

太阳射电爆发干扰导航通信机理及影响表征分析*

董 亮¹ 黄文耿² 潘业欣³

1(中国科学院云南天文台 昆明 650011)

2(中国科学院国家空间科学中心 北京 100089)

3(中国人民解放军 61741 部队 北京 100094)

摘 要 太阳射电爆发是一种潜在的导航系统干扰因素。通过导航信号模型推导,分析了其干扰导航信号的机理,提出太阳射电爆发干扰导航通信的影响方程与太阳射电爆发流量、接收机性能以及太阳-天线高度角有关,其中太阳射电流量总功率与信号的信噪比下降呈正相关;同时受到太阳-天线高度角和有效面积的制约,又与接收机环路滤波器响应函数呈卷积关系。通过对 2003 年 10 月 28 日、2006 年 12 月 6 日和 2015 年 11 月 4 日事件中 GPS 失锁情况分析,发现同一次事件中同一站点不同接收机的失锁率不同;同一次事件中不同纬度的接收机失锁率不同,以及在同一次事件中 L 波段(1~2 GHz)太阳射电爆发频谱不均匀的条件下, L1 和 L2 频段信号的信噪比下降情况也不同。从上述三个事件的观测表征验证了上述影响方程的分析正确性。

关键词 太阳射电爆发, 导航通信, 同频干扰, 影响机制, 观测表征

中图分类号 P228, TN927

Analyses for the Mechanism of Solar Radio Burst Interfering Satellite Navigation Signal and Influence Presentation

DONG Liang¹ HUANG Wengeng² PAN Yexin³

1(Yunnan Astronomy Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011)

2(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100089)

3(Unit 61741 of PLA, Beijing 100094)

Abstract Solar radio bursts are a potential interference factor in navigation systems. From the navi-

* 国家自然科学基金项目天文联合基金培育项目(U2031133), 国家自然科学基金天文联合基金重点项目(U1831201), 国家自然科学基金专项项目(11941003), 云南省应用基础研究计划面上项目(2019FB009)和云南省太阳物理和空间目标监测重点实验室项目(202205AG070009)昆明市对外(国际)科技合作基地项目(GHJD-2021022)共同资助

2022-02-15 收到原稿, 2023-02-21 收到修定稿

E-mail: dongliang@ynao.ac.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

gation signal model is derived in this paper, the paper analyzes the solar radio burst interference mechanism of navigation signal, the interference effects exist three effects, namely with the solar radio burst flux, receiver performance, and the Angle of the Sun-navigation antenna height, synthesize the proposed the influence of solar radio burst interfere with communication navigation equation. It is concluded that the total integrated power of the solar burst flow in the navigation communication frequency band is positively correlated with the decrease of the signal to noise ratio of the communication signal, and is affected by the modulation of the height Angle of the sun-antenna and the effective area of the antenna, and has a convolution relationship with the response function of the loop filter of the navigation receiver. Then, this paper further analyzed the GPS lock-out signal during the solar radio bursts on 28 October 2003, 6 December 2006 and 4 November 2015. It is found that the loss-rate of different receivers at the same site is different in the same event (receiver performances effect). The loss-of-lock rate of the same receiver at different latitudes in the same event is different (Sun-antenna height Angle effect). In addition, under the condition of non-uniform spectrum of L-band (1~2 GHz) solar radio bursts in the same event (solar radio burst flow distribution effect), the decrease of signal to noise ratio of L1 and L2 band communication signals is also different. Therefore, the analytical correctness of the above influence equation is verified by the observation characterization of the above three events.

Key words Solar radio bursts, Navigation communication, Simplify frequency interference, Influence mechanism, Observation representation

0 引言

太阳射电爆发(Solar Radio Burst, SRB)在厘米波、分米波频段产生强辐射信号,以光速传递到地球的整个向阳面,在向阳面的天线接收到太阳射电爆发信号后,会造成同频工作的无线电通信系统接收机输入功率增加,降低信噪比,严重时可能会导致这类接收机饱和。

20 世纪 40 年代,英国的雷达就收到了来自太阳的强微波干扰,这是人类首次受到太阳射电爆发影响^[1]。随着无线通信广泛地进入人类生活,太阳射电爆发对无线电通信的影响这类事件越来越多地被先进的无线终端观察到。Lanzerotti 等^[2]发现在 2001 年 4 月 6 日的一次太阳射电爆发期间,向阳面手机基站的通话失败数量较之背日面有大幅增加,且在时间上与太阳射电爆发持续时间呈很强的正相关性。但是手机通信一般对实时性要求不是非常高,用户体验感影响不大。但是对于雷达、导航等一系列对实时性要求较高无线系统,这样的影响无疑是相当危险的。

随着 GPS、北斗(BDS)、GALILEO、GLONASS 等一系列导航系统的出现,其广泛应用于定位、授

时、空间探测等一系列领域,人们对导航信号的依赖日益严重,且该系统对实时性要求较高,即使短时的影响也会造成极大的损失。太阳射电爆发作为一种潜在的影响,可能会造成导航接收机的输入噪声水平短时升高,进而影响导航信息的锁定和位置等的解算。例如 2003 年 10 月 28 日^[3],2006 年 12 月 5 日、6 日、13 日^[4-7],2015 年 11 月 4 日^[8,9],2017 年 9 月 6 日^[10,11]的太阳射电爆发事件中,均发现了 GPS 和北斗导航系统受到强太阳射电爆发信号影响的情况。以往的研究多集中于现象观测和事件分析,例如上述多篇论文主要是从爆发事件当时的信噪比情况、定位精度、可见星数量、环路失锁情况等观测数据进行分析。

在影响阈值计算方面,中国科学院云南天文台与国家卫星气象中心做了一定的前期计算分析工作,Dong 等^[12,13]通过计算得到太阳射电爆发干扰导航通信的影响阈值在 1000~2600 sfu(太阳射电流量单位, $1 \text{ sfu} = 10^{-22} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$),且与通信信号波长的平方呈倒数关系。

同时 Yue 等^[6]通过对 2006 年 12 月 6 日事件中 GPS 失锁时间点和国际太阳射电联测网(RSTN, Ra-

dio Solar Telescope Network) 中在 L 波段唯一监测频点 1415 MHz 的数据, 发现在该频点上太阳射电流量超过 1807 sfu 时 GPS 信号开始失锁, 为此, 将该频点的 1807 sfu 作为阈值。Yang 等^[11]通过对 IGS(International GPS Service)网的数据分析发现, 在 L2 频点 (1227.60 MHz) 流量超过 800 sfu 的太阳射电爆发事件即可从监测数据中被发现。

一方面, L 波段内 1000 sfu 以上的太阳射电爆发是一种比较频繁的事件。Huang 等^[14]统计了 1997—2016 年的太阳射电爆发时间一共有 2384 次 L 波段的太阳射电爆发事件, Nita 等^[15]统计了 40 年在 OVSA(Owens Valley Solar Array) 1.4 GHz 上的观测数据, 得到在太阳活动峰年流量大于 100 sfu 的事件日发生次数概率为大约平均每天 1 次。太阳射电爆发这类空间天气事件将对导航通信造成严重的影响。另一方面, GNSS 作为一个通信系统如果仅仅从太阳射电观测和定位功能等表征方面的数据分析, 还不足以从根本上阐明此类空间天气事件的影响机理, 进而有效准确预测事件带来的影响程度。

Dong 等^[13]从香农公式中信道容量方面对干扰事件的影响表征做了初步分析, 得到信道容量下降与太阳射电爆发流量之间的关系。他们认为, 如果是近距离通信, 且信号功率较强, 信噪比也较高, 则太阳爆发噪声影响较小, 且如果通信系统是在楼宇等建筑物内, 或是没有太阳照射的地方, 其实是没有任何影响的; 如果信号功率较弱, 且接收机天线处信号的信噪比较低, 受到太阳射电爆发影响会更强。对于远距离的一些通信系统, 例如卫星通信, 影响较大; 通信频率越高且原始的系统噪声 N_0 值越大, 在同样 N_s 的情况下信道受到的影响也越小。因此, 一些采用低噪声接收机的通信系统比普通的接收机系统更容易受到影响。

本文拟从通信系统接收机信号处理过程和引入太阳噪声角度分析该类事件的机理, 以求定量描述太阳射电观测数据到技术影响之间的关系, 从而更加精准地分析和预测太阳射电爆发这类空间天气事件对接收机信号造成的影响。

1 从 GNSS 接收机信号处理角度的机理分析

GNSS 接收机系统的信号捕获、载波跟踪和数据

解调的性能均取决于接收机中每一个相关性输出的信号与干扰和噪声比 (Signal to Interference plus Noise Ratio, SNIR)^[16,17]。

假设总的干扰可以建模为统计平稳过程, 且干扰或有用信号的频谱可以近似为某一带宽上的一条直线, 相关器的输出 SNIR 为^[17]

$$\rho_c(\tau, \theta) = \frac{\frac{2TC_s}{N_0} \left\{ R \left[e^{j\theta} \int_{-\infty}^{+\infty} S_s(f) H_\tau(f) e^{j2\pi f\tau} df \right] \right\}^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} |H_R(f)|^2 S_s(f) df + \frac{C_1}{N_0} \int_{-\infty}^{+\infty} |H_R(f)|^2 S_I(f) S_s(f) df} \quad (1)$$

式中, τ 为本地产生的复制码相对于所接收到信号真实的 TOA 时延, θ 为复制载波信号相对于所接收到信号相位的载波相位, T 为相关器的积分时间, C_s 为接收到的有用信号功率 (单位 W), N_0 为白噪声的功率谱密度 (单位 $W \cdot Hz^{-1}$), $R\{\cdot\}$ 表示括号内函数的实部, $S_s(f)$ 为归一化为无穷带宽上的单位频段内信号的功率谱密度, $H_\tau(f)$ 为卫星信号发射机的传输函数, $H_R(f)$ 为接收机滤波器的传输函数, C_1 为接收机收到的干扰信号功率 (单位 W); $S_I(f)$ 为归一化为无穷带宽上的单位频段内的干扰信号功率谱密度, 对应于太阳射电爆发带来的干扰, 该数值对应于精密流量望远镜测得的太阳爆发流量密度 flux 乘以此时的天线有效面积 A_e 以及通信频段带宽 B_{W_0} 。

在卫星通信中, 采用载波功率与噪声功率密度之比 (载噪比) 来表征所接收的 GNSS 信号质量。在无干扰的情况下, 为相关器最优输出状态, 此时系统噪声为高斯白噪声; 在无干扰时, 式(1)可以写为

$$\rho_c(\tau, \theta) = \frac{\frac{2TC_s}{N_0} \left\{ R \left[e^{j\theta} \int_{-\infty}^{+\infty} S_s(f) H_T(f) e^{j2\pi f\tau} df \right] \right\}^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} |H_R(f)|^2 S_s(f) df} \quad (2)$$

为此, 在无干扰的情况下, 最佳载噪比输出为

$$C_s/N_0 = \frac{\max_{\tau, \theta} [\rho_c(\tau, \theta)] \int_{-\infty}^{+\infty} |H_R(f)|^2 S_s(f) df}{2T \left\{ R \left[e^{j\theta} \int_{-\infty}^{+\infty} S_s(f) H_T(f) e^{j2\pi f\tau} df \right] \right\}^2} \quad (3)$$

式中, $(\hat{\tau}, \hat{\theta}) = \arg \max_{\tau, \theta} [\rho_c(\tau, \theta)]$ 是使输出 $\rho_c(\tau, \theta)$ 保持最大的值。当存在干扰和白噪声时的等效载噪比为

$$(C_s/N_0)_{\text{eff}} = (C_s/N_0) \cdot \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} |H_R(f)|^2 S_s(f) df}{\int_{-\infty}^{+\infty} |H_R(f)|^2 S_s(f) df + \frac{C_1}{N_0} \int_{-\infty}^{+\infty} |H_R(f)|^2 S_i(f) S_s(f) df} = \frac{1}{\frac{1}{(C_s/N_0)} + \frac{C_1/C_s}{\int_{-\infty}^{+\infty} |H_R(f)|^2 S_s(f) df}} \cdot \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} |H_R(f)|^2 S_i(f) S_s(f) df}{\int_{-\infty}^{+\infty} |H_R(f)|^2 S_s(f) df} \quad (4)$$

令 Q 为系统的抗干扰品质因素, 其与接收机内部滤波器性能及码元速率有关, 即

$$Q = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} |H_R(f)|^2 S_s(f) df}{R_c \int_{-\infty}^{+\infty} |H_R(f)|^2 S_i(f) S_s(f) df} \quad (5)$$

式中, R_c 为码元发生器的扩频码速率, 以每秒码片数来确定, 则上式可化简为

$$(C_s/N_0)_{\text{eff}} = \frac{1}{\frac{1}{(C_s/N_0)} + \frac{C_1/C_s}{QR_c}} \quad (6)$$

式中, C_s/N_0 为接收机内所接收信号在无干扰情况下的信噪比; C_1/C_s 为接收机内干扰与接收信号功率之比。将式(6)转化为 $\text{dB} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 为单位, 有

$$(C_s/N_0)_{\text{eff,dB}} = 10 \lg \left(\frac{1}{\frac{1}{C_s/N_0} + \frac{C_1/C_s}{QR_c}} \right) = -10 \lg \left[10^{-\frac{(C_s/N_0)_{\text{dB}}}{10}} + \frac{10^{\frac{(C_1/C_s)_{\text{dB}}}{10}}}{QR_c} \right] \quad (7)$$

式中,

$$(C_s/N_0)_{\text{dB}} = 10 \lg(C_s/N_0) (\text{dB} \cdot \text{Hz}^{-1}),$$

$$(C_1/N_s)_{\text{dB}} = 10 \lg(C_1/N_s) (\text{dB}).$$

对于太阳射电爆发引入的干扰信号功率为 P_{SRB} , 其频谱特征为宽带, 且与导航通信频段部分或全部重

合, 引入功率为整个导航通信频段内的太阳射电流量 F_s 的积分, 有

$$P_{\text{SRB}} = C_1 = A_e \int_B F_s df. \quad (8)$$

式中, A_e 为天线有效面积, B 为整个太阳爆发信号的带宽和信道带宽两者之间取小者, F_s 为太阳爆发时候的功率谱密度, 该数值是由下式决定^[18]:

$$F_s = [8\pi kT / (G\lambda^2)] \times 10^{22}. \quad (9)$$

式中, k 为玻尔兹曼常数, T 为该次太阳爆发在通信频段的亮温度, G 为天线增益, λ 为通信信号工作波长。

将式(8)和(9)代入式(7), 可以得到如下太阳射电流量在载噪比下降中的影响公式

$$(C_s/N_0)_{\text{eff,dB}} = 10 \lg \left(\frac{1}{\frac{1}{C_s/N_0} + \frac{C_1/C_s}{QR_c}} \right) = -10 \lg \left[10^{-\frac{(C_s/N_0)_{\text{dB}}}{10}} + \frac{10 \lg \left(\frac{A_e}{C_s} \int_B \frac{8\pi kT}{G\lambda^2} \times 10^{22} df \right)_{\text{dB}}}{QR_c} \right] \quad (10)$$

进一步分析, 假设式(10)对数真数求和中第一项即卫星发射的有用功率载噪比为一个不受环境影响时的常数, 太阳射电爆发的影响来自于式(10)对数真数求和式中的第二项, 为此将式(10)进一步提取出太阳射电爆发 SRB 造成的载噪比下降, 记为 $\Delta(C_s/N_0)_{\text{dB-SRB}}$, 有

$$\Delta(C_s/N_0)_{\text{dB-SRB}} = -10 \lg \left[\frac{10 \lg \left(\frac{A_e}{C_s} \int_B \frac{8\pi kT}{G\lambda^2} \times 10^{22} df \right)_{\text{dB}}}{QR_c} \right] = -10 \lg \left[10^{\frac{10 \lg \left(\frac{A_e}{C_s} \int_B \frac{8\pi kT}{G\lambda^2} \times 10^{22} df \right)_{\text{dB}}}{10}} \right] + 10 \lg(QR_c) = -10 \lg \left(\frac{A_e}{C_s} \int_B \frac{8\pi kT}{G\lambda^2} \times 10^{22} df \right) + 10 \lg(QR_c) = 10 \lg(QR_c C_s) - 10 \lg \left(A_e \int_B \frac{8\pi kT}{G\lambda^2} \times 10^{22} df \right). \quad (11)$$

式(11)可以改写为

$$\Delta(C_s/N_0)_{\text{dB-SRB}} = 10 \lg(QR_c) - 10 \lg \left(\frac{A_e \int_B \frac{8\pi kT}{G\lambda^2} \times 10^{22} df}{C_s} \right). \quad (12)$$

式(12)的等号右边第一项为地面接收机的固有参数,等号右边第二项为太阳射电爆发引入的功率和固有的通信信号功率(即有用信号功率)之比。可以看出,在接收机一定的情况下,即系统的抗干扰品质因素 Q 和码元速率 R_c 一定的情况下,载噪比的下降取决于太阳爆发功率带内总功率与接收到有用信号功率 C_s 之比。因此,从式(10)~(12)能够得出以下结论。

(1)如果是近距离通信且信号功率 C_s 较强,则太阳爆发噪声影响较小;反之,如果是远距离通信,信号功率 C_s 较弱,则太阳爆发噪声影响更强。

(2)通信频率越高 N_0 值越大,在同样 N_s 的情况下信道受到的影响较之于较低频率更小。

(3)必然存在不同接收机之间的差异,即不同抗干扰品质因素 Q 与码元速率 R_c 的不同,会导致不同的信噪比下降,必然存在不同的接收机差异。

(4)在实际信号传输过程中,在链路动态范围、编译码冗余、功率调整方面都会做一定的调整,为此实际中产生影响的太阳射电流量将大于推论,但理论计算值可以作为警戒阈值。

为此,可以做一个模拟太阳射电爆发影响分析,假设一次太阳射电爆发在整个导航频段内为一个流量密度为 1000 sfu 的爆发(当然实际爆发情况会复杂得多),且均充满了整个 GPS 通信带宽。GPS 各种码型的扩频码速率 R_c 值和通信带宽 B ,以及在接收天线有效面积 A_e 为 0.005 m^2 ($G \approx 0 \text{ dB}$)条件下,由式(12)的太阳射电爆发引入的噪声和有效载噪比下降计算结果列于表 1。

2 太阳-天线相对角度对导航信号载噪比的影响

根据不同时间太阳高度角的不同,太阳射电信号到 GNSS 天线的入射角是不同的。为此,同一次事件中不同地点的接收机所受影响也不同,在此进行量化分析。

假设导航信号到天线口面的载波信号流量为 S ,在无射电爆发时接收到的噪声(包括接收机、天线噪

声以及来自宇宙的噪声)为 P_N ,天线在空间方向图函数为 $G(\zeta)$, ζ 为不同的俯仰高度角,具体接收天线方向如图 1 所示。

当导航卫星处在任意俯仰角 ε 时(无射电爆发),载噪比为

$$(C/N_0)^0(\varepsilon) = \frac{S}{P_N} \left[\frac{G(90-\varepsilon)}{G(0)} \right]. \quad (13)$$

当太阳射电爆发信号从高度角 θ 方向入射到天线时,太阳爆发信号功率为 P_{SRB} ,有

$$(C/N_0)(\varepsilon) = \frac{S}{[P_N + P_{\text{SRB}}G(\theta)/G(0)]} \frac{G(90-\varepsilon)}{G(0)}. \quad (14)$$

联立式(13)和式(14)解得到

$$P_{\text{SRB}} = P_N \frac{G(0)}{G(\theta)} \left[\frac{(C/N_0)^0(\varepsilon)}{(C/N_0)(\varepsilon)} - 1 \right]. \quad (15)$$

从式(13)可以看出,不同的天线俯仰高度与太阳高度的夹角将影响 L 波段太阳射电对导航信号,为此只需要研究具有一种固定天线的北斗系统在活动中的表现,就可以通过取代天线方向图因子 $G(\theta)$,实现对不同北斗地面站的预警值计算。

表 1 在太阳射电爆发流量为 1000 sfu 条件下的不同码元速率载噪比损失

Table 1 Noise ratio loss for different symbol rates when SRB flux reaches 1000 sfu

	C/A码	P(Y)码	M码
R_c/MHz	1.023	10.23	5.115
通信带宽BW/MHz	2.046	20.46	10.23
$P_{\text{SRB}}/\text{dBW}$	-150	-140	-143
用户最低可解调接收功率/dBw	-158.5	-161.5	-164.5
最大影响载噪比/dB	8.5	21.5	21.5

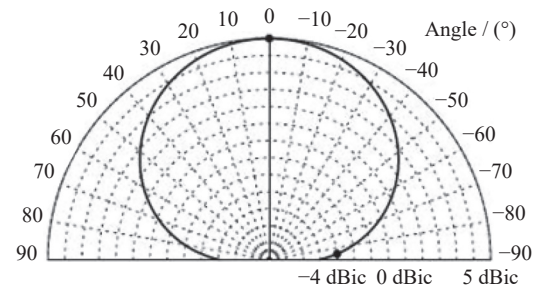


图 1 典型的 GNSS 接收天线方向

Fig. 1 Typical receiving antenna direction of GNSS system

将式(15)代入式(12)得到太阳射电流量-导航信号信噪比下降的影响公式如下:

$$\Delta(C_s/N_0)_{\text{dB-SRB}} = 10\lg(QR_c) - 10\lg \left[\frac{A_e \frac{g(90-\varepsilon)}{g(0)} \int_B \frac{8\pi kT}{G\lambda^2} \times 10^{22} df}{C_s} \right] \quad (16)$$

通过式(16)可以得出,太阳射电爆发引起的导航信噪比下降与两个因素有关。一是爆发信号带宽在整个通信信道内的占用带宽比例以及爆发流量,即在导航通信频段内的太阳射电爆发流量情况;二是太阳-天线主瓣高度角以及天线的有效面积或者增益,即GNSS地面站天线性能以及事件发生当时的太阳高度角与天线主瓣之间的夹角关系。

下面就表1中的参数 A_e 为 0.005 m^2 ($G \approx 0 \text{ dB}$) 进行不同的修改,假设 A_e 为 0.005 m^2 为最大值,在不同角度下根据天线有效面积与增益之间的关系,有

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_e \quad (17)$$

根据式(16)太阳射电爆发流量仍按 1000 sfu 计算,设置不同的 A_e 值。在不同 A_e 条件下的载噪比影响见表2。

3 事件分析

下面通过以往事件中的实际表征可以证实上述所提出的重要结论。

事件1 2003年10月28日事件中不同接收机失锁情况,进而分析验证式(12)中关于太阳射电爆发

表2 不同天线面积条件下流量为 1000 sfu 的太阳射电爆发引起的载噪比影响

Table 2 With the different effective area the SRB flux reaches 1000 sfu causing influences results

A_e/m^2	0.005	0.001	0.0005	0.0001
$P_{\text{SRB}}/\text{dBW}$	-150	-157	-160	-167
C/A码/dB最低所需可解调接收功率条件下的载噪比影响	8.5	1.5	0	0
P(Y)码/dB最低所需可解调接收功率条件下的载噪比影响	21.5	4.5	1.5	0
M码/dB最低所需可解调接收功率条件下的载噪比影响	21.5	7.5	4.5	0

对不同结构接收机的影响不同的结论。

2003年10月28日事件是有文献记载到太阳射电爆发干扰GPS正常运行最早的事件之一。在该事件中,全球定位系统于11:02 UTC-12:00 UTC信号出现不同情况的失锁。其中,在射电爆发流量最强的11:05 UTC,考察的接收机所有伪随机码失锁。Chen等^[3]提到了GPS接收机和天线是一个对抗SRB干扰的重要因素。

文献^[3]将此次事件分为两个太阳射电爆发阶段:最强阶段和次强阶段,考察在白天所有IGS站不同接收机的失锁率情况^[3],如表3所示。

表3中,锁定率 $P_{i \times j}$ 定义为在某个地理区域内的所有的接收机和失锁的接收机数量之比,公式为

$$P_{ij} = \frac{\sum_{i=-180^\circ}^{180^\circ} \sum_{j=-90^\circ}^{90^\circ} (N_{\text{PLL}})_{ij}}{\sum_{i=-180^\circ}^{180^\circ} \sum_{j=-90^\circ}^{90^\circ} (N_{\text{ALL}})_{ij}} \times 100\% \quad (18)$$

其中, i 为 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 的某个纬度区域, j 为 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 的某个经度区域。 $(N_{\text{PLL}})_{ij}$ 为上述区域内影响事件中失锁的导航接收机总数, $(N_{\text{ALL}})_{ij}$ 为上述区域内所有的导航接收机总数。

事件2 2003年10月28日事件中不同位置IGS站失锁情况分析,进而分析验证式(16)中关于不同太阳-天线相对角度参数对太阳射电爆发干扰导航通信质量影响的结论。

图2给出了2003年10月28日事件中4个不同位置IGS地面站的失锁率随时间的变化情况^[3]。根据时间可以推断当时太阳的直射点已经越过赤道,且向南回归线方向移动,选择IGS的TRIMBLE 4000 SSI接收机的L2频点数据质量进行比较分析,如表4所示。

该次事件的表征说明,该类空间天气事件的影响程度与太阳-天线主瓣的夹角有关,在同一次事件中,夹角越小,影响越大。

事件3 2015年11月4日事件中L1和L2点失锁率差异情况分析,表明宽带太阳射电爆发中不同频点流量不同对多个导航频点影响不同,表象也不同。

2015年11月4日的太阳射电爆发干扰导航通信事件中,根据欧洲GNSS监测网提供的数据*,在

*http://gnss.be/Atmospheric_Maps/srb_event.php?date=2015-11-04

表 3 2003 年 10 月 28 日事件中接收机锁定率与接收机种类之间的关系
Table 3 Relationship between the phased lock loop and different receiver types during the event occurred on 28 October 2003

接收机型号	考察的接收机数目	最强阶段锁定率	次强阶段锁定率
ASHTECH Z-XII3	43	11.62	2.33
ASHTECH UZ-12	12	8.33	0.00
ASHTECH Z18	11	27.27	18.18
TRIMBLE 4000 SSI	38	78.95	63.16
TRIMBLE 4700	9	22.22	22.22
TRIMBLE 4000 SSE	6	16.67	16.67
AOA SNR-8000 ACT	14	7.14	7.14
AOA BENCHMARK ACT	8	0.00	0.00
AOA ROGUE SNR-8000	8	75.00	75.00
JPS LEGACY	7	14.29	14.29

注 最强阶段时间11:02—11:12 UTC, 次强阶段时间11:42—12:00 UTC。

表 4 2003 年 10 月 28 日事件中几个台站位置分布和失锁率情况
Table 4 Loss of lock present and the positions of several stations during the event occurred on 28 October 2003

台站名称	地理位置(经纬度)	当时太阳高度角	L2频点失锁率情况
IGS-NKLG	2.1°N, 9.4°E	74°50′	100% 影响最强
IGS-BRAZ	47.9°S, 15.9°W	49°28′	50%, 持续时间较长
IGS-ALAC	38.2°N, 0.3°W	37°59′	50%
IGS-SIMO	18.4°N, 34.2°W	36°30′	50%

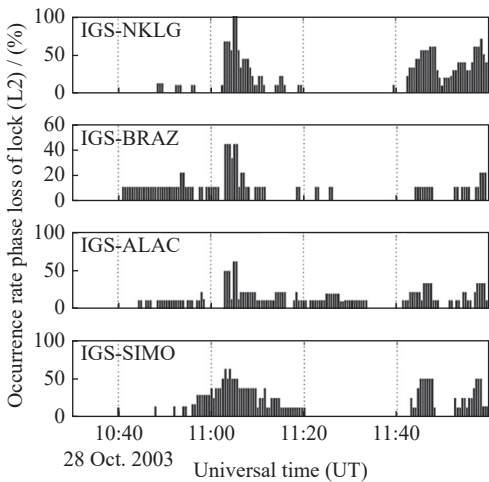


图 2 2003 年 10 月 28 日事件中 4 个 IGS 台站失锁率随时间的变化情况

Fig. 2 During 28 October 2003 events, the variation of loss-lock rate of four IGS stations over time

13:30—15:30 UTC 时间段中, L1 点 (1575.42 MHz) 和 L2 点 (1227.6 MHz) 的载噪比损失情况如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 全球太阳射电望远镜没有在 L1 和 L2 两个频点上观测到太阳流量射电在这次爆发的变化情况, 但是从 GNSS 导航系统的失锁情况, 则能够推断出该次事件中太阳爆发流量情况。这次事件说明在 L2 点 (1227.6 MHz) 频率上, 太阳射电爆发流量超过了该频点的阈值, 而在 L1 点当时的太阳射电爆发流量没有超过阈值。

但进一步可以推断太阳射电爆发的谱型也会给该类空间天气事件带来一些较为复杂的表征。太阳射电爆发一般都不是单一机制, 而是多种机制的联合效应。因此, 在爆发持续时间、辐射强度、频谱特征、偏振等方面都呈现出多样性, 如图 4 所示。

从不同的谱型来看, 在 L 波段的太阳射电爆发对

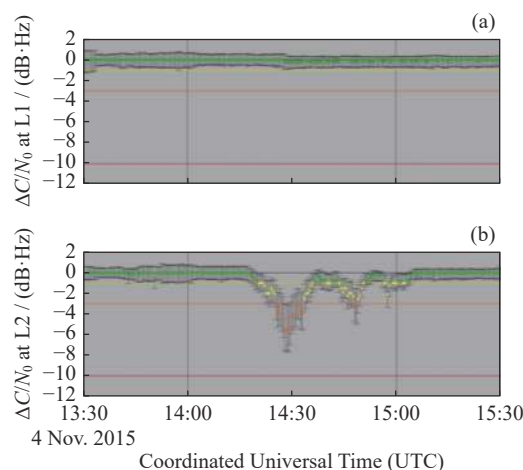


图3 2015年11月4日事件中两个GPS工作频点的载噪比损失情况

Fig. 3 Loss of signal to noise ratio of two GPS working frequency bands in the event occurred on 4 November 2015

导航信号的影响可能呈现多种表现,例如,短时周跳失锁(对应 pulsations 情况)、部分通信频点失锁(对应不均匀爆发,例如 narrow band spikes 等情况)。

4 结语

太阳射电爆发干扰无线电通信这类事件具有快速、预警时间短、作用范围广且与太阳射电爆发流量变化呈较好的正相关性等特点。与空间天气事件中的电离层扰动引起的导航精度下降不同,经本文分析,可以通过证认L波段太阳射电爆的变化和导航接收机的在射电爆期间的数据表征来有效甄别该类事件。

目前,已经在中国廊坊建立了工作于导航频段——L波段的太阳射电望远镜。通过其对太阳射电流量的进行实时监测,同时记录GPS和北斗导航

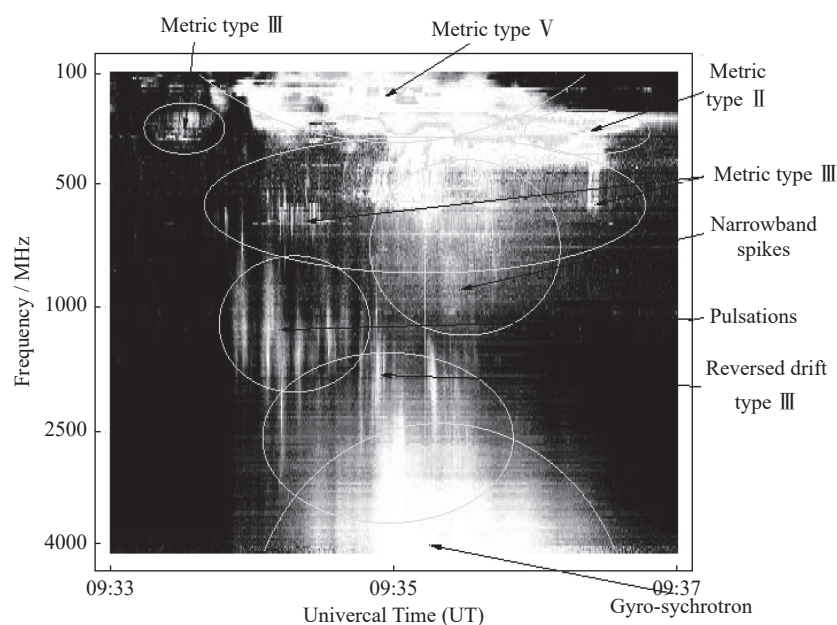


图4 宽带太阳射电爆发显示出的多种频谱形式

Fig. 4 Different spectrum types emitted from wideband solar radio bursts

性能参数。在该望远镜监测到L波段太阳射电流量达到阈值之前发出预警信息,在流量超过阈值后通过流量与导航失锁数据比对,分析总结该次太阳射电爆发带来的影响。

参考文献

- [1] HEY J S. Solar radiations in the 4~6 meter radio wavelength band[J]. *Nature*, 1946, **157**(3976): 47-48
- [2] LANZEROTTI L J, GARY D E, THOMSON D J, *et al.* Solar radio burst event (6 April 2001) and noise in wireless communications systems[J]. *Bell Labs Technical Journal*, 2002, **7**(1): 159-163
- [3] CHEN Z Y, GAO Y, LIU Z Z. Evaluation of solar radio bursts' effect on GPS receiver signal tracking within International GPS Service network[J]. *Radio Science*, 2005, **40**(3): RS3012

- [4] KINTNER JR P M, O'HANLON B, GARY D E, *et al.* Global Positioning System and solar radio burst forensics[J]. *Radio Science*, 2009, **44**(1): RS0A08
- [5] CARRANO C S, BRIDGWOOD C T, GROVES K M. Impacts of the December 2006 solar radio bursts on the performance of GPS[J]. *Radio Science*, 2009, **44**(1): RS0A25
- [6] YUE X, SCHREINER W S, KUO Y H, *et al.* The effect of solar radio bursts on the GNSS radio occultation signals[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(9): 5906-5918
- [7] HUANG Wengeng, ERCHA A, LIU Siqing, *et al.* Effect of the 13 December 2006 solar radio burst on GPS observations[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2015, **35**(6): 679-686 (黄文耿, 阿尔察, 刘四清, 等. 2006年12月13日太阳射电暴对GPS观测的影响[J]. *空间科学学报*, 2015, **35**(6): 679-686)
- [8] MARQUÉ C, KLEIN K L, MONSTEIN C, *et al.* Solar radio emission as a disturbance of aeronautical radionavigation[J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2018, **8**: A42
- [9] DONG Liang, YAN Xiaojuan, HUANG Wengeng, *et al.* X-ray aura analysis of the solar radio burst interfering with navigation signal events on November 4, 2015[J]. *Astronomical Research & Technology*, 2021, **18**(3): 294-300 (董亮, 闫小娟, 黄文耿, 等. 2015年11月4日太阳射电爆发干扰导航信号事件中的X射线先兆分析[J]. *天文研究与技术*, 2021, **18**(3): 294-300)
- [10] SATO H, JAKOWSKI N, BERDERMANN J, *et al.* Solar radio burst events on 6 September 2017 and its impact on GNSS signal frequencies[J]. *Space Weather*, 2019, **17**(6): 816-826
- [11] YANG F, ZHU X F, CHEN X Y, *et al.* Intense L-band solar radio bursts detection based on GNSS carrier-to-noise ratio decrease over multi-satellite and multi-station[J]. *Sensors*, 2021, **21**(4): 1405
- [12] DONG Liang. The Assessment and Pre-alarm Methods Research for the Solar Radio Burst Events Interfering the Communication Systems[D]. Kunming: Yunnan University, 2016 (董亮. 太阳射电爆发干扰通信系统评估与预警方案的研究[D]. 昆明: 云南大学, 2016)
- [13] DONG Liang, YAN Xiaojuan, HUANG Wengeng, *et al.* Analysis of the influence of solar radio bursts on radio signals in different bands[C]//Proceedings of the 35th National Meteorological Annual Meeting. Hefei: Chinese Meteorological Society, 2018: 12 (董亮, 闫小娟, 黄文耿, 等. 太阳射电爆发对不同波段无线电信号影响分析[C]//第35届中国气象学会年会 S18 空间天气观测与业务的融合. 合肥: 中国气象学会, 2018: 12)
- [14] HUANG W G, AA E, SHEN H, *et al.* Statistical study of GNSS L-band solar radio bursts[J]. *GPS Solutions*, 2018, **22**(4): 114
- [15] NITA G M, GARY D E, LANZEROTTI L J, *et al.* The peak flux distribution of solar radio bursts[J]. *The Astrophysical Journal*, 2002, **570**(1): 423-438
- [16] Z. G Cao, Y. S Qian. Principles of Modern Communication[M]. Beijing, Tsinghua University Press, 1992 (曹志刚, 钱亚生. 现代通信原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992)
- [17] KAPLAN E D, HEGARTY C J. Understanding GPS Principles and Applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012 (KAPLAN E D, HEGARTY C J. GPS原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012)
- [18] KUMMER W H, GILLESPIE E S. Antenna measurements—1978[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1978, **66**(4): 483-507