

C_N 频段导航信号射频兼容评估方法研究*

李志芸^{1,2,3}, 白燕^{1,2}, 卢晓春^{1,2,3,4}

- (1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
2. 中国科学院 精密导航定位与定时技术重点实验室, 西安 710600;
3. 中国科学院大学, 北京 100049;
4. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 101048)

摘要: L 频段导航信号过分拥挤造成 GNSS(Global Navigation Satellite System) 频谱资源紧张, C_N 频段已被考虑作为全球导航卫星系统的候选频段, 但在工程化应用之前, 必须要充分考虑 C_N 频段同相邻业务频段的射频兼容性问题。对 C_N 频段导航信号与射电天文业务的兼容性进行研究, 在国际电信联盟(ITU)规定的兼容评估准则基础上, 针对导航系统的 GSO(geostationary earth orbit satellite) 卫星以及非 GSO 卫星分别给出兼容评估的具体实现策略, 并利用 GMSK(8) 信号进行仿真分析, 得到射电望远镜在不同指向下的干扰分布情况。在非 GSO 卫星的兼容评估中, 对有干扰的射电望远镜指向进一步分析其等效功率通量密度随时间的变化情况, 可以得出无干扰的时间段。该研究可以为未来无线电导航在 C_N 频段的业务拓展提供射频兼容评估方面的技术支持, 同时为射电天文系统在业务工作中选取合适的观测时段、提高观测数据质量等方面提供参考。

关键词: C_N 频段导航信号; 射电天文; 对地球静止地球轨道卫星; 非对地球静止地球轨道卫星; 兼容性评估

Research on radio frequency compatibility evaluation method of C_N band navigation signal

LI Zhi-yun^{1,2,3}, BAI Yan^{1,2}, LU Xiao-chun^{1,2,3,4}

- (1. National Time Service Center, Chinese Academy of Science, Xi'an 710600, China;
2. Key Laboratory of Precise Positioning and Timing Technology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101048, China)

Abstract: The L-band navigation signals are overcrowded and the spectrum resources are strained, the C_N band has been considered as a candidate band for Global Navigation Satellite System. Before engineering applications, it is necessary to consider the compatibility of the C_N band with the adjacent service band. The compatibility between C_N band navigation signal and radio astronomy service is studied. Based on the compatibility assessment criteria defined by the ITU(International Telecommunication Union), the specific implementation strategies for the compatibility evaluation of the GSO satellite and the non-GSO satellite are

* 收稿日期: 2018-08-21; 接受日期: 2018-09-30

基金项目: 中国科学院“西部之光”人才培养计划西部青年学者资助项目(Y607YR9701)

作者简介: 李志芸, 女, 硕士, 主要从事信号兼容评估研究。

respectively provided. By using the GMSK(8) signal as simulation analysis, the interference distribution of the radio telescope in different directions was obtained. In non-GSO satellite compatibility assessments, to analyze the changes of the equivalent power flux density over time for the radio-telescope with interference, a non-interfering time period can be obtained. The research can provide technical support for radio frequency compatibility assessment for C_N band, at the same time, it can provide reference for the radio astronomy system to select the appropriate observation period and improve the quality of observed data.

Key words: C_N band navigation signal; radio astronomy; geostationary earth orbit satellite; non-GSO; compatibility evaluation

0 引言

目前大多数导航系统的工作频段集中在 L 频段,造成频段资源过度拥挤,不同信号之间的协调和兼容难度增加。为了解决导航频段资源紧张的问题,国际电信联盟(International Telecommunication Union,简称 ITU)划分 C_N 频段(5 010~5 030 MHz)供卫星无线电导航使用,其中 C_N 中的 N 取 New 和 Navigation 之意^[1]。与 L 频段相比,使用 C_N 频段的一个明显优势是电离层延迟较小,约为 L 频段的 1/10;另一个优势是 C_N 频段的波长较短,相同体积的天线, C_N 频段天线增益更高^[2-5]。但在工程化应用 C_N 频段之前,需要考虑该频段与相邻业务频段的兼容问题。射电天文系统频段(4 990~5 000 MHz)与该频段相邻,且射电天文望远镜一般只接收信号,而不往外发射信号,因此它并不会对其他频带的任何电信业务造成干扰。但是,它自身对外界的电磁干扰却是非常敏感。对于射电天文学来说,广播、雷达、人造卫星等业务都会对射电望远镜的观测产生很大影响。为射电天文分配特定的频段并进行保护,是关系到射电天文研究工作能否正常进行与发展的根本问题。因此,评估 C_N 频段与射电天文频段的兼容问题是利用 C_N 频段开展导航业务需要考虑和解决的问题。

为了保护射电天文系统不被 C_N 频段导航信号干扰,ITU 出台了 C_N 频段射频兼容性分析的有关评估准则^[6],但是并未给出具体的实现方法以及切实可行的分析工具。目前查阅到的国内外文献中^[7-14]有关 C_N 频段导航信号与射电天文系统的兼容分析中,虽然基于 ITU 评估准则进行分析,但是均对该准则进行了一定简化,而简化后的方法只能计算 C_N 频段导航信号与射电天文系统是否兼容,不能具体分析天文台站精确的干扰分布情况。基于此,本文试图寻找一种更为完善的方法弥补目前 C_N 频段射频兼容评估理论的不足。本文没有采用简化的 ITU 方法,而是在 ITU 射频兼容评估准则的基础上,针对 GSO(geostationary earth orbit satellite)导航卫星星座以及非 GSO 导航卫星星座,给出 C_N 频段射频兼容评估的具体实现过程,可以为未来无线电导航在 C_N 频段的业务拓展提供射频兼容评估方面的技术支持,同时为射电天文系统在工作中选择合适的观测时段提供参考。

1 GMSK 调制

鉴于 C_N 频段带外兼容的严苛要求,在选择导航信号调制方式时应选择带外辐射较小,功率谱旁瓣衰减较快的信号调制方式。本文中采用 GMSK(8)调制信号,其时域表达式^[15]为

$$S_{\text{GMSK}}(t) = A \cos(2\pi f_c t + \sum_k a_k p(t - kT_c) + \varphi_0(t)), \quad (1)$$

式(1)中, f_c 为载波频率, a_k 为码元信息, T_c 为码元周期, φ_0 为相位偏移量,是一个常量,可以设为 0,矩形脉冲 $h(t)$ 经过高斯低通滤波器 $g(t)$ 得到高斯型的脉冲码元脉冲 $p(t)$ 。

$$p(t) = h(t) \otimes g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\tau) h(t - \tau) d\tau, \quad (2)$$

$$h(t) = \begin{cases} \frac{1}{2T_c} & nT_c \leq t \leq (n+1)T_c \\ 0 & \text{其他} \end{cases}, \quad (3)$$

$$g(t) = \frac{1}{\sigma T_c \sqrt{2}} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2 T_c^2}\right), \quad (4)$$

$g(t)$ 表达式中的 σ 用下式表示

$$\sigma = \frac{\sqrt{\ln(2)}}{2\pi B T_c}, \quad (5)$$

式(5)中, B 是高斯滤波器的 3 dB 带宽, 仿真时 $B T_c = 0.3$ 。

利用 Matlab 对 GMSK(8) 调制信号进行仿真, 得到功率谱进行加窗平滑, 仿真功率谱如图 1 所示。

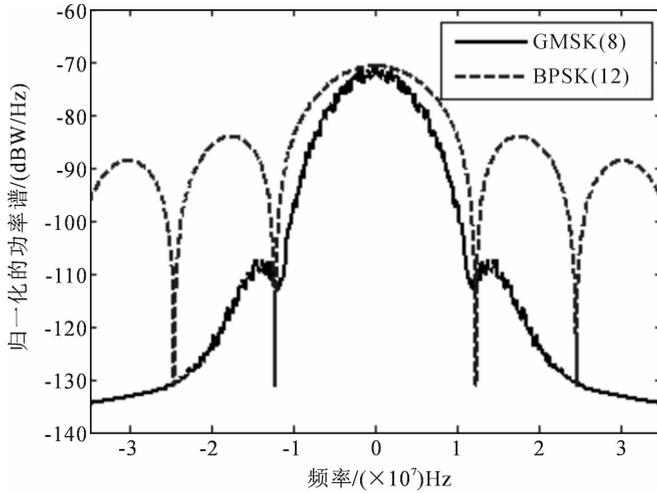


图 1 GMSK(8) 功率谱图

图 1 中, GMSK(8) 信号的主瓣带宽约为 24 MHz, 与相同带宽的 BPSK(12) 信号对比, GMSK(8) 信号的旁瓣衰减较大, 对相邻频段的干扰较小, 是一种适合 C_N 频段的导航信号。

2 GSO 系统 C_N 频段导航信号同射电天文系统兼容性评估

GSO 卫星有着相对稳定的方位角和高程范围, 相对于射电天文台站的位置不会发生变化。而目前运行的射电望远镜几乎都可以看到多颗 GSO 卫星。因此, 它们有可能成为射电天文台站干扰问题的来源。

2.1 兼容评估方法

为了不对 4 990~5 000 MHz 频段内的射电天文系统造成干扰, ITU 建议由工作在 5 010~5 030 MHz 频段内的任何对地静止轨道卫星系统在射电天文系统的 10 MHz 频段内产生的功率通量密度 (power flux density, 简称 PFD) 在任何射电天文台处不应超过 $-171 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$ [6]。

每颗卫星在射电天文台处的功率通量密度记为 P_{PFD} , 表达式为

$$P_{\text{PFD}} = 10 \log_{10} \left[\frac{10^{0.1(P_{\text{EIRP}} - L_{\text{atm}})}}{4\pi d^2} \int_{4990 \text{ MHz}}^{5000 \text{ MHz}} G(f) df \right], \quad (6)$$

式(6)中, P_{EIRP} 为卫星的等效全向辐射功率 (单位 dBW), L_{atm} 为大气损耗 (单位 dB), d 为卫星到射电望远镜的距离 (单位 m), $G(f)$ 为 C_N 频段导航信号的归一化功率谱密度。

分析来自 GSO 卫星的 C_N 频段导航信号对射电天文台站造成的干扰大小时, 采用 ITU-R SA. 509-3 建议书给出的如公式(7)所示的射电望远镜天线增益辐射方向图 [16]。

$$G_{r1}(\varphi) = \begin{cases} 74 - 3(\varphi/0.0217)^2 & 0 \leq \varphi < 0.056 \\ 54 & 0.056 \leq \varphi < 0.1 \\ 29 - 25 \lg \varphi & 0.1 \leq \varphi < 48 \\ -13 & 48 \leq \varphi < 80 \\ -8 & 80 \leq \varphi < 120 \\ -13 & 120 \leq \varphi < 180 \end{cases}, \quad (7)$$

式(7)中, $G_{r1}(\varphi)$ 为射电望远镜天线增益(单位为 dBi); φ 为离轴角(单位为 $^\circ$)。

ITU 建议 C_N 频段导航信号在射电天文台处的功率通量密度不得高于 $-171 \text{ dB}(\text{W}/\text{m}^2)$, 该值是基于射电望远镜天线增益为 0 dBi 处设置的, 即经过射电望远镜天线进入接收机的所有干扰信号产生的干扰电平不得高于 $-171 \text{ dB}(\text{W}/\text{m}^2)$ 。GSO 卫星相对于天文台的位置是固定的, 只有天线的指向靠近该卫星时才会产生干扰电平。干扰电平的大小与干扰信号相对于射电望远镜天线主波束轴的离轴角有关, 若该卫星的 C_N 频段导航信号到达接收机的功率通量密度为 $-171 \text{ dB}(\text{W}/\text{m}^2)$ 时的离轴角为 φ , 则当干扰信号的离轴角小于 φ 时会对射电天文系统产生干扰, 而离轴角大于 φ 时则无干扰。

单颗卫星对应的干扰天空面积与总的天空面积的比值为

$$r = \frac{2\pi d^2 \int_0^\varphi \sin\theta d\theta}{2\pi d^2} = 1 - \cos\varphi, \quad (8)$$

式(8)中, φ 为单颗卫星的 C_N 频段信号到达接收机处的功率通量密度为 $-171 \text{ dB}(\text{W}/\text{m}^2)$ 时的离轴角。

上述分析是单颗 GSO 卫星对应的干扰天空面积, 对于 GSO 卫星星座中的每颗卫星所产生的干扰均可用上述方法分析。

2.2 兼容分析

仿真参数设置如下: $P_{\text{EIRP}} = 42 \text{ dBW}$, GSO 卫星到达天文台站的最小距离 $d = 35\,786 \text{ km}$, 大气损耗 $L_{\text{atm}} = 0.5 \text{ dB}$, C_N 频段导航信号采用 GMSK(8) 信号, 载波中心频率^[1]为 $5\,022.93 \text{ MHz}$ 。

将上述参数代入公式(6)得 $P_{\text{PFID}} = -182 \text{ dB}(\text{W}/\text{m}^2)$, 当来自单颗 GSO 卫星的 C_N 频段导航信号到达射电望远镜接收机的电平为 $-171 \text{ dB}(\text{W}/\text{m}^2)$ 时, 入射角对应的天线增益为 11 dBi, 即 $29 - 25\lg\varphi = 11$, 则入射角度为 5.25° , 因此, 当望远镜的指向与 GSO 视线方向的夹角小于 5.25° 时会对射电天文系统造成干扰, 而当角度大于 5.25° 时不会存在干扰。单颗 GSO 卫星对应的干扰天空面积占总天空面积的比值由公式(8)可得 $r = 0.42\%$ 。

3 非 GSO 系统 C_N 频段导航信号同射电天文系统兼容性评估

非 GSO 卫星的数量较多, 这也成为它们对射电天文系统造成干扰的一个重要原因。

3.1 兼容评估方法

非 GSO 卫星与 GSO 卫星的分析方法不同, 主要是因为非 GSO 卫星相对于射电望远镜天线波束的位置随着时间的变化而变化。ITU 建议为了不对 $4\,990 \sim 5\,000 \text{ MHz}$ 频段内的射电天文系统造成干扰, 工作在 $5\,010 \sim 5\,030 \text{ MHz}$ 频段内的非对地静止轨道卫星在 $4\,990 \sim 5\,000 \text{ MHz}$ 频段内所产生的等效功率通量密度 (equivalent power flux density, 简称 EPFD), 在任何天文台站处超过 $-245 \text{ dB}(\text{W}/\text{m}^2)$ 的时间百分比不应超过 2% ^[17]。等效功率通量密度是指将天线接收到的各个方向上的卫星发射的功率通量密度, 等效成在天线最大增益处所接收到的功率通量密度^[18]。

等效功率通量密度计算公式如下:

$$P_{\text{EPFD}} = 10\log_{10} \left[\sum_{i=1}^{N_a} 10^{\frac{P_i + G_i(\theta_i)}{10}} \cdot \frac{1}{4\pi d_i^2} \cdot \frac{10^{0.1(G_r(\varphi_i))}}{10^{0.1(G_{r,\text{max}})}} \right], \quad (9)$$

令 $P_i + G_i(\theta_i) = P_{\text{EIRP}} \int_{4\,990 \text{ MHz}}^{5\,000 \text{ MHz}} G(f) df$, 加入大气损耗 L_{atm} , 将上式进一步简化, 得到

$$P_{\text{EPFD}} = 10\log_{10} \left[\sum_{i=1}^{N_a} 10^{\frac{(P_{\text{EIRP}} - L_{\text{atm}})}{10}} \int_{4\,990 \text{ MHz}}^{5\,000 \text{ MHz}} G(f) df \cdot \frac{1}{4\pi d_i^2} \cdot \frac{10^{0.1(G_r(\varphi_i))}}{10^{0.1(G_{r,\text{max}})}} \right], \quad (10)$$

式(9)和(10)中, N_a 为射电望远镜可见的非 GSO 卫星的数量, P_i 为非 GSO 卫星发射功率在射电天文频段上

的无用功率(单位为 dBW), θ_i 为非 GSO 卫星发射波束中心和射电望远镜方向之间的离轴角(单位为 $^\circ$), $G_r(\theta_i)$ 为非 GSO 卫星在射电望远镜方向上的发射天线增益(单位为 dBi), $G(f)$ 为 C_N 导航信号的归一化功率谱密度, d_i 为射电望远镜和非 GSO 卫星之间的距离(单位为 m), φ_i 为射电望远镜指向和非 GSO 卫星方向之间的离轴角(单位为 $^\circ$), $G_r(\varphi_i)$ 为射电望远镜在非 GSO 卫星方向的接收天线增益(单位为 dBi), $G_{r,\max}$ 为射电望远镜的最大接收天线增益(单位为 dBi), P_{EIRP} 为卫星的等效全向辐射功率(单位为 dBW)。

ITU 建议分析非 GSO 卫星系统对射电望远镜造成的干扰大小时, 采用 ITU-R RA. 1631-0 建议书给出的射电望远镜天线增益模型^[16], 其如公式(11)所示:

$$G_r(\varphi) = \begin{cases} 74 - 2.5 \times 10^{-3} \times (1595\varphi)^2 & 0 \leq \varphi < 0.065 \\ 47 & 0.065 \leq \varphi < 0.19 \\ 29 - 25\lg\varphi & 0.19 \leq \varphi < 10 \\ 34 - 30\lg\varphi & 10 \leq \varphi < 34.1 \\ -12 & 34.1 \leq \varphi < 80 \\ -7 & 80 \leq \varphi < 120 \\ -12 & 120 \leq \varphi < 180 \end{cases}, \quad (11)$$

式(11)中, $G_r(\varphi)$ 为相对于全向天线的增益(单位为 dBi), φ 为离轴角(单位为 $^\circ$)。

在评估非 GSO 卫星的 C_N 频段导航信号与射电天文系统兼容的仿真过程如下:

① 用 STK 软件对导航系统的所有非 GSO 卫星进行可见性仿真^[19], 得到当前时刻可见卫星数目 N_a , 每颗卫星相对于地面站的距离 d_i 以及方位俯仰角度。

② 为地面站的射电望远镜天线设置不同的方位俯仰角度, 根据 STK 获得的卫星位置, 计算出干扰信号方向同射电望远镜指向的夹角即离轴角 φ_i , 由射电望远镜天线增益模型即公式(11)计算出增益 $G_r(\varphi_i)$ 。

夹角 φ_i 可通过向量来计算。首先, 为天文台站的射电望远镜设置指向, 用 (A_g, E_g) 表示射电望远镜的方位和俯仰, 通过第一步的仿真可以得到当前时刻每颗可视卫星的方位和俯仰, 用 (A_{si}, E_{si}) 表示, 射电望远镜到卫星的方向向量用 \vec{d}_{si} 表示, 如公式(12)所示, 射电望远镜主波束指向的向量用 \vec{d}_g 表示, 如公式(13), 两个向量的夹角即为 φ_i , 如公式(14)所示。

$$\vec{d}_{si} = (\cos E_{si} \cos A_{si}, \cos E_{si} \sin A_{si}, \sin E_{si}), \quad (12)$$

$$\vec{d}_g = (\cos E_g \cos A_g, \cos E_g \sin A_g, \sin E_g), \quad (13)$$

$$\varphi_i = \arccos \frac{\vec{d}_{si} \cdot \vec{d}_g}{|\vec{d}_{si}| |\vec{d}_g|}. \quad (14)$$

③ 根据 C_N 频段导航信号调制方式计算出归一化功率通量密度 $G(f)$, 最后将各参数带入公式(10) 即可得到当前时刻的等效功率通量密度。

④ 仿真一段时间后计算在该时间段内 EPFD 超过 $-245 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$ 的时间占总时间的百分比。在仿真时, 仿真时间长度应远大于非 GSO 卫星星座运行周期, 且仿真时间越长, 最后结果越准确。

3.2 兼容仿真分析

利用 STK 工具对北斗导航系统的非 GSO 卫星星座进行可见性仿真, 该星座包括 6 颗 IGSO 卫星和 3 颗 MEO 卫星, 天文台站地点选择三亚、西安、长春, 仿真时间为 20 d, 时间间隔为 1 min, C_N 频段导航信号采用 GMSK(8) 信号, $P_{\text{EIRP}} = 42 \text{ dBW}$, 大气损耗 $L_{\text{atm}} = 0.5 \text{ dB}$, 计算射电望远镜不同指向下 EPFD 超出 $-245 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$ 的时间占总时间的百分比。仿真结果示于图 2 至图 4, 分别代表三亚、西安、长春 3 处天文台站的干扰分布, 横坐标为射电望远镜的方位角, 纵坐标为射电望远镜的仰角, 最右侧栏不同颜色代表 EPFD 超出 $-245 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$ 的时间百分比。

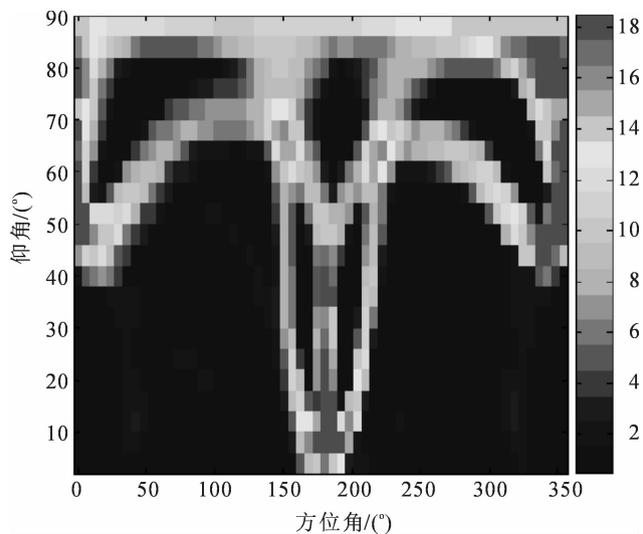


图 2 三亚站干扰分布

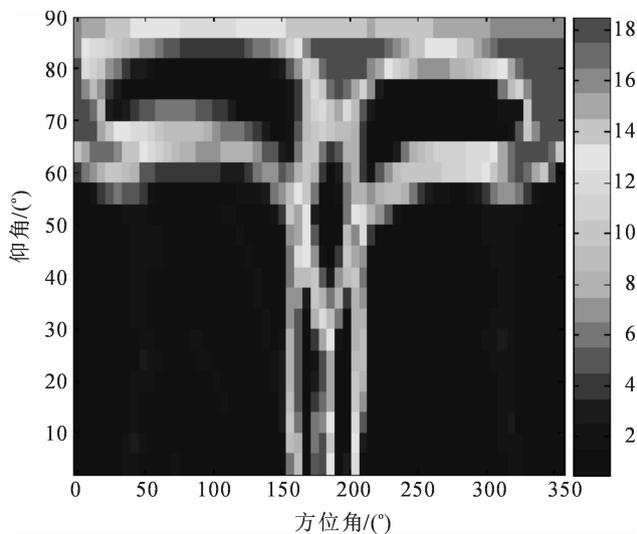


图 3 西安站干扰分布

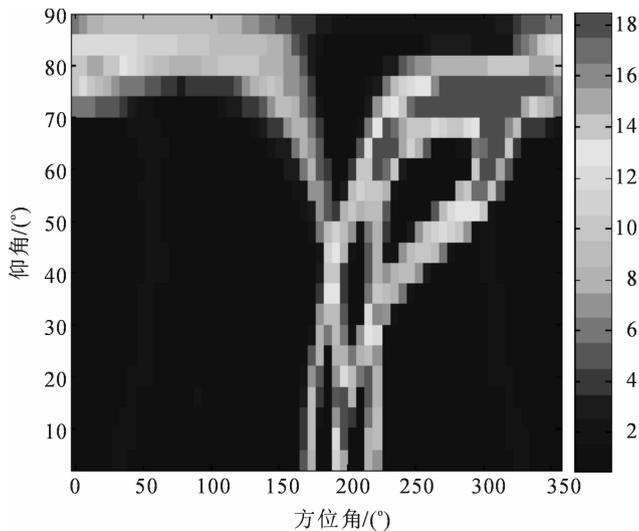


图 4 长春站干扰分布

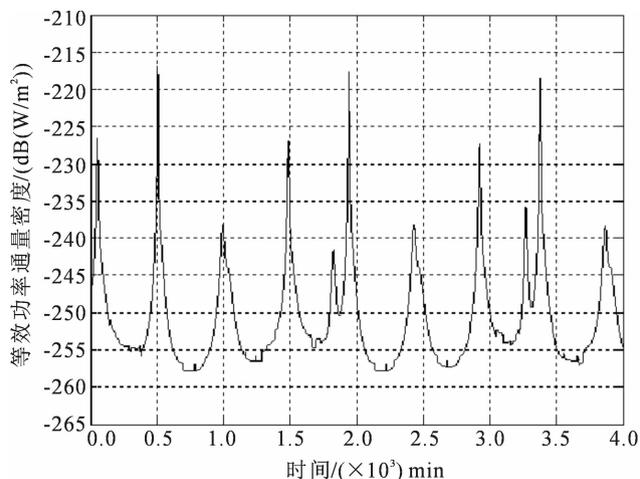
干扰时间不超过 2% 的指向是满足兼容的, 对图 2 至图 4 中不同地区干扰情况进行统计, 满足兼容的指向占总指向的百分比如表 1 所示。

表 1 不同地区满足兼容的天线指向占总指向的百分比

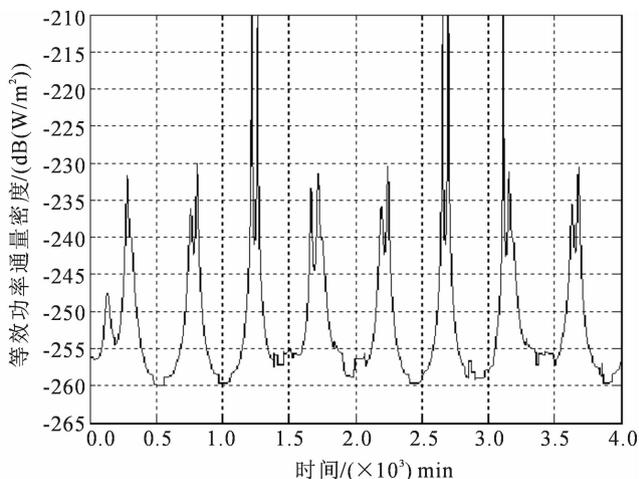
地点	满足兼容的天线指向百分比
三亚	50%
西安	53%
长春	58%

由表 1 可以看出, 3 个地区均有超过一半的指向是满足兼容条件的, 不同地区的兼容程度与该地上空的卫星覆盖度有关。对比图 2 至图 4 中西安、三亚、长春 3 个地区的干扰分布图可得, 干扰的指向多集中在方位角为 180° 附近, 以及高仰角处, 并且随着纬度变化而变化。

对干扰较大的指向进一步分析其 EPFD 随时间的变化情况。对三亚、西安和长春三站任选两个干扰时间超过 2% 的射电望远镜指向, 仿真其 EPFD 随时间累积的变化情况, 仿真结果如图 5 至图 7 所示。

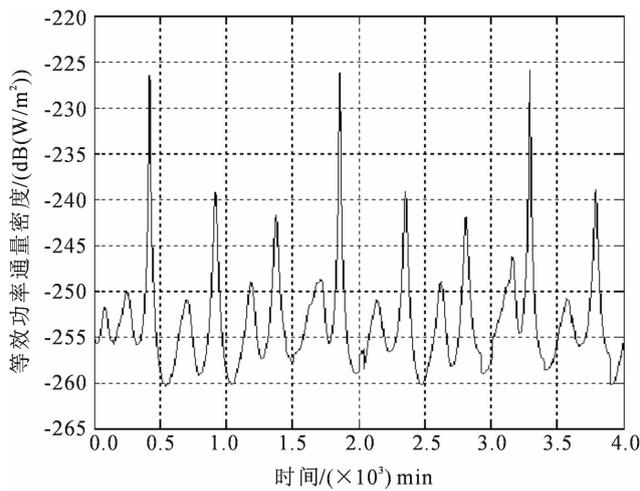


(a) 方位174°, 仰角28°, 干扰时间17.98%

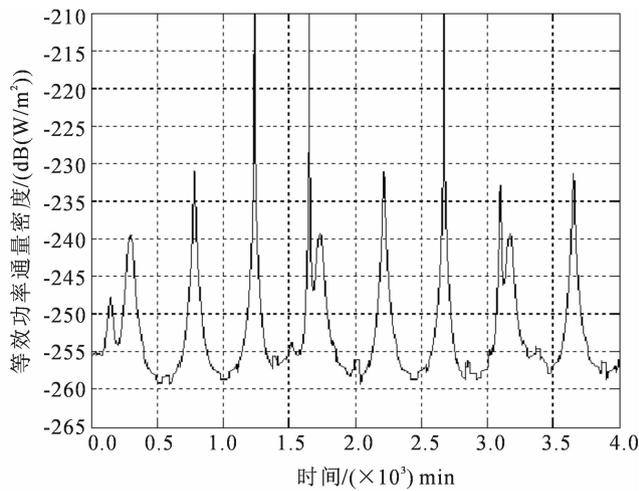


(b) 方位342°, 仰角76°, 干扰时间19.86%

图5 三亚站不同天线指向下的等效功率通量密度变化

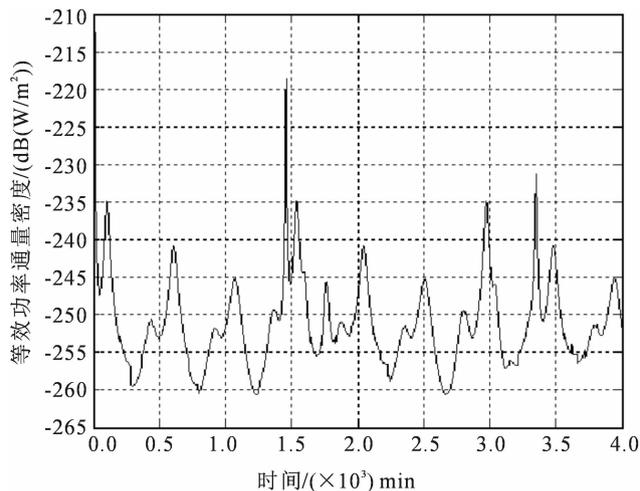


(a) 方位192°, 仰角56°, 干扰时间6.83%

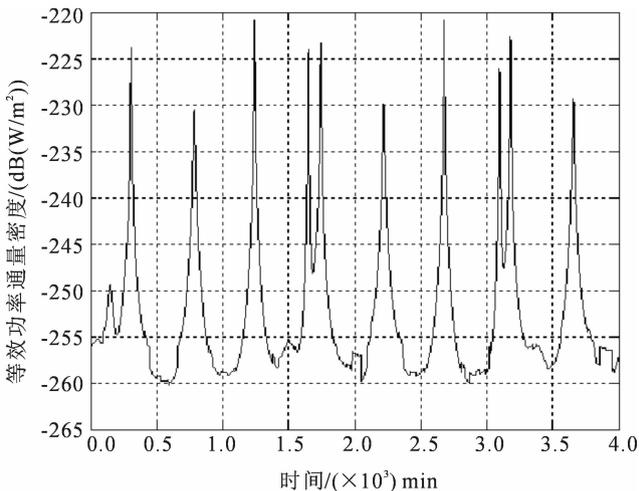


(b) 方位270°, 仰角88°, 干扰时间15.12%

图6 西安站不同天线指向下的等效功率通量密度变化



(a) 方位330°, 仰角40°, 干扰时间10.92%



(b) 方位240°, 仰角68°, 干扰时间14.37%

图7 长春站不同天线指向下的等效功率通量密度变化

图 5 至图 7 中,在文中所选择射电望远镜的指向下,累积时间为 4 000 min,EPFD 超过 $-245 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$ 的干扰时间与总时间的比值均大于 2%,会给射电天文观测带来干扰。但是从图中可以看出,无论数据损失的百分比大或小,EPFD 变化都是有规律的,在大部分时间均低于 $-245 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$ 。对图 5 至图 7 中的最大无干扰时段以及平均无干扰时段进行统计,统计结果如表 2 所示。

表 2 不同站点不同指向下的干扰时间分析

地区	天线指向(方位,俯仰)/($^{\circ}$)		干扰时间百分比		最长无干扰时间段/min		平均无干扰时间段/min	
三亚	(174,28)	(342,76)	17.98%	19.86%	417	403	370	376
西安	(192,56)	(270,88)	6.83%	15.12%	460	420	444	391
长春	(330,40)	(240,68)	10.92%	14.37%	855	416	596	391

表 2 中,文中所选择的干扰指向下,最长无干扰时间段以及平均无干扰时间段均大于 6 h,由图 5 至图 7 以及表 2 可以得出,对于不满足兼容的天线指向,一般会有连续较长一段不受 C_N 频段导航信号干扰的时间段,之后会出现较短的受到 C_N 频段导航信号干扰的时间段,如此重复。因此,在实际工作中,可以通过上述分析方法选取无干扰的有效观测时段,从而保证天文观测数据的正确性。

4 结语

本文对 C_N 频段导航信号同射电天文系统的兼容评估方法进行研究,给出一种实现 ITU 评估准则的具体实施方法。GSO 卫星相对天文台站的位置是固定的,通过本文方法可计算得出每颗卫星所对应的干扰区域。非 GSO 卫星相对于天文台站的位置随着时间的变化而变化,基于本文方法可得出射电望远镜不同指向下的干扰情况,对于某些干扰较大的指向,通过进一步分析其等效功率通量密度随时间的变化情况,可以找到无干扰的时间段,这可为射电天文台站选择合适的观测时段提供参考,同时本文研究可为 C_N 频段导航信号设计提供射频兼容评估方面的技术支持。

参考文献:

- [1] 王瑛. C_N 频段卫星导航研究[C]//第七届中国卫星导航学术年会论文集——S03 卫星导航信号. 北京:中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心,2016:109-117.
- [2] ENKEL P,GÜNTHER C. Joint L-/C-band code and carrier phase linear combinations for Galileo[J]. International Journal of Navigation & Observation,2008(8):1-8.
- [3] TESCHL F,SCHOENHUBER M,PEREZ F F,et al. C-band,narrow and wideband measurement campaign for satellite-to-indoor and roadside tree links[C]// European Conference on Antennas and Propagation, Munich, Gemany: IEEE Xplore,2009:3687-3691.
- [4] RODRIGUEZ A J A,WALLNER S,HEIN G W,et al. A vision on new frequencies,signals and concepts for future GNSS systems[C]//Proceedings of ION GNSS 2007, Fort Worth, Texas: USA,2007:517-534.
- [5] IRSIGLER M,HEIN G W,SCHMITZ P A. Use of C-band frequencies for satellite navigation:benefits and drawbacks[J]. GPS Solutions,2004,8(3):119-139.
- [6] Intenational Telecommunication Union. Resolution 741. Protection of the radio astronomy service in the frequency band 4 990~5 000 MHz from unwanted emissions of the radionavigation-satellite service (space-to-Earth) operating in the frequency band 5 010~5 030 MHz[R]. Geneva:ITU, 2015.
- [7] 谢钢. 全球卫星导航卫星系统原理——GPS、格洛纳斯和伽利略系统[M]. 北京:电子工业出版社,2013.
- [8] 李锐,曾大治,陆明泉. 卫星导航 MSK 扩频调制及跟踪技术研究[J]. 北京理工大学学报,2014,34(4):421-426.

- [9] 朱亮,陆明泉,冯振明.北斗系统 C 频段导航信号的波形设计[J].电子技术应用,2012,38(8):89-92.
- [10] 胡修林,唐祖平,周鸿伟,等. GPS 和 Galileo 信号体制设计思想综述[J].系统工程与电子技术,2009,31(10):2285-2293.
- [11] 冉一航. GNSS 信号调制方式及频率兼容性研究[D]. 武汉:华中科技大学,2011.
- [12] Recommendation ITU-R. RA. 1031-2; Protection of the Radio Astronomy Service in Frequency Bands Shared with Other Services[R]. Geneva:ITU,2017.
- [13] Recommendation ITU-R. RA. 1513-2; Levels of Data Loss to Radio Astronomy Observations and Percentage-of-Time Criteria Resulting from Degradation by Interference for Frequency Bands Allocated to the Radio Astronomy Service on a Primary Basis[R]. Geneva:ITU,2015.
- [14] RODRIGUEZ A J A, WALLNER S, WON J H, et al. Study on a Galileo signal and service plan for C-band[C]// Proceedings of ION GNSS 2008, Savannah, Georgia: USA, 2008:2515-2529.
- [15] 熊于菽. GMSK 调制解调技术研究[D]. 重庆:重庆大学,2007.
- [16] Recommendation ITU-R. SA. 509-3; Space Research Earth Station and Radio Astronomy Reference Antenna Radiation Pattern for Use in Interference Calculations, Including Coordination Procedures, for Frequencies Less than 30 GHz[R]. Geneva:ITU,2014.
- [17] 张柯,白燕. 基于 STK 的新一代北斗导航卫星可见性仿真分析[J]. 电子设计工程,2017,25(15):153-157.
- [18] Recommendation ITU-RM. 1583-1; Interference Calculations Between Non-Geostationary Mobile-Satellite Service or Radio Navigation-Satellite Service Systems and Radio Astronomy Telescope Sites[R]. Geneva:ITU,2007.
- [19] Recommendation ITU-R. RA. 1631. Reference Radio Astronomy Antenna Pattern to be Used for Compatibility Analyses between Non-GSO Systems and Radio Astronomy Service Stations based on the E_{pf}d Concept[R]. Geneva:ITU,2003.