

NGSO通信星座系统间同频干扰场景与建模研究

李 伟¹, 严 康¹, 耿静茹², 王 文²

(1.国家无线电监测中心, 北京 100037;

2.中国科学院信息工程研究所, 北京 100093)

摘要: 针对非静止轨道(NGSO)通信星座系统存在的严重频率重叠问题, 在综合阐述典型系统频率资源规划使用现状的基础上, 全面分析多个NGSO通信星座系统同频共用情形下潜在的干扰场景, 并对每个场景下发生干扰风险的可能性进行初步定性评估。根据干扰场景特征, 探讨NGSO通信星座系统之间同频干扰分析的关键参数和模型, 并给出3种不同评价指标的同频干扰计算模型, 最后指出NGSO通信星座系统间同频干扰分析面临的挑战以及重点研究方向。研究结果可为NGSO通信星座系统之间的兼容共存提供参考。

关键词: 频率资源; NGSO通信星座系统; 同频干扰; 干扰场景; 干扰评价指标

中图分类号: TN91

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2021003

Research on Scenarios and Modeling of Co-Frequency Interference Between NGSO Communication Constellation Systems

LI Wei¹, YAN Kang¹, GENG Jingru², WANG Wen²

1.The State Radio Monitoring Center, Beijing 100037, China

2. Institute of Information Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

Abstract: Aiming at the serious problem of frequency overlapping among non-geostationary satellite orbit (NGSO) communication constellation systems. The potential interference scenarios under multiple NGSO communication constellation systems sharing the same spectrum band was comprehensively analyzed, with the aid of analyzing frequency plan of typical constellation systems. Then the possibility of interference risk in each scenario was qualitatively evaluated. According to the characteristics of interference scenarios, the key parameters and models for the co-frequency interference analysis between the NGSO communication constellation systems were discussed, and the computing models of co-frequency interference based on three different protect criterion were presented. Finally, challenges and key research directions of co-frequency interference analysis between NGSO communication constellation systems were pointed out. The research can provide a reference for the study of compatibility and coexistence between broadband Internet constellation systems.

Keywords: frequency resource, NGSO communication constellation system, co-frequency interference, interference scenario, interference evaluation criterion

1 引言

当前, 地面无线通信网络的服务范围有限, 满足不了偏远地区及航空、航海等特殊环境下的通信需求^[1-2], 6G网络将有望提供100%的覆盖率, 实现空天地海一体化网络^[3-5]。为了满足全球无缝覆盖的需求, 6G网络不局限于陆地无线通信网络, 其将与卫星通信、海洋通信和

无人机通信等结合, 形成以地面网络为基础、以空间网络为拓展的信息网络^[6-7]。凭借空间立体广域覆盖、高通量大带宽, 尤其是微小卫星制造技术的发展以及卫星发射成本的降低, 非静止轨道(Non-Geostationary Satellite Orbit, NGSO)通信星座网络被认为是未来6G体系架构中一种十分有潜力的解决方案^[8]。

收稿日期: 2021-02-01; **修回日期:** 2021-03-05

基金项目: 国家重点研发计划(No.2020YFB1806100); 国家自然科学基金(No.91738101)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program(No. 2020YFB1806100), The National Natural Science Foundation of China(No.91738101)

近年来,NGSO通信星座系统热潮兴起,以OneWeb、SpaceX为代表的欧美公司纷纷提出建设NGSO通信星座系统来提供高速率宽带互联网服务^[9]。目前全球公开发布的NGSO通信星座系统计划有20余个,其中,OneWeb申请发射大约4.8万颗卫星,SpaceX公司申请发射大约4.2万颗卫星。除了这些公开的星座系统计划,从世界各国向国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)申报的频率轨道资源技术资料来看,全球范围内至少还有100多个公司或机构有意向建设NGSO通信星座系统。

新兴的NGSO通信星座系统拟使用的频率非常集中,而且卫星数目巨大,用户终端遍布全球,NGSO通信星座系统之间以及其与静止轨道(Geostationary Satellite Orbit, GSO)的干扰链路数量急剧增加,NGSO宽带星座系统将对同频段上的GSO卫星系统和其他NGSO通信星座系统产生潜在有害干扰^[10]。因此,在大规模部署NGSO通信星座系统之前,研究NGSO通信星座系统之间以及其与GSO卫星系统之间的同频干扰显得尤为必要。

由于GSO卫星及其地球站的数量有限,地理位置相对固定,干扰场景复杂度较低,目前报道NGSO通信星座系统与GSO卫星系统之间的干扰分析方法和干扰评价指标的文献较多^[11-15]。比如通过计算 I/N 、 C/I 或受扰系统接收端的等效功率通量密度(Equivalent Power Flux Density, EPFD),并对一定时间内上述干扰评价指标进行数学统计,分析超过规定限值的时间百分比,进而刻画出发生干扰事件的强度和频度。然而,相较于NGSO通信星座系统与GSO卫星系统而言,NGSO通信星座系统之间的干扰分析研究处于起步探索阶段,目前相关报道较少^[16-19]。在NGSO通信星座系统之间的同频共用场景,卫星之间以及卫星与地球站的相对位置、空间几何关系均是时变的,从而干扰链路特性也是时变的。再者,新兴的NGSO通信星座系统的波束多、卫星数量多,并且是对地多重覆盖,致使干扰链路数量也多,干扰呈现发生概率高、强度大、时变、集总效应等特点。简单的单链路干扰场景已不足以描述当前复杂多变的干扰环境,需要使用多链路集总干扰场景来描述。因此,NGSO通信星座系统之间的干扰场景十分复杂,且干扰分析计算尤为复杂,传统的干扰分析方法和干扰评价指标不再适用于NGSO宽带星座系统间的干扰分析。

2 NGSO通信星座系统频率资源使用现状

目前全球范围内已有100余家公司或机构通过各国政府向ITU提交了NGSO通信星座系统的卫星网络资料申请并进行了相关登记,并且卫星网络资料数量呈现快速增长的趋势。国外很多通信运营商和新兴科技公司都在致

力于设计和建设NGSO通信星座系统。例如正着手部署的美国Starlink星座和英国OneWeb星座,以及正在推进研发的亚马逊Kuiper星座和加拿大Telesat星座等。

根据O3b、OneWeb、Starlink、Kuiper及Telesat系统公开的技术资料^[20-24],这些NGSO通信星座系统的构型参数和频率资源使用规划分别如表1和图1所示。由表1和图1可知,O3b、OneWeb、Starlink、Kuiper及Telesat星座系统集中使用10.7~14.5 GHz、17.8~20.2 GHz、27.5~30 GHz、37.5~43.5 GHz、47.2~50.2 GHz频段,覆盖了卫星通信全部好用及可用的频段资源,不同系统的用户链路之间、用户链路和馈线链路之间、馈线链路之间均存在用频重叠。再者,由于大规模NGSO宽带星座系统具有很强的频率独享性,NGSO通信星座系统间产生潜在严重干扰的可能性较大,相互间实现频率共用十分困难。

3 NGSO通信星座系统之间潜在干扰场景分析

由地球站到卫星的链路被称为上行链路,由卫星到地球站的链路被称为下行链路。卫星系统通过上下行通信链路进行数据传输,当不同系统的使用频段相同或部分重叠且有用链路与干扰链路夹角较小时,系统间可能会发生严重干扰。根据信号传输方向,干扰类型一般分为上行链路间的干扰和下行链路间的干扰。根据系统链路类型,干扰场景可分为用户链路之间的干扰、用户链路和馈线链路之间的干扰以及馈线链路之间的干扰。结合上述两种干扰类型划分,考虑到某些频段的双向使用,NGSO通信星座系统之间的干扰场景具体可划分为9种,具体见表2。其中,NGSO_A卫星系统为施扰系统,NGSO_B为受扰系统。由表2可知,涉及频段双向使用的干扰场景,其干扰风险由站间距以及天线波束的隔离角度决定。此外,表2还对各干扰场景发生风险做出零风险和有风险简单定性分析。

3.1 上行链路干扰场景

上行链路干扰场景如图2所示,在NGSO_B卫星可视范围内,NGSO_A系统的多个地球站到其对应NGSO_A卫星的上行链路对NGSO_B地球站到其卫星的上行链路产生干

表1 典型大规模NGSO星座系统构型参数

星座名称	卫星数量/颗	轨道高度/km	申请频段
O3b	42	8 062	Ku/Ka
OneWeb	720	1 200	Ku/Ka/V
Starlink	4 409	550、1 110、550、540、560、570	Ku/Ka/V
	7 518	345.6、340.8、335.9	V
Kuiper	3 236	590、610、630	Ka
Telesat	117	1 000、1 248	Ka/V

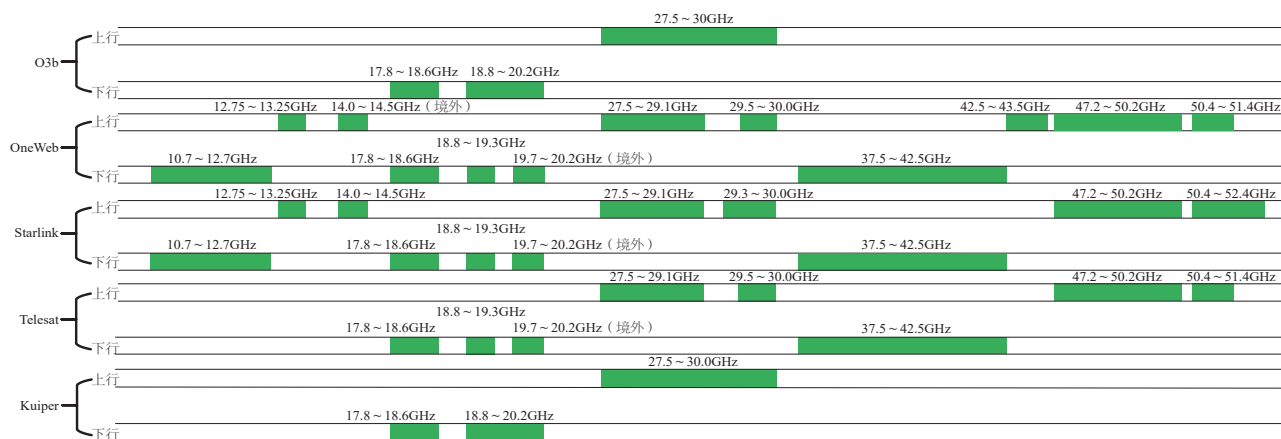


图1 星地混合移动回传系统示意

表2 干扰场景划分及干扰风险定性分析

对比项	NGSO _A 的信关站发射机	NGSO _A 的卫星发射机	NGSO _A 的用户终端发射机
NGSO _B 的信关站接收机	①信关站→信关站 零干扰风险，除非双向使用频段（频段既可用作上行链路，也可用作下行链路）。即使频段被双向使用，风险也可忽略不计。因为信关站均处于地面，它们指向卫星的天线波束具有良好的角度分离，且信关站天线彼此可以保持足够的距离	②卫星→信关站 有干扰风险，当NGSO _A 的下行链路传输与NGSO _B 信关站期望的下行链路传输共信道且波束对准时，NGSO _A 对NGSO _B 的接收造成干扰	③用户终端→信关站 零干扰风险，除非双向使用频段。即使频段被双向使用，风险也很小。因为信关站和用户终端都处于地面，它们指向卫星的天线波束具有良好的角度分离，但这取决于用户终端和信关站之间的距离
NGSO _B 的卫星接收机	④信关站→卫星 有干扰风险，当NGSO _A 的上行链路传输与NGSO _B 卫星接收机期望的上行链路传输共信道且波束对准时，NGSO _A 对NGSO _B 的接收造成干扰	⑤卫星→卫星 零干扰风险，除非频段被双向使用或一个系统使用FSS频段进行卫星间业务。风险有限，但当其他卫星系统试图增加星间链路，干扰风险将会增大	⑥用户终端→卫星 有干扰风险，当NGSO _A 的上行链路传输与NGSO _B 卫星接收机期望的上行链路传输共信道且波束对准时，NGSO _A 对NGSO _B 的接收造成干扰
NGSO _B 的用户终端接收机	⑦信关站→用户终端 零干扰风险，除非双向使用频段。即使频段双向使用，风险也很小。因为信关站和用户终端都在地面，它们指向卫星的天线波束具有良好的角度分离，但这取决于从信关站到用户终端的距离	⑧卫星→用户终端 有干扰风险，当NGSO _A 的下行链路传输与NGSO _B 用户终端接收机期望的下行链路传输共信道且共线时，NGSO _A 对NGSO _B 的接收造成干扰	⑨用户终端→用户终端 零干扰风险，除非双向使用频段。即使频段双向使用，风险也很小，因为用户终端都处于地面，因此它们指向卫星的天线波束具有良好的角度分离，但这取决于用户终端之间的距离

扰。由于存在多条干扰链路，故通常采用集总干扰来反映干扰情况。图2中的地球站既可以是信关站，也可以是用户终端。如果是用户终端，对应表2中的干扰场景⑥，如果是信关站，对应表2中的干扰场景④。

当NGSO_A通信频率与NGSO_B双向使用时，即当NGSO_A的上行链路通信频率与NGSO_B的下行链路通信频率相同或部分重叠时，NGSO_A地球站的发射将给NGSO_B地球站的接收带来潜在干扰风险，如图3所示。若两系统地球站均为信关站时，对应表2中的干扰场景①；若两系统地球站均为用户终端时，对应表2中的干扰场景⑨；若NGSO_A系统地球站为信关站，NGSO_B系统地球站为用户终端，对应表2中的干扰场景⑦；若NGSO_A系统地球站为用户终端，NGSO_B系统地球站为信关站，对应表2中的干扰场景③。

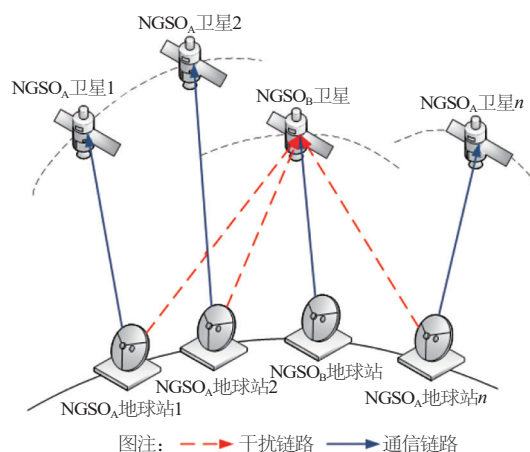


图2 上行链路集总干扰场景

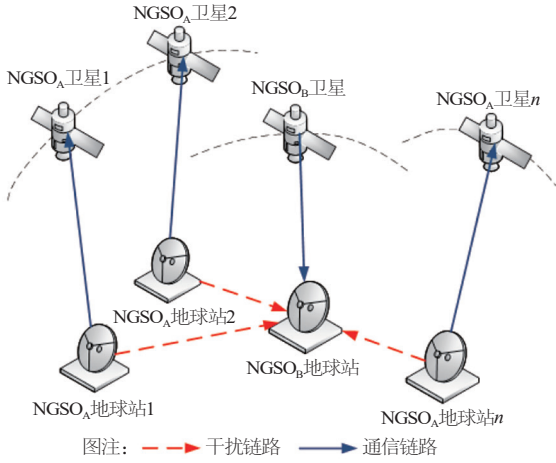


图3 频率双向使用场景下的上行链路集总干扰示意

3.2 下行链路干扰场景

下行链路干扰场景如图4所示，在NGSO_B地球站可视范围内，NGSO_A星座的多颗卫星到其对应NGSO_A地球站的下行链路对NGSO_B卫星到其地球站的下行链路产生干扰。由于存在多条干扰链路，故通常采用集总干扰来表示干扰情况。如果图4中地球站是用户终端，对应表2中的干扰场景⑧，如果是信关站，则对应表2中的干扰场景②。

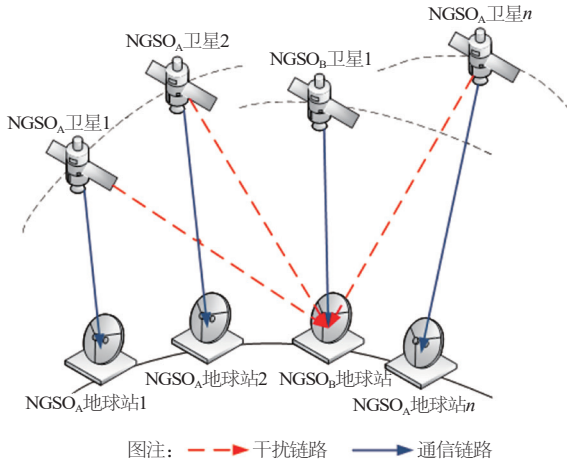


图4 下行链路集总干扰场景示意

当NGSO_A通信频率与NGSO_B双向使用时，即当NGSO_A的下行链路通信频率与NGSO_B的上行链路通信频率相同或部分重叠时，此时NGSO_A卫星的发射给NGSO_B卫星的接收带来干扰风险，如图5所示，对应表2中的干扰场景⑤。

4 NGSO通信星座系统同频干扰分析模型

本节介绍NGSO通信星座系统同频干扰建模涉及的

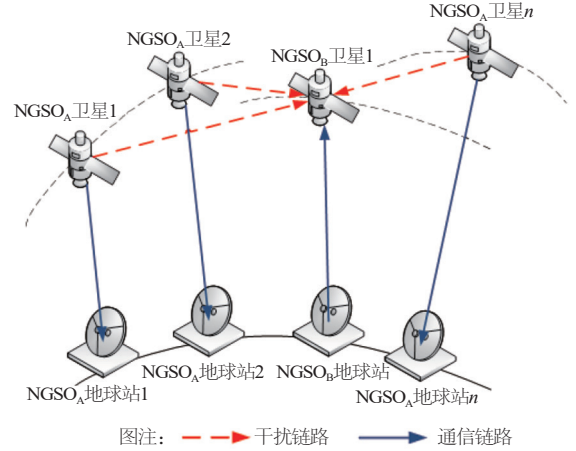


图5 频率双向使用场景下的下行链路集总干扰示意

关键参数以及3种基于不同评价指标的干扰建模方法。

4.1 天线方向图模型

4.1.1 NGSO卫星天线模型

对于卫星天线来说，若天线方向图可测量，则使用测量得到的天线方向图。若不能测量，对于圆波束或椭圆波束的卫星固定业务（Fixed Satellite Service, FSS）系统中的多波束NGSO卫星天线，则参考ITU-R S.1528建议书提供的卫星天线方向图进行干扰分析^[25]。现有研究通常选取 $(D/\lambda) < 35$ 的情况，具体公式如下

$$G(\varphi) = \begin{cases} G_{\max} - 3(\varphi/\varphi_b)^2, & \varphi_b < \varphi < Y \\ G_{\max} + L_s - 25\log(\varphi/Y), & Y < \varphi < Z \\ L_F, & Z < \varphi < 180 \end{cases} \quad (1)$$

其中， $Y = \varphi_b(-L_s/3)^{1/2}$ ； $Z = Y \times 10^{0.04(G_{\max} + L_s - L_F)}$ 。

对于中地球轨道系统卫星天线方向图，有

$$L_s = -12, Y = 2\varphi_b$$

$$G(\varphi) = 20\log(D/\lambda) + 3.5 - 25\log(\varphi/\varphi_b), 2\varphi_b < \varphi < Z \quad (2)$$

对于低地球轨道系统卫星天线方向图，有

$$L_s = -6.75, Y = 2\varphi_b$$

$$G(\varphi) = 20\log(D/\lambda) + 5.65 - 25\log(\varphi/\varphi_b), 1.5\varphi_b < \varphi < Z \quad (3)$$

其中， φ 为主轴偏离角； $G(\varphi)$ 为角度 φ 对应的增益（dBi）； $G_{\max}$ 为主瓣最大增益（dBi）； φ_b 为3dB波瓣宽度的一半值（°）； L_s 为近主瓣的旁瓣电平（dBi）； L_F 为最远旁瓣电平，理想方向图该值趋近于0（dBi）； λ 为频段范围内最大波长（m）； D 为天线直径（m）。

4.1.2 NGSO地球站天线模型

在现有干扰分析研究中，通常有以下两种NGSO地球站天线方向图可供选择，ITU-R S.1428建议书给出的NGSO地球站天线方向图适用的频率范围为10.7~30 GHz^[26]，通常用

于移动地球站。现有研究中通常选取 $(D/\lambda) > 100$ 的情况, 具体公式如下

$$G(\varphi) = \begin{cases} G_{\max} - 2.5 \times 10^{-3} (D/\lambda \times \varphi)^2, & 0 < \varphi < \varphi_m \\ G_1, & \varphi_m \leq \varphi < \varphi_r \\ 29 - 25 \log(\varphi), & \varphi_r \leq \varphi < 10 \\ 34 - 30 \log(\varphi), & 10 \leq \varphi < 34.1 \\ -12, & 34.1 \leq \varphi < 80 \\ -7, & 80 \leq \varphi < 120 \\ -12, & 120 \leq \varphi \leq 180 \end{cases} \quad (4)$$

其中, $G_{\max} = 20 \log(D/\lambda) + 8.4$; $G_1 = -1 + 15 \log(D/\lambda)$;

$\varphi_m = \frac{20\lambda}{D} \sqrt{G_{\max} - G_1}$; $\varphi_r = 15.85(D/\lambda)^{-0.6}$; G_1 为第1个旁瓣增益。

与ITU-R S.1428建议书不同的是, ITU R-S.465建议书给出的NGSO地球站天线方向图通常用于非移动地球站, 适用的频率范围为2~31 GHz^[27]。假定卫星固定业务系统的地球站天线辐射方向图绕视轴旋转对称, 具体公式如下:

$$G = \begin{cases} 32 - 25 \log \varphi, & \varphi_{\min} \leq \varphi < 48 \\ -10, & 48 \leq \varphi_{\min} < 180 \end{cases} \quad (5)$$

其中, 当 $(D/\lambda) \geq 50$ 时, $\varphi_{\min} = \max(1, 100\lambda/D)$, 通常用于GSO地球站; 当 $(D/\lambda) < 50$ 时, $\varphi_{\min} = \max(2, 114(D/\lambda)^{-1.09})$, 通常用于NGSO地球站。

4.2 传播模型及空间损耗

针对干扰场景建模时涉及的无线电波传播模型, ITU-R P系列建议书中给出了一系列传播损耗模型及计算方法^[28-34], 具体见表3。对工作在Ku/Ka频段的卫星系统, 大多数干扰分析研究仅考虑自由空间传播损耗, 云雾雨等大气现象导致的传播损耗并没有被考虑在内。对工作在Q/V频段的卫星系统, 信号的传播将严重受到降雨的影响, 所以除了自由空间传播损耗, Q/V频段的干扰分析还需重点考虑雨衰影响。

表3 ITU-R P系列相关的建议书

建议书编号	描述
ITU-R P.341	无线电链路传输损耗概念
ITU-R P.525	自由空间衰减的计算
ITU-R P.526	绕射传播
ITU-R P.530	设计地面视距系统所需的传播数据和预测方法
ITU-R P.618	雨衰模型
ITU-R P.676	大气层衰减
ITU-R P.840	云雾模型
ITU-R P.619	对流层闪烁模型

对于自由空间路径损耗 (Free Space Loss, FSL), 参考ITU-R P.525, 可表示为

$$FSL(\lambda, d) = (\lambda/4\pi d)^2 \quad (6)$$

其中, λ 表示波长; d 为站星距, 单位为m。

若转换为dB正值, 用 L_{bf} 表示, 则为

$$L_{bf} = 20 \log(4\pi d/\lambda) \quad (7)$$

若转换为频率和距离的公式, 则为

$$L_{bf} = 32.4 + 20 \log f + 20 \log d \quad (8)$$

其中, f 表示频率, 单位为MHz; 距离 d 的单位为km。

对于降雨衰减, 根据ITU-R P.618可知, 单位降雨衰减 α (dB/km) 为

$$\alpha = aR_p^b \quad (9)$$

其中, a 和 b 与频率和极化方式有关, 取值详见ITU-R P.838建议书; p 为时间百分比; R_p 为降雨率。

此时总的降雨衰减为

$$A = \alpha L \quad (10)$$

其中, L 是信号经过降雨区域的有效路径长度, 单位为km。

L 的计算方法如下

$$L_s = (h_R - h_O) / \sin EI \quad (11)$$

$$L = L_s r_p \quad (12)$$

其中, L_s 表示几何路径长度; h_R 为降雨高度; h_O 为地球站海拔高度; EI 为仰角, 一般取值为 $EI > 10^\circ$; r_p 为衰减因子。

综上所述, 降雨衰减的表达式为

$$A = aR_p^b L_s r_p \quad (13)$$

4.3 NGSO通信星座系统同频干扰场景建模方法

本节将介绍3种基于不同干扰评价指标的干扰场景建模方法。

4.3.1 基于I/N的干扰场景建模方法^[12, 17, 18]

I/N 是干扰噪声比, 是两个卫星系统干扰的通用衡量指标。以NGSO通信星座系统下行链路干扰场景为例, 对于NGSO_B某个受扰接收地球站, 可能会存在多颗NGSO_A干扰卫星, 设干扰卫星总个数为 n , 则总的干扰功率为整个星座中 n 颗干扰卫星分别产生的干扰功率之和

$$I = \left(\frac{\lambda_d}{4\pi} \right)^2 \sum_{j=1}^n P_{ts,j} A_{BM} G_{ts,j}(\theta_{1,j}) G_{re,j}(\theta_{2,j}) \frac{1}{D_j^2} \quad (14)$$

则系统受到的 I/N 为

$$\frac{I}{N} = \frac{1}{B_{ts} k T_e} \left(\frac{\lambda_d}{4\pi} \right)^2 \sum_{j=1}^n P_{ts} A_{BM} G_{ts,j}(\theta_{1,j}) G_{re,j}(\theta_{2,j}) \frac{1}{D_j^2} \quad (15)$$

式中, P_{ts} 为NGSO_A卫星发射功率; B_{ts} 为NGSO_A卫星发射带宽; $\theta_{1,j}$ 为第 j 个NGSO_A卫星发射天线在NGSO_B地球站接收天线方向上的离轴角; $\theta_{2,j}$ 为NGSO_B地球站接收天线在第 j 个NGSO_A卫星发射天线方向上的离轴角; $G_{ts}(\theta_{1,j})$ 为第 j 个NGSO_A卫星发射天线的离轴增益; $G_{re}(\theta_{2,j})$ 为NGSO_B地球站接收天线的离轴增益; λ_d 为下行链路工作载波的波长; D_j 为第 j 个NGSO_A卫星到NGSO_B地球站的距离; k 为

玻尔兹曼常数, 为 1.38×10^{-23} J/K; T_e 为NGSO_B地球站接收系统的等效噪声温度; A_{BM} 为带宽调整因子;

由于两个NGSO通信星座系统使用的载波频段可能不是完全相同的, 只是有一部分频段重叠, 通常需要使用带宽调整因子对带宽和重叠程度的差值进行调整, 只考虑共频部分的干扰情况。

此时的重叠频段Overlap为:

$$\text{Overlap} = \min \left\{ B_w, B_l, \frac{(B_w + B_l)}{2} - |f_w - f_l| \right\} \quad (16)$$

A_{BM} 为

$$A_{BM} = 10 \lg \left(\frac{\text{Overlap}}{B_l} \right) \quad (17)$$

式中, B_w 为有用信号带宽; B_l 为干扰信号带宽; f_w 为有用信号中心频率; f_l 为干扰信号中心频率。

对于两个卫星通信系统之间的干扰, ITU-R S.1432-1建议书有较为明确的建议: 考虑主用频率重叠所引起的通信性能和可用度恶化, 以系统噪声的百分数来表示干扰容忍限能够被转换成相应的干扰噪声比 I/N , 并推导出 $I/N = -12.2$ dB的门限。对于干扰计算所得 I/N 进行时间统计分析, 绘制累积分布函数图。若 I/N 超过 -12.2 dB的累积概率在规定的百分比范围之内, 则两个卫星系统之间不会发生有害干扰。

4.3.2 基于EPFD的干扰场景建模方法

参考《无线电规则》第22条^[35], 卫星系统的集总干扰等效功率通量密度定义为干扰系统的所有发射站(卫星或地球站)对位于地球表面的受扰系统接收站(地球站)或非静止轨道的受扰系统接收站(卫星)产生的功率通量密度的总和, 对应的计算公式(单位: dB(W/m²))为

$$\text{EPFD} = 10 \lg \left[\sum_{j=1}^n 10 \frac{P_{ts,j} G_{ts,j}(\theta_{1,j}) G_{re,j}(\theta_{2,j})}{10 \cdot 4\pi D_j^2 G_{re,max}} \right] \quad (18)$$

式中, $G_{re,max}$ 为NGSO_B系统接收站天线的最大增益(单位: dB)。

根据《无线电规则》第22条, 在考虑NGSO系统对GSO系统的干扰时, NGSO系统的等效功率通量密度需满足一定的限值, 针对不同的共用频率范围和干扰链路, NGSO系统所需满足的EPFD限值可参考《无线电规则》第22条的表22-1至表22-4。统计干扰计算所得的EPFD值, 绘制累积分布函数。当EPFD超过规定限值的概率不超过相应频率的干扰时间百分比, 则可视为没有发生有害干扰。针对NGSO系统之间的干扰也可参考上述限值进行分析。

4.3.3 基于C/I的干扰场景建模方法

C/I 是载波功率(目标信号)与干扰功率(干扰信

号)的比值, 用以衡量接收环境与接收机质量^[19]。 C/I 值较大时, 说明载波信号强度相对于干扰较强, 接收质量较好。同样以下行链路干扰场景为例, 多颗干扰卫星的集总 C/I 的计算方法为

$$C/I = 10 \lg \frac{P(0) G_{ts}(0) G_{re}(0) / D_0^2}{\sum_{j=1}^n P_{ts,j} A_{BM} G_{ts,j}(\theta_{1,j}) G_{re,j}(\theta_{2,j}) \frac{1}{D_j^2}} \quad (19)$$

式中, P_0 为NGSO_B卫星的发射功率; $G_{ts}(0)$ 为NGSO_B卫星发射天线增益, 认为NGSO_B地球站接收天线对准NGSO_B卫星发射天线最大增益方向, 若存在角度偏离则可将偏离角带入式(19); $G_{re}(0)$ 为NGSO_B地球站接收天线增益, 认为NGSO_B卫星发射天线对准NGSO_B地球站接收天线最大增益方向, 若存在角度偏离则可将偏离角带入式(19); D_0 为NGSO_B卫星到NGSO_B地球站的距离。

评估干扰计算所得 C/I 值, 若最坏 C/I 值较大, 足以影响受扰链路正常通信, 应判定为发生有害干扰, 需要采取进一步干扰缓解措施。

5 总结与展望

对于NGSO通信星座系统之间的同频干扰分析研究, 干扰分析基础理论基本处于空白。国际上关于该领域的研究也刚刚起步, 目前国际上干扰分析方法尚未明确, 干扰判定标准还未统一, 没有权威的干扰评估方法。下一步, 结合当前系统规模庞大的特点, 从干扰场景、干扰计算、干扰判定标准、干扰减缓途径等方面入手, 探索干扰机理和演变规律, 研究相关理论和关键技术, 形成一套巨型NGSO通信星座系统之间的干扰场景建模、干扰计算、干扰综合评价、干扰减缓途径的研究方法、仿真分析验证手段和场景演示模型, 为巨型NGSO通信星座系统之间同频共存探索理论基础和研究手段。

参考文献:

- [1] 刘悦, 廖春发. 国外新兴卫星互联网星座的发展[J]. 科技导报, 2016, 34(7): 139-148.
LIU Y, LIAO C F. The development of emerging satellite internet constellations[J]. Science & Technology Review, 2016, 34 (7): 139-148.
- [2] 孙晨华, 肖永伟, 赵伟松, 等. 天地一体化信息网络低轨移动及宽带通信星座发展设想[J]. 电信科学, 2017, 33(12): 43-52.
SUN C H, XIAO Y W, ZHAO W S, et al. Development conception of space-ground integrated information network LEO mobile and broadband internet constellation[J]. Telecommunications Science,

- 2017, 33(12): 43-52.
- [3] CAO X B, YANG P, ALZENAD M, et al. Airborne communication networks: a survey[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018: 36(9): 1907-1926.
- [4] 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[J]. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2020, 1 (1): 1-16.
- [5] ZHAO J, YU H, XU Q. 6G mobile communication network: Vision, challenges and key technologies[J]. *Science China Information Sciences*, 2019: 49(8): 963-987.
- [6] LIU J, SHI Y, FADLULLAH Z M, et al. Space-air-ground integrated network: A survey[J]. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 2018: 20(4): 2714-2741.
- [7] QIU J, GRACE D, DING G, et al. Air-ground heterogeneous networks for 5G and beyond via integrating high and low altitude platforms[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(6):140-148.
- [8] ZHOU D, SHENG M, LUO J, et al. Collaborative data scheduling with joint forward and backward induction in small satellite networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(5):3443-3456.
- [9] 刘洁, 潘坚, 曹世博. 低轨互联网星座业务发展趋势分析[J]. *中国航天*, 2015(7): 17-21.
- LIU J, PAN J, CAO S B. Analysis on the development trend of low-orbit Internet constellation service[J]. *SPACE System and Technology*, 2015(7): 17-21.
- [10] PORTILLO I D, 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(6): 123-135.
- [11] 靳瑾, 李娅强, 张晨, 等. 全球动态场景下非静止轨道通信星座干扰发生概率和系统可用性[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2018, 58(9): 833-840.
- JIN J, LI Y Q, ZHANG C, et al. Occurrence probability of co-frequency interference and system availability of non-geostationary satellite system in global dynamic scene[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2018, 58(9): 833-840.
- [12] SHARMA S K, CHATZINOTAS S, OTTERSTEN B. Inline interference mitigation techniques for spectral coexistence of GEO and NGEOSATs[J]. *International Journal of Satellite Communications & Networking*, 2016, 34(1): 11-39.
- [13] WANG H W, WANG C, YUAN J, et al. Coexistence downlink interference analysis between LEO system and GEO system in Ka band[C]//*IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 465-469.
- [14] ZHANG C, JIN J, ZHANG H, et al. Spectral coexistence between LEO and GEO satellites by optimizing direction normal of phased array antennas[J]. *China Communications*, 2018, 15(6): 18-27.
- [15] 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.
- [16] FORTES J M P, SAMPAIO-NETO R, MALDONADO J E A. An analytical method for assessing interference in interference environments involving NGSO satellite networks[J]. *International Journal of Satellite Communications*, 1999, 17(6): 399-419.
- [17] 周傲松, 陈道明. 非静止轨道卫星网络间下行数据传输同频干扰的分析方法[J]. *通信学报*, 2000, 21(3): 32-37.
- ZHOU A S, CHEN D M. An analysis method of co-frequency interference for data transmission in down-link between non-geostationary orbit satellite networks[J]. *Journal of China Institute of Communications*, 2000, 21(3): 32-37.
- [18] 李睿, 曾德贤. 非静止轨道卫星网络中同频干扰问题的分析与仿真[J]. *电讯技术*, 2008(8): 6-10.
- LI R, ZENG D X. Analysis and simulation of co-frequency interference in non-geostationary orbit satellite network[J]. *Telecommunication Engineering*, 2008(8): 6-10.
- [19] 周傲松. 涉及非静止通信卫星星座的干扰计算方法[J]. *中国空间科学技术*, 2001(3): 68-72.
- ZHOU A S. An calculation method for frequency interference involving non-GSO telecommunication satellite constellation[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2001(3): 68-72.
- [20] O3b. Limited modification to U.S. market access grant for the O3b MEO satellite system[R]. 2017.
- [21] OneWeb. Federal Communications Commission Satellite Space Station Authorizations(Technical and Operational Description)[R]. 2016.
- [22] Space Exploration Holdings, LLC. For approval for orbital deployment and operating authority for the SpaceX NGSO satellite system[R]. 2016.
- [23] Telesat Canada. Petition for declaratory ruling to grant access to the U.S. market for Telesat's NGSO constellation[R]. 2016.
- [24] Kuiper Systems LLC. Application for authority to launch and operate a non-geostationary satellite orbit system in Ka-band frequencies[R]. 2019.
- [25] 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[S]. 2001.
- [26] ITU-R. Reference FSS earth-station radiation patterns for use in

interference assessment involving non-GSO satellites in frequency bands between 10.7 GHz and 30 GHz: ITU-R S.1428[S]. 2001.

- [27] 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[S]. 2010.
- [28] ITU-R. The concept of transmission loss for radio links:ITU-R P.341[S]. 2019.
- [29] ITU-R. Calculation of free-space attenuation: ITU-R P.525[S]. 2019.
- [30] ITU-R. Propagation by diffraction : ITU-R P.526[S]. 2019.
- [31] ITU-R. Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems: ITU-R P.530[S]. 2017.
- [32] ITU-R. Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication systems: ITU-R P.618[S]. 2017.
- [33] ITU-R. Attenuation by atmospheric gases and related effects: ITU-R P.676[S]. 2019.
- [34] ITU-R. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods: ITU-R P.838[S]. 2005.
- [35] ITU-R. Artical 22 in radio regulations[R]. 2016.

[作者简介]



李伟（1984-），国家无线电监测中心高级工程师，主要研究方向为卫星通信系统/移动通信系统的频率兼容技术、干扰减缓技术。



严康（1989-），国家无线电监测中心工程师，主要研究方向为卫星通信系统/移动通信系统的频率兼容技术、干扰减缓技术。



耿静茹（1996-），中国科学院信息工程研究所博士生，主要研究方向为卫星通信干扰。



王文（1988-），中国科学院信息工程研究所高级工程师，主要研究方向为电磁环境安全感知、卫星系统频率兼容性分析。