测计算带来了困难,使得部分实验结果无法得到预测计算值的验证,实验数据精度有待提高。

空间碎片探测最主要的目的是碰撞预警,而碰撞预警的基础就是高精度的空间碎片轨道数据^[9],提高轨道数据的精度是航天器规避空间碎片的保障。保障源头数据的准确性,提高数据质量的精确度和可靠性是雷达探测实验研究的生命线,数据的质量直接影响到统计分析和预测能否得出正确的结论。改善雷达时频系统稳定度,增加发射编码类型,提高测量精度和有效性,降低系统噪声和误差,是未来曲靖非相干散射雷达发展的方向所在。

3 结束语

非相干散射雷达主要的设计目的是研究电离层。但空间目标反射回的信号同样被雷达所接收,因此,通过检测、处理被空间目标反射回的信号,实现对空间目标的探测是可行的。为实现这一可行性,雷达系统需要进行站坐标和雷达指向精度的精确校正等技术改造和升级。目前曲靖非相干散射雷达正在进行适用于空间碎片测量的系统升级设计,

以有能力探测 5 cm 左右的空间碎片。正在进行系统升级的雷达设备测量精度的提高,不仅对空间目标更精确信息的提取,而且对精确测量空间物理大气参数随时间和高度的变化测定都是很重要的。

对于低轨空间碎片,地基雷达是目前国际上最重要的观测设备。从长远看,雷达发射机功率和天线孔径是观测远距离细小物体的一个限制因素,寻求适合的高灵敏度的天线设备组成探测网对空间碎片进行探测,是提高地基雷达系统观测能力的重要途径。目前云南 40 m 射电望远镜天线,内蒙古低频 40 面口径 4.5 m 综合孔径天线阵列,新疆巴里坤已经建成的 16 面口径 6 m 天线阵列和计划建设的后续大规模天线阵列,以及正在建设的世界最大单口径射电望远镜贵州 500 m 射电望远镜,均可作为曲靖非相干散射雷达的接收设备。这些设备的接收面积的大大增加和接收站地理分布的广泛性必将对空间碎片的雷达探测研究产生积极的作用,同时将大大提高探测能力和测量精度,以及更大的视角能够同时实现空间碎片的多目标普测和精确定位能力。

走向开放的具有兆瓦级发射能力的曲靖非相干散射雷达,及其世界一流的高灵敏度的遥测设备还可以直接应用于射电天文观测、太阳系行星地基雷达探测和深空探测等科学和工程应用中,成为推动国内天文学研究整体迈上新台阶的重要基础设施之一。

参考文献:

- [1] Zhang Jingxu. Progress in foreign ground-based optoelectronic detecting system for space target detection [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(1):10–16. (in Chinese)
张景旭. 国外地基光电系统空间目标探测的进展[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(1): 10–16.
- [2] NASA Orbital Debris Program Office. The Orbital Debris Quarterly News, 2015, 19(1): 1–10[EB/J]. <http://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/newsletter/pdfs/ODQNV19i1.pdf>.
- [3] Li Bin, Sang Jizhang, Ning Jinsheng. Analysis of accuracy in orbit predictions for space debris using semianalytic theory [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3310–3316. (in Chinese)
李彬, 桑吉章, 宁津生. 空间碎片半解析法轨道预报精度性能分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(11): 3310–3316.
- [4] Kessler D J. Orbital debris environment for space craft in low earth orbit[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1991, 28(3): 347–351.
- [5] Sato T, Wakayama T, Tanaka T, et al. Shape of space debris as estimated from radar cross section variations [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1994, 31(4): 665–670.
- [6] Bowles K L. Observations of vertical-incidence scatter from the ionosphere at 41Mc/s[J]. *Phys Rev Letters*, 1958, 1: 454.
- [7] Millman G H, Moceyunas A J, Sanders A E, et al. The effect of Faraday rotation on incoherent backscatter observations [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1961, 66(5): 1564–1568.
- [8] Jin Wang, Wu Jian, Wu Zhensen, et al. Space debris cross section observations with 930MHz radar [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2012, 27(6): 1076–1080. (in Chinese)
金旺, 吴健, 吴振森, 等. 930MHz 雷达测空间碎片散射截面电波[J]. 科学学报, 2012, 27(6): 1076–1080. (in Chinese)
- [9] Li Yuqiang, Li Rongwang, Li Zhulian. Application research on space debris laser ranging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3324–3329. (in Chinese)
李语强, 李荣旺, 李祝莲. 空间碎片激光测距应用研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(11): 3324–3329.