NGSO互联网星座用户 链路同频干扰分析

Cochannel Interference Analysis for User Link of NGSO Internet Constellation

刘子威/LIU Ziwei¹,李嘉颖/LI Jiaying²,张更新/ZHANG Genoxin¹

(1. 南京邮电大学,中国 南京 210003; 2. 中国人民解放军军事科学院,中国 北京 100141)

(1. Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;

2. PLA Academy of Military Sciences, Beijing 100141, China)

摘要:针对未来非静止轨道(NGSO)互联网星座用户链路的灵活多波束发展趋势,梳理了用户 链路的干扰场景与星地节点特点,并建立了面向多波束的同频干扰分析模型。该模型可支撑 卫星在多色复用波束编排下地面大量终端的同频干扰分析。采用商用轨道建模软件与MAT-LAB级联,在实际系统间采用所提模型对载干噪比(CINR)、干噪比(INR)等主要评估指标进行 了仿真计算。结果表明,非静止轨道互联网星座间具有多波束、多终端特点,使得同频干扰问 题不可避免。研究结果能够有效指导中国卫星互联网星座工程的建设工作。

关键词:多波束;同频干扰分析;非静止轨道星座;卫星互联网

Abstract: Based on the trend of flexible multi-beam for non-geostationary orbit (NGSO) Internet constellation user links, the interference scenes and the characteristics of satellite and earth nodes are summarized, and a multi-beam-oriented cochannel interference analysis model is established. The model can support the cochannel interference analysis of massive ground terminals under multi-color multiplexing beam arrangement. The commercial orbital modeling software and MATLAB were used to calculate the carrier to interference plus noise ratio (CINR) and interference to noise ratio (INR) using the proposed model between two actual constellations. Results show that the cochannel interference is inevitable due to the multi-beam and multi-terminal characteristics of the non-geostationary orbit Internet constellation. The research results of this paper can effectively guide the construction of satellite Internet constellation project in China.

Keywords: multi-beam; cochannel interference analysis; NGSO constellation; satellite Internet

近年来,随着卫星互联网浪潮的 兴起,为了满足全球全天时覆 盖和宽带高速应用需求,非静止轨道 (NGSO)卫星星座成为发展的重点。 目前,除中国外的其他国家主要依靠 商业航天公司来建设NGSO 宽带卫星 通信星座,例如美国 Starlink 星座^[1]、

Kuiper星座^[2],英国OneWeb星座^[3],以 及加拿大Telesat星座^[4]。

天基信息系统发展的主要瓶颈 之一是频轨资源紧张。一方面,不断 增加的低轨通信星座系统,会对使用 相同频段的静止轨道(GSO)卫星系 统造成严重影响;另一方面,随着Ku、 Ka频段频率资源的逐渐枯竭,各申报 星座难以避免使用重叠频段,导致各 NGSO卫星系统存在潜在同频干扰。 在国际电联的申报框架中,存在同频 干扰的系统需要在申报阶段进行频 轨协调,以保证有害干扰不超过可靠 工作的阈值。协调时用到的方法是 同频干扰分析。

最初的干扰分析主要针对GSO 卫星开展,并形成了一整套建议书与 规范[5-7]。然而,在进行高轨卫星间的 协调时,参与协调的卫星数少,星地 空间关系近似恒定,干扰链路并不复

DOI: 10 12142/7TET. J 202105005 网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/ detail/34.1228.TN.20210924.0326.002.html

网络出版日期:2021-09-24 收稿日期:2021-08-16



基金项目:国家自然科学基金(91738201、 61801445);江苏省前沿引领技术基础研究专项 (BK20192002)

专题

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

杂。不同于GSO系统之间的干扰场 景,低轨卫星与地球站的相对位置是 变化的,从而导致卫星之间以及卫星 与地面站之间的空间几何关系具有 时变性。当前申报的NGSO星座规模 通常高达数万颗,并且在某一指定地 面区域的瞬时可见星座数量达到数 十颗。无论是干扰链路的数量,还是 干扰链路的时变性,均大大增加了干 扰计算的复杂程度。文献[8-9]最早 对NGSO星座间的干扰计算方法进行 了分析,但并没有给出相关的仿真结 果。李睿等虽然针对NGSO星座时变 性的特点,对不同采样点上的瞬时干 扰进行了计算和仿真,但只考虑了 NGSO 星座与GSO卫星间的干 扰^[10-11]。对于NGSO系统间干扰,靳 瑾等提出了一种卫星链路间夹角等 效干扰指标的方式,并以OneWeb系 统和03b系统为例给出了全球范围 内系统间的可用概率[12]。此外,针对 具体的干扰分析场景,基于链路计算 的分析方法能够得到准确的分析 结果[13]。

随着星上载荷与天线技术的发展,未来低轨卫星互联网通信系统的一个重要发展方向是星载相控阵天线技术。该技术将使卫星节点在空域维度具备业务驱动、灵活可变的能力。用户链路更要依赖相控阵多波束技术,以满足广域业务的服务需求。对此,本文主要对大规模NGSO星座系统之间的用户链路同频干扰问题开展研究,在完成场景分析的基础上梳理面向多波束的干扰分析模型及计算方法,并在所搭建的仿真分析平台中对大规模星座的用户链路间同频干扰进行仿真计算。

1 用户链路干扰场景与干扰分 析模型

同频干扰的产生需要在空间和

频率上均产生重叠碰撞。其中,未来 NGSO 星座通常具有全球覆盖的特性,因此空间域的碰撞是不可避免的。对于频率维度而言,根据目前全球典型的NGSO 星座的申报数据,在 用户链路干扰场景中,当NGSO 系统 卫星与地面通过上下行用户链路进 行通信时,处于干扰角度范围内的不 同 NGSO 星座的卫星就会产生干扰^[14]。表1给出了用户链路间潜在同频干扰情况。

(1)OneWeb与Starlink星座均采 用Ku频段作为用户链路的频段,与 使用Ka频段的O3b、Telesat等星座的 用户链路不会发生同频干扰;

(2)OneWeb和Starlink的用户上下 行链路频率产生重叠,两者都采用倾 斜轨道,因此会产生用户链路碰撞;

(3)Telesat和Kuiper星座都采用 不同倾斜角度的倾斜轨道,因此干扰 遍布全球;

(4)O3b、Telesat和Kuiper星座的 用户链路都使用Ka波段,且各自系 统内的通信过程都会对相邻系统产 生干扰。其中,O3b主要为赤道圆轨 道星座,与其他星座的频率重叠干扰 发生在低纬度地区。

在空域和频域都满足潜在干扰 的条件时,需要对系统间的同频干扰 进行分析。分析结果将作为频轨协 调与干扰规避的依据。

1.1 用户链路干扰场景

在未来,为满足广覆盖和高资源

利用率的要求,卫星用户链路多以相 控阵下的多点波束方式进行工作。 多色复用技术也会被采用以避免同 一系统内相邻波束间的干扰。同一 卫星同频工作的用户链路波束数量 多,而不同系统的卫星多色复用却不 同。干扰场景表现为复杂多波束间 同频波束的互相碰撞,如图1所示。 其中,多色复用策略体现在使用不同 颜色的波束来代表不同的频率。由 于卫星用户链路采用多波束多色复 用的方式,同频波束间会产生复杂的 交叉干扰情况,因此干扰分析模型必 须体现出多星、多波束的主要特点。

此外,对于宽带互联网星座而 言,根据业务类型和形态的不同,地 面终端用户包括两类:(1)大型固定 天线、车载天线、船载天线等往往具 有指向能力,可生成凝视波束;(2)小 型天线、便携式用户天线往往不具备 指向能力,可生成固定波束(多采用 小口径、弱方向性波束)。因此,在不 同分析场景下,不同波束调度方式的 卫星和不同类型的终端会形成不同 的同频干扰场景,需要做针对性 分析。

1.2 干扰分析模型

在载干噪比、干噪比等评估指标 中,载波功率、干扰功率、噪声功率需 要进行组合。这里我们分别给出多 波束条件下载波功率和干扰功率的 分析模型。

(1) 载波分析模型

▼表1 典型非静止轨道卫星星座使用频率

星座	用户 上行频率/GHz	用户 下行频率/GHz	
O3b	27.6~28.4 28.6~29.1	17.8~18.6 18.8~19.3	
OneWeb	12.8~14.5	10.7~12.7	
Starlink	14.0~14.5	10.7~12.7	
Telesat	27.5~30.0	17.8~20.2	
Kuiper	27.5~30.0	17.7~18.6 18.8~20.2	

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

考虑卫星用户链路多波束的特 性,有用信号可以写为:

$$C_{ij}(t) = \frac{P_0 G_t \Big[\theta_{ij}(t) \Big] G_r \Big[\varphi_{ij}(t) \Big] \lambda_i^2}{(4\pi)^2 d_{ij}^2(t)}, (1)$$

其中,i为波束编号,i为地面段平台编 号, C"表示多波束卫星第 i个波束中 第j个地面段平台与卫星的有用信号 功率, P_0 表示载波发射功率。 $\theta_{ii}(t)$ 与 $\varphi_{ii}(t)$ 分别表示发射天线的离轴角度 与接收天线的离轴角度, $G_{\mu}[\theta_{\mu}(t)]$ 和 $G_r \left[\varphi_{ij}(t) \right]$ 则分别代表发射和接收天 线在对应角度上的增益。 λ_i 表示第i个波束频率对应的波长,d_i(t)表示相 应的地面终端与卫星间的距离。由 于卫星具有运动特性,上述角度和斜 距均随时间变化。对于工作在凝视 模式的用户设备,可以认为其 $\theta_{ii}(t)$ 与 $\varphi_{ii}(t)$ 均一直等于最大增益角,并且几 乎保持不变;而对于固定指向的卫星 或弱指向性的地面终端,其 $\theta_{ii}(t)$ 与 $\varphi_{ii}(t)$ 则是随时间变化的。

(2) 干扰分析模型

实际上,由于NGSO卫星星座数 量较多,多个干扰卫星/地面站会对同 一站点/卫星产生干扰。这种干扰称 为集总干扰。卫星系统的集总干扰 功率则为通信仰角范围内干扰卫星 造成的干扰功率之和。

$$I_{\text{total}}(t) = \sum_{j=1}^{N_{i}(t)} \sum_{i=1}^{N_{i}} \frac{P_{ij}G_{t} \left[\theta_{ij}'(t)\right] G_{r} \left[\varphi_{ij}'(t)\right] \lambda_{j}^{2}}{(4\pi)^{2} d_{j}^{2}(t)}, \quad (2)$$

其中,N₁表示施扰平台造成干扰的波 束数量,N_i(t)表示可视范围内的卫星 数量, P_{ii} 是带内干扰功率。 $\theta'_{ii}(t)$ 与 $\varphi'_{ii}(t)$ 分别表示干扰链路相对于通信 链路发射天线与接收天线的离轴角 度, $G_{i}\left[\theta_{ii}'(t)\right]$ 和 $G_{r}\left[\varphi_{ii}'(t)\right]$ 则分别代

表对应的发射和接收天线在对应角 度上的增益。基于上述模型计算,并 结合轨道外推,我们可以对NGSO卫 星的同频干扰进行精确计算与分析。

2 仿真计算平台

针对大规模 NGSO 星座的干扰分 析仿真场景,我们搭建了商业轨道建 模软件+MATLAB科学计算的仿真架 构,如图2所示。其中,轨道建模软件 可以建立复杂的卫星场景,并支持卫 星干扰场景全过程的步进推演。同 时,MATLAB能够通过编程便捷地获 得可供复杂逻辑和高级数学运算使 用的轨道建模结果,并通过通信控制 模块实现场景的高效控制。

同时,借助轨道建模软件提供的 显示接口,我们使用C#语言来搭建图 形操作界面。该界面能够实时显示 星座组成、二维/三维星座状态,如图 3所示。其中,界面顶端的任务栏能 够进行整个系统的控制,包括场景构 建、星座设计、干扰分析等。中间主 要区域分为左侧节点列表、中部三维 显示,以及右侧二维显示和图表显 示。MATLAB运算集成于软件的后 台,以支撑完整的干扰分析过程。

3 大规模星座仿真计算

在搭建的仿真计算平台中,我们 以 Starlink 和 OneWeb 系统为分析对 象,对本文所建立的分析模型和分析 方法进行仿真计算。根据申报资料, 我们构造了Starlink一期的4425颗卫 星星座和 OneWeb 系统的 648 颗卫星 星座,如图4所示。其中,OneWeb为







UCU (Targeniter/999 4 LOGA) 4 LOGA/

▲图3 图形操作界面截图

受扰星座, Starlink 为施扰星座。One-Web的648颗NGSO卫星和备份星分 布在高度为1200km、倾角为87.9°的 12个轨道面上,并且每个轨道面均部 署49颗OneWeb卫星和5颗备用星。 Starlink的轨道参数如表2所示。

在互联网系统中,下行用户链路 的传输速率比上行用户链路更高,使 得相应的干扰变得更加严重。本文 中,我们以下行链路为例进行仿真。

3.1 仿真场景与参数

OneWeb采用16个高椭圆波束 (并列排布),可覆盖1100km²的正方 形区域,如图5(a)所示。Starlink则采 用灵活波束,其相控阵波束可以实现 点波束300km²的覆盖。对于需要较 大点波束覆盖的区域,Starlink则可实 现更大波束600km²的覆盖。由于 Starlink的频率复用方式未知,我们以



▲图4 星座布局图

四色复用的频率复用方式为例对16 个用户波束进行仿真(考虑4个同频 波束)。假设4个波束的覆盖面积均 为600 km²,即覆盖半径约为14 km, 波束半锥角为1.5°。在对热点地区进 行仿真时,我们将灵活波束视为短时 间内的凝视波束。此时,波束覆盖仿 真区域。由上述参数可以看出,One-Web与Starlink的波束存在完全重叠 的可能,其相对离轴角受卫星间的位 置关系影响,并且这种影响会随时间 发生变化。Starlink 同色波束如图5

▼表2 Starlink 低轨道参数

参数	初期部署(1 600颗)	后期部署(2 825颗)				
轨道数量	72	72	36	6	4	
轨道卫星数量	22	22	20	58	43	
轨道高度/km	550	540	570	560	560	
轨道倾角/°	53	53.2	70	97.6	97.6	



▲图5 仿真波束示意图

(b)所示。

NGSO互联网星座用户链路同频干扰分析

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

对于用户终端,我们采用随机分 布的50个Starlink终端作为干扰链路 的终端,并采用1个OneWeb终端作 为受扰链路的终端进行分析。这些 终端的分布中心位于江苏省南京市, 如图6所示。具体系统仿真参数如表 3所示。

3.2 仿真结果

72 h内 OneWeb 终端的载噪比、载干噪比和干噪比的仿真结果如图 7 和图 8 所示。其中,干噪比-12.2 dB 或等效载干噪比损失 0.25 dB 被作为 有害干扰发生的阈值。可以看出,由 于多波束、多终端、集总干扰的存在, 链路质量受损严重,绝大部分时刻均 处于有害干扰范围。

为量化系统的可用时间,进一步 得到干扰发生的概率和系统的可用 时间百分比,我们对载干噪比和干噪 比做进一步分析。相关累积分布曲 线如图9和图10所示。

通过图10可以看出,干噪比小

2021年10月 第27卷第5期 Oct. 2021 Vol. 27 No. 5

21

NGSO 互联网星座用户链路同频干扰分析 ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

于-12.2 dB 门限值的时间百分比接近 0,即系统不存在恶意干扰的时间几 乎没有。这将严重影响系统的正常 工作。同时,由于地面用户数量多、 分布广,不同区域的用户密度不同, 无法通过空间隔离来减缓干扰。因



▲图6 地面终端均匀随机分布示意图

▼表3 星座用户链路参数

OneWeb 卫星参数 Starlink 卫星数量 648 4 4 2 5 卫星发射功率/dBW 4.5 7.78 卫星天线尺寸/m 0.2 0.4 0.5 02 接收天线尺寸/m 天线指向 固定 凝视 波束数量 16 Δ 天线类型 抛物线型 通信频率/GHz 10.7 诵信带宽/MHz 250 系统噪声温度/K 290 传输速率/(Mbit·s⁻¹) 20 QPSK 调制方式 天线效率 55% 信道类型 高斯白噪声信道

QPSK:正交相移键控







4 结束语

NGSO互联网星座是未来空天地 海网络的必然组成部分,但频轨资源 的争夺是目前阻碍发展的重要因素。 本文中我们针对未来低轨互联网卫 星用户链路的空域和频域特点,梳理 了同频干扰场景和干扰分析模型,并 搭建了仿真分析平台,以Starlink和 OneWeb星座为例进行了系统级干扰 分析仿真计算。其中,所计算的卫星 数达到了5000颗以上。仿真结果表 明,低轨星座间干扰十分严重,系统 可用时间百分比不足10%,急需频率 协调与干扰减缓。这同时也说明本



▲ 图 9 Oneweb 终端的氧干燥比系标分布 曲线



▲图10 OneWeb终端的干噪比累积分布曲线

文所提模型能够有效实现同频干扰 分析。未来我们将针对各种不同场 景下的系统共存问题进行更多的仿 真计算,以持续推进本工作的研究 进展。

致谢

本文的实验内容和仿真平台开 发主要由南京邮电大学硕士研究生 赵长林和陆远松完成,在此对他们的 辛勤工作致以衷心的感谢!

参考文献

- [1] 刘帅军, 徐帆江, 刘立祥, 等. Starlink 第一期星 座发展历程及性能分析 [J]. 卫星与网络, 2020, (9): 46-49
- [2] 刘帅军, 胡月梅, 刘立祥. 低轨卫星星座 Kuiper系统介绍与分析 [J]. 卫星与网络, 2019, (12): 66-71
- [3] 邹明, 赵子骏, 魏凡.新兴低轨卫星通信星座发展前景研究 [J].中国电子科学研究院学报, 2020, 15: 1155–1162
- [4] PORTILLOA D I, CAMERONB G B, CRAW-

下转第35页🔿

专题