

引文格式:吴春俊,孙越强,王先毅,等.风云三号D卫星GPS信号功率调整及干扰分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(5):687-693.DOI:10.13203/j.whugis20200569



Citation: WU Chunjun, SUN Yueqiang, WANG Xianyi, et al. Adjustment of GPS Flex Power and Its Interference Analysis Based on FY-3D Satellite[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(5): 687-693. DOI: 10.13203/j.whugis20200569

风云三号D卫星GPS信号功率 调整及干扰分析

吴春俊^{1,2,3,4,5}

孙越强^{1,2,3,4,5}

王先毅^{1,3,4,5}

白伟华^{1,2,3,4,5}

孟祥广^{1,3,4,5}

杜起飞^{1,3,4,5}

王冬伟^{1,2,3,4,5}

李福^{1,2,3,4,5}

1 中国科学院国家空间科学中心,北京,100190

2 中国科学院大学,北京,100190

3 天基空间环境探测北京市重点实验室,北京,100190

4 中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室,北京,100190

5 掩星探测与大气气候应用国际联合实验室,北京,100190

摘要:全球定位系统(global positioning system, GPS)卫星的IIR和IIF卫星能够在各个信号分量之间重新分配其发送信号的功率,一个或多个GPS信号可以在指定区域根据需要进行功率调整或者关闭。分析GPS信号的变化特征对于地面和空间应用有重要的意义。风云三号D(FengYun-3D, FY-3D)卫星是中国极轨气象卫星之一,利用FY-3D卫星实际测量数据可以帮助GPS用户全面了解GPS功率调整的特点。首先,利用FY-3D运行轨道全球覆盖的特点分析GPS信号的强度,特别是GPS信号功率调整时间段信号变化的特点;然后,使用在轨数据研究了全球范围L波段信号干扰的特征,得到了干扰对全球导航卫星系统掩星探测仪掩星天线的自动增益控制和基底噪声的影响。结果表明:从2020-02-14开始的GPS功率调整以[35°N, 37°E]和[35°N, 69°E]为中心,覆盖半径约为7 500 km,在该区域内GPS P(Y)码功率增加约10 dB;GPS L1和L2频段在中东地区持续受干扰的影响,该区域的基底噪声比其他区域增加约3~10倍;干扰区域中心点和GPS功率调整区域中心点大致在同一位置。GPS卫星的功率调整和信号干扰对GPS用户,特别是低轨卫星的定位有明显的影响,在GNSS接收机设计时应引起重视。

关键词:GPS信号功率调整;信号干扰;风云三号D卫星;掩星探测仪测量

中图分类号:P228;P414.4

文献标识码:A

收稿日期:2020-12-30

DOI:10.13203/j.whugis20200569

文章编号:1671-8860(2023)05-0687-07

Adjustment of GPS Flex Power and Its Interference Analysis Based on FY-3D Satellite

WU Chunjun^{1,2,3,4,5} SUN Yueqiang^{1,2,3,4,5} WANG Xianyi^{1,3,4,5} BAI Weihua^{1,2,3,4,5}

MENG Xiangguang^{1,3,4,5} DU Qifei^{1,3,4,5} WANG Dongwei^{1,2,3,4,5} LI Fu^{1,2,3,4,5}

1 National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

3 Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing 100190, China

4 Key Laboratory of Environmental Space Situation Awareness Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

5 Joint Laboratory on Occultations for Atmosphere and Climate (JLOAC), Beijing 100190, China

Abstract: Objectives: Global positioning system (GPS) block IIR and block IIF satellites have the capability to redistribute the power of their transmitted signals between individual signal components. One or more GPS signals upon designated area can be adjusted or even shut off as needed. The analysis of GPS signals is of great importance for both ground and space uses. FengYun-3D (FY-3D) satellite is one of China's

基金项目:国家自然科学基金(41505030,41606206,41775034);中国科学院空间先导专项(XDA15007501);中国科学院科研装备研制项目(YZ201129);国家重点研发计划(2017YFB0502800,2017YFB0502802)。

第一作者:吴春俊,博士,工程师,主要从事GNSS定位和遥感仪器研发。wuchunjun10@foxmail.com

polar orbiting meteorological satellites. We try to help GPS users comprehensively understand the characteristic of GPS flex power based on real measurement data of FY-3D satellite. **Methods:** The global coverage of FY-3D satellite is used to analyze the strength of GPS signals, especially the characteristics of the signal change during GPS flex power period. The characteristics of global interference of L band is also researched by using the in-orbit data. And the interference on the automatic gain control and base noise of occultation antenna of global navigation satellite system occultation sounder is reported. **Results:** The results show that the GPS flex power, which started on February 14, 2020, is centered on [35°N, 37°E] and [35°N, 69°E], and its radius is about 7 500 km. The GPS P(Y) code is increased by about 10 dB in this region. The interference of GPS L1 band and L2 band are continuously affected by interference in the Middle East. The base noise in this region is increased about 3—10 times compared with other areas. The centre point of interference and the centre point of GPS flex power is roughly in the same place. **Conclusions:** GPS flex power and interference have a significant impact on GPS users, especially on the positioning of low earth orbit satellites, which should be taken into account in the design of GNSS receivers.

Key words: global positioning system (GPS) signal flex power; signal interference; FengYun-3D satellite; occultation sounder measurement

在全球部分区域调整功率是全球定位系统(global positioning system, GPS)自IIR-M类型卫星开始新增的一个重要功能。该功能允许GPS地面段控制GPS某一个或者几个频点的信号功率在指定区域上空进行调整甚至关闭,这是GPS自2000-05取消选择可用性(selective availability, S/A)政策以后发展的新技术^[1]。从2010年开始,该功能已经多次在GPS卫星上进行测试。文献[2-3]使用地面GPS接收机接收到的数据分析了2010—2018年数次功率调整的特点及影响。GPS功率调整不仅影响了L1频点和L2频点的P(Y)码和M码,也影响了民用码L1C/A码;既造成了信号强度的变化,也对信号的频间偏差产生了影响。文献[4-5]则使用国际GNSS服务(international GNSS service, IGS)站的数据分析了2018-04及2019-06的GPS P(Y)功率增强码的特点。分析结果表明,提高P(Y)码的信号功率可有效减弱地区干扰信号的影响,明显提高其定位导航能力。但上述文献使用在地面固定位置接收到的数据进行GPS功率调整分析,无法实现全球覆盖;且位于不同位置的不同型号的接收机或者天线往往表现出不同的特点,可对比性较差,导致使用不同接收机的数据得到的结论不完全一致。

与地面GPS接收机一样,运行于低轨卫星的GPS接收机同样会受到人类活动的影响,如有意或者无意的L频段信号的干扰,该影响在使用GPS信号进行遥感探测如GNSS掩星、GNSS反射等任务中表现尤为明显^[6-8]。已有很多文章对GPS信号干扰进行了介绍^[9-12]。文献[13]使用

GPS接收机内部的自动增益控制(automatic gain control, AGC)器输出的电平来预测干扰信号。文献[14-15]对欧洲Metop卫星掩星接收机GRAS的噪底进行统计,分析了2007-10干扰信号的全球地理分布。本文使用风云三号D(FengYun-3D, FY-3D)卫星在轨数据对GPS干扰信号进行研究。

FY-3D卫星是运行于太阳同步轨道的低轨卫星,其运行轨迹具有全球覆盖的特点。星载GPS接收机天线通常朝向天顶方向,来自地面的干扰信号会被极大衰减,地面干扰信号对星载GPS接收机的影响并不明显。而GNSS掩星探测仪(GNSS occultation sounder, GNOS)掩星天线指向卫星运行的前方和后方,提供了通过掩星数据观测干扰信号的机会。GNOS具有GPS L1和L2双频信号的接收能力。使用GNOS在轨数据分析GPS功率变化和信号干扰有3个方面的优点:

- 1) 全球覆盖,克服了地面观测覆盖率不足的缺点;
- 2) 一致性良好,使用单一接收机进行观察,克服了地面观测中不同品牌、不同型号接收机性能不同导致可对比性差的缺点;
- 3) 轨道高度高,受地球大气层的干扰较小。

本文首先使用GNOS在轨数据对GPS功率变化的特点进行分析,对GPS功率变化影响的区域及特点进行研究;然后使用GNOS临边探测的掩星数据对GPS信号干扰进行分析和监测;最后对GPS功率调整和信号干扰对接收机测量精度的影响进行分析。

1 FY-3D 卫星

FY-3D 卫星是中国第二代极轨气象卫星系统的第四颗星,于 2017-11-15 发射升空。该卫星轨道高度 836 km, 轨道倾角 98.75°, 降交点地方时为 14:00^[16]。GNOS 作为 FY-3D 的载荷之一, 通过接收临边穿过地球大气层的 GNSS 信号反演地球大气的温、湿、压和电离层的电子密度等廓线信息, 具有高精度、全天候、无须标定和全球覆盖等优点^[17-18]。GNOS 由定位天线、前向掩星天线、后向掩星天线、射频单元和电子处理单元组成, 如图 1 所示。定位天线指向天顶方向, 接收 GPS 和北斗的信号用于实时定位, 并获取原始测量值用于精密定轨; 前向掩星天线位于卫星的前方, 用于接收上升掩星的信号, 包括一个电离掩星天线和一个大气掩星天线; 后向掩星天线位于卫星的后方, 用于接收下降掩星的信号, 也包括一个电离掩星天线和一个大气掩星天线; 电子处理单元用于处理定位和掩星信号。GNOS 在轨开机后各项功能均正常。

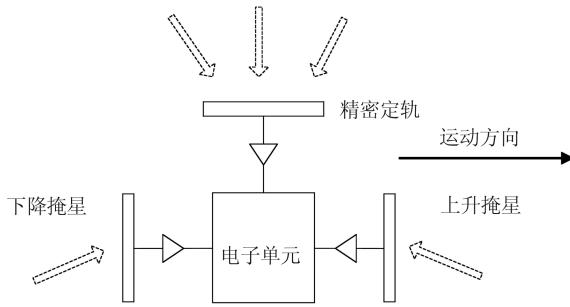


图 1 GNOS 天线位置示意图
Fig.1 Antenna Position of GNOS

2 信号跟踪

FY-3D 卫星 GNOS 设有 27 个 GPS 定位跟踪通道, 最多可以同时接收 9 颗 GPS 卫星的 L1C/A、L2C 和 L2P 信号。GNOS 跟踪的伪距和载波相位信号一方面被用于实时定位, 定位结果用来预测掩星事件; 另一方面, 原始测量数据被下传至地面, 用于获得精密轨道信息, 该信息用于掩星数据反演及其他科学应用。除了伪距和载波相位, GNOS 同时还输出载噪比、多普勒、基底噪声等信息, 原始数据采样率为 1 Hz。

以 2020-02-14 的数据为例, 图 2 和图 3 分别展示了跟踪 GPS 卫星的天空视图和跟踪卫星数统计图。由于 FY-3D 卫星运行于低地球轨道, 其运行速度约为 7.2 km/s, 轨道周期只有约

100 min, 远小于 GPS 卫星约 12 h 的运行周期, 所以相对于低轨卫星, GPS 卫星按照从前向后的趋势掠过天顶, 如图 2 所示。从图 3 可以看出, GNOS 跟踪的卫星数最少为 5 颗, 完全能够满足实时定位的要求, 在 95% 以上的时段, 参与定位的卫星数大于 6 颗。

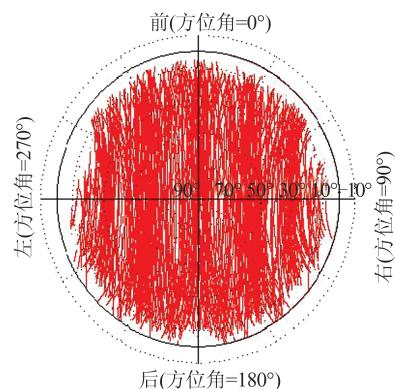


图 2 跟踪卫星天空视图
Fig.2 Sky-Plot of Tracked Satellites

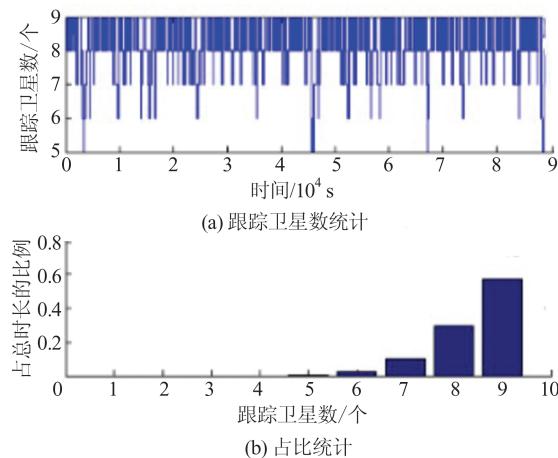


图 3 跟踪卫星数及占比统计
Fig.3 Statistics of Tracked Satellites and Their Proportions

3 GPS 功率调整

2020-02-14—2020-09-12, GPS 进行了长达 7 个月的功率调整。为研究该次功率调整, 选用 FY-3D 卫星 2020-01-01—2020-01-07 和 2020-02-14—2020-02-20 的数据对该次功率调整的特点进行对比分析。

GPS P(Y) 码载噪比在功率增强前后随仰角的变化如图 4 所示, 可以看到, L2P(Y) 码的信号强度有突然的升高或降低, 该种功率调整只发生在 GPS IIR-M 及 IIF 类型的卫星的信号中。在轨服务的 GPS 卫星有 31 颗, 这两种类型的卫星占 19 颗。由于 FY-3D 卫星运行轨迹全球覆盖, 所

以可以根据实测数据绘制此次功率调整影响的区域,如图5所示。从图5可以看出,此次功率调整影响了地球表面大部分的区域。以2020-01-01—2020-01-07期间GPS没有进行功率调整时的数据为参考,计算2020-02-14—2020-02-20期间功率增强后L2P码功率的相对变化,功率变化随GPS卫星下点地理位置的变化如图6所示。此次功率增强区域是以[35°N, 37°E]和[35°N, 69°E]为中心、半径为7500 km的两个圆形区域。功率增强后和功率增强前信号载噪比随仰角的变化如图7所示。仰角越高,载噪比越大,主要是因为仰角越高,接收机天线增益越高。从图7可以看出,功率增强后,L2P(Y)码的载噪比在不同的仰角下均比正常运行时高10 dB左右。由于GNOS采用的是半无码的跟踪技术,无法分辨出该功率变化是发生在L1P(Y)码还是L2P(Y)码的信号中^[19]。在GPS的L1C/A码和L2C码上,没有发现明显的功率变化。

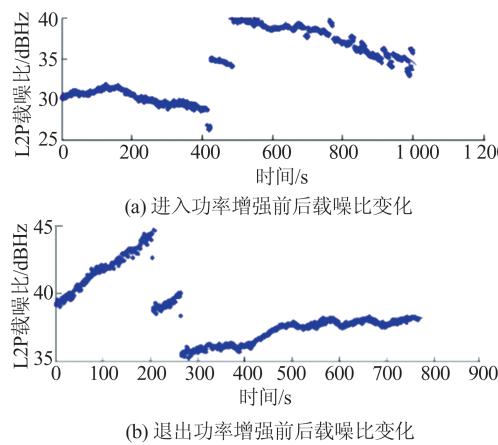


图4 GPS L2P载噪比随时间的变化

Fig.4 Change of Carrier Noise Ratio of GPS L2P with Time

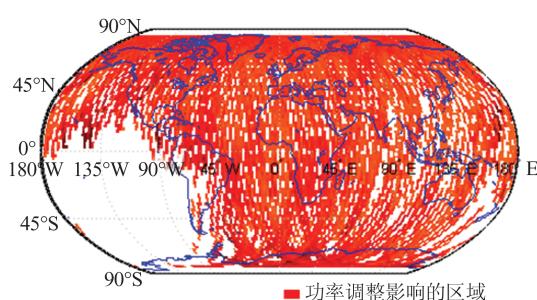


图5 GPS功率调整影响的区域

Fig.5 Regions Influenced by GPS Flex Power

4 信号干扰

FY-3D卫星GNOS在跟踪9颗GPS卫星用

于定位的同时,还设有8个掩星通道专门用于掩星探测。使用GNOS临边探测的掩星数据对GPS信号干扰进行分析和监测,使用2018-11-21—2018-11-28共8 d的在轨数据。在该时段内,GNOS测量噪底随时间的变化如图8所示。AD0~AD5分别对应定位天线、前向大气天线、后向大气天线、前向电离天线和后向电离天线的信号。从图8中可以看出,L1和L2噪底随时间都出现周期性的突然增加。对其中一个干扰信号进行放大,显示出如图9所示的特征:前向大气和前向电离信号首先受到干扰,其后,后向大气和后向电离信号受到干扰。把所有测量噪底异常增加的点绘制在世界地图上,如图10所示,结合前后掩星天线的指向性,可以看出,干扰信号最强的点位于中东地区上空,并且该干扰信号持续存在。除了中东地区,在白令海峡附近的上空同样可以探测出干扰信号,该处的干扰信号与中东地区上空的不同,呈现出脉冲干扰的特点。这两处干扰信号在GPS的L1和L2频点都能观测到。

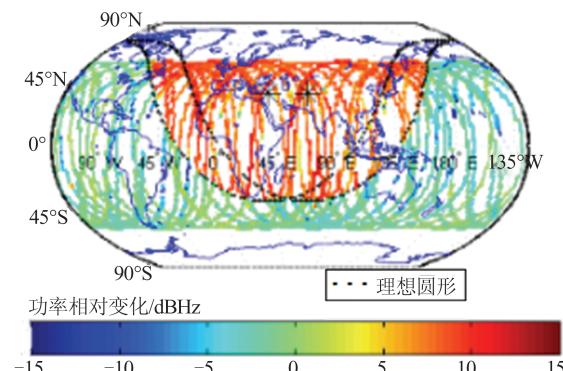


图6 GPS P(Y)码功率变化的全球分布

Fig.6 Global Distribution of GPS P(Y) Flex Power Variation

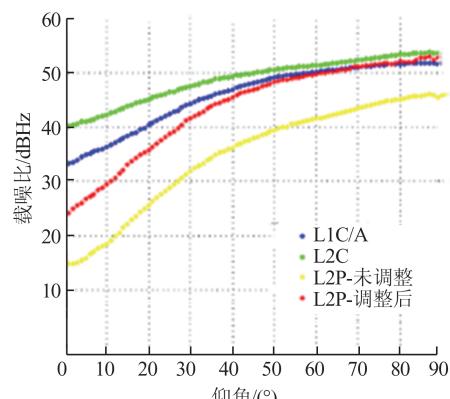


图7 载噪比随仰角的变化

Fig.7 Change of Carrier Noise Ratio with Elevation

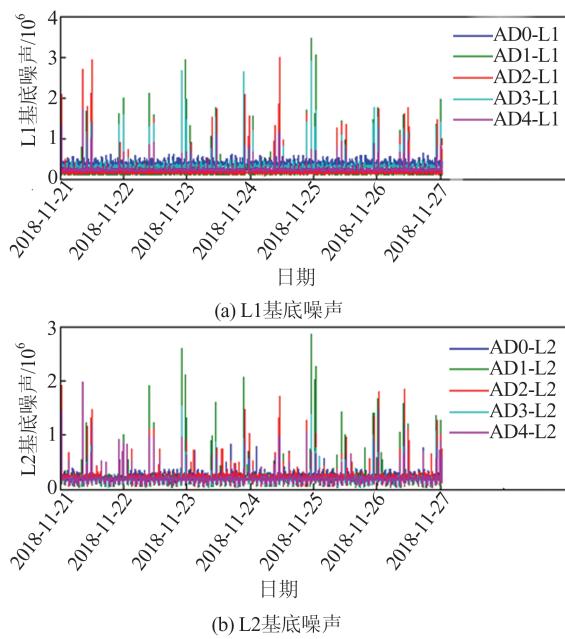


图 8 GNOS 噪底随时间的变化

Fig.8 Change of Base Noise of GNOS with Time

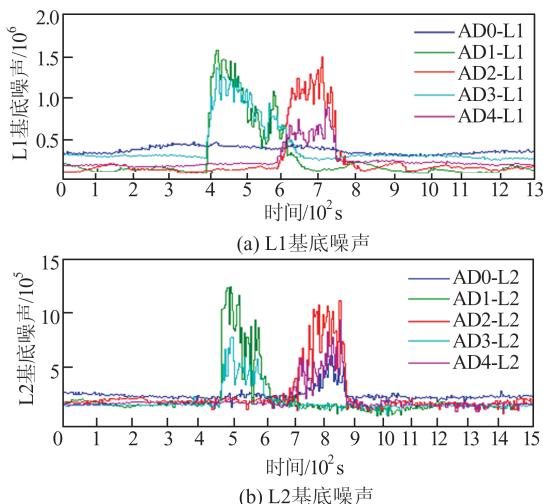


图 9 噪底随时间变化的放大图

Fig.9 Enlarged View of Change of Base Noise with Time

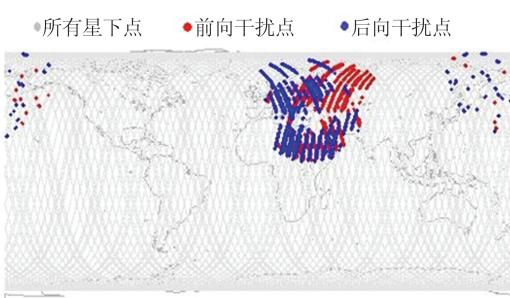


图 10 全球干扰信号的分布

Fig.10 Distribution of Global Interference

干扰信号除了影响测量噪底,对GNOS射频前端的AGC也会有一定影响。AGC的作用是使输出的信号功率保持稳定,AGC电压的大小对应

增益的大小,AGC电压越小,输入信号的功率越大。由于GPS接收机接收到的信号功率远远低于环境热噪声,所以相应的输入功率增加说明接收到了干扰信号^[20-21]。前向大气掩星天线的AGC电压和噪底的全球分布见图11。可以看出,L1频点AGC电压的变化特征和测量噪底的变化高度一致,L2频点测量噪底增加的区域AGC电压也表现出明显变化。AGC和测量噪声的同时变化印证了中东地区存在L1和L2频点的干扰信号。后向掩星天线AGC和测量噪底的变化与前向掩星天线表现出的特征类似,不再赘述。

5 影 响

GPS卫星信号功率的调整或者信号干扰,通过影响信号跟踪的载噪比,可能对GPS的测量精度产生了影响^[19]。以载波测量为例,锁频环(phase locked loop, PLL)的噪声方差的估算公式为:

$$\sigma_{\text{PLL}} = \frac{180^\circ}{\pi} \sqrt{\frac{B_L}{C/N_0} \left(1 + \frac{1}{2T_{\text{coh}} C/N_0} \right)} \quad (1)$$

式中, B_L 为噪声带宽; T_{coh} 为相干积分时间; C/N_0 为信号的载噪比; σ_{PLL} 为锁频环的测量噪声。从式(1)中可以看出,在噪声带宽和相干积分时间一定的情况下, C/N_0 越小, σ_{PLL} 越大; C/N_0 越大, σ_{PLL} 越小。 C/N_0 对伪码测量精度的影响有相似的特征。

2020-02-14—2020-09-12间GPS的功率调整影响了P码的信号强度,采用半无码跟踪时,L2P码的载噪比增加了约10 dB。根据之前数次GPS功率调整的测试结果,此次功率调整可能对载波相位的连续性和频间偏差均产生影响,需要借助地面高增益天线及其他专有设备对此进行分析,不在本文的讨论范围内^[2-3]。

地球表面的干扰信号通过增加测量噪底的方式降低了GPS接收机的载噪比。在存在干扰信号的区域,L1和L2频点的噪底大概增加了3~10倍,会使载噪比减少4~10 dB。从在轨接收的数据看,该种影响主要存在于中东地区及白令海峡的上空。

对干扰区域内和干扰区域外后向掩星的测量精度进行统计,结果如表1所示。可以看出,干扰区域内和干扰区域外L1频点和L2频点伪距测量精度和载波相位测量精度没有明显区别,但明

显差于定位天线的测量精度。产生这种结果可能的原因是掩星天线朝向后向,接收的GPS卫星

仰角在 0° 上下,地球大气对伪距和载波相位的影响远远大于其对接收机的影响。

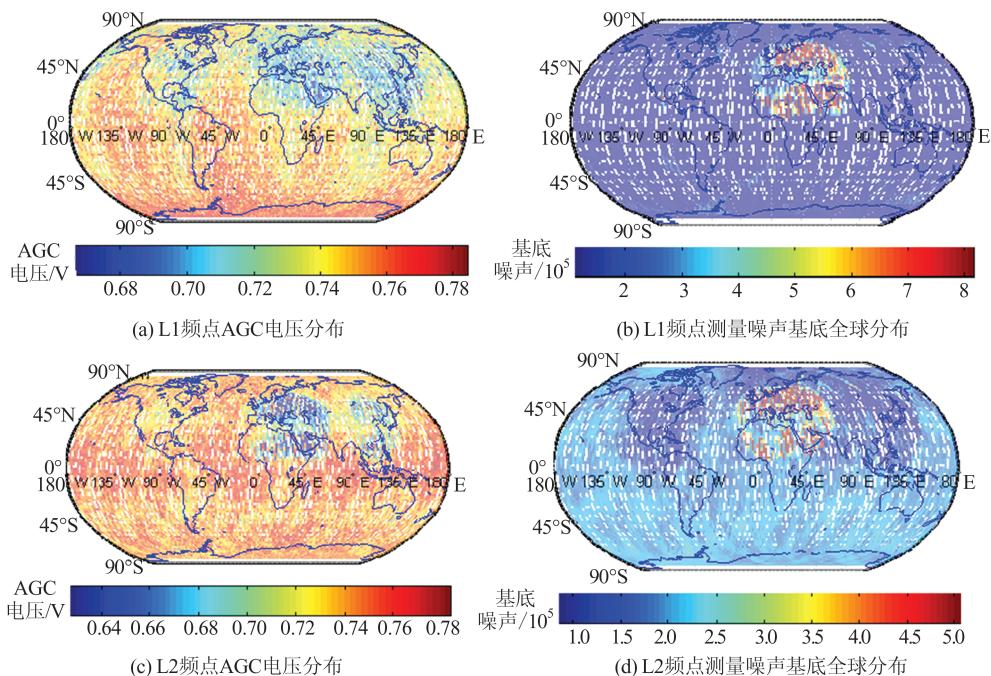


图11 前向大气掩星天线AGC电压和测量噪底全球分布

Fig.11 Global Distribution of AGC Voltage and Base Noise of Front Atmosphere Antenna

表1 干扰区域和正常区域GPS测量精度

Tab.1 Measurement Accuracy of GPS in the Interfered and the Normal Regions

区域	伪距精度/m		载波相位精度/cm	
	L1C/A	L2P	L1C/A	L2P
干扰区域	0.347	0.405	1.49	1.50
非干扰区域	0.346	0.397	1.50	1.52

6 结语

本文利用FY-3D卫星运行轨迹全球覆盖的特点,对GPS功率调整影响的区域和特点进行了分析,对地球表面干扰信号的区域及干扰信号的特征进行了介绍。通过分析可以看出,此次GPS功率增强是以 $[35^{\circ}\text{N}, 37^{\circ}\text{E}]$ 和 $[35^{\circ}\text{N}, 69^{\circ}\text{E}]$ 为中心、半径约为7500 km的区域,当GPS IIR-M和IIF卫星飞越该区域上空时,使用半无码跟踪技术时L2P码功率大约增强了10 dB。本文使用GNOS临边探测的掩星数据对来自地球表面的干扰信号进行了分析,利用前后掩星天线先后收到干扰信号的特点,准确地确定了干扰源的位置。干扰在中东地区最为明显,其中心点与GPS功率增强的中心点基本重合,干扰信号会使GPS L1和L2频点的载噪比降低4~10 dB。地面信号

干扰和功率增强对掩星接收机的测量精度没有明显的影响。

参 考 文 献

- [1] Jiménez B D, Perelló G J V, Crisci M. The Measured Effects of GPS Flex Power Capability Collected on Sensor Station Data [C]//The 5th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing, Noordwijk, Netherlands, 2011.
- [2] Hartman T, Boyd L, Koster D, et al. Modernizing the GPS Block IIR Spacecraft [C]//The 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 2000), Salt Lake City, UT, USA, 2000.
- [3] Steigenberger P, Thölert S, Montenbruck O. Flex Power on GPS Block IIR-M and IIF [J]. *GPS Solutions*, 2019, 23:8.
- [4] Han Qi, Zhu Kejia, Fu Yu, et al. Monitoring and Assessment of GPS Signals During US Attacking on Syria [J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2019, 7(3): 7-10. (韩奇, 朱克家, 付钰, 等. 美国打击叙利亚期间GPS信号监测评估[J]. 导航定位学报, 2019, 7(3): 7-10.)
- [5] Liu Miaomiao, Jiao Wenhui, Jia Xiaolin. GPS Sig-

- nal Enhancement Analysis in the US–Iranian Conflict [J]. *GNSS World of China*, 2020, 45(1): 31–36. (刘苗苗, 焦文海, 贾小林. 美伊冲突中的 GPS 信号增强分析[J]. 全球定位系统, 2020, 45(1): 31–36.)
- [6] Simsky A, Wilde D W, Willems T, et al. First Field Experience with L5 Signals: DME Interference Reality Check[C]// The 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2009), Savannah, GA, USA, 2009.
- [7] Montenbruck O, Markgraf M, Tossaint M. GNSS Interference in L-Band SAR Missions – Assessment and Mitigation[C]// International Technical Meeting of the Institute of Navigation, Reston, Virginia, USA, 2019.
- [8] Gleason S, Johnson J, Ruf C, et al. Characterizing Background Signals and Noise in Spaceborne GNSS Reflection Ocean Observations [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, 17(4): 587–591.
- [9] Sun Xiyan, Ji Yuanfa, Shi Huli, et al. Algorithms for Removing Narrow-Band Interference Based on Software GPS Receiver[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(1): 77–80. (孙希延, 纪元法, 施浒立, 等. 基于 GPS 软件接收机的抗窄带干扰方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2009, 34(1): 77–80.)
- [10] Han Tianzhu, Cao Jianping, Lu Mingquan. Anti-interference Antenna Based Near-Far Effect Mitigation Method[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(10): 1222–1225. (韩天柱, 曹建平, 陆明泉. 基于抗干扰天线的远近效应抑制技术[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(10): 1222–1225.)
- [11] Hegarty C, Van Dierendonck A, Bobyn D, et al. Suppression of Pulsed Interference Through Blanking [C]// IAIN World Congress in Association with the US ION 56th Annual Meeting, San Diego, UAS, 2000.
- [12] Borio D. Swept GNSS Jamming Mitigation Through Pulse Blanking[C]// European Navigation Conference (ENC), Helsinki, Finland, 2016.
- [13] Bastide F, Akos D, Macabiau C, et al. Automatic Gain Control (AGC) as an Interference Assessment Tool [C]// The 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS/GNSS 2003), Portland, OR, USA, 2003.
- [14] Isoz O, Buehler S A, Kinch K, et al. Interference from Terrestrial Sources and Its Impact on the GRAS GPS Radio Occultation Receiver[J]. *Radio Science*, 2014, 49(1), DOI: 10.1002/2013RS005243.
- [15] Bonnedal M, Christensen J, Carlström A, et al. Metop–GRAS In–Orbit Instrument Performance [J]. *GPS Solutions*, 2010, 14: 109–120.
- [16] Du Q F, Sun Y Q, Bai W H, et al. The On–Orbit Performance of FY–3D GNOS[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Yokohama, Japan, 2019.
- [17] Wang Fuhong, Ling Sanli, Gong Xuewen, et al. Decimeter–Level Orbit Determination for FY3C Satellite Based on Space–Borne GPS/BDS Measurements [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(1): 1–6. (王甫红, 凌三力, 龚学文, 等. 风云三号 C 卫星星载 GPS/BDS 分米级实时定轨模型研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(1): 1–6.)
- [18] Wang D W, Tian Y S, Sun Y Q, et al. Preliminary In–Orbit Evaluation of GNOS on FY3D Satellite [C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Valencia, Spain, 2018.
- [19] Parkinson B W, Spilker J, Editors A, et al. Global Positioning System: Theory and Applications[M]. Washington, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996.
- [20] Montenbruck O, Gill E, Lutze F H. Satellite Orbits: Models, Methods, and Applications [J]. *Applied Mechanics Reviews*, 2002, 55(2): B27–B28.
- [21] Montenbruck O, Garcia–Fernandez M, Williams J. Performance Comparison of Semicodeless GPS Receivers for LEO Satellites [J]. *GPS Solutions*, 2006, 10(4): 249–261.