

非静止卫星轨道星座系统固定波束到地功率通量密度研究

黄颖, 简晨, 李伟, 严康

(国家无线电监测中心, 北京 100037)

摘要: 功率通量密度是评估非静止卫星轨道星座系统保护地面业务系统的一项干扰评价指标。基于功率通量密度的定义, 给出非静止卫星轨道星座系统固定波束功率通量密度的计算方法, 在分析ITU关于非静止卫星轨道卫星固定业务系统的功率通量密度约束条件的基础上, 给出确定非静止卫星轨道星座系统功率通量密度限值的方法。以Starlink系统为分析场景, 计算分析Starlink测控波束的功率通量密度。结果表明, 给出的功率通量密度计算方法与Starlink系统使用方法的分析结果完全一致, 18.55~18.6 GHz频段测控波束功率通量密度不满足限值要求。在当前国际规则框架下, 卫星星座规模大小是非静止卫星轨道星座系统合法使用Ka频段的决定性因素。

关键词: 非静止卫星轨道; 功率通量密度; 星座系统; 固定波束; 同频干扰

中图分类号: TP927.2

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2022012

Research on the Power Flux-Density at the Earth's Surface Produced by Emissions from the Fixed Beam of NGSO Constellation System

HUANG Ying, JIAN Chen, LI Wei, YAN Kang

State Radio Monitoring Center, Beijing 100037, China

Abstract: The power flux-density is an interference criterion for protecting terrestrial service systems from non-geostationary orbit (NGSO) constellation systems. Based on the definition of power flux density(PFD), a calculation method on the PFD produced by the emissions from the fixed beam of NGSO constellation system was given. On the basis of describing the PFD constraint conditions of the NGSO fixed-satellite service system given by ITU, a method for determining the limits of PFD from the NGSO constellation system was presented. Taking the Starlink system as the typical scenario, the PFD produced by telemetry, tracking, and control (TT&C) beam of the Starlink system was analyzed. The results showed that the analytical results of the given method were consistent with those of the Starlink system, and the PFD of TT&C beam in the 18.55-18.6 GHz frequency band exceeded the limit given in radio regulations. Under the current ITU framework, the number of the satellite constellation is a decisive factor for the legal use of the Ka band by NGSO constellation system.

Keywords: NGSO, power flux-density, constellation system, fixed beam, co-frequency interference

0 引言

近年来, 非静止卫星轨道(Non-Geostationary Satellite Orbit, NGSO)星座系统发展迅猛, 全球范围内已有超过100多个公司或机构向ITU递交卫星网络资料, 以发展其NGSO宽带通信星座系统^[1]。目前, 全球主流的NGSO宽带通信星座系统有美国的Starlink星座/Kuiper星座、英国的OneWeb星座、俄罗斯的Sphere星座以及中国

的鸿雁/虹云星座等, 其中, OneWeb预计发射720颗卫星, Starlink预计共发射约42 000颗卫星^[2]。这些NGSO星座系统拟使用的频率资源特别集中, 主要是Ku/Ka/Q/V频段, 而且通常具有轨道高度低、占用带宽大、卫星数量多和波束可控等特征。因此, NGSO星座系统对使用相同频率的地面业务或其他空间业务产生有害干扰的可能性极大^[3-4]。

为保护相同地位的固定业务和移动业务的通信系统,《无线电规则》第21.16条规定了空间业务电台发射到地功率通量密度(Power Flux-Density, PFD)的限值^[5]。由于NGSO星座系统的星座构型复杂,星座规模从几十颗到几百颗甚至上千颗不等,覆盖特性能够满足全球任何地点可达,不同频段的PFD限值与NGSO星座系统的系统特性强相关。因此有必要对NGSO星座系统下行波束到地PFD的计算方法和规则要求与适用条件等方面进行研究。

NGSO星座系统的卫星波束有固定波束和可控波束等类型,例如OneWeb每颗卫星具有16个相同的不可控的高椭圆固定波束,Starlink每颗卫星用户波束和馈线波束采用可控波束,测控波束采用固定波束^[6]。本文基于PFD的定义,给出NGSO星座系统固定波束到地PFD计算方法和国际上关于PFD限值的确定方法,并以Starlink星座系统为例,分析验证PFD计算方法的可用性与规则符合性。

1 NGSO卫星固定波束到地功率通量密度计算方法

《无线电规则》第21.16条中规定,空间电台到地产生的最大PFD不应超过相应业务及频段的限值。这个最大PFD是在自由空间传播条件下获得的。PFD的定义为单位面积上通过的功率,因此计算空间电台对地球表面产生的最大PFD需要确定与发射功率和传播距离两个参数相关的变量,如发射功率谱密度、天线方向图 and 不同仰角传播距离等。如图1所示,空间电台信号到达地球站所在点的方向与水平面的夹角定义为对地到达角 θ ,等于该点向空间电台方向看上去的仰角,空间电台到地球站和空间电台到地心的夹角定义为半视场角 ϕ 。卫星与地球站之间的传播距离 L 和半视场角 ϕ 可表示如下

$$L = \sqrt{(H+R)^2 - R^2 \cos^2 \theta} - R \sin \theta \quad (1)$$

$$\phi = \arccos \frac{L^2 + (R+H)^2 - R^2}{2(R+H)L} \quad (2)$$

由式(1)~式(2)可知,传播距离、半视场角均与仰角、卫星轨道高度有关。如图2所示,下行链路中,卫星半视场角为 ϕ ,地球站天线对准空间电台,仰角为 θ 。此处卫星下行波束离轴角为 ψ 。此方向对地产生的PFD可根据式(3)或式(4)计算

$$\text{PFD} = P + G(\psi) + 10 \lg(\text{BW}) - 10 \lg(4\pi L^2) \quad (3)$$

$$\text{PFD} = \text{EIRP}(\psi) + 10 \lg(\text{BW}) - 10 \lg(4\pi L^2) \quad (4)$$

其中, P 为卫星下行波束发射功率谱密度,EIRP(ψ)和 $G(\psi)$ 分别为偏离卫星天线主轴 ψ 方向上的EIRP谱密度和发射天线增益。BW为计算PFD时对应的带宽。BW通常定义为

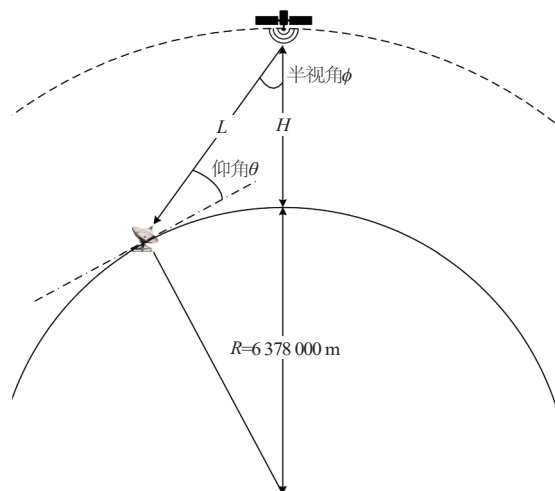


图1 空间电台对地发射几何关系

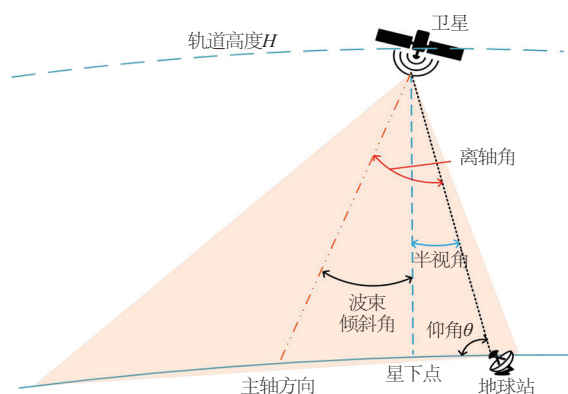


图2 卫星覆盖特性示意

21.16条中限值对应的参考带宽,即为4 kHz或1 MHz。

对于固定波束,计算空间电台在地球表面不同水平面上到达角产生的最大PFD时,当观察点位于波束主瓣覆盖范围内,此区域发射天线增益最大,可认为卫星主瓣对准观察点,则 $G(\psi)$ 取天线最大增益 $G_{\max}$ 。 P 取最大发射功率谱密度 $P_{\max}$,EIRP谱密度取最大EIRP $_{\max}$,计算公式变为

$$\text{PFD} = P_{\max} + G_{\max} + 10 \lg(\text{BW}) - 10 \lg(4\pi L^2) \quad (5)$$

$$\text{PFD} = \text{EIRP}_{\max} + 10 \lg(\text{BW}) - 10 \lg(4\pi L^2) \quad (6)$$

当观察点位于波束主瓣覆盖范围之外时,利用式(3)或式(4)计算波束在不同水平面到达角的最大PFD。此时, P 取最大发射功率谱密度 $P_{\max}$, $G(\psi)$ 为偏离天线主轴 ψ 方向上的增益,EIRP(ψ)为偏离天线主轴 ψ 方向的EIRP谱密度。

2 NGSO卫星到地PFD限值确定方法

本节分析总结《无线电规则》第21.16条中未规定PFD

限值的频段,分析NGSO卫星固定业务(Fixed-Satellite Service, FSS)系统的PFD限值约束条件和确定方法。

2.1 未规定PFD限值的频段

《无线电规则》第21.16条适用于与固定业务或移动业务以同等权利共用频段的空电台的发射。未规定PFD限值的频段包括以下情况:

- (1) 未划分给空业务(空对地)的频段;
- (2) 未划分给固定业务或移动业务的频段;
- (3) 划分给空业务(空对地)和固定业务或移动业务,但空业务(空对地)为主要业务,固定业务或移动业务为次要业务的频段;
- (4) 划分给空业务(空对地)和固定业务或移动业务,但固定业务或移动业务为主要业务,空业务(空对地)为次要业务的频段;
- (5) 大于50.2 GHz的频段。

2.2 NGSO星座系统的到地PFD限值约束条件与确定

分析到地PFD限值时,第21.16条中列出的与NGSO星座系统相关的约束条件如下。

条件1: 同一半球同时运行的同频NGSO星座系统数量不超过5个。

条件2: 轨道倾角在35°到145°之间。

条件3: 远地点轨道高度大于18 000 km。

条件4: 无线电通信局在1995年11月17日之前收到的并在该日期前未投入运营的要求完整协调或通知资料的NGSO星座系统。

条件5: 无线电通信局已于2007年11月16日之后收到其完整协调资料或完整通知资料的卫星固定业务空电台。

条件6: NGSO星座系统卫星数量不大于100颗。

C/Ku/Ka/Q/V频段NGSO卫星到地PFD限值确定方法见式(7)~式(16),其中, θ 为对地到达角(仰角)。

(1) C频段限值

对满足条件1的NGSO FSS系统空电台,在3 400~4 200 MHz,NGSO星座系统到地PFD限值PFD_{limit}的确定方法如下

$$\text{PFD}_{\text{limit}} = \begin{cases} -138 - Y & , 0^\circ \leq \theta \leq 5^\circ \\ -138 - Y + (12 + Y)(\theta - 5) / 20 & , 5^\circ < \theta \leq 25^\circ \\ -126 & , 25^\circ < \theta \leq 90^\circ \end{cases}$$

$$Y = \begin{cases} 0 & , \max(N_N, N_S) \leq 2 \\ 5 \lg(\max(N_N, N_S)) & , \max(N_N, N_S) > 2 \end{cases}$$

(7)

其中, N_N 为北半球同一星座系统中同时发射的同频空电台最大数量, N_S 为南半球同一星座系统中同时发射的

同频空电台最大数量。当不满足条件1时,该限值的适用性需进一步研究。

(2) Ku频段限值

①对同时满足条件1、条件2和条件3的NGSO FSS系统空电台,在10.7~11.7 GHz、11.7~12.5 GHz(1区)、12.5~12.75 GHz(第5.494款和第5.496款所列的1区国家)、11.7~12.7 GHz(2区)、11.7~12.75 GHz(3区)频段,限值PFD_{limit}的确定方法如下

$$\text{PFD}_{\text{limit}} = \begin{cases} -129 & , 0^\circ \leq \theta \leq 5^\circ \\ -129 + 0.75(\theta - 5) & , 5^\circ < \theta \leq 25^\circ \\ -114 & , 25^\circ < \theta \leq 90^\circ \end{cases} \quad (8)$$

当不满足条件1时,该限值的适用性需进一步研究。

②对不满足条件2或条件3的NGSO FSS系统空电台,在10.7~11.7 GHz,限值PFD_{limit}的确定方法如下

$$\text{PFD}_{\text{limit}} = \begin{cases} -126 & , 0^\circ \leq \theta \leq 5^\circ \\ -126 + 0.5(\theta - 5) & , 5^\circ < \theta \leq 25^\circ \\ -116 & , 25^\circ < \theta \leq 90^\circ \end{cases} \quad (9)$$

③对不满足条件2或条件3的NGSO FSS系统空电台,在11.7~12.5 GHz(1区)、12.5~12.75 GHz(第5.494款和第5.496款所列的1区国家)、11.7~12.7 GHz(2区)、11.7~12.75 GHz(3区)频段,限值PFD_{limit}的确定方法如下

$$\text{PFD}_{\text{limit}} = \begin{cases} -124 & , 0^\circ \leq \theta \leq 5^\circ \\ -124 + 0.5(\theta - 5) & , 5^\circ < \theta \leq 25^\circ \\ -114 & , 25^\circ < \theta \leq 90^\circ \end{cases} \quad (10)$$

(3) Ka频段限值

①对在17.7~18.8 GHz频段的NGSO FSS系统空电台,或在18.8~19.3 GHz频段不符合条件4的NGSO FSS系统空电台,限值PFD_{limit}的确定方法如下

$$\text{PFD}_{\text{limit}} = \begin{cases} -115 - X & , 0^\circ \leq \theta \leq 5^\circ \\ -115 - X + \left(\frac{10+X}{20}\right)(\theta - 5) & , 5^\circ < \theta \leq 25^\circ \\ -105 & , 25^\circ < \theta \leq 90^\circ \end{cases}$$

$$\text{其中, } X = \begin{cases} 0 & , N \leq 50 \\ \frac{5}{119}(N - 50) & , 50 < N \leq 288 \\ \frac{1}{69}(N + 402) & , N > 288 \end{cases}$$

(11)

式中 N 为星座系统卫星数量。

②对在17.7~19.7 GHz频段同时满足条件2和条件3的NGSO FSS系统空电台,或在18.8~19.3 GHz频段满足条件4的NGSO FSS系统空电台,限值PFD_{limit}的确定方

法如下

$$\text{PFD}_{\text{limit}} = \begin{cases} -115 & , 0^\circ \leq \theta \leq 5^\circ \\ -115 + 0.5(\theta - 5) & , 5^\circ < \theta \leq 25^\circ \\ -105 & , 25^\circ < \theta \leq 90^\circ \end{cases} \quad (12)$$

③对于所有第147号决议(WRC07)未涵盖同时满足条件2、条件3和条件5的NGSO FSS系统空间电台,在17.7~19.7 GHz频段,限值 $\text{PFD}_{\text{limit}}$ 的确定方法如下

$$\text{PFD}_{\text{limit}} = \begin{cases} -120 & , 0^\circ \leq \theta \leq 3^\circ \\ -120 + (8/9)(\theta - 3) & , 3^\circ < \theta \leq 12^\circ \\ -112 + (7/13)(\theta - 12) & , 12^\circ < \theta \leq 25^\circ \\ -105 & , 25^\circ < \theta \leq 90^\circ \end{cases} \quad (13)$$

(4) Q/V频段限值

对于满足条件6的NGSO FSS系统空间电台,在37.5~40 GHz, 40~42 GHz, 42~42.5 GHz限值 $\text{PFD}_{\text{limit}}$ 的确定方法分别如下

$$\text{PFD}_{\text{limit}} = \begin{cases} -127 & , 0^\circ \leq \theta \leq 5^\circ \\ -127 + (4/3)(\theta - 5) & , 5^\circ < \theta \leq 20^\circ \\ -107 + 0.4(\theta - 20) & , 20^\circ < \theta \leq 25^\circ \\ -105 & , 25^\circ < \theta \leq 90^\circ \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{PFD}_{\text{limit}} = \begin{cases} -115 & , 0^\circ \leq \theta \leq 5^\circ \\ -115 + 0.5(\theta - 5) & , 5^\circ < \theta \leq 25^\circ \\ -105 & , 25^\circ < \theta \leq 90^\circ \end{cases} \quad (15)$$

$$\text{PFD}_{\text{limit}} = \begin{cases} -120 & , 0^\circ \leq \theta \leq 5^\circ \\ -120 + 0.75(\theta - 5) & , 5^\circ < \theta \leq 25^\circ \\ -105 & , 25^\circ < \theta \leq 90^\circ \end{cases} \quad (16)$$

2.3 PFD约束条件下NGSO星座系统卫星发射功率分析

NGSO星座系统单颗卫星的发射功率产生的到地PFD应小于对应频段的PFD限值,即

$$P_{\text{max}} + G_{\text{max}} + 10\lg(\text{BW}) - 10\lg(4\pi L(\theta)^2) \leq \text{PFD}_{\text{limit}}(\theta) \quad (17)$$

$$\text{EIRP}_{\text{max}} + 10\lg(\text{BW}) - 10\lg(4\pi L(\theta)^2) \leq \text{PFD}_{\text{limit}}(\theta) \quad (18)$$

根据PFD限值可进一步反推NGSO星座系统单颗卫星的最大发射功率谱密度和最大EIRP谱密度,即

$$P_{\text{max}} \leq \text{PFD}_{\text{limit}}(\theta) - G_{\text{max}} - 10\lg(\text{BW}) + 10\lg(4\pi L(\theta)^2) \quad (19)$$

$$\text{EIRP}_{\text{max}}(\phi) \leq \text{PFD}_{\text{limit}}(\theta) - 10\lg(\text{BW}) + 10\lg(4\pi L(\theta)^2) \quad (20)$$

特别地,对于Ka频段的NGSO星座系统,在卫星数量大于288颗时,单颗卫星的 $\text{PFD}_{\text{limit}}$ 与星座规模呈线性相关,如图3所示。在25°以下对地到达角, PFD限值随NGSO星座系统的卫星数量增大而线性减小,且对地到达角越小,限制越严。当对地到达角为5°,星座规模为1 000颗时, PFD限值为-135.3 dBW/m²/MHz;星座规模为10 000颗时, PFD限值为-265.7 dBW/m²/MHz, PFD限值要求提高130.4 dB,意味着星座规模越大, NGSO星座

系统保护地面固定业务系统和移动业务系统的要求更苛刻,对干扰规避措施要求更高。假设NGSO星座系统轨道高度为1 000 km,利用式(20),可得到单颗卫星不同地面到达角方向发射的EIRP谱密度限值,如图4所示。星座规模为10 000颗时,在5°地面到达角方向,单颗卫星发射EIRP谱密度不能超过-187.4 dBW/Hz,这就要求卫星的发射在旁瓣方向具有极高的抑制。为了满足当前《无线电规则》第21.16条中PFD限值要求,设计NGSO星座系统时,可通过结合减小卫星主瓣宽度、降低旁瓣辐射功率、提高卫星地面站工作仰角等多种方式减小25°以下到达角的辐射功率。

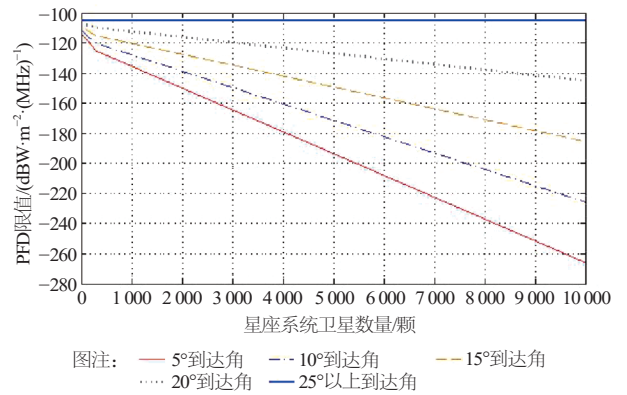


图3 Ka频段NGSO星座系统卫星数量与PFD限值的变化关系

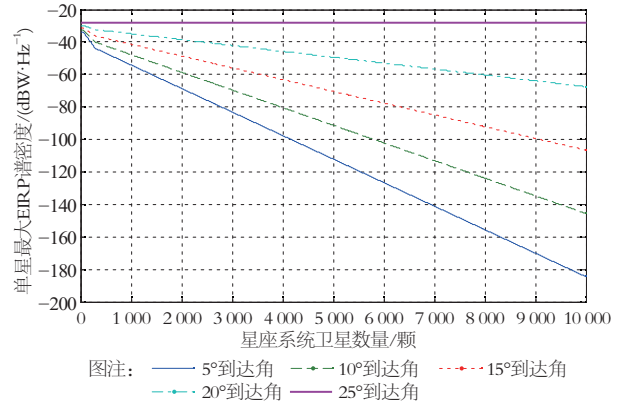


图4 Ka频段NGSO星座系统卫星数量与单颗卫星最大EIRP谱密度变化关系

分析21.16条中NGSO星座系统PFD限值约束条件可知:

(1) NGSO星座系统对地PFD的限值确定方法与多个因素有关,具体包括:星座自身规模大小、轨道倾角、轨道高度、南半球或北半球星座自身的同频卫星数量、同一半球同时运行的NGSO星座系统数量;

(2) 在同一半球同时运行的同频NGSO星座系统数量超过5个时, 3 400~4 200 MHz频段的PFD限值有待进一步

研究;

- (3) NGSO星座系统卫星数量大于100颗时, 37.5 ~ 42.5 GHz频段的PFD限值有待进一步研究;
- (4) 为保护50.2 GHz以上频段的固定业务或移动业务, 相应空间业务对地PFD限值亟待研究;
- (5) 17.7 ~ 19.3 GHz频段的PFD限值在NGSO星座系统卫星规模较大时对卫星发射功率限制过于严格, 需进一步研究确定。

3 NGSO星座系统固定波束到地PFD计算分析与验证

本节以Starlink一代一期星座系统为例, 根据以上计算方法和限值确定方法, 分析计算其固定波束到地PFD并验证限值的规则符合性。

3.1 Starlink一代一期星座系统

Starlink星座系统是太空探索公司SpaceX设计、建造、发射和运营的NGSO星座系统, 提供覆盖全球的高速互联网接入服务。2016年首次向美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)提交其一代一期系统频率许可和业务运营申请, 后对频率轨道特性进行了5次修改^[7-8], 计划发射4 409颗低轨卫星, 运行在5个不同的轨道高度(540 ~ 570 km)。用户波束使用Ku频段, 为可控波束; 馈线波束使用Ku/Ka频段, 均为可控波束; 测控波束使用Ka频段, 为固定波束。Starlink一代一期星座系统申请和获得授权的频段如图5所示。截至2021年8月30日, SpaceX已发射1 740颗Starlink卫星, 在轨卫星1 646颗^[9]。

3.2 Starlink一代一期星座系统固定波束PFD计算及规则符合性验证

以Starlink一代一期系统在2019年8月申请的材料为例^[10], 计算分析测控波束TX11和TX12的到地PFD。申请材料中的波束信息见表1^[10]。TX11和TX12为固定波束, 最大增益分别为3 dBi和5 dBi, 服务区域为全球, 最大EIRP谱密度为-89.2 dBW/Hz和-86.1 dBW/Hz, 对应最大EIRP分别为-12.2 dBW和-9.1 dBW。

在Starlink星座的5个轨道高度中, 最低轨道高度为550 km, 对应最短的传播距离, 在相同发射功率下会产生最大的PFD。考虑到在不同仰角分段内(0 ~ 5°/5° ~ 10°/10° ~ 15°/15° ~ 20°/20° ~ 25°/25° ~ 90°)取最大值, 能够得到最大PFD值。根据式(1)、式(2)和式(6), 在计算PFD时, 仰角按最大角度取值, EIRP谱密度按最大EIRP谱密度取值, 可分析得到不同仰角下的4 kHz和1 MHz参考带宽上的最大PFD值, 见表2。

依据NGSO星座系统的PFD限值确定方法, 12.15 ~ 12.25 GHz和18.55 ~ 18.6 GHz的NGSO空间电台的PFD限值可通过式(10)和式(11)计算得到。SpaceX公司此次申请的卫星数量为4 409颗, 因此式(11)中M取4 409。由表2可知:

- (1) TX11和TX12两个波束在不同水平面到达角下的最大PFD的计算值与SpaceX公司申请材料提供的核定值是一致的;
- (2) 12.15 ~ 12.25 GHz频段TX11波束最大PFD计算值小于《无线电规则》第21.16条规定的限值, 且有较大余量, 满足保护固定业务和移动业务的要求;
- (3) 18.55 ~ 18.6 GHz频段TX12波束在10°以下水平面上到达角的最大PFD计算值大于《无线电规则》第

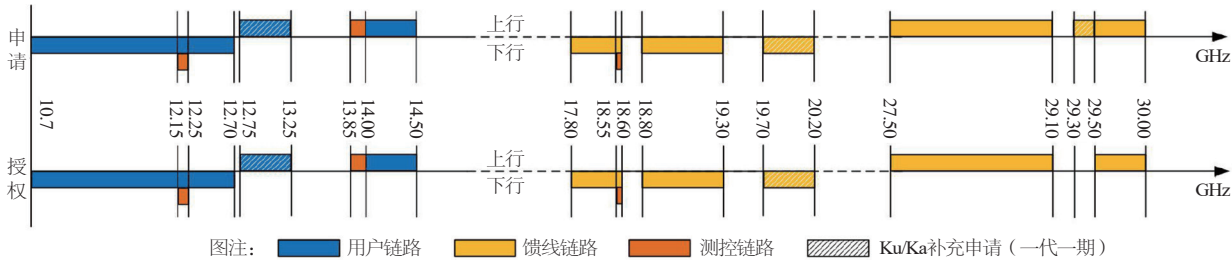


图5 Starlink一代一期星座系统申请和获得授权的频段

表1 Starlink 测控波束TX11和TX12

波束	类型	频率范围/MHz	波束类型	极化方式	最大增益/dBi	最大EIRP谱密度/(dBW·Hz ⁻¹)	最大EIRP/dBW	服务区域
TX11	测控	12 150 ~ 12 250	固定	RHCP	3	-89.2	-12.2	全球
TX12	测控	18 550 ~ 18 600	固定	RHCP	5	-86.1	-9.1	全球

表2 TX11和TX12波束不同水平面上到达角最大PFD结果对比

参数			PFD来源	水平面上到达角最大PFD ($\text{dBW} \cdot (\text{m}^{-2} \cdot \text{参考带宽}^{-1})$)					
波束	频率范围/MHz	参考带宽		0~5	5~10	10~15	15~20	20~25	25~90
TX11	12 150~12 250	4 kHz	SpaceX核定值 ^[10]	-191.1	-189.4	-187.8	-186.4	-185.2	-179
		4 kHz	计算值	-191.0	-189.4	-187.8	-186.4	-185.2	-179.0
		1 MHz	计算值	-167.1	-165.4	-163.8	-162.4	-161.2	-155.0
		1 MHz	限值	-124	-121.5	-119	-116.5	-114	-114
		1 MHz	余量	43.1	43.9	44.8	45.9	47.2	41
TX12	18 550~18 600	1 MHz	SpaceX核定值 ^[10]	-164.0	-162.3	-160.7	-159.3	-158.1	-151.9
		1 MHz	计算值	-164.0	-162.3	-160.7	-159.3	-158.1	-151.9
		1 MHz	限值	-184.7	-164.8	-144.9	-124.9	-105	-105
		1 MHz	余量	-20.7	-2.5	15.8	34.4	53.1	46.9

21.16条规定的PFD限值, 不满足要求。

对于不满足限值的情况, SpaceX在2016年申请文件中做出如下说明^[11]: ①17.7~19.3 GHz频段的PFD限值的确定方法(式(11))是在WRC-2000研究周期制定的, 不适用于卫星数量大于840颗的动态控制的NGSO星座系统; ②式(11)的限值计算方法未考虑受扰地面系统是否可见干扰卫星或干扰卫星是否发射的情况; ③Starlink星座系统全球测控站不足10个, 每个站点有5副天线, 这样保证在同一时间不会有超过50颗活跃卫星, 因此式(11)中 M 应取50颗; ④SpaceX申请豁免17.7~19.3 GHz频段的PFD约束^[12]。

图6给出了PFD值随着不同水平面上到达角的变化趋势。由图可知, 当 $N=50$ 颗时, 即按照Starlink测控链路最大活跃卫星数量来确定18.55~18.6 GHz频段PFD限值时, TX12波束不同水平面上到达角最大PFD的计算值远小于限值。当 $N=4\ 409$ 颗时, 约11°以下的水平面上到达角最大PFD计算值不满足限值要求。由此可见, 在当前的国际无线电管理规则框架下, 卫星星座规模大小是NGSO星座系统能够使用Ka频段的决定性因素。

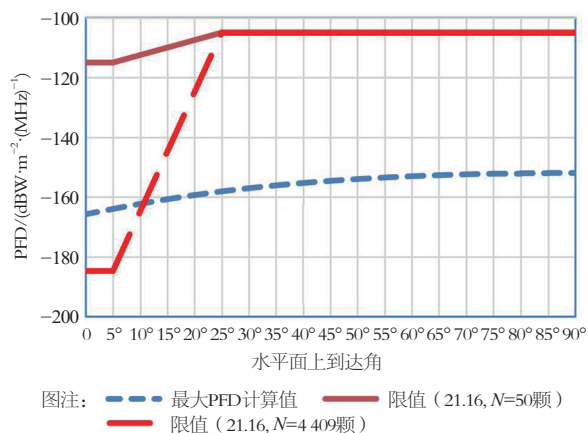


图6 PFD值随着不同水平面上到达角的变化趋势

4 结束语

为保护频率使用同等级别的固定业务和移动业务系统, ITU针对空间无线电业务到地PFD提出了明确的限值要求。本文给出了NGSO星座系统固定波束的PFD计算方法和《无线电规则》第21.16条中NGSO星座系统的PFD限值确定方法以及相应的使用约束条件, 分析了Ka频段PFD限值约束条件下星座规模大小变化对干扰规避以及天线旁瓣抑制的影响。以Starlink星座系统固定波束为分析场景, 计算分析12.15~12.25 GHz和18.55~18.6 GHz频段测控波束的PFD。结果表明, 给出的PFD计算方法与Starlink系统使用方法的分析结果完全一致。Ku频段测控波束PFD满足限值要求, Ka频段测控波束PFD在仰角低于11°时不满足限值要求。其主要原因在于, Ka频段PFD限值与NGSO星座系统规模大小正相关。下一步将重点研究Ku/Ka/Q/V频段PFD限值确定方法以及使用约束条件。

参考文献:

- [1] 李伟, 严康, 耿静茹, 等. NGSO通信星座系统间同频干扰场景与建模研究[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(1): 20-27.
LI W, YAN K, GENG J R, et al. Research on scenarios and modeling of co-frequency interference between NGSO communication constellation systems[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(1): 20-27.
- [2] 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.
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.
- [3] 李伟, 黄颖, 严康, 等. Q/V频段5G基站对NGSO星座系统地球站的干扰分析[J]. 电讯技术, 2021, 61(5): 548-554.
- LI W, HUANG Y, YAN K, et al. Interference of 5G base stations on earth stations of NGSO constellation system in Q/V band[J]. Telecommunication Engineering, 2021, 61(5): 548-554.
- [4] KOBAYASHI H, SHINONAGA H, ARAKI N, et al. Study on interference between non-GSO MSS gateway station and GSO FSS earth station under reverse band operation[C]// Proceedings of the 10th International Conference on Digital Satellite Communications. Brighton: IET, 1995: 282- 289.
- [5] ITU. Radio regulations, article[M]. Geneva: ITU, 2020.
- [6] DEL P I, 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: 123-135.
- [7] SpaceX. Application for fixed satellite service attachments by space exploration holdings, LLC: attachment legal narrative, file number: SAT-LOA-20161115-00118[R]. 2016.
- [8] SpaceX. Application for fixed satellite service attachments by space exploration holdings, LLC: attachment legal narrative, file number: SAT-LOA-20200417-0037[R]. 2020.
- [9] Jonathan. Jonathan's space pages ,Starlink launch statistics[EB]. 2018.
- [10] SpaceX. Application for fixed satellite service attachments by space exploration holdings, LLC: attachment technical parameters, file number: SAT-LOA-20190830-00087[R]. 2019.
- [11] SpaceX. Application for fixed satellite service attachments by space exploration holdings, LLC: attachment technical attach, file number: SAT-LOA-20161115-00118[R]. 2016.
- [12] SpaceX. Application for fixed satellite service attachments by space exploration holdings, LLC: attachment technical attach, file number: SAT-LOA-20161115-00118[R]. 2016.

[作者简介]



黄颖（1968-），女，硕士，国家无线电监测中心高级工程师，主要研究方向为空间无线电业务管理技术。



简晨（1987-），男，硕士，国家无线电监测中心高级工程师，主要研究方向为卫星通信系统频率兼容技术、卫星监测技术。



李伟（1984-），男，博士，国家无线电监测中心教授高级工程师，主要研究方向为卫星通信系统的频率兼容技术、频谱共享技术。



严康（1989-），男，硕士，国家无线电监测中心高级工程师，主要研究方向为卫星通信系统的频率兼容技术、无线电监测技术。