

文章编号:1007-5321(2020)06-0110-08

DOI:10.13190/j.jbupt.2020-189

基于协作的大规模 NGSO 星座间频率兼容共存研究

李伟, 潘冀, 严康, 魏文康, 张磊

(国家无线电监测中心, 北京 100037)

摘要: 针对大规模非静止轨道(NGSO)通信星座系统间的同频干扰问题,在综合分析传统干扰评价指标的相互转换关系的基础上,建立了基于链路夹角的干扰分析模型,将通信干扰约束转化为几何构型约束.通过卫星选择和链路组合选择定义了系统可用性指标,基于此,开展了基于协作的大规模 NGSO 星座间频率兼容共存研究,并给出了协作模式下 NGSO 星座的工作方式.仿真中,选取 OneWeb 和 Telesat 系统实际工作参数,评估了全球范围内系统的可用性.结果表明,非协作模式下系统平均可用性为 72.82%,在 27.18% 的时间内系统之间将产生严重干扰,而协作模式下系统平均可用性为 96.00%,协作模式将大幅提升 NGSO 星座系统之间的频率兼容性.

关键词: 大规模非静止轨道通信星座; 干扰分析; 非协作/协作模式; 系统可用性; 频率兼容

中图分类号: TN927

文献标志码: A

Research on Frequency Compatibility of Collaboration-Based Large-Scale NGSO Constellations

LI Wei, PAN Ji, YAN Kang, WEI Wen-kang, ZHANG Lei

(The State Radio Monitoring Center, Beijing 100037, China)

Abstract: Aiming at the problem of co-frequency interference between large-scale non-geostationary orbit (NGSO) constellation systems, we established the interference analysis model of link angle to convert communication interference constraints into geometric configuration constraints based on the comprehensive analysis of the mutual conversion relationship of the traditional interference evaluation indicators. Furthermore, the system availability index is defined by satellite selection and link combination selection. On basis of this, we carry out some researches on frequency compatibility of collaboration-based large-scale NGSO constellations, in which the working mode of NGSO constellation in cooperation mode is given. In this simulation, the actual working parameters of OneWeb and Telesat systems are selected to evaluate the system availability on a global scale. The result illustrates that the average system availability in non-cooperative mode is 72.82% since the severe interference will occur between systems in 27.18% of the time, while the average system availability in cooperative mode is 96.00%, which means cooperation mode will greatly improve the compatibility of NGSO communication constellation systems.

Key words: large-scale non-geostationary orbit communication constellations; interference analysis; non-cooperative/cooperative mode; system availability; frequency compatibility

收稿日期: 2020-10-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(91738101); 国家重点研发计划项目(2020YFB1806100)

作者简介: 李伟(1984—), 男, 高级工程师

通信作者: 潘冀(1963—), 女, 正高级工程师, E-mail: panji@src.org.cn.

近些年来, OneWeb、SpaceX 等公司纷纷提出通信星座计划, 试图打造由成百上千颗的非静止轨道 (NGSO, non-geostationary orbit) 卫星组成的星座系统^[1]. 与静止轨道 (GSO, geostationary orbit) 卫星系统为局部地区提供静态服务相比, NGSO 通信星座系统具有大规模、高频段、大带宽、低时延等特点, 且可为全球范围提供动态服务, NGSO 通信星座已成为当下最有应用前景的卫星通信技术之一^[2].

目前, OneWeb、Starlink、Telesat 和 Kuiper 等典型 NGSO 通信星座系统在频率资源的使用上非常集中, 规划的主用频段均为 Ku/Ka 频段, 且均向国际电联 (ITU, international telecommunication union) 申报了 Q/V/E 频段作为面向下一代 NGSO 通信星座系统的储备资源, 多个系统在 Ku/Ka 甚至 Q/V 频段同频共用的局面在所难免. 再者, 由于这些 NGSO 通信星座系统在全球可实现无缝覆盖, 且卫星规模庞大, 系统之间发生有害干扰的可能性极高, 所以, 在 NGSO 通信星座系统频率资源的使用、规划和方案设计阶段, 开展系统之间的频率兼容共存分析研究显得尤为必要.

现有的频率兼容共存分析方法大多针对 NGSO 卫星与 GSO 卫星共存的场景^[3-6]. Park 等^[3]从误码率的角度分析了 NGSO 卫星系统对 GSO 卫星系统的干扰程度, 重点探究了 NGSO 卫星数量以及隔离角等因素对干扰结果的影响. Sharma 等^[4]提出了一种自适应功率控制方法, 通过调整地球轨道 (MEO, medium earth orbit) 卫星或地面终端的发射功率, 以达到在满足 MEO 链路服务质量的同时确保对 GSO 系统的干扰低于其门限值. Wang 等^[5]评估了 Ka 频段 LEO 系统对 GSO 系统的下行干扰, 并探究了隔离角策略对干扰结果的影响. Pourmoghadas 等^[6]针对 NGSO 系统与 GSO 系统的下行干扰场景, 提出了 3 种基于功率控制的干扰消除方法, 用以减缓 NGSO 卫星对 GSO 地球站造成的共线干扰. Wang 等^[7-9]利用频谱共享技术实现 GSO 和 NGSO 卫星共存. 但是上述研究主要针对 NGSO 系统和 GSO 系统之间的干扰场景, 对 NGSO 通信星座系统间干扰分析的借鉴意义不大, 主要是因为在未来大规模 NGSO 通信星座共存的动态场景下, 涉及的时变参数更多, 距离、指向、衰减、功率和平台姿态等链路特征均不断变化, 在此基础上, 随着地球站、NGSO 卫星数目的增多, 链路数目快速增长, 计算分析量成几何级数增长, 复杂性陡增. NGSO 通信星座系统之间的频率兼

容共存分析将是系统在用频上面临的首要难题^[10-11].

针对 NGSO 通信星座系统 (尤其大规模星座) 同频共存场景, 公开报道的文献较少, 频率兼容共存分析方法尚处于摸索阶段. Zhang 等^[12]通过频谱感知技术规避 NGSO 系统间干扰. Jin 等^[13]给出了 NGSO 通信星座系统干扰约束下的地面系统可用性分析方法. ITU-R S. 1325 建议书中给出了一种累积概率统计方法以评估系统间的短时干扰^[14]. ITU-R S. 1431 建议书中指出使用卫星分集、卫星选择策略、频率信道化等方法可以提升 NGSO 系统之间的频率共享性^[15], 但未给出具体的方法. 上述研究主要针对特定干扰场景, 没有针对整个星座系统进行全景式分析, 所涉及的仿真对象大多具有特定的轨道特征, 如零倾角轨道.

针对上述问题, 建立了 NGSO 通信星座系统间干扰分析的基本模型, 基于产生星地链路干扰的机理, 通过基于链路夹角的干扰分析方法, 将 NGSO 通信星座系统间的通信干扰约束转化为几何构型约束, 并给出夹角阈值的计算方法. 基于上述方法, 提出了非协作/协作模式下的 NGSO 通信星座系统可用性定义和协作模式下的系统工作方法, 并对比了 2 种模式下的系统兼容性. 以 OneWeb 卫星网络^[16]和 Telesat 卫星网络^[17]这 2 个典型通信星座系统为例, 验证了所提出的同频干扰分析方法的有效性. 通过对比仿真结果可知, 协作模式可显著提升系统的兼容性, 为未来多个 NGSO 通信星座系统同频共存提供了一种思路.

1 NGSO 星座系统间的干扰模型与分析方法

1.1 干扰评价指标统一性分析

干扰评价指标是衡量干扰严重程度的物理量, 常用的干扰评价指标包括噪声温度相对增量 $\Delta T/T$ 、干扰噪声功率比 I/N 、载波干扰功率比 C/I 、载波干扰噪声功率比 $C/(N+I)$ 、等效功率通量密度 (EPFD, equivalent power flux density) E 等, 这些指标可表示为

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{P'_{T,i,0} G_{T,i}(\theta_{1,i}) G_{R,i}(\theta_{2,i})}{kT} \left(\frac{\lambda_2}{4\pi d_i} \right)^2 \quad (1)$$

$$\frac{I}{N} = \frac{P'_{T,i} G_{T,i}(\theta_{1,i}) G_{R,i}(\theta_{2,i})}{kTW} \left(\frac{\lambda_2}{4\pi d_i} \right)^2 \quad (2)$$

$$\frac{C}{I} = \frac{P_{1,T} G_{1,T}(0) G_{1,R}(0) (\lambda_1/d)^2}{P'_{T,i} G_{T,i}(\theta_{1,i}) G_{R,i}(\theta_{2,i}) (\lambda_2/d_i)^2} \quad (3)$$

$$\frac{C}{I+N} = \frac{P_{1,T} G_{1,T}(0) G_{1,R}(0) (\lambda_1/4\pi d)^2}{P'_{T,i} G_{T,i}(\theta_{1,i}) G_{T,i}(\theta_{2,i}) (\lambda_2/4\pi d_i)^2 + kTW} \quad (4)$$

$$E = \sum_i \left[P_i \frac{G_{T,i}(\theta_i) \cdot G_{R,i}(\varphi_i)}{4\pi d_i^2 \cdot G_{R,\max}} \right] \quad (5)$$

其中: $P'_{T,i,0}$ 为第 i 条干扰链路重叠频带内的最大发射功率谱密度(当载频小于 15 GHz 时,在谱密度最大的 4 kHz 内取平均值;载频大于 15 GHz 时,在谱密度最大的 1 MHz 内取平均值), $P'_{T,i}$ 为重叠频带内第 i 条干扰链路的发射功率, P_i 为基准带宽内第 i 条干扰链路的发射功率, $P_{1,T}$ 为通信信号的发射功率, $G_{T,i}(\cdot)$ 为第 i 条干扰链路的发射增益, $G_{R,i}(\cdot)$ 为第 i 条干扰链路的接收增益, $G_{1,T}(\cdot)$ 为通信链路的发射增益, $G_{1,R}(\cdot)$ 为通信链路的接收增益, $G_{R,\max}$ 为峰值接收增益, k 为玻尔兹曼常数, λ_1 为通信信号的波长, λ_2 为干扰信号的波长, d_i 为第 i 条干扰链路的距离, d 为通信链路的距离, W 为通信带宽。

根据式(1)~式(4)可得到如图 1 所示的转换关系,其中 W' 为根据干扰载波功率和其最大功率谱密度的比值定义的等效带宽, W_{ref} 为基准带宽, W_{OL} 为干扰系统与受扰系统重叠部分的带宽. 因此,从能量的角度,以上各项指标具有统一性. 对于 NGSO 系统间的干扰评价指标尚无明确标准,一般采用超过干扰门限值的时间占比等指标来评估干扰. 由于这种统一性,在后续分析中,选取 I/N 作为评价指标,衡量系统干扰严重程度.

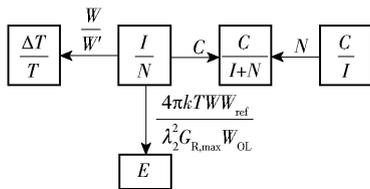


图 1 干扰评价指标转换关系示意图

1.2 NGSO 星座系统间干扰场景分析模型

由于上下行干扰场景类似,以 NGSO 系统 1 对 NGSO 系统 2 产生的下行干扰为例进行 NGSO 星座系统间干扰场景建模及分析. 图 2 为 NGSO 星座系统间下行链路干扰示意图. 其中系统 1 的 NGSO 卫星向系统 1 的地球站发射信号时,其能量不可避免地要进入系统 2 的 NGSO 地球站的接收端,从而对

系统 2 的 NGSO 地球站造成干扰.

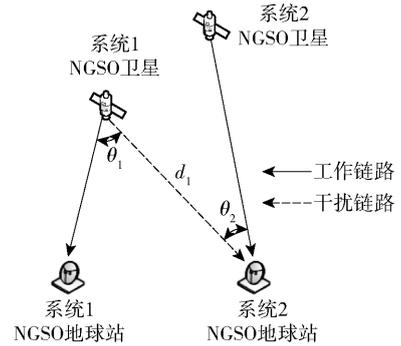


图 2 NGSO 卫星系统间下行链路干扰示意图

因此,下行干扰场景中,主要的变量包括系统 1 地球站—系统 1 卫星—系统 2 地球站的链路夹角 θ_1 、系统 1 卫星—系统 2 地球站—系统 2 卫星的链路夹角 θ_2 、干扰信号的传输距离(系统 1 卫星和系统 2 地球站的距离) d_1 、在重叠频带内系统 1 卫星的发射功率 $P'_{\text{sat},T,1}$. 一般来说 $P'_{\text{sat},T,1}$ 是恒定的,且在卫星网络资料中可查询,因此认为产生干扰的自变量为 θ_1, θ_2 和 d_1 . 假设系统 1 卫星对准系统 1 地球站,系统 2 地球站对准系统 2 卫星, $G_{\text{sat},T,1}(\theta_1)$ 和 $G_{\text{es},R,2}(\theta_2)$ 分别表示干扰链路的发射增益和接收增益,则下行链路干扰可表示为

$$I_d(\theta_1, \theta_2, d_1) = P'_{\text{sat},T,1} G_{\text{sat},T,1}(\theta_1) G_{\text{es},R,2}(\theta_2) \left(\frac{\lambda}{4\pi d_1} \right)^2 \quad (6)$$

可以看出,下行链路的干扰由多个变量共同决定. 由于 NGSO 卫星动态特性,链路夹角 θ_1, θ_2 和链路距离 d_1 均随时间快速变化,所以,下行链路的干扰随时间快速变化,需要一种能快速确定下行链路 $I_d(\theta_1, \theta_2, d_1)$ 和干扰阈值 $I_{d,\text{th}}$ 相对大小关系的干扰分析方法.

1.3 基于链路夹角的干扰分析方法

对于图 2 中系统 2 的地球站,当其位置与系统 1 的地球站位置完全重合时, θ_1 为 0,此时系统 1 卫星上天线的发射增益达到峰值,系统 2 的地球站所受干扰的大小关系可表述为

$$I_d(\theta_1, \theta_2, d_1) \leq I_d(0, \theta_2, d_1) \quad (7)$$

进一步考虑链路距离对干扰的影响,对于轨道高度为 h 的系统 1 卫星,系统 1 卫星至系统 2 地球站的干扰链路 d_1 和链路夹角 θ_2 的最大变化范围分别为

$$\Delta d_{1,\max} = \sqrt{h^2 + 2r_e h} - h \quad (8)$$

$$\Delta\theta_{2,\max} = \pi(\text{rad}) \quad (9)$$

其中 r_e 为地球半径. 通过近地轨道高度的一般范围可知, $\Delta d_{1,\max}$ 引起下行链路干扰 I_d 的变化值远小于 $\Delta\theta_{2,\max}$ 引起 I_d 的变化值, 因此, θ_2 的变化是影响 I_d 的主要因素. 进一步, 理论上, d_1 与 θ_2 相互耦合, 但由于 d_1 对 I_d 的影响较小, 可认为 $d_1 = d_{1,\min}$, 以取得最恶劣情况, 从而将 d_1 与 θ_2 解耦, 仅考虑 θ_2 对下行链路干扰的影响, 即

$$I_d(\theta_1, \theta_2, d_1) \leq I_d(0, \theta_2, d_1) \leq I_d(0, \theta_2, h) \quad (10)$$

因此, 如果可以保证 $I_d(0, \theta_2, h) \leq I_{d,\text{th}}$, 即可保证系统 1 对系统 2 造成的干扰满足限值要求. 由于 $I_d(0, \theta_2, h)$ 中仅包含 θ_2 一个未知量, 所以可根据 $I_{d,\text{th}}$ 得到 θ_2 的阈值, 即

$$\theta_{2,\text{th}} = G_{\text{es,R},2}^{-1} \left[\frac{I_{d,\text{th}}(4\pi h)^2}{P'_{\text{sat},T,1} G_{\text{sat},T,1}(0) \lambda^2} \right] \quad (11)$$

应当说明的是, 当天线存在旁瓣时, 式(11)可能得到多个链路夹角阈值, 此时需要离轴角既满足主瓣的阈值要求, 也满足旁瓣的阈值要求. 因此, 系统 2 受到系统 1 有害干扰的概率 $Q(I_d > I_{d,\text{th}})$ 可近似为链路夹角 θ_2 小于链路夹角阈值的概率 $Q(\theta_2 < \theta_{2,\text{th}})$, 而对于轨道位置确定的 NGS0 卫星而言, 链路夹角 θ_2 是由时间完全确定的, 即 $\theta_2 = \theta_2(t)$, 因此, 设链路夹角 θ_2 的概率密度分布函数为 $f(\theta_2)$, 即可得到如下关系:

$$Q(I_d > I_{d,\text{th}}) \approx Q(\theta_2 < \theta_{2,\text{th}}) \approx \int_0^{\theta_{2,\text{th}}} f(\theta_2) d\theta_2 \quad (12)$$

因此, 对于任意 2 个 NGS0 卫星, 首先可根据其链路参数确定 θ_2 的阈值 $\theta_{2,\text{th}}$, 再根据轨道参数确定每个仿真时刻的 θ_2 值. 由大数定律, 当仿真时间足够长时, 统计频率将越来越接近真实的概率分布 $f(\theta_2)$, 即可得到系统 1 对系统 2 下行链路产生有害干扰的概率.

从上述分析可知, 下行链路的干扰由多个变量共同决定, 但主要的影响因素在于链路夹角这一几何构型. 接下来从系统全局出发, 在基于链路夹角干扰分析方法的基础上, 以系统可用性作为评价指标, 开展基于协作的大规模 NGS0 星座系统间频率兼容共存的研究.

2 大规模 NGS0 星座系统间频率兼容共存研究

对于 NGS0 通信星座系统, 随着星座规模变大,

对于每一个地球站, 将可见多颗 NGS0 卫星, 其接入时可有多个选择. 如果系统 1 和系统 2 是非协作的, 系统 1 无法预先知晓系统 2 的接入策略. 这种情况下, 系统 1 认为系统 2 地球站可能接入任何可视卫星, 则系统 1 的所有卫星中, 可能对系统 2 产生干扰的卫星均不可接入. 但是, 如果系统 1 和系统 2 在一定程度上是协作的, 即系统 1 预先知晓系统 2 的接入规则, 系统 1 可以有针对性地避让与系统 2 星地链路夹角较小的系统 1 卫星, 从而自动构造出较大的链路夹角, 消除系统间的干扰. 通过利用地球站可用性指标, 对比分析非协作和协作模式下大规模 NGS0 星座可用性, 评估协作方式对系统之间频率兼容性的提升程度.

2.1 非协作模式下系统频率兼容共存研究

系统 1 和系统 2 是非协作的, 对于系统 1 而言, 系统 2 的接入策略是完全未知的, 则系统 1 可能对系统 2 产生干扰的卫星均不能接入. 根据之前的分析, 假设系统 1 和系统 2 地球站的位置重合, 系统 1 共有 M 颗 NGS0 卫星, 记为集合 $S_1 = \{s_1^1, s_1^2, \dots, s_1^M\}$, 系统 2 共有 N 颗 NGS0 卫星, 记为集合 $S_2 = \{s_2^1, s_2^2, \dots, s_2^N\}$, 以上行链路为例, 非协作模式下该地球站的可用性计算算法步骤如下:

- 1) 根据卫星数据库资料, 获取发射功率、天线方向图等系统参数;
- 2) 根据 2.2 节基于夹角的干扰分析方法, 确定链路夹角阈值 $\theta_{1,\text{th}}$;
- 3) 对于第 k 个仿真时刻, 循环遍历 S_1 和 S_2 中卫星与地球站的可视关系, 得到可视卫星集合 $S'_1 = \{s_1^1, s_1^2, \dots, s_1^{M'}\}$ 和 $S'_2 = \{s_2^1, s_2^2, \dots, s_2^{N'}\}$, 其元素个数分别为 M' 和 N' , 设置地球站可接入卫星集合 $S''_1 = \emptyset$;
- 4) 开始外层循环: 依次选取系统 1 可视卫星集合 S'_1 中元素 $s_1^i (1 \leq i \leq M')$, 计算 s_1^i 与系统 2 可视卫星集合 S'_2 中每个元素 s_2^j 的链路夹角 $\theta_{i,j}$;
- 5) 开始内层循环: 对于步骤 4) 中 s_1^i 对应的全部 $\theta_{i,j} (1 \leq j \leq N')$, 如果 $\exists \theta_{i,j} < \theta_{1,\text{th}}$ 或 $\theta_{i,j}$ 不满足旁瓣隔离角阈值的要求, 那么 $s_1^i \notin S''_1$; 否则 $s_1^i \in S''_1$;
- 6) 重复步骤 4) 和步骤 5), 直至 S'_1 中全部元素均完成遍历;
- 7) 第 k 个时刻该地球站的可用性为 $\eta_k = \frac{|S''_1|}{M'} \times 100\%$, $k = k + 1$
- 8) 重复步骤 2) ~ 步骤 7), 直至全部 K 个仿真时刻均完成遍历;

9) 该地球站的可用性为

$$H = \sum_{k=1}^K \frac{\eta_k}{K} \quad (13)$$

地球站与卫星的可视关系计算方法为:设地球站的经度为 θ_{es} , 纬度为 φ_{es} , 则地心地固坐标系下的位置向量 \mathbf{R}_{es} 可表示为

$$\mathbf{R}_{es} = \begin{bmatrix} r_e \cos(\varphi_{es}) \cos(\theta_{es}) \\ r_e \cos(\varphi_{es}) \sin(\theta_{es}) \\ r_e \sin(\varphi_{es}) \end{bmatrix} \quad (14)$$

对于某一颗卫星, 在第 k 个时刻的经度为 $\theta_s(t_k)$, 纬度为 $\varphi_s(t_k)$, 轨道高度为 $h(t_k)$, 则其地心地固坐标系下位置向量 $\mathbf{R}_s(t_k)$ 可表示为

$$\mathbf{R}_s(t_k) = \begin{bmatrix} (r_e + h(t_k)) \cos(\varphi_s(t_k)) \cos(\theta_s(t_k)) \\ (r_e + h(t_k)) \cos(\varphi_s(t_k)) \sin(\theta_s(t_k)) \\ (r_e + h(t_k)) \sin(\varphi_s(t_k)) \end{bmatrix} \quad (15)$$

则在第 k 个时刻地球站与该卫星可视时, 需满足

$$\arccos \left[\frac{\mathbf{R}_{es}(\mathbf{R}_s(t_k) - \mathbf{R}_{es})}{|\mathbf{R}_{es}| |\mathbf{R}_s(t_k) - \mathbf{R}_{es}|} \right] \leq \frac{\pi}{2} - e_{th} \quad (16)$$

其中 e_{th} 为地球站的最小工作仰角。

2.2 协作模式下系统频率兼容共存研究

如果系统 1 和系统 2 是协作的, 那么, 对于系统 1 而言, 系统 2 的接入策略是已知的, 系统 1 可根据系统 2 接入的卫星, 根据基于夹角的干扰分析方法, 预先排除可能对系统 2 产生干扰的系统 1 卫星, 在剩余的卫星中系统 1 根据自身接入策略选取合理的卫星接入。同样假设系统 1 和系统 2 地球站位置重合, 系统 1 共有 M 颗 NGSO 卫星, 记为集合 $S_1 = \{s_1^1, s_1^2, \dots, s_1^M\}$, 系统 2 共有 N 颗 NGSO 卫星, 记为 $S_2 = \{s_2^1, s_2^2, \dots, s_2^N\}$, 以上行链路为例, 协作模式下该地球站的可用性计算算法如下:

1) 根据卫星数据库资料, 获取发射功率、天线方向图等系统参数;

2) 根据 2.2 节基于夹角的干扰分析方法, 确定链路夹角阈值 $\theta_{1,th}$;

3) 对于第 k 个仿真时刻, 循环遍历 S_1 和 S_2 中卫星与地球站的可视关系, 得到可视卫星集合 $S_1' = \{s_1^1, s_1^2, \dots, s_1^{M'}\}$ 和 $S_2' = \{s_2^1, s_2^2, \dots, s_2^{N'}\}$, 其元素个数分别为 M' 和 N' , 设置地球站可接入卫星集合 $S_1'' = \emptyset$;

4) 开始外层循环: 依次选取系统 1 可视卫星集合 S_1' 中的元素 $s_1^i (1 \leq i \leq M')$, 计算 s_1^i 与系统 2 可视卫星集合 S_2' 中的每个元素 s_2^j 的链路夹角 $\theta_{i,j}$;

5) 开始内层循环: 对于步骤 4 中 s_1^i 对应的全部 $\theta_{i,j} (1 \leq j \leq N')$

如果 $\theta_{i,j} > \theta_{1,th}$ 且 $\theta_{i,j}$ 满足旁瓣隔离角阈值的要求, 那么 $\{s_1^i, s_2^j\} \in S_1''$; 否则 $\{s_1^i, s_2^j\} \notin S_1''$;

6) 重复步骤 4) 和步骤 5), 直至 S_1' 中全部元素均完成遍历;

7) 第 k 个时刻该地球站的可用性为 $\eta_k = \frac{|S_1''|}{M'N'} \times 100\%$;

8) 重复步骤 2) ~ 步骤 7), 直至全部 K 个仿真时刻均完成遍历;

9) 该地球站的可用性为 $H = \sum_{k=1}^K \frac{\eta_k}{K}$, 其中可视关系的计算方法与 2.1 节相同。应当注意的是, 在非协作模式下, S_1'' 为可接入卫星的集合, 集合中的元素为系统 1 的卫星, 而在协作模式下, S_1'' 为可接入链路组合的集合, 集合中的元素为由系统 1 卫星和系统 2 卫星组合成的链路组合。因此, 在地球站接入系统 2 卫星的基础上, 可在 S_1'' 中选择合理的链路组合, 其可用性将比非协作模式有提升。

在非协作模式下, 系统 1 无法知晓系统 2 的链路选择和构型参数, 其只能按照自身的工作模式开展业务。在协作模式下, 系统 1 已知系统 2 的链路选择和构型参数, 其工作模式如下:

1) 对于第 k 个时刻, 系统 1 地球站计算与每颗卫星的可视关系, 获取可视卫星集合 $S_1' = \{s_1^1, s_1^2, \dots, s_1^{M'}\}$;

2) 根据系统 2 的链路选择, 根据基于链路夹角的干扰分析方法, 除去 S_1' 中对系统 2 造成干扰的卫星, 得到新的集合 $S_{1,a}' = \{s_1^1, s_1^2, \dots, s_1^{M_a'}\}$;

3) 在 $S_{1,a}'$ 中根据系统 1 自身的接入切换规则, 如最高仰角接入准则、最长可视时长接入准则等, 选择合理的卫星接入。

上行链路同理, 在此不再赘述。上述非协作模式和协作模式下的系统可用性算法均完成了单个地球站(该地球站所在的地理位置)链路可用性分析。此外, 还可以使用该方法计算全球位置的系统可用性, 优先在系统可用性 H 较大的位置部署地球站, 提升 NGSO 通信星座系统的整体性能。

进一步, 可评估全球位置或布站位置的系统可用性, 从全局的角度评估 NGSO 通信星座的兼容性。

3 建模与仿真分析

3.1 仿真模型

选取典型 NGSO 通信星座作为仿真对象, 以获得一般性结论. 结合各 NGSO 通信星座的频率使用情况, 选取 OneWeb 系统作为系统 1, 即干扰方; 选取 Telesat 系统作为系统 2, 即受扰方. 两者上行馈电链路均使用 Ka 频段, 因此, 仿真 OneWeb 系统和 Telesat 系统在 Ka 频段上行馈电链路的干扰情况.

根据国际电联公布的网络资料, OneWeb 系统参数如表 1 所示, Telesat 系统参数如表 2 所示. 由于两者轨道运行周期约 1 h 45 min, 因此选取 1 min 作为仿真步长, 选取 1 个恒星日作为仿真时长. 选取国际电联 SpaceCap 软件读取卫星数据库中的参数, 使用 Matlab 进行轨道外推、隔离角实时计算和干扰情况统计, 以获取不同地理位置的可用性.

表 1 OneWeb 系统参数

参数	数值
地面站发射天线峰值增益/dBi	65
地面站发射天线波束张角/(°)	0.1
地面站发射功率/dBW	21.7
地球站天线方向图	AP8
卫星轨道构型	18 × 40
卫星轨道高度/km	1 200
卫星轨道倾角/(°)	87.9
卫星接收天线峰值增益/dBi	31.2
卫星天线方向图	REC-1528
卫星接收机系统噪声温度/K	600
系统通信带宽/MHz	100
系统通信频率/GHz	27.55

表 2 Telesat 系统参数

参数	数值
地面站发射天线峰值增益/dBi	65
地面站发射天线波束张角/(°)	0.08
地面站发射功率/dBW	13
地球站天线方向图	REC-580-6
卫星轨道构型	6 × 12 5 × 9
卫星轨道高度/km	1 000 1 248
卫星轨道倾角/(°)	99.5 37.4
卫星接收天线峰值增益/dBi	26
卫星天线方向图	REC-1528
卫星接收机系统噪声温度/K	730
系统通信带宽/MHz	100
系统通信频率/GHz	27.55

3.2 基于链路夹角的干扰分析方法仿真结果

根据上一节给出的具体参数, 以干扰比 (I/N) 为干扰评价指标. OneWeb 系统地球站采用 AP8 型天线方向图, 当离轴角达 3° 时, 峰值增益下降约 40 dBi, 意味着 I/N 下降约 40 dB, 相应地, 干扰链路 (OneWeb 系统地球站到不同的 Telesat 卫星) 距离 d_1 从最小值 h 变化为最大值 $\sqrt{h^2 + 2R_1 h}$ 时, 引起的 I/N 下降小于 8 dB, 因此, 可认为链路夹角为主要因素, 仿真时取 $d_1 = h$, 以获取干扰最恶劣的情况.

进一步, 选取 -12.2 dB 作为上行链路的 I/N 门限值, 仿真 Telesat 系统接收端干扰比随链路夹角的变化, 如图 3 所示. 可以看出, 随着站间距的减小, 隔离角阈值越来越大, 根据式 (10) 所示的不等式关系, 当地球站重合时达到最恶劣干扰情况, 即当链路夹角小于 14.05° 时, Telesat 系统收到的干扰比超出限值, 因此, $\theta_{1,th} = 14.05^\circ$. 可以通过该链路夹角的门限值确定两系统是否存在有害干扰.

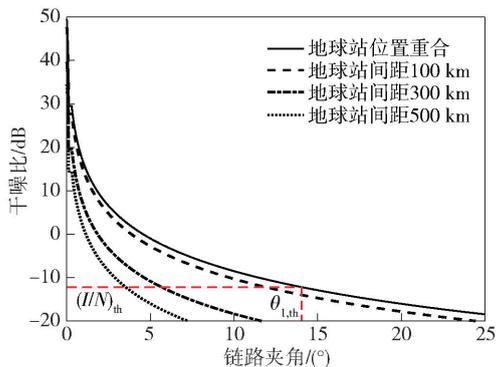


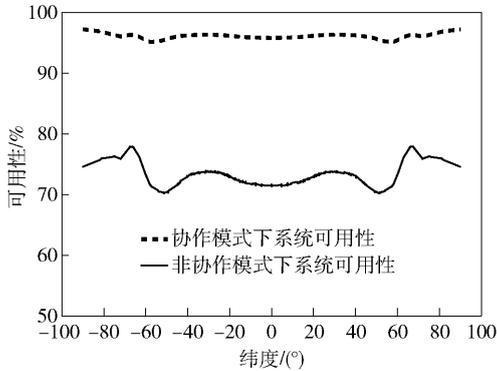
图 3 上行链路干扰比随链路夹角的变化

3.3 系统兼容性的仿真结果

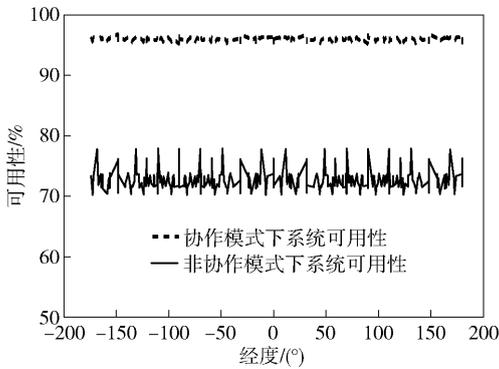
OneWeb 系统为干扰系统, Telesat 系统为被干扰系统, 仿真分析了 OneWeb 系统在避免对 Telesat 系统产生干扰的情况下, OneWeb 系统地球站在各地理位置的可用程度, 即各地理位置 OneWeb 系统地球站的可用性. 首先探究非协作/协作模式下, 系统可用性随经纬度变化. 在不同经度、不同纬度均布地球站, 根据 $\theta_{1,th} = 14.05^\circ$, 并按照 2.1 节和 2.2 节中给出的可用性算法, 计算各站的可用性.

从图 4 可知, 非协作模式下, OneWeb 系统地球站的可用性随纬度变化较为明显, 随经度变化不大. 在高纬度 (约 60° ~ 90°) 和中低纬度 (约 20° ~ 40°) 区域的可用性较好, 在中高纬度 (约 40° ~ 60°) 和低纬度 (约 0° ~ 20°) 时的可用性较差. 这主要由 Telesat 系统特殊的轨道构型所导致, 其星座包含 2 个子

星座:一个是逆行轨道(轨道倾角 99.5°)星座;另一个是低倾角轨道(轨道倾角 37.4°)星座,使可用性在中纬度地区有一定的变化. 而协作模式下,各区域可用性较平均,且相比非协作模式有较大范围的整体提升.



(a) 可用性随纬度的变化



(b) 可用性随经度的变化

图 4 OneWeb 系统可用性随纬/经度的变化

由于地球的球面结构,等经纬度法遍布的地球站会存在低纬度地区稀疏、高纬度地区密集的特征,无法做到均匀分布. 因此,采用等面积法均布地球站(等面积法又称为等三角法),相当于把 642 个正三角形拼接在一起,高度拟合地球的球型表面,在每个正三角形的中心放置 1 个地球站,尽可能地保证地球站均匀分布. 基于这一地球站分布计算各站的可用性.

图 5 和图 6 所示为非协作和协作模式下 OneWeb 系统全球可用性分布. 在非协作模式下,系统平均可用性为 72.82%,这意味着在概率意义上,OneWeb 系统平均有 27.18% 的时间会对 Telesat 系统造成有害干扰,这将严重影响 Telesat 系统的服务质量. 在这种情况下,OneWeb 系统和 Telesat 系统的频率兼容性很差. 在这些时段内,OneWeb 系统必须采取干扰减缓措施来消除干扰.

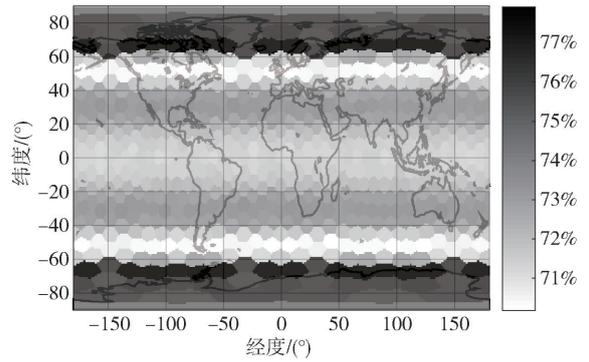


图 5 非协作模式下 OneWeb 系统全球可用性分布

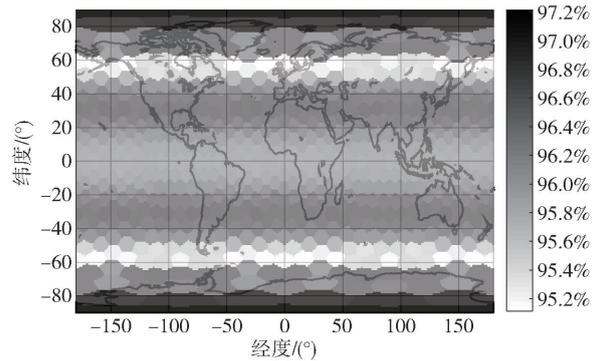


图 6 协作模式下 OneWeb 系统全球可用性分布

采用基于协作的工作方式后,系统的平均可用性高达 96.00%,这表明在全部接入链路的组合中,只有 4% 的链路组合会对 Telesat 系统造成有害干扰,此时 OneWeb 和 Telesat 系统的频率兼容性很好. 相比非协作模式,系统的可用性提升了 23.18%. 因此,基于协作的干扰减缓方法将大幅改善系统的兼容性. 在此基础上,还可通过 2.2 节给出的工作模式和自身链路接入选择,不选择造成有害干扰的 4% 的链路组合,双方的系统性能基本上不会受到影响.

4 结束语

针对多个大规模 NGSO 通信星座系统共存时同频干扰问题,首先给出了各干扰评价指标的转换关系,指出从能量角度这些干扰评价指标具有统一性;结合星地链路干扰产生的物理机理,采用基于链路夹角的干扰分析方法对系统间同频干扰场景进行了数学建模,将通信干扰约束转化为几何构型约束;最后,通过卫星选择/链路组合选择定义系统的可用性,提出了非协作/协作模式下的 NGSO 通信星座系统可用性定义和协作模式下的工作方式. 选择 OneWeb 和 Telesat 系统作为仿真对象,结合实际参数,

仿真分析了全球尺度内系统可用性. 仿真结果表明,非协作模式下 OneWeb 系统和 Telesat 系统间频率兼容性较差,协作模式将大幅提升系统间的频率兼容性.

参考文献:

- [1] Portillo I, Cameron B G, Crawley E F. Ground segment architectures for large LEO constellations with feeder links in EHF-bands [C] // IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE Press, 2018: 1-14.
- [2] Portillo 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] 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] // Proceedings of the 2010 2nd International Conference on Information Technology Convergence and Services. Cebu: IEEE Press, 2010: 1-5.
- [4] Sharma S K, Chatzinotas S, Ottersten B. In-line interference mitigation techniques for spectral coexistence of GEO and N GEO satellites [J]. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 2016, 34(1): 11-39.
- [5] Wang Huiwen, Wang Cheng, Yuan Jun, et al. Coexistence downlink interference analysis between LEO system and GEO system in Ka band [C] // IEEE International Conference on Communications. Beijing: IEEE Press, 2018: 465-469.
- [6] 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*, 2016, 35(5): 443-459.
- [7] Wang Yunfeng, Ding Xiaojin, Zhang Genxin. A novel dynamic spectrum-sharing method for GEO and LEO satellite networks [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 147895-147906.
- [8] Wang Chuang, Bian Dongming, Shi Shengchao, et al. A novel cognitive satellite network with GEO and LEO broadband systems in the downlink case [J]. *IEEE Access*, 2018(6): 25987-26000.
- [9] Panagopoulos A D, Arapoglou P M, Chatzarakis G E, et al. Coexistence of the broadcasting satellite service with fixed service systems in frequency bands above 10 GHz [J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2006, 52(1): 100-107.
- [10] Federal Communication Commission. Electronic code of federal regulations CFR 25.261: sharing among NGSO FSS space stations [DB/OL]. (2017-09-27)[2020-05-20]. <https://www.fcc.gov/about/overview>.
- [11] Hanson Ward A. In their own words OneWeb's internet constellation as described in their FCC form 312 application [J]. *NEW SPACE*, 2016, 4(3): 143-167.
- [12] Zhang Chi, Jin Jin, Kuang Linling, et al. Blind spot of spectrum awareness techniques in non-geostationary satellite systems [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 54(6): 3150-3159.
- [13] 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 Jin, Li Yaqiang, Zhang Chen, 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.
- [14] ITU-R. Simulation methodologies for determining statistics of short-term interference between co-frequency, co-directional 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. 1325-2004 [S]. Geneva: ITU, 2004: 2-21.
- [15] ITU-R. Methods to enhance sharing between non-GSO FSS systems (except MSS feeder links) in the frequency bands between 10-30 GHz: ITU-R S. 1431-2000 [S]. Geneva: ITU, 2000: 1-4.
- [16] ITU. Coordination of the L5 satellite network in IF-IC2809 [DB/OL]. (2015-08-12)[2020-07-14]. <https://www.itu.int/sns/converted-to-v8/ific2809.zip>.
- [17] ITU. Coordination of the CANSAT-LEO satellite network in IFIC2850 [DB/OL]. (2017-07-25)[2020-07-14]. <https://www.itu.int/sns/ific8/ific2850.zip>.