



专题：卫星互联网

低轨星座系统的可控波束到地功率通量密度研究

黄颖, 李伟, 简晨, 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空间业务系统保护地面业务系统的一项干扰评价指标。给出了低轨星座系统可控波束的功率通量密度的计算方法和特定可控角下功率通量密度限值的符合性判定算法。在此基础上, 提出了一种基于仰角遍历的功率通量密度限值的符合性判定算法。结合低轨星座系统的特征, 论证了简化最大功率通量密度计算需要满足的条件。以 Starlink 系统为分析场景, 计算分析了其 Ka/E 频段馈电波束的功率通量密度, 并与 SpaceX 公开的结果对比验证了所提方法的正确性。结果表明, Starlink 系统 Ka 频段馈电波束到地功率通量密度在仰角低于 20° 时不满足《无线电规则》规定的限值要求。

关键词: 低轨星座系统; 功率通量密度; 频率资源; 可控波束; 同频干扰

中图分类号: TN927.2

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022073

Research on power flux-density at the earth's surface produced by emissions from the steerable beam of LEO constellation system

HUANG Ying, LI Wei, JIAN Chen, YAN Kang

The State Radio Monitoring Center, Beijing 100037, China

Abstract: The power flux-density (PFD) is an interference criterion for protecting terrestrial service systems from space service systems. A calculation method on the PFD produced by the emissions from the steerable beam of low earth orbit (LEO) constellation system was given, and thus a compliance determination algorithm of the limits of PFD under specific steering angle was presented. On this basis, a compliance determination algorithm of the limits of PFD based on elevation traversal was proposed. Combined with the characteristics of LEO constellation system, the conditions to simplify the calculation of maximum PFD of steerable beam were demonstrated. Taking the Starlink system as the typical scenario, the PFD produced by the gateway beam was analyzed, and the correctness of the proposed method was verified by comparison with the results published by SpaceX. The results showed that the PFD of the gateway beam of the Starlink system in Ka frequency band at elevations below 20° exceeded the limits given in Radio Regulations.

Key words: LEO constellation system, power flux-density, frequency resource, steerable beam, co-frequency interference

收稿日期: 2022-02-10; 修回日期: 2022-04-15

通信作者: 李伟, liwei@srcc.org.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2020YFB1806100); 国家自然科学基金资助项目 (No.91738101)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program (No.2020YFB1806100), The National Natural Science Foundation of China (No.91738101)



0 引言

近年来,在 Google、Amazon 和 SpaceX 等科技巨头公司的推动和支持下,卫星互联网行业迅速发展,旨在为全球用户提供不间断的宽带互联网接入服务,诞生了一批以 Starlink、OneWeb 和 O3b 为代表的低轨星座系统^[1-2]。低轨星座通信被认为是融合到未来 6G 之中,实现全球立体泛在覆盖的重要技术^[3]。目前,全球公开发表的低轨通信星座系统计划有 20 多个,其中 OneWeb 公司申请发射约 4.8 万颗卫星,SpaceX 公司申请发射约 4.2 万颗卫星^[4]。这些星座系统通常具有卫星规模庞大、轨道高度低、波束宽度窄、波束可控等特征,且使用频率集中,都计划使用 Ku/Ka/Q/V 频段资源,低轨星座系统之间发生有害干扰的概率极大^[5]。同时,在这些频段运行着大量静止轨道卫星通信系统,低轨星座系统很有可能会对使用相同频率的其他空间或地面通信系统造成有害干扰^[6-8]。

为保护以同等权利共用频段的固定业务或移动业务,《无线电规则》第 21.16 条中规定了空间电台发射到地球表面的功率通量密度 (power flux-density, PFD) 的限值^[9]。新兴的低轨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^[10]。这些新兴的低轨星座系统采用相控阵天线技术、新型频率复用技术、星上处理技术、功率控制技术、动态频谱共享技术等多种关键技术^[11],其用户波束和馈电波束多为可控波束^[12]。新兴的低轨星座系统卫星到地的 PFD 计算需要考虑不同可控角的发射功率和天线参数特性,同时低轨星座系统在 Ka/Q/V 等频段的 PFD 限值需考虑星座规模。因此有必要对低轨星座系统可控波束到地 PFD 计算方法和 PFD 限值符合性判定方法进行研究。

1 可控波束到地 PFD 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 的定义为单位面积通过的功率,因此计算空间电台在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、天线方向图和不同仰角传播距离等。空间电台对地发射示例如图 1 所示,空间电台信号到达地球站所在点的方向与水平面夹角定义为对地到达角 θ (即仰角),空间电台到地球站与空间电台到地心的夹角定义为半视角 ϕ 。设地球半径为 R ,卫星与地球站之间的传播距离 L 和半视角 ϕ 可表示为:

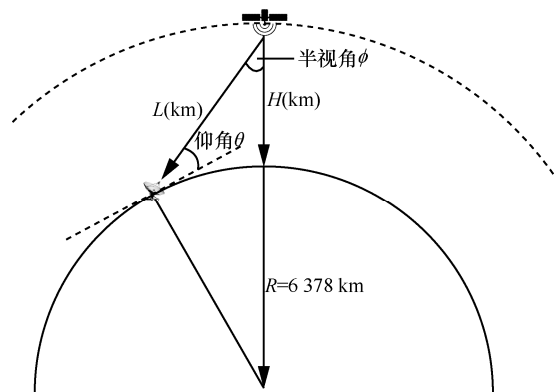


图 1 空间电台对地发射示例

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

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

由式 (1)、式 (2) 可知,卫星与地球站之间的传播距离、半视角均与仰角、卫星轨道高度有关。对于低轨星座系统可控波束,当波束指向观察点时,卫星天线可控角正好等于半视角。可控波束通过相控阵天线或机械转动天线实现。若卫星天线为相控阵天线,天线总增益为阵列增益 G_A 与单元增益 G_e 之和,阵列增益与单元增益组合形成的相控阵天线方向示意图如图 2 所示^[13],可知不同可控角时天线最大增益 $G_{\max}(\phi)$ 不同。若卫星天线为机械转动天线,不同可控角最大增益 $G_{\max}$

相同。可控角为 ϕ 时的卫星发射功率谱密度 $P(\phi)$ 由卫星系统本身决定。比如, Starlink 系统采用相控阵天线, 通过功率控制算法实现可控波束在不同对地到达角情形的最大 PFD 恒定不变^[14], 此时发射功率谱密度 $P(\phi)$ 主要由天线增益 $G(\phi)$ 和星地传播距离 L 决定。

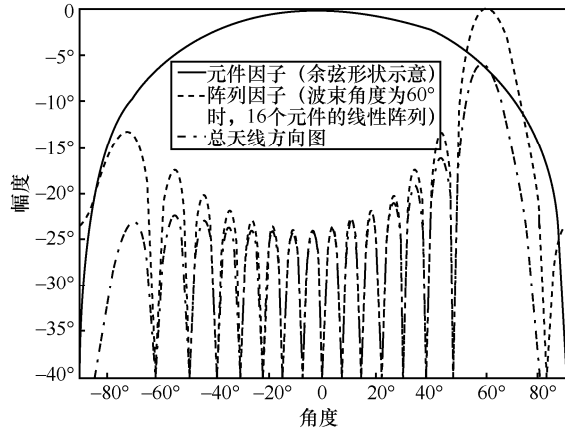


图2 阵列增益与单元增益组合形成的相控阵天线方向示意图

计算空间电台可控波束在不同水平面到达角 θ 时的最大 PFD, 需要获取以下参数信息: 可控角 ϕ 时的最大发射功率谱密度 $P_{\max}(\phi)$ 、可控角 ϕ 时水平面到达角 θ 方向对应发射天线离轴角 ψ 、与可控角 ϕ 和离轴角 ψ 相关的天线增益 $G(\phi, \psi)$ 、传输距离 $L(\theta)$ 。可控波束的最大 PFD 计算式如下:

$$\text{PFD} = P_{\max}(\phi) + G(\phi, \psi) + 10\lg(\text{BW}) - 10\lg(4\pi L(\theta)^2) \quad (3)$$

当已知不同可控角 ϕ 时对应的最大等效全向辐射功率 (equivalent isotropically radiated power, EIRP) 谱密度 $\text{EIRP}_{\max}(\phi)$, 可控波束的最大 PFD 计算式如下:

$$\text{PFD} = \text{EIRP}_{\max}(\phi) - R(\phi, \psi) + 10\lg(\text{BW}) - 10\lg(4\pi L(\theta)^2) \quad (4)$$

其中, BW 通常定义为《无线电规则》第 21.16 条中限值对应的参考带宽, 即为 4 kHz 或 1 MHz。 $R(\phi, \psi) = G(\phi, 0) - G(\phi, \psi)$ 为离轴角 ψ 时相对最大

增益的下降量, $\psi=0$ 时 $R(\phi, \psi)=0$, 在半功率波束宽度处时, $R(\phi, \psi)=3 \text{ dB}$ 。

下面分析离轴角 ψ 的取值范围。不同可控角时到地 PFD 示意图如图 3 所示, 地球站 A 处观察点水平面上到达角为 θ 。卫星可控波束指向地球站 A 时, 此时可控角等于半视场角, 均为 ϕ_1 , A 处离轴角 ψ_1 为 0, 观察点方向上天线增益为 $G(\phi_1, 0) = G_{\max}(\phi_1)$, 卫星最大发射功率谱密度为 $P_{\max}(\phi_1)$ 。卫星可控波束指向地球站 B 时, 可控角为 ϕ_2 , 地球站 A 处观察点离轴角为 ψ_2 , 观察点 A 方向上卫星天线增益为 $G(\phi_2, \psi_2)$, 卫星最大发射功率谱密度为 $P_{\max}(\phi_2)$ 。

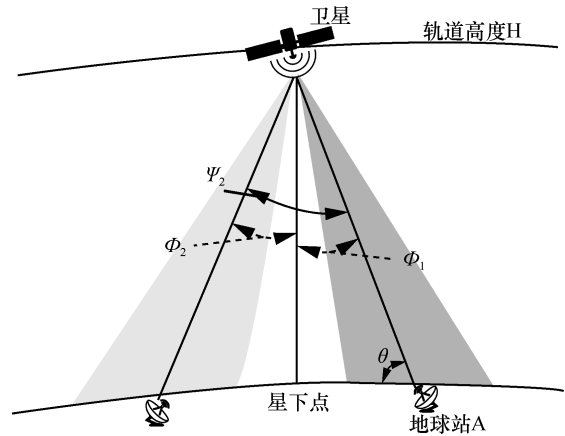


图3 不同可控角 ϕ 时到地 PFD 示意图

离轴角 ψ_2 的大小由可控角 ϕ_1 和 ϕ_2 共同决定, 且 $|\phi_1 - \phi_2| \leq \psi_2 \leq \phi_1 + \phi_2$ 。具体说明如下。

离轴角的取值范围示意图如图 4 所示, 卫星星下点为 O, 可控角为 ϕ_1 时, 波束中心在地面点的集合为图 4 中小圆, 此时指向 A 点。可控角为 ϕ_2 时波束中心在地面点的集合为图 4 中大圆, 此时指向 B' 点, A 处观察点离轴角 ψ_2 的大小根据 B' 的位置变化而变化。三角形 AOB' 中, AO 和 B'O 为固定长度, AB' 长度取决于 $\angle B'OA$ 。当 B' 运动到 B 点时, AB' 最小, 对应离轴角 $\psi_2 = |\phi_2 - \phi_1|$; 当 B' 运动到 B'' 处时, AB' 最大, 对应离轴角 $\psi_2 = \phi_2 + \phi_1$ 。因此有 $|\phi_1 - \phi_2| \leq \psi_2 \leq \phi_1 + \phi_2$ 。

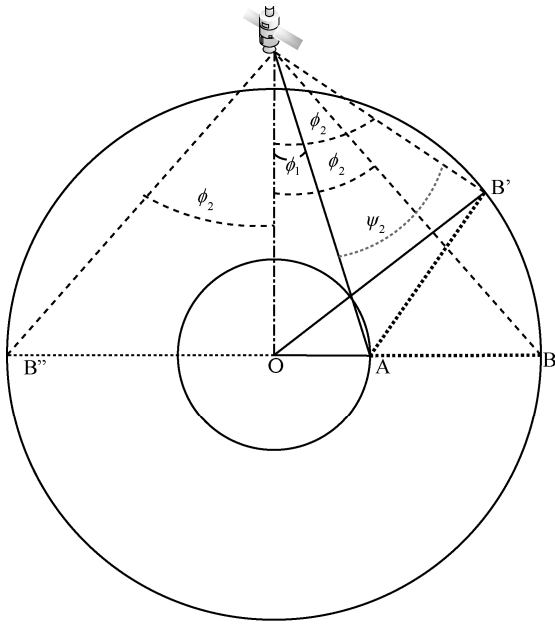


图4 离轴角的取值范围示意图

2 可控波束 PFD 限值符合性判定方法

通过式 (3) 或式 (4) 可计算特定可控波束到地 PFD 值。按照国际电信联盟规定, 评判特定可控波束到地 PFD 值是否满足《无线电规则》第 21.16 条限值要求, 除了分析评估该特定可控波束在覆盖范围内是否满足限值要求之外, 还需要同时判断可控波束覆盖范围之外的 PFD 值是否满足限值要求。

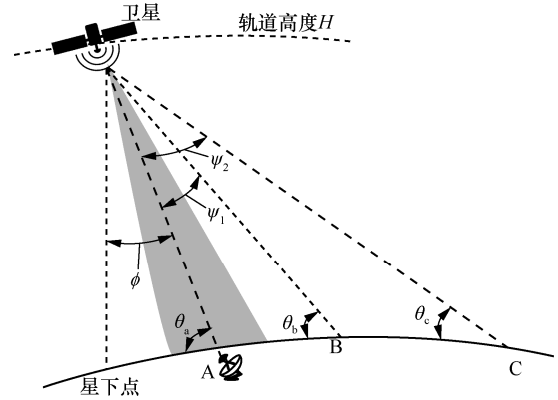
2.1 特定可控角下可控波束 PFD 限值符合性判定算法

当卫星天线参数确定后, 可控波束最大发射功率谱密度 $P_{\max}(\phi)$ 或最大 EIRP 谱密度 $\text{EIRP}_{\max}(\phi)$ 便可确定。可控角固定时到地 PFD 示意如图 5 所示, 可控角为 ϕ 的可控波束指向观察点 A, 判断该可控波束是否满足 PFD 限值要求, 应计算此可控波束对任意水平面上到达角 θ 产生的 PFD 均能满足限值要求, 具体算法步骤如下。

步骤 1 $\forall \theta \in (0, 90]$, 利用式 (3) 或式 (4) 计算到地 $\text{PFD}(\theta)$ 。

步骤 2 $\forall \theta \in (0, 90]$, 按照《无线电规则》第 21.16 条要求计算相应业务相应频段 PFD 限值 $\text{PFD}_{\text{Limit}}(\theta)$ 。

步骤 3 如果 $\exists \theta \in (0, 90]$, $\text{PFD}(\theta) > \text{PFD}_{\text{Limit}}(\theta)$, 则可控角为 ϕ 的可控波束不满足 PFD 限值的要求; 如果 $\forall \theta \in (0, 90]$, 均有 $\text{PFD}(\theta) \leq \text{PFD}_{\text{Limit}}(\theta)$, 则可控角为 ϕ 的可控波束 $\text{EIRP}_{\max}(\phi)$ 满足限值要求。

图5 可控角 ϕ 固定时到地 PFD 示意图

可控角为 ϕ 的可控波束不满足 PFD 限值时, 则应减小卫星的发射功率谱密度 $P_{\max}(\phi)$ 或 EIRP 谱密度 $\text{EIRP}_{\max}(\phi)$, 使其满足 $\forall \theta \in (0, 90]$, 均有 $\text{PFD}(\theta) \leq \text{PFD}_{\text{Limit}}(\theta)$ 。将式 (3) 或式 (4) 代入, 则 $\forall \theta \in (0, 90]$,

$$P_{\max}(\phi) + G(\phi, \psi) + 10 \lg(\text{BW}) - 10 \lg(4\pi L(\theta)^2) \leq \text{PFD}_{\text{Limit}}(\theta) \quad (5)$$

或

$$\text{EIRP}_{\max}(\phi) - R(\phi, \psi) + 10 \lg(\text{BW}) - 10 \lg(4\pi L(\theta)^2) \leq \text{PFD}_{\text{Limit}}(\theta) \quad (6)$$

式 (5) 和式 (6) 变换后, 在可控角为 ϕ 时的卫星最大发射功率谱密度 $P_{\max}(\phi)$ 或最大 EIRP 谱密度 $\text{EIRP}_{\max}(\phi)$, 可由式 (7)、式 (8) 确定:

$$P_{\max}(\phi) \leq \text{MIN}(\text{PFD}_{\text{Limit}}(\theta) - G(\phi, \psi) - 10 \lg(\text{BW}) + 10 \lg(4\pi L(\theta)^2)), \forall \theta \in (0, 90) \quad (7)$$

$$\text{EIRP}_{\max}(\phi) \leq \text{MIN}(\text{PFD}_{\text{Limit}}(\theta) + R(\phi, \psi) - 10 \lg(\text{BW}) + 10 \lg(4\pi L(\theta)^2)), \forall \theta \in (0, 90) \quad (8)$$

2.2 基于仰角遍历的可控波束 PFD 限值符合性判定算法

基于第 3.1 节给出的特定可控角下的可控波束

PFD 限值符合性判定方法, 遍历可控波束的可控角 ϕ 取值范围, 即可分析可控波束是否满足 PFD 限值要求。这种方法思路较为简单, 但需要执行每个可控角下不同仰角 PFD 的符合性判定, 运算复杂度高。本节将给出基于仰角遍历的可控波束 PFD 限值符合性判定方法, 先在给定仰角下从所有的可控波束找到最大 PFD, 然后再与限值作比较, 无须判定每个特定可控角的可控波束是否满足 PFD 限值要求。可控波束不同到地角最大 PFD 计算流程如图 6 所示, 具体的算法步骤如下。

步骤 1 根据低轨星座系统信息获取不同可控角的功率谱密度 $P_{\max}(\phi)$ 或 EIRP 谱密度 $\text{EIRP}_{\max}(\phi)$ 、天线方向图、最大增益和波束可控范围 (根据系统最低通信仰角确定) 等信息。

步骤 2 初始化仰角 $\theta=90^\circ$, 设置仰角遍历步进为 $\Delta\theta$, 初始化 $\text{PFD}_{\max}(\theta)=-9\,999$ 。

步骤 3 初始化可控角 $\phi=\phi_{\min}$, 设置可控角

遍历步进为 $\Delta\phi$, 根据仰角计算半视角 ϕ_0 。

步骤 4 初始化离轴角 $\psi=|\phi-\phi_0|$, 设置离轴角遍历步进为 $\Delta\psi$ 。

步骤 5 利用式 (3) 或式 (4) 计算当前仰角、可控角和离轴角下的可控波束到地 $\text{PFD}(\phi, \psi, \theta)$ 。

步骤 6 若 $\text{PFD}(\phi, \psi, \theta) \geq \text{PFD}_{\max}(\theta)$, 则 $\text{PFD}_{\max}(\theta)=\text{PFD}(\phi, \psi, \theta)$, 否则直接进入下一步。

步骤 7 离轴角 $\psi=\psi+\Delta\psi$ (不同离轴角对应指向不同但可控角相同的可控波束)。

步骤 8 若离轴角小于 $\phi+\phi_0$, 重复步骤 (5) 至步骤 (7), 否则进入步骤 (9)。

步骤 9 可控角 $\phi=\phi+\Delta\phi$ 。

步骤 10 若可控角 ϕ 小于最大值 $\phi_{\max}$, 重复步骤 (4) 至步骤 (9), 否则进入步骤 (11)。

步骤 11 输出 $\text{PFD}_{\max}(\theta)$, 此时得到仰角为 θ 时可控波束到地的最大 PFD。

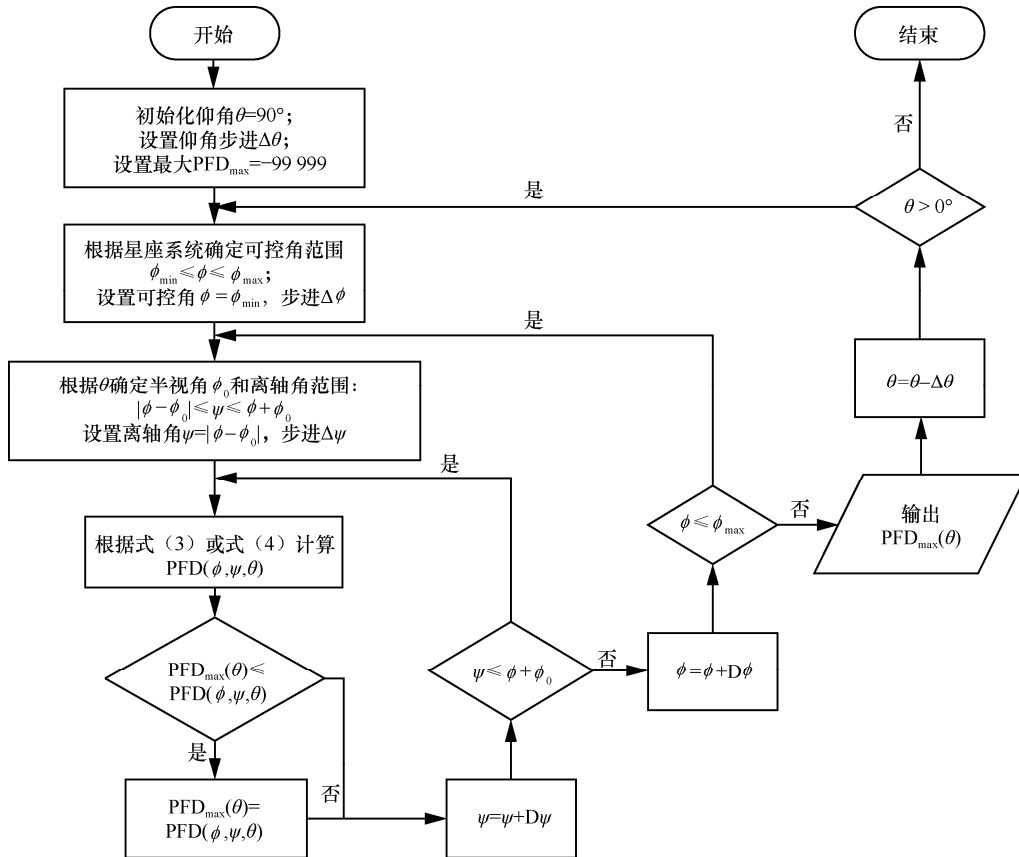


图6 可控波束不同到地角最大 PFD 计算流程



步骤 12 仰角 $\theta = \theta - \Delta\theta$;

步骤 13 若仰角 θ 大于 0° ，重复步骤 (3) ~ 步骤 (12)，否则结束。

通过以上步骤，便可确定低轨卫星可控波束在不同对地到达角 θ 的最大功率通量密度 $\text{PFD}_{\max}(\theta)$ ，与相应的限值 $\text{PFD}_{\text{Limit}}(\theta)$ 对比后，如果 $\exists \theta \in (0, 90]$ ， $\text{PFD}_{\max}(\theta) > \text{PFD}_{\text{Limit}}(\theta)$ ，则该可控波束不满足 PFD 限值的要求；如果 $\forall \theta \in (0, 90]$ ，均有 $\text{PFD}_{\max}(\theta) \leq \text{PFD}_{\text{Limit}}(\theta)$ ，则该可控波束满足限值要求。

2.3 低轨星座系统可控波束最大 PFD 简化算法

利用第 3.2 节的算法求解低轨星座系统可控波束在不同仰角最大 PFD 需进行离轴角、可控角和半视角三重遍历循环，运算量仍较大。低轨星座系统使用的频段较高，其可控波束通常为高增益窄波束，在主瓣外增益迅速下降。一般来讲，对某一观察点，可控波束直射（主瓣作用）产生的 PFD 比未直射（旁瓣作用）产生的 PFD 大。若此条件对任意观察点均成立，则只需要计算波束直射观察点的 PFD 便可得到该仰角的最大 PFD。下面对两个可控波束直射观察点和未直射观察点产生的 PFD 进行比较分析。

可控波束覆盖范围示意图如图 7 所示，观察点 A 处半视角为 ϕ ，仰角为 θ_A 。可控波束指向 A 时，可控角等于半视角 ϕ ，利用式 (4) 计算该点 PFD 时， $R(\phi, \psi) = R(\phi, 0) = 0$ 。此时 PFD 为：

$$\text{PFD}(\phi) = \text{EIRP}_{\max}(\phi) + 10\lg(\text{BW}) - 10\lg(4\pi L(\theta_A)^2) \quad (9)$$

可控波束指向 B 点时，可控角为 ϕ_1 ，到观察点 A 处的离轴角为 ψ_1 ，PFD 为：

$$\text{PFD}(\phi_1) = \text{EIRP}_{\max}(\phi_1) - R(\phi_1, \psi_1) + 10\lg(\text{BW}) - 10\lg(4\pi L(\theta_A)^2) \quad (10)$$

这两个可控波束在 A 点产生的 PFD 的差值为：

$$\Delta\text{PFD} = \text{EIRP}_{\max}(\phi) - \text{EIRP}_{\max}(\phi_1) + R(\phi_1, \psi_1) \quad (11)$$

其中， $|\phi_1 - \phi| \leq \psi_1 \leq \phi_1 + \phi$ 。若 $\forall \phi_1 \in [\phi_{\min}, \phi_{\max}]$ ，均有 $\Delta\text{PFD} \geq 0$ ，即 $\text{EIRP}_{\max}(\phi_1) - \text{EIRP}_{\max}(\phi) \leq R(\phi_1, \psi_1)$ ，则仰角为 θ_A 时对应的最大 PFD 产生于可控波束直接指向观察点 A。因此，当观察点位于可控波束可覆盖范围内任意一点时，可控波束指向观察点产生的 PFD 等于可控波束在对应仰角（该观察点）产生的最大 PFD 需满足的条件为：

$$\forall \phi \in [\phi_{\min}, \phi_{\max}], \forall \phi_1 \in [\phi_{\min}, \phi_{\max}], \Delta\text{EIRP}_{\max}(\phi_1 \rightarrow \phi) R(\phi_1, \psi_1) R(\phi, \psi_1) \quad (12)$$

其中， ϕ 为任意观察点处对应的半视角， ϕ_1 为任意可控角， ψ_1 为可控角为 ϕ_1 的波束到观察点处的离轴角， $|\phi_1 - \phi| \leq \psi_1 \leq \phi_1 + \phi$ ， $\Delta\text{EIRP}_{\max}(\phi_1 \rightarrow \phi) = \text{EIRP}_{\max}(\phi_1) - \text{EIRP}_{\max}(\phi)$ ，表示任意可控角 ϕ_1 处的 EIRP 相对于可控角 ϕ （也是半视角）时的 EIRP 的增量。

3 低轨星座系统可控波束到地 PFD 分析与验证

SpaceX 公司在 2020 年 5 月向美国联邦通信委员会（Federal Communications Commission, FCC）提交了 Starlink 二代星座系统的申请^[15]，拟发射 30 000 颗低轨卫星，申请使用 Ku/Ka/E 频段，运行在 328.3~614 km 等 8 个不同轨道高度。用户波束和馈电波束均为可控波束，采用相控阵天线^[16]。本节以 Starlink 二代星座系统为例，分析计算 Starlink 可控波束 PFD 并验证限值的规则符合性。

3.1 Starlink 卫星可控波束特性分析

Starlink 用户波束和馈电波束均为可控波束，如图 7 所示，地面加粗部分为可控波束覆盖范围，根据式 (1)、式 (2)，可通过地面站最低通信仰角 θ 计算给定高度卫星的波束最大可控角 ϕ 。

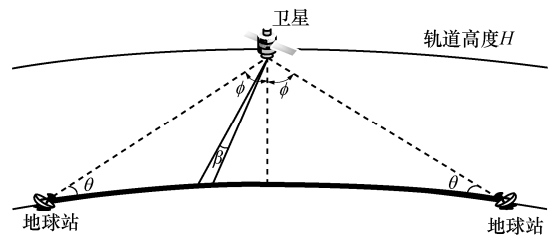


图 7 可控波束覆盖范围示意图

对于 360 km 和 373.2 km 高度的卫星, 位于高于纬度 62°地区 (极地地区) 的信关站, Ka 频段馈电波束 (下行 17.8~18.6 GHz/18.8~19.3 GHz) 和 E 频段馈电波束 (下行 71~75 GHz) 最低通信仰角为 5°, 纬度低于 62°最低通信仰角为 25°, 其余轨道高度卫星馈电波束对应任何地区信关站最低通信仰角均为 25°。不同轨道高度卫星馈电波束对应地球站最低通信仰角见表 1。根据式 (1)、式 (2), 360 km 高度卫星不同最低仰角 θ 对应最大半视角 ϕ 和通信距离见表 2。

表 1 Starlink 卫星馈电波束对应信关站最低通信仰角

轨道高度/km	倾角	信关站馈电波束最低通信仰角	
		Ka 频段	E 频段
328.3	30°	25°	25°
334.4	40°	25°	25°
345.6	53°	25°	25°
360	96.9°	5/25°	5/25°
373.2	75°	5/25°	5/25°
498.8	53°	25°	25°
604	148°	25°	25°
614	115.7°	25°	25°

表 2 360 km 高度 Ka/E 频段地球站通信仰角对应半视角

地球站通信仰角 θ	卫星下行波束半视角 ϕ	通信距离/km
5°	70.56°	1 687
10°	68.78°	1 331
15°	66.11°	1 078
20°	62.81°	898
25°	59.08°	767
90°	0	360

Starlink 星座系统通过功率控制, 使得可控波束到地 PFD 恒定不变, 在可控角度覆盖范围内相同增益的地面站接收载波功率相同。波束可以大范围转动, Starlink 卫星下行发射功率需根据不同可控角进行调整, 以补偿路径损耗和发射天线增益变化引入的衰减变化。从图 8 和图 9 可知, 360 km 高度处, Ka 频段和 E 频段馈电链路 Starlink 卫星 EIRP 谱密度随可控角不断增大而逐渐增大。在可控角增至约 70.56°时, EIRP 谱密度

骤降。这是因为此时地球站仰角约为 5°, 刚好低于最低通信仰角。

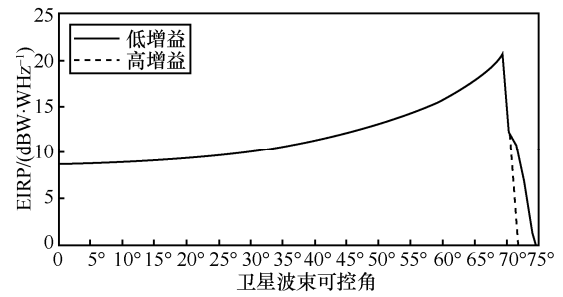


图 8 不同可控角对应的 EIRP 谱密度 (Ka 频段) [13]

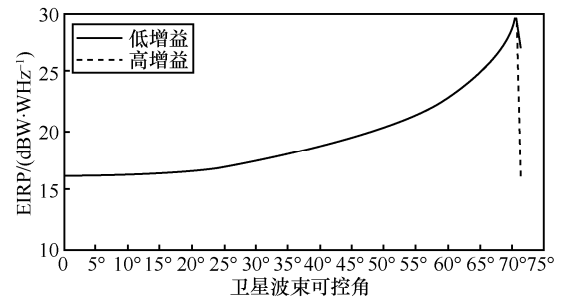


图 9 不同可控角对应的 EIRP 谱密度 (E 频段) [13]

3.2 Starlink 卫星可控波束最大 PFD 简化算法适用性分析

Starlink 可控波束天线为高增益天线, 360 km 高度 Ka 频段卫星用户波束的天线最大增益为 34.5 dB 或 44.5 dB, E 频段卫星测控波束的天线最大增益为 42 dB 或 52 dB。波束主瓣以外, 天线增益迅速降低, $R(\phi, \psi)$ 随离轴角 ψ 增大而迅速变大, 半功率波束宽度小于 2°, 离轴角为 1° 时, $R(\phi, \psi)=3$ dB; 离轴角为约 3.5° 时, $R(\phi, \psi)=20$ dB [17]; 离轴角超过 3.5° 时, $R(\phi, \psi)>20$ dB。由图 8 和图 9 结合该波束相控阵天线离轴角 ψ 相对天线最大增益下降量 $R(\phi, \psi_1)$ 可知:

- $\forall \phi \in [0, 70], \forall \phi_1 \in [0, 70], \phi_1 - \phi = 1^\circ$ 时, $\Delta \text{EIRP}_{\max}(\phi \rightarrow \phi_1) < 1$ dB, $\psi_1 \geq \phi_1 - \phi = 1^\circ$, $R(\phi_1, \psi_1) \geq 3$ dB。
- $\Delta \text{EIRP}_{\max}(\phi \rightarrow \phi_1) < R(\phi_1, \psi_1)$, $1^\circ < \phi_1 - \phi < 3.5^\circ$ 时, $\Delta \text{EIRP}_{\max}(\phi \rightarrow \phi_1) < 3$ dB。



- $R(\phi_1, \psi_1) > 3 \text{ dB}$, $\Delta \text{EIRP}_{\max}(\phi_1 \rightarrow \phi) < R(\phi_1, \psi_1)$,
 $3.5^\circ \leq \phi_1 - \phi \leq \phi_{\max} - \phi_{\min}$ 时, $\psi_1 \geq 3.5^\circ$
 $\Delta \text{EIRP}_{\max}(\phi_1 \rightarrow \phi) < 15 \text{ dB}$, $R(\phi_1, \psi_1) \geq 20 \text{ dB}$,
 $\Delta \text{EIRP}_{\max}(\phi_1 \rightarrow \phi) < R(\phi_1, \psi_1)$ 。

因此对任意观察点位于可控波束覆盖范围内, 均能满足第 3.3 节中式 (12) 的要求。

由上述分析可知, 针对 Starlink 星座系统的 Ka/E 频段的馈电波束, 计算不同仰角下最大 PFD 只需要分析可控波束指向观察点时 (可控角等于半视角) 的情况, 无须分析观察点处于可控波束覆盖范围外的情况。

3.3 计算结果与分析

依据第 4.2 节的结论, 分析 Starlink 卫星可控波束的发射是否满足第 21.16 条 PFD 限值要求, 只需要确定可控波束在不同水平面上到达角 θ 的最大功率通量密度 $\text{PFD}_{\max}(\theta)$ 和对应的限值 $\text{PFD}_{\text{Limit}}(\theta)$ 即可。

360km 轨道高度处, Ka 频段 Starlink 卫星发射 EIRP 谱密度见表 3^[13]。根据式 (1)、式 (2) 和式 (4), 可计算不同对地到达角时的最大 $\text{PFD}_{\max}(\theta)$, 见表 4。《无线电规则》第 21.16 条中 17.7~19.3 GHz 频段非静止轨道 (non-geostationary satellite orbit, NGSO) 星座系统 PFD 限值 $\text{PFD}_{\text{Limit}}(\text{dBW}/(\text{m}^2 \cdot \text{MHz})^{-1})$ 的计算见式 (13), 可知限值与 NGSO 星座系统规模有关。Starlink 星座系统卫星颗数为 30 000 颗, 因此 N 取 30 000。

$$\text{PFD}_{\text{Limit}} = \begin{cases} -115 - X & , 0 \leq \theta \leq 5 \\ -115 - X + \left(\frac{10+X}{20}\right)(\theta - 5) & , 5 < \theta \leq 25 \\ -105 & , 25 < \theta \leq 90 \end{cases} \quad (13)$$

其中,

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

N 为星座系统卫星数量。

360 km 轨道高度处, E 频段下行波束, 根据表 2 可得到不同地球站仰角的半视角, 通过相应半视角在图 9 查得相应的可控角对应 EIRP 谱密度的大约值, Ka 频段与 E 频段 EIRP 谱密度见表 3。利用式 (4) 计算得到最大 PFD, 与 SpaceX 核定值^[14]均见表 4。《无线电规则》第 21.16 条暂无 E 频段的 PFD 限值。

根据表 4 可知如下内容。

- 在不同对地到达角下, 所提方法分析得到的 Ka 频段/E 频段可控波束到地最大 PFD 的计算值与 SpaceX 公司申请材料提供的计算值是一致的。
- 水平面到达角在 20° 以下时, Starlink 星座系统的 Ka 频段可控波束最大 PFD 远大于《无线电规则》第 21.16 条规定的 PFD 限值, 不满足规则要求。
- 由于《无线电规则》第 21.16 条暂未规定 E 频段的 PFD 限值, 无法判定 Starlink 星座系统的 E 频段测控波束是否会对固定业务系统/移动业务系统产生有害干扰。

对于不满足限值的情况, SpaceX 公司作出如下说明^[13]: 星座系统卫星数量多达 30 000 颗, 式 (13) 中 N 为 30 000, 导致 17.7~19.3 GHz

表 3 Ka 频段与 E 频段 EIRP 谱密度

参数			不同水平面上到达角 EIRP 谱密度/dB(W/(m ² ·参考带宽))					
频率范围	参考带宽	数据来源	90°	25°	20°	15°	10°	5°
17.8~18.6 GHz 18.8~19.3 GHz	1 Hz	文献[13]	-51.2	-44.6	—	—	—	-48.3
71~75 GHz	1 MHz	图 9	16	23	24	26	28	30

表 4 360 km 高度 Ka/E 频段馈电可控波束水平面上到达角最大 PFD 与限值

参数			PFD 来源	不同水平面上到达角最大 PFD/dB(W/(m ² ·参考带宽))					
波束	频率范围	参考带宽		0~5	5~10	10~15	15~20	20~25	25~90
Ka 频段	17.8~18.6 GHz 18.8~19.3 GHz	1 MHz	SpaceX 核定值 ^[14]	-123.8	-113.3	-113.3	-113.3	-113.3	-113.3
			计算值	-123.8	-113.3	—	—	—	-113.3
			限值	-555.6	-443.0	-330.3	-217.7	-105	-105
			余量	-431.8	-329.7	-217	-104.4	8.3	8.3
E 频段	71~75 GHz	1 MHz	SpaceX 核定值 ^[14]	-106.0	-106.0	-106.0	-106.0	-106.0	-106.0
		1 MHz	计算值	-106.1	-105.6	-106.1	-105.6	-105.5	-105.5
		1 MHz	限值	无	无	无	无	无	无

的 PFD 限值在 5° 以下水平面上到达角时为 -555.6 dB(W/(m²·MHz)), 远小于核定的最大 PFD; 用于 Ka 频段的 PFD 限值计算方法是在低轨星座系统卫星数量很少时的研究周期制定的。对大型星座系统, 这种计算方法大大高估了对地面固定业务系统产生有害干扰的可能性, 不适用于卫星数量大于 840 颗的动态控制波束的低轨星座系统^[18]; SpaceX 公司申请豁免 Ka 频段 (17.8~18.6 GHz/18.8~19.3 GHz) 的 PFD 约束^[16]。

4 结束语

为保护频率使用同等地位的固定业务和移动业务, ITU 针对空间业务到地 PFD 提出了明确的限值要求。本文分析了低轨星座系统可控波束的 PFD 的计算方法, 给出了特定可控角可控波束 PFD 限值符合性判定算法, 基于此, 提出了一种基于仰角遍历的可控波束 PFD 限值符合性判定算法并给出了相应的算法流程。结合低轨星座系统特征, 给出了可控波束最大 PFD 简化算法。以 Starlink 星座系统可控波束为分析场景, 计算分析了 Ka/E 频段馈电波束的 PFD。分析结果表明, 所提可控波束 PFD 算法与 Starlink 系统使用方法得到的分析结果一致, 印证了所提算法的有效性。Ka 频段馈电波束到地 PFD 在仰角低于 20° 时不满足限值要求, 主要原因在于《无线电规则》第 21.16 条中 PFD 限值大小与低轨星座系统卫星规模正相

关。由于暂无 PFD 限值约束, 无法判定 Starlink 系统 E 频段馈电波束是否会对地面业务系统产生有害干扰。

参考文献:

- [1] 刘悦, 廖春发. 国外新兴卫星互联网星座的发展[J]. 科技导报, 2016, 34(7): 139-148.
LIU Y, LIAO C F. The development of emerging satellite Internet constellations[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(7): 139-148.
- [2] 李伟, 张磊, 严康. Ka 频段宽带互联网星座系统间上行同频干扰分析研究[J]. 数字通信世界, 2021(5): 12-15, 23.
LI W, ZHANG L, YAN K. Analysis of uplink co-frequency interference in ka band between broadband Internet constellation systems[J]. Digital Communication World, 2021(5): 12-15, 23.
- [3] 陈山枝. 关于低轨卫星通信的分析及我国的发展建议[J]. 电信科学, 2020, 36(6): 1-13.
CHEN S Z. Analysis of LEO satellite communication and suggestions for its development strategy in China[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(6): 1-13.
- [4] 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.
- [5] 靳瑾, 李娅强, 张晨, 等. 全球动态场景下非静止轨道通信星座干扰发生概率和系统可用性[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2018, 58(9): 833-840.
JIN J, LI Y Q, ZHANG C, et al. Occurrence probability of co-frequency interference and system availability of non-geostationary satellite system in global dynamic scene[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2018, 58(9): 833-840.
- [6] DEL PORTILLO 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] 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 2010 2nd International Conference on Information Technology Convergence and Services. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-5.
- [8] KOBAYASHI H. Study on interference between non-gso mss gateway station and gso fss earth station under reverse band operation[C]//Proceedings of 10th International Conference on Digital Satellite Communications (ICDSC-10). Piscataway: IEEE Press, 1995: 282-289.
- [9] ITU. Radio regulations, article[M]. Geneva, Switzerland: ITU, 2020.
- [10] GU P, LI R, HUA C Q, et al. Dynamic cooperative spectrum sharing in a multi-beam LEO-GEO co-existing satellite system[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(2): 1170-1182.
- [11] TANG J Y, BIAN D M, LI G X, et al. Resource allocation for LEO beam-hopping satellites in a spectrum sharing scenario[J]. IEEE Access, 2021(9): 56468-56478.
- [12] JIA H G, NI Z Y, JIANG C X, et al. Uplink interference and performance analysis for megasatellite constellation[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(6): 4318-4329.
- [13] DELOSP, BROUGHTON B, KRAFTJ. Phased array antenna patterns-part 1: linear array beam characteristics and array factor[J]. Analog Dialogue, 2020 (2): 54.
- [14] 李伟, 严康, 刘帅军, 等. Starlink 星座对 GSO 卫星系统馈电链路的下行同频干扰分析[J]. 中国无线电, 2021(4): 43-45, 53.
- LI W, YAN K, LIU S J, et al. Co-frequency interference analysis for gateway link between starlink constellation and gso system[J]. China Radio, 2021(4): 43-45, 53.
- [15] FCC. Application for fixed satellite service attachments by Space Exploration Holdings, LLC: Attachment narrative app, File Number: SAT-LOA-20200526-00055 [R]. 2020.
- [16] FCC. Application for fixed satellite service attachments by Space Exploration Holdings, LLC: Attachment technical attach, File Number: SAT-LOA-20200526-00055 [R]. 2020.
- [17] Application for fixed satellite service attachments by Space Exploration Holdings, LLC: Attachment Gen2_Technical_Param. File Number: SAT-LOA-20200526-00055 [EB]. 2020.
- [18] ITU. Report on the third meeting of JTG 4-9-11 PART2, Annex 3 to Attachment 1: Pfd limits in the 18GHz band[R]. 1999.
- [19] FCC. Application for fixed satellite service attachments by Space Exploration Holdings, LLC: Attachment Waiver Requests, File Number: SAT-LOA-20200526-00055 [R]. 2020.

[作者简介]



黄颖 (1968-), 女, 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。



李伟 (1984-), 男, 博士, 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、频谱共享技术。



简晨 (1987-), 男, 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。



严康 (1989-), 男, 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。