

文章编号: 2095-4980(2022)05-0414-05

## 基于 EPFD 分析的高低轨卫星角度间隔研究

付春鑫<sup>1</sup>, 蒋应富<sup>2</sup>, 葛俊祥<sup>1</sup>

(1.南京信息工程大学 电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044; 2.上海卫星工程研究所, 上海 201109)

**摘要:** 随着低轨(LEO)通信卫星业务需求的增加, 低轨卫星需要使用 Ka 频段进行通信。本文针对低轨卫星采用 Ka 频段可能与在轨的高轨卫星发生同频干扰问题, 采用基于链路分离角的空域分隔方法进行干扰规避的角度间隔分析。分别从不同干扰场景、地面站分布情况分析对干扰角度间隔的影响, 并在此基础上提出该角度间隔范围内, 低轨卫星需采取的干扰规避措施。

**关键词:** Ka 频段; 同频干扰; 干扰场景; 地面站分布; 干扰规避

中图分类号: TN927+.2

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021133

## Research on angular separation of geostationary and low earth orbit satellites based on EPFD analysis

FU Chunxin<sup>1</sup>, JIANG Yingfu<sup>2</sup>, GE Junxiang<sup>1</sup>

(1.School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Engineering, Nanjing Jiangsu 210044, China;  
2.Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** With the increasing demand of Low Earth Orbit(LEO) communication satellite services, LEO satellites need to use Ka band for communication. In order to solve the problem of co-frequency interference between LEO satellite and Geostationary Orbit(GEO) satellite when Ka band is utilized, the spatial separation method based on link separation angle is adopted to analyze the angle interval of interference avoidance. The influence of different interference scenarios and ground station distribution on the interference angle interval is studied, and the interference avoidance measures are put forward for LEO satellites within the angle interval.

**Keywords:** Ka band; co-frequency interference; interference scenario; ground station distribution; interference avoidance

随着低轨(LEO)通信卫星数量的增加, LEO 通信卫星的业务需求也在不断提高, 导致 LEO 通信业务系统容量压力急剧增加。由于可用于 LEO 卫星通信的低频段带宽受到限制, 扩展可用带宽是解决这一问题的主要途径。相比于传统的 C 频段, Ka 频段具有更丰富的频谱带宽, 因此, Ka 频段成为 LEO 通信卫星发展的必然趋势。但 LEO 卫星采用 Ka 频段存在与对地静止(GEO)卫星现使用的 Ka 频段发生重叠问题, 容易发生同频干扰。

根据无线电规则中的静态频谱分配原则, 卫星通信使用的 Ka 频段为 17.7~21.2/27.5~31 GHz, 当 GEO 和 LEO 卫星通信频率发生共用时, LEO 卫星通信不得对在轨的 GEO 卫星通信造成有害干扰, 特别地, 在 17.8~19.3/28.6~29.1 GHz 特定频段, GEO 卫星通信享有优先权<sup>[1]</sup>。Ka 频段的其他部分频率协商工作, 应遵循文献[2]中第 22.5 条规定的等效功率通量密度(Equivalent Power Flux Density, EPFD)限制条件, 并作为设计约束。同时, LEO 不能寻求 GEO 卫星系统的干扰保护。因此, 满足 EPFD 保护门限成为研究 GEO 和 LEO 卫星同频干扰规避措施必不可少的前提条件。

目前, LEO 与 GEO 之间的频谱共享技术研究主要集中在干扰分析方面: 文献[3]提出 LEO 通信信号对 GEO 通信信号的干扰可分为 LEO 地面站上行信号对 GEO 卫星接收信号的干扰和 LEO 卫星的下行信号对 GEO 地面站接收信号的干扰两类; 文献[4-5]基于空间角分析问题, 分别分析了 LEO 系统通信信号对 GEO 系统的上行干扰和下行干扰模型。这两篇文章均只简要阐述了干扰模型与规避基本设想, 没有开展详细论述。

收稿日期: 2021-04-01; 修回日期: 2021-05-06

对于现阶段关于同频干扰规避问题，文献[6]提出了采用控制 LEO 系统通信功率的方法来减轻对 GEO 系统的干扰；文献[7]介绍了非对地静止卫星系统对 GEO 卫星系统的频谱共用干扰规避问题，但只研究了中轨卫星对 GEO 卫星的干扰问题；ITU-R 建议书<sup>[8-10]</sup>提出采用卫星及地面站天线旁瓣赋形约束、卫星功率控制约束、卫星关机约束、卫星接入规避带等措施规避同频干扰问题；文献[11]在讨论低轨通信星座发展时提到美国 OneWeb 公司提出的当卫星飞行到赤道附近时，采用“渐近俯仰”专利技术，即当地面站上行波束可能对 GEO 卫星产生干扰时，地面站上行波束自动选择其他方向上的卫星进行上行通信，通过调整上行波束方向和信号电平，从而消除对 GEO 卫星的干扰。以上方案的研究均是在 ITU 规定的干扰门限下进行，至于如何满足 EPFD 的保护门限，以上文献均未作详细讲述。

本文基于 EPFD 值研究了 LEO-GEO 之间的同频干扰问题。首先，采用空域分隔的方法，研究链路分离角与单个干扰源 EPFD 之间的关系，并结合 ITU 给出的 EPFD 保护门限值得到不同的干扰场景所需的链路分离角的大小。最后将链路分离角的门限值设为角度间隔，并提出在该角度间隔范围内，LEO 从宏观上所需采取的规避措施，为同频干扰具体解决方案提供了研究基础。

### 1 干扰场景分析

同频干扰主要分为 LEO 对 GEO 和 GEO 对 LEO 两种类型的干扰，本文提出的干扰分析主要针对 LEO 对 GEO 的干扰。LEO 对 GEO 的干扰场景如图 1 所示，可细分为 LEO 地面站上行信号对 GEO 卫星的干扰和 LEO 卫星下行信号对 GEO 地面站的干扰，且上、下行场景的干扰还会因为地面站分布不同而产生不同的影响。

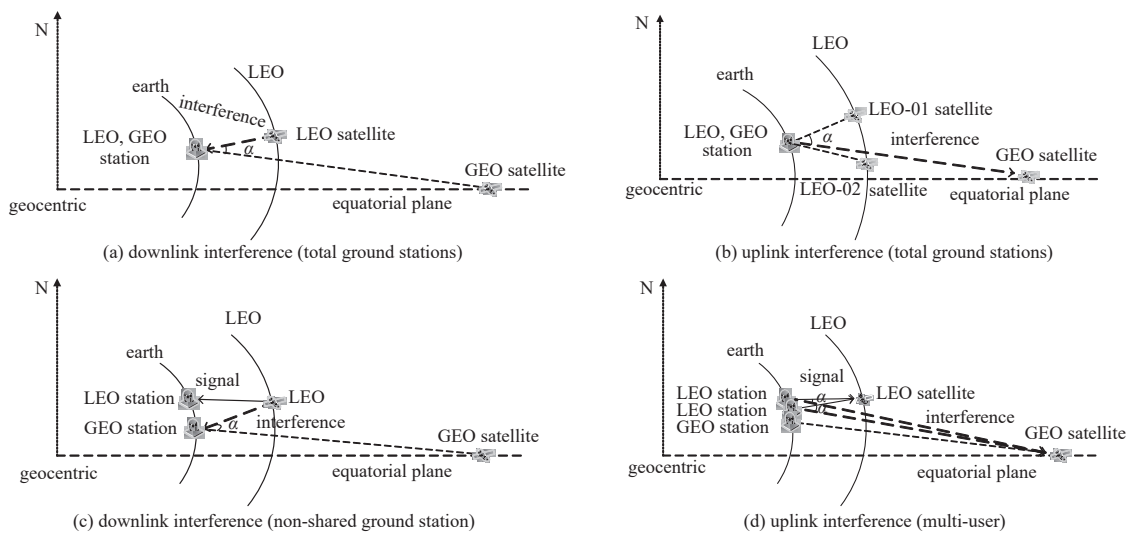


Fig.1 LEO to GEO interference scenario  
图 1 LEO 对 GEO 干扰场景

在下行干扰场景中，当 GEO 与 LEO 同时建立通信链路状态时，LEO 卫星发射功率信号，GEO 地面站接收功率信号，且 LEO 卫星处于地面站的可视区域，则 LEO 卫星的下行信号容易被 GEO 地面站接收天线接收，从而对 GEO 地面站接收信号产生干扰；同样地，上行干扰场景中，LEO 地面站天线上行信号容易被 GEO 卫星接收天线接收，并对其产生干扰。

针对同频干扰问题，本文将从轨道设计的角度与可能受到干扰的 GEO 采取空域分隔的方法，让 LEO 在最大限度上规避对 GEO 的干扰。对于任意位置的地面站，将地面站与两颗卫星之间的空间夹角称为链路分离角  $\alpha$ ，并将满足链路分离角门限值  $\alpha_{th}$  在空间范围上称为 LEO 需采取规避措施的角度间隔。

### 2 角度间隔分析

当 LEO 卫星与 GEO 卫星均采用 Ka 频段时，通常会发生如图 2 所示的频段部分重叠现象。假设 LEO 卫星采用的带宽为  $W_{LEO}$ ，GEO 卫星采用的带宽为  $W_{GEO}$ ，Overlap 为两卫星的重叠带宽， $P_{TX}$  为干扰信号的发射功率，则重叠频带内干扰信号的发射功率  $\hat{P}_{TX}$  可用式(1)表示：

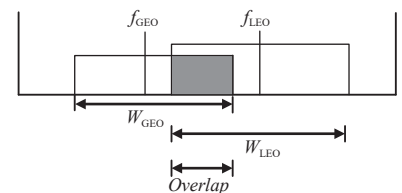


Fig.2 Frequency band overlapping between two satellite systems  
图 2 两卫星系统频段重叠

$$\hat{P}_{TX} = P_{TX} \frac{Overlap}{W_{LEO}} \quad (1)$$

根据 ITU 建议书, 在研究同频干扰问题时, 应以 EPFD 作为设计约束。EPFD 定义为: 非对地静止卫星系统范围内, 对地静止卫星系统接收到的非对地静止卫星系统发射端的功率通量密度总和。本文首先针对 GEO 接收到的单个干扰源发射端的 EPFD 值进行分析, 并将下行干扰场景对应的 EPFD 记为  $EPFD_{down}$ , 如式(2)所示:

$$EPFD_{down} = 10 \lg \left( \hat{P}_{TX} \frac{G_{TX}(\theta_2)}{4\pi d_2^2} \times \frac{G_{RX}(\varphi_2)}{G_{RX,MAX}} \right) \quad (2)$$

式中:  $\hat{P}_{TX}$  为 LEO 卫星在重叠带宽内的发射功率;  $G_{TX}(\theta_2)$  为 LEO 卫星发射天线在离轴角  $\theta_2$  方向上的天线增益;  $G_{RX}(\varphi_2)$  为 GEO 地面站接收天线在离轴角  $\varphi_2$  方向上的接收增益;  $G_{RX,MAX}$  为 GEO 地面站接收天线最大增益;  $d_2$  为 LEO 卫星到 GEO 地面站的距离。

同样地, 将单个干扰源上行干扰场景的 EPFD 值记为  $EPFD_{up}$ , 如式(3)所示。其中,  $G_{TX}(\theta_1)$  为 LEO 地面站天线在离轴角  $\theta_1$  方向上的增益,  $d_1$  为 LEO 地面站到 GEO 卫星的距离,  $G_{RX}(\varphi_1)$  为 GEO 卫星接收天线在离轴角  $\varphi_1$  方向上的接收增益,  $G_{RX,MAX}$  为 GEO 卫星接收天线的最大增益。

$$EPFD_{up} = 10 \lg \left( \hat{P}_{TX} \frac{G_{TX}(\theta_1)}{4\pi d_1^2} \times \frac{G_{RX}(\varphi_1)}{G_{RX,MAX}} \right) \quad (3)$$

天线离轴角  $\theta, \varphi$  与干扰距离  $d$  示意图如图 3 所示, 在单个干扰源的干扰场景中, 特别地, 当 LEO 与 GEO 共用地面站时,  $\theta_1$  即为  $\varphi_2$ , 在空间角度上, 该离轴角  $\theta_1$  和  $\varphi_2$  即为链路分离角  $\alpha$ 。根据式(2)~(3)可知, 干扰信号的 EPFD 值与干扰距离成反比, 故随着链路分离角变小, 干扰距离也越来越小, 从而单个干扰信号的 EPFD 值越来越大。

将 ITU 给出的 EPFD 门限值记为  $EPFD_{th}$ , 其对应的链路分离角记作  $\alpha_{th}$ 。对于单个干扰源下行干扰场景, 由于 GEO 地面站与两颗卫星下点存在经度差, 干扰距离  $d_2$  会随经度差的增大而增大, 故当经度差为  $0^\circ$  时, 即地面站与两颗卫星处于同一经度面, 此时干扰距离  $d_2$  最短。因此, 对单个干扰源下行干扰场景的链路分离角门限值  $\alpha_{down,th}$  进行一次放大, 即针对地面站与两颗卫星下点经度差为  $0^\circ$  时, 对不同纬度的地面站变换仰角所取得的门限标准  $EPFD_{th}$  的最大链路分离角定为  $\alpha_{down,th}$ 。

同样地, 对于单个干扰源的上行干扰场景, 将满足保护门限  $EPFD_{th}$  的链路分离角记为  $\alpha_{up,th}$ 。值得注意的是, 在上行干扰场景中, 实际场景多为图 1(d)所示, 为单个 LEO 卫星波束覆盖下的多个 LEO 地面站同时进行上行通信。因此, 该场景为多个 LEO 地面站对 GEO 卫星干扰信号的累加值。由于每个 LEO 地面站与 GEO 卫星的相对位置不一致, 且 LEO 地面站天线指向 LEO 卫星的方向也不同, 从而造成了对上行多用户干扰场景分析的复杂性。因此本文分析多用户上行干扰场景是基于单干扰源链路分离角门限值  $\alpha_{up,th}$  提出的。

综合考虑上、下行干扰场景, 选取上、下行场景门限最大值为链路分离角门限值, 如式(4)所示:

$$\alpha_{th} = \text{Max}(\alpha_{up,th}, \alpha_{down,th}) \quad (4)$$

将链路分离角门限值对应的范围称为角度间隔范围, 且在该角度间隔范围内, LEO 需无条件采取规避措施。本文从宏观角度提出如图 4 所示的规避方案。针对单个干扰源下行干扰场景中, 链路分离角小于等于门限值时, 该 LEO 卫星需要采取关机措施规避对 GEO 地面站的干扰; 在单个干扰源上行干扰场景中, 地面站通过遥测感知到链路分离角小于等于门限值时, 则需改变天线指向, 避免对 GEO 卫星接收信号的干扰; 其中多用户 LEO 地面站同时对 GEO 卫星造成干扰的场景, 满足单颗 LEO 卫星覆盖下的地面站, 当链路分离角小于等于门限值时, 则需关闭自己的上行信号。

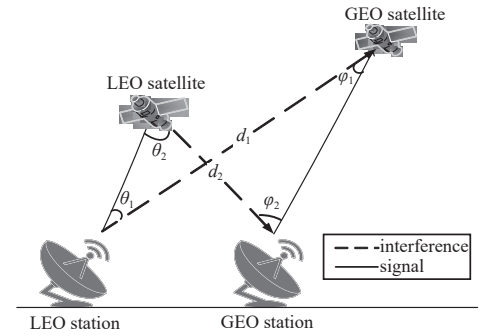


Fig.3 Schematic diagram of antenna off-axis angle and interference distance

图 3 天线离轴角与干扰距离示意图

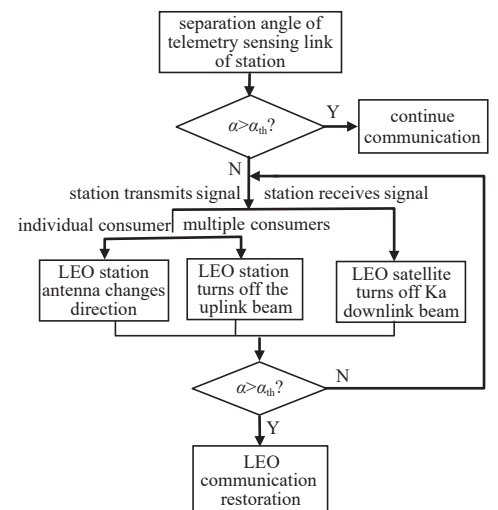


Fig.4 Flow chart of LEO evasion measures

图 4 LEO 规避措施流程图

### 3 干扰仿真分析

本文通过 STK 仿真软件，对同频干扰模型进行仿真。首先，仿真 LEO 地面站与 GEO 地面站重合的情况，即分析 LEO 地面站与 GEO 地面站均位于(116°E,39°N)位置时，GEO 通信信号受到干扰的情况。然后，将 GEO 地面站固定在(116°E, 39°N)位置，同时固定 LEO 地面站经度位置，变换 LEO 地面站的纬度位置，分别与 GEO 地面站保持 1°,2°,3°,4° 的纬度间隔。最后，分析 LEO 卫星在单个运行周期内，GEO 卫星受到的干扰随地面站位置的变化关系。

表 1 为仿真参数。表 2 为 ITU 列出的 EPFD 门限，其中上、下行干扰场景的载波带宽均为 40 kHz。

在单个干扰源下行干扰场景中，对于两卫星地面站共用的场景，即两地面站同时位于(116°E,39°N)位置时，GEO 地面站接收到干扰信号的 EPFD 随着链路分离角的变化如图 5 所示。由于地面站均建立在北半球，随着 LEO 卫星轨迹的改变，链路分离角  $\alpha$  关于地面站与 GEO 卫星的连线是不对称的，因此 GEO 接收到干扰信号的 EPFD 图像也是不对称的。在 LEO 卫星处于降轨过程时，干扰信号的 EPFD 值随着链路分离角一起逐渐变小再变大。根据表 2 可知，下行干扰场景的门限值  $EPFD_{th}$  为  $-164 \text{ dB}(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$ ，图 5 中该门限值对应的链路分离角  $\alpha_{down,th}=3.7^\circ$ 。同样的，对于两卫星地面站共用上行干扰场景，GEO 卫星接收到单个干扰源的 EPFD 与链路分离角的关系如图 6 所示，干扰场景门限值  $\alpha_{down,th}=-162 \text{ dB}(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$  对应的链路分离角为  $1^\circ$ 。

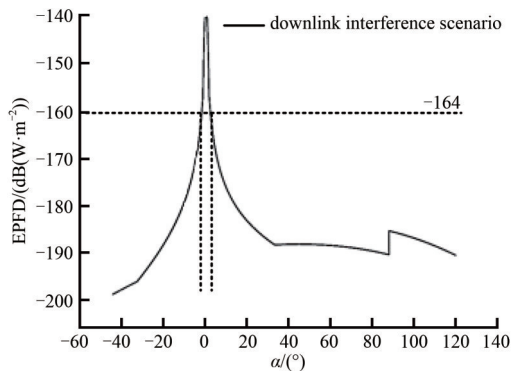


Fig.5 Variation of EPFD received by GEO ground station with the change of link angle  
图 5 GEO 地面站接收的 EPFD 随链路分离角的变化

对于单个干扰源非共用地面站的干扰场景分析，通过改变 LEO 地面站的位置，仿真得出链路分离角门限值与地面站纬度距离的关系如图 7 所示。可以看出，链路分离角门限值随距离的增大而减小，从而可知增大两地面站的距离有利于减小干扰范围，缩短干扰时间。根据式(4)可知，链路分离角门限值取上、下行干扰场景门限值的最大值，故取  $\alpha_{th}=3.7^\circ$ ，并将  $3.7^\circ$  定为干扰场景的角度间隔。

### 4 结论

本文主要采用链路分离角的空域分隔方法对 LEO 卫星需要采取规避措施的角度间隔范围进行研究，并结合 ITU 建议书给出的干扰保护门限，在 STK 仿真软件中对不同干扰场景、地面站分布情况进行仿真，研究了不同场景对于干扰规避角度间隔的

表 1 仿真参数

Table1 Simulation parameters

parameter	value
LEO orbit/km	1 200
GEO orbit/km	35 786
earth radius/km	6 371
orbit inclination/(°)	87
uplink frequency/GHz	28.5
downlink frequency/GHz	18
LEO bandwidth/GHz	2.4
Overlap bandwidth/GHz	2.4
LEO station antenna aperture/m	2.4
GEO station antenna aperture/m	1
LEO satellite antenna aperture/m	0.75
GEO satellite antenna aperture/m	3
uplink transmit power/dBW	10
downlink transmit power/dBW	11.2
station antenna gain	reference [12]
LEO satellite antenna gain	reference [13]
GEO satellite antenna gain	reference [14]

表 2 干扰门限

Table2 Interference threshold

interference scene	frequency/ GHz	EPFD threshold/ $(\text{dB}(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}))$
uplink interference	27.5~28.6	-162
downlink interference	17.8~18.6	-164

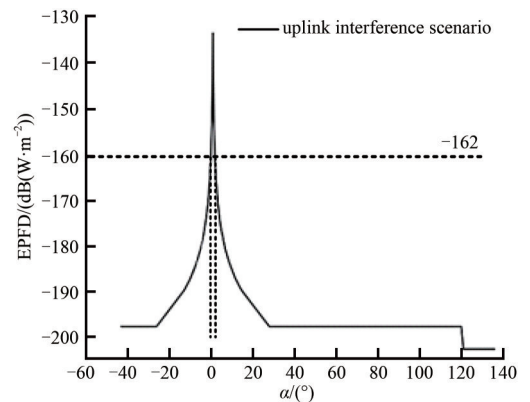


Fig.6 Variation of EPFD received by GEO satellite with the change of link separation angle  
图 6 GEO 卫星接收到 EPFD 随链路角的变化

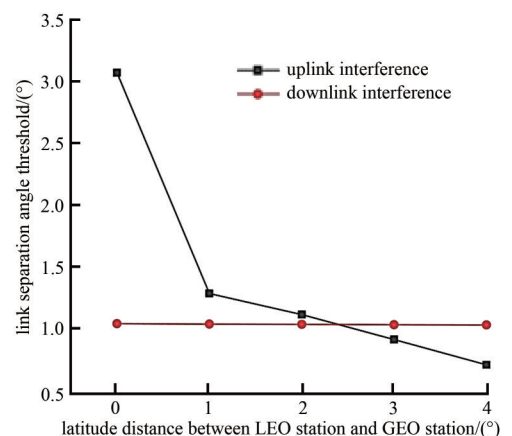


Fig.7 Link separation angle threshold of unshared ground station  
图 7 非共用地面站链路分离角门限值

影响, 并对该问题给出了详细论证。通过 STK 仿真, 得出 LEO 卫星需要采取规避措施的角度间隔范围, 同时研究了 LEO 与 GEO 共用地面站和不同地面站对链路分离角的影响, 得出两地面站距离越大, 链路分离角越小, 从而有利于缩短 LEO 对 GEO 干扰时间的结论; 在已知 LEO 卫星规避角度间隔范围的基础上, 从宏观上给出规避方案, 从而为具体的规避方案措施研究提供参考价值。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 张泓湜, 蒋伯峰. 基于空间隔离的低轨卫星系统频谱共享方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(9): 1909–1917. (ZHANG Hongshi, JIANG Bofeng. Spectrum sharing method for LEO satellite system based on space isolation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(9): 1909–1917.)
- [ 2 ] ITU Radiocommunication (ITU-R). Radio regulations articles edition of 2012[S]. Geneva: ITU, 2012: 271–289.
- [ 3 ] ITU Radiocommunication (ITU-R). Analytical method for estimating interference between non-geostationary mobile-satellite feeder links and geostationary fixed-satellite networks operating co-frequency and codirectionally[S]. Geneva: ITU, 1997: 2–3.
- [ 4 ] XU Pin, WANG C, YUAN Jun, et al. Uplink interference analysis between LEO and GEO systems in Ka band[C]// 2018 IEEE 4th International Conference on Computer and Communications. Chengdu, China: IEEE, 2018.
- [ 5 ] WANG H, WANG C, YUAN J, et al. Coexistence downlink interference analysis between LEO system and GEO system in Ka band[C]// 2018 IEEE/CIC International Conference on Communications in China. Beijing, China: IEEE, 2018: 465–469.
- [ 6 ] LI R, GU P, HUA C. Optimal beam power control for co-existing multibeam GEO and LEO satellite system[C]// 2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. Xi'an, China: [s.n.], 2019: 1–6.
- [ 7 ] SHARMA S K, CHATZINOTAS S, OTTERSTEN B. International interference mitigation techniques for spectral coexistence of GEO and N GEO satellites[J]. 34th AIAA International Communications Satellite Systems Conference. Cleveland, OH: AIAA, 2016: 1–12.
- [ 8 ] ITU-R S. 1431. Method to enhance sharing between non-GEO FSS systems (except MSS feeder links) in the frequency bands between 10–30 GHz[S]. Geneva: ITU, 2000.
- [ 9 ] ITU-R S. 1325. Simulation methodologies for determining statistics of short-term interference between co-frequency, codirectional non-geostationary-satellite orbit fixed-satellite service systems in circular orbits or geostationary-satellite orbit fixed-satellite service networks[S]. Geneva: ITU, 2003.
- [ 10 ] ITU-R S. 1503. Functional description to be used in developing software tools for determining conformity of non-geostationary-satellite orbit fixed-satellite system networks with limits contained in Article 22 of the radio regulation[S]. Geneva: ITU, 2013.
- [ 11 ] 翟继强, 李雄飞. OneWeb 卫星系统及国内低轨互联网卫星系统发展思考[J]. 空间电子技术, 2017, 14(6): 1–7. (ZHAI Jiqiang, LI Xiongfei. Thinking on the development of OneWeb satellite system and domestic low orbit internet satellite system[J]. Space Electronic Technology, 2017, 14(6): 1–7.)
- [ 12 ] ITU Radiocommunication (ITU-R). Reference FSS earth-station radiation patterns for use in interference assessment involving non-GSO satellites in frequency bands between 10.7 GHz and 30 GHz[S]. Geneva: ITU, 2001: 2–3.
- [ 13 ] ITU Radiocommunication (ITU-R). Satellite antenna radiation patterns for non-geostationary orbit satellite antennas operating in the fixed-satellite service below 30 GHz[S]. Geneva: ITU, 2001: 2–4.
- [ 14 ] ITU Radiocommunication (ITU-R). Satellite antenna radiation pattern for use as a design objective in the fixed-satellite service employing geostationary satellites[S]. Geneva: ITU, 1997: 2–5.

#### 作者简介:

付春鑫(1996–), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为卫星通信 .email: 2319539436@qq.com.

葛俊祥(1960–), 男, 博士, 教授, 主要研究领域为微波毫米波理论与技术、天线理论与技术、卫星/移动通信等。