

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2023.02.013

# 空间低频射电天文天线材质 – 观测性能分析

董 亮<sup>1</sup>, 陈 松<sup>2</sup>, 张从发<sup>3</sup>, 黎 彪<sup>3</sup>

(1. 中国科学院云南天文台, 昆明 650011; 2. 昆明贵金属研究所, 昆明 650106; 3. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

**摘 要:**15 MHz 以下的射电天文信号由于受到电离层的阻挡只能通过空间卫星平台进行观测。采用空间展开的电小天线是目前普遍的做法。就电小天线的材质 – 接收性能方面进行分析, 构建了基于材质磁导率、电导率对后端接收机噪声影响模型。通过计算结果比对和就天线材质空间展开难易程度的综合考虑, 归纳总结了不同材质对空间低频射电天文观测噪声影响以及展开难度, 为新天线的研制提供了数据依据。该项工作将为下一步 L1 点空间天气监测卫星中的太阳射电观测载荷提供技术支持。

**关键词:**电小天线; 空间射电天文; 低频; 噪声模型; 性能分析

中图分类号: TN253; V443

文献标志码: A

文章编号: 1674-7135(2023)02-0084-07

## Space low frequency radio astronomy antenna materials-observation performance analysis

DONG Liang<sup>1</sup>, CHEN Song<sup>2</sup>, ZHANG Congfa<sup>3</sup>, LI Biao<sup>3</sup>

(1. Yunnan Astronomy Observatory Chinese Academy of Science, Kunming 650011, China;

2. Kunming Institute of Precious Metals, Kunming 650106, China;

3. Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The radio astronomy signal can only be observed in space because of the ionospheres' barrier. Nowadays, it always uses the space deployable electric small antennas for observing. In this paper, we did some analysis for the material of electric small antennas and the corresponding receiving performance, and we constructed the noise influence model based on the material Permeability, electrical conductivity. Through the comparing the computing results based on above model, we conclude that the different influences and deploy difficulties based on different antenna materials, and provide the data reference for new antenna designing. This work can provide the technology supports for the solar radio observation payload located in the next L1 point space monitoring satellite.

**Key words:** electric small antenna; space radio astronomy; low frequency; noise model; performance analysis

## 0 引言

低于 15 MHz 射电天文信号由于受到电离层的阻挡只能搭载于卫星平台上进行观测。这一频段

是重要射电天文观测频段, 在空间天气、太阳射电<sup>[1]</sup>、太阳射电太阳系内行星爆发<sup>[2]</sup>等诸多领域有着重要的研究价值<sup>[3-4]</sup>。

收稿日期: 2022-06-25; 修回日期: 2022-07-22

**基金项目:**国家自然科学基金天文联合基金培育项目(编号: U2031133); 天文联合基金重点项目(编号: U1831201); 重点专项项目(编号: 11941003); 地区基金项目(编号: 51767011); 云南省应用基础研究计划面上项目(编号: 2019FB009); 云南省稀贵金属材料基因工程(编号 202002AB080001-6); 云南省太阳物理和空间目标监测重点实验室项目(编号: 202205AG070009); 云南省国际超新星研究重点实验室基金项目(编号: 202302AN360001); 昆明市对外(国际)科技合作基地项目(编号: GHJD-2021022)

**引用格式:**董亮, 陈松, 张从发, 等. 空间低频射电天文天线材质 – 观测性能分析[J]. 空间电子技术, 2023, 20(2): 84–90. DONG L, CHEN S, ZHANG C F, et al. Space low frequency radio astronomy antenna materials-observation performance analysis[J]. Space Electronic Technology, 2023, 20(2): 84–90.

首先在空间天气领域,其是低频太阳射电重要的观测频段,从 15 MHz 一直延展到 KHz 级的太阳射电爆发信号对应了日冕物质抛射 (coronal mass ejection, CME) 事件在距离地球不同位置的辐射情况,它的观测数据是其他预测 CME 运动方向观测手段不可替代的重要物理参数<sup>[1]</sup>,如图 1 所示。

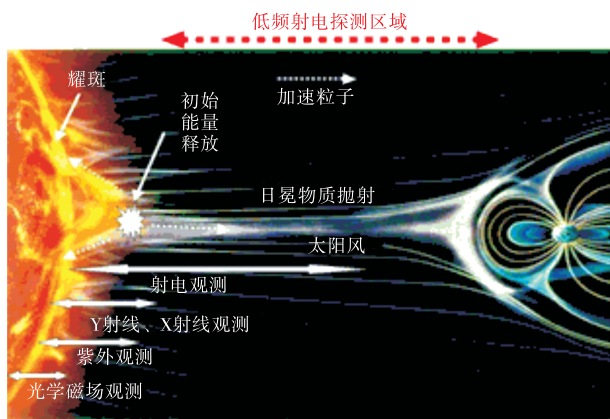


图 1 低频太阳射电观测对 CME 的探测范围

**Fig. 1** Detection range of CME by low frequency solar radio observations

其次太阳系内行星研究方面,15 MHz 以下的空间观测也具有重要的地位<sup>[5-7]</sup>,首先是其在大行星爆发如木星磁层研究,例如木星的射电爆发主要有两类:一类在短波波段频段,另一类在短波的低频段和中波波段。其余如海王星、天王星等也存在类似木星的射电爆发辐射<sup>[8]</sup>。

地球千米波辐射 (ARK): 一分钟尺度 10 kHz ~ 60 kHz 频率范围, 其与空间天气、地磁暴等现象密切相关<sup>[9-10]</sup>。图 2 是在该频段主要的射电观测目标及流量情况。

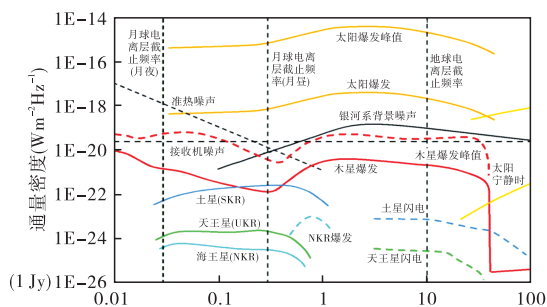


图2 低频射电波段的可观测科学目标一览

**Fig. 2 Overview of observable science targets in low frequency radio bands**

目前,已有的成功案例,如 WIND/WAVES 卫星、STEREO/WAVES 卫星,嫦娥 4 号着陆器的低频射电频谱仪 (low frequency radio spectrum analyze,

LFRS)、中荷兰长波探测器(netherlands china long wave explore, NCLE)采用空间展开的电小天线作为观测天线。在空间失重环境下的天线展开难易程度必然和天线材质息息相关,而进一步作为射电天文的观测接收装置,其面对的是微弱的射电天文信号,从图2中的射电天文信号流量来看,大部分信号较之于通信信号,甚至大部分卫星平台自身的底噪信号都是弱信号,为此空间电小天线既要在结构上保持稳定,又要兼顾到作为接收信号天线的电性能特性。

在结构方面,空间低频天线绝大多数采用空间伸杆设计,这是一种最基本的空间可展开机构。借助空间伸杆可以实现在发射过程中存储空间节省,入轨后再展开成单极子天线形式。

其中 STEREO/WAVES 采用了铍铜合金<sup>[11]</sup>, 长度为 5 m, 在空间中采用螺旋形展开机构展开, 如图 3 所示。

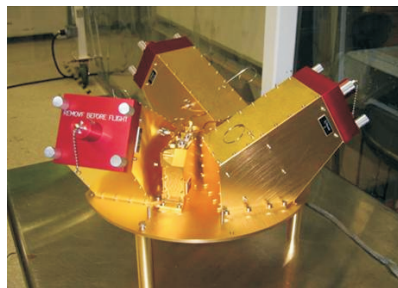


图3 STEREO/WAVES 的空间展开机构

**Fig.3 Space deployable mechanism of STEREO/WAVES**

搭载于嫦娥4号中继星“鹊桥”的NCLE采用可收缩的碳纤维卷尺型驱动装置,在空间入轨后进行展开,该卷尺型驱动装置内部的步进电机可由程序控制伸缩任意长度,这样就可以兼顾到一些特殊频段的观测。如图4所示。

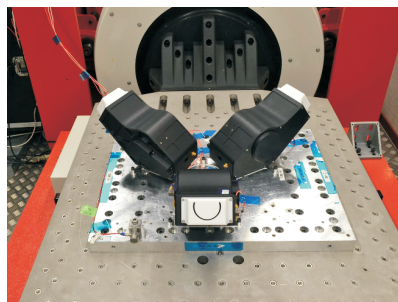


图4 “鹊桥”中继星上 NCLE 载荷卷尺天线

**Fig. 4** Tape antenna of NCLE payload located in “Queqiao” relay satellite

嫦娥4号着陆器的低频射电频谱仪LFERS采用的是不锈钢作为主要材质,采用弹性卷筒作为伸缩

机构实现天线的空间展开<sup>[12]</sup>。如图 5 所示。

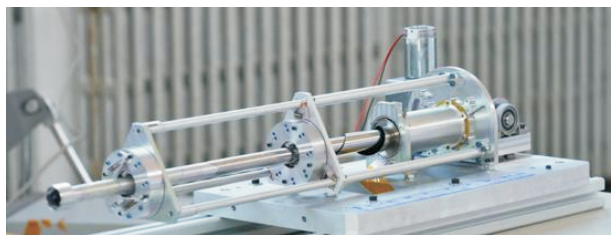


图 5 弹性卷筒成型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of elastic drum forming

从另一方面展开方式上,也有新的创新。梁旭豪等<sup>[13]</sup>提出了一种结构/机构一体化空间可展开复合材料柔性伸杆,其在发射阶段能无损 180° 折叠,夹紧固定在卫星的表面,在入轨后通过直接解锁释放机构的办法将伸杆展开成直线,完全展开后即可实现空间天线。

较之于前述几种展开机构,该种方式具有控制系统简单,一次性可控制到位等优点,值得下一步在空间平台上使用。

但空间天线/电场传感器不仅仅取决于结构,作为射电天文观测更在意其电性能分析,文章将从电小天线电性能方面进行分析,以指导不同空间展开伸杆的设计和材料选型。

## 1 空间电小天线特点

目前绝大多数空间的低频射电频谱仪接收天线设计长度为 5 m,当工作频率较低时,由于其长度远小于观测信号的波长,这样的接收天线属于电小天线。

由于电小天线的物理尺寸远小于  $\lambda/2\pi$  的天线,其辐射增益低,电抗为阻抗的主要成分,但其辐射方向图在相应频带内变化较小。为此部分参考文献又将电小天线称之为电场传感器 (electric field sensor, EFS)。

为了实现接收天线的宽频带工作,可采用有源电路实现全频带内的阻抗匹配,同时对其低频增益进行补偿,即为有源天线。

电小单极子天线的辐射电阻、损耗电阻及电容可分别表示如下<sup>[14]</sup>:

$$R_r = \frac{2\pi}{3} Z_0 (l_e/\lambda)^2 \quad (1)$$

$$R_l = \frac{l\rho}{4\pi a\delta} \quad (2)$$

$$C_a = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{[2\ln(l/a) - 2 + \ln(4)]} \quad (3)$$

其中  $\rho$  为电阻率,  $\delta$  为趋肤深度。从式(1)和式(2)可以分析得到:

1) 即使在不同材质的条件下,天线形状相同,即可得到同样的辐射电阻  $R_r$  和电容  $C$ ;

2) 损耗电阻  $R_l$  与天线材质密切相关。

天线的输入阻抗可表示为:

$$Z = R + jX(R_r + R_l) - j/(\omega C) \quad (4)$$

当工作频率较高时,天线电尺寸较大 ( $l \geq \lambda/2\pi$ ),单极子天线的有效长度可用式(5)计算:

$$l_e = \frac{\lambda}{\pi} \tan\left(\frac{\pi l}{2\lambda}\right) \quad (5)$$

当工作频率较低时,天线电尺寸较小 ( $l \leq \frac{\lambda}{2\pi}$ ),单极子天线上的电流近似呈三角分布,如等效为恒定分布,则天线的有效长度  $l_e$  可表示为:

$$l_e = \frac{l[2\ln(l/a) - 1]}{2[2\ln(l/a) - 2 + \ln 4]} \quad (6)$$

其中  $l$  为单极子长度,  $a$  为单极子横截面半径,  $l/a$  为单极子天线细长比。

## 2 天线接收信号模型的建立

当空间中的来波电场平行于天线的分量为  $E_{\parallel}$ ,则天线接收到的电压  $V$  为:

$$V = E_{\parallel} l_e \quad (7)$$

设  $V$  和  $E_{\parallel}$  为与频率  $f$  有关的函数,式(7)可以写成:

$$V_f = E_{\parallel}(f) l_e \quad (8)$$

另一方面,从天线/电场传感器接收到的电压功率谱密度根据 Nyquist 方程<sup>[15]</sup>可以写成:

$$V_f^2 = 4k_B T R_r \quad (9)$$

其中,  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $V_f^2$  又可以写为天线接收到的信号自相关函数的傅里叶变换:

$$V_f^2 = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} [V(t) V(t + \tau)] e^{j2\pi f\tau} d\tau \quad (10)$$

进一步,由于天线接收到的电压  $V$  只能在天线/电场传感器的辐射电阻  $R_r$  上产生,则式(7)通过欧姆定律可以写作:

$$V = I_0 R_r \quad (11)$$

如图 6 所示,其中  $I_0$  为整个环路电流。将辐射电阻产生电压作为一个辐射源,进一步考虑整个接收机输入端电阻为  $R_{in}$ ,有:

$$V_{in} = V \cdot \frac{R_{in}}{R_{in} + R_l} = L_{eff} \cdot E_l \cdot \frac{R_{in}}{R_{in} + R_l} =$$

$$L_{eff} \cdot E_l \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_l}{R_{in}}} \quad (12)$$

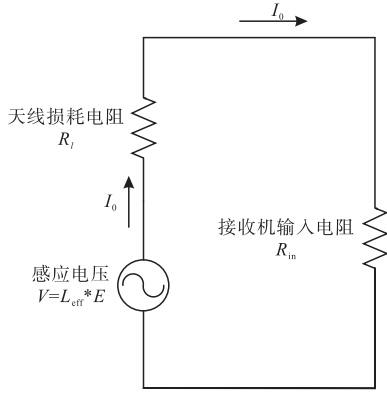


图 6 低频空间接收系统信号系统电路模型

Fig. 6 Circuit model of signal receiving system in low frequency space

接收机的输入电压与天线的损耗电阻  $R_l$  成反比,当损耗电阻较大时,接收机获得的电压越小,灵敏度越低。

那么进一步设损耗电阻  $R_l$  的分压电压可以作为整个系统的一个损耗电压  $V_{loss}$ :

$$V_{loss} = I_0 R_l \quad (13)$$

### 3 损耗电阻的解析分析

损耗电阻为天线/电场传感器本身的压降,同时也对整个接收机产生噪声贡献。为此,空间射电频谱仪载荷接收机均采用高阻匹配方案,一是为了降低在损耗电阻上的压降;二是可以减少环路电流,降低损耗电阻产生的热噪。

在本节中对其不同材质下的性能进行分析,式(2)中的趋肤深度  $\delta$  由式(14)决定:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{w\mu}} \quad (14)$$

其中,  $w$  为信号角频率,  $\mu$  为磁导率,  $\rho$  为电导率;则损耗电阻可以写作:

$$R_l = \frac{l\rho}{4\pi a\delta} = \frac{l\rho}{4\pi a} \left( \frac{w\mu}{2\rho} \right)^{0.5} = \frac{l}{4\pi a} \left( \frac{w\mu\rho}{2} \right)^{0.5} =$$

$$\frac{l}{8\pi a} (2w\mu\rho)^{0.5} = \frac{\sqrt{2}l}{8\pi a} (w\mu\rho)^{0.5} \quad (15)$$

如果考虑电导率的温度效应,有:

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (16)$$

其中,  $\rho_0$  为室温下的电阻率,  $T_0$  为室温,  $T$  为当

前温度,  $\alpha$  为温度影响系数;损耗电阻可以表示为:

$$R_l = \frac{\sqrt{2}l}{8\pi a} \{w\mu\rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)]\}^{0.5} \quad (17)$$

由式(17)可见,损耗电阻  $R_l$  与材质的电导率  $\rho$  和磁导率  $\mu$  的二分之一次方成正比。

进一步式(13)可以写作:

$$V_{loss} = I_0 \frac{\sqrt{2}l}{8\pi a} \{w\mu\rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)]\}^{0.5} \quad (18)$$

根据功率与电压关系,损耗电阻上的损耗功率  $P_{loss}$  为:

$$P_{loss} \propto \frac{l^2}{32\pi^2 a^2} w\mu\rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (19)$$

在同一观测频率  $w$  条件下,损耗功率与天线/电场传感器长度  $l$  的平方,材质的磁导率、电阻率以及温度变化成正比,和截面积成反比。

综上,可以把损耗电阻理解为接收机第一级 LNA 与理想天线之间的带有损耗的传输电缆。

### 4 容抗模型对接收的影响分析

在空间中,电小天线的接收功率主要是由天线的电容  $C_a$  和系统杂散电容  $C_s$  构成的传输系数  $\Gamma$  决定<sup>[16]</sup>:

$$\Gamma = \frac{C_a}{C_a + C_s} \quad (20)$$

在空间中天线/电场传感器与空间等离子体等物质相互作用拓扑图如图 7 所示<sup>[11]</sup>:

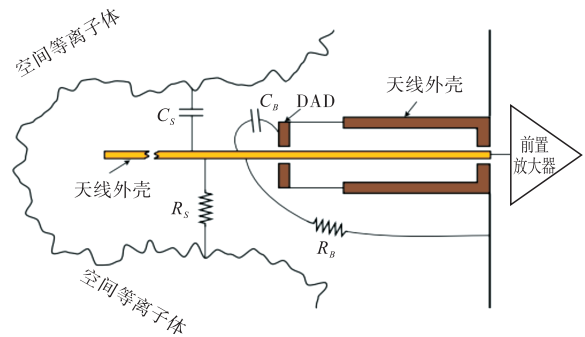


图 7 天线/电场传感器与周围环境构建的相互作用图

Fig. 7 Interaction diagram between antenna/electric field sensor and surrounding environment

进一步解释天线的容抗计算  $C_a$  的决定因素,根据 ULYSSES, ISEE 以及 CASSINI 等卫星上低频射电天文设备设计经验,  $C_a$  在 6m 的单集子天线 (monopole) 条件下大约为 63 Pf。其中,  $C_a$  符合如下公式<sup>[17]</sup>:

$$C_a \approx \frac{2\pi\epsilon_0}{[\log(L/a) - 1]} \frac{\tan kL}{k} \quad (21)$$

其在某一特定波长 ( $k = 2\pi/\lambda$ ) 和周围环境 ( $\varepsilon_0$ ) 条件下, 只与天线/电场传感器的实际长度  $L$  和横截面积有关, 如果在选定上述两个参数情况下,  $C_a$  即可确定。

## 5 空间观测中的实际情况考虑

### 5.1 外界信号来源分析

考虑观测源的亮温度  $B_f$  ( $\text{W}/\text{m}^2/\text{Hz}/\text{sr}$ ) 在一特定波长  $\lambda = c/f$  下符合瑞利 - 金斯曲率 (Rayleigh-Jeans law) [16]:

$$B_f = 2 \frac{K_B T}{\lambda^2} \quad (22)$$

另一方面, 考虑到空间环境中等离子体产生的准热噪声辐射 (quasi-thermal noise, QTN) [18-19], 其功率随频率变化为:

$$V_{\text{QTN}}^2 \approx 5 * 10^{-5} \frac{n_e T_e}{f^3 L} \quad (23)$$

其中,  $n_e$  为载荷所在位置的等离子体密度, 此信号为一个各向同性信号。

### 5.2 信号传输模型

空间低频射电载荷总的接收信号  $V_r$  的功率谱可以表示为 [18]:

$$V_r^2 = V_{\text{noise}}^2 + \Gamma^2 V_{\text{QTN}}^2 + 2\Gamma^2 R_r \lambda^2 B_f \quad (24)$$

其中  $V_{\text{noise}}$  为接收系统自身噪声, 包含了接收机系统的噪声和损耗电阻带来的噪声, 可以分解为:

$$V_{\text{noise}}^2 = V_{\text{rec\_noise}}^2 + V_{\text{loss}}^2 \quad (25)$$

其中,  $V_{\text{rec\_noise}}^2$  为接收机自身的噪声功率,  $V_{\text{loss}}^2$  为

$$\text{SNR} = \frac{(V_{\text{QTN}}^2 + 320\pi^2 l_e^2 B_f) \times \left( \frac{R_{\text{in}}}{R_{\text{in}} + \frac{l}{4\pi a} \cdot \sqrt{\frac{w\mu\mu_0[1+\alpha(T-T_0)]}{2}}} \cdot \frac{C_a}{C_a + C_{\text{st}}} \right)^2}{V_{\text{rec\_noise}}^2 + k \cdot \frac{l^2}{32\pi^2 a^2} w\mu\mu_0 [1+\alpha(T-T_0)]} \quad (30)$$

综上, 空间天线/电场传感器材质对接收信号影响主要表现在如下:

1) 在降低噪声方面: 由于损耗电阻带来噪声, 这部分表现为给接收信号带来的噪声, 使得有用信号的信噪比下降, 主要由损耗电阻材质的磁导率、电阻率决定的, 在特定条件下应尽量选择磁导率和电阻率较小的材料; 同时在可能的条件下增加横截面积。

2) 在提高接收信号功率方面: 通过有效的提高天线/电场传感器的容抗  $C_a$ , 同时降低材质的磁导

损耗电阻带来噪声功率, 结合式 (19),  $P_{\text{loss}}$  表达式线性折算为  $V_{\text{loss}}^2$ , 有:

$$V_{\text{loss}}^2 = k \cdot \frac{l^2}{32\pi^2 a^2} w\mu\mu_0 [1+\alpha(T-T_0)] \quad (26)$$

其中,  $k$  为一个线性折算比例系数。

进一步结合式 (12), 实际能够被后端接收机采集到的信号功率谱表现为外部功率 (QTN 和射电源辐射信号) 通过天线损耗电阻和接收机输入电阻之间的分配关系, 满足如下公式:

$$V_{r\_in}^2 = V_{\text{noise}}^2 + (\Gamma^2 V_{\text{QTN}}^2 + 2\Gamma^2 R_r \lambda^2 B_f) \times \left( \frac{R_{\text{in}}}{R_{\text{in}} + R_l} \right)^2 \quad (27)$$

将式 (23) 和式 (26) 代入式 (27) 得到:

$$V_{r\_in}^2 = V_{\text{rec\_noise}}^2 + k \cdot \frac{l^2}{32\pi^2 a^2} w\mu\mu_0 [1+\alpha(T-T_0)] + (V_{\text{QTN}}^2 + 2R_r \lambda^2 B_f) \times \left( \frac{R_{\text{in}}}{R_{\text{in}} + R_l} \cdot \frac{C_a}{C_a + C_{\text{st}}} \right)^2 \quad (28)$$

再将式 (1)、式 (2) 和式 (14) 对接收电阻和损耗电阻的表达式代入式 (28) 中, 表达式如式 (29) (化简过程省略) 所示:

$$V_{r\_in}^2 = V_{\text{rec\_noise}}^2 + k \cdot \frac{l^2}{32\pi^2 a^2} w\mu\mu_0 [1+\alpha(T-T_0)] + (V_{\text{QTN}}^2 + 320\pi^2 l_e^2 B_f) \times \left( \frac{R_{\text{in}}}{R_{\text{in}} + \frac{l}{4\pi a} \cdot \sqrt{\frac{w\mu\mu_0[1+\alpha(T-T_0)]}{2}}} \cdot \frac{C_a}{C_a + C_{\text{st}}} \right)^2 \quad (29)$$

进一步可将信噪比写为:

$$\text{SNR} = \frac{(V_{\text{QTN}}^2 + 320\pi^2 l_e^2 B_f) \times \left( \frac{R_{\text{in}}}{R_{\text{in}} + \frac{l}{4\pi a} \cdot \sqrt{\frac{w\mu\mu_0[1+\alpha(T-T_0)]}{2}}} \cdot \frac{C_a}{C_a + C_{\text{st}}} \right)^2}{V_{\text{rec\_noise}}^2 + k \cdot \frac{l^2}{32\pi^2 a^2} w\mu\mu_0 [1+\alpha(T-T_0)]} \quad (30)$$

率、电阻率和增加横截面积来实现。

3) 从横截面积方面来看, 由于空间飞行器, 如卫星、空间站等内部空间狭小, 不可能使用较大的横截面积的型材作天线/电场传感器, 因此在横截面积这个参量上的扩展空间不大。

## 6 不同材质 - 观测性能对比分析

作为空间展开的兼具机械和电子双重功能的机电装置, 在材质选择上应考虑其轻便性、易塑性、低噪声等多重特性。对嫦娥 4 号着陆器低频射电频

谱仪 LFRS(不锈钢材料)和 STEREO/WAVES(镀铜合金材料)的实际情况进行分析。

其中,铜的磁导率(相对磁导率)和电阻率(电阻率的倒数)为:

$$\mu_{\text{铜}} = 0.99990 \text{ H/m}$$

$$\sigma_{\text{铜}} = 1.75 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$$

$$\rho_{\text{铜}} = 5.7 \times 10^7 \text{ } 1/\Omega\text{m}$$

钢的相对磁导率是 129 H/m

在 0~900℃,各类不锈钢主要牌号的电阻率大小基本在  $70 \times 10^{-6} \sim 130 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$ ,且随着温度的增加有增加的趋势。为此不锈钢的电阻率高于铜的电阻率 2000~10000 倍左右。

综上,不锈钢材质所制天线的损耗电阻大约比镀铜合金材质所制天线的损耗电阻高出 1000 倍左右。

将上述参数带入式(30),在长度、横截面积等参数一定的条件下,得到铜制天线/电场传感器接收信号的信噪比要高出不锈钢制天线/电场传感器接收信号的信噪比 30 余倍,是个相当可观的提升。

在此,列出了多种材料的性能对比,如表 1 所列:

表 1 不同材料的性能对比

Tab.1 Comparison of the properties of different materials

| 材料名称 | 相对磁导率  | 20℃ 电阻率/<br>( $\Omega \cdot \text{m}$ ) | 弹性模量/GPa |
|------|--------|-----------------------------------------|----------|
| 铜    | 0.99   | $1.75 \times 10^{-8}$                   | 108      |
| 铁    | 200000 | $9.78 \times 10^{-8}$                   | 196      |
| 钢    | 9000   | $73 \times 10^{-6}$                     | 206      |
| 铝    | 1      | $2.82 \times 10^{-8}$                   | 70       |
| 金    | 1      | $2.4 \times 10^{-8}$                    | 78.5     |
| 银    | 1      | $1.62 \times 10^{-8}$                   | 82.7     |
| 铂    | 1      | $10.6 \times 10^{-8}$                   | 170      |
| 钛    | 1      | $42 \times 10^{-8}$                     | 120.2    |
| 钨    | 1      | $5.65 \times 10^{-8}$                   | 411      |
| 钼    | 1      | $5.2 \times 10^{-8}$                    | 324.8    |

其中材料的弹性模量  $E$  越大则其柔性系数( $L/EA$ )越小,二者成反比关系。柔度系数,表示的是长度为  $L$ ,横截面积为  $A$  的物体杆件在单位力的作用下,杆件顶部产生的位移  $L/EA$ 。

下一步,北京空间飞行器总体设计部将对上述材料进行进一步的筛选实验。从价格、重量以及合成难度等可能性方面进行分析。

## 7 结论

天线/电场传感器是决定空间低频射电天文观测的重要部分,其性能直接决定了观测数据的效果。通过文章的分析,系统的梳理了天线/电场传感器材质和观测数据质量之间的关系,其中材质中的磁导率、电阻率是影响观测数据信噪比的关键参数,要尽量选取小磁导率和电阻率的材质,同时在空间和载重允许的条件下,尽量扩大横截面积。

后续,中国科学院云南天文台将参与中国气象局在 L1 点空间天气卫星项目,在深空探测卫星上进行低频射电频谱仪的搭载,文章的推导将为设备设计和数据处理提供可靠的依据。后续将进一步融合天线材质、空间展开难度、稳定性等诸多因素,综合设计新一代的空间天线/电场传感器。

### 参考文献:

- [1] OBEROI D, KASPER J C. LOFAR: The potential for solar and space weather studies[J]. Planetary and Space Science, 2004, 52(15): 1415-1421.
- [2] CAIRNS I H. Solar, interplanetary, planetary, and related extra-solar system science for LOFAR[J]. Planetary and Space Science, 2004, 52(15): 1423-1434.
- [3] BLOTT R, BAAN I W A, BOONSTRA A J, et al. Space-based ultra-long wavelength radio observatory (low cost)-SURO-LC[C]//European Planetary Science Congress 2013, 2013.
- [4] ENGELEN S, QUILLIEN K A, VERHOEVEN C, et al. The road to OLFAR-a roadmap to interferometric long-wavelength radio astronomy using miniaturized distributed space systems[C]//64th International Astronautical Congress, 2013.
- [5] GALOPEAU P, ORTEGA-MOLINA A, ZARKA P. Evidence of Saturn's magnetic field anomaly from Saturnian kilometric radiation high-frequency limit[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 1991, 96(A8): 14129-14140.
- [6] ZARKA P. Auroral radio emissions at the outer planets: Observations and theories[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 1998, 103(3339): 20159-20194.
- [7] BENTUM M J, et al. A roadmap towards a space-based radio telescope for ultra-low frequency radio astronomy[J]. Advances in Space Research, 2020, 65(2): 856-867.
- [8] 平劲松, 王明远, 张墨, 等. 行星低频射电爆发的空间探测进展[J]. 深空探测学报(中英文), 2021, 8(1): 80-91.
- [9] 纪奕才, 赵博, 方广有, 等. 在月球背面进行低频射电

- 天文观测的关键技术研究[J]. 深空探测学报, 2017, 4(2): 150-157.
- [10] 梅丽, 苏彦, 周建锋. 极低频射电天文观测现状与未来发展[J]. 天文研究与技术, 2018, 15(2): 127-139.
- [11] BALE S D, ULLRICH R, GOETZ K, et al. The electric antennas for the STEREO/WAVES experiment[J]. Space Science Reviews, 2008, 136(1): 529-547.
- [12] 刘晨迪, 周建锋, 苏彦. 基于 CLEAN 算法的嫦娥四号极低频电频谱仪信号干扰抑制[J]. 天文研究与技术, 2022, 19(3): 206-220.
- [13] 梁旭豪, 沈峰, 戴晶滨, 等. 结构/机构一体化空间可展开复合材料柔性伸杆的设计[J]. 空间电子技术, 2019, 16(3): 26-32 + 60.
- [14] KRAUS J D, MARHEFKA R. J. Antennas for All Applications[M]. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [15] NYQUIST H. Thermal agitation of electric charge in conductors[J]. Physical Review, 1928, 32(1): 110-113.
- [16] ZASLAVSKY A, MEYER-VERNET N, HOANG S, et al. On the antenna calibration of space radio instruments using the galactic background: General formulas and application to STEREO/WAVES[J]. Radio Science, 2011, 46(2): 1-7.
- [17] BALANIS C A. Antenna Theory [M]. New York: Wiley 1997.
- [18] MEYER-VERNET N, PERCHE C. Tool kit for antennae and thermal noise near the plasma frequency[J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94(3): 2405.
- [19] EASTWOOD J P, BALE S D, MAKSIMOVIC M, et al. Measurements of stray antenna capacitance in the STEREO/WAVES instrument: Comparison of the radio frequency voltage spectrum with models of the galactic nonthermal continuum spectrum [J]. Radio Science, 2009, 44(4): 1-8.

作者简介: 董亮(1982—), 四川自贡人, 博士研究生, 高级工程师。主要研究方向为射电天文技术、空间天气。E-mail: dongliang@ynao.ac.cn