

李伟, 魏文康, 刘畅, 等. 基于空间位置概率的 NGSO 通信星座干扰仿真分析研究[J]. 电波科学学报, 2021, 36(3): 483-490. DOI: [10.12265/j.cjors.2021007](https://doi.org/10.12265/j.cjors.2021007)

LI W, WEI W K, LIU C, et al. Interference analysis simulation method based on spatial position probability for NGSO communication constellation system[J]. Chinese journal of radio science, 2021, 36(3): 483-490. (in Chinese) DOI: [10.12265/j.cjors.2021007](https://doi.org/10.12265/j.cjors.2021007)

基于空间位置概率的 NGSO 通信星座 干扰仿真分析研究

李伟 魏文康 刘畅 刘珊杉 武秀广

(国家无线电监测中心, 北京 100037)

摘 要 针对非静止轨道 (non-geostationary orbit, NGSO) 通信星座系统与静止轨道 (geostationary orbit, GSO) 卫星系统同频干扰问题, 建立了面向多波束 NGSO 通信星座系统的集总干扰分析模型, 根据国际电联的相关建议和报告, 提出了基于空间位置概率的双精度分析方法. 通过对 NGSO 参考卫星进行空间采样, 得出干扰的统计分布规律. 以 OneWeb 和 SINOSAT-5 系统为仿真场景, 评估了两系统间的干扰情况, 并与国际通用工具对比验证了所提方法的正确性. 在此基础上探究了精细步长仿真准则和地球站位置对结果的影响. 结果表明, 对于大规模 NGSO 通信星座系统, 分隔角小于等于精细步长区域夹角的 NGSO 卫星数占比门限为 20% 时能够兼顾结果精度和计算效率, 干扰分布趋势与 GSO 地球站纬度密切相关.

关键词 非静止轨道 (NGSO) 通信星座系统; 静止轨道 (GSO) 卫星系统; 同频干扰; 干扰分析; 空间位置概率
中图分类号 TN927 **文献标志码** A **文章编号** 1005-0388(2021)03-0483-08
DOI [10.12265/j.cjors.2021007](https://doi.org/10.12265/j.cjors.2021007)

Interference analysis simulation method based on spatial position probability for NGSO communication constellation system

LI Wei WEI Wenkang LIU Chang LIU Shanshan WU Xiuguang

(State Radio Monitoring Center, Beijing 100037, China)

Abstract Aiming at the problem of co-frequency interference between non-geostationary orbit (NGSO) constellation system and geostationary orbit (GSO) satellite system, aggregated interference analysis model for NGSO multi-beam constellation system is established, and the dual step algorithm of spatial position probability is proposed for interference analysis simulation based on relevant ITU recommendations and reports. This method discretizes the spatial position of NGSO reference satellite by dividing the latitude and longitude grid. Then the probability density function of interference-to-noise ratio (I/N) can be obtained. Taking OneWeb and SINOSAT-5 system as the typical NGSO constellation system and GSO satellite system respectively, the interference analysis is performed by using the proposed method, and the results are verified with International common tool. The results illustrate that when the threshold of the number of NGSO satellites whose separation angle is not more than the included angle of the fine step size region is 20%, both the result accuracy and calculation efficiency can be balanced. The I/N distribution is related to the latitude of the ground station.

收稿日期: 2021-01-11

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

联系人: 刘畅 E-mail: liu.c.c@srrc.org.cn

Keywords NGSO communication constellation system; GSO satellite system; co-frequency interference; interference analysis; spatial position probability

引言

与5G无线网络相比,6G无线网络将有望提供100%的覆盖率,实现空天地海一体化网络^[1].为满足全球无缝覆盖的需求,6G无线网络不只限于陆地无线网络,将与卫星通信、海洋通信和无人机通信等形成以地面网络为基础、以空间网络为拓展的信息网络^[2].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和卫星发射成本的降低,非静止轨道(non-geostationary orbit, NGSO)通信星座网络被认为是未来6G无线网络体系架构中一种有潜力的解决方案^[3].

近年来,O3b、OneWeb、SpaceX和Telesat等欧美公司纷纷计划部署NGSO通信星座系统来提供高速率宽带互联网服务^[4],NGSO通信星座系统迎来了新一波高速发展浪潮,如OneWeb预计发射720颗卫星^[5];Starlink预计共发射约42000颗卫星.从世界各国向国际电联(International Telecommunication Union, ITU)申报的频率轨道资源技术资料来看,这些新兴的NGSO通信星座系统拟规划使用的频率资源主要集中在Ku/Ka频段.同时,Ku/Ka频段也是传统静止轨道(geostationary orbit, GSO)卫星通信系统的主用频段,目前该频段上已运行着大量的在轨系统.未来NGSO通信星座系统与GSO卫星通信系统同频共存的场景下,由于NGSO通信星座系统的卫星规模庞大,全球连续覆盖且用户终端无处不在,对GSO卫星通信系统造成有害干扰的可能性极大^[6-10].根据ITU《无线电规则》第22.2条,GSO卫星固定业务系统和卫星广播系统在Ku/Ka频段使用上具有优先地位,NGSO卫星通信系统不得对这些GSO系统造成不可接受的干扰,且不得寻求GSO系统的保护.因此,开展NGSO通信星座系统与GSO卫星系统之间的干扰分析研究显得尤为必要.

国内外已经开展了NGSO通信星座系统与GSO卫星系统间的干扰分析研究.针对GSO卫星系统的地球站接收到来自多颗NGSO卫星的发射信号下行链路场景,文献^[6]分析了规避角策略对等效功率通量密度(equivalent power flux density, EPFD)的影响.文献^[7]在保证GSO系统不受干扰前提下,通

过计算载噪比及干噪比对NGSO下行链路的可用性进行了分析.文献^[8]研究了NGSO星座系统与GSO卫星系统间的上下行共线干扰情况,并提出了基于功率控制的干扰减缓策略.文献^[9]分析了NGSO星座系统对GSO卫星系统的上行链路干扰.文献^[10]针对NGSO星座系统干扰GSO卫星系统的端到端场景,研究了NGSO卫星数量以及NGSO卫星与GSO卫星间的相对角度对误码率(bit error rate, BER)的影响.文献^[11]提出了一种基于概率的干扰分析方法.

上述文献基本都是在特定干扰场景下针对星座系统中单颗或少数几颗NGSO卫星进行的干扰计算仿真,没有结合实际星座系统的轨道运行规律,进而难以对干扰仿真结果进行长时的统计分析,得到的仿真结果不能较为客观地反映实际干扰情况.并且国内外规划建设的星座系统都是成百上千颗卫星组成,甚至还有万颗以上规模,如何高效分析这种大规模NGSO通信星座系统与GSO卫星系统之间的干扰也是当前面临的难题.关于卫星系统的干扰仿真分析,国际上较为通用的软件工具Visualyse (Professional)在计算大规模NGSO通信星座系统时存在复杂度过高、仿真时间过长的问题.文献^[11]获得统计性干扰计算结果不需要计算机长时间的仿真来遍历整个星座,与通用软件仿真相比具有仿真时间短的优势,但在干扰建模时没有考虑NGSO通信星座系统的多波束建模和频率复用方案,且在对NGSO星座中的参考卫星进行空间采样时使用不变的单一精度.

针对上述问题,本文对NGSO通信星座系统与GSO卫星通信系统之间的同频干扰情况进行深入研究,建立了面向多波束NGSO通信星座系统的集总同频干扰场景数学分析模型,根据ITU的相关建议和报告,提出基于空间位置概率的双精度干扰分析方法.通过对比分析验证所提方法的可信度及高效性,为大规模NGSO通信星座系统的干扰评估提供有效的分析方法并降低仿真复杂度.

1 干扰场景及干扰建模

图1为GSO卫星系统与NGSO通信星座系统间的下行干扰场景示意图.

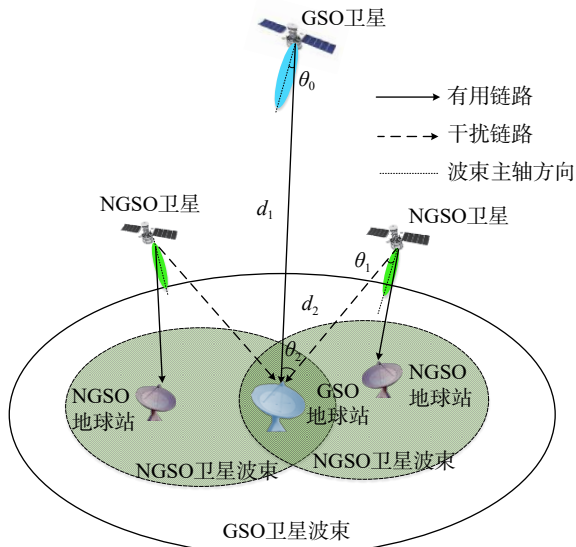


图 1 下行干扰场景示意图

Fig. 1 Schematic diagram of downlink interference scenario

1.1 干扰场景数学模型

GSO 地球站接收到来自单个 NGSO 卫星某个波束的下行链路干扰 I_{down} 为

$$I_{\text{down}} = \frac{P_t g_{\text{ns}}(\theta_1) g_{\text{ge}}(\theta_2) F_{\text{BA}}}{(4\pi d_2 / \lambda_2)^2} \quad (1)$$

式中: P_t 表示 NGSO 卫星的发射功率; 假设地球站天线主瓣对准其服务卫星天线, $g_{\text{ns}}(\theta_1)$ 、 $g_{\text{ge}}(\theta_2)$ 分别表示偏离天线主轴 θ_1 、 θ_2 方向上的天线增益, 其中下标 ns 表示 NGSO 卫星, 下标 ge 表示 GSO 地球站; F_{BA} 表示下行链路的带宽调整因子; d_2 表示下行链路干扰路径的星地间距离; λ_2 表示下行链路载波频率对应波长。

由于 NGSO 通信星座系统卫星规模大, 地面终端无处不在, 存在多颗 NGSO 卫星同时干扰某个 GSO 地球站的情况; NGSO 卫星采用多波束天线且卫星波束之间存在频率复用^[12], 每个 NGSO 卫星覆盖范围内同时存在多条链路对 GSO 地球站产生有害干扰。因此, 在对 NGSO 通信星座系统和 GSO 卫星系统的下行干扰场景进行分析时, 需要同时考虑来自不同 NGSO 卫星和不同卫星波束的同频干扰。GSO 地球站受到来自 NGSO 卫星的下行链路集总干扰为

$$I_{\text{down,agg}} = \sum_{s=1}^S \sum_{l=1}^{L_s} I_{\text{down},s,l} \quad (2)$$

式中: $I_{\text{down},s}$ 表示第 s 颗 NGSO 卫星的第 l 个波束对 GSO 地球站产生的下行干扰; S 表示对 GSO 地球站

产生干扰的 NGSO 卫星数量; L_s 表示第 s 颗 NGSO 卫星下对 GSO 地球站产生干扰的波束数量。

1.2 干扰评价指标

干扰评价指标是判定两系统能否频率共用的判定标准。常用的干扰评价指标有六种: 最大允许集总干扰功率 I_{agg} 、集总干扰噪声功率比 R_{IN} 、噪声相对增量 R_{ATT} 、EPFD、载波与集总干扰功率比 R_{CI} 、BER。前四种评价指标是面向频率协调, 后两种是面向系统工作性能。在后续分析中, 选取 ITU 最常用的 R_{IN} 作为干扰评价指标, 来衡量系统干扰严重程度。GSO 地球站受到来自 NGSO 卫星的下行链路集总干扰噪声功率比 R_{IN} 为

$$R_{\text{IN}} = \frac{I_{\text{down,agg}}}{N} = \frac{\sum_{s=1}^S \sum_{l=1}^{L_s} I_{\text{down},s,l}}{kBT} \quad (3)$$

式中: k 表示玻尔兹曼常数; B 表示受扰系统的下行链路通信带宽; T 表示受扰系统地球站天线等效噪声温度。集总干扰噪声功率比 R_{IN} 的 dB 形式为

$$R_{\text{IN}}(\text{dB}) = 10 \lg(R_{\text{IN}}) \quad (4)$$

2 空间位置概率双精度算法

空间位置概率双精度算法 (dual step algorithm of spatial position probability, DSA-SPP) 采用双精度网格分辨率对经纬度网格进行空间采样, 对每一个空间采样点进行干扰分析, 从而得到具有空间统计特性的干扰结果。DSA-SPP 可通过预先设定的 NGSO 参考卫星所处的空间网格位置求解得到 NGSO 星座的拓扑^[11]。由于干扰功率水平是 NGSO 卫星位置的函数, 已知 NGSO 参考卫星在经纬度网格的概率密度函数, 则可求解得到干扰功率水平的概率密度函数和累积分布函数 (cumulative distribution function, CDF), 从而评估 NGSO 通信星座系统对 GSO 卫星系统的干扰程度。鉴于 NGSO 通信星座系统的卫星规模庞大, 干扰链路数量较多, 为了兼顾仿真的准确性及高效性, DSA-SPP 采用双精度: 在干扰变化显著的区域采用精细网格分辨率, 在干扰变化缓慢的区域采用粗网格分辨率。

2.1 空间位置概率的精度分析

2.1.1 NGSO 参考卫星的概率密度函数

已知参考卫星的位置, 可以确定星座中其他卫星的位置, 得到对应的星座拓扑。考虑圆轨道, 参考卫星位置关于经度 ϕ 和纬度 θ 的联合概率分布函

数^[11]为

$$p_x(\Phi, \Theta) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi^2} \frac{\cos(\Theta)}{\sqrt{\sin^2(\delta) - \sin^2(\Theta)}}; & -\pi < \Phi \leq \pi \\ 0 & -\delta < \Theta < \delta \\ \text{其它} & \end{cases} \quad (5)$$

式中, δ 为 NGSO 星座的轨道倾角.

2.1.2 精细步长区域定义

依据 ITU-R S.1325-3 建议书^[12], 精细步长区域 φ_{FSR} 是基于 GSO 地球站处观察到的分隔角来定义的. 如图 2 所示, φ_{FSR} 与地球站的天线尺寸有关, 当 $D/\lambda > 100$ 时,

$$\varphi_{\text{FSR}} = \max(3.5^\circ, \alpha_1). \quad (6)$$

式中: α_1 为第一旁瓣角度, $\alpha_1 = 15.85(D/\lambda)^{-0.6}$, D 为 GSO 地球站天线直径, λ 为下行链路工作频率所对应的波长.

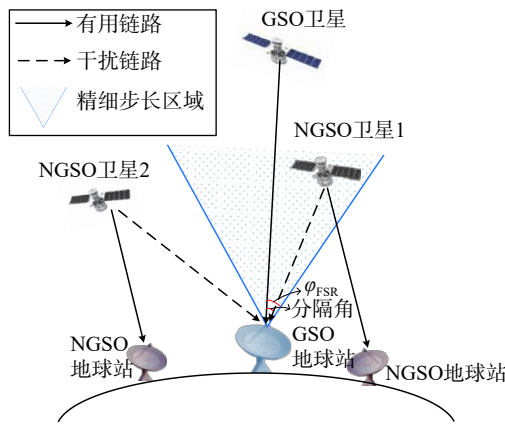


图 2 精细步长区域示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fine step region

2.1.3 精细步长仿真触发准则

按照 ITU-R S.1325-3 建议书, 对于 GSO 地球站 e_m , 只要有一颗 NGSO 卫星 s_n 与 GSO 卫星之间的分隔角 $\varphi_{m,n}$ 小于等于 φ_{FSR} , 则应采用精细仿真步长. 当参考卫星位于经纬度网格 $g_{i,j}$ 时, DSA-SPP 采用的精细步长仿真触发因子 $f_{i,j,m}$ 为

$$f_{i,j,m} = \begin{cases} 1 & \varphi_{m,n} \leq \varphi_{\text{FSR}} (\text{采用精细步长}) \\ 0 & \text{其它} (\text{不采用精细步长}) \end{cases} \quad (7)$$

考虑到新兴 NGSO 通信星座系统的卫星数量巨大, 对地具有多重覆盖, 在 GSO 地球站 e_m 处, 分隔角小于等于 φ_{FSR} 的 NGSO 卫星数量将会变多. 同时, 为

了进一步提升仿真效率, 在 S.1325-3 建议书定义的精细步长区域基础上, 设计了基于分隔角小于等于 φ_{FSR} 的 NGSO 卫星颗数的精细步长仿真因子. 记 q 表示分隔角小于等于 φ_{FSR} 的 NGSO 卫星颗数占所有干扰 NGSO 卫星颗数的比例, 当参考卫星位于经纬度网格 $g_{i,j}$ 时, DSA-SPP 采用的精细步长仿真触发因子 $f_{i,j,m}$ 为

$$f_{i,j,m} = \begin{cases} 1, & q \geq q_{\text{th}} (\text{采用精细步长}) \\ 0, & \text{其它} (\text{不采用精细步长}) \end{cases}, \quad (8)$$

$$q = \frac{S'}{S}. \quad (9)$$

式中: q_{th} 表示准则所规定的门限值; S' 表示分隔角小于等于 φ_{FSR} 的 NGSO 卫星颗数; S 表示对 GSO 地球站 e_m 带来干扰的 NGSO 卫星总颗数.

2.2 DSA-SPP 流程

DSA-SPP 流程如图 3 所示. 首先在 $(-\pi < \Phi \leq \pi, -\delta < \Theta < \delta)$ 经度-纬度平面按照粗网格分辨率划分经纬度网格. 对于每次空间采样, 假定参考卫星位于经纬度网格中心. 任意选取一个经纬度网格, 将 NGSO 通信星座系统的参考卫星置于该网格中心, 并根据式 (5) 计算出参考卫星出现在该经纬度网格上的概率. 已知参考卫星的位置, 则可确定星座系统中其他卫星的位置, 按照一定的跟星策略建立通信链路, NGSO 通信星座系统与 GSO 卫星系统之间的干扰关系也能够确定, 进而可计算出该网格下 NGSO 通信星座系统对 GSO 卫星系统下行链路的集总干扰. 遍历所有经纬度网格, 得到在每一个网格下的集总干扰及对应概率, 最终可得到 R_{IN} 的 CDF.

为兼顾干扰计算的精度与复杂度, 在按照粗网络分辨率划分经纬度网格的基础上, 在一定触发准则下, 引入细网格分辨率. 在图 3 的步骤 8, 根据在 GSO 地球站观察到的 GSO 卫星与 NGSO 卫星之间的分隔角自适应调整经纬度网格分辨率, 若分隔角小于等于式 (6) 的精细步长区域的夹角限值 φ_{FSR} , 则采用细仿真网格分辨率将参考 NGSO 卫星所处的经纬度网格作进一步划分, 形成更细的经纬度网格, 并按照前文描述的干扰分析流程分别计算每一个细经纬度网格下的集总干扰及相应的概率.

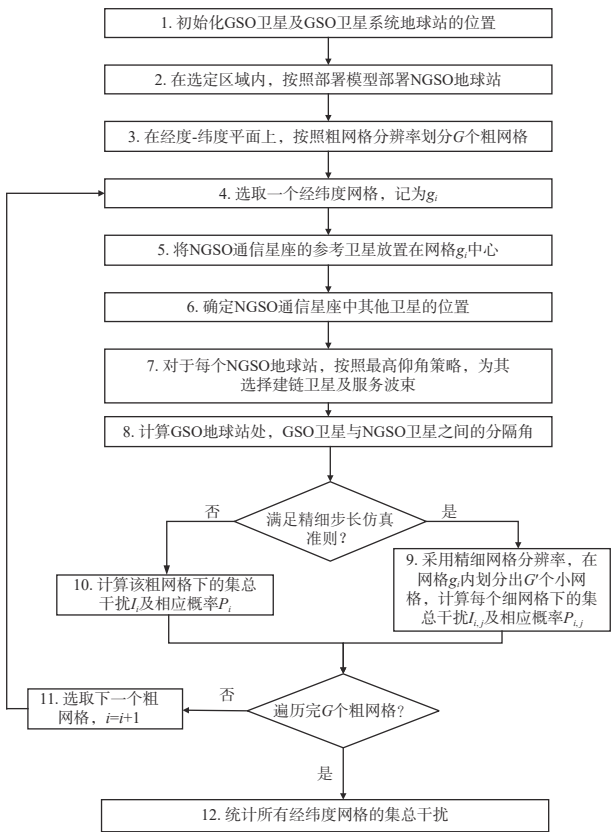


图 3 DSA-SPP 流程

Fig. 3 Flowchart of DSA-SPP

3 仿真与结果分析

3.1 仿真模型

以 SINOSAT-5 系统和 OneWeb 系统为仿真场景. SINOSAT-5 卫星的轨道位置为 110.5°E, ITU 卫星网络资料数据库中 SINOSAT-5 卫星网络资料 ID 为 106520145^[13]. 选取下行波束 EKU1 的参数信息作为 SINOSAT-5 系统下行链路的仿真参数配置,如表 1 所示.

表 1 SINOSAT-5 卫星系统通信参数

Tab. 1 SINOSAT-5 satellite communication parameters

参数	取值
链路类型	下行链路
卫星天线峰值增益/dBi	37
卫星天线半功率波束角/(°)	0.1
发射功率/dBW	16.3
地球站天线峰值增益/dBi	52.9
地球站天线半功率波束角/(°)	0.4
通信带宽/MHz	60
工作频率/GHz	11.54
接收机噪声温度/K	240
地面站天线模型	AP8 ^[14]
卫星天线模型	ITU-R S.672-4 ^[15]

OneWeb 系统的轨道高度为 1 200 km, 倾角为 87.9°, 有 18 个轨道面, 每个轨道面有 40 颗卫星, 共 720 颗卫星. 每颗 OneWeb 卫星具有 16 个固定波束^[4-5], 波束采用时分复用传输方案, 波束间采用八色频率复用. OneWeb 卫星网络资料 ID 为 113520120^[16], 选取下行波束 TAR3 的参数信息作为 OneWeb 系统的仿真参数配置, 如表 2 所示.

表 2 OneWeb 卫星系统通信参数

Tab. 2 OneWeb satellite communication parameters

参数	取值
链路类型	下行链路
卫星天线峰值增益/dBi	25.9
卫星天线半功率波束角/(°)	7.9
发射功率/dBW	8.5
地球站天线峰值增益/dBi	19.9
地球站天线半功率波束角/(°)	17.7
通信带宽/MHz	125
工作频率/GHz	11.512 5
接收机噪声温度/K	120
地球站天线模型	AP8 ^[14]
卫星天线模型	ITU-R S.1528-0 ^[17]

3.2 精细步长仿真触发准则探究

DSA-SPP 采用双精度分辨率来划分经纬度网格, 需要确定精细步长仿真(即精细网格分辨率)触发准则. 根据式(7)至(9), 设置了三种不同精细步长仿真触发准则, 以评估其对仿真结果的影响, 如表 3 所示.

表 3 双步长仿真触发准则

Tab. 3 Simulation trigger criteria of dual step

仿真准则	参数
准则1	ITU-R S.1325
准则2	$q_{th} = 10\%$
准则3	$q_{th} = 20\%$

基于 OneWeb 和 SINOSAT-5 系统参数, 设置 GSO 地球站的位置为 (0°, 110.5°E), 采用均匀分布方式部署 NGSO 地球站 28 个(站间距 160 km), 分析 OneWeb 系统对 SINOSAT-5 系统下行用户链路的干扰. 粗细仿真步长的经纬度分辨率分别为 0.2°和 0.01°. 图 4 给出了不同精细步长仿真触发准则下 GSO 地球站集总干扰 R_N 的 CDF 曲线. 可以看出, 与单一粗步长相比, 采用单一粗步长与细步长结合的双步长得到的 R_N 分布范围更广, 尤其能够有效避免漏掉一些较为严重干扰情形的统计, 如图 4 右上角的小图所示. 另外, 在三种精细步长仿真触发准则下, GSO 地球站集总干扰 CDF 曲线完全重合. 这是因为当部署 28 个 NGSO 地球站时, 分隔角小于等于 φ_{FSR} 的 NGSO 卫星颗数占比 q 超过了 20%.

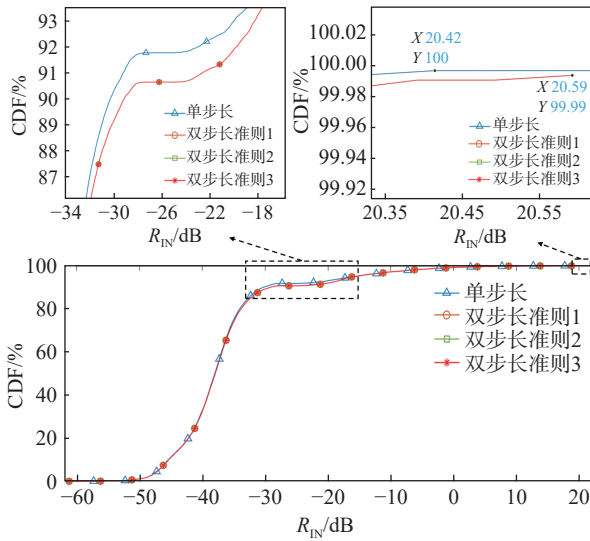
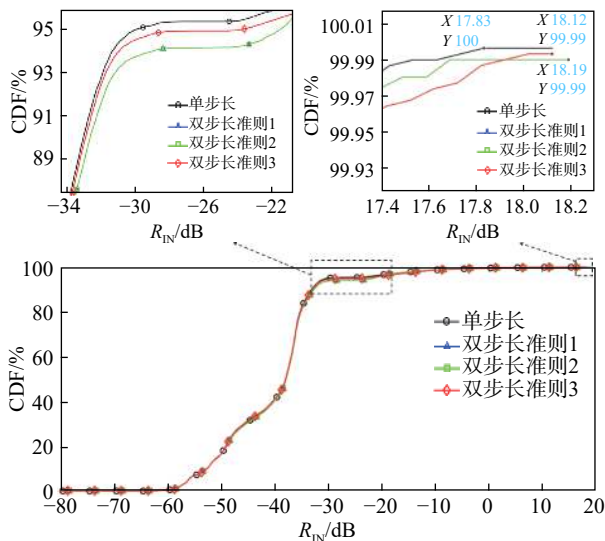
图4 不同精细步长准则下 R_{IN} 的CDF(28个NGSO地球站)Fig. 4 CDF of R_{IN} with different fine step size criteria (28 NGSO earth stations)

图5给出了在NGSO地球站部署数目增为252个情形下GSO地球站集总干噪比 R_{IN} 的CDF曲线.由图5可知,准则1和准则2下的GSO地球站集总干噪比CDF曲线完全重合,准则3与它们并未完全重合,但相差甚微.随着NGSO地球站部署数量的增多,干扰GSO地球站的NGSO卫星数量随之增加,致使在每次空间采样中分隔角小于等于 φ_{FSR} 的NGSO卫星数占比 q 均不小于10%,但不总大于20%.因此,在对大规模NGSO通信星座系统进行干扰分析时,可以通过设置稍微严格的精细步长仿真准则,在保证干扰计算结果精度的同时还可提升仿真效率.

图5 不同精细步长准则下 R_{IN} 的CDF(252个NGSO地球站)Fig. 5 CDF of R_{IN} with different fine step size criteria (252 NGSO earth stations)

3.3 仿真方法有效性及高效性探究

通过与国际通用工具 Visualyse(Professional) 的干扰计算结果作比较来验证所提方法的有效性. Visualyse(Professional) 仿真步长分别设为 10 s、1 s 和 0.1 s, 总仿真时长 3 天, 卫星数目为 720 颗. 仿真计算机配置如表4所示.

表4 仿真计算机配置

Tab. 4 Computer configuration for simulation

配置清单	参数
处理器	Intel 酷睿i5 8250U
CPU主频	1.6 GHz
内存容量	4 GHz
操作系统	Windows 10 Home Basic 64 bit

DSA-SPP 与 Visualyse(Professional) 仿真结果如图6所示.可以看出,两种方法得到的结果趋势一致,仿真曲线基本重合,DSA-SPP 与 Visualyse(Professional)(0.1 s)得到的结果最为接近,说明利用DSA-SPP 进行干扰分析是合理可信的.从图6还可看出,采用DSA-SPP得到的 R_{IN} 分布在 $-60 \sim 20$ dB,比 Visualyse(Professional)采用最精细步长 0.1 s 时统计得到的 R_{IN} 分布范围更广,说明DSA-SPP的统计结果更为精确. DSA-SPP 仿真用时 27 min, Visualyse (Professional)(0.1 s)用时 1 801 min, 说明 DSA-SPP 仿真效率更高.

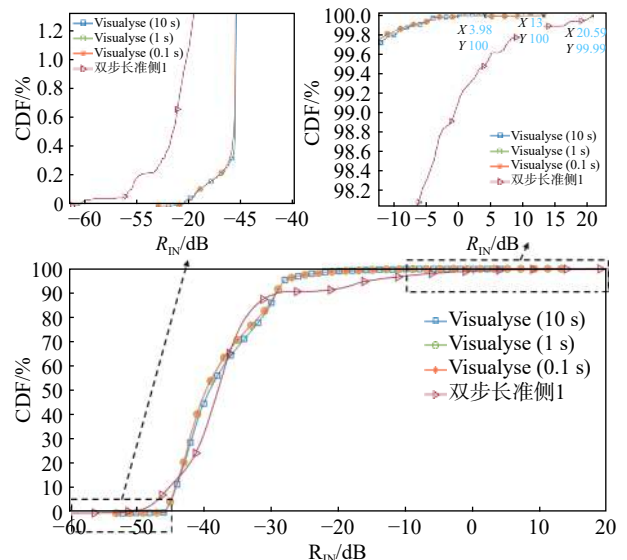


图6 DSA-SPP 与 Visualyse(professional) 仿真结果对比

Fig. 6 Comparison of simulation results between DSA-SPP and Visualyse (professional)

3.4 地球站位置对仿真结果影响探究

在 $[0^\circ\text{N}, 5^\circ\text{N}, 10^\circ\text{N}, 15^\circ\text{N}, 20^\circ\text{N}]$ 各部署1个GSO

地球站,探究GSO地球站位置对干扰结果的影响,结果如图7所示.可以看出,在 $0\sim 20^{\circ}\text{N}$ 低纬地区,随着纬度增大,GSO地球站受来自NGSO通信星座系统的干扰程度不断减弱.这是因为在 $0\sim 20^{\circ}\text{N}$ 区域内,GSO地球站的集总干扰主要受OneWeb卫星的发送天线增益及SINOSAT-5地球站的接收增益影响.干扰链路指向相对于OneWeb波束指向的离轴角变化小,干扰链路的发射增益变化不明显;GSO卫星波束指向其星下点位置,随着GSO地球站纬度增大,干扰链路相对于GSO卫星波束指向的离轴角也将增大,受扰链路的接收增益随之而减小.

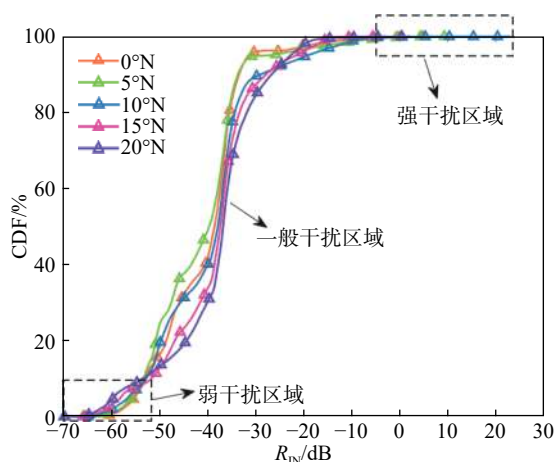


图7 不同GSO地球站地理纬度干扰结果

Fig. 7 Interference analysis of GSO earth station in different geographical latitudes

4 结论

针对NGSO通信星座系统与GSO卫星系统下行用户链路之间的同频干扰,尤其是大规模星座系统同频干扰仿真效率不高的问题,建立了面向多波束NGSO通信星座系统的集总干扰分析数学模型.根据ITU的相关建议和报告,设计了DSA-SPP和精细步长仿真驱动准则.以SINOSAT-5系统和OneWeb系统为仿真场景,与国际通用工具Visualyse (Professional)进行了结果校验.仿真结果表明,相比通用国际工具,所提算法能够得到更大范围的干扰比,耗时更短,说明所提算法得到的统计结果更精确,仿真效率更高,更加适用于卫星颗数庞大的通信星座系统.

在DSA-SPP算法影响因素探究上,通过三种精细步长仿真驱动准则下的结果对比分析,证明对于大规模NGSO通信星座系统,采用准则3(即分隔角小于等于 φ_{FSR} 的NGSO卫星颗数占比门限为20%时)能够兼顾结果精度和计算效率.在干扰分析结果

影响因素探究上,GSO地球站的纬度位置分布对NGSO通信星座系统的下行干扰程度影响较大.上述研究有望为大规模NGSO通信星座系统设计以及频率国际协调提供有益参考,下一步将重点研究如何减缓大规模NGSO通信星座系统对GSO卫星系统的干扰.

参考文献

- [1] 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.
- [2] LIU J J, SHI Y P, FADLULLAH Z M, et al. Space-air-ground integrated network: a survey[J]. *IEEE communications surveys tutorials*, 2018, 10(4): 2714-2741.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] XIA S, JIANG Q, ZOU C, et al. Beam coverage comparison of LEO satellite systems based on user diversification[J]. *IEEE access*, 2019, 7: 181656-181667.
- [6] 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)*. Beijing, August 16-18, 2018: 465-469.
- [7] 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.
- [8] SHARMA S K, CHATZINOTAS S, OTTERSTEN B. In-line interference mitigation techniques for spectral coexistence of GEO and NGEOSATs[J]. *International journal of satellite communications & networking*, 2016, 34(1): 11-39.
- [9] 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.
- [10] 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]//*IEEE 2nd International Conference on Information Technology Conver-*

- gence & Services(ITCS). Cebu, August 11-13, 2010: 1-5.
- [11] FORTES J M P, SAMPAIO-NETO R. An analytical method for assessing interference in an environment involving NGSO satellite networks[C]//IEEE International Telecommunications Symposium. Sao Paulo, August 9-13, 1998: 5-9.
- [12] ITU. 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: recommendation ITU-R S.1325-3[R]. Geneva: ITU-R, 2003.
- [13] ITU.Coordination of the SINOSAT-5 satellite network in IFIC2784[DB/OL].(2014-12-09)[2020-10-28].https://www.itu.int/online/sns/geo.sh?sat_type=G&ie=y&ntc_id=106520145&categ=C.
- [14] ITU. Radio regulations[R]. Geneva: ITU-R, 2016.
- [15] ITU. Satellite antenna radiation pattern for use as a design objective in the fixed-satellite service employing geostationary satellites: Recommendation ITU-R S.672-4[R]. Geneva: ITU-R, 1997.
- [16] ITU. Coordination of the L5 satellite network in IFIC 2862[DB/OL]. (2018-01-23)[2020-10-28]. https://www.itu.int/online/sns/nongeo.sh?sat_type=N&ie=y&ntc_id=113520120&categ=C.
- [17] ITU. Satellite antenna radiation patterns for non-geostationary orbit satellite antennas operating in the fixed-satellite service below 30 GHz: Recommendation ITU-R S.1528-0[R]. Geneva: ITU-R, 2003.

作者简介

李伟 (1984—), 男, 湖北人, 国家无线电监测中心高级工程师, 博士, 研究方向为卫星通信系统/IMT 移动通信系统的频率兼容及干扰减缓技术.

魏文康 (1990—), 女, 河北人, 国家无线电监测中心工程师, 硕士, 研究方向为空间业务系统间频率兼容技术和无线电频谱共享技术.

刘畅 (1987—), 女, 内蒙古人, 国家无线电监测中心高级工程师, 硕士, 研究方向为空间业务系统间电磁兼容技术和频谱动态共用技术.