



## 高纬电离层调制加热辐射波特性分析

杨巨涛, 李清亮, 陈 靓, 郝书吉, 闫玉波, 吴 健, 马广林, 陆 洪

### Analysis of the characteristics of modulated heating radiation wave in the high latitude ionosphere

YANG Jutao, LI Qingliang, CHEN Jing, HAO Shuji, YAN Yubo, WU Jian, MA Guanglin, and LU Hong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.cjors.2023049>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 电离层涡旋加热波的传播特性理论分析

Theoretical analysis of propagation characteristics of ionospheric vortex heating waves

电波科学学报. 2017, 32(3): 245–252

#### 张衡一号卫星观测的地基VLF波电离层加热扰动特征

Characteristics of ionospheric heating disturbances caused by ground-based VLF waves observed by ZHANGHENG-1 satellite

电波科学学报. 2021, 36(6): 970–976

#### 基于全波法的甚低频波对低电离层扰动分析

Analysis of disturbance of VLF wave to low ionosphere based on full wave method

电波科学学报. 2021, 36(4): 619–629

#### 基于近零指数超材料的频分复用信息传输

Frequency-division-multiplexing information transmission based on index-near-zero metamaterials

电波科学学报. 2021, 36(6): 905–911

#### 磁化电离层等离子体异常吸收效应研究

Anomalous absorption effect on magnetized plasma induced by ionospheric modification

电波科学学报. 2017, 32(4): 434–440

#### 磁化电离层等离子体异常吸收效应研究

Anomalous absorption effect on magnetized plasma induced by ionospheric modification

电波科学学报. 2017, 32(4): 434–440



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

杨巨涛, 李清亮, 陈靓, 等. 高纬电离层调制加热辐射波特性分析[J]. 电波科学学报, 2023, 38(4): 705-713. DOI: 10.12265/j.cjors.2023049

YANG J T, LI Q L, CHEN J, et al. Analysis of the characteristics of modulated heating radiation wave in the high latitude ionosphere[J]. Chinese journal of radio science, 2023, 38(4): 705-713. (in Chinese). DOI: 10.12265/j.cjors.2023049

## 高纬电离层调制加热辐射波特性分析

杨巨涛 李清亮\* 陈靓 郝书吉 闫玉波 吴健 马广林 陆洪

(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** 基于 2017—2019 年我国利用欧洲非相干散射 (European Incoherent Scatter, EISCAT) 科学联合会加热装置开展电离层调制加热的实验数据, 分析获得了高纬度电离层调制加热激励 ULF/VLF 电磁波辐射特性. 实验采用自然电流调制和双频双波束调制两种加热模式, 分析两种加热模式下加热功率、加热波极化、辐射频率和地磁扰动对 ULF/VLF 电磁波强度的影响. 研究表明: 激励辐射波强度与加热功率近似成正比例关系, 自然电流调制和双频双波束调制激励辐射波的功率比例系数分别约为 1.7 和 2.1; 相对 O 波极化方式, 加热波采用 X 极化波更有利于激励 ULF/VLF 电磁波辐射; 随着辐射波频率的增加, 辐射波强度先增加后减小, 自然电流调制激励辐射波强度最大值出现在 2 kHz 附近, 双频双波束调制激励辐射波强度最大值出现在 8~14 kHz; 自然电流调制加热激励辐射源强度依赖于电离层中自然电流的大小, 而双频双波束调制激励辐射波强度与自然电流强弱相关性较小. 最后, 针对目前电离层调制加热的热点问题——双频双波束调制加热形成 ULF/VLF 辐射源到底处于电离层中什么位置, 采用实验和理论相结合的分析方法, 对比两种加热模式激励 ULF/VLF 电磁波传播特性的差异, 结果表明双频双波束调制模式辐射源的传播特性更加符合辐射源位于 F 层情形.

**关键词** 电离层调制加热; 幅度调制; 双频双波束调制; 加热功率; 加热波极化; 地磁扰动; 辐射频率

中图分类号 P352.3; P353.3

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2023)04-0705-09

DOI 10.12265/j.cjors.2023049

## Analysis of the characteristics of modulated heating radiation wave in the high latitude ionosphere

YANG Jutao LI Qingliang\* CHEN Jing HAO Shuji YAN Yubo WU Jian MA Guanglin LU Hong

(National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of  
Radiowave Propagation, Qingdao 266107, China)

**Abstract** This paper presents the radiation characteristics of ULF/VLF electromagnetic wave excited by the ionospheric modulated heating in the high-latitude based on the experimental data of the ionospheric modulated heating conducted by Chinese scientific researchers using the European Incoherent Scatter (EISCAT) heating facility in 2017–2019. The effects of heating power, heating wave polarization, radiation frequency and geomagnetic disturbance on the electromagnetic wave intensity of ULF/VLF under two modulated heating modes of natural current modulation (AM) and dual-frequency double-beam modulation (BW) are experimentally analyzed. The results show that the intensity of the excitation radiation wave is approximately proportional to the heating power, and the power ratio coefficients of AM and BW are about 1.7 and 2.1, respectively. The heating wave employed with X wave is more beneficial to stimulate ULF/VLF electromagnetic wave radiation when compared to employing O wave. With the increase of the radiation wave frequency, the intensity of the radiation wave first increases and then decreases, but the maximum intensity of the radiation wave excited by AM and BW heating occur at 2 kHz and 8–14 kHz, respectively.

收稿日期: 2023-02-16

资助项目: 国防基础科研计划 (JCKY2021210C614240301); 电波环境特性及模化技术重点实验室基金 (A172101Z04)

通信作者: 李清亮 E-mail: qlianglicirp@sina.cn

The intensity of the radiation source excited by AM depends on the magnitude of the natural current in the ionosphere, while the intensity of the radiation wave excited by BW has little correlations with the intensity of the natural current. Finally, in perspective of the current hot issue of ionospheric modulation heating, the question of where is the location of the BW source in the ionosphere is raised. The differences in the propagation characteristics of ULF/VLF electromagnetic waves excited by two modulated heating modes are compared by combining the experimental and theoretical analysis methods. It is confirmed that the radiation source formed in the BW mode is likely to be located in the F region, which is different from the AM mode.

**Keywords** ionospheric modulation heating; amplitude modulation; dual-frequency dual-beam modulation; heating power; heating wave polarization; geomagnetic disturbance; radiation frequency

## 0 引言

按照我国无线电频率划分规定, 300~3 000 Hz 为 ULF, 3~30 kHz 为 VLF. 频率低于 30 kHz 的电磁波波长长, 地/海面与电离层对于该频段属于良好的反射面, 远距离传输传播衰减小, 同时又对海水具有一定的穿透能力, 是海军的战略通信频段. 但有效的电磁波发射天线尺寸应与电磁波的波长可比拟, 所以地基 ULF/VLF 发射台站规模巨大, 且发射效率低.

随着等离子物理相关理论的发展, 1973 年 Willis 等人<sup>[1]</sup>提出利用自然电流调制加热激励 ULF/VLF 电磁波辐射, 其原理是利用幅度调制的 HF 波加热电离层, 振荡改变电离层电子温度和电导率, 使加热区域内自然电流按调制波频率周期振荡变化, 形成 ULF/VLF 辐射源. 随后, Getmantsev 等人<sup>[2]</sup>利用地面大功率 HF 加热装置对 Willis 等人<sup>[1]</sup>的理论进行了实验验证, 实验首次成功激励出 1.2~7 kHz 的 ULF/VLF 电磁波. 实验的成功吸引了大量学者从事这项研究工作, 通过几十年的理论与实验研究, 获得了许多令人振奋的结果: 地面接收 ULF/VLF 电磁波磁场强度超过 20 pT, 辐射源功率约为 269 W<sup>[3]</sup>; 在离加热装置约 4 461 km 处成功接收到辐射的 ULF 信号<sup>[4]</sup>; 利用调制加热激励 ULF/VLF 电磁波进行近距离传输实验中, 最高传输速率可达 800 bit/s<sup>[5]</sup>, 等等. 但学者们也发现, ULF/VLF 电磁波强度受背景电离层参数影响非常大, 尤其受自然电流/电场强度的影响, 通常情况下它们之间存在强相关. 而电离层中自然电流分布不均匀且不稳定, 导致位于中低纬度的 Arecibo 加热实验中激励 ULF/VLF 电磁波强度通常比位于高纬度地区的美国高频主动极光研究项目 (High Frequency Active Auroral Research Program, HAARP) 和欧洲非相干散射 (European Incoherent Scatter, EISCAT) 科学联合会实验低两个数量级, 以及在同一位置不同时间辐射电磁波强度变化最大可达 3 个数量级以上, 导致该技术难以在应用上有所突破. 为

改善 ULF/VLF 电磁波激励效果, 学者们相继提出快速扫描<sup>[6]</sup>、几何调制<sup>[7]</sup>、预加热<sup>[8-9]</sup>、双频双波束加热<sup>[10-12]</sup>等方法, 其中快速扫描、几何调制和预加热方法都是基于自然电流调制原理的加热方式进行改进, 其本质仍属于自然电流调制, 并不能解决电离层自然电流和电场不利条件下 ULF/VLF 电磁波有效生成问题. 双频双波束调制加热原理是采用两束 HF 电磁波同时作用电离层同一区域, 两束电磁波相互作用形成组合频率波, 导致电离层中电子温度、电流等参量按照两束高频电磁波的差频或和频扰动, 辐射的差频信号即为所对应的 ULF/VLF 电磁波信号.

双频双波束调制加热模式最早由 Barr 等人<sup>[10]</sup>提出, 但由于当时实验条件的限制, 辐射出的 ULF/VLF 电磁波强度远小于自然电流调制模式, 且认为该模式本质上就是拍波幅度调制自然电流, 导致该技术未受到大家的关注. 近年来, 随着 HAARP 实验的发展, 发现在背景自然电流较弱的夜间, 利用双频双波束调制加热方法可获得较强的 ULF/VLF 电磁波辐射. 随后, Kuo 等人<sup>[11]</sup>利用有质动力非线性加热理论定性解释了双频双波束激励 ULF/VLF 电磁波辐射原理, 并建立了相应的理论仿真模型, 从理论上指出激励的 ULF/VLF 辐射源位于 F 层. 但 Moore 等人<sup>[13]</sup>利用时间到达技术指出地面接收到的 ULF/VLF 电磁波主要来自 D 层, Cohen 等人<sup>[14]</sup>建立的 D 层碰撞吸收理论模型证实了这一结论, 并指出 Kuo 等人<sup>[11]</sup>基于有质动力非线性加热理论解释 F 层双频双波束加热具有一定的合理性, 但仍需要进一步验证. Tereshchenko 等人<sup>[15]</sup>通过分析激励的 ULF/VLF 电磁波多普勒频移推算辐射源的移动速度与 D 层中性风速一致, 推断出辐射源位于 D 层这一观点. 因此, 双频双波束调制加热激励的 ULF/VLF 辐射源位于 D 层还是 F 层目前仍存在争议.

国内学者从 20 世纪 90 年代就开展电离层调制加热激励 ULF/VLF 电磁波理论研究<sup>[16-17]</sup>, 但相关研

究主要针对自然电流调制,理论仿真表明位于中低纬度地区的我国采用自然电流调制激励的 ULF/VLF 电磁波强度极弱. 2018 年,杨巨涛等人<sup>[12]</sup>基于高电离层质动力非线性加热理论,引入差频双波束概念,建立了双频双波束调制加热理论仿真模型,仿真表明:中低纬度地区,在相同的条件下,相对于自然电流调制,采用双频双波束加热方式 ULF/VLF 电磁波强度可提升 10 dB 以上. 由于缺乏实验条件,相关研究仅涉及理论研究层面,没有得到实验验证.

本文给出了 2017—2019 年我国利用 EISCAT 加热系统开展电离层调制加热激励 ULF/VLF 电磁波辐射的实验结果. 首先对实验的整体情况进行介绍;然后分析加热功率、辐射频率、加热波极化和地磁扰动对 ULF/VLF 电磁波强度的影响,并对相应结论进行理论解释;最后基于星-地联合探测数据,结合全波法,从理论与实验的角度对 ULF/VLF 辐射源在电离层中的位置进行验证.

## 1 实验介绍

我国利用 EISCAT 加热系统开展的电离层调制加热实验,时间集中在冬季,分别为 2017-11-10—29、2018-11-27—12-11 和 2019-11-11—28. 冬季电离层临界频率较低,主要选用工作频率 (3.85~5.65 MHz) 较低的 2 号加热天线阵,该天线阵由 6×6 交叉偶极子天线沿南-北方向排列组成. 自然电流调制方法,加热系统频率  $f_0=4.04$  MHz,实验期间辐射频率  $f$  包括 517 Hz、518 Hz、529 Hz、1 005 Hz、1 017 Hz、1 018 Hz、2 003 Hz、2 017 Hz、2 517 Hz、3 017 Hz、3 517 Hz、4 017 Hz、4 517 Hz、5 017 Hz、5 517 Hz、6 017 Hz、6 517 Hz、7 017 Hz、7 517 Hz、8 012 Hz 和 10 017 Hz 共 21 个频率;双频双波束调制方法,加热天线阵按南-北方向平均分阵,其中北边子阵工作频率  $F_1=f_0+f$ ,南边子阵工作频率  $F_2=f_0$ ,辐射频率  $f$  包括 517 Hz、518 Hz、1 018 Hz、2 003 Hz、2 017 Hz、3 017 Hz、3 517 Hz、4 006 Hz、4 017 Hz、5 017 Hz、6 017 Hz、8 012 Hz、8 017 Hz、9 517 Hz、10 017 Hz、11 017 Hz、12 017 Hz、13 017 Hz、14 017 Hz、15 017 Hz、18 012 Hz、18 017 Hz、19 017 Hz、22 017 Hz、26 017 Hz 和 29 017 Hz 共 26 个频率. 此外,分别采用位于 EISCAT 站内的电离层垂直探测仪和位于特罗姆瑟大学内的磁力计监测电离层状态和地磁场变化. ULF/VLF 接收机位于 EISCAT 站以东 15 km 位置,同时在 2019 年首次利用我国地磁监测卫星“张衡一号”(China Seismo-Electromagnetic Satellite, CSES)在过境时对实验期间辐射的 ULF/VLF 信号进行监测.

三次实验共获得约 50 h 的实验数据. 图 1 给出了实验期间地面接收到的 ULF/VLF 磁场强度分布,可以看出:实验期间采用自然电流调制和双频双波束调制获得的最大辐射波强度分别为 15.2 dBpT、-2.7 dBpT,对应的频率为 2 017 Hz 和 8 017 Hz;实验期间加热参数和背景参数的差异,导致 ULF/VLF 磁场强度的变化范围非常大;当辐射波频率低于 4 000 Hz 时,自然电流调制激励的 ULF/VLF 电磁波强度高于双频双波束调制,而当辐射频率高于 8 000 Hz,前者激励的 ULF/VLF 电磁波强度低于后者. 下面将针对特定参数条件下,两种调制加热模式激励的 ULF/VLF 电磁波的特性进行分析,并对比两者之间的差异. 为了简便说明,自然电流调制模式用 AM 表示,双频双波束调制模式用 BW 表示.

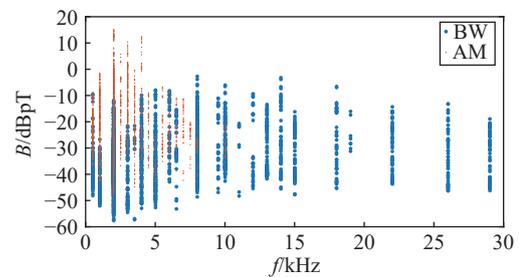


图 1 2017—2019 年 EISCAT 调制加热地面接收结果  
Fig. 1 Ground reception results of EISCAT modulation heating experiment from 2017 to 2019

## 2 实验结果分析

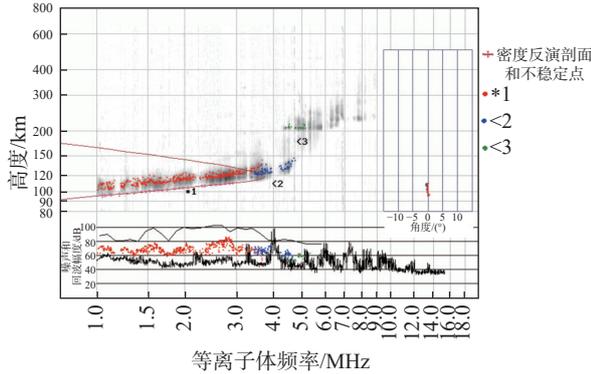
### 2.1 加热功率影响

选用 2017-11-22T16:00—16:10UT (AM) 和 17:14—17:24UT(BW) 实验数据对加热功率影响进行分析. 实验期间,  $f_0$  为 4.04 MHz,  $f$  为 2 017 Hz, 加热波极化方式为 X 波, 即双频双波束加热模式下  $F_1=4.04$  MHz+2 017 Hz,  $F_2=4.04$  MHz, 加热系统功率按 16 MW、48 MW、80 MW、128 MW 和 160 MW 依次变换, 每个功率等级工作 2 min.

图 2 给出了实验期间电离层垂直探测仪的探测结果, 其为典型的夜间电离图: 电离层 D/E 层消失, 同时 F 层存在明显的扩散吸收.

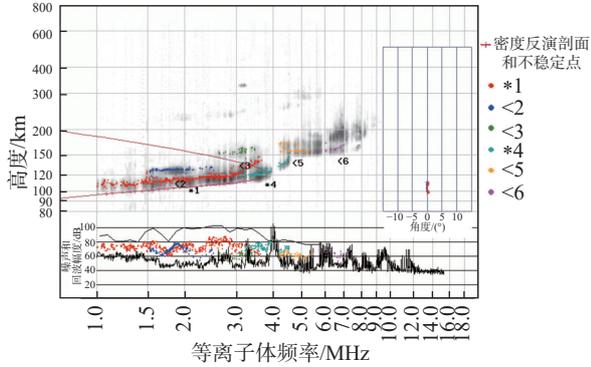
图 3 给出了 ULF/VLF 电磁波强度随加热功率的变化, 可以看出, AM 与 BW 两种模式下激励辐射波强度与加热功率  $P$  近似成正比例线性关系, 比例系数分别约为 1.7 和 2.1. 导致这种现象的主要原因是加热功率等级越高, 进入电离层中的电磁波能流密度越强, 调制加热过程中电子吸收的能量越高, 激励形成的 ULF/VLF 电磁波强度也越强, 这与文献 [12] 的理论仿真和文献 [18] 的实验结果是一致的.

TROMSØ NORWAY DYNASONDE 2017-11-22T16:00UT 15°E  
DoY=326.666 66



(a) AM 模式  
(a) AM mode

TROMSØ NORWAY DYNASONDE 2017-11-22T17:00UT 15°E  
DoY=326.708 34



(b) BW 模式  
(b) BW mode

图2 功率变化实验期间垂直探测仪探测结果

Fig. 2 Detection results of vertical ionosonde during power change experiment

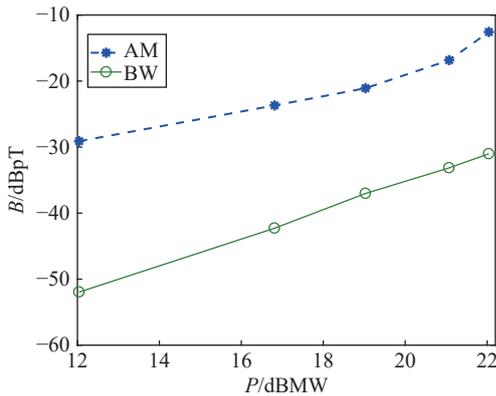


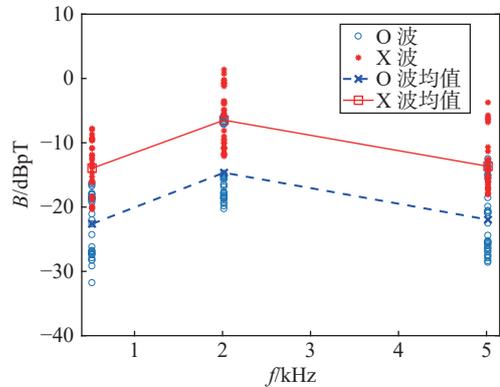
图3 辐射波强度随加热功率的变化

Fig. 3 Radiation wave intensity changes with heating power

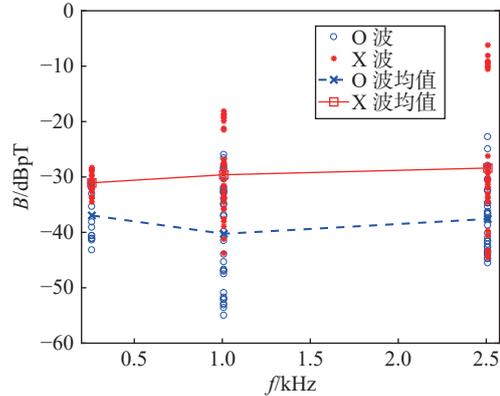
### 2.2 加热波极化影响

选用2017-11-15(AM)和16日(BW)实验数据来研究加热波极化对ULF/VLF电磁波辐射强度的影响.实验以45 min为一个周期,每个周期分别激励517 Hz、2 017 Hz和5 017 Hz三个频率信号,每个频率工作10 min后加热关闭5 min.考虑到极化改变在10 min以内电离层背景变化不会很大,可不考虑背

景电离层参数(地磁变化、电离层状态等)变化对不同极化对比结果的影响,结果如图4所示.可以看出,两种调制加热模式下,X波激励的ULF/VLF电磁波强度高于O波,即X波更有利于激励辐射ULF/VLF电磁波,其主要原因是形成ULF/VLF电磁波辐射源的本质是通过调制振荡改变电子温度,而X波加热可使得电子吸收更多的能量去改变电子温度,从而可辐射更强的ULF/VLF电磁波.此外,对于AM模式,不同的辐射频率两种极化方式激励的电磁波强度差值维持在8~9 dB;但对于BW模式,辐射频率会影响到两种极化方式激励的电磁波强度差值,如辐射频率为517 Hz、2 017 Hz和5 017 Hz时,平均强度差值分别约为5 dB、11 dB和9 dB.



(a) AM 模式  
(a) AM mode



(b) BW 模式  
(b) BW mode

图4 加热波极化对辐射波强度的影响

Fig. 4 Effect of heating wave polarization on radiation wave intensity

### 2.3 辐射频率影响

电离层调制加热期间,电离层参数的振荡频率与辐射波频率 $f$ 相同,因此 $f$ 不仅会影响到辐射源的强度,同时由于辐射源位于电离层中,不同频率的电磁波在电离层中的传输衰减也不一样,导致地面接收到的不同辐射频率的ULF/VLF电磁波强度存在差

异. 选取 2017-11-24T13:05—13:35UT(AM) 和 2019-11-11T14:00—14:10UT(BW) 的实验数据来研究辐射频率对辐射波强度的影响. 采用 X 波扫频工作模式, AM 模式加热波频率为 4.04 MHz,  $f$  分别为 518 Hz、1 018 Hz、2 017 Hz、2 517 Hz、3 017 Hz、3 517 Hz、4 017 Hz、4 517 Hz、5 017 Hz、5 517 Hz、6 017 Hz、6 517 Hz、7 017 Hz、7 517 Hz 和 10 017 Hz, 每个频率工作 1 min 55 s, 频率之间间隔 5 s; BW 模式  $F_1=4.04$  MHz,  $F_2=4.04$  MHz+ $f$ ,  $f$  分别为 2 003 Hz、4 006 Hz、6 017 Hz、8 012 Hz、10 017 Hz、14 017 Hz、18 012 Hz、22 017 Hz、26 017 Hz 以及 29 017 Hz, 每个频率工作 55 s, 频率之间间隔 5 s. 实验结果如图 5 所示, 可以看出, 在 AM 模式下辐射波强度随辐射频率增大先增大后整体下降, 强度最大值出现在频率为 2 017 Hz 处, 其原因是地球-电离层波导高度为 60~80 km, 与 2 017 Hz 的半波长相匹配, 使得该频率电磁波传播衰减最小<sup>[19]</sup>. 但随着辐射频率的增大, 单个加热周期内加热时间减小, 调制加热激励的 ULF/VLF 辐射源强度就弱, 使得辐射波强度随着辐射频率的增大而降低<sup>[19-21]</sup>; BW 模式激发与 AM 模式一样, 随辐射波频率的增大, 辐射波强度先增大后减小, 但其最大值位于 8~14 kHz, 这主要是两种加热模式形成 ULF/VLF 辐射源的位置不一样. 此外, 当辐射波频率超过 4 kHz 时, BW 模式辐射波强度超过 AM 模式, 与图 2 的统计结果是一致的, 也与文献 [12] 的理论结果及文献 [11,22] 的实验结果一致.

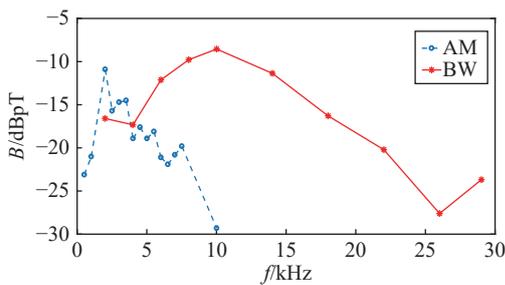


图 5 辐射波强度随辐射频率的变化

Fig. 5 The variation of radiation wave intensity with radiation frequency

### 2.4 地磁扰动影响

BW 模式理论研究上的一个重要分歧是辐射的 ULF/VLF 电磁波强度是否依赖于电离层自然电流, 能否在自然电流较弱的时段激励较强的 ULF/VLF 电磁波. 但实验期间通过直接的手段去测量自然电流强度是非常困难的. 通常电离层中自然电流的强弱可以用地磁场水平分量的相对扰动量 ( $|\Delta H|$ ) 来体现<sup>[22-24]</sup>, 即  $|\Delta H|$  值越大, 相应的自然电流强度越强; 反之,  $|\Delta H|$  值越小, 对应的自然电流强度越

弱. 因此, 通过研究地磁扰动对 ULF/VLF 电磁波强度的影响, 可侧面反映出双频双波调制加热对电离层自然电流的依赖性. 选取 2017-11-21T19:10—22:10UT(AM) 和 2018-12-3T10:00—15:00UT(BW) 实验数据. AM 模式实验以 30 min 为 1 个周期,  $f$  按 1 018 Hz-3 017 Hz-1 018 Hz-3 017 Hz-2 017 Hz 依次变化, 每个频率工作 5 min, 最后 5 min 系统关闭. BW 模式  $f$  为 2 017 Hz, 加热周期为 5 min 开 5 min 关. 两种模式加热波极化均为 X 波,  $f_0$  为 4.04 MHz. 图 6 给出了两种加热模式下辐射波强度和水平地磁相对扰动随时间变化的对应关系.

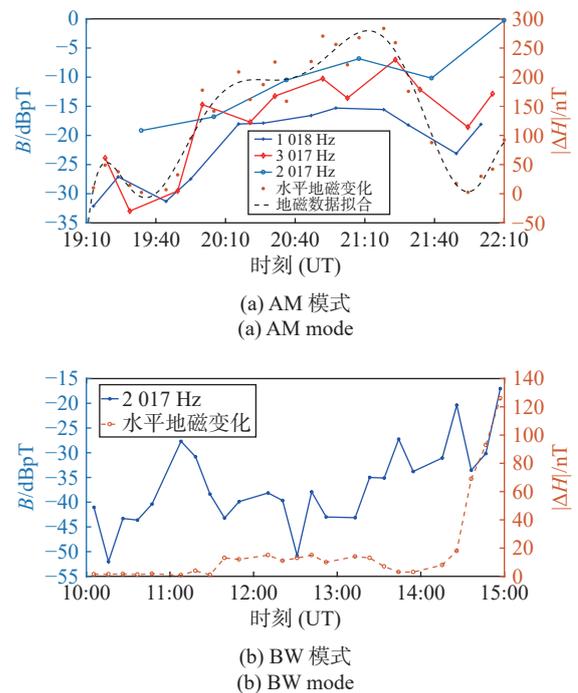


图 6 辐射波强度与水平地磁相对扰动相关性

Fig. 6 Correlation between radiation wave intensity and horizontal geomagnetic relative disturbance

在图 6(a) 中, AM 模式加热实验期间  $|\Delta H|$  值变化较大, 其最大值达到 280 nT, 同时 1 018 Hz、3 017 Hz 和 2 017 Hz 三个频率信号强度随时间变化趋势与  $|\Delta H|$  的变化趋势基本一致, 表明 ULF/VLF 信号强度与  $|\Delta H|$  正相关, 即通过 AM 模式加热形成 ULF/VLF 辐射源强度依赖于电离层中自然电流的大小, 这与以往的研究结论<sup>[23,25]</sup>是一致的. 在图 6(b) 中, BW 模式加热实验期间地磁场相对平静, 大多数实验时段  $|\Delta H|$  小于 25 nT, 仅在 14:30 以后, 出现  $|\Delta H|$  较大的突增, 最大值达到了 126 nT. 实验不仅出现了文献 [11] 中地磁扰动较弱时段辐射 ULF/VLF 波的幅度高于地磁扰动较强时段的实验现象, 如 10:30—11:30 时段 ULF/VLF 信号强度明显高于 12:00—13:00 时段; 还出现文献 [15] 中地磁扰动较强时段辐射

ULF/VLF 波的幅度高于地磁扰动较弱时段的实验现象, 如 14:00—15:00 时段 ULF/VLF 信号强度明显高于其他实验时段. 结果表明, 通过 BW 模式辐射的 ULF/VLF 波强度变化趋势与  $|\Delta H|$  的变化趋势相关性较差, 即 BW 模式并不像 AM 模式一样在调制加热过程中对电离层中自然电流大小具有较强的依赖性.

### 3 讨论

虽然上述实验结果不能证实利用 BW 加热模式激励的 ULF/VLF 电磁波辐射不依赖于自然电流, 但可确定是在自然电流较弱电离层背景下, 如低电离层的电离减弱、地磁相对平静等, 利用 BW 加热模式能获得较强的 ULF/VLF 电磁波辐射. 下面我们将针对 BW 加热理论与实验研究中“辐射源位于电离层哪个区域”这一争论性问题进行讨论分析.

2019-11-21T13:47:00—13:50:00UT 地面和 CSES 卫星同时接收 ULF/VLF 电磁波信号进行 BW 辐射源位置实验. 实验采用 AM 和 BW 两种加热方式交替开展, 每种方式工作 30 s, 前 30 s 为 AM 调制, 后 30 s 为 BW 调制,  $f$  为 2 017 Hz, 加热波极化为 X 波. 地面接收机用于接收辐射的 ULF/VLF 电磁波磁场信号, CSES 电场仪用于接收辐射的 ULF/VLF 电磁波电场信号. 与 Demeter 卫星工作方式一样, 为保护卫星上设备, CSES 卫星经过地理纬度  $>65^\circ\text{N}$  或  $>65^\circ\text{S}$  的区域时卫星上探测设备关闭. 卫星轨迹及各点位置关系如图 7 所示, 卫星仅在 13:37:30—13:49:00 观测到辐射的 ULF/VLF 电磁波, 对应图 7 中 A、B、C 和 D 四个点, 与 EISCAT 加热装置的地面距离分别为 435 km、646 km、860 km 和 1 072 km, 其中 A 和 C 对应 BW 模式、B 和 D 对应 AM 模式. 磁场强度和电场强度的关系<sup>[26]</sup>为

$$H \approx nE/Z_0 \quad (1)$$

式中:  $n$  为折射指数;  $Z_0$  为真空中波阻抗, 约为  $377 \Omega$ . 由 CSES 卫星携带的高能粒子探测器<sup>[27]</sup> 得到卫星轨道处电子密度为  $2.4 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ , 得到频率 2 017 Hz 的折射指数  $n$  约为 28. 根据式 (1) 将 CSES 电场仪测得的电场转换为磁场, 各点接收的 ULF/VLF 电磁波磁场强度如图 8 所示. 可以看出: 卫星分别处于 A 和 B 两点时, 对应 BW 和 AM 两种加热模式下, 卫星上信号强度相差不到 2 dB, 但地面上信号强度相差超过 30 dB, 即相对于 AM 模式, BW 模式激励的辐射波向下传播进入地球-电离层波导中受到更强的衰减; 卫星位于 B 点和 C 点时, 调制方式由 AM 变为 BW, 卫星与地面接收到的辐射波强度之差增加了 12.7 dB, 表明两种加热模式形成的 ULF/VLF 辐射波的传播特性存在较大的差异, 辐射源在电离层中的

位置, 以及辐射源形态等因素都会导致这种实验现象发生. 此外, 随着传输距离的增加, 卫星上辐射波磁场强度降低, 在 BW 模式下, 卫星由 A 点运动到 C 点, 相对于地面辐射场, 卫星接收到的信号磁场强度降低 19.5 dB; 在自然电流调制下, 卫星由 B 点运动到 D 点, 相对于地面辐射场, 卫星接收到的信号磁场强度降低 5.5 dB, 进一步表明两种加热方式形成的 ULF/VLF 辐射波在电离层中传播特性不一致.

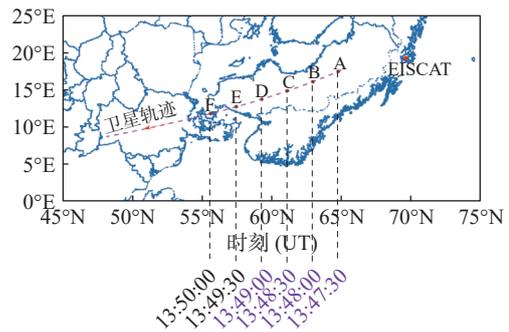


图 7 实验期间卫星轨迹示意图

Fig. 7 Schematic of satellite trajectory during the experiment

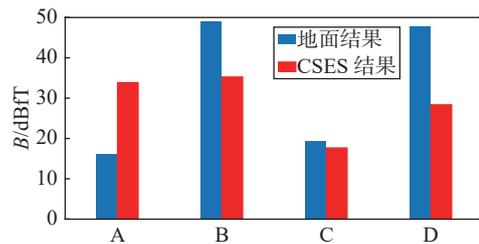


图 8 地面与 CSES 卫星接收到的辐射波强度对比

Fig. 8 Comparison of radiation wave intensity received by ground and CSES satellite

利用全波法<sup>[28-30]</sup> 对位于电离层 D 层和 F 层 ULF/VLF 辐射源的辐射传播特性进行估算, 来探寻 AW 和 BW 模式形成 ULF/VLF 辐射源差异的原因. 电离层背景采用 IRI-2018 模型, 其中 120 km 以上电离层电子浓度随高度变化比较平缓, 仿真中将其看作均匀的各向异性等离子体; 60 km 以下为中性大气层, 60~120 km 之间为过渡区, 共分为 60 分层, 每一分层内电离层参数认为无变化. 辐射源近似等效为与地磁场垂直的电偶极子, 强度为  $30 \text{ A} \cdot \text{km}$ , 辐射频率为 2 017 Hz, D 层辐射源位于 85 km, F 层辐射源位于 250 km. 图 9 所示分别为 D 层和 F 层辐射源的辐射波磁场强度分布的仿真结果, 其中  $h$  表示离地高度,  $d$  表示离加热站的水平距离. 可以看出, 向上辐射进入磁层的电磁波强度要高于向下辐射进入地球-电离层波导中电磁波强度. 即对于 D 层辐射源, 在电离层 500 km 处辐射波磁场强度为  $-113 \text{ dB}/\text{m}$ , 而地面辐射波磁场强度为  $-131 \text{ dB}/\text{m}$ , 两者相差 18 dB; 对于 F 层辐射源, 在电离层 500 km 处辐射波磁场强度

为 $-105$  dB/m,而地面辐射波磁场强度为 $-145$  dB A/m,两者相差 40 dB.也就是说,相对于 D 层辐射源,位于 F 层辐射源的激励波向下辐射进入地-电离层波导中具有更强的传播衰减,但更易向上传播进入磁层.同时,在电离层中传播时,位于 F 层辐射源的激励波在卫星轨道高度处随距离传播衰减更快,这些对电离层不同高度辐射源的传播特性的仿真结果与 AM 和 BW 模式加热实验结果是相符的.因此,考虑到 AM 模式加热形成的 ULF/VLF 辐射源位于 D 层<sup>[10,18-20]</sup>,BW 模式辐射源的传播特性更加符合辐射源位于 F 层情形.

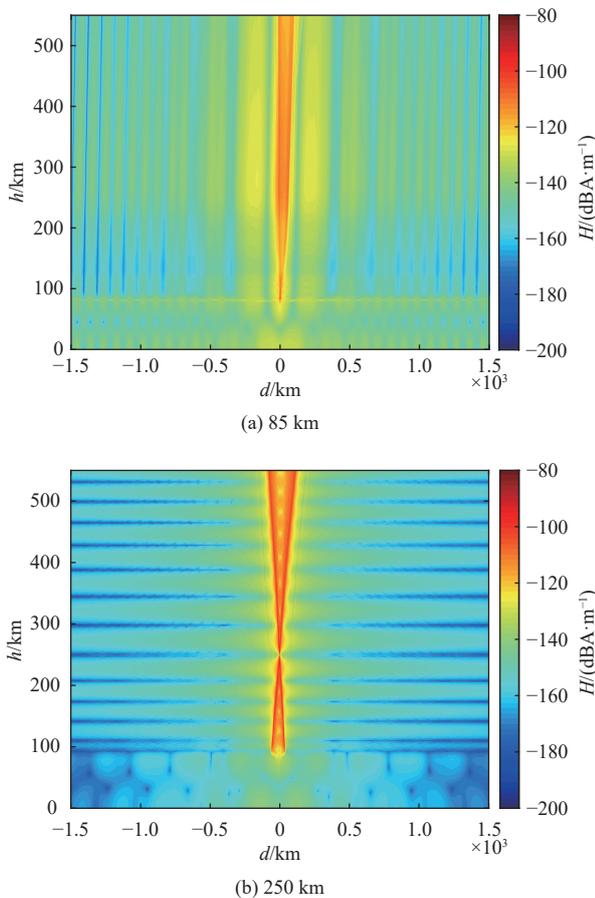


图 9 电离层中辐射源位于不同位置时辐射磁场分布仿真结果

Fig. 9 Simulation results of radiation magnetic field distribution when radiation sources are located at different positions in the ionosphere

## 4 结 论

本文针对高纬度电离层调制加热激励的 ULF/VLF 电磁波辐射特性,基于我国 2017—2019 年利用 EISCAT 加热装置开展的调制加热实验数据,分析了 AM 和 BW 两种加热模式加热功率、加热波极化、辐射频率和地磁扰动对辐射波强度的影响,研究结果表明:

1) ULF/VLF 电磁波强度与加热功率等级近似成正比例线性关系,AM 和 BW 两种模式功率比例系数分别约为 1.7 和 2.1.

2) X 波激励辐射的 ULF/VLF 电磁波强度高于 O 波. AM 模式下,采用 X 波和 O 波激励辐射波强度的差值受辐射波频率影响较小,实验期间维持在 8~9 dB; BW 模式下,两种极化激励辐射波强度的差值受辐射波频率影响较大,如辐射频率为 517 Hz 时, X 波激发电磁波强度与 O 波激发强度之差约为 5 dB,但辐射频率为 2 017 Hz 时,差值可达 11 dB.

3) 随着辐射波频率的增加,辐射波强度先增大后减小,但 AM 调制激励辐射波强度最大值出现在 2 kHz 附近, BW 模式激励辐射波强度最大值出现在 8~14 kHz.

4) AM 模式下,激励辐射源强度依赖于电离层中自然电流的大小,而 BW 模式激励的辐射波强度与自然电流强弱相关性较小,表明自然电流较弱背景下,利用 BW 模式能获较强的 ULF/VLF 电磁波辐射.

针对 BW 模式调制加热在电离层中形成 ULF/VLF 辐射源的位置问题,采用实验和理论相结合的分析方法,对比两种加热模式激励的 ULF/VLF 电磁波传播特性的差异,以及基于 AM 模式激励的辐射源位于 D 层这一事实, BW 模式辐射源的传播特性更加符合辐射源位于 F 层情形.但需说明的是,在利用全波法对电离层不同高度处辐射源的传播特性进行仿真估算中,将辐射源等效为单一的电偶极子并不能完全代表电离层调制加热实际形成 ULF/VLF 辐射源.实际上,调制加热形成的辐射源是一个区域体源,与调制加热区域的大小有关,在加热电磁波经过电离层各高度上都有可能形成辐射源,因此本文中 AM 和 BW 两种模式形成辐射源位置指的是对应模式加热下激励 ULF/VLF 波的主要电离层高度.由于缺乏对 ULF/VLF 辐射源高度直接诊断测量的手段,后期还须对更多的相关实验数据进行统计分析,以及从加热激发 ELF/VLF 物理机理的层面,结合背景电离层参数,进行更深入的建模仿真来确认辐射源的位置.

此外,针对电离层调制加热激发 ULF/VLF 电磁波应用问题,在 2019 年 EISCAT 调制加热实验中,还开展了利用自然电流激励 ULF/VLF 电磁波进行信息传输实验<sup>[31-32]</sup>,实验实现了最高速率 400 bit/s 的信息传输,并在 CSES 卫星轨道对信息信号的接收,表明利用电离层调制加热激发 ULF/VLF 电磁波辐射具有重要的应用前景.

## 参考文献

- [1] WILLIS S W, DAVIS J R. Radio frequency heating effect on the electron density in the lower E region[J]. *Journal of geophysical research*, 1973, 78(25): 5710-5717.
- [2] GETMANTSEV G G, ZUIKOV N A, KOTIK D S, et al. Combination frequency in the interaction between high-power short-wave radiation and ionospheric plasma[J]. *JETP letters*, 1974, 20(4): 101-102.
- [3] COHEN M B, GOLKOWSKI M. 100 days of ELF/VLF generation via HF heating with HAARP[J]. *Journal of geophysical research*, 2013, 118(10): 6597-6607.
- [4] MOORE R C, INAN U S, BELL T F, et al. ELF waves generated by modulated HF heating of the auroral electrojet and observed at a ground distance of  $\sim 4400$  km[J]. *Journal of geophysical research*, 2007, 112(A5): A05309.
- [5] JIN G, SPASOJEVIC M, COHEN M B, et al. Utilizing nonlinear ELF generation in modulated ionospheric heating experiments for communications applications[J]. *Radio science*, 2013, 48(1): 61-68.
- [6] PAPAPOULOS K, CHANG C L, VITELLO P, et al. On the efficiency of ionospheric ELF generation[J]. *Radio science*, 1990, 25(6): 1311-1320.
- [7] COHEN M B, INAN U S, GOLKOWSKI M. Geometric modulation: a more effective method of steerable ELF/VLF wave generation with continuous HF heating of the lower ionosphere[J]. *Geophysical research letters*, 2008, 35(12): L12101.
- [8] MILIKH G M, PAPAPOULOS K. Enhanced ionospheric ELF/VLF generation efficiency by multiple timescale modulated heating[J]. *Geophysical research letters*, 2007, 34(20): L20804.
- [9] 郝书吉, 李清亮, 杨巨涛, 等. 电离层预加热幅度调制模式的理论与模拟[J]. *电波科学学报*, 2013, 28(2): 231-236.
- HAO S J, LI Q L, YANG J T, et al. Theory and simulation of ionospheric pre-heating amplitude modulated heating mode[J]. *Chinese journal of radio science*, 2013, 28(2): 231-236. (in Chinese)
- [10] BARR R, STUBBE P. ELF and VLF wave generation by HF heating: a comparison of AM and CW techniques[J]. *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics*, 1997, 59(18): 2265-2219.
- [11] KUO S, SNYDER A, KOSSEY P, et al. Beating HF waves to generate VLF waves in the ionosphere[J]. *Journal of geophysical research*, 2012, 117(A3): A03318.
- [12] 杨巨涛, 李清亮, 王建国, 等. 双频双波束加热电离层激发甚低频/极低频辐射理论分析[J]. *物理学报*, 2017, 66(1): 019401.
- YANG J T, LI Q L, WANG J G, et al. Theory of very low frequency/extra low frequency radiation by dual-beam beat wave heating ionosphere[J]. *Acta physica sinica*, 2017, 66(1): 019401. (in Chinese)
- [13] MOORE R C, FUJIMARU S, COHEN M. On the altitude of the ELF/VLF source region generated during "beat-wave" HF heating experiments[J]. *Geophysical research letters*, 2012, 39(18): L18101.
- [14] COHEN M B, MOORE R C, GOLKOWSKI M, et al. ELF/VLF wave generation from the beating of two HF ionospheric heating sources[J]. *Journal of geophysical research*, 2012, 117(A12): A12310.
- [15] TERESHCHENKO E D, SHUMILOV O I, KASATKINA E A. Features of amplitude and Doppler frequency variation of ELF/VLF waves generated by "beat-wave" HF heating at high latitudes[J]. *Geophysical research letters*, 2014, 41(13): 4442-4448.
- [16] 李清亮, 杨巨涛, 闫玉波, 等. 中低纬调制高频加热电离层 ELF/VLF辐射模拟[J]. *电波科学学报*, 2008, 23(5): 883-887.
- LI Q L, YANG J T, YAN Y B, et al. ELF/VLF waves radiated by modulated HF heating ionospheric in mid-latitude and equatorial regions[J]. *Chinese journal of radio science*, 2008, 23(5): 883-887. (in Chinese)
- [17] 黄文耿, 古占芬, 龚建村. 电离层电急流的人工调制[J]. *电波科学学报*, 2005, 20(3): 295-299.
- HUANG W G, GU Z F, GONG J C. Artificial modulation of ionospheric electrojet by powerful HF radio waves[J]. *Chinese journal of radio science*, 2005, 20(3): 295-299. (in Chinese)
- [18] BARR R, STUBBE P. ELF radiation from the Tromsø "Super Heater" facility[J]. *Geophysical research letters*, 1991, 18(6): 1035-1038.
- [19] STUBBE P. Review of ionospheric modification experiments at Tromsø[J]. *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics*, 1996, 58(1-4): 349-368.
- [20] BARR R, STUBBE P. ELF and VLF radiation from the "polar electrojet antenna" [J]. *Radio science*, 1984, 19(4): 1111-1122.
- [21] COHEN M B, INAN U S, GOLKOWSKI M, et al. On the generation of ELF/VLF waves for long-distance propagation via steerable HF heating of the lower ionosphere[J]. *Journal of geophysical research*, 2010, 115(A7): A07322.
- [22] KUO S, LEE M C. On the VLF wave generation by beating of two HF heaters[J]. *Physic of plasmas*, 2017, 24(2): 022902.
- [23] KAPUSTIN I N, PERTSOVSKII R A, VASIL'EV A N, et al. Generation of radiation at combination frequencies in the region of the auroral electric jet[J]. *JETP letters*, 1977, 25(5): 228-231.
- [24] JIN G, SPASOJEVIC M, INAN U S. Relationship between

- electrojet current strength and ELF signal intensity in modulated heating experiments[J]. *Journal of geophysical research*, 2009, 114(A8): A08301.
- [25] RIETVELD M T, KOPKA H, NIELSEN E, et al. Ionospheric electric field pulsations: a comparison between VLF results from an ionospheric heating experiment and STARE[J]. *Journal of geophysical research*, 1983, 88(A3): 2140-2146.
- [26] JAMES H G, INAN U S, RIETVELD M T. Observations on the DE 1 spacecraft of ELF/VLF waves generated by an ionospheric heater[J]. *Journal of geophysical research*, 1990, 95(A8): 12187-12195.
- [27] 刘大鹏, 申旭辉, 杨德贺, 等. 张衡一号卫星观测的地基 VLF 波电离层加热扰动特征 [J]. *电波科学学报*, 2021, 36(6): 970-976.
- LIU D P, SHEN X H, YANG D H, et al. Characteristics of ionospheric heating disturbances caused by ground-based VLF waves observed by ZHANGHENG-1 satellite[J]. *Chinese journal of radio science*, 2021, 36(6): 970-976. (in Chinese)
- [28] YAGITANI S, NAGANO I, MIYAMURA K, et al. Full wave calculation of ELF/VLF propagation from a dipole source located in the lower ionosphere[J]. *Radio science*, 1994, 29(1): 39-54.
- [29] LEHTINEN N G, INAN U S. Radiation of ELF/VLF waves by harmonically varying currents into a stratified ionosphere with application to radiation by a modulated electrojet[J]. *Journal of geophysical research*, 2008, 113(A6): A06301.
- [30] LEHTINEN N G, INAN U S. Full-wave modeling of transionospheric propagation of VLF waves[J]. *Geophysical research letters*, 2009, 36(3): L03104.
- [31] LU H, YANG J T, LI Q L, et al. ELF/VLF communication experiment by modulated heating of ionospheric auroral electrojet at EISCAT[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2021, 69(4): 2267-2273.
- [32] YANG J T, LI Q L, LU H, et al. Experimental ELF / VLF wave communication with excitation by ionosphere modulated heating[J]. *Radio science*, 2022, 57: RS007406.

### 作者简介

**杨巨涛** (1982—), 湖南人, 中国电波传播研究所高级工程师, 博士, 研究方向为电波传播和等离子体物理. E-mail: yyjt521@126.com

**李清亮** (1963—), 河南人, 中国电波传播研究所研究员, 中国电子科技集团公司首席科学家, 博士, 长期从事电波传播理论及应用技术研究, 先后担任某重大工程副总设计师, 973 项目技术首席和 863 计划重大课题组长, 在目标及其环境特性、电离层扰动与传播特性等方面取得多项研究成果, 获国家科技进步一等奖, 享受国务院政府特殊津贴. E-mail: qlianglicirp@sina.cn

**陈靓** (1990—), 云南人, 中国电波传播研究所高级工程师, 博士, 研究方向为等离子物理和数值仿真. E-mail: chenjingcj40@163.com