

基于空间矢量天线的太阳低频射电爆发探测研究

陈林杰¹, 颜毅华^{1,2}, 谭宝林^{1,2}

(1. 中国科学院国家天文台太阳活动重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学天文学与空间科学学院, 北京 100047)

摘要: 目前已有空间探测器对太阳的甚低频射电爆发进行的探测主要是频谱观测, 针对太阳低频射电爆发的成像观测仍然是空白, 利用空间矢量天线可以对太阳低频射电爆发(包括II型和III型暴)进行空间定位和一定的成像观测。研究针对空间(甚)低频射电探测器对太阳射电爆发的探测, 提出了利用三极子矢量天线对太阳爆发进行定位的算法; 基于部分空间甚低频设备的观测数据, 在不同条件下对算法进行了仿真, 同时针对“嫦娥四号”上的甚低频射电探测器(同样采用了三极子矢量天线), 分析了其探测太阳低频射电爆发的能力。结果表明: 当信号的信噪比达到10 dB以上时, 矢量天线可以实现度量级的定位精度, 并进一步分析了空间低频探测器探测太阳低频射电爆发的能力。

关键词: 甚低频; 空间探测器; 太阳射电爆发; 矢量天线

中图分类号: P182, P162.11

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2021)01-0100-09

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2021.20190411002

引用格式: 陈林杰, 颜毅华, 谭宝林. 基于空间矢量天线的太阳低频射电爆发探测研究[J]. 深空探测学报(中英文), 2021, 8(1): 100-108.

Reference format: CHEN L J, YAN Y H, TAN B L. Study of very low frequency solar radio emission detection with space vector antenna[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8(1): 100-108.

引言

由太阳爆发活动引起的太阳风、日冕物质抛射、行星际激波和高能粒子事件被称为太阳电磁风暴, 超级太阳爆发将会引起一系列的空间灾害性影响。因此, 探索和掌握这些事件的发生、发展和活动规律, 不仅在空间科学领域, 在人类社会方面也有着重要的意义。

从日球层密度模型可得出, 太阳射电辐射的频率与日冕高度之间具有直接的联系: 辐射频率越高, 其辐射源区越接近太阳表面, 频率越低其源区则距离太阳表面越远。来自太阳的日冕物质抛射(Coronal Mass Ejection, CME)、高能粒子流和太阳风暴等现象, 当它们离开太阳表面附近空间后, 随着等离子体密度的迅速降低, 其辐射频率也将迅速降低, 从而使光学、红外、紫外、X射线、微波及米波射电探测都失去了作用。我们无法知道这些高速扰动源在离开太阳表面附近以后在日地之间广阔空间里是如何传播和演化的。目前在轨运行的各种空间太阳探测器中, 其探测波段主要为可见光、紫外线、X射线等波段, 这些波

段的太阳辐射源区基本上均位于距离太阳表面1~2个太阳半径以内的空间范围。这类探测对于离开太阳表面2个太阳半径以外到地球附近的广阔空间里所发生的物理过程几乎无能为力, 而甚低频射电探测则有可能在这个领域里取得明显突破。

射电天文学中的甚低频(≤ 30 MHz), 作为最后几个未被实质观测的频谱窗口之一, 一直受到天文学家的重视。然而, 在低于30 MHz的频段, 大量人为的射电干扰严重限制了人们对宇宙低频射电辐射的观测, 而且地球电离层的截止频率白天很少会低于10 MHz, 即使夜晚也不会低于几MHz, 因此基于地基射电望远镜对宇宙甚低频射电辐射进行观测很难或者几乎不可能。为了实现对这一频段的射电观测, 空间射电望远镜成为了唯一的选择。

近年来, 随着空间科学探测的进一步发展, 包括我国在内的一些国家已经将空间大型甚低频射电探测项目列入未来的空间科学计划之中, 并为此开展了一系列的研究。为了尽可能地减小地球干扰的影响, 空间甚低频射电探测可以选择不同的探测地点。月球由于巨大的体积能够遮挡地球的干扰, 因此其背面提供

收稿日期: 2019-02-20 修回日期: 2019-06-20

基金项目: 嫦娥四号任务有效载荷科研工程研制项目; 中荷-低频射电探测器(NCLE); 国家自然科学基金资助项目(11573043, 11433006, 11790305, 11941003); 中科院战略性先导科技专项高频段高精度频谱测量与定标(XDA15020203)

了近乎理想的甚低频射电观测条件^[1-2]。另一方面，随着距离的增加，射电干扰也会相应地衰减。研究表明，当远离地球约100万km以上时，地球射电干扰将会衰减到宇宙背景噪声以下，达到研究可以接受的水平。因此，在不同的探测地点，其受到地球射电干扰的影响也是不同的。地球轨道的探测器由于受到的干扰比较强，很难开展实质的甚低频射电天文观测。月球轨道的甚低频探测器由于可以部分时间被月球遮挡，因此也可以开展一些灵敏度要求高的射电天文研究，且探测器的实施相对于月球背面来说比较容易^[3]。而其它轨道如日-地朗格朗日点（如L2、L4或L5点），由于其特殊的位置，它们能够提前一定时间对太阳电磁风暴进行观测，对于日地空间天气研究来说具有重要意义。

在空间甚低频射电探测方面，最新的研究是基于我国探月计划“嫦娥四号”开展的甚低频探测器项目，这些探测器将在月球背面或是月球轨道对空间甚低频射电辐射进行探测。在所有已开展的研究中，大部分探测器采用了三极子Tripole矢量天线作为基本的探测单元。Tripole天线由3个相互正交的阵子天线组成，具有相同的长度，中心馈电并向3个方向伸展。它能够测量三维电场分量，并且能够抑制干扰，不同于空间分布的天线阵列，利用单个天线就能够实现对入射电磁波的达波方向估计。这些都使得Tripole天线成为空间甚低频观测天线的理想选择。

电磁波的达波方向估计有着广泛的应用。目前的算法大部分使用阵列天线技术^[4-5]，也有一些是基于矢量天线来实现。这方面的研究主要有2个方向，提高解析度和降低运算量。一些被称为超解析度的技术，如以往空间谱估计采用的MUSIC，Root-MUSIC以及ESPRIT算法，它们基于特征分解技术，通过空间平滑来使信号源的协方差矩阵满足满秩的要求，以此实现。这些算法虽然能够对窄频信号实现很好的解析度，但是算法的计算量很大，不易实现。Sarkar等^[4]提出了运用矩阵束（MP）的方法来实现达波方向的估计，这一算法不需要进行空间平滑，因此算法的计算量有所降低。Haardt在文献[5]中将一个单位变换引入到ESPRIT方法中，通过将一个复数矩阵变为一个实数矩阵来减少频率估计中的计算量。Nuri Yilmazer又将类似的变换运用到矩阵束方法中，同样降低了频率估计的复数计算量^[6]。为了分析三维电磁场的极化特性，Carozzi等人引入了归一化的斯托克斯参数以及三维电磁场的替代描述^[7]。通过三维极化特性参数计算入射波的三维极化椭圆方向，多个来自不同方向的信号源可

以被同时进行测量，这就为利用矢量天线（例如Tripole天线）对多个信号源的达波方向估计提供了理论基础。

本文将重点讨论利用三极子矢量天线探测太阳甚低频射电II和III型爆发的能力。其中，第1节主要介绍三极子天线的达波方向计算；第2节重点介绍达波方向估计算法；第3节对太阳射电爆发的达波方向估计进行分析；第4节为“嫦娥四号”低频射电频谱仪数据的初步处理；第5节为结论及讨论。

1 三极子天线的达波方向计算

Tripole天线包括3个相互垂直的共中心阵子天线，它可以被看做是一个由3个天线组成的小型天线阵，如图1所示。为了便于分析，建立如图所示的坐标系，每一个阵子天线与xy平面的夹角为35.3°。对于这一种天线配置，如果Tripole天线被建在一个与xy平面平行的介质表面，则可以看出3个阵子的条件完全相同，必然有着相同的性能，这将使得Tripole天线的后续校准非常简单。这一点，对于空间基的天线来说尤为重要。

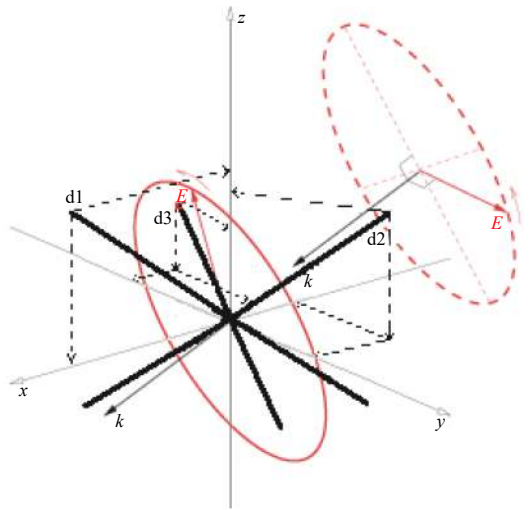


图1 Tripole天线对电场所扫偏振椭圆进行3D采样示意图

Fig. 1 A radio wave sensed by a tripole antenna propagates with a wave vector k sweeping out the polarization ellipse

为了研究Tipole天线上入射波的极化特性，电场矢量可以由3个与阵子平行的电场分量表示

$$\mathbf{E}(t) = (A_1 e^{i\theta_1}, A_2 e^{i\theta_2}, A_3 e^{i\theta_3}) e^{i\omega t} \quad (1)$$

这里 A_1 、 A_2 、 A_3 和 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 分别代表3个电场分量的幅度和相位。为了对图1所示的天线配置进行计算，将这3个电场分量在xyz坐标系下进行投影，得到新坐标系下的分量

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} = \mathbf{T} \times \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \sqrt{6}/3 & -\sqrt{6}/6 & -\sqrt{6}/6 \\ 0 & \sqrt{2}/2 & -\sqrt{2}/2 \\ \sqrt{3}/3 & \sqrt{3}/3 & \sqrt{3}/3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

这里 \mathbf{T} 为转换矩阵。引入一个三维相干张量^[7]如下

$$\mathbf{E}\mathbf{E}^H = \begin{pmatrix} E_x E_x^* & E_x E_y^* & E_x E_z^* \\ E_y E_x^* & E_y E_y^* & E_y E_z^* \\ E_z E_x^* & E_z E_y^* & E_z E_z^* \end{pmatrix} \quad (3)$$

式(3)称之为频谱张量。通常情况下,相干张量用来对电场的时域极化特性进行分析,对应的频域张量被称为频谱张量,为了使用相干张量,要求式中的信号为准单色波,但是对于频谱张量,则没有这一限制。

斯托克斯参数中 I 描述的是场的总强度,这里等于上述张量的迹,

$$I = |E_x|^2 + |E_y|^2 + |E_z|^2 \quad (4)$$

参照斯托克斯参数 V ,引入一个三维广义矢量 \mathbf{V} ,其中 Im 表示求虚部

$$\mathbf{V} = -2\text{Im}\left(E_y E_z^* \hat{x} + E_z E_x^* \hat{y} + E_x E_y^* \hat{z}\right) \quad (5)$$

分析这一矢量可知,它平行于入射波的波矢量 \mathbf{k} ,如图1所示,因此,通过计算矢量 \mathbf{V} 的方向就可以得到入射波的波达方向。在球面极坐标系下,归一化的矢量 \mathbf{V} 可以表示为

$$\mathbf{V}/I = v \cdot \left(\sin\theta \cos\varphi \hat{x} + \sin\theta \sin\varphi \hat{y} + \cos\theta \hat{z}\right) \quad (6)$$

其中:归一化的幅度 $v = |\mathbf{V}|/I$,表示入射波的圆极化度,零为线极化,而一则为圆极化; θ 和 φ 分别指俯仰角和方位角。于是,达波方向参数可以由式(6)在极坐标系下进行计算^[8]

$$\theta = \arccos\left(V_z / \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}\right)$$

$$\varphi = \begin{cases} \arctan(V_y/V_x) & \text{如果 } V_x > 0 \\ \arctan(V_y/V_x) + \pi & \text{如果 } V_x < 0 \end{cases} \quad (7)$$

2 射电信号达波方向估计算法

在月基甚低频射电天文研究中,一个重要的科学目标是对太阳低频射电爆发的探测。而我们知道,太阳的射电爆发信号不管是II型暴、III型暴或是IV型暴,其都是一个宽带信号。除此之外,有高能宇宙射电或者中微子撞击月球表面也会产生宽带的射电脉冲信号。为了确定宽带射电信号的来源,基于Tripole天

线,对其的达波方向估计进行了研究。由于信号的宽频带特性,文献[8]和[9]中的频率估计算法将不再有效。但对于太阳爆发信号,大部分情况下,观测到的信号都明显大于背景噪声,达到10~20 dB以上,这就意味着对于不同频率的信号仅有一个来波方向需要确定。

对于单个或是多个准单色波,信号的频率分量可以由基于矩阵束和最小二乘法的算法进行估计^[9]。由于具有滤除噪声的功能,因此相比与快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT),上述算法能够实现更高的频率估计精度和效率,从而保证了达波方向估计的精度。而对于宽带信号,上述估计算法则是无效的,这里考虑通过FFT来获得信号的频谱,然后用公式(7)来计算每一个频率分量所对应的达波方向。由于不同频率的信号仅有一个方向,因此考虑对相邻的不同频率分量的达波方向进行平均,以此来提高方向估计的精度^[1],具体的算法图2所示。

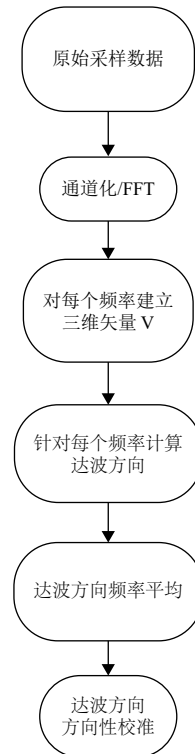


图2 宽带脉冲信号的达波方向估计算法

Fig. 2 DOA Estimation for broad-band pulse signal

在具体的算法中,对采集的太阳射电爆发信号首先进行频谱变换或是信道化,得到不同频率的子带信号,然后按上节所述的方法建立针对不同频率的广义三维矢量 \mathbf{V} ,以此求得不同频率信号的达波方向,并对其在一定频率带宽内进行平均,以此得到不同频率

更为准确的达波方向。

理论上，该算法仅适用于理想情况下/自由空间的小天线，然而，大多情况下，天线并不是工作在自由空间，而是安装在一个卫星平台之上或是在一个大的介质表面（如月面）上。卫星平台或是介质会影响天线的辐射方向图，如图3所示：天线的长度为2.5 m，天线距离地面1 m，其中的月面电参数为 $\epsilon_r = 3 + j0.01$ ， $\sigma = 10^{-14}$ S/m；沙漠的电参数为 $\epsilon_r = 3$ & $\sigma = 5 \times 10^{-5}$ S/m；纯净水为 $\epsilon_r = 80 + j0.001$ & $\sigma = 0.001$ S/m；田地电参数为 $\epsilon_r = 15$ & $\sigma = 0.02$ S/m；以及理想地面。 ϵ_r 和 σ 分别表示相对介电常数以及电导率。图中不同地面介质的电参数取值都为其典型值，所示的方向图（ $\varphi = 0^\circ$ ）为Tripole天线中的单个阵子的方向图。可以看出，月球表面的结果和沙漠上的几乎重合在一起，并且接近于自由空间里的方向图，这是因为月面和沙漠对电磁波的损耗比较小。然而，其它的方向图，由于介质损耗比较大，则与自由空间的差别非常大。将

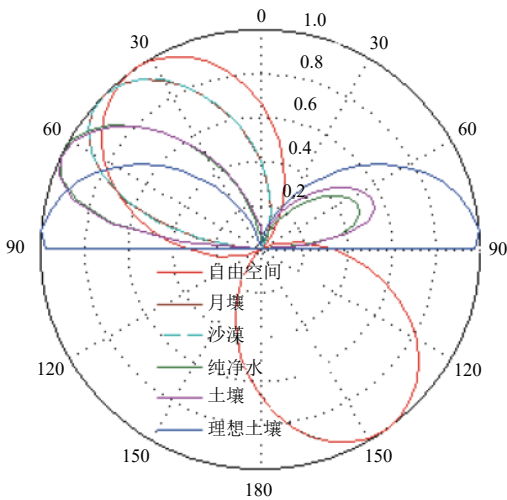


图 3 Tripole天线5 MHz的归一化方向图
Fig. 3 Normalized far-field patterns at 5 MHz Tripole

上述算法运用到不同的地面介质，可发现不同方向图与自由空间的差别决定了达波方向的估计误差，其中方向图的差别越大，DOA估计的误差也就越大。为此，需要对天线的方向图相对于自由空间的方向图进行校正，从而得到准确的信号达波方向。

对于天线方向图的校准，在自由空间和有平台或是介质情况下建立统一的坐标系，通过天线方向图的仿真数据或是测试数据来对信号DOA估计的误差进行确定，在不同方向建立一一对应的误差校正关系。当然，如果利用仿真的数据进行校正，仿真结果的准确性将直接影响校正的效果。另外，如果利用测试的数据进行校正，测试的精度也将直接影响最终DOA估计的精度。

3 太阳射电爆发的达波方向估计

太阳活动产生的高能粒子流在甚低频段主要表现为具有快速频率漂移的射电III爆发，其主要特点是辐射频率快速从高频向低频漂移。通过对甚低频射电III爆的定位和监测，将对高能粒子是否存在二次加速、加速机制以及加速源区等问题给出新的解释，并为高能粒子的到达时间的预报给出可靠的依据。而ICME和行星际激波在射电甚低频段主要表现为射电II型爆发。与射电III型爆不同，II型爆发具有缓慢的频漂率。通过监测射电II型爆可以追踪ICME和行星际激波的位置、空间结构、传播规律和演变过程，从而为灾害性空间天气扰动事件的预报提供可靠依据。如图4所示，太阳的III型暴表现出快速的频漂特性。而我们知道太阳射电辐射的不同频率对应的辐射源区也是不同的，也就是说我们探测到的太阳不同频率的辐射可能来自于不同的方向，这就要求在探测太阳射电爆发的时候需要针对不同的频率进行不同的方向估计。通过对不同频率太阳射电辐射的定位和跟踪，将能够

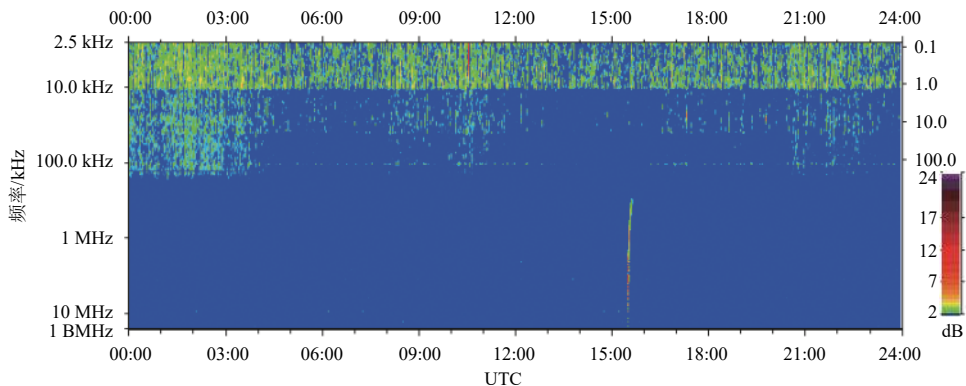


图 4 STEREO/WAVES观测到的太阳III型射电爆发事件 (20190208)
Fig. 4 Solar type III radio burst observed by STEREO/WAVES on Feb.8, 2019

实现对其在行星际空间的动力学过程以及传播特性进行研究,并为预报高能粒子的到达时间提供更为可靠的依据。

为了评估三极子Tripole天线对太阳射电爆发的定位和方向估计能力,对其进行了仿真。根据太阳射电爆发信号的特性(如图5),模拟太阳射电爆发的射电信号,在时间域其可以看做是一个脉冲型的宽带信号,而在不同频率其到达时间有一定的时间差,且不同频率的来波方向也是不一样的。理论上,太阳射电爆发的甚低频射电辐射位于约2个太阳半径(30 MHz)到十几个太阳半径(1 MHz),也就是说距离太阳约 $1^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 的范围。对于仿真来说此范围太小,不能够清楚地反映出信号达波方向估计的精度和适用性,为此在仿真时将不同频率信号的来波方向进行随机地设置,在不同信噪比下对其的达波方向估计进行了仿真,如图6所示,图中(a)、(b)、(c)和(d)分别为信

噪比5、10、20及30 dB下的DOA仿真。图中黑点为每次仿真的DOA估计,蓝色为方向图校准后的DOA结果,红色为信号的理想来波方向。不同信噪比下的DOA估计误差见表1。

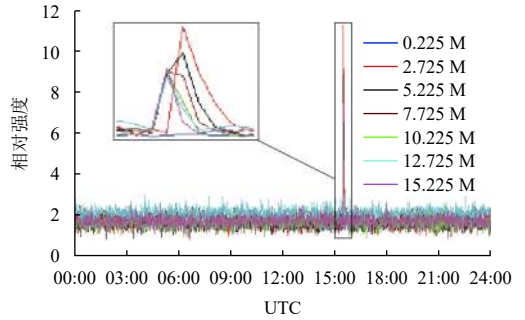


图5 STEREO/WAVES观测到的太阳III型射电爆发频谱
Fig. 5 Dynamic spectrum of a solar type III radio burst observed by STEREO/WAVES

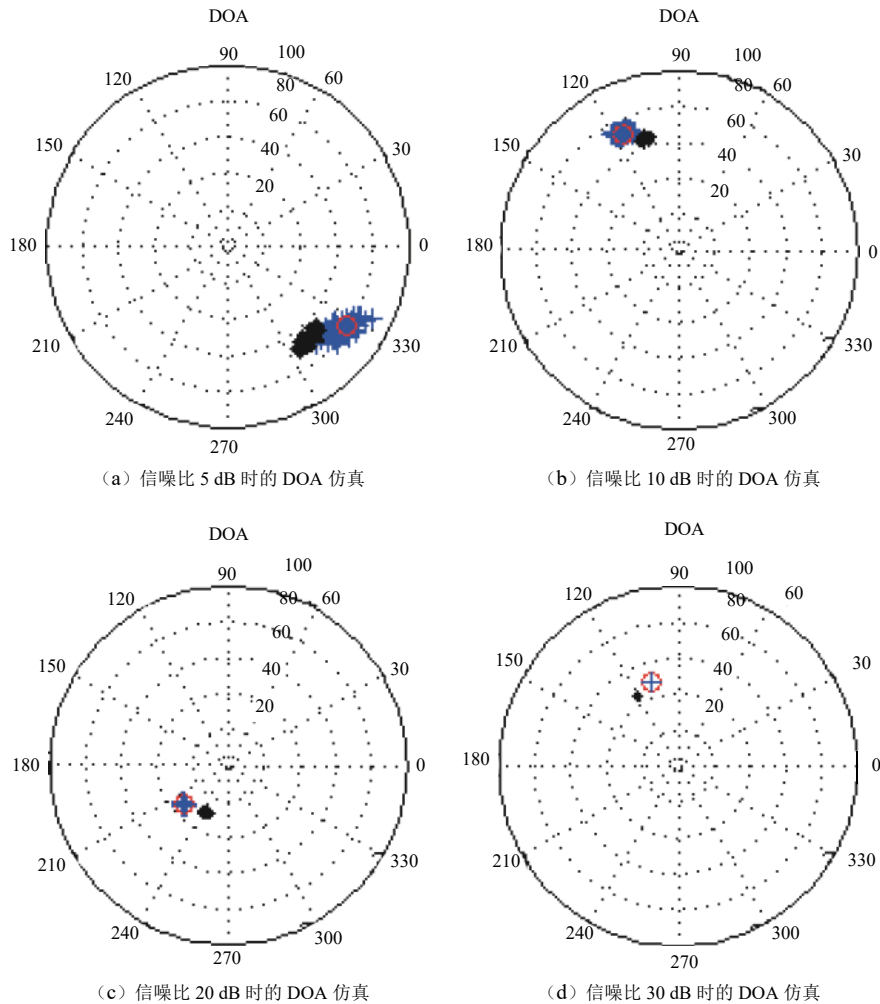


图6 月面不同信噪比下的太阳射电爆发在20 MHz时达波方向估计
Fig. 6 DOA estimation results of the solar radio burst at 20 MHz on the Moon surface

表 1 不同信噪比下的DOA估计误差

Table 1 DOA estimation errors for different SNR

DOA估计误差/dB	DOA	
	方位角 / (°)	俯仰角 / (°)
5	4.189 9	2.835 6
10	1.812 8	1.421 3
20	0.651 9	0.632 1
30	0.347 8	0.262 7

由以上仿真结果可以看出，在信号的信噪比达到 20 dB 以上时，经过对方向图的校正（针对卫星平台或是月面的影响），利用空间甚低频探测器可以实现小于 1° 的达波方向估计精度，当然这要求方向图的校准要实现度量级的精度。这一结果也为研究太阳射电爆发在日地空间的传播特性提供了可能。

此外，由于不同频率天线的方向图是不一样的，而且随着频率的增加，方向图可能会产生裂瓣。为此，利用空间三极子天线在不同频率下对太阳的射电爆发进行了达波方向估计仿真。

图7及表2显示了4个频率的达波方向估计结果，图7中黑点为每次仿真的DOA估计，蓝色为方向图校准后的DOA结果，红色为理想来波方向。可以看出，相比于信噪比，不同频率对达波方向估计的精度影响不大，且比较稳定，精度在1.5°左右。

信噪比为 20 dB；不同频率的爆发来自于相互靠近的不同位置，间隔 3° 左右。

表 2 不同频率的DOA估计误差

Table 2 DOA estimation errors for different frequencies

DOA估计误差/MHz	DOA	
	方位角 / (°)	俯仰角 / (°)
10	1.488 2	0.972 6
20	1.212 2	0.716 7
30	1.053 2	0.712 0
40	1.417 8	0.783 2

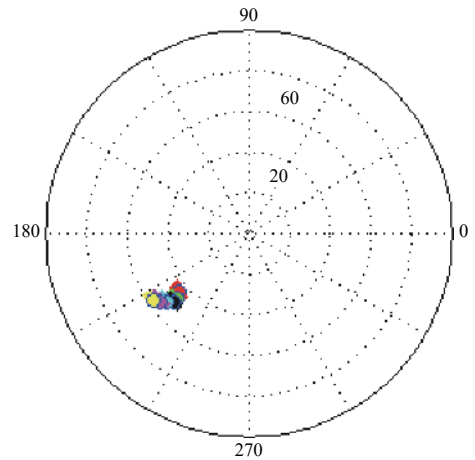


图 8 太阳射电爆发的传播过程模拟

Fig. 8 Direction simulations for CME moving from inside to outside

由以上结果可以看出，利用空间三极子天线基本可以实现对太阳射电爆发在行星际空间的定位和跟踪。

4 低频射电频谱仪数据处理

“嫦娥四号”任务的中继星和着陆器分别搭载有中-荷低频探测仪（Netherlands-China Low frequency Explorer, NCLE）和低频射电频谱仪（Low Frequency Radio Spectrometer, LFRS）两台设备，两者都可以对宇宙的甚低频射电辐射进行探测。其中NCLE刚完成了天线的在轨展开，还未开展正式的科学观测。而LFRS已经开展了十几个月昼的科学观测，并释放了相关的观测数据。

低频射电频谱仪LFRS工作在0.1~40 MHz，其天线是由3个5 m长的单极子构成的Tripole天线。理论上LFRS完全可以利用上述DOA估计的方法来对太阳射电爆发进行定位。但由于“嫦娥四号”着陆器采用的是“嫦娥三号”的平台，并没有针对低频射电观测进行专门的电磁兼容设计，因此平台本身存在着大量的低频射电干扰，对射电观测带来了严重的影响。为了利用观测数据开展科学研究，必须要对数据进行干扰去除的处理。

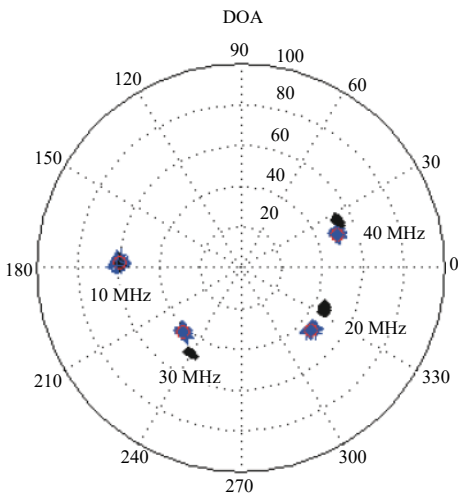


图 7 不同频率太阳射电爆发的达波方向估计

Fig. 7 DOA estimation results of solar radio burst for different frequencies

为了进一步直观地分析利用空间甚低频天线对太阳射电II型或III型爆发的定位能力，模拟了太阳射电爆发的传播过程，如图8所示，图中的每一个点为每次仿真的结果，圆圈为理想的来波方向，不同的颜色代表不同频率及不同位置的达波方向估计。其中信号的

在实际的数据处理中,采用了将2个单极子天线组合成偶极子的方法,来消除两个单极子天线上的共模分量。由于来自平台的干扰基本是近场辐射信号,在不同的天线上会产生一定的共模信号,因此这种方法可以在一定程度上减小来自平台的干扰,但这需要天线接收到的原始信号。

对LFRS在2019年2月8日观测的数据进行了处理,如图9所示:图中蓝色为3个单极子天线A、B、C的频谱,红色为3个组合的偶极子的频谱,其中左边显示的是低频段的结果,右边为高频段的结果。可以看到经

过偶极子组合后的频谱中干扰信号在整个频段均得到了一定程度的抑制,在某些频段甚至达到20~30 dB。但同时也看到,由于LFRS单次采集仅得到一小段傅里叶变换点数的原始数据,时间太短,导致数据的灵敏度不够,因此频谱中的噪声起伏很大。为此,对一天的数据进行了积分,获得了相当于在低频段2 s和高频段100 ms积分时间的频谱,如图10所示:图中蓝色为3个单极子天线A、B、C的频谱,红色为3个组合的偶极子的频谱,其中左边显示的是低频段的结果,右边为高频段的结果。

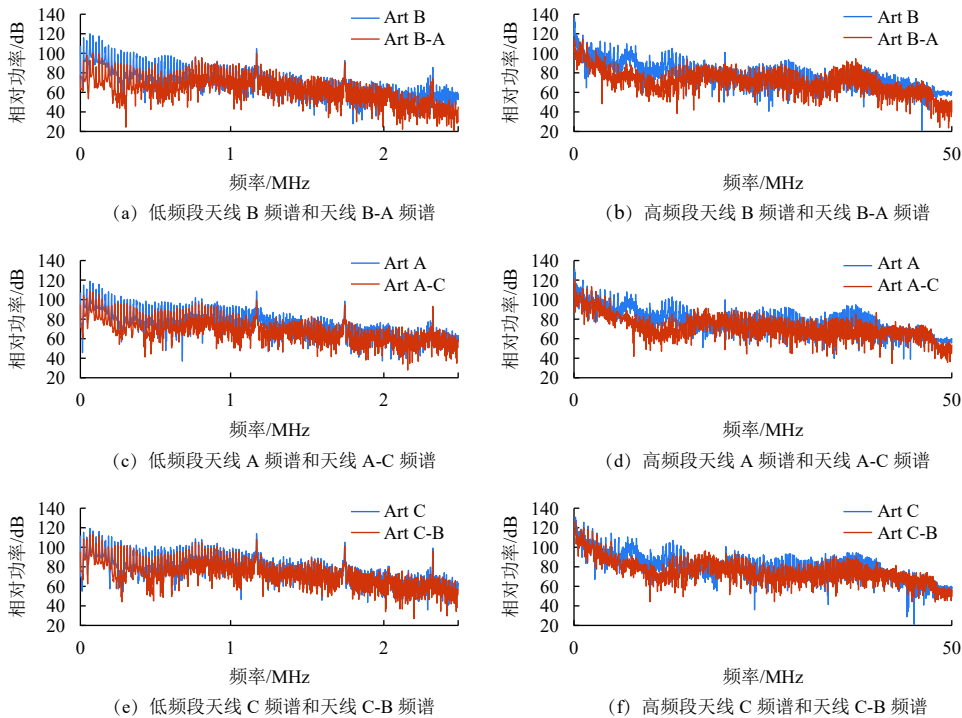


图9 单极子组合成偶极子的共模抑制频谱

Fig. 9 Common-mode RFI rejections by combining two monopoles to get dipole antenna

可以看出,积分后频谱的灵敏度得到了明显的提高,频谱曲线变得平滑,尤其是高频频段。虽然通过长时间的积分,可以明显改善灵敏度,但也损失了时间分辨率。对于太阳爆发这种快变信号来说,很难利用这种方法来处理。但对于研究宇宙背景辐射这类稳定的谱信号,这种处理非常有效。另外看到在整个频谱中仍然有大量的干扰,这主要是平台的低频干扰产生的二次和三次谐波。后续,将对观测数据做进一步的处理,同时也将改善和利用其它方法来更有效地去除信号中的干扰,从而更好地开展科学研究。

5 结论及讨论

利用空间甚低频探测器对太阳射电爆发进行观

测,将能够克服地球上在此频段观测的限制,获得太阳射电爆发超宽带的频谱观测数据,并能从中反演出比以往更为丰富的频谱精细结构背后的物理信息。更为重要的是,利用单个空间甚低频探测器便能够对太阳甚低频射电爆发进行定位和跟踪。在信噪比大于20 dB时,能够实现度量级的定位精度,基本满足进一步研究的需要,从而为通过研究太阳射电爆发在日地空间的动力学传播特性来进行空间灾害性天气的预报奠定一定的基础。目前,针对“嫦娥四号”上搭载的甚低频探测设备,其观测数据的处理和分析工作正在进行中。

另一方面,也要看到,虽然空间单个甚低频探测器能够在一定程度上实现对太阳射电爆发的空间定

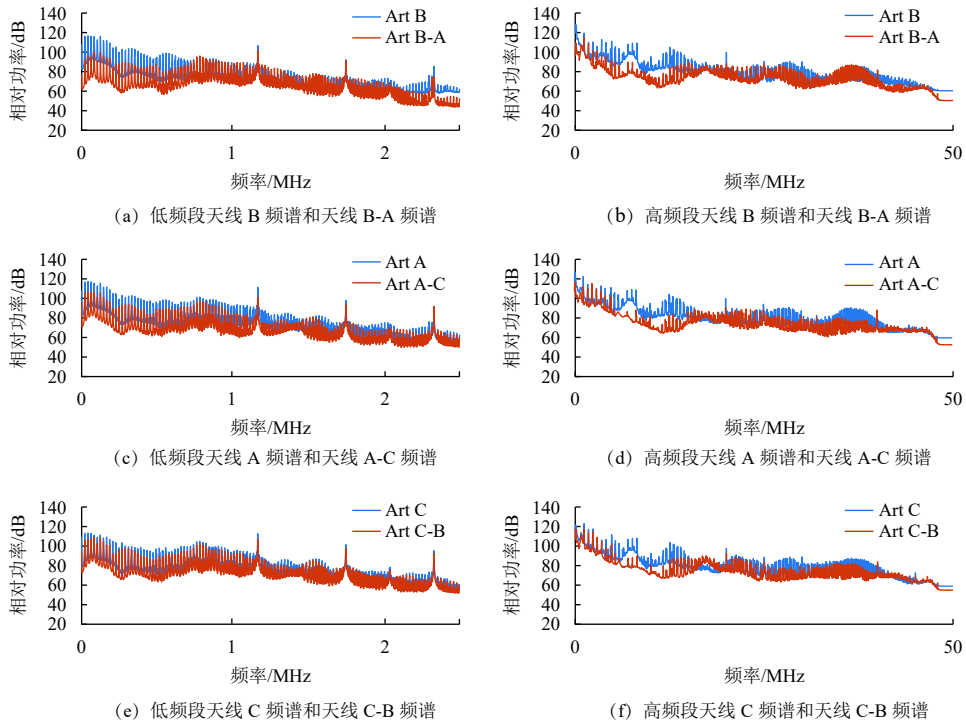


图 10 单极子组合成偶极子的积分频谱

Fig. 10 Integrated spectrum for the dipole antenna

位，但是其只能实现爆发源区重心的定位，不能反映爆发内部的结构信息，而这些爆发的源区一定存在内部结构。对这种源区结构特征的探测和研究，必然需要空间甚低频射电成像设备。为此，需要将多个空间探测器组合构成甚低频阵列才能够实现这一目标。目前基于“嫦娥四号”上单个甚低频探测设备进行研究，大型的月基甚低频射电阵列也已经被提出，并进入实质性研究阶段，在其完成并发射升空后，太阳甚低频射电爆发的研究必将迎来新的阶段！

参 考 文 献

- [1] 陈林杰. 月基甚低频射电干涉仪技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2011.
CHEN L J. Research on Moon-based very low frequency radio interferometer[D]. Beijing: School of Astronomy and Space Science, 2011.
- [2] 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(中英文), 2017, 4(2): 150-157.
JI Y C, ZHAO B, FANG G Y, et al. Key technologies of very low frequency radio observations on the lunar far-side[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(2): 150-157.
- [3] 张锦绣, 陈学雷, 曹喜滨, 等. 月球轨道编队超长波天文观测微卫星任务[J]. 深空探测学报(中英文), 2017, 4(2): 158-165.
CAO X B, ZHANG J X, CHEN X L, et al. Formation flying around lunar for ultra-long wave radio interferometer mission[J]. Journal of

Deep Space Exploration, 2017, 4(2): 158-165.

- [4] SARKAR T K, PEREIRA O. Using matrix pencil method to estimate the parameters of a sum of complex exponentials[J]. IEEE Antennas Propag. Mag., 1994, 37(1): 48-54.
- [5] HAARDT M, NOSSEK J A. Unitary ESPRIT: how to obtain increased estimation accuracy with a reduced computational burden[J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1995, 43(5): 1232-1242.
- [6] YILMAZER N, KOH J. Utilization of a unitary transform for efficient computation in the matrix pencil method to find the direction of arrival[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2006, 54(1): 171-181.
- [7] CAROZZI T, KARLSSON R, BERGMAN J. Parameters characterizing electro-magnetic wave polarization[J]. Phys Rev E Stat Phys Plasmas Fluids Relat Interdiscip Topics, 2000, 61(2): 2024-2028.
- [8] DALDORFF L K S, TURAGA D S, VERSCHURE O, et al. Direction of arrival estimation using single tripole radio antenna[C]//Proceedings of the 2009 IEEE ICASSP. [S.l.]: IEEE, 2009.
- [9] CHEN L, AMINAEI A, FALCKE H, et al. Optimized estimation of the direction of arrival with single tripole antenna[C]//2010 Loughborough Antennas & Propagation Conference. [S.l.]: IEEE, 2010.

作者简介:

陈林杰(1981-), 男, 博士, 高级工程师, 硕士生导师。主要研究方向: 射电天文、空间甚低频、太阳射电综合孔径成像。

通讯地址: 北京市朝阳区大屯路20号甲中国科学院国家天文台(100101)

电话: (010)64807931

E-mail: ljchen@nao.cas.cn

Study of Very Low Frequency Solar Radio Emission Detection with Space Vector Antenna

CHEN Linjie¹, YAN Yihua^{1,2}, TAN Baolin^{1,2}

(1. CAS Key Laboratory of Solar Activity, National Astronomical Observatories of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100047, China)

Abstract: Solar winds, Coronal Mass Ejections (CME), interplanetary shock waves and high-energy particle events, induced by the solar radio bursts, are called as solar electromagnetic storms. The propagation, acceleration, and evolution of the CMEs, solar winds, interplanetary shock waves and high-energy particle phenomena mainly happen at the frequency range from tens of kHz to tens of MHz, which is generally considered as the frequency band of Very Low Frequency (VLF). Though, there are already few space instruments that have investigated the VLF solar radio emissions, most of the observations are spectral measurements, and only occupied part of the whole VLF band, while the imaging observations of the VLF solar radio bursts are still blank. Based on the characteristics of the vector antenna, it can estimate the Direction Of Arrival (DOA) of the incoming waves, which can be used to locate and image the solar radio bursts (Type II&III). So all the latest space VLF radio instruments adopt the tripole antenna can do the observations. In this paper, in order to investigate the detection of the solar radio bursts with the space VLF radio explorer, different algorithms are proposed to detect the solar radio bursts with a tripole vector antenna, and simulations have been done with some space VLF radio observations for these algorithms under different conditions. The simulation results show that the vector antenna can locate the radio bursts with a degree-level accuracy. The capability of detecting the solar radio bursts is also analyzed in further for the space VLF radio explorer.

Keywords: very low frequency; space explorer; solar radio burst; vector antenna

Highlights:

- Using the characteristic of Tripole vector antenna, how to locate the solar VLF radio burst with single tripole antenna is studied.
- The DOA estimation algorithm is proposed for the tripole antenna, and simulations under different conditions show that it can locate the solar radio burst with a degree-level accuracy under certain SNR.
- The capability of detecting solar radio burst is studied for the VLF radio instrument onboard Chane'e-4 mission.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 朱恬]