

# 太阳风暴对短波电子装备性能的影响及应对措施

王世凯, 柳文, 李铁成

(中国电波传播研究所, 山东 青岛 266107)

**摘要:** **目的** 掌握太阳风暴对短波电子装备性能的影响及应对措施, 为系统设计提供参考。**方法** 分析太阳风暴的表现形式, 并从作用距离、目标检测、定位精度等方面给出太阳风暴对短波超视距雷达、短波通信等装备的影响。**结果** 电离层 SID、电离层暴可造成短波通信中断, 短波通信可用频段变窄。电离层强吸收可降低天波超视距雷达作用距离和目标定位精度, 电子浓度、电离层虚高快速变化影响超视距雷达检测性能和定位精度, 负相电离层暴使天波超视距雷达可用频段严重变窄。地球磁暴期间, 电磁场突变产生的强电压和电流有可能烧毁用于天、地波超视距雷达的电子设备。电离层非规则现象对超视距雷达有严重影响。**结论** 太阳风暴对电子装备性能有利有弊, 要分别对待。系统设计时应充分考虑太阳风暴的影响, 在出现太阳风暴时, 采取针对性措施降低其影响。

**关键词:** 电离层; 太阳风暴; 超视距雷达; 短波通信

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2017.07.003

**中图分类号:** TJ07; TN011

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2017)07-0012-06

## Impacts of Solar Storm on Performance of Shortwave Electronic Equipment and Solutions

WANG Shi-kai, LIU Wen, LI Tie-cheng

(China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107, China)

**ABSTRACT: Objective** To master impacts of solar storm on performance of shortwave electronic equipment and corresponding solutions and provide reference for system design. **Methods** The forms of solar storms were analyzed and influences of solar storm on shortwave beyond visual range radar, short wave communication, etc. were given from ranging coverage, object detection, positioning accuracy et al. **Results** The ionosphere SID and ionospheric storm could interrupt shortwave communication and narrow shortwave spectrum of communication. Strong ionospheric absorption could decrease the sky-wave over-the-horizon radar range and target location accuracy and electron concentration. The inflated rapid change of the ionosphere affected the over-the-horizon radar detection performance and positioning precision. Negative phase ionospheric storm narrowed the available spectrum of the sky-wave over-the-horizon radar severely. During geomagnetic storms, strong electromagnetic field, mutation of voltage and current may burn electronic equipment for sky-ground wave over-the-horizon radar. Irregular phenomenon of ionosphere had serious influences on over-the-horizon radar. **Conclusion** The solar storm is both advantageous and disadvantageous to performance of electronic equipment. It should be treated respectively. During system design, it is required to take full consideration on influences of solar storm and take corresponding measures to reduce influences of solar storm when it appears.

**KEY WORDS:** ionosphere; solar storm; over the horizon radar; shortwave communication

收稿日期: 2017-03-21; 修订日期: 2017-04-15

基金项目: 国家自然科学基金 (61331012)

作者简介: 王世凯 (1979—), 男, 河北人, 硕士, 高级工程师, 主要从事电离层电波传播及工程应用等方面的研究。

现代高科技武器电子装备性能要求越来越高,传播环境对武器装备性能的影响不容忽视,除了正常的传播环境外,太阳风暴是一种避不开的异常环境。文中重点阐述了如何认识太阳风暴,太阳风暴对武器电子装备的影响包括哪些方面,以及如何应对太阳风暴等技术问题。

## 1 太阳风暴及对电离层的影响

太阳风暴是指太阳上的剧烈爆发活动及其在日地空间引发的一系列强烈扰动。太阳爆发活动是太阳大气中发生的持续时间短暂、规模巨大的能量释放现象<sup>[1-2]</sup>。

太阳风暴发生后,通常以三种方式向行星际空间喷射能量和物质。针对电离层环境,每一个打击波造成的影响是不同的,太阳风暴的攻击手段及时间如图 1 所示。

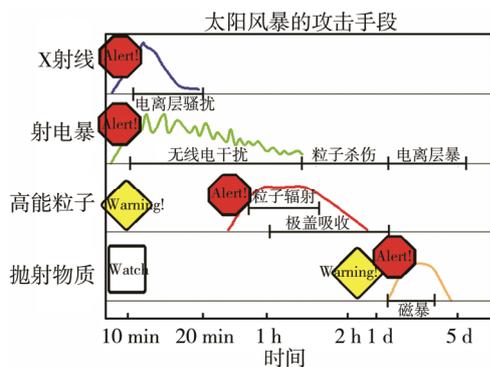


图 1 太阳风暴的攻击手段及时间

首先是超强的电磁辐射,包括 X 射线、紫外线、射电辐射等在内的辐射以光速传播,大约 8.3 min 后到达地球。主要攻击目标是向日面电离层环境,攻击能持续几十分钟甚至 2 h 以上。突增的紫外线和 X 射线在向日面的地球上空 60~90 km 处被大气吸收,直接引起电离层 D 层的电子密度快速增加,同时 D 层的高度发生变化。在强太阳风暴期间,该层电子密度增加可达 10 倍以上,会引起一系列的骚扰现象,如短波突然中断、吸收突然增强、突然相位异常、突然频率漂移等,统称为电离层突然骚扰。

其次是太阳高能粒子,它们以远超声速的速度传播,几十分钟后到达地球。主要攻击目标包括空间飞行器和高纬电离层环境,能持续几小时到几十小时。此时地球磁场不再是密不透风的,而是在高纬有个缺口,引起地面 50~90 km 高度范围内的电子密度增加,导致高频无线电波的吸收增强。吸收主要出现在高纬地区,然后逐渐向较低纬度延伸,持续时间为 1~60 h,也称为极盖吸收。

最后是日冕物质抛射,它携带的大量物质和磁场

以每秒几百至几千公里的速度传播,几十小时后到达地球。能攻击大范围的地球磁层和电离层环境,持续几十小时至几天,产生全球性的电离层电子密度的异常变化,即电离层暴。电离层暴有正暴、负暴和双相暴等多种形态。其中,正暴是指电离层电子密度和总电子含量的增加,负暴或负相暴是指它们的减小,双相暴是指增加和减小交替出现。电离层暴的形态与季节和纬度等因素有关。在高纬地区主要出现负暴,在低纬地区主要出现正暴。在中纬地区,冬天正暴居多,负暴则多出现在夏天。

## 2 对短波通信系统影响的综合评估<sup>[3]</sup>

### 2.1 电离层 SID、电离层暴可造成短波通信中断

电离层突然骚扰(SID)期间,日照面电离层 D 层的电子浓度突然增加,从而造成高频(HF)信号的严重吸收,甚至可引起突然短波消失(SWF)。SWF 持续时间一般从几分钟到 2 h。

SWF 期间,短波信道中断,短波通信彻底不能工作。例如 1989 年 3 月上旬发生的一系列的耀斑爆发和剧烈的“太阳风暴”典型事件,引起了一系列的电离层突然骚扰、极盖区吸收和电离暴事件,造成了 39 次短波通讯骚扰,其中有 24 次是全球性的中断。2001 年 3 月 19 日发生的电离层暴,到 21 日 9 时,中国大陆及太平洋西岸大面积电离层负暴覆盖,导致短波通信中断数小时。2005 年 1 月 20 日发生的一次 X7.9 级耀斑爆发,造成大面积短波无线电信号强吸收和信道中断,其中北京地区信号中断 1 个多小时。2006 年 12 月 13 日北京时间 10:30 左右,太阳发生一次 X3 级耀斑爆发,我国各地均发生突然电离层骚扰(SID),广州、海南、重庆等电波观测站短波信号从 10:20 起发生全吸收,信号全部中断。此次耀斑爆发,直接造成了我国北京、河北、陕西、山西、新疆等地对海南、上海、北京、拉萨方向的短波广播信号中断。我国对外广播的部分电路也受到了不同程度的影响,造成昆明对南亚地区 9 MHz 以上广播频率、喀什对南美地区 7 MHz 以上广播频率、西安对东南亚、南亚和中亚地区 9 MHz 以上广播频率和长春对东南亚地区 15 MHz 以上广播频率中断。直到 13:30 左右信号才基本恢复正常。

### 2.2 电离层暴造成短波通信可用频段变窄

电离层负相暴期间,电离层 F2 层最大电子浓度的相对变化一般为 -20%~-60%,强电离层暴可达到 -100%以上。由于负相暴电离层电子浓度减小,相应临界频率降低,直接导致短波通信最高可用频率

(MUF)显著下降。同时,负相暴扰动期间,伴随电离层吸收增加,使得最低可用频率(LUF)增加,这两方面结合导致 HF 通信可用频段严重变窄。例如 2001 年 3 月 21 日发生一次较大的电离层暴,这次电离层骚扰是由一次不大的太阳“日冕物质发射(CME)”事件引起的。中、高纬度地区电离层 F 层的临界频率严重降低,下降幅度普遍超过 50%。2001 年 4 月 3 日早晨 5:51 分(北京时间),太阳表面发生一次 25 年来最强烈的 X-射线爆发,持续时间约 30 min 左右。到 12 点时,最低可用频率已接近最高可用频率,可通频段十分狭小。例如兰州至新乡的可通频段只有 2.4 MHz,重庆至新乡的可通频段只有 1.7 MHz,广州至新乡的可通频段只有 3.1 MHz,满洲里至新乡的可通频段只有 3.7 MHz。

由于可用频段变窄,高频信道用户都集中在一段窄频段内工作,造成信道异常拥挤,干扰严重,通信环境恶劣,也严重影响通信效果。此外,如果 HF 通信系统在该窄频段性能不理想(如发射机效率、收发天线的方向性增益等在该频段不理想),则对通信的影响尤为严重。

### 2.3 地球磁暴对短波通信系统设备的影响

地球磁暴期间,地磁场的突然变化可在高压输电系统、电缆线等长导体内产生强电流和高电压,这种强电流和高电压可能烧毁变压器,造成停电。电磁场突变产生的强电压和电流也有可能烧毁用于 HF 通信、超视距雷达、电子战和技术侦察等电子设备。

### 2.4 电离层暴影响短波通信质量

无论是正相、负相和双相电离层暴,电离层电子浓度都将出现快速变化。电离层暴期间,电离层 F2 层最大电子浓度的相对变化一般为 $\pm 20\% \sim \pm 60\%$ ,强电离层暴可达到 100%以上。这种快速变化导致 HF 信号相位随机抖动,造成频率选择性衰落和时间选择性衰落,从而使通信误码率增加。对于近距离或超远距离通信链路而言,这种影响较中等距离通信更为严重。

### 2.5 极盖吸收对短波通信的影响

极盖吸收(PCA)发生在高纬地区,通常在地磁纬度大于 $64^\circ$ 的区域,出现概率相对较小。主要影响高纬地区的短波通信,或者是穿越高纬地区的短波通信。其主要表现是由于电离层吸收严重,可使通信信噪比下降,影响通信性能,甚至造成通信中断。

### 2.6 大尺度电离层行扰对短波通信的影响

电离层行扰是暴时极区激发的、向赤道方向以 600~700 m/s 速度水平传播的大气重力波扰动。周期为 30 min 至几小时,东西向水平尺度可达几千公里,

传播上千公里后波形变化不大。它可发生使 F2 层偏离正常值 20%~30%的扰动,严重改变无线电波的传播环境。大尺度电离层行扰(TID)造成通信信号的多径时延散布和多普勒散布增加,造成短波数字通信码间串扰和时间选择性衰落,最终使误码率增加。

### 2.7 Es 层对短波通信的影响

强太阳风暴期间,有可能出现强 Es(突发 E 层),即 E 区的突发不均匀体,其高度多在 90~120 km 之间的区域,厚度可达几百米到数公里,水平尺度可达数百米至上千米,出现的时间不定。在没有太阳风暴时,Es 也会经常出现,在存在 Es 的情况下,如果不能选择合适的通信频率避开电离层 F 模式单独利用 Es 通信或避开 Es 模式单独利用 F 模式通信,则多径传播效应明显,造成数字通信的码间串扰,增加误码率。

## 3 对天/地波超视距雷达影响的综合评估

### 3.1 对天波超视距雷达的影响

天波超视距雷达利用电离层反射实现超远距离目标的预警探测,配备电波环境诊断分系统,实现电离层的实时探测,为雷达提供工作频率和坐标变换系数等参数。

#### 3.1.1 电离层 SID、电离层暴<sup>[4-7]</sup>

SWF 期间或强吸收期间, HF 信道中断,此时电波环境诊断分系统垂直探测的回波、返回散射探测回波、斜向探测信号都将消失殆尽,而干扰和无线电噪声监测接收电平也将显著下降,雷达也将收不到任何回波信息,整个系统完全处于不能工作的状态。SID 发生前后垂测图的变化如图 2 所示。

#### 3.1.2 电离层强吸收

即使没有出现 SWF, SID 造成的 HF 信号强吸收对天波超视距雷达的影响也特别严重,它将大大减小天波超视距雷达作用距离。SID 期间,电离层吸收较平静时一般能增加 7~40 dB,考虑到天波超视距雷达信号传播的双程吸收,雷达作用距离可降低 3~100 倍。同时,电波环境诊断分系统的垂测、斜测、返回散射探测信号也由于电离层的强吸收而极弱,不能有效提取所需的各种信息,造成一系列的不利影响。如各种电离图的智能判读、电离层参数的反演、区域电离层的重构、频率选择、传播效应修正等,最终影响天波超视距雷达目标定位精度。

#### 3.1.3 电子浓度、电离层虚高快速变化

电离层暴变期间导致电离层电子浓度的快速起伏变化,对天波雷达回波信号造成严重相位污染,可

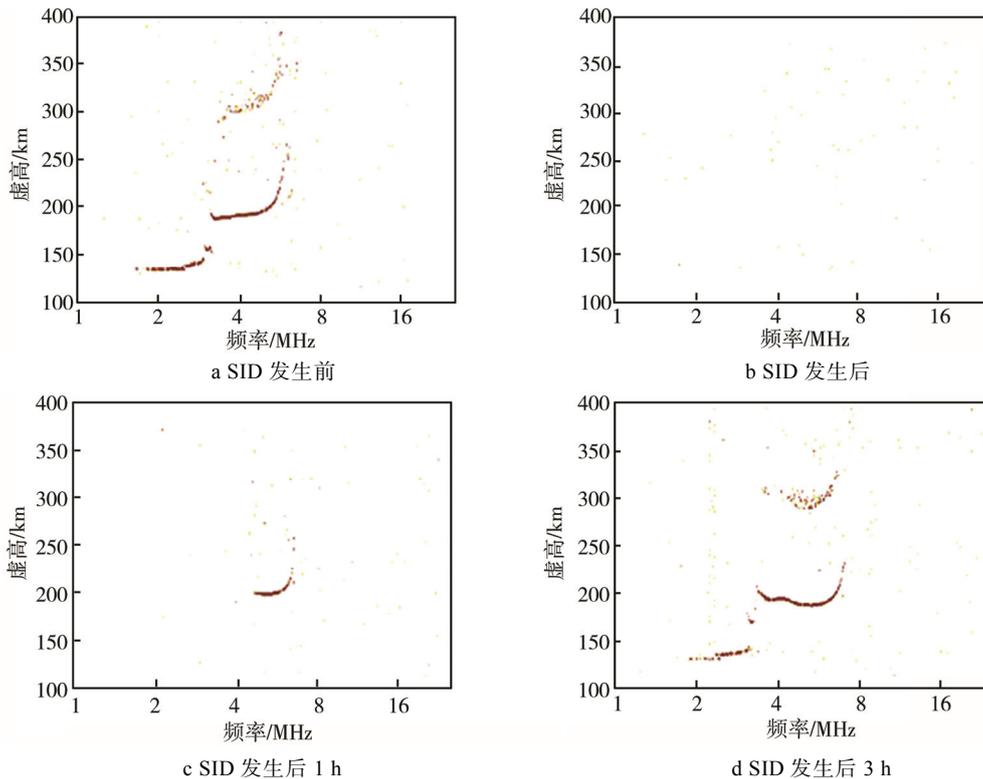


图 2 SID 期间垂测电离图的变化

使天波超视距雷达无法进行有效地相干积累,明显降低目标回波的杂噪比,影响目标检测,特别是对于海面低速目标的检测,影响更为严重。除此之外,电离层电子浓度的显著变化造成沿传播路径 TEC 的变化,电波传播时延相应也产生明显变化,电波环境诊断分系统提供的参数无法适应这种快速变化,导致目标定位精度变差。按电子浓度的变化 20%~60% 范围计算,可造成 PD 变换误差为几十公里,甚至上百公里。

电离层暴变时, F2 层最大电子浓度高度 hmF2 通常为正常,有时电离层实际高度变化仅 20 km,但垂直探测虚高变化达到 600 km。例如 1989 年 3 月 12—16 日电离层暴变期间,0° 经度链附近 9 个观测台站在本地时间的清晨或夜间,各站的虚高同时发生突然增长,最大增长幅度可达 150%, 120°E 经度链附近 9 个台站也在本地时清晨发生虚高突然增大,最大增幅可达 90%。在这种情况下,垂测电离图反演电离层参数将产生极大的误差,最终影响探测目标的定位精度。同时,由于虚高突增,斜传播的群时延也发生极大的变化,经估计,假设电离层实际高度变化仅 20 km,垂直探测虚高变化达到 600 km,可能造成 PD 变换误差至少在 150 km 以上。

电子浓度的变化还可使 F2 层反射的短波信号发生频率突然偏高,然后减小,这种现象称为突然频率偏移(SFD)。SFD 可使天波雷达检测的目标多普勒频率出现突变,SFD 持续时间较长的情况下,将导致跟踪目标的丢失或造成航迹形成困难。

### 3.1.4 电离层负相暴

负相电离层暴使天波超视距雷达可用频段严重变窄,这与短波通信中的频段变窄类似。造成 HF 信道异常拥挤,干扰严重,工作环境恶化,将严重影响天波超视距雷达性能。

### 3.1.5 电离层非规则现象<sup>[4-5,8]</sup>

电离层非规则现象也与太阳及地磁活动有一定的关系,特别是大尺度的 TID。沿南北向传播的大尺度 TID 将严重影响天波超视距雷达定位精度,对于南北向传播的 TID 而言,探测目标的方位偏差将显著增加,最大可达到 6°~7°。电波环境诊断分系统提供的 PD 变换系数和方位修正系数不能适应 TID 的变化,在 TID 传播速度较快、幅度较大的情况下,雷达接收到的同一目标的群路径信息、方位信息都存在很大的起伏变化,目标多普勒信息也较电离层平静时期不稳定。在这种情况下,雷达对检测目标形成航迹将很困难。

对于天波超视距雷达而言,Es 主要影响其作用距离,强遮蔽 Es 可使天波超视距雷达作用距离缩减到 2000 km 以内。

## 3.2 对地波超视距雷达的影响

电离层污染导致雷达性能下降。地波超视距雷达正常工作时,由于其收发天线的非理想性,除了绝大部分能量以地波方式沿海面传播外,还有部分

能量可能通过天波传播,形成电离层回波污染,电离层回波污染是影响其探测性能的一个重要因素。遭电离层污染的典型雷达多普勒谱图如图3所示,目标回波信号淹没在电离层污染谱中,对目标检测造成极大困难。

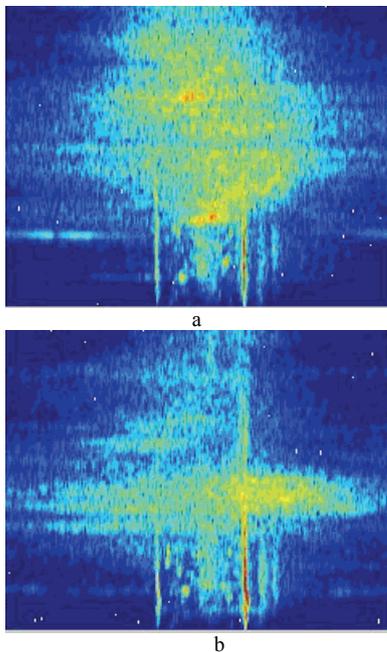


图3 遭电离层污染的地波超视距雷达多普勒谱图

电离层暴期间电离层电子浓度的快速变化造成的电离层污染对地波超视距雷达检测性能造成严重影响。Es反射回波刚好落在地波超视距雷达有效探测距离之内,将对地波超视距雷达产生电离层污染,可严重影响其检测性能<sup>[9-10]</sup>。SWF对HF地波传播基本上没有什么影响,相反,由于HF天波信号的突然消失,使得地波超视距雷达没有天波信号的干扰或干扰大幅降低,这种情况对地波超视距雷达的目标检测极为有利。负相电离层暴导致的信道变窄对地波超视距雷达有利,其一是电离层污染减少,其二是工作信道HF干扰较少。

#### 4 对短波电子战装备影响的综合评估

电离层突然骚扰SID造成的HF信号强吸收或SWF,对电子战系统的影响特别严重,其最显著的影响之一是使电子干扰作用距离大大减小。同时,强吸收造成严重的吸收衰落,由于衰落的影响,在99.3%的时间内,接收点的场强比中值要低20~40dB,而最大衰落深度能达到60dB。如此严重的衰落效应使得到达干扰目标的干扰功率在很多时候都衰落掉了,无法有效实施对目标的干扰,使其处于瘫痪状态。SWF期间,高频信道中断,HF电子干扰系统失去其工作能力。

负相电离层暴使HF电子干扰系统可用频段严重变窄,甚至使短波信道中断。电离层暴期间发生的电离层强吸收可大大减小电子干扰系统的作用距离。

大尺度电离层行扰TID造成电离层大尺度的倾斜。这种倾斜使得电磁波偏离大圆面传播,从而使HF电子干扰系统无法对目标实施精确打击,甚至会适得其反,干扰己方目标。

#### 5 对短波技侦装备影响的综合评估

电离层突然骚扰期间,电离层强吸收使被侦听信号信噪比降低,效果差,甚至无法正常工作。电离层负相暴使技侦系统的可用频段变窄,高频率信号将穿透电离层,而低频段的信号由于电离层的强吸收而在接收端收不到信号。电离层正相暴期间导致电子浓度增加,电波传播的群时延相对于平静时期将增加数百公里,对单站定位系统造成数百公里的定位误差。

无论正相暴还是负相暴,电离层电子浓度的随机起伏都将造成测向信号波前扰动,造成来波真实方向的改变。对单站测向的准确性和有效性造成严重影响,从而对整个技侦网的交汇定位精度造成严重影响,也会造成信号来波仰角起伏、跳变较电离层平静时期更加剧烈。大尺度电离层行扰TID造成电离层大尺度的倾斜,这种倾斜使得电磁波偏离大圆面传播,由此产生测向误差,由于TID造成的测向误差有时可达到 $7^{\circ}\sim 8^{\circ}$ 。

Es对技侦装备的影响主要是降低其作用距离。此外,在半遮蔽Es情况下,多径效应使得到达测向天线的电波呈现多个方向的波前,形成多波场干扰,引起接收信号的波前扰动,造成真实方向的改变,对测向的准确性和有效性造成严重影响。同时由于传播路径不唯一,经不同路径传播的电波到达侦收点的场强衰减量也不同,因此,根据接收信号场强判断敌方目标属性变得相当复杂。

#### 6 太阳风暴的应对措施

在太阳风暴期间,采取相应的措施,可在一定程度上改善电子装备性能。下面以高频雷达为例进行说明。

##### 6.1 对付SID攻击的手段

1)适当提高系统发射功率。SID期间,雷达本身发射的无线电波吸收严重,其他高频用户也不可避免遭受这种强吸收。此时干扰减少,环境噪声也有所降低,环境反而干静,提高系统发射功率能有一定的效果。

2)尽可能提高工作频率。无线电波频率越高,

吸收越小, 因此可尽量使用高频工作, 减少电离层的吸收。频率不能超过 MUF, 否则, 不但起不到改善效果, 反而什么也看不到了。

SID 造成信道中断的时间一般不会持续很长时间, 而且只发生在白天, 因此一旦发生 SID, 应当及时和有关部门沟通, 调整当前的工作任务, 做好下一步规划。

## 6.2 对付电离层暴的手段

1) 电离层负相暴期间, 由于电子浓度降低, 导致雷达最高可用频率降低, 同时可能伴随吸收增加。此时可以从电波环境诊断分系统的探测结果中判断是最高可用频率降低还是电离层吸收增加, 或二者兼而有之, 然后可以针对具体情况, 采取有效措施。如果最高可用频率降低, 则需要降低频率工作, 保证雷达发射的无线电波不至于穿透电离层, 能够覆盖到要探测的区域, 但频率不能降低到最低可用频率 LUF 以下; 如果伴随有电离层吸收增加, LUF 也会增加, 高频用户的可用频段压缩, 此时信道拥挤, 因此应该尽可能提高发射功率。

2) 如果出现 Es, 可采取以下措施: 当 Es 是半遮蔽时, 对于近距离区域可适当降低工作频率, 有可能使无线电波不穿透 Es 进入 F 层, 防止能量分流, 提高目标检测概率; 当 Es 是全遮蔽时, 为了能看到远距离目标, 可以尽可能地提高工作频率, 有可能使无线电波穿透 Es 进入 F 层, 从而看到更远的目标。

3) 当出现电离层倾斜时, 可适当调整工作频率, 因为同样倾斜的情况下, 不同频率的作用距离是不同的, 调整频率对锁定探测距离是有效的。

4) 太阳风暴期间应尽可能缩短电波环境诊断分系统的工作周期, 使其尽可能跟上快速变化的电离层, 及时更新雷达工作频率和其他参数, 可有效改善

雷达性能。

正确认识太阳风暴对短波电子装备性能的影响及应对措施, 对充分发挥武器装备性能具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] BURESOVA D, LASTOVICKA J. Changes in the F1 Region Electron Density during Geomagnetic Storms at Low Solar Activity[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2001, 63: 537—544.
- [2] BIKTASH L Z, MARUYAMA T, NOZAKI K. The Solar Wind Control of the Equatorial Ionosphere Dynamics during Geomagnetic Storms[J]. *Advances in Space Research*, 2008, 41: 562—568.
- [3] 索玉成, 张添益. 太阳风暴、电离层骚扰对通信系统的影响[C]// 第七届全国电波传播学术年会论文集. 电波科学学报, 2007: 272—278.
- [4] 周晨, 赵正予, 邓峰. 电离层行进式扰动对天波超视距雷达坐标配准的影响[J]. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(10): 2222—2225.
- [5] 李雪, 李吉宁, 娄鹏, 等. 行波扰动对天波雷达慢速目标检测影响研究[J]. *电波科学学报*, 2015, 30(2): 295—299.
- [6] 李宗强, 柳文. 低纬地区天波雷达系统时间可用度研究[J]. *电波科学学报*, 2002, 17(3): 264—268.
- [7] 张晓华, 盛文, 王世凯. 天波雷达电离层信道可用度统计方法研究[J]. *现代雷达*, 2012, 34(10): 10—14.
- [8] 肖赛冠, 肖佐, 史建魁, 等. 中纬地区日间类扩展 F 不规则结构的观测研究[J]. *空间科学学报*, 2016, 36(6): 875—880.
- [9] 韩彦明, 胡进, 孔庆颜, 等. 中国南部地区 Es 层出现规律统计及分析[J]. *电波科学学报*, 2009, 24(5): 929—933.
- [10] 李玉辉. Es 层对 OTHR 传播的影响[J]. *中国空间科学技术*, 1993(2): 19—24.