

地球站跟踪模式对NGSO-GSO系统间 频率兼容性评估的影响研究

姚秀娟¹, 董苏惠^{1,2}, 高翔¹, 王静¹, 智佳¹, 孙云龙¹

(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 100049)

摘要: 针对NGSO星座系统在上行Ka频段和下行Ku频段对GSO卫星系统之间的频率兼容性仿真分析场景, 在对地球站的常用跟踪模式对频率兼容性计算结果的影响程度进行定量化分析的基础上, 提出一种基于频率兼容性评估的NGSO-GSO地球站跟踪模式分析方法。以ITU实际登记的Telesat和CHNSAT-98E卫星网络资料为例, 对上下行通信链路在地球站不同跟踪模式下的频率兼容性仿真数据进行比对分析, 提出一种在满足ITU-R S.1323建议书总干扰保护标准的前提下, 地球站可用跟踪策略的建议。研究成果可作为NGSO-GSO间系统兼容性分析及地球站跟踪计划制定的借鉴。

关键词: 地球站; 跟踪模式; 频率兼容; 干扰评估; NGSO星座系统

中图分类号: TN972

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2021002

Research on the Influence of Earth Station Tracking Modes on Frequency Compatibility Evaluation Between NGSO-GSO Systems

YAO Xiujuan¹, DONG Suhui^{1,2}, GAO Xiang¹, WANG Jing¹, ZHI Jia¹, SUN Yunlong¹

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

2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Aiming at the simulation analysis scenarios of frequency compatibility between NGSO constellation system and GSO satellite system in the Ka uplink and Ku downlink frequency band, one tracking mode of the earth station of NGSO constellation was proposed. By calculation results analysis, the quantitative influence was depicted in common tracking mode of the earth station, such as ephemeris guided tracking, single pulse automatic tracking, and sidelobe tracking. And taking the parameters registered on ITU of Telesat and CHNSAT-98E systems as an example, the simulation data was compared and analyzed in different tracking modes of the earth station. Then, one available tracking strategy of the NGSO constellation station was proposed, which is under the constraint of recommendation ITU-R S.1323. The research results can be used as a reference for NGSO-GSO system compatibility analysis, also the tracking plan formulation of earth stations.

Keywords: earth station, tracking mode, frequency compatibility, interference evaluation, NGSO constellation system

1 引言

非对地静止轨道 (Non-Geostationary-Orbit, NGSO) 星座系统的大量部署使空间频谱和轨道资源异常紧张, 国内外对此做了大量的研究工作^[1-5]。在大规模星座系统的通信性能方面, 参考文献[2]对Telesat、OneWeb、Starlink三大星座系统的频率带宽分配、波束特性以及系统吞吐量进行

了比较研究; 参考文献[3-4]对NGSO星座的组网性能进行了分析和研究; 参考文献[5]对天地一体化信息网络的发展情况进行了综合性的论述。在NGSO-GSO系统间的频率兼容性方面, 参考文献[6-7]研究了NGSO与对地静止轨道 (Geostationary-Orbit, GSO) 的最坏共线干扰及共存场景, 并在此基础上提出了基于功率控制的干扰缓解

收稿日期: 2021-01-11; **修回日期:** 2021-03-02

基金项目: 中国科学院空间科学战略性先导科技专项 (No. XDA15060100); 中科院复杂航天系统电子信息技术重点实验室择优基金项目 (No. Y42613A32S)

Foundation Items: Chinese Academy of Sciences Strategic Priority Program on Space Science(No. XDA15060100), CAS Key Laboratory of Integrated Avionics and Information Technology for Complex Aerospace Systems Selected Foundation Program(No. Y42613A32S)

技术；参考文献[8-10]提出了GSO卫星系统和LEO卫星系统间的频谱共享方法；参考文献[11-14]对NGSO星座系统与GSO卫星系统间的同频干扰问题进行了分析计算。在NGSO星座系统对GSO卫星系统的频率保护方面，国际电信联盟（International Telecommunication Union, ITU）提出了一系列的建议措施，如ITU-R S.1323-2建议书^[15]中，对于30 GHz以下GSO/FSS（Fixed Satellite Service, 固定卫星业务）、NGSO/FSS、NGSO/MSS（Mobile Satellite System, 移动卫星系统）卫星网络馈线链路被其他同向FSS网络允许的干扰评估方面，提出了长期集总干扰噪声比（Interference-to-Noise Ratio, INR） $I/N > -12.2$ dB的时间概率不能超过10%的要求；ITU-R S.1325-3建议书^[16]中，提出了NGSO/FSS间或NGSO/FSS对GSO/FSS网络同频同向短时干扰分析的方法。这些工作给NGSO-GSO系统间的频率兼容性评估提供了基础参照条件。

在星座系统的实际在轨运行场景中，一般不会只设计一种工作模式。除了星上系统具有姿态调整、波束切换等功能外，为了提高系统可用度和灵活性，地球站一般会设置星历引导跟踪、单脉冲自动跟踪、旁瓣跟踪等多种跟踪模式。地球站的不同跟踪模式与星上通信系统的姿态调整相配合，形成了星一地链路之间的灵活通信模式。星一地之间的多种通信模式或组合通信模式对两个系统之间的频率兼容性计算结果产生不同程度的影响，甚至会影响系统间共存能力的整体评估。因此，有必要开展不同通信模式对频率兼容性评估的量化计算方法的研究。

本文通过建立NGSO星座系统与GSO卫星系统间的共存场景，重点研究地球站的跟踪模式对NGSO-GSO系统间的频率兼容性评估的影响。

2 NGSO星座系统与GSO系统间共存场景

在NGSO-GSO共存场景中，重点分析NGSO星座系统对GSO卫星系统的干扰场景，建立的两个系统间共存的上下行链路干扰场景示意如图1、图2所示。

在地心惯性参考系中，干扰系统NGSO卫星轨迹方程 $\mathbf{R}_{\text{NGSO}}$ 为

$$\mathbf{R}_{\text{NGSO}} = \begin{bmatrix} x_{\text{NGSO}} \\ y_{\text{NGSO}} \\ z_{\text{NGSO}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{\text{ngso}} [\cos(\nu + \omega) \cos(\Omega) - \sin(\nu + \omega) \sin(\Omega) \cos(I_{\text{nc}})] \\ R_{\text{ngso}} [\cos(\nu + \omega) \sin(\Omega) + \sin(\nu + \omega) \cos(\Omega) \cos(I_{\text{nc}})] \\ R_{\text{ngso}} \sin(\nu + \omega) \sin(I_{\text{nc}}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中， Ω 为NGSO卫星的升交点经度； ω 为NGSO卫星的

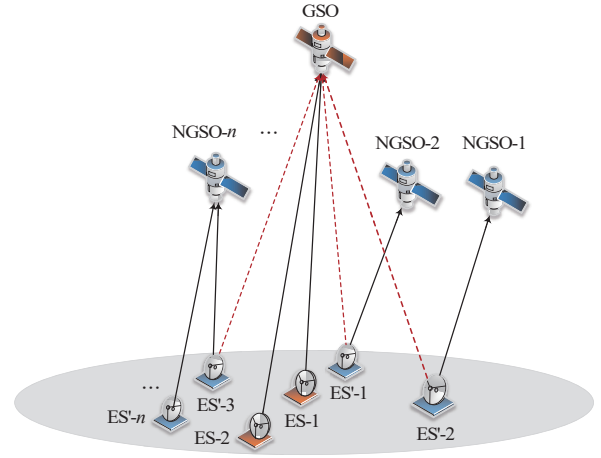


图1 NGSO星座系统与GSO卫星系统上行链路干扰场景示意

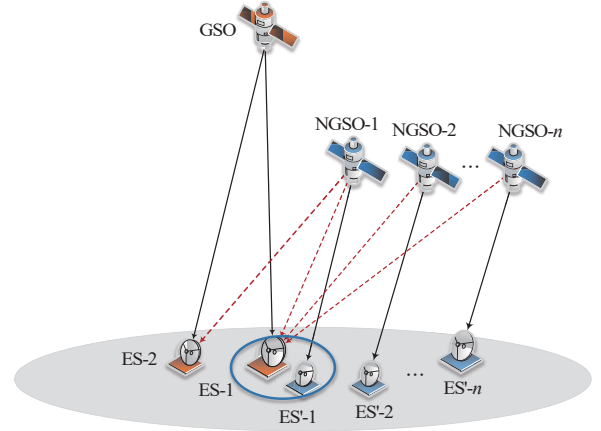


图2 NGSO星座系统与GSO卫星系统下行链路干扰场景示意

近地点角距； ν 为NGSO卫星的真近点角； R_{ngso} 为NGSO卫星到地球中心的距离； I_{nc} 为卫星轨道面倾角。

在地心惯性参考系中，受扰系统GSO卫星轨迹方程 $\mathbf{R}_{\text{GSO}}$ 为

$$\mathbf{R}_{\text{GSO}} = \begin{bmatrix} x_{\text{GSO}} \\ y_{\text{GSO}} \\ z_{\text{GSO}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{\text{gso}} \cos(\text{lat}_{\text{gso}}) \cos(\text{lon}_{\text{gso}} + \Omega_{\text{e}} t) \\ R_{\text{gso}} \cos(\text{lat}_{\text{gso}}) \sin(\text{lon}_{\text{gso}} + \Omega_{\text{e}} t) \\ R_{\text{gso}} \sin(\text{lat}_{\text{gso}}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中， lat_{gso} 为GSO卫星的对地纬度； lon_{gso} 为GSO卫星的经度； Ω_{e} 为地球自转的角速度； R_{gso} 为GSO卫星到地球中心的距离。

在地心惯性参考系中，地球站的轨迹方程 $\mathbf{R}_{\text{ES}}$ 为

$$\mathbf{R}_{\text{ES}} = \begin{bmatrix} x_{\text{ES}} \\ y_{\text{ES}} \\ z_{\text{ES}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_{\text{e}} + \text{alt}_{\text{es}}) \cos(\text{lat}_{\text{es}}) \cos(\text{lon}_{\text{es}} + \Omega_{\text{e}} t) \\ (R_{\text{e}} + \text{alt}_{\text{es}}) \cos(\text{lat}_{\text{es}}) \sin(\text{lon}_{\text{es}} + \Omega_{\text{e}} t) \\ (R_{\text{e}} + \text{alt}_{\text{es}}) \sin(\text{lat}_{\text{es}}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中， lat_{es} 为地球站的纬度； lon_{es} 为地球站的经度； alt_{es} 为

地球站的海拔高度,采用ITU建议书ITU-R P.1511中的地形高度数据作为参考值^[17]; Ω_e 为地球自转的角速度; R_e 为地球的半径。

其中受扰GSO系统地球站的仰角 ε 为

$$\varepsilon = \arccos \left(\frac{R_{\text{gso}}}{d_{\text{es} \rightarrow \text{gso}}} \sqrt{1 - \cos^2(\text{lon}_{\text{es}} - \text{lon}_{\text{gso}}) \cos^2(\text{lat}_{\text{es}})} \right) \quad (4)$$

式中, $d_{\text{es} \rightarrow \text{gso}}$ 为地球站至GSO卫星的距离。

受扰GSO系统地球站的方位角 φ_z 为

$$\varphi_z = \begin{cases} \beta, & \text{当星下点位于地球站东北向} \\ 360 - \beta, & \text{当星下点位于地球站西北向} \\ 180 - \beta, & \text{当星下点位于地球站东南向} \\ 180 + \beta, & \text{当星下点位于地球站西南向} \end{cases} \quad (5)$$

其中, β 为

$$\beta = \arcsin \left(\frac{\sin(|\text{lon}_{\text{es}} - \text{lon}_{\text{gso}}|)}{\sin(\arccos(\cos(\text{lon}_{\text{es}} - \text{lon}_{\text{gso}}) \cos(\text{lat}_{\text{es}})))} \right) \quad (6)$$

3 NGSO星座系统地球站常用跟踪模式及增益分布情况分析

3.1 跟踪模式对地球站天线方位角及仰角的影响分析

图3为地球站常用的3种跟踪模式的示意,其中 $\Delta\varphi$ 为

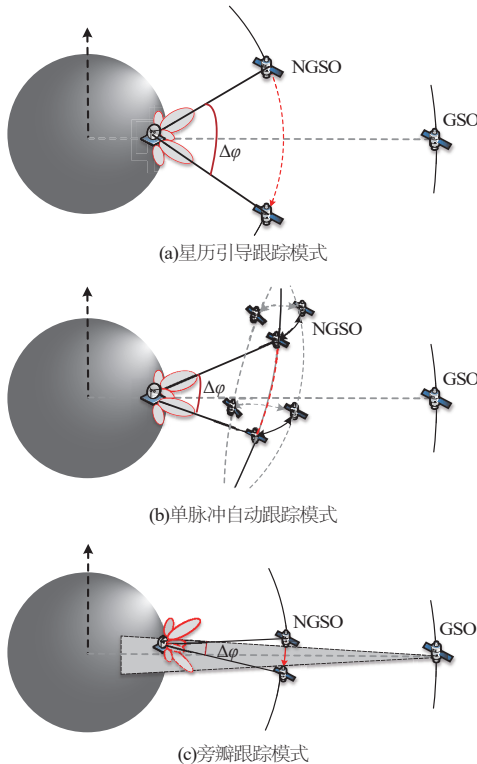


图3 NGSO地球站的3种跟踪模式示意

跟踪角度。在图3(a)的星历引导跟踪模式中,当卫星进入地球站的跟踪范围内时,地球站通过解析卫星的星历信息,从而引导地球站天线的方位角和俯仰角指向卫星。在图3(b)单脉冲自动跟踪模式中,地球站通过比较可视范围内的多个卫星信号,得到地球站天线波束指向目标卫星的方位角和仰角的偏差,从而使天线对准跟踪具有最强信号的卫星。图3(c)为旁瓣跟踪模式,是地球站为了避免接收端放大器饱和或者规避对GSO卫星的共线干扰而采用的一种跟踪模式。

为了方便分析,NGSO星座系统选用轨道高度为1000 km、轨道倾角为99.5°的Telesat星座系统;GSO卫星系统选用CHNSAT-98E(0°N, 98.2°E),轨道参数和频率参数通过查询其在ITU登记的卫星网络资料得到。分别研究地球站位于不同纬度地区的喀什(39.5°N, 75.9°E, 1307 m)、密云(40.4°N, 116.8°E, 109 m)、三亚(18.3°N, 109.3°E, 22 m)时,不同跟踪模式下天线增益的时变情况。分析过程中,下行链路频率为 $f_d=17.85$ GHz,上行链路频率为 $f_u=27.55$ GHz,地球站的最小跟踪仰角 $\varepsilon=10^\circ$ 。

图4为喀什、密云、三亚3个地球站采用星历引导跟踪和单脉冲自动跟踪模式时,地球站天线的仰角和方位角随时间的变化特性曲线。

由图4可知,采用星历引导跟踪模式时,3个站的方位角和俯仰角变化平稳。而当采用单脉冲自动跟踪模式时,喀什站和三亚站出现切换可视区域内的NGSO卫星的现象,从而导致方位角和俯仰角的跳变。旁瓣跟踪模式下的跟踪角度曲线与星历引导跟踪模式相差一个固定的偏离角度,不做单独区分。

3.2 跟踪模式对地球站天线增益分布的影响研究

忽略天线指向误差,在星历引导跟踪、单脉冲跟踪模式下,地球站的天线主轴对准被跟踪的目标NGSO卫星,达到峰值增益。图5反映了天线口径分别为0.5 m、1 m、1.8 m、2.4 m、7.5 m以及13 m时的增益变化情况,其中下行链路通信频率为17.85 GHz,上行链路通信频率为27.55 GHz。

当地球站采用旁瓣跟踪方式时,天线的接收或发射增益为参考天线方向图中的第一旁瓣增益,其主要取决于天线的口径或波束宽度。图6反映了NGSO星座系统地球站采用旁瓣跟踪模式时,天线口径分别为0.5 m、1 m、1.8 m、2.4 m、7.5 m以及13 m时的天线第一旁瓣增益的变化情况,其中相应地球站天线方向图参考建议书ITU-R S.465-6^[18],下行链路通信频率为17.85 GHz,上行链路通信频率为27.55 GHz。

图6中,对于频率为 $f_u=27.55$ GHz的上行链路,当天线口径 $D>1.09$ m时,地球站接收到的天线第一旁瓣增益

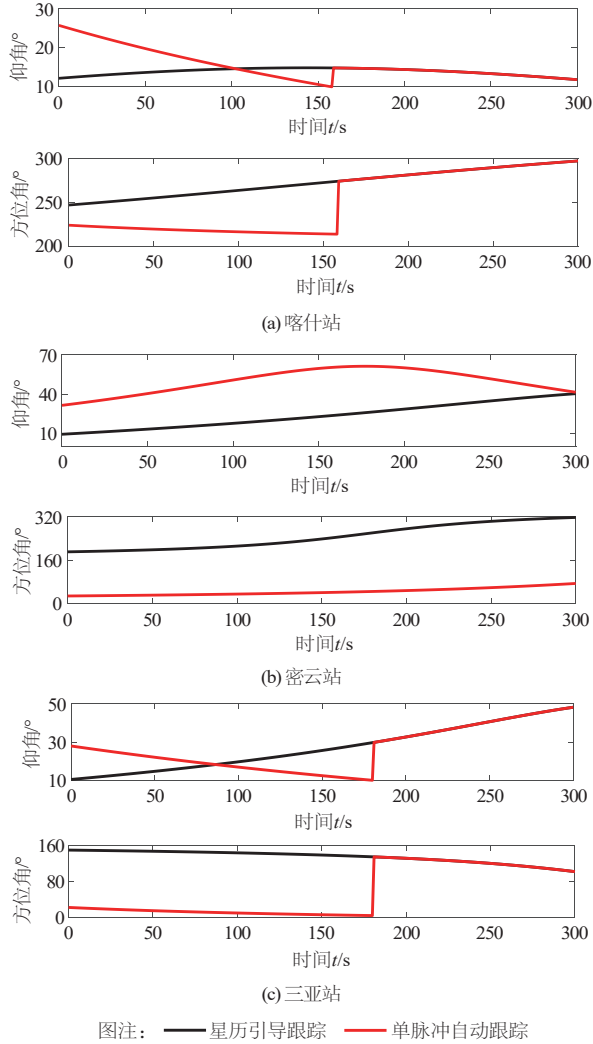


图4 在星历引导跟踪和单脉冲自动跟踪模式下，地球站的仰角和方位角随时间的变化特性曲线

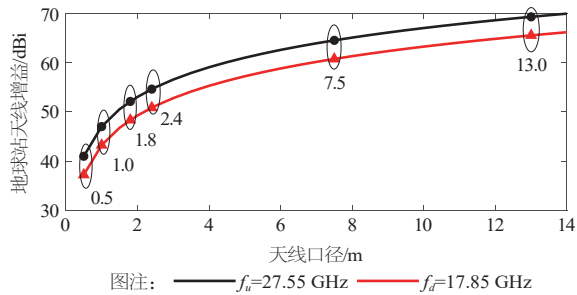


图5 天线口径为0.5 m、1.0 m、1.8 m、2.4 m、7.5 m以及13.0 m时的增益情况

不再随天线口径而变化，该值为32 dBi，如式(7)所示

$$G(D)=\begin{cases} 31.075+25\lg D, & D<1.09 \text{ m} \\ 32, & D\geq 1.09 \text{ m} \end{cases} \quad (7)$$

对于频率 $f_d=17.85$ GHz的下行链路，当天线口径

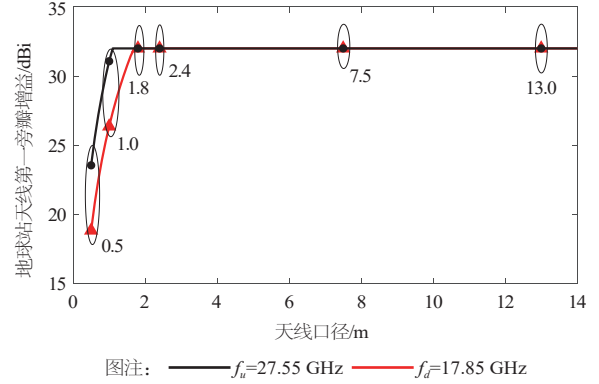


图6 天线口径为0.5 m、1.0 m、1.8 m、2.4 m、7.5 m以及13.0 m时的增益情况（第一旁瓣）

$D>1.68$ m时，地球站接收到的天线第一旁瓣增益不再随天线口径而变化，如式(8)所示

$$G(D)=\begin{cases} 26.363+25\lg D, & D<1.68 \text{ m} \\ 32, & D\geq 1.68 \text{ m} \end{cases} \quad (8)$$

在构建的NGSO-GSO场景中，研究地球站的跟踪模式，分析不同跟踪模式下地球站的方位角、仰角以及天线增益的变化情况，为定量化的干扰计算创造了条件。

4 干扰计算模型及评价指标

4.1 干扰计算模型及评价指标研究

根据图1和图2构建的干扰链路场景，分析NGSO星座系统对GSO卫星系统产生的集总干扰情况。在同向上行或下行链路干扰场景中，考虑到NGSO星座系统的链路动态性和复杂性，GSO系统的接收机可能会接收到多条来自NGSO星座系统的干扰信号。则GSO卫星系统接收机接收到的集总干扰噪声比 I/N 为

$$\left(\frac{I}{N}\right)_{\Sigma} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{M_i} I_{i,j} = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{M_i} \left(\frac{I}{N}\right)_{i,j} \quad (9)$$

式中， N_i 为干扰系统的发射机总数； M_i 为干扰系统中第 i 个发射机的干扰建链总数； N 为受扰系统接收机的等效噪声功率； $(I/N)_{i,j}$ 为干扰系统第 i 个发射机建立的第 j 条干扰链路上的干扰噪声比。

其中， $(I/N)_{i,j}$ 可由式(10)计算得到

$$\left(\frac{I}{N}\right)_{i,j} = \frac{p_i' \cdot g_{\text{txi}}'(\varphi_{\text{txij}}) \cdot g_{\text{rej}}(\varphi_{\text{reij}})}{k \cdot T \cdot W \cdot l_{i,j}} \quad (10)$$

式中， p_i' 为NGSO星座系统第 i 个发射机的发射功率，单位为W； $g_{\text{txi}}'(\varphi_{\text{txij}})$ 为NGSO星座系统第 i 个发射机在第 j 条干扰链路上的天线发射增益； φ_{txij} 为NGSO星座系统第 i 个发射机在第 j 条干扰链路上的离轴角； $g_{\text{rej}}(\varphi_{\text{reij}})$ 为GSO系统在第 j 条干扰链路上的接收增益； φ_{reij} 为GSO系统在第

j 条干扰链路上的离轴角； T 为GSO系统接收端的等效噪声温度，单位为K； W 为GSO系统通信链路的带宽，单位为Hz； k 是波尔兹曼常数，值为 1.38×10^{-23} J/K； $l_{i,j}$ 为NGSO星座系统第 i 个发射机在第 j 条干扰链路的链路损耗。

其他干扰评价指标，如载波干扰比 $(C/I)_{ij}$ 、载波干扰和噪声比 $(C/(I+N))_{ij}$ 的数学形式为

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{i,j} = \frac{p g_{\text{tx-max}} g_{\text{re-max}} l_{i,j}}{p_i' g_{\text{txi}}'(\varphi_{\text{txij}}) g_{\text{rej}}(\varphi_{\text{reij}}) l} \quad (11)$$

$$\left(\frac{C}{I+N}\right)_{i,j} = \frac{p g_{\text{tx-max}} g_{\text{re-max}} / l}{p_i' g_{\text{txi}}'(\varphi_{\text{txij}}) g_{\text{rej}}(\varphi_{\text{reij}}) / l_{i,j} + kTW} \quad (12)$$

式中， C 为GSO系统的载波功率； p 为GSO系统发射机的发射功率； l 为GSO系统通信链路损耗。

依据ITU-R S.1432-1^[19]建议书，NGSO星座系统和GSO卫星系统间可将 $(I/M)_{\text{th}} = -12.2$ dB作为系统是否受到了有害干扰评估的门限值。如果超过了该门限值，则认为GSO系统受到了有害干扰。根据ITU-R S.1323-2建议书^[15]，来自NGSO星座系统的长期集总干扰值超过门限值的时间概率百分比需保持在10%以内。

选取Telesat星座系统作为干扰系统，其上行及下行链路波束参数分别参考波束KAULEO、KADLEO，其轨道、波束及空中接口参数见表1；选取CHNSAT-98E作为受扰GSO系统的卫星，其上行及下行链路波束及空中接口参数分别参考波束KAUR、KADR，具体见表2。其中，Telesat系统星上天线方向图参考建议书ITU-R S.1528-0^[20]，地球站方向图参考建议书ITU-R S.465-6^[18]；GSO星上天线参考建议书ITU-R S.672-4^[21]，相应地球站天线方向图参考建议书ITU-R S.580-6^[22]或ITU-R S.465-6^[18]。

4.2 最坏干扰情况研究

在图1和图2中，当NGSO与GSO系统的地球站同址

表1 Telesat系统上行及下行链路的轨道、波束及空中接口参数

轨道及链路参数	下行链路	上行链路
轨道高度/km	1 000	
轨道倾角	99.5°	
卫星数量/颗	6 × 12	
通信频率/GHz	17.85	27.55
波束带宽/MHz	100	100
接收机接收天线峰值增益/dBi	63.8	26
发射功率/dBW	5	13
发射机发射天线峰值增益/dBi	25	49.9
极化方式	RHCP	RHCP
调制方式	BPSK	BPSK
接收机天线噪声温度/K	250	730

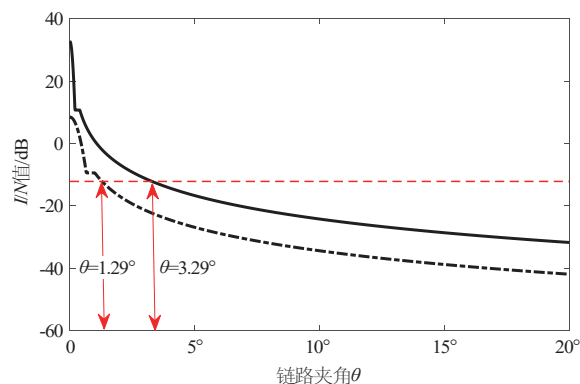
表2 CHNSAT-98E系统上行及下行链路波束及空中接口参数

链路参数	下行链路	上行链路
通信频率/GHz	17.85	27.65
波束带宽/MHz	300	300
接收机接收天线峰值增益/dBi	61	45
发射功率/dBW	29.9	29.4
发射机发射天线峰值增益/dBi	45	69.9
极化方式	LHCP	LHCP
调制方式	BPSK	BPSK
接收机天线噪声温度/K	120	800

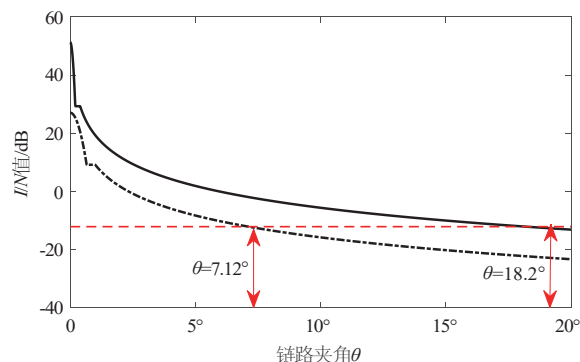
时，GSO系统接收到来自NGSO星座系统的最坏干扰，在该场景下研究系统间的干扰评估情况，具有一定的代表意义。链路夹角 θ 的计算可由式(13)得出

$$\theta = \arccos \left(\frac{(\mathbf{R}_{\text{NGSO}} - \mathbf{R}_{\text{ES}}) \cdot (\mathbf{R}_{\text{GSO}} - \mathbf{R}_{\text{ES}})}{|\mathbf{R}_{\text{NGSO}} - \mathbf{R}_{\text{ES}}| |\mathbf{R}_{\text{GSO}} - \mathbf{R}_{\text{ES}}|} \right) \quad (13)$$

参考表1和表2的参数，分析受扰CHNSAT-98E卫星系统上下行链路接收来自单颗Telesat卫星及星座的 I/N 值随链路夹角 θ 的变化情况，如图7所示。



(a) 单颗Telesat卫星干扰场景下



(b) Telesat卫星星座干扰场景下

图注：——下行链路 - - - -上行链路 - - - -12.2 dB

图7 受扰CHNSAT-98E系统上下行链路 I/N 值随链路夹角 θ 的变化曲线

由图7可以看出,在单颗NGSO卫星下行链路的干扰场景中,当链路夹角 $\theta < 3.29^\circ$ 时,GSO卫星系统地球站接收来自单颗NGSO卫星的 I/N 值超过GSO系统保护标准限值 -12.2 dB ;在上行链路仿真场景中,当链路夹角 $\theta < 1.29^\circ$ 时,GSO卫星系统卫星接收来自NGSO星座系统地球站的 I/N 值超过GSO卫星系统保护标准限值 -12.2 dB 。对于NGSO-GSO下行链路集总干扰场景,当链路夹角 $\theta < 18.2^\circ$ 时,GSO卫星系统地球站接收来自NGSO星座系统的集总 I/N 值超过GSO卫星系统保护标准限值;在上行链路仿真场景中,当链路夹角 $\theta < 7.12^\circ$ 时,GSO卫星系统卫星接收来自NGSO星座系统地球站的集总 I/N 值超过GSO卫星系统保护标准限值。图7中,上行链路的链路夹角阈值明显小于下行链路,主要是由于上行链路的频率高,干扰链路距离长,传输损耗远大于下行链路传输损耗。

当链路夹角即将达到门限范围时,需采取措施规避对GSO卫星系统的有害干扰产生,切换NGSO星座系统地球站天线的跟踪模式是可选策略之一。

5 地球站跟踪模式对干扰效果评估的影响分析及建议

5.1 地球站的布设情况分析

以轨道倾角为 99.5° 的Telesat星座系统和CHNSAT-98E(0°N , 98.2°E)GSO卫星系统为例。

将干扰NGSO星座系统Telesat地球站视距内卫星的集中分布范围 $60^\circ\text{S} \sim 60^\circ\text{N}$,作为地球站纬度的选址范围;将受扰GSO卫星系统卫星CHNSAT-98E波束可视的经度范围 $38^\circ\text{E} \sim 158^\circ\text{E}$ 作为地球站经度的选址范围,均匀选取40个位置组成地球站分布簇,保持干扰NGSO星座系统和受扰GSO卫星系统的地球站在同一位置,研究最坏干扰情况下不同跟踪模式对干扰评估效果的影响。

不同纬度布设的地球站视距内干扰NGSO星座系统Telesat卫星的数量主要集中在 $60^\circ\text{S} \sim 60^\circ\text{N}$ 范围内^[2],如图8所示,给出了不同纬度的地球站视距(Line of Sight, LOS)内Telesat系统卫星的平均数量。

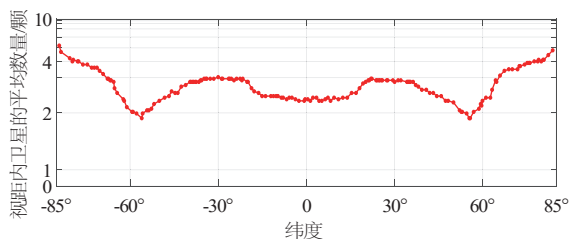


图8 不同纬度的地球站视距内Telesat系统卫星的平均数量

5.2 上行链路分析场景

考虑到受扰系统的地球站不论采用何种跟踪模式,干扰上行通信链路的传输损耗主要取决于受扰系统GSO卫星与干扰系统地球站的时空位置以及干扰系统地球站的跟踪模式。考虑到干扰NGSO星座系统上行链路的高动态性,干扰NGSO星座系统地球站一般采用星历引导跟踪模式来跟踪NGSO卫星。根据第4.2小节计算结果,当上行链路夹角 $\theta < 7.12^\circ$ 时,GSO卫星系统卫星接收的 I/N 值超过干扰保护标准限值 -12.2 dB 。因此,可在满足建链条件 $6\text{ dB} \leq [C/N]_{\min} \leq 10\text{ dB}$ ^[19,23,24]时调整干扰系统地球站发射天线的波束指向,采用天线旁瓣跟踪模式,使地球站天线的第一旁瓣对准被跟踪卫星,从而减小NGSO星座系统对GSO卫星系统的干扰。

在Telesat与CHNSAT-98E系统的上行干扰场景中,干扰地球站在采用星历引导跟踪模式的基础上,在第4节得到的上行链路夹角 $\theta < 7.12^\circ$ 的范围内,调整天线指向,切换为旁瓣跟踪模式,其中地球站的最小跟踪仰角 $\varepsilon = 10^\circ$ 。

在仿真时长为1 d,仿真步长为10 s的上行干扰场景中,出现了干扰地球站、Telesat卫星以及GSO卫星三者共线的情况,如图9所示。该图还反映了当干扰地球站天线采用星历引导和旁瓣跟踪的组合模式时对应的仰角时变情况。其中,干扰地球站位置为(30°N , 123.71°E)。

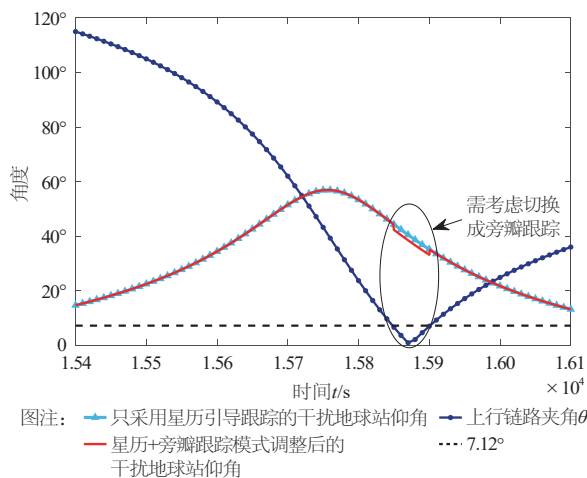


图9 干扰地球站天线采用星历引导和旁瓣跟踪的组合模式时仰角的调整情况

图10为干扰地球站采用不同跟踪模式对应的干扰噪声比 I/N 值在仿真时长内的时间累积百分比的变化特性曲线。

如图10所示,在1 d干扰仿真时长内,NGSO星座系统地球站采用星历引导跟踪和旁瓣跟踪的组合模式比单一采用星历引导跟踪模式的 I/N 超限值降低了2.82%。

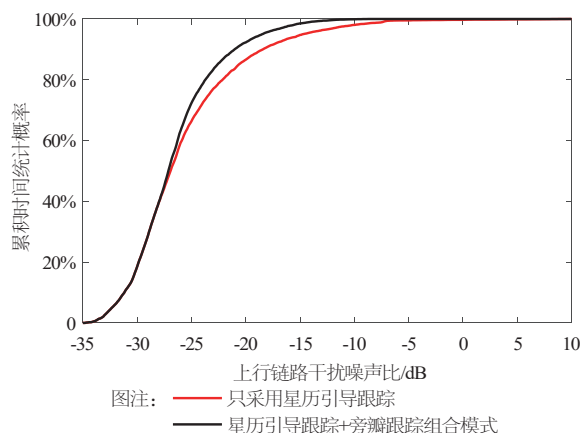


图10 Telesat与CHNSAT-98E系统间上行链路 I/N 的时间统计百分比曲线

5.3 下行链路分析场景

在下行链路干扰分析场景中,根据第4.2小节的计算结果,当下行链路夹角 $\theta < 18.2^\circ$ 时,GSO卫星系统地球站接收的 I/N 值超过干扰保护标准限值 -12.2 dB。同样,可在满足建链条件 $6 \text{ dB} \leq [C/M]_{\text{min}} \leq 10 \text{ dB}$ ^[19,23,24]时调整干扰系统星上发射天线的离轴角或者受扰系统地球站接收天线的波束指向,从而规避或减小NGSO星座系统对GSO卫星系统的干扰。本文重点讨论受扰GSO卫星系统地球站躲避干扰场景下的天线指向调整策略。

在仿真时长为1 d,仿真步长为10 s的下行干扰场景中,如图11所示,反映了当受扰地球站天线采用星历引导和旁瓣跟踪的组合模式时对应的仰角时变情况。其中,受扰地球站位置为 $(30^\circ\text{N}, 123.71^\circ\text{E})$ 。

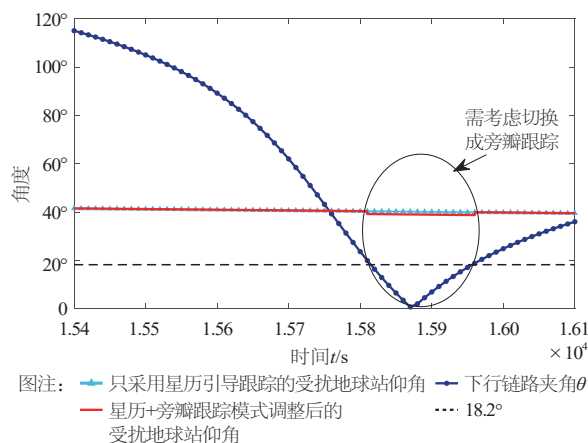


图11 受扰地球站天线采用星历引导和旁瓣跟踪的组合模式时仰角的调整情况

在Telesat与CHNSAT-98E系统的下行干扰场景中,

图12反映了CHNSAT-98E系统地球站采用不同的跟踪模式对应的干扰噪声比 I/N 值在仿真时长内的时间累积百分比的变化特性曲线,干扰仿真时长为1d,仿真步长为10 s,地球站的最小跟踪仰角。

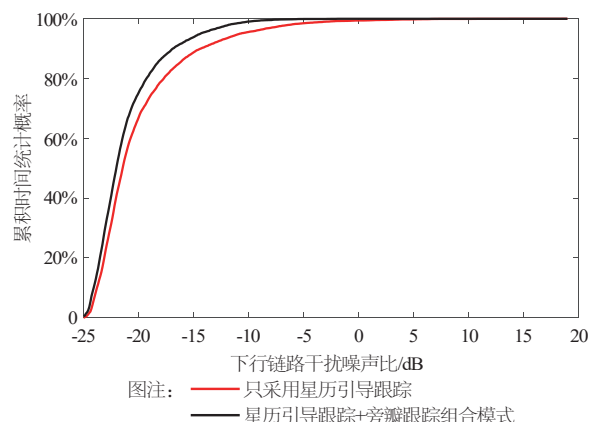


图12 Telesat与CHNSAT-98E系统间下行链路 I/N 的时间统计百分比曲线

如图12所示,在1 d干扰仿真时长内,受扰地球站采用星历引导跟踪和旁瓣跟踪的组合模式跟踪CHNSAT-98E卫星,比单一采用星历引导跟踪模式下的 I/N 超限值降低了4.36%,其他口径天线或波束指向下的分析方法与此相同。

考虑受扰地球站采用单脉冲自动跟踪方式跟踪CHNSAT-98E卫星,当Telesat卫星运行到受扰地球站接收天线主瓣的辐射区域内,需要根据受扰地球站接收到的信号强度,使天线对准跟踪具有最强信号的卫星,因此在该区域内需要判断地球站天线是否会继续跟踪CHNSAT-98E卫星。由表1和表2可得到,受扰地球站接收到来自Telesat系统卫星的最大信号功率为 -86.48 dBW ,接收到来自CHNSAT-98E卫星的最大信号功率为 -72.66 dBW ,即使Telesat卫星运行到受扰地球站接收天线主瓣的辐射区域时,受扰地球站仍继续跟踪CHNSAT-98E卫星。因此在本节构建的下行场景中,对于受扰地球站而言,忽略天线指向误差,采用单脉冲自动跟踪方式与采用星历跟踪方式跟踪CHNSAT-98E卫星具有相同的跟踪及干扰评估效果,不做单独区分。

对于下行链路,在干扰及受扰系统地球站同址的最坏干扰情况下,通过分析NGSO星座的轨道构型和链路波束及空中接口参数,得到超过GSO保护标准的链路夹角范围。必要情况下,受扰GSO卫星系统的地球站可通过调整接收天线指向的方式躲避来自NGSO星座系统的有害干扰。

参考文献：

- [1] RADTKE J, KEBSCHULL C, STOLL E. Interactions of the space debris environment with mega constellations—Using the example of the OneWeb constellation[J]. *Acta Astronautica*, 2017(131): 55-68.
- [2] DELPORTILLO I, CAMERON B G, CRAWLEY E F. A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband[J]. *Acta Astronautica*, 2019(159):123-135.
- [3] PELTON J N, JACQUÉ B. Distributed internet- optimized services via satellite constellations, *Handbook of Satellite Applications*[M]. New York: Springer Press, 2017: 249-269.
- [4] HANSON W A. Satellite internet in the mobile age[J]. *New Space*, 2016, 4(3): 138-152.
- [5] 吴巍. 天地一体化信息网络发展综述[J]. *天地一体化信息网络*, 2020, 1(1): 1-16.
WU W. Survey on the development of space-integrated-ground information network[J]. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2020, 1(1): 1-16.
- [6] SHARMA S K, CHATZINOTAS S, OTTERSTEN B. In-line interference mitigation techniques for spectral coexistence of GEO and NGE0 satellites[J]. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 2016, 34(1):11-39.
- [7] POURMOGHADAS A, SHARMA S K, CHATZINOTAS S, et al. On the spectral coexistence of GSO and NGSO FSS systems: power control mechanisms and a methodology for inter-site distance determination[J]. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 2017, 35 (5): 443-459.
- [8] 王闯, 胡婧, 李永强, 等. 空间信息网络中面向双卫星的频谱共享方法[J]. *航空学报*, 2019, 40(9): 252-264.
WANG C, HU J, LI Y Q, et al. Spectrum sharing method for dual satellite in space information network[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2019, 40(9): 252-264.
- [9] 王悦, 王权, 袁丽, 等. GEO及NGSO卫星通信系统融合应用研究[J]. *航天器工程*, 2020, 29(4): 11-18.
WANG Y, WANG Q, YUAN L, et al. Research on fusion application of GEO and NGSO satellite communication system[J]. *Spacecraft Engineering*, 2020, 29 (4): 11-18.
- [10] 张泓湜, 蒋伯峰. 基于空间隔离的低轨卫星系统频谱共享方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2018, 44 (9): 1909-1917.
ZHANG H S, JIANG B F. Spatial isolation methodology for spectral coexistence in LEO satellite systems[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2018, 44(9): 1909- 1917.
- [11] 韩锐, 石会鹏, 李伟, 等. 我国Ka频段卫星固定业务系统间干扰特性分析研究[J]. *电波科学学报*, 2017, 32 (5): 619-625.
- HAN R, SHI H P, LI W, et al. Interference analysis of China's NGSO constellation system to GSO system with fixed-satellite service in Ka band[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2017, 32 (5): 619-625.
- [12] PARK C S, KANG C G, CHOI Y S, et al. Interference analysis of geostationary satellite networks in the presence of moving non-geostationary satellites[C]// 2010 2nd International Conference on IEEE, Information Technology Convergence and Services (ITCS). Piscataway: IEEE Press, 2010:1-5.
- [13] WANG Y F, DING X J, ZHANG G X. A novel dynamic spectrum-sharing method for GEO and LEO satellite networks[J]. *IEEE Access*, 2020(8):147895-147906.
- [14] WANG C, BIAN D M, SHI S C, et al. A novel cognitive satellite network with GEO and LEO broadband systems in the downlink case[J]. *IEEE Access*, 2018(6): 25987-26000.
- [15] ITU-R. Maximum permissible levels of interference in a satellite network (GSO/FSS; non-GSO/FSS; non-GSO /MSS feeder links) in the fixed-satellite service caused by other codirectional FSS networks below 30 GHz: ITU-R S.1323-2[S]. 2002.
- [16] ITU-R. Simulation methodologies for determining statistics of short-term interference between co-frequency, codirectional non-geostationary-satellite orbit fixed- satellite service systems in circular orbits and other non-geostationary fixed-satellite service systems in circular orbits or geostationary-satellite orbit fixed-satellite service networks: ITU-R S. 1325-3[S]. 2003.
- [17] ITU-R. Topography for Earth-to-space propagation modelling: ITU-R P.1511-2[S]. 2019.
- [18] ITU-R. Reference radiation pattern of earth station antennas in the fixed-satellite service for use in coordination and interference assessment in the frequency range from 2 to 31 GHz: ITU-R S.465-6[S]. 2010.
- [19] ITU-R. Apportionment of the allowable error performance degradations to fixed-satellite service (FSS) hypothetical reference digital paths arising from time invariant interference for systems operating below 30 GHz: ITU-R S.1432-1[S]. 2006.
- [20] ITU-R. Satellite antenna radiation patterns for non-geostationary orbit satellite antennas operating in the fixed-satellite service below 30 GHz: ITU-R S.1528-0[S]. 2001.
- [21] ITU-R. Satellite antenna radiation pattern for use as a design objective in the fixed-satellite service employing geostationary satellites: ITU-R S.6724[S]. 1997.
- [22] ITU-R. Radiation diagrams for use as design objectives for antennas of earth stations operating with geostationary satellites:

ITU-R S.580-6[S]. 2004.

[23] CCSDS. TM synchronization and channel coding 2017 recommendation for space data system standards: CCSDS 131.0-B-3[S]. 2017.

[24] CCSDS. TC synchronization and channel coding 2017 recommendation for space data system standards: CCSDS 231.0-B-3[S]. 2017.

[作者简介]



姚秀娟（1977-），中国科学院国家空间科学中心研究员，博士生导师，主要从事空间通信与频谱感知方面的研究工作。



董苏惠（1994-），中国科学院大学博士生，主要研究方向为空间频谱感知技术、认知无线电技术等。



高翔（1984-），中国科学院国家空间科学中心副研究员，主要从事卫星通信、空间频谱感知、数字信号处理，以及空间频轨资源兼容性分析技术等方面的研究工作。



王静（1990-），中国科学院国家空间科学中心在读博士后，主要研究方向为空间频谱资源兼容技术和空间频谱感知技术等。



智佳（1985-），中国科学院国家空间科学中心高级工程师，主要研究方向为互联网卫星星座频谱兼容性数据处理、航天设备地面综合测试技术等。



孙云龙（1996-），中国科学院国家空间科学中心工程师，主要研究方向为卫星网络频轨资源申报及规划、卫星网络干扰仿真等。