

地球静止轨道卫星系统兼容性多维度分析方法*

董苏惠^{1,2}, 高翔¹, 韩锐³, 姚秀娟¹, 闫毅¹

(1. 中国科学院国家空间科学中心 复杂航天系统电子信息技术重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 国家无线电监测中心, 北京 100037)

摘要:针对地球静止轨道(Geostationary Satellite Orbit, GSO)卫星系统间的兼容性分析,设计了单波束和多波束GSO卫星系统间的上行及下行干扰场景,并在卫星的轨位、系统链路可用度及干扰系统地球站选址等多维度对GSO卫星系统间的干扰进行了评估,提出了不同轨位间隔条件下满足国际电信联盟干扰协调限值的干扰系统地球站最近选址的建议,细化了各维度研究上的颗粒度,在不同维度间进行横向对比,分析了GSO卫星系统在不同维度下的干扰变化特性曲线和各维度对干扰分析结果的影响程度。在系统链路可用度一定的条件下,两个卫星系统的轨位间隔 $>2^\circ$ 时,干扰数值变化缓慢;轨位间隔 $\leq 2^\circ$ 时,干扰数值变化较快;轨位间隔 $\leq 0.1^\circ$ 时,干扰数值急剧上升。以国际电信联盟实际登记的CHNSAT-81.5和INSAT-KA82.5E卫星的网络资料为例,将计算得到的GSO系统波束间的干扰噪声比、载波干扰比与Visualyse软件结果进行验证对比,结果误差保持在0.7 dB范围内,证明该方法具有有效的评估性能。

关键词:地球静止轨道卫星系统;兼容性分析;多维度干扰评估;地球站选址;干扰规避

中图分类号:TN972 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2022)01-077-08

Compatibility multi-dimensional analysis method for geostationary satellite orbit systems

DONG Suhui^{1,2}, GAO Xiang¹, HAN Rui³, YAO Xiujuan¹, YAN Yi¹

(1. Key Laboratory of Electronics and Information Technology for Complex Space Systems, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. The State Radio Monitoring Center, Beijing 100037, China)

Abstract: Aiming at the compatibility analysis between GSO (geostationary satellite orbit) satellite systems, uplink and downlink interference scenarios were designed between single-beam and multi-beam GSO satellite systems, and GSO satellite systems interference was evaluated on multiple dimensions, such as satellite orbital position, system link availability, and interference system's earth stations location. Recommendations were proposed on the nearest location of interference system's earth stations at different orbital intervals, which met International Telecommunication Union limit. The granularity of each dimension was refined. Different dimensions were compared horizontally, and interference variation characteristic curves and the influence level of each dimension were analyzed. When link availability was fixed, the interference value changed slowly with the orbital interval at $>2^\circ$, the interference value changed rapidly with the interval at $\leq 2^\circ$, especially when the interval was at $\leq 0.1^\circ$, the interference value rose sharply. Taking network data of the CHNSAT-81.5 and INSAT-KA82.5E satellites registered by the International Telecommunication Union as examples, the interference-to-noise ratio and the carrier-to-interference ratio were compared with Visualyse, the result error was kept in the range of 0.7 dB with an effective evaluation performance.

Keywords: geostationary satellite orbit system; compatibility analysis; multiple dimensions interference assessment; earth station location; interference avoidance

近年来,随着卫星成功发射数量的迅猛增加,卫星频率和轨道资源愈加紧张,尤其是地球静止轨道(Geostationary Satellite Orbit, GSO)卫星的资源竞争异常激烈^[1],在全球 360° 地球静止轨道上,平均不到 1° 就有1颗卫星,而世界各国必须按照国际

电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)的《组织法》及《无线电规则》等,在划分的空间业务频段内,遵循“先登先占”原则^[2]。因此,越优先掌握频谱资源,在频率使用和协调过程中将占据越有利地位,考虑到多个协调对象已有在

* 收稿日期:2020-07-17

基金项目:中国科学院空间科学战略性先导科技专项资助项目(XDA15060100)

作者简介:董苏惠(1994—),女,山东济宁人,博士研究生,E-mail:dongsuhui17@mails.ucas.ac.cn;

高翔(通信作者),男,副研究员,博士,硕士生导师,E-mail:gaoxiang@nssc.ac.cn

轨卫星,全球的频率协调难度大大提升。为了支撑国内外频率协调工作的顺利实施,研究频轨资源相关的标准体系和协调方法具有重要意义。国内外在该方面已经开展了很多工作^[3-6],本文在此基础上,梳理了卫星网络协调的保护标准及 ITU 相关建议书^[7-12],在 GSO 卫星固定业务之间的干扰分析中,建议书 ITU-R S. 738、S. 737、S. 739 主要采用等效噪声温度增量百分比 $\Delta T/T$ 的干扰分析方法,提出在上行和下行链路中, $\Delta T/T$ 的值应该与 6% 的门限值进行比较^[7-9]。建议书 ITU-R S. 740、S. 741 采用载波干扰比 (Carrier-to-Interference Ratio, CIR) 的干扰分析方法,CIR 值由载波噪声比 (Carrier-to-Noise Ratio, CNR) 和调整因子得出,即 $C/I = C/N + k$, k 一般为 12.2 dB 或 14 dB,具体可参考 ITU-R S. 741 建议书提出的单入干扰 (Single Entry Interference, SEI) 的保护标准^[10-11]。建议书 ITU-R S. 1432-1 将系统噪声的百分数转换成相应的干扰噪声比 (Interference-to-Noise Ratio, INR) 来表示干扰容限,提出 $I/N = -12.2$ dB 的干扰门限值,其他卫星业务和场景也可参考该值^[12]。

现有文献[3, 13-16]在 GSO 卫星系统兼容性分析的研究中,大多围绕固定卫星轨位间隔的场景来开展,暂未发现在 GSO 卫星轨道位置、系统链路可用度以及干扰地球站选址等维度上进行精细化颗粒度的分析,大多在单一维度上进行干扰评估,且干扰分析的结果在某一确定维度上的变化特征没有得到直观体现,也并未区分不同维度对分析结果的影响程度,现有公开资料未查阅到与现有专业软件 Visualyse 分析结果的比对论证。

本文构建了单波束及多波束 GSO 卫星系统的干扰场景,在干扰分析时考虑了 GSO 卫星轨道、系统链路的可用度及干扰系统地球站选址等维度,在不同维度间进行横向对比,细化各维度干扰评估时的颗粒度,突破了传统单一维度和粗颗粒度干扰评估方法的局限性,在进行综合干扰分析时可以反映出各个维度的特征,如对干扰分析结果的影响方向、程度和增量的变化情况。本文还提出了不同轨位间隔下干扰系统地球站选址的建议,为 GSO 卫星系统间的干扰规避提供参考。基于多维度的 GSO 卫星系统兼容性分析方法还结合了链路损耗中的多种影响因素(如降雨、云或雾、大气引起的衰减等),对于 GSO 卫星系统干扰评估效能的提升具有一定的借鉴意义。

1 频率覆盖问题的研究

本节主要研究 GSO 卫星系统间的同道干扰,设受扰卫星系统的通信链路载波频率为 f ,通信链路带宽为 W ;干扰卫星系统的通信链路载波频率为 f_i ,通信链路带宽为 W_i 。则两个系统间的重叠频带宽度 W_{Overlap} 如式(1)所示。

$$W_{\text{Overlap}} = \begin{cases} f_2 - f_{i1} & f_{i1} \leq f_2 \leq f_{i2} \\ 0 & f_2 < f_{i1} \quad f \leq f_i \\ W_i & f_2 > f_{i2} \end{cases} \quad (1)$$

$$W_{\text{Overlap}} = \begin{cases} f_{i2} - f_1 & f_1 \leq f_{i2} \leq f_2 \\ 0 & f_{i2} < f_1 \quad f > f_i \\ W & f_{i2} > f_2 \end{cases} \quad (2)$$

其中,

$$\begin{cases} f_{i1} = f_i - \frac{W_i}{2} \\ f_{i2} = f_i + \frac{W_i}{2} \\ f_1 = f - \frac{W}{2} \\ f_2 = f + \frac{W}{2} \end{cases} \quad (3)$$

以 Ka 上行频段(27.5 ~ 31 GHz)为例,图 1 反映了国内部分 GSO 卫星系统在该频段范围内的频段占用情况,图 1 数据来源于 ITU 公开资料。由图 1 可见,众多 GSO 卫星系统的多频段同频共用问题十分普遍,本文主要研究带内干扰情况。

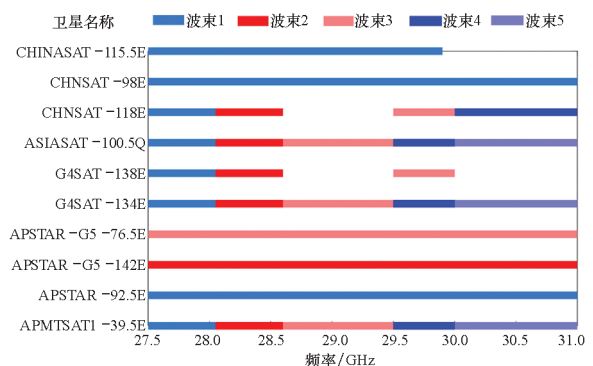


图 1 国内部分 GSO 卫星系统在 27.5 ~ 31 GHz 内的频段占用情况

Fig. 1 Occupation of some domestic GSO satellite systems in the 27.5 ~ 31 GHz

2 基于系统链路可用度的研究

卫星系统的可用度常用系统链路可用度来近似代替,假定一年 $p\%$ 的时间中,卫星系统链路中断,则链路可用度为一年中系统链路的误比特率

(Bit Error Rate, BER) 不超过给定的门限值的概率 P , 即

$$P = 1 - p\% \quad (4)$$

卫星系统链路可用度主要受电波传播模型及硬件故障等因素影响,忽略硬件故障等较小的影响因素,本节重点研究电波传播模型对不同通信链路的影响。其中,雨衰主要对 5 GHz 以上的电磁波有影响,大气衰减和云雾衰减主要对 10 GHz 以上的电磁波有影响^[17-23],由此可见在对 K、Ka 频段的卫星进行干扰分析时降雨以及云雾的影响不可忽视。

GSO 卫星选取 CHNSAT - 81.5E 卫星,分别研究该卫星与喀什(39.5°N, 75.9°E, 1 307 m)、密云(40.4°N, 116.8°E, 109 m)、三亚(18.3°N, 109.3°E, 22 m)三个地球站间星地链路的降雨引起的传播损耗随通信频率的变化特性曲线,如图 2 所示;云雾引起的传播损耗随通信频率的变化特性曲线,如图 3 所示;大气引起的传播损耗随通信频率的变化特性曲线,如图 4 所示;其中,图 2~4 中的数据来源于 ITU 公开的资料^[17-23],GSO - 三站星地链路的地球站仰角依次是 44.24°、31.21°、51.88°,极化方式为混合极化,超过降雨的衰减时间百分比为 0.01%,超过云雾衰减的时间百分比为 0.1%。

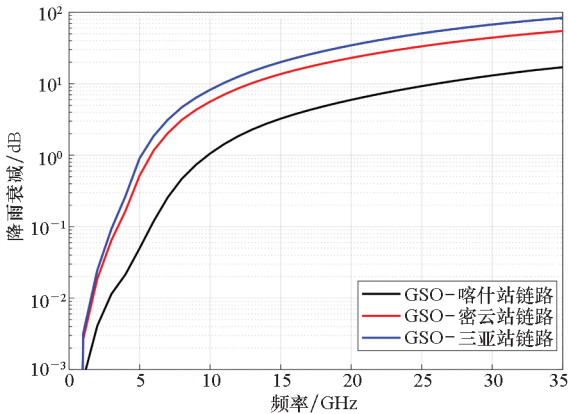


图 2 星地链路中降雨引起的传播损耗随通信频率的变化特性曲线

Fig. 2 Variation characteristics curves of propagation loss caused by rainfall with communication frequency in the satellite-earth link

K、Ka 频段卫星 - 三站的自由空间损耗值相近^[24],由图 2~4 可知,三站中喀什站电波传播模型引起的衰减值最小,考虑到电波传播模型是影响该频段星地链路传播损耗的主要因素,因此三站中 CHNSAT - 81.5E 卫星 - 喀什站的星地链路的传播损耗最小。在下节的 GSO 系统间的干扰

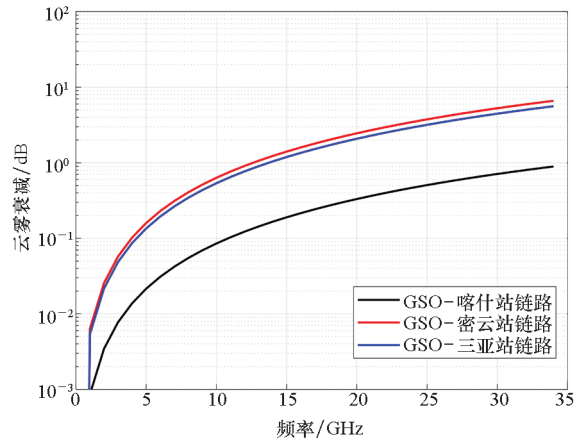


图 3 星地链路中云雾引起的传播损耗随通信频率的变化特性曲线

Fig. 3 Variation characteristics curves of propagation loss caused by cloud and fog with communication frequency in the satellite-earth link

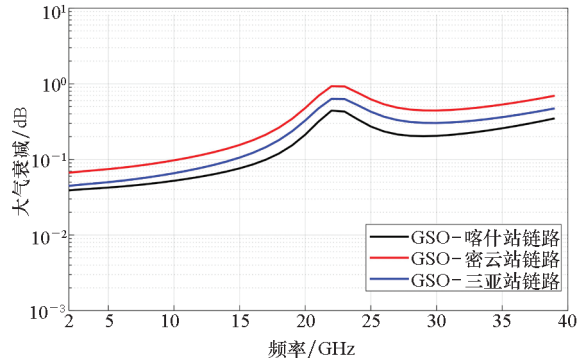


图 4 星地链路中大气引起的传播损耗随通信频率的变化特性曲线

Fig. 4 Variation characteristics curves of propagation loss caused by atmosphere with communication frequency in the satellite-earth link

分析中,可以选择喀什站作为待分析的地球站,将得到比其他两站更大的链路干扰。

由图 2~4 可知,在降雨、云雾、大气等因素中,降雨是影响卫星通信链路的关键因素,在研究 GSO 卫星系统链路可用度对干扰分析结果的影响时,需重点研究链路雨衰与系统链路可用度的关系。

分别研究通信频率为 30 GHz 及 20 GHz 时,CHNSAT - 81.5E 卫星至喀什、密云、三亚三站的降雨引起的衰减与系统链路可用度的变化特性曲线,如图 5 所示。

由图 5 可知,对于同一通信链路而言,GSO 系统链路的可用度越高,则超过降雨衰减的时间百分比越低,GSO 系统链路的可用度越高,雨衰对通信链路的影响越大,且当 GSO 系统链路可用度

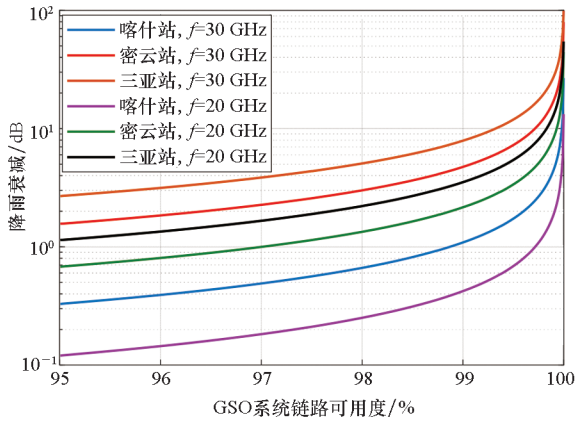


图 5 CHNSAT-81.5E 卫星至喀什、密云、三亚三站的降雨引起的衰减随系统链路可用度的变化特性曲线

Fig. 5 Variation characteristics curves of CHNSAT-81.5E satellite to Kashi, Miyun, Sanya three stations rainfall attenuation with the system link availability

超过 99.99% 时,雨衰的影响急剧增大。

3 单波束 GSO 卫星系统间的研究

3.1 基于 GSO 卫星轨位间隔研究

图 6 为单波束 GSO 卫星系统间的干扰场景,主要针对单条恒联通链路对单条恒联通链路的干扰影响研究,在该干扰场景下,受扰 GSO 卫星系统接收机的数学干扰模型可以用干扰噪声比 I/N 来表示^[25],其中,下行 I/N 如式(5)所示,上行 I/N 如式(6)所示。

$$\left(\frac{I}{N}\right)_d = \frac{p'_s \cdot g'_1(\theta_1) \cdot g_2(\theta_2)}{k \cdot T_e \cdot W_d \cdot l_{si \rightarrow e}} \quad (5)$$

式中: I 为受扰系统接收到的干扰信号功率, W ; N 为受扰系统接收机的等效噪声功率, W ; p'_s 为干扰卫星的发射功率, W ; $g'_1(\theta_1)$ 为干扰卫星天线的发

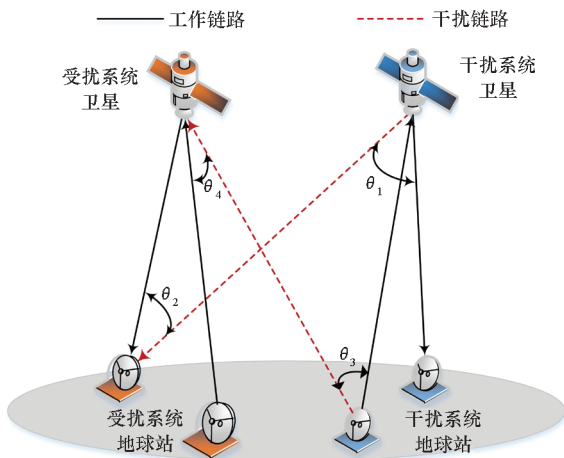


图 6 单波束 GSO 卫星系统间的干扰场景

Fig. 6 Interference scenarios between single-beam GSO satellite systems

射增益, θ_1 为干扰卫星发射天线的离轴角, ($^\circ$); $g_2(\theta_2)$ 为受扰地球站天线的接收增益, θ_2 为受扰地球站接收天线的离轴角, ($^\circ$); T_e 为受扰地球站下行接收端的等效噪声温度, K ; W_d 为受扰系统下行通信链路的带宽, Hz ; $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K 为玻尔兹曼常数。

$$\left(\frac{I}{N}\right)_u = \frac{p'_e \cdot g'_3(\theta_3) \cdot g_4(\theta_4)}{k \cdot T_s \cdot W_u \cdot l_{ei \rightarrow s}} \quad (6)$$

式中: p'_e 为干扰地球站的发射功率, W ; $g'_3(\theta_3)$ 为干扰地球站天线的发射增益, θ_3 为干扰地球站发射天线的离轴角, ($^\circ$); $g_4(\theta_4)$ 为受扰卫星天线的接收增益, θ_4 为受扰卫星接收天线的离轴角, ($^\circ$); T_s 为受扰卫星上行接收端的等效噪声温度, K ; W_u 为受扰系统上行通信链路的带宽, Hz 。

$l_{si \rightarrow e}$ 和 $l_{ei \rightarrow s}$ 分别为下行及上行干扰通信链路的传输损耗,其包含:自由空间损耗 L_s ,馈线损耗 L_f ,天线指向误差损耗 L_{ap} ,极化损耗 L_p ,降雨引起的衰减 L_r ,云或雾引起的衰减 L_c ,大气吸收引起的衰减 L_a ^[17-24]。

选取 CHNSAT-81.5 地球同步轨道卫星作为受扰系统 GSO 卫星,选取的受扰及干扰地球站位于喀什的同一位置,考虑 GSO 系统链路可用度的影响,分析干扰 GSO 卫星系统在不同轨位间隔下两个系统间的干扰噪声比的变化特性,其中受扰及干扰 GSO 卫星系统干扰场景所使用的波束及空口参数参考频率信息通报 (International Frequency Information Circular, IFIC),下行链路如表 1 所示,上行链路如表 2 所示。

表 1~2 中,地球站天线方向图参考 ITU 公布的建议书 ITU-R S. 580-6^[26]或 ITU-R S. 465-6^[27],星上天线方向图参考建议书 ITU-R S. 672-4^[28]。

图 7、图 8 分别反映了干扰系统 GSO 卫星在不同轨位以及系统链路可用度条件下的下行和上行链路 I/N 的变化特性,坐标轴分别代表干扰系统 GSO 卫星与受扰系统 CHNSAT-81.5 地球同步轨道卫星的轨位间隔、GSO 系统链路的可用度。

由图 7 和图 8 可知,当 GSO 系统链路可用度为 99.99% 时,对于下行链路,轨位间隔为 2° 时的 I/N 为 -13.77 dB,轨位间隔为 0.1° 时的 I/N 为 9.08 dB;对于上行链路,轨位间隔为 2° 时的 I/N 为 -27.95 dB,轨位间隔为 0.1° 时的 I/N 为 -3.51 dB。

在系统链路可用度一定的条件下,两个卫星系统的轨位间隔 $> 2^\circ$ 时, I/N 变化缓慢;轨位间隔 $\leq 2^\circ$ 时, I/N 变化较快,尤其是轨位间隔 $\leq 0.1^\circ$

表 1 卫星系统下行链路干扰场景波束及空口参数

Tab. 1 Beam and air interface parameters of satellite systems downlink interference scenario

下行链路参数	通信频率/ GHz	通信带宽/ GHz	地球站接收天线 峰值增益/dBi	卫星发射 功率/dBW	卫星发射天线 峰值增益/dBi	极化 方式	地球站接收机 天线噪声温度/K
受扰系统	19.45	3.5	66.4	30	9	M	180
干扰系统	19.45	3.5	35.8	22	54	M	200

表 2 卫星系统上行链路干扰场景波束及空口参数

Tab. 2 Beam and air interface parameters of satellite systems uplink interference scenario

下行链路参数	通信频率/ GHz	通信带宽/ GHz	地球站接收天线 峰值增益/dBi	卫星发射 功率/dBW	卫星发射天线 峰值增益/dBi	极化 方式	地球站接收机 天线噪声温度/K
受扰系统	29.25	3.5	69.9	33	45	M	800
干扰系统	29.25	3.5	66.0	30	57	M	800

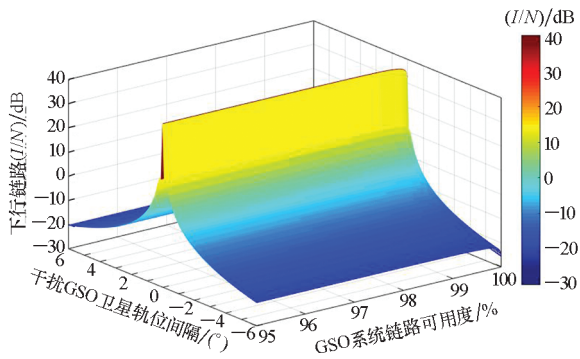


图 7 干扰系统 GSO 卫星在不同轨位以及系统链路可用度条件下的下行链路 I/N 变化特性曲面图

Fig. 7 Downlink I/N variation surface map of interference system GSO satellite in different orbits and system link availability

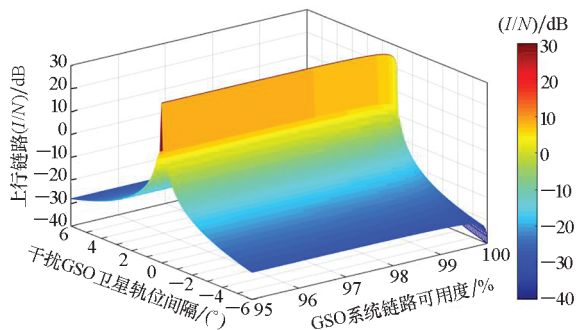


图 8 干扰系统 GSO 卫星在不同轨位以及系统链路可用度条件下的上行链路 I/N 变化特性曲面图

Fig. 8 Uplink I/N variation surface map of interference system GSO satellite in different orbits and system link availability

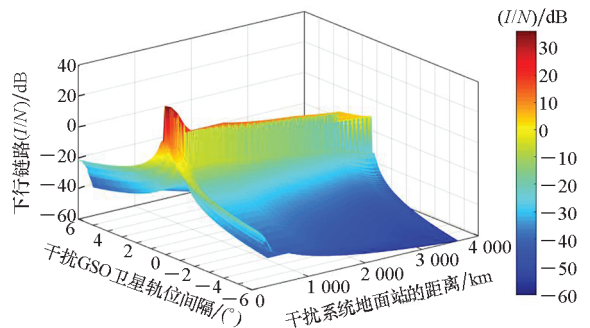
时,出现 I/N 急剧上升现象。在卫星系统间的轨位间隔一定的条件下,系统间的 I/N 随着系统链路可用度的增大而减小,且变化幅度远小于轨位

间隔引起的 I/N 变化幅度。

3.2 基于干扰系统地球站选址研究

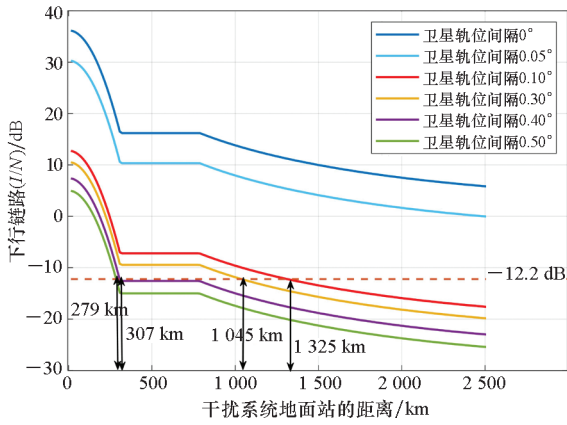
参考表 1 中的下行链路波束及空口参数,选取 CHNSAT-81.5 地球同步轨道卫星、喀什地球站组成受扰系统,GSO 系统链路可用度为 99.9%,分析干扰卫星与受扰系统卫星在不同轨位间隔、干扰系统的地球站与受扰地球站在不同距离差值下 I/N 的变化特性,如图 9 所示。

分析不同轨位间隔下干扰系统地球站最近选址距离,可以为 GSO 卫星系统的干扰规避提供参考。由图 9 可知,当干扰卫星与受扰系统卫星轨位相差 0.1°时,干扰系统地球站距受扰地球站 1 325 km 左右时下行链路 I/N 满足 ITU 的 -12.2 dB 限值条件;轨位间隔相差 0.5°时,干扰系统地球站距受扰地球站 279 km 左右时下行链路 I/N 满足限值条件;当干扰系统地球站在距受扰系统地球站 321 ~ 788 km 选址时,下行链路 I/N 的值基本保持不变。



(a) 干扰系统在不同轨道和地球站位置条件下的下行链路 I/N 变化特性曲面图

(a) Downlink I/N variation surface map of interference system in different orbits and earth station locations



(b) 下行链路 I/N 随干扰系统地球站选址的变化特性曲线

(b) Variation characteristics curves of downlink I/N with interference system earth station locations

图 9 干扰系统在不同轨道和地球站位置条件下的下行链路 I/N 分析

Fig. 9 Downlink I/N analysis of interference system in different orbits and earth station locations

4 多波束 GSO 卫星系统间的研究

多波束 GSO 卫星系统间的集总干扰场景,如图 10 所示,干扰系统 B 的点波束数量为 m ,受扰系统 A 的点波束数量为 n 。

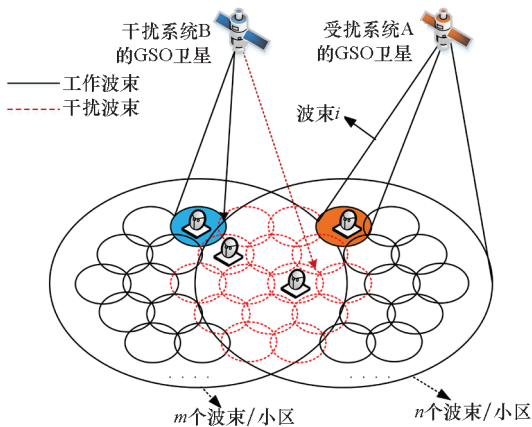


图 10 多波束 GSO 卫星系统间的集总干扰场景

Fig. 10 Integrated interference scenario between multi-beam GSO satellite systems

选取 CHNSAT - 81.5 作为受扰系统 GSO 卫星,干扰系统 GSO 卫星位于与受扰系统 GSO 卫星间隔 $[-6^\circ, 6^\circ]$ 的轨位区间内,下行链路使用的波束及空口参数参考表 1,上行链路参数参考表 2,受扰及干扰系统的波束数量 n, m 均为 10,卫星波束间采用四色划分频分多址 (Frequency Division Multiple Access, FDMA) 的多址方式。考虑到波束间业务需求的不均匀性,假设干扰系统

中的第 i 个波束的业务需求量为 $80 + 10(i - 1)$ Mbit/s,按照波束业务需求量公平性地对干扰及受扰系统进行功率分配^[29]。图 11 和图 12 反映了干扰系统 GSO 卫星在不同轨位间隔以及系统链路可用度条件下的下行及上行链路集总 I/N 的变化特性。

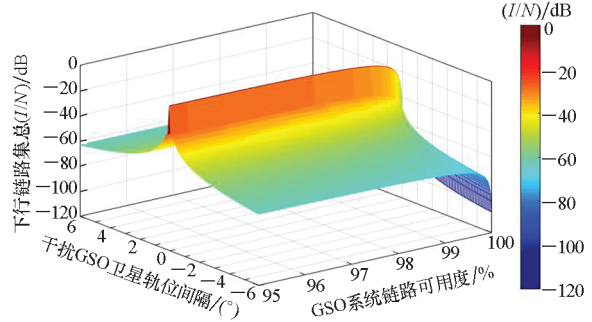


图 11 多波束 GSO 系统在不同轨位间隔以及系统链路可用度条件下的下行链路集总 I/N 变化特性曲面图

Fig. 11 Downlink integrated I/N variation surface map of multi-beam GSO systems in different orbits and system link availability

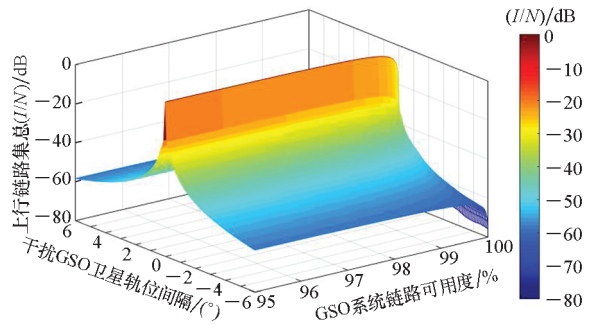


图 12 多波束 GSO 系统在不同轨位间隔以及系统链路可用度条件下的上行链路集总 I/N 变化特性曲面图

Fig. 12 Uplink integrated I/N variation surface map of multi-beam GSO systems in different orbits and system link availability

由图 11 和图 12 可知,对于多波束卫星系统,同样地,在系统链路可用度一定的条件下,两个卫星系统的轨位间隔 $> 2^\circ$ 时, I/N 变化缓慢;轨位间隔 $\leq 2^\circ$ 时, I/N 变化较快,尤其是轨位间隔 $\leq 0.1^\circ$ 时,出现 I/N 陡升现象。并且系统间的 I/N 随着系统链路可用度的增大而减小。

5 案例对比分析

Visualyse 软件由英国 TSL 公司开发,基于 ITU 的标准和规则,用于开展国际间频率轨道协调,对高低轨卫星的干扰分析计算已被 ITU 高度认可和采纳。本节使用的方法同样依据 ITU 的相关建议书和规则,在分析时增加了多维度的影响因素,并细化了每个维度的分析颗粒度,使干扰分

析结果的表征直观形象。

依据第 2、第 3 节的研究,在此基础上分析现有 GSO 卫星系统间的选频、选轨方法,并将分析得到的干扰结果与 Visualyse 软件结果进行比对和验证。

本节仍以 CHNSAT - 81.5 卫星作为受扰系统卫星,选取的受扰及干扰地球站位于喀什的同一位置,选取与 CHNSAT - 81.5 卫星轨位间隔 1° 的 INSAT - KA82.5E 卫星作为干扰系统的 GSO 卫星,其中 CHNSAT - 81.5 卫星系统的波束及空口参数参考频率信息通报,本节计算的波束间干扰结果见表 3。

表 3 分析结果与 Visualyse 结果比对
(暂不考虑电波传播模型的影响)

Tab.3 Comparison of analysis results with Visualyse results
(excluding the electromagnetic wave propagation loss)

序号	链路类型	本文计算结果		Visualyse 计算结果	
		(I/N)/dB	(C/I)/dB	(I/N)/dB	(C/I)/dB
1	上行	-8.611 6	45.420 8	-8.579 1	45.362 3
2	上行	-8.567 5	45.376 7	-8.279 5	45.062 6
3	上行	-9.403 4	46.212 6	-9.566 4	46.349 6
4	上行	-6.751 1	43.560 2	-6.911 6	43.694 8
5	上行	-6.403 4	43.856 3	-6.370 9	43.154 1
6	上行	-5.769 6	43.222 4	-6.163 7	42.946 9
7	下行	-1.697 5	35.562 8	-2.257 7	36.030 9
8	下行	8.665 7	25.199 6	8.698 2	25.200 3
9	下行	-2.117 1	35.982 4	-2.108 1	36.007 6
10	下行	8.742 6	25.122 7	8.775 1	25.123 4
11	下行	-21.257 4	55.122 7	-21.224 9	55.123 4

在保证 GSO 系统链路可用度高达 99.99% 的条件下,选取表 3 的第 1、第 3、第 9 三组场景,并考虑电波传播模型对干扰结果的影响,本文的计算结果与 Visualyse 的结果对比见表 4,表 4 中 GSO 系统链路可用度达 99.99%。

表 4 分析结果与 Visualyse 结果比对(考虑电波传播模型的影响)

Tab.4 Comparison of analysis results with Visualyse results
(including the electromagnetic wave propagation loss)

序号	链路类型	本文计算结果		Visualyse 计算结果	
		(I/N)/dB	(C/I)/dB	(I/N)/dB	(C/I)/dB
12	上行	-20.825 1	45.457 3	-20.183 4	45.452 5
13	上行	-20.941 3	45.573 5	-20.885 1	46.154 1
14	下行	-8.210 6	36.599 5	-8.415 6	36.557 0

本文计算波束间的干扰结果与 Visualyse 结果间的误差如图 13 所示。

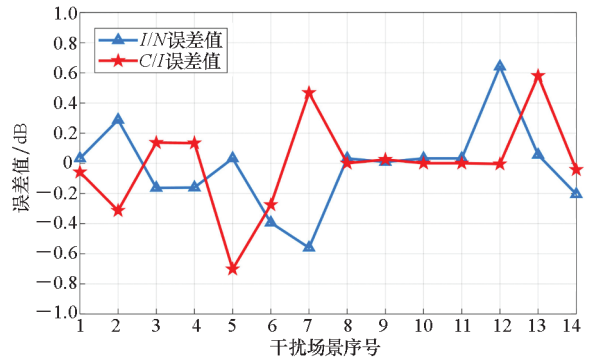


图 13 计算结果与 Visualyse 结果的误差分析

Fig.13 Error analysis of calculation and Visualyse results

由图 13 的对比分析可以得出,本文 I/N 及 C/I 的计算结果与 Visualyse 的误差基本保持在 0.7 dB 范围以内,验证了本文干扰评估方法的有效性。

6 结论

针对 GSO 卫星系统间的同道干扰问题,结合 ITU 提供的电波传播模型、天线波束等参数,分别建立了单波束及多波束 GSO 卫星系统干扰分析的数学模型。

1) 在 GSO 卫星轨道位置、系统链路可用度以及干扰地球站选址等维度上进行精细化颗粒度的分析,避免了传统单一维度和粗颗粒度干扰评估方法的局限性,不同维度间进行横向对比,分析了 GSO 卫星系统在不同维度下的干扰变化特性曲线,并比较了各维度对干扰分析结果的影响程度。

2) 在满足 ITU 干扰限值条件下,提供了下行干扰场景中不同 GSO 卫星轨位间隔下的干扰系统地球站最近选址的方法,可以为 GSO 卫星系统的干扰规避提供参考。

3) 本文 I/N 和 C/I 计算结果与 Visualyse 软件计算结果的误差基本保持在 0.3%,证明了本文方法的有效性,对支撑 GSO 卫星系统的国内外资源协调、干扰分析具有一定的借鉴意义。

参考文献(References)

[1] 梁斌,徐文福,李成,等.地球静止轨道在轨服务技术研究现状与发展趋势[J].宇航学报,2010,31(1):1-13. LIANG B, XU W F, LI C, et al. The status and prospect of orbital servicing in the geostationary orbit[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(1): 1-13. (in Chinese)

[2] 潘冀,刘卓然,李健欣,等.空间无线电业务国际协调手册[M].北京:人民邮电出版社,2013:1-60.

- PAN J, LIU Z R, LI J X, et al. International coordination manual for space radio services[M]. Beijing: Post & Telecom Press, 2013: 1-60. (in Chinese)
- [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 2nd International Conference on Information Technology Convergence and Services, 2010: 1-5.
- [4] 谢继东, 魏清, 冯加骥. 同步轨道邻星干扰分析[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2013, 33(6): 29-34.
XIE J D, WEI Q, FENG J J. Analysis of adjacent satellite interference of geostationary orbit [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science), 2013, 33(6): 29-34. (in Chinese)
- [5] CAO T T, LI D P, REN A A, et al. Application of computer simulation in interference assessment between satellite systems[C]// Proceedings of International Conference on Geo-Information in Resource Management and Sustainable Ecosystem, 2017: 426-432.
- [6] 郭强, 刘波, 司圣平, 等. 卫星通信系统邻星干扰分析方法研究[J]. 上海航天, 2017, 34(3): 131-135.
GUO Q, LIU B, SI S P, et al. Analysis method study of satellite communications system adjacent interference [J]. Aerospace Shanghai, 2017, 34(3): 131-135. (in Chinese)
- [7] ITU-R. Procedure for determining if coordination is required between geostationary-satellite networks sharing the same frequency bands; ITU-R S. 738-0 [S]. Geneva: ITU, 1992.
- [8] ITU-R. Relationship of technical coordination methods within the fixed-satellite service; ITU-R S. 737-0 [S]. Geneva: ITU, 1992.
- [9] ITU-R. Additional methods for determining if detailed coordination is necessary between geostationary-satellite networks in the fixed-satellite service sharing the same frequency bands; ITU-R S. 739-0 [S]. Geneva: ITU, 1992.
- [10] ITU-R. Technical coordination methods for fixed-satellite networks; ITU-R S. 740-0 [S]. Geneva: ITU, 1992.
- [11] ITU-R. Carrier-to-interference calculations between networks in the fixed-satellite service; ITU-R S. 741-2 [S]. Geneva: ITU, 1994.
- [12] 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]. Geneva: ITU, 2006.
- [13] LEGHARI Z A. Detailed interference and compatibility analysis of two GEO satellites located at 1/spl deg/orbital separation [C]//Proceedings of Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics, 2005.
- [14] LAGUNAS E, SHARMA S K, MALEKI S, et al. Resource allocation for cognitive satellite uplink and fixed-service terrestrial coexistence in Ka-band [C]//Proceedings of International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks, 2015.
- [15] PANAGOPOULOS A D, KRITIKOS T D, LIVIERATOS S N, et al. Interference studies between adjacent satellite communications systems operating above 10 GHz and using power control as fade mitigation technique [J]. Wireless Personal Communications, 2014, 77(2): 1311-1327.
- [16] KATSAMBAS V K, KANELLOPOULOS J D. A model for the estimation of the carrier-to-noise plus total interference ratio between two adjacent dual polarized satellite links sharing the same frequency band [J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2005, 23(1): 77-90.
- [17] ITU-R. Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication systems; ITU-R P. 618-13 [S]. Geneva: ITU, 2017.
- [18] ITU-R. Characteristics of precipitation for propagation modeling; ITU-R P. 837-7 [S]. Geneva: ITU, 2017.
- [19] ITU-R. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods; ITU-R P. 838-3 [S]. Geneva: ITU, 2005.
- [20] ITU-R. Rain height model for prediction methods; ITU-R P. 839-4 [S]. Geneva: ITU, 2013.
- [21] ITU-R. Attenuation due to clouds and fog; ITU-R P. 840-8 [S]. Geneva: ITU, 2019.
- [22] ITU-R. Attenuation by atmospheric gases and related effects; ITU-R P. 676-12 [S]. Geneva: ITU, 2019.
- [23] ITU-R. Reference standard atmospheres; ITU-R P. 835-6 [S]. Geneva: ITU, 2017.
- [24] ITU-R. Calculation of free-space attenuation; ITU-R P. 525-4 [S]. Geneva: ITU, 2019.
- [25] 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.
- [26] ITU-R. Radiation diagrams for use as design objectives for antennas of earth stations operating with geostationary satellites; ITU-R S. 580-6 [S]. Geneva: ITU, 2004.
- [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. 465-6 [S]. Geneva: ITU, 2010.
- [28] ITU-R. Satellite antenna radiation pattern for use as a design objective in the fixed-satellite service employing geostationary satellites; ITU-R S. 672-4 [S]. Geneva: ITU, 1997.
- [29] 李广侠, 冯琦, 冯少栋. 多点波束宽带卫星系统波束间功率优化分配算法[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2013, 14(1): 1-6.
LI G X, FENG Q, FENG S D. Optimal inter-beam power allocation algorithm for multi-beam broadband satellite systems[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 14(1): 1-6. (in Chinese)