

# 激光与光电子学进展

## 国际移动通信地面基站对低轨卫星的细化干扰建模与分析

施艳<sup>1,2,3</sup>, 谢卓辰<sup>1\*</sup>, 刘会杰<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 200120;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>3</sup>上海科技大学信息科学与技术学院, 上海 200120

**摘要** 在星地无线电频率/激光波长共享的背景下, 分别针对 6 GHz 以下频率无线电通信以及自由空间激光通信, 研究了低轨卫星(LEO)受到的国际移动通信系统地面基站的集总干扰。其中针对 6 GHz 以下频率, 根据最新的国际电信联盟(ITU)建议书构建了不同的典型国际移动通信(IMT)地面基站部署场景。使用蒙特卡洛仿真引入了统计性质的地物损耗模型, 分析了其适用性, 并用于随机性细化场景仿真。通过典型场景设计结合低轨卫星多波束天线特性, 仿真得到 IMT 地面集总干扰在不同场景、不同卫星天线波束指向下干扰的变化趋势。研究结果表明在基站天线高度低于屋顶线时, 地物损耗不容忽视。另一方面, 针对地面自由空间光通信对卫星产生的干扰, 通过链路计算分析了可能的干扰情况。研究结果对监测低轨卫星通信接收环境具有理论指导意义和应用价值。

**关键词** 频谱分析; 低轨卫星; 同频干扰分析; 地物损耗模型; 国际移动通信系统; 自由空间光通信

中图分类号 TN92

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0307002

## Modeling and Analysis of Fine-Grained Interference from International Mobile Communication System Terrestrial Base Stations to Low Earth Orbit Satellites

Shi Yan<sup>1,2,3</sup>, Xie Zhuochen<sup>1\*</sup>, Liu Huijie<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Innovation Academy of Microsatellites of CAS, Shanghai 200120, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>School of Information Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 200120, China

**Abstract** In the context of satellite terrestrial radio frequency/laser wavelength sharing, this paper studies the aggregate interference of International Mobile Telecommunication System (IMT) terrestrial stations that is imposed to the low earth orbit (LEO) satellites equipped with the multi-beam receiving antenna for radio communication with frequencies below 6 GHz and free-space laser communications. For frequencies below 6 GHz, typical kinds of IMT base station deployment scenarios were emulated according to the latest International Telecommunication Union (ITU) Recommendations. By means of Monte Carlo simulation, a statistical clutter loss model was introduced into the interference simulation. The model's applicability was analyzed, and it was used for the random detailed scene simulation. After combining the typical scenarios with the characteristics of the satellite multi-beam antennas, we study the change trends of the different typical base station deployment scenarios with the different satellite antenna

收稿日期: 2021-04-17; 修回日期: 2021-05-12; 录用日期: 2021-05-19

基金项目: 自然科学基金重大研究计划重点支持项目(91738201)

通信作者: \*xiezc.ac@hotmail.com

beam scanning angles by simulations. The results show that when the height of base station antenna was below rooftop, the clutter loss should not be neglected. On the other hand, we analyze the possible interference of the terrestrial free-space optical communication imposed to the LEO satellite by link calculation. The analysis results have theoretical guiding significance and application value for monitoring the receiving environment of LEO satellites.

**Key words** spectrum analysis; low earth orbit satellites; co-channel interference analysis; clutter loss model; international mobile communication system; free-space optical communication

## 1 引言

近年来随着一网(OneWeb)计划、星链(Starlink)计划的提出与实施,在全球范围内掀起了一波低轨卫星星座发展的热潮。卫星系统与国家经济命脉和国家安全息息相关,是空天科技的重要发展方向。打造、发展电磁感知的低轨卫星系统,可满足信息时代万物互联、电磁空间安全掌握以及频谱资源高效利用等重大应用需求<sup>[1]</sup>。

卫星通信网络可作为地面通信网络的必要补充来实现无线移动通信的全球无缝覆盖,是下一代移动通信的趋势之一。星地无线电频率/激光波长共享这一技术是为了提高资源利用率,缓解频谱紧张提出的。无论卫星通信系统和地面通信系统是否合作,都有必要了解一方的存在对另一方产生的干扰影响<sup>[2-5]</sup>。

针对地面通信系统和卫星通信系统的干扰共存,国内外的一些学者近年来开展了一些研究。文献[6]研究了 28 GHz 频率下地面国际移动通信(IMT)系统与地球静止轨道(GSO)卫星固定服务系统的干扰共存情况,分析雨衰和地面基站天线仰角因素与干扰的关系,研究结果表明 IMT 地面基站对 GSO 卫星的干扰没有超过保护准则。文献[7]研究了 IMT-2020 系统和高低轨卫星星间服务系统的干扰共存情况,通过改变地面基站的仰角和数量分析集总干扰的变化趋势。文献[8]同文献[7]一样研究了 IMT-2020 系统和高低轨卫星星间服务系统的干扰共存情况,使用了中心站的概念,同时还从时间和空间的角度分析干扰两种系统共存的可能性。文献[9]研究了卫星组件和地面组件集成的星地一体化系统之间存在的系统间干扰,提出禁区的概念来协调两种组件不可避免的干扰,达到容量最大的平衡。

然而这些文献大多是研究 IMT 系统对 GSO 卫星的集总干扰,IMT 系统对低轨卫星干扰分析的相关研究很少。不同于 GSO 卫星和地面基站之间静止的相对关系,低轨卫星轨道高度较低,飞行速度

较快,波束覆盖地面面积较小,面临的干扰时刻发生变化。由于低轨卫星相控阵点波束覆盖面积小,不同场景的设置带来的干扰区别明显。根据国际电信联盟无线电通信部门(ITU-R)的最新建议书,分类考虑地面 IMT 系统的不同典型部署场景,考虑与仰角相关的地物损耗衰减,通过蒙特卡洛模拟仿真分析了不同点波束扫描角下的干扰特征,以保证覆盖低轨卫星快速飞行下的所有集总干扰场景。

针对自由空间光通信时光学地面站对低轨卫星造成的干扰,大部分学者研究了星地激光通信的通信性能相关内容,与干扰相关的研究较少。文献[10]仿真分析了大气湍流与平台微振动对性地激光通信性能产生的影响。文献[11]介绍了国外典型的星地激光通信系统的各项指标和通信链路余量的情况。文献[12]通过数值仿真研究了瞄准误差对激光通信系统的影响。因此本文通过链路计算分析了自由空间光通信中光学地面站对低轨卫星可能造成的干扰。

## 2 基本原理

### 2.1 6 GHz 以下无线电频率的干扰分析

ITU-R 发布的《无线电规则 2020 年版》指出了一种干扰场景,干扰来源是 IMT 地面基站或移动台站,被干扰对象是 IMT 卫星空间电台。当低轨卫星要接入此天地一体化共存场景时,将作为 IMT 空间电台。有必要先对低轨卫星接收天线波束范围内可能受到的地面 IMT 系统造成的集总干扰情况进行分析。由于移动台站采取功率控制策略,发射功率极小,且 50%~100% 位于室内,有穿墙损耗,因此重点考虑地面基站造成的集总干扰情况。

#### 2.1.1 地面场景分类

根据地面 IMT 系统的环境和功能分类,可以将一个区域内室外地面 IMT 基站的部署情况分为如表 1 所示的五种场景。

农村、郊区、城市三种环境的区别主要在人口密度和建筑物平均高度。农村、郊区、城市的人口密度依次增高。农村的人口密度最低,因此在功能

表 1 地面 IMT 基站部署的场景分类<sup>[13]</sup>Table 1 Deployment scenarios of terrestrial IMT BS<sup>[13]</sup>

Scenario	Seamless wide area coverage	Small area coverage
Rural	Macro rural	/
Suburban	Macro suburban	Micro suburban
Urban	Macro urban	Micro suburban

需求上,小区域容量提升不适用于农村。农村建筑物最为低矮,郊区多为低层建筑,而城市多为多层建筑,城市中心地区经常出现高楼耸立的情况。从基站的功能方面来看,宏基站为了无缝广域覆盖,将天线架设于高度较高的位置;而微基站只需覆盖小区域,通常低于屋顶线。

### 2.1.2 传播机制

地面 IMT 基站对低轨卫星的干扰通过地-空传播路径,传播损耗主要包括自由空间路径损耗、去极化损耗、地物损耗等<sup>[14]</sup>。

在无线电波传播过程中,自由空间路径损耗代表了无障碍物引起的反射和绕射,即视距直射路径下电磁波信号功率的损失。地-星路径的长距离传

输特性使得自由空间损耗十分严重。自由空间路径损耗  $L_p$  的公式<sup>[15]</sup>如下:

$$L_p = \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2, \quad (1)$$

式中,  $d$  为收发终端之间的路径距离,  $\lambda$  是无线电波的波长。

地物损耗适用于当基站天线挂高低于屋顶线的情况。根据 ITU 发布的报告显示,无论是在郊区还是城市场景中,所有的微基站天线都低于屋顶线。而城市中尤其是城市中心存在许多高耸的建筑物,所以在宏城市场景中 30% 的城市宏基站天线也低于屋顶线。对于低于屋顶线的基站,周围的建筑物会对其传播产生地物损耗。地物损耗作为附加损耗,将其添加至已计算得到的路径基本传输损耗上。

ITU-R P. 2108 建议书提供了当干扰路径的一端在地物中,另一端为卫星、飞机或其他高空平台时的地物损耗模型。在这里,在地物中不指在建筑物中,而是指在建筑物群中。

统计模型给出了不超过  $p\%$  位置的地物损耗公式<sup>[16]</sup>:

$$L_{ces} = \left\{ -K_1 [\ln(1 - p\%)] \cot \left[ A_1 \left( 1 - \frac{\theta}{90} \right) + \frac{\pi\theta}{180} \right] \right\}^{\left[ \frac{0.5(90 - \theta)}{90} \right]} - 1 - 0.6Q^{-1}(p\%), \quad (2)$$

$$K_1 = 93(f^{0.175}), A_1 = 0.05,$$

式中,  $p$  为  $[0, 1]$  均匀分布的随机数,  $Q^{-1}(p\%)$  为逆正态分布函数,  $\theta$  为从地面基站看向卫星的仰角。

该地物损耗模型的适用场景符合当地面基站低于屋顶线时基站下行信号对卫星的干扰分析,但建议书中给出的频率适用范围为 10~100 GHz。关于该频率限制,模型提出团队给出的理由是:大多数建筑物在 1~10 GHz 的无线电波频率范围内逐渐不能透过,即大多数建筑物对 1~10 GHz 的无线电波的透射率相比 10 GHz 以上是高的,因此模型仅适用于 10 GHz 以上的频率范围。ITU 工作组提出希望能够将该模型的频率拓展。加拿大爱立信公司通过分析相关测量数据,比较了多个频率下被单个建筑物挡住和被多个建筑物挡住的地物损耗趋势,发现两组数据的结果十分相似。由此认为在低频率下阻挡建筑物没有变得更可透射,该模型的频率适用范围可以拓展为 0.5~100 GHz。根据材料的电气特性<sup>[17]</sup>,选取水泥、石膏板、木材、玻璃四种材料,计算材料的相对介电常数和电导率,实验了不

同频率的电波从空气入射到建筑材料中的反射和透射系数,在 1 GHz 以上到 100 GHz 的频率,反射系数和透射系数几乎没有发生变化。因此可以认为该模型的频率可以拓展新增 1~10 GHz 的频率适用范围。

### 2.1.3 卫星接收天线

现今低轨卫星多携带包含相控阵的星上天线。相控阵天线采用电子方法可实现波束无惯性扫描。它的波束宽度随着扫描角的变化发生变化,当扫描角从  $0^\circ$  变为  $60^\circ$  时,波束宽度变为 2 倍。它的波束宽度公式<sup>[18]</sup>为:

$$\theta_{BW} = \frac{k_3 \lambda}{Nd_z \cos \theta_0}, \quad (3)$$

式中,  $k_3=0.886$  为 3 dB 波束宽度因子,  $N$  是线性阵元数,  $d_z$  为阵元间距,  $\theta_0$  是扫描角,即波束指向方向。 $\theta_{BW}$  的单位为弧度 rad。

天线增益公式为:

$$G_{\theta_0} = \frac{2\pi N d_z \cos \theta_0}{\lambda}, \quad (4)$$

式中,  $G_{\theta_0}$  为扫描角为  $\theta_0$  下的天线增益倍数, 其他的物理量含义同(3)式。

#### 2.1.4 集总干扰计算

要分析 IMT 地面基站到低轨卫星的集总干扰, 首先给出点对点的单链路计算过程, 即单个 IMT 地面基站对低轨卫星的干扰。

$$I = P_T + G_T(\theta) + G_R - L_P - L_{ces} - L_{xp} \quad (5)$$

式中,  $I$  为单链路干扰,  $P_T$  为发射功率,  $G_T(\theta)$  是发射天线的天线增益,  $G_R$  是接收天线的天线增益,  $L_P$  为自由空间路径损耗,  $L_{ces}$  为地物损耗,  $L_{xp}$  为去极化损耗, 估计约为 3 dB。

在文中, 集总干扰计算包含随机性, 使用了蒙特卡洛仿真。步骤如下:

1) 地面部署: 选定地面场景, 根据站间距部署基站, 根据基站激活因子, 随机选取百分比的基站满功率发射, 其余基站不发射, 当基站为宏基站时添加方位角随机性, 当基站天线低于屋顶线时添加地物损耗这一附加损耗;

2) 卫星采样部署: 卫星处于不同轨道位置, 设定点波束的扫描角、波束宽度、天线增益;

3) 循环计算完成点波束覆盖地面范围内每个的基站的单链路干扰;

4) 单链路干扰线性叠加得到集总干扰;

#### 2.2 自由空间激光通信的干扰分析

自由空间光通信作为一种激光通信方式, 有超宽带宽和高数据速率、器件紧凑、无需频率许可证、部署快速方便等优势, 使得它在临时应急链路、星间链路、补充链路、回程链路、“最后一公里”等问题上都有着合适的应用可能<sup>[19]</sup>。

在研究地面激光发射源对低轨卫星光学接收天线可能产生的干扰时, 考虑到自由空间光通信的收发系统之间需要精准瞄准, 且大气激光通信对大气因素引起的损耗十分敏感。尤其是星地上行链路时, 发射端处于大气层内, 对信号的影响极大<sup>[19]</sup>。综上所述, 通常地面发射光源一般很难产生对卫星光学接收天线的干扰或集总干扰。在这里考虑最差的情况, 即有光学地面站的光学发射天线正对低轨卫星所在的方向发射信号, 那么单链路干扰  $I$  的链路计算为<sup>[20]</sup>:

$$I = P_T - A_{geo} - A_{atm} - A_{scintillation} - A_{system}, \quad (6)$$

式中,  $P_T$  为发射功率,  $A_{geo}$  是因发射波束随距离增大

而扩展使得接收天线端功率减小的几何衰减,  $A_{atm}$  是由大气因素造成的损耗, 如大气中分子和气溶胶引起的吸收和散射,  $A_{scintillation}$  是大气湍流引起的闪烁损失,  $A_{system}$  是瞄准损耗等系统损耗。

几何衰减<sup>[20]</sup>的公式可以由下表示:

$$A_{geo}(dB) = 10 \log_{10} \left( \frac{S_d}{S_{capture}} \right) = 10 \log_{10} \left( \frac{\frac{\pi}{4} (d \cdot \theta)^2}{S_{capture}} \right) \quad (7)$$

式中,  $S_{capture}$  为接收机捕捉表面积,  $S_d$  为发射距离  $d$  后的波束表面积, 它可以由发射机和接收机之间的距离  $d$  和光束发散角  $\theta$  表示。

激光发射通常选择避免强烈大气吸收散射的处于“大气窗口”的波长, 假设天气为大晴天且能见度为 50 km, 大气衰减  $A_{atm}$  可取 0.19 dB/km<sup>[21]</sup>。

对流层的大气湍流引起的闪烁变化<sup>[20]</sup>可表示为:

$$\sigma_x^2 = 23.17 \cdot k^{7-6} \cdot C_n^2 \cdot L^{11-6} \quad (8)$$

式中,  $k$  为波数,  $C_n^2$  为折射率结构参数,  $L$  为链路长度。闪烁引起的衰减为  $2\sigma_x$ 。

## 3 分析与讨论

### 3.1 6 GHz 以下频率的仿真结果

#### 3.1.1 各场景干扰均值分析

当分析集总干扰的时候, 需要考虑低轨卫星一个点波束下覆盖的地面面积中所有的地面 IMT 基站。本文细分场景, 因此没有像以往的大部分文献一样假设每一个地面基站对卫星的干扰都是相同的, 而是将真实情况中可能出现的与基站相关的随机性加入仿真。对于 50% 的基站激活率, 随机选取 50% 的基站发射, 相当于加入了位置的均匀随机分布。对于发射天线三扇区放置的宏基站, 加入了天线自身方位角的随机性。以正北方向为  $0^\circ$  基准, 设置基站扇区天线自身方位角在  $0^\circ$  到  $120^\circ$  均匀随机分布。对于发射天线低于屋顶线的微基站和部分宏基站, 加入了具有统计特性的地物损耗模型。基站发射带宽为 10 MHz。

表 2 为地面基站部署的仿真参数, 取自 ITU 推荐的 2 GHz 下的各个场景的典型值。

在仿真中, 地面设置为一块  $160 \text{ km} \times 160 \text{ km}$  的方形区域。低轨卫星轨道高度为 800 km, 相控阵为阵元 64 个, 阵元间距为半波长。首先设置扫描角为  $0^\circ$  即波束指向正下方的星下点, 垂直指向地面研究

表 2 2 GHz 地面 IMT 基站设置参数<sup>[22]</sup>  
Table 2 Deployment-related parameters for bands at 2 GHz<sup>[22]</sup>

	Macro rural	Macro suburban	Macro urban	Macro suburban	Micro urban
Cell radius /km	7.5	1.5	0.75	1.5	0.5
Antenna height /m	30	30	25	6	
Downtilt /( $^{\circ}$ )	3	6	10	n. a.	
Antenna pattern	ITU-R F. 1336 <sup>[23]</sup> (recommends 3. 1)			ITU-R F. 1336 (recommends 2)	
Below rooftop BS antenna deployment		0%	30%	100%	
Feeder loss /dB		3		n. a	
Maximum BS output power (10 MHz) /dBm		46		35	
Maximum BS antenna gain /dBi	18	16	16	5	
Average BS activity			50%		

区域。根据相控阵天线公式计算了波束宽度以及相应的地面覆盖范围。卫星采样的选取去除了边缘效应,并让波束不重叠避免过多的空间相关性。

表 3 给出了扫描角为  $0^{\circ}$  时各场景下的干扰功率均值和标准差。根据实验结果,在宏农村场景下,低轨卫星一个点波束覆盖范围内受到的干扰在约  $-114 \sim -104$  dBm 之间,平均值为  $-107.22$  dBm。在独立随机实验中,一些采样点得到了  $-\text{Inf}$  的干扰结果。这是因为宏农村场景下地面基站之间站间距较大,而相控阵点波束覆盖区域较小,基站激活因子为 50% 时,位置随机性的存在使得在一些采样点位置低轨卫星波束覆盖范围内出现了没有基站的情况,干扰为 0,在对数单位下即为  $-\text{Inf}$ 。宏农村场景下的干扰数据波动较大,标准差约为 1.91 dB。这是因为覆盖区域内基站数量较少,随机分布引起的数量变化量相对于基站数量总数较大。在宏郊区场景下,由于基站部署密度相较于宏农村的增加,干扰在  $-93.5 \sim -91.5$  dBm 之间。在宏城市场景下,基站密度进一步增加,相较于前两个场景,部分基站位于屋顶下加入了地物损耗,干扰在  $-87 \sim -85.5$  dBm 之间。微城市的干扰是所有场景中最高的,主要的原因是基站密度显著高于任一其他场景。在基站密度较高的场景下,干扰数据波动的标准差较小。

### 3.1.2 扫描角分析

卫星天线波束主瓣方向有一定倾角即扫描角,在不同的倾角下也对应了不同的地面基站仰角。由于地空路径的角度发生变化,引发了一系列的变化如卫星接收天线增益、卫星波束宽度、覆盖的地面面积变化、地-空路径长度,地面基站天线增益、地物损耗等的变化。因此实验了卫星扫描角变化下的干扰变化趋势。

将卫星天线波束扫描角从  $0^{\circ}$  变换到  $60^{\circ}$ ,图 1 给出了各个场景下低轨卫星受到的平均干扰功率的变化曲线。宏基站场景在不同环境下的变化趋势基本相同,随着扫描角的增加干扰呈现上升趋势。有两个推动干扰上升的因素,一是随着扫描角的增大,干扰的地-空路径与地面基站天线的主瓣波束对准方向之间的隔离角减小;二是因为随着扫描角的增大,相控阵天线的波束宽度变大,导致波束覆盖范围变大,在覆盖范围内的基站数量增大。而微基站场景随着扫描角的增加先呈现一个下降的趋势,然后在扫描角为  $50^{\circ}$  的时候重新上升。这是因为扫描角的增大给微基站场景带来的除了隔离角的减小、基站数量的增加,同时也伴有一个削减干扰的因素,即地物损耗的增加。对于地面基站来说仰角越小,地物损耗就会越大。

为了进一步了解地物损耗对干扰的影响,实验仿真对比了加入和不加入地物损耗时宏城市、微郊

表 3 各场景下的网格干扰功率的平均值和标准差  
Table 3 Average value and standard deviation of grid interference in each scenario

	Macro rural	Macro suburban	Macro urban	Micro suburban	Micro urban
Average value /dBm	$-107.22$	$-92.27$	$-86.27$	$-92.41$	$-82.91$
Standard deviation /dB	1.91	0.33	0.16	0.36	0.11

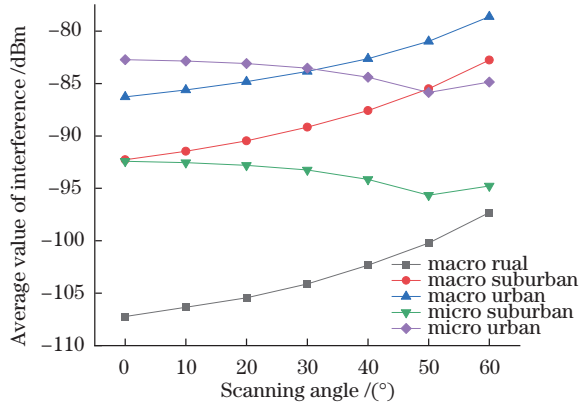


图 1 各场景干扰功率均值随扫描角变化曲线

Fig 1 Variation curve of average value of interference with scanning angle in each scenario

区、微城市三种场景的干扰情况。

图 2 显示出在宏城市场景下,地物损耗对干扰上升趋势产生了削弱的作用。随着扫描角的增加,

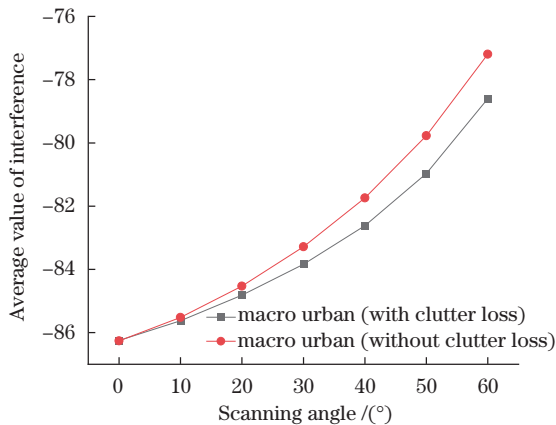


图 2 宏城市场景下有无加入地物损耗的干扰对比

Fig 2 Comparison of interference with and without clutter loss in macro urban scenario

地物损耗增大,但推动干扰上升的因素依然主导着干扰功率均值上升。

通过图 3 可知,对于微基站场景而言,地物损耗对干扰功率均值影响很大。当链路计算不包含地物损耗时,微基站场景下干扰功率随着扫描角的增大也会呈现上升的趋势,和宏基站场景下类似。但是当地物损耗被考虑在内时,干扰水平随着扫描角的增大呈现下降的趋势,直到扫描角超过  $50^{\circ}$  继续增大时,干扰水平重新上升。这是因为相控阵的扫描角在  $60^{\circ}$  时波束宽度为  $0^{\circ}$  的 2 倍,基站数量的增加带来的干扰增强超过了地物损耗带来的干扰损失。

### 3.2 自由空间激光通信的仿真结果

光学地面站的光学发射天线正对低轨卫星所

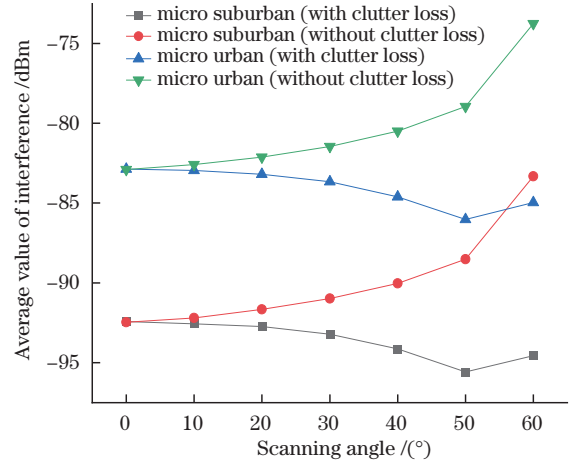


图 3 微基站场景下有无加入地物损耗的干扰对比

Fig 3 Comparison of interference with and without clutter loss in micro scenario

主宰的方向发射信号的最差情况,考虑两种代表性场景。第一种场景为光学地面站与某颗卫星通过自由空间光通信建立连接,假设受干扰低轨卫星与光学地面站之间的干扰路径为最短路径,即光学地面站正位于低轨卫星下点时的,后文用垂直路径来指代这种场景;第二种场景为两个自由空间光学通信地面站之间建立连接,即地面光学站以水平的方向发射信号,后文用水平路径来指代这种场景,这种情况下受干扰低轨卫星与光学地面站的路径较长,且有很大一部分属于大气损耗区域。

大气损耗主要发生在近地对流层大气中<sup>[24]</sup>,因此参数分为大气路径和总路径,大气路径为总路径的一部分。表 4 是两种场景的仿真参数。

从表 5 的仿真结果可以看到,在垂直路径场景下单站干扰功率远大于水平路径场景。但是垂直路径

表 4 垂直路径场景和水平路径场景的仿真参数

Table 4 Simulation parameters for vertical and horizontal path cases

Item	Vertical path	Horizontal path
Total path length /km	800	3291
Atmosphere path length /km	20	505
Wavelength /nm		850
Output power /dBm		24
Beam divergence /mrad		0.2
Aperture /m <sup>2</sup>		0.005
Atmosphere attenuation	Very clear air and visibility is 50 km, attenuation is 0.19 dB/km	
$C_n^2$ /m <sup>-2/3</sup>	Weak turbulence: $10^{-16}$	

表 5 垂直路径场景和水平路径场景的仿真结果

Table 5 Simulation result for vertical and horizontal path cases

Item	Vertical path	Horizontal path
Output power /dBm	24	24
$A_{\text{geo}} / \text{dB}$	66.04	78.33
$A_{\text{atm}} / \text{dB}$	3.8	95.95
$A_{\text{scintillation}} / \text{dB}$	0.0152	0.294
$A_{\text{system}} / \text{dB}$	1	1
$I / \text{dBm}$	-46.8552	-151.574

干扰场景,即自由空间光通信用于星地通信时受干扰低轨卫星正对准光学地面站的干扰情况,出现的概率很小,不会出现大量光学地面站对同一颗低轨卫星的集总干扰;而水平路径场景下的干扰是由地面自由空间光通信链路引起的,可能会出现多个地面光学站的情况,集总干扰出现的可能性较大。

## 4 结 论

研究了在无线电频率下低轨卫星受到点波束覆盖区域为宏农村、宏郊区、宏城市、微郊区、微城市五种典型基站部署场景下的干扰情况,通过蒙特卡罗仿真引入了统计性质的地物损耗,结合低轨卫星多波束天线特性,仿真模拟得到了各场景下干扰功率均值以及均值随卫星波束扫描角变化的情况,分析了地物损耗对干扰的影响。研究表明,郊区和城市场景下的平均干扰功率远大于农村场景下的平均干扰功率。对于宏基站场景来说,卫星波束扫描角即波束指向方向的增大会带来干扰的提升,而对微基站场景而言,扫描角的增大带来的影响能与地物损耗的影响相互制衡。对于基站天线低于屋顶线的场景,在干扰分析中考虑地物损耗是十分有必要的。同时对自由空间光通信中低轨卫星可能受到的干扰进行了分析,得到了两种代表性场景下的干扰情况。本文研究了低轨卫星与地面通信基站之间的星地干扰,对监测低轨卫星频谱环境有着重要的意义。

## 参 考 文 献

- [1] Yu Q, Wang J C. 14th Five-Year Plan | Yu Quan, Academician of the Chinese Academy of Engineering: exploring the development of electromagnetic sensing LEO constellation system[N/OL]. China Electronics News, 2021-01-05. <http://www.cena.com.cn/industrynews/20210106/110145.html>.  
于全,王敬超.我为“十四五”建言|中国工程院院士于全:探寻发展电磁感知低轨星座系统[N/OL].中国电子报,2021-01-05(1).<http://www.cena.com.cn/industrynews/20210106/110145.html>.
- [2] Jia M, Jing X Y, Liu X F, et al. Spectrum allocation method for cognitive satellite network based on service priorities[J]. Journal on Communications, 2019, 40(4): 140-148.  
贾敏,敬晓晔,刘晓峰,等.基于业务优先级的认知卫星网络频谱分配方法[J].通信学报,2019,40(4): 140-148.
- [3] Hao C Y, Liu Y Y, Zhang Q. Recent research on NGSO satellite spectrum management[J]. China Radio, 2019(1): 43-47.  
郝才勇,刘元媛,张琪.NGSO卫星频谱管理近期研究[J].中国无线电,2019(1): 43-47.
- [4] Xu D J, Meng F L, Xie J D, et al. Analysis of co-channel interference in satellite internet of things coexisting with terrestrial internet of things[J]. Video Engineering, 2018, 42(9): 42-46, 51.  
徐大剑,孟繁伦,谢继东,等.地面物联网与卫星物联网间同频干扰分析[J].电视技术,2018,42(9): 42-46, 51.
- [5] Ma L, Chen X T, Liu H J, et al. Research on the application of cognitive radio technology in LEO communication satellite systems[C]//Proceedings of the 6th Annual Conference on New Services and New Technologies of Satellite Communications, March 10, 2010, Beijing, China. Beijing: China Institute of Communications, 2010.  
马陆,陈晓挺,刘会杰,等.认知无线电技术在低轨通信卫星系统中的应用研究[C]//第六届卫星通信新业务新技术学术年会论文集.北京.北京:中国通信学会,2010: 277-284.
- [6] Wang T, Qian Z J, Kang L, et al. Coexistence interference analysis of 28 GHz IMT and fixed-satellite service systems[C]//2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), March 25-26, 2017, Chongqing, China. New York: IEEE Press, 2017: 1574-1578.
- [7] Li B, Qian Z J, Liu S J, et al. Interference assessment for the spectrum sharing between IMT-2020 and inter-satellite service[M]//Lau E T, Chai M K K, Chen Y, et al. Smart grid inspired future technologies. Lecture notes of the institute for computer sciences, social informatics and telecommunications engineering. Cham: Springer, 2017, 203: 25-34.
- [8] Tan H F, Wang T, Chen J J, et al. Preliminary coexistence studies between IMT-2020 systems and

- inter-satellite service in 26 GHz[J]. MATEC Web of Conferences, 2017, 139: 00027.
- [9] Kang K, Park J M, Kim H W, et al. Analysis of interference and availability between satellite and ground components in an integrated mobile-satellite service system[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2015, 33(4): 351-366.
- [10] Sun J, Huang P M, Yao Z S. Performance of satellite-to-ground laser communications under the influence of atmospheric turbulence and platform micro-vibration[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(3): 0301003.  
孙晶, 黄普明, 幺周石. 大气湍流与平台微振动影响下的星地激光通信性能[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(3): 0301003.
- [11] Jia X, Li S H. Analysis on satellite-to-ground laser communications experiment and its link budget in foreign countries[J]. Spacecraft Engineering, 2013, 22(1): 120-126.  
贾旭, 李少辉. 国外星地激光通信试验及其链路分析[J]. 航天器工程, 2013, 22(1): 120-126.
- [12] Wan X F, Hao S Q, Zhang D, et al. Link performance optimization for inter-satellite laser communications based on beckmann distribution[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(2): 0206003.  
宛雄丰, 郝士琦, 张岱, 等. 基于贝克曼分布的星间激光通信链路性能优化[J]. 光学学报, 2019, 39(2): 0206003.
- [13] ITU-R. Modelling and simulation of IMT networks and systems for use in sharing and compatibility studies: recommendation ITU-R M.2101-0[R]. Geneva: ITU-R, 2017.
- [14] ITU-R. Propagation data required for the evaluation of interference between stations in space and those on the surface of the Earth: recommendation ITU-R P.619-4[R]. Geneva: ITU-R, 2019.
- [15] Guo Q, Wang Z Y, Gu X M. Satellite communication system[M]. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2010: 59.
- 郭庆, 王振永, 顾学迈. 卫星通信系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 59.
- [16] ITU-R. Prediction of clutter loss: recommendation ITU-R P.2108-0[R]. Geneva: ITU-R, 2017.
- [17] ITU-R. Effects of building materials and structures on radiowave propagation above about 100 MHz: recommendation ITU-R P.2040-1[R]. Geneva: ITU-R, 2015.
- [18] Li H, Xue B, Yang Y K. The technology of measuring and testing phased array antennas[J]. China Measurement Technology, 2003, 29(5): 10-12, 14.  
李宏, 薛冰, 杨英科. 相控阵天线的测试技术[J]. 中国测试技术, 2003, 29(5): 10-12, 14.
- [19] Kaushal H, Kaddoum G. Optical communication in space: challenges and mitigation techniques[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(1): 57-96.
- [20] ITU-R. Prediction methods required for the design of terrestrial free-space optical links: recommendation ITU-R P.1814-0[R]. Geneva: ITU-R, 2007.
- [21] ITU-R. Propagation data required for the design of terrestrial free-space optical links: recommendation ITU-R P.1817-1[R]. Geneva: ITU-R, 2012.
- [22] ITU-R. Characteristics of terrestrial IMT-Advanced systems for frequency sharing/interference analyses: recommendation ITU-R M.2292-0[R]. Geneva: ITU-R, 2014.
- [23] ITU-R. Reference radiation patterns of omnidirectional, sectoral and other antennas for the fixed and mobile services for use in sharing studies in the frequency range from 400 MHz to about 70 GHz: recommendation ITU-R F.1336-5[R]. Geneva: ITU-R, 2019.
- [24] Diao H X, Zhang Y P, Tang Y F, et al. Simulation analysis of atmospheric attenuation effect on optical communication[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(12): 1525-1530.  
刁红翔, 张义浦, 唐雁峰, 等. 大气衰减效应对光通信影响及仿真分析[J]. 激光与红外, 2017, 47(12): 1525-1530.