

# 跨境场景下 SD2D 系统对地面 IMT 网络的同频干扰分析与动态仿真验证

刘全<sup>\*①②</sup> 赵伟松<sup>①</sup> 肖娜<sup>①</sup> 宋艳军<sup>①</sup> 周萌<sup>①</sup>  
张志丽<sup>①</sup> 王金海<sup>①</sup> 王丽冲<sup>①</sup>

<sup>①</sup>((中国电子科技集团公司第五十四研究所 石家庄 050081))

<sup>②</sup>(中华通信系统有限责任公司 北京 100070)

**摘要:** 针对手机直连卫星(Satellite-Direct-to-Device, SD2D)系统对邻国边境IMT网络产生的同频下行干扰, 该文推导了保护IMT终端和基站所需的PFD (Power Flux Density)和EPFD (Equivalent Power Flux Density)限值, 并构建了动态仿真框架进行验证。仿真基于典型低轨星座, 并按ITU-R推荐的信道传播、地物遮挡及天线辐射模型建立; 综合考虑同频波束隔离、波束调度与建链策略等工程约束, 采用分段搜索算法确定满足IMT保护要求的最小隔离距离及其对应的PFD/EPFD统计值。基线仿真及其稳定性验证结果表明, 在I/N 门限-6 dB、百分位99.5%的保护准则下, 典型系统 Starlink-1满足边境 IMT 终端/基站保护所需最小隔离距离的基线值为195 km/290 km, 稳定性验证范围为195-210 km/290-300 km; Starlink-2对应基线值为272 km/420 km, 稳定性验证范围为266-290 km/370-420 km。敏感性测试显示: 地物遮挡可显著降低终端侧干扰并压缩所需隔离距离, 但对基站侧影响有限; 保护百分位仅改变从样本中提取“尾部事件”的统计口径; 最低工作仰角、极化复用、同频波束数以及建链策略等参数会改变活跃波束的选择与分布, 从而导致隔离距离呈现非线性、甚至非单调变化。

**关键词:** 手机直连卫星; IMT; 同频干扰; 跨境协调; 隔离距离

中图分类号: TN927.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2026)00-0001-13

DOI: 10.11999/JEIT260263

CSTR: 32379.14.JEIT260263

## 1 引言

随着近几年卫星通信的迅猛发展, 手机直连卫星 (Satellite-Direct-to-Device, SD2D) 作为典型的星地融合解决方案受到了通信产业界和学术界的广泛关注<sup>[1-4]</sup>, 其主要目标是使用地面移动通信用户设备直接通过卫星接入地面网络或实现端到端通信, 从而将卫星移动业务(Mobile Satellite Service, MSS)从专用小众市场转变为地面网络的延伸和补充。目前, SD2D系统仍处于全球化发展的初期阶段, 主要有三种技术路线并行推进<sup>[1, 2]</sup>: 基于双/多模终端的星/地独立网络、基于存量终端的地面网络延伸、基于5G-NTN全新协议的星地融合网络。

本文研究的SD2D系统侧重于第二类路线, 近来备受关注的SpaceX等SD2D系统均属于此类, 直接将IMT基站(BS)搬上低轨星座, 配备超大尺寸卫星天线, 复用地面IMT网络现有划分频段, 实现卫

星与存量IMT用户终端(UE)之间的直接通信。这类系统对于移动网络运营商尤其具有吸引力, 因其复用了现有的IMT频谱和终端生态系统。尽管这两年SD2D系统发展迅猛, 但同时也面临许多挑战, 其中最突出的问题是如何解决SD2D系统与其它现有业务的共存, 特别是在跨境场景下如何保护非协作IMT网络是当前亟需解决的重点, 也是关系其能否最终全球化部署的关键所在。针对该问题, ITU-R在WRC-27研究周期启动了议题1.13, 正在WP4C和5D等工作组研究制定相应的规则及措施<sup>[5, 6]</sup>。Ofcom、FCC等主要欧美国监管机构以及3GPP等标准化组织正在积极推动SD2D相关频率兼容性研究<sup>[3, 7-9]</sup>。同时, 学术界也在密切关注该问题。文献<sup>[10]</sup>对星地融合网络频谱共享技术的进展、关键技术及挑战进行了全面概述。文献<sup>[11]</sup>总结了星地融合的频谱共享架构与监管模式, 并提出了干扰管理方法及性能评估指标。文献<sup>[12, 13]</sup>分析了L和S频段用于SD2D的可行性, 并给出了与现有MSS等业务共存的限值要求。文献<sup>[4, 14]</sup>对SD2D系统与IMT系统同频共存问题进行了初步分析, 并基于典型参数进行了仿真验证。

上述文献具备一定的参考价值, 但大多数未能将保护准则转化为可执行的协调参数, 因此工程应用价值有限。以会议论文<sup>[4]</sup>为例, 聚焦SD2D-IMT跨境共存场景, 采用动态仿真方法评估了单个

收稿日期: 2026-03-09; 改回日期: 2026-06-17; 网络出版: 2026-07-02

\*通信作者: 刘全 [liuquan61s@163.com](mailto:liuquan61s@163.com)

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (62231012), 工信部移动通信网络国家科技重大专项(2024ZD1300800)

Foundation Items: The Key Project of the National Natural Science Foundation of China (62231012), the National Science and Technology Major Project of the Ministry of Industry and Information Technology (MIIT) for Mobile Information Networks (2024ZD1300800)

SD2D系统下行对邻国IMT终端和基站的聚合干扰,并反推不同保护概率下所需的功率通量密度(Power Flux Density, PFD)限值。本文在该成果基础上进行了深入拓展:一是新增确定性PFD和等效功率通量密度(Equivalent Power Flux Density, EPFD)限值推导,并与动态验证和最小隔离距离搜索形成闭环框架;二是扩展信道传播、基站天线方向图、后瓣遮挡及同频波束干扰抑制等关键模型;三是将仿真结果由I/N和PFD限值映射为可执行的最小地理隔离距离及PFD/EPFD统计值;四是从单一SD2D系统扩展到两套更具代表性的Starlink系统,并增加对地物遮挡、最低工作仰角、极化复用以及建链策略等关键参数的敏感性分析。

## 2 系统建模

### 2.1 跨境同频干扰场景

跨境同频干扰场景如图1所示。国家A部署SD2D系统,并授权其使用地面IMT频段;邻国B部署同频IMT网络,且边境两侧属于非协作网络,未预设统一调度或动态协同机制。在此条件下,两系统采用相同频率划分,可能产生的干扰场景归纳为四类<sup>[6]</sup>:(1) A1(IMT→SD2D上行),IMT终端和/或基站对SD2D卫星的干扰;(2) A2(IMT→SD2D下行),IMT终端和/或基站对SD2D终端的干扰;(3) B1(SD2D上行→IMT),SD2D终端对IMT终端和/或基站的干扰;(4) B2(SD2D下行→IMT),SD2D卫星对IMT终端和/或基站的干扰。其中,B2场景最为关键,原因在于地面IMT网络已在全球广泛部署,具有明确且优先的保护需求。因此,本文重点研究B2场景,由于SD2D卫星下行与IMT终端及基站的接收频率均可能存在重叠,故需要分别评估其对两类IMT接收机的同频干扰<sup>[6]</sup>。频点选取方面,参考ITU-R WP4C报告给出的候选频段<sup>[5]</sup>,并考虑SD2D系统可能在694–2690 MHz内的多个下行子频段发射,选取两处下行代表频点用于跨境同频干扰评估:

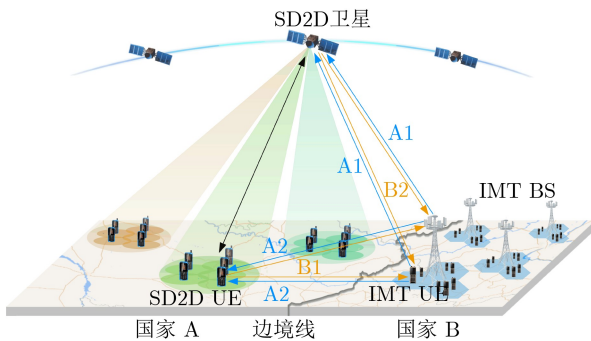


图1 跨境同频干扰场景

1995 MHz和2190 MHz,当邻国边境IMT系统采用ITU-R M.1036建议书约定的B6(UL 1980–2010 MHz/DL 2170–2200 MHz)<sup>[15]</sup>或者3GPP/5G NR n65(UL 1920–2010 MHz / DL 2110–2200 MHz)<sup>[16]</sup>划分时,SD2D下行链路将在这两个频点分别对IMT终端和基站造成潜在干扰。

### 2.2 SD2D系统建模

#### 2.2.1 SD2D技术参数

SD2D系统建模主要参考SpaceX的两套系统参数,分别记为Starlink-1和Starlink-2。其中,Starlink-1参数来源于ITU WP4C报告<sup>[5]</sup>,对应搭载SD2D载荷的二代Starlink星座<sup>[17]</sup>;Starlink-2参数主要来源于SpaceX向FCC提交申请的新一代NGSO MSS系统<sup>[18]</sup>,部分未披露参数在不改变研究主线的前提下参考Starlink-1的基准值取定。若后续披露更精确参数,可按照本文提供的仿真方法对结果进行修正。两套系统的轨道参数如表1所示,射频特性、工作仰角、建链策略等关键参数如表2所示<sup>[17,18]</sup>。其中,建链策略默认基于卫星侧发起,以最大仰角选择SD2D终端建立链路,即在给定覆盖与波束调度策略下,逐颗卫星逐个波束扫描所有候选SD2D终端点位,然后将波束指向具有最高仰角的终端(简记为Sat-MaxElevation)。

#### 2.2.2 波束调度机制

每颗SD2D卫星配置数十至数百个点波束。为提升频谱效率,一般采用多色频率复用,通过对同频波束进行足够隔离以抑制自干扰,实现同一载频在同一卫星上多次复用,从而提升系统容量。每个波束划分为若干载波信道;在任一时刻、针对某一载波,每个波束至多分配一条激活链路。地面控制中心统一调度卫星波束,动态将波束指向存在活跃用户且获得授权的服务区域,并可对各波束独立调整,以降低系统内与系统间干扰风险。对于无活跃用户或未授权区域,波束将被关闭或移开。基于上述假设,卫星波束仅指向已授权区域,并规避同频波束间自干扰,同时满足对现有业务的保护要求。

#### 2.2.3 同频波束干扰抑制

为抑制SD2D星座内同频波束之间的自干扰,对同频链路施加最小几何隔离约束。所需隔离度主要由卫星天线方向图的旁瓣特性以及载干比(C/I)允许的性能劣化决定。本文采用波束指向隔离角度扫描方法,对C/I值统计处理求互补累积分布函数(CCDF),实现对同频波束干扰抑制的最优设计:

$$CCDF(C/I) = \Pr C/I > \tau | (\theta_{intra}^*, \theta_{cross}^*) \geq \zeta \quad (1)$$

其中,C表示单条有效链路的瞬时载波功率,I表

表 1 SD2D系统轨道参数配置

系统	高度(km)	轨道倾角(°)	轨道面	单面星位 <sup>①</sup>	RAAN 间隔(°)	各壳层星位数	星位总数/卫星总数
Starlink-1	525	53	28	120	12.9	3360	8640/8640
	340	53	48	110	7.5	5280	
	335	26	96	60	3.75	5760	
	334	32	96	60	3.75	5760	
	333	38	96	60	3.75	5760	
	332	43	96	60	3.75	5760	
Starlink-2	331	48	96	60	3.75	5760	46800/15000 <sup>②</sup>
	330	53	96	60	3.75	5760	
	329	60	48	60	7.5	2880	
	328	69	48	60	7.5	2880	
	327	76	48	60	7.5	2880	
	326	96.87	60	60	6	3600	

注: ①星位 (orbit slots) 指每个轨道面内预设的可部署位置。②关于 Starlink-2 的轨道配置, SpaceX 声明其实际在轨部署卫星总数将不超过 15000, 小于预设星位总数 46800, 以灵活调整星座构型<sup>[18]</sup>。故本文在仿真时, 固定总卫星数 15000 颗, 并按各壳层星位数占比进行均匀缩放: 335/334/333/332/331 km 每壳层 1846 颗; 330 km 壳层 1847 颗; 329/328/327 km: 每壳层 923 颗; 326 km 壳层 1154 颗。

表 2 SD2D系统主要技术参数

参数	Starlink-1/Starlink-2
频带	698-2690 MHz/1429-2690 MHz
卫星发射带宽	5 MHz
卫星天线发射极化	右旋圆极化
单波束发射功率	4.79-14.79 dBW (12.79 dBW @ 2190/1995 MHz)
单波束EIRP	38.89-48.89 dBW (46.89 dBW @ 2190/1995 MHz)
卫星天线方向图	ITU-R S.1528 <sup>[19]</sup>
单星同频波束数量 ( $J$ )	6
最低工作仰角 ( $\varepsilon_{\min}$ )	20°/10°
建链策略	Sat-MaxElevation
径向和横向尺寸 ( $L_r, L_t$ )	$L_r = L_t = 1.6$ m
第一旁瓣比值 (SLR)	20 dB
旁瓣级数设计参数 ( $l$ )	2

示同一 SD2D 系统内其它所有同频波束旁瓣泄漏在该有效链路接收端形成的聚合干扰功率,  $\tau$  表示载干比门限值,  $\zeta$  表示优于门限值的百分位,  $\theta_{\text{intra}}^*$ ,  $\theta_{\text{cross}}^*$  分别表示星内同频波束隔离角度  $\theta_{\text{intra}}$ 、星间同频波束隔离角度  $\theta_{\text{cross}}$  的扫描最优解。

对第  $n$  个 SD2D 用户终端, 其瞬时 C/I 值:

$$(C/I)_n = -10 \lg \left( \sum_{j \in J_n} 10^{-\frac{\Delta P_{t,j} + \Delta G_{t,j} + \Delta G_{r,j} + \Delta L_{s,j} + \sigma_j}{10}} \right) \quad (2)$$

其中,

$$\begin{aligned} \Delta P_{t,j} &= P_{t,\max} - P_{t,j}, \Delta G_{t,j} = G_{t,\max} - G_{t,j}(\theta_j, \phi_j), \\ \Delta G_{r,j} &= G_{r,\max} - G_{r,j}(\theta_{rj}, \phi_{rj}), \Delta L_{s,j} = L_{s,j} - L_{s,n} \end{aligned}$$

分别表示该终端有效链路与第  $j$  条同频干扰链路的发射功率差、发射增益差、接收增益差、链路损失差,  $\sigma_j$  表示第  $j$  条干扰链路相对有效链路的极化隔离,  $J_n$  表示该终端可见的全部同频干扰链路集合。

## 2.3 IMT系统建模

### 2.3.1 IMT 技术参数

地面 IMT 系统模型主要参考 ITU-R WP 5D 报告<sup>[20]</sup>, 详见表3。其中, IMT 基站部署采用农村宏站类型, 基站天线采用传统扇区天线, 其方向图沿用 ITU-R F.1336建议书 recommends 3.1峰值旁瓣模型<sup>[21]</sup>; IMT 终端天线按全向模型处理。

表 3 IMT系统主要技术参数

参数	取值
基站部署类型	乡村宏基站 (Rural-macro)
小区半径	> 3 km (@ 1-2 GHz, 典型值 5 km)
基站天线高度	30 m (@ 1-2 GHz)
基站扇区数量	3
基站接收机噪声系数	5 dB
频率复用系数	1
基站天线类型	Non-AAS, ITU-R F.1336 <sup>[21]</sup>
基站天线设计参数	$\varphi_3=65^\circ, \beta=3^\circ$ , 线极化 $\pm 45^\circ$ , $L_t=3$ dB, $G_0=18$ dBi, $k_p=0.7, k_h=0.7, k_v=0.3$
终端部署密度(单扇区同频发射终端数量)	3
终端天线高度	1.5 m
终端天线类型	全向天线
终端天线设计参数	最大增益-3 dBi, 线性极化 $\pm 45^\circ$
终端人体损耗	4 dB
终端噪声系数	9 dB

### 2.3.2 IMT 保护标准

根据文献[6, 20, 22], 以干扰噪声比 (I/N) 表征对 IMT 终端与基站接收机的保护要求。设 I/N 为瞬时干扰噪声比,  $(I/N)_{th}$  为保护门限, 则基本判据可用 I/N 的累积分布函数 (CDF) 表示, I/N 不超过门限的概率应不小于目标百分位  $\kappa$ [6, 22], 即

$$\Pr \{I/N \leq (I/N)_{th}\} \geq \kappa \quad (3)$$

依据文献[6, 22], 对 IMT 终端与基站统一采用保护门限  $(I/N)_{th} = -6$  dB。第3节确定性计算中按  $\kappa=100\%$  (最不利)条件推导; 第5节的动态仿真则选取代表性百分位( $\kappa=99.50\%$ )进行评估。

### 2.4 天线辐射方向图建模

为描述卫星到IMT接收机的干扰链路在收、发天线处的离轴增益, 构建如图2所示的空间几何模型, 分别在卫星和IMT基站处定义局部坐标系, 并标识干扰链路在相应坐标系中的位置及角度。

#### 2.4.1 卫星天线辐射模型

根据 ITU-R S.1528 Recommends 1.4[19], 并参考文献[23]进行校正, 卫星天线的离轴增益采用圆形泰勒光照函数描述, 计算模型如下:

$$G_t(u) = G_{max} + 20 \lg \left( \frac{2J_1(u)}{u} \cdot \prod_{i=1}^{l-1} \frac{\left[ 1 - \frac{u^2}{\pi^2 \cdot \sigma^2 \cdot [A^2 + (i-1/2)^2]} \right]}{\left[ 1 - \left( \frac{u}{\pi \cdot \mu_i} \right)^2 \right]} \right) \quad (4)$$

其中,  $G_{max}$  是峰值增益 (dBi);  $l$  为旁瓣设计参数 (均匀旁瓣级数  $l-1$ ) [23];  $J_1(\cdot)$  是第一类一阶贝塞尔函数,  $\mu_i (i=1, 2, \dots, l)$  为  $J_1(\cdot)$  的主根; 过程变量  $A, \sigma, u$  分别定义为[23]:

$$A = \frac{1}{\pi} \cdot \text{arccosh} \left( 10^{\frac{SLR}{20}} \right), \sigma = \frac{\mu_l}{\sqrt{A^2 + (l - \frac{1}{2})^2}}$$

$$u(\theta, \varphi) = \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{(L_r \sin \theta \cos \varphi)^2 + (L_t \sin \theta \sin \varphi)^2}$$

SLR表示第一旁瓣比值;  $u$ 主要取决于天线的径向和横向口径尺寸( $L_r$ 和 $L_t$ ), 波长 $\lambda$ , 以及干扰信号相对主瓣方向的极角(总离轴角)  $\theta$  及其在天线安装平面投影的方位角 $\varphi$ 。对于给定频点, 先计算其波长 $\lambda$ , 再由卫星、波束指向中心与IMT接收机的相对几何关系求得 $(\theta, \varphi)$ , 然后代入式(4)计算 $u(\theta, \varphi)$ 及对应的离轴增益。在本文参数下, 由于 $L_r = L_t$ , 故 $u(\theta, \varphi)$ 可简化为 $u(\theta) = \pi L_r \sin \theta / \lambda$ 。

#### 2.4.2 基站天线辐射模型

如图2所示, 干扰链路在原局部坐标系  $(X_h, Y_h, Z_h)$  中的单位向量为 $u = (u_x, u_y, u_z) = (\cos \theta_h \cos \varphi_h, \cos \theta_h \sin \varphi_h, \sin \theta_h)$ 。天线绕 $Y_h$ 轴下倾 $\beta$ 后, 该向量映射为 $u' = (u'_x, u'_y, u'_z)$ , 其中,

$$u'_x = -u_z \sin \beta + u_x \cos \beta, u'_y = u_y,$$

$$u'_z = u_z \cos \beta + u_x \sin \beta$$

根据图2定义的几何关系,  $u'_z = \sin \theta_d$ ,  $u'_x = \cos \theta_d \cos \varphi_d$ , 则下倾后天线仰角和方位角分别为:

$$\theta_d = \arcsin(\sin \theta_h \cos \beta + \cos \theta_h \cos \varphi_h \sin \beta) \quad (5)$$

$$\varphi_d = \arccos \left( \frac{(-\sin \theta_h \sin \beta + \cos \theta_h \cos \varphi_h \cos \beta)}{\cos \theta_d} \right) \quad (6)$$

根据ITU-R F.1336 Recommends 3.1峰值旁瓣参考模型[21], 基站天线的离轴接收增益可表示为:

$$G_r(\theta_d, \varphi_d) = G_0 + G_{hr}(x_h) + RG_{vr}(x_v) \quad (7)$$

其中,  $G_0$ 为峰值增益;  $G_{hr}(x_h)$ 是在 $(x_h, 0)$ 归一化方向上方位角平面中的相对参考天线增益,  $x_h = |\varphi_d|/\varphi_3$ ,  $\varphi_3$ 为方位面3 dB波束宽度;  $G_{vr}(x_v)$ 表示在 $(0, x_v)$ 归一化方向上仰角平面中的相对参考天线增益,  $x_v = |\theta_d|/\theta_3$ ,  $\theta_3$ 表示仰角平面3 dB波束宽度;  $R$ 表示随着方位角从 $0^\circ$ 移动到 $\varphi_d$ 时的水平增益压缩比。相关过程变量的具体计算公式如下:

$$G_{hr}(x_h) = \begin{cases} \max \{-12x_h^2, G_{180}\}, & x_h \leq 0.5 \\ \max \{-12x_h^{(2-k_h)} - \lambda_{kh}, G_{180}\}, & x_h > 0.5 \end{cases}$$

$$G_{vr}(x_v) = \begin{cases} -12x_v^2, & x_v < x_k \\ -12 + 10 \lg(x_v^{-1.5} + k_v), & x_k \leq x_v < 4 \\ -\lambda_{kv} - \text{Clg}(x_v), & 4 \leq x_v < 90^\circ/\theta_3 \\ G_{180}, & x_v \geq 90^\circ/\theta_3 \end{cases}$$

$$\lambda_{kh} = 3(1 - 0.5^{-k_h}), x_k = \sqrt{1 - 0.36k_v}$$

$$\lambda_{kv} = 12 - \text{Clg}(4) - 10 \lg(4 - 1.5 + k_v)$$

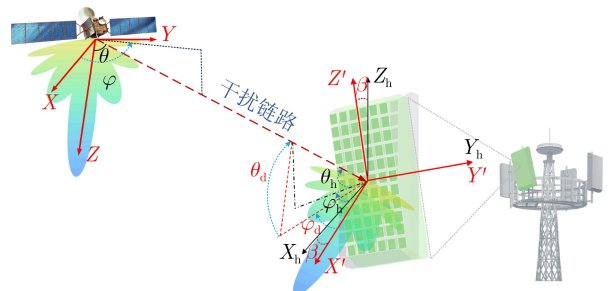


图2 卫星天线和基站天线辐射空间几何模型

$$G_{180} = -12 + 10\lg(1 + 8k_p) - 15\lg(180^\circ/\theta_3)$$

$$C = \frac{10\lg\left(\frac{(180^\circ/\theta_3)^{1.5}(4^{-1.5} + k_v)}{1 + 8k_p}\right)}{\lg(22.5^\circ/\theta_3)}$$

$$R = \frac{G_{hr}(x_h) - G_{hr}(180^\circ/\phi_3)}{G_{hr}(0) - G_{hr}(180^\circ/\phi_3)}$$

输入参数  $k_p$ ,  $k_h$ ,  $k_v$  用于控制方向图形状及增益。

### 2.4.3 后瓣遮挡衰减模型

上述 S.1528 和 F.1336 参考模型主要描述天线标称方向图, 未显式刻画卫星平台、太阳翼、基站桅杆或建筑立面等后向结构可能引入的附加遮挡。为增强模型完备性, 在参考方向图基础上引入附加后瓣遮挡修正项。设  $u_f$  表示入射方向沿前向主轴的方向余弦, 则由后瓣遮挡引入的附加衰减为:

$$A_{back} = \begin{cases} B_{max} x^\gamma, & \text{if } u_f < 0 \\ 0, & \text{if } u_f \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $x = \min(1, \max(0, -u_f))$ ,  $B_{max}$  表示深后方可达到的附加遮挡损耗上限,  $\gamma$  表示该附加损耗由后半空间边界向深后方增长的平滑程度。

本文取  $B_{max} = 60$  dB、 $\gamma = 4$  作为基线参数。卫星和基站天线叠加后瓣遮挡效应的三维辐射方向图验证结果详见增强出版材料中的附录 A。

### 2.5 信道传播模型

针对卫星至 IMT 接收机的下行干扰链路, 采用 ITU-R P.619 建议书<sup>[24]</sup>给出的地空传播模型计算路径损耗。依据 ITU-R P.618 建议书<sup>[25]</sup>, 在 10 GHz 以下大气吸收与晴空衰减通常较小。考虑到本文研究频段位于 2 GHz 附近, 且干扰评估以跨境保护为目标, 故将自由空间损耗定义为保守基线, 即在路径计算中默认仅计入自由空间损耗<sup>[23]</sup>:

$$L_{bfs} = 92.45 + 20\lg f + 20\lg d_s \quad (9)$$

其中,  $f$  为频率 (GHz),  $d_s$  为卫星与受扰 IMT 接收机之间的直线距离 (km)。在此基础上, 为进一步刻画植被、建筑等地物遮挡对干扰链路的影响, 引入 ITU-R P.2108 建议书<sup>[26]</sup>中的“高度增益终端修正”模型, 对地物遮挡效应进行量化。针对开放/农村部署环境, 附加地物损耗可表示为<sup>[26]</sup>:

$$A_h(f, h) = \begin{cases} -K_{h2}(f)\lg(h/H_0), & h < H_0 \\ 0, & h \geq H_0 \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $H_0 = 10$  m 为典型地物高度,  $h$  表示 IMT 终端或基站天线高度,  $K_{h2}(f) = 21.8 + 6.2\lg(f)$ 。

考虑到 P.2108 地物遮挡具有统计属性, 引入遮挡概率  $P_{shield}$  建模: 对动态仿真采样中的每个 IMT

接收机, 按概率  $P_{shield} \in [0, 1]$  随机标识其是否处于地物遮挡状态; 若为遮挡, 则其路径  $L_{path}$  计算时, 应在自由空间损耗基础上叠加遮挡损耗:

$$L_{path} = L_{bfs} + I_{clutter} A_h(f, h) \quad (11)$$

其中,  $I_{clutter} \in \{0, 1\}$  为地物遮挡标识变量。除专门的敏感性测试外, 本文默认取  $P_{shield} = 0$  (无遮挡)。

## 3 确定性计算

### 3.1 保护 IMT 终端 PFD 限值

鉴于 IMT 终端采用全向天线, 其最大允许聚合 PFD 限值 (dBW/m<sup>2</sup>/MHz) 为<sup>[6]</sup>:

$$PFD_{Mask, UE} = 10\lg(kTB) + NF_{UE} + \left(\frac{I}{N}\right)_{th} - G_{UE} - 10\lg\left(\frac{\lambda^2}{4\pi}\right) + L_{pol} + L_{body} \quad (12)$$

其中,  $k = -228.6$  dBW/(K·Hz) 为玻尔兹曼常数,  $T = 290$  K 为噪声温度,  $B = 1$  MHz 为参考带宽;  $NF_{UE}$ ,  $G_{UE}$ ,  $\lambda$ ,  $L_{pol}$ ,  $L_{body}$  分别表示 IMT 终端噪声系数、天线增益、波长、极化失配损耗、人体损耗。

### 3.2 保护 IMT 基站 EPFD 限值

上述 PFD 限值计算方法并不适用于 IMT 基站, 原因在于基站天线增益对仰角高度敏感且方向性很强, 因此无法将 PFD 限值定义为仰角的函数以实现有效保护<sup>[6]</sup>。为此, 借鉴《无线电规则》<sup>[27]</sup> 22.5C.1 条款的做法, 引 EPFD 作为保护基站免受 SD2D 干扰的衡量指标<sup>[6]</sup>, 其定义为:

$$EPFD = 10\lg \left[ \sum_{i=1}^{N_a} 10^{\frac{P_i}{10}} \frac{G_{Sat}(\theta_{ti}, \phi_{ti}) G_{BS}(\theta_{ri}, \phi_{ri})}{4\pi d_{si}^2 G_{BSmax}} \right] \quad (13)$$

其中,  $P_i$  为第  $i$  个干扰卫星的发射功率 (dBW);  $G_{Sat}$  为卫星天线指向基站的发射增益;  $G_{BS}$  为基站天线在卫星入射方向的接收增益,  $G_{BSmax}$  为其最大增益;  $(\theta_{ti}, \phi_{ti})$  与  $(\theta_{ri}, \phi_{ri})$  分别为发射与接收端表征干扰链路方向的俯仰/方位角组合;  $d_{si}$  为基站至该卫星的斜距;  $N_a$  为基站可见的干扰卫星数量。

据此, 可由接收机参数推导用于保护基站的聚合 EPFD 限值 (dBW/m<sup>2</sup>/MHz)<sup>[6]</sup>:

$$EPFD_{Mask, BS} = 10\lg(kTB) + NF_{BS} + \left(\frac{I}{N}\right)_{th} + L_{pol} + L_f - G_{BSmax, dB_i} - 10\lg\left(\frac{\lambda^2}{4\pi}\right) \quad (14)$$

其中,  $NF_{BS}$ ,  $L_f$  分别为基站的噪声系数与馈线损耗。

按照上述确定性计算方法, 基表 3 所列参数, 分别计算不同频点下用于保护 IMT 终端和基站所需的聚合 PFD/EPFD 限值, 并绘于图 3。其中, 典型

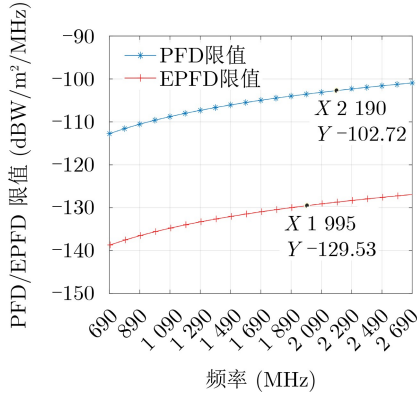


图3 保护IMT终端和基站所需的 PFD/EPFD 限值随频率变化曲线

频点2 190 MHz 处的最大允许PFD限值为 $-102.72 \text{ dBW/m}^2/\text{MHz}$ ; 1995 MHz处最大允许EPFD限值为 $-129.53 \text{ dBW/m}^2/\text{MHz}$ 。

#### 4 系统间干扰分析

为实现两系统共存，通常可采用多种干扰缓解手段，例如业务区地理隔离、频率分割、极化隔离、自适应波束赋形、波束调零等。本文聚焦于地理隔离这一基础且通用的措施，以建立跨境场景下SD2D-IMT共存分析框架。在如图1所示的干扰场景中，国家A侧部署的SD2D系统为了减缓对边境IMT系统的干扰，需要在服务区与边境之间引入隔离距离 $d$ 。通过逐步增大隔离距离( $0 \rightarrow d_1 \rightarrow d_2 \rightarrow \dots \rightarrow d_{\min}$ )，SD2D服务区向A境内不断收缩，直至满足IMT终端与基站的保护要求：

$$\Pr \{ (I/N)_{\text{UE}} \leq (I/N)_{\text{th}} | d_{\min}^{\text{UE}} \} \geq \kappa \quad (15)$$

$$\Pr \{ (I/N)_{\text{BS}} \leq (I/N)_{\text{th}} | d_{\min}^{\text{BS}} \} \geq \kappa \quad (16)$$

上述保护准则可通过时/空动态仿真完成验证和判定，即在边境区域内多个被干扰接收机处，采集一定时间范围内的瞬时I/N样本后进行CDF统计处理，然后在指定百分位处进行符合性判定。为同时保护终端和基站，最终隔离距离应取：

$$d_{\min} = \max \{ d_{\min}^{\text{UE}}, d_{\min}^{\text{BS}} \} \quad (17)$$

在给定 $d$ 下，每个时刻对所有观测IMT终端/基站计算其瞬时聚合干扰：

$$I_{\text{agg}} = 10 \lg \left( \sum_m^M \sum_j^J 10^{\frac{I_{(m,j)}}{10}} \right) \quad (18)$$

$$I_{(m,j)} = P_{\text{tx}(m,j)} + G_{\text{tx}}(\theta_{\text{tx}}, \phi_{\text{tx}})_{(m,j)} - L_{\text{path},m} + G_{\text{rx}}(\theta_{\text{rx}}, \phi_{\text{rx}})_{(m)} - L_{\text{pol}} - L_{\text{others}} \quad (19)$$

其中， $I_{(m,j)}$ 为第 $m$ 颗可见卫星的第 $j$ 个同频波束对受扰IMT终端/基站接收机产生的干扰功率谱密

度； $P_{\text{tx}(m,j)}$ 为对应的发射功率谱密度； $G_{\text{tx}}(\theta_{\text{tx}}, \phi_{\text{tx}})_{(m,j)}$ 与 $G_{\text{rx}}(\theta_{\text{rx}}, \phi_{\text{rx}})_{(m)}$ 分别为卫星发射天线与受扰接收天线在相应干扰链路方向上的增益； $L_{\text{path},m}$ 为路径损耗； $L_{\text{pol}}$ 为极化失配损耗； $L_{\text{others}}$ 表示受扰终端人体损耗 $L_{\text{body}}$ 或基站馈线损耗 $L_{\text{f}}$ ； $M$ 为可见的发射卫星数； $J$ 为单星同频波束数。

IMT终端/基站接收机的聚合干扰噪声比为：

$$I/N = I_{\text{agg}} - (10 \lg(kTB) + NF) \quad (20)$$

该干扰样本亦用于评估终端侧的聚合PFD：

$$\text{PFD}_{\text{agg}} = 10 \lg \left( \sum_m^M \sum_j^J 10^{\text{PFD}_{(m,j)}/10} \right) \quad (21)$$

$$\text{PFD}_{(m,j)} = P_{\text{tx}(m,j)} + G_{\text{tx}}(\theta_{\text{tx}}, \phi_{\text{tx}})_{(m,j)} - 10 \lg(4\pi d_{\text{sm}}^2) \quad (22)$$

其中， $\text{PFD}_{(m,j)}$ 为第 $m$ 颗可见干扰卫星的第 $j$ 个同频波束贡献的PFD， $d_{\text{sm}}$ 为该卫星至接收机距离。

同理，基于式(13)可得基站侧的聚合EPFD：

$$\text{EPFD}_{\text{agg}} = 10 \lg \left( \sum_m^M \sum_j^J 10^{\text{EPFD}_{(m,j)}/10} \right) \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \text{EPFD}_{(m,j)} = & P_{\text{tx}(m,j)} + G_{\text{tx}}(\theta_{\text{tx}}, \phi_{\text{tx}})_{(m,j)} \\ & - 10 \lg(4\pi d_{\text{sm}}^2) + G_{\text{rx}}(\theta_{\text{rx}}, \phi_{\text{rx}})_{(m)} \\ & - G_{\text{BSmax,dBi}} \end{aligned} \quad (24)$$

## 5 动态仿真

### 5.1 动态仿真方法

基于图1所示的干扰场景，约定如下仿真条件：

(1) 国家A、B分别为 $2500 \text{ km} \times 2500 \text{ km}$ 矩形区域，中心分别为 $(68^\circ \text{ E}, 48^\circ \text{ N})$ ， $(101.6^\circ \text{ E}, 48^\circ \text{ N})$ ；  
(2) 仿真时长 $T=1$ 天，采样间隔 $\Delta t=10$ min，随机种子 $\text{Seed}=1$ ；  
(3) IMT基站和终端沿两国边境线开始向B内陆延伸部署，取边境附近区域内(宽度 $L=30 \text{ km}$ )的IMT终端与基站作为观测点进行统计。上述基线设置( $\Delta t=10 \text{ min}$ ,  $T=1$ 天,  $\text{Seed}=1$ )是在兼顾计算复杂度与统计分辨率条件下所采用的默认参数，而并非预先假定为唯一充分收敛的设置。针对仿真结果的稳定性，5.5节进一步从时间步长、仿真时长和随机实现三个方面进行了补充验证。

动态仿真流程如图4所示。首先在 $d=0$ 条件下通过对候选隔离角度集合 $\Theta$ 进行扫描，并根据2.2.3节计算各SD2D终端的C/I瞬时值，通过CCDF统计方法确定满足同频波束干扰抑制条件的最小隔离角度组合 $(\theta_{\text{intra}}^*, \theta_{\text{cross}}^*)$ ；然后，基于分段扫描方法(粗扫 $\rightarrow$ 细化 $\rightarrow$ 微调,  $\Delta d \in \{50, 10, 1\}$ )，分别确定

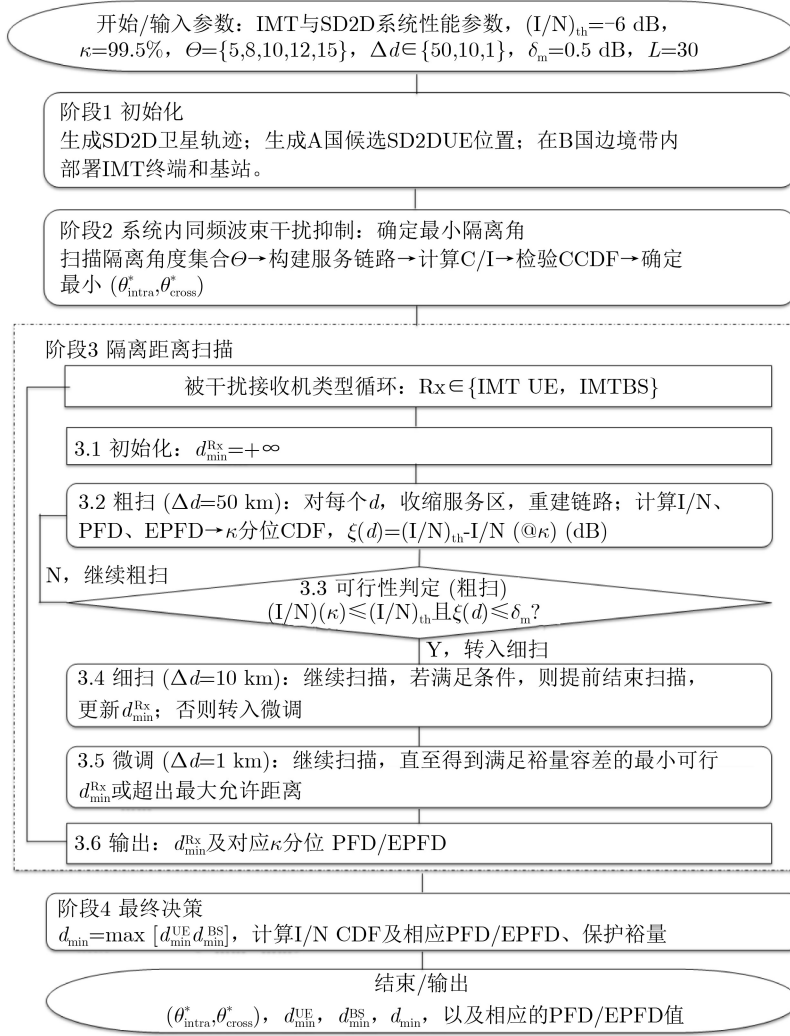


图 4 动态仿真流程示意图

满足IMT终端与基站保护要求的最小隔离距离  $d_{\min}^{\text{UE}}$  和  $d_{\min}^{\text{BS}}$ 。在扫描过程中, 对每个候选距离  $d$ , 均需在每个时间步重建业务链路, 按照第4节方法计算全部观测点的I/N与PFD/EPFD的瞬时样本, 并进行CDF统计; 当IMT终端与基站的I/N均在目标百分位( $\kappa=99.5\%$ )达到门限要求, 且残存保护裕量 ( $\xi(d) = (I/N)_{\text{th}} - I/N(@\kappa)$ )不超过给定容差(取 $\delta_m = 0.5$  dB)时, 扫描过程结束。

## 5.2 仿真结果

### 5.2.1 Starlink-1系统

图5为Starlink-1在不同隔离角度组合下的C/I CCDF曲线。取 $\tau=15$  dB,  $\zeta=95\%$ , 则同频波束间的最小隔离角度为( $12^\circ, 12^\circ$ )。图6和图7分别给出了Starlink-1在不同隔离距离下干扰IMT终端和基站的I/N CDF曲线; 表4列出了当 $(I/N)_{\text{th}} = -6$  dB,  $\kappa=99.5\%$  时, 在不同  $d$  条件下, IMT终端和基站的干扰聚合I/N、PFD/EPFD、保护裕量 $\xi$ 的仿真统计结果。结果显示: 在 $\kappa=99.5\%$ 条件下, 保护

IMT终端所需最小隔离距离为195 km, 对应的PFD统计值为 $-102.84$  dBW/m<sup>2</sup>/MHz; 保护IMT基站所需最小隔离距离为290 km, 对应的EPFD统计值为 $-129.90$  dBW/m<sup>2</sup>/MHz。如考虑同时保护IMT终端和基站, 则最终隔离距离应取两者最大值, 即290 km。在最小隔离距离处,  $\kappa$ 分位PFD与EPFD统计值与确定性限值非常接近(裕量 $<0.5$  dB), 从而验证了仿真结果与确定性限值的一致性。

### 5.2.2 Starlink-2系统

将SD2D系统参数替换为Starlink-2后重新仿真, 可得到类似的C/I CCDF曲线和I/N CDF曲线, 此处不再罗列, 仅列出对应的数值结果: (1)在 $\tau=15$  dB,  $\zeta=95\%$ 条件下, 最小波束隔离角度为( $15^\circ, 15^\circ$ ); (2)  $\kappa=99.5\%$  时, 不同隔离距离下IMT终端和基站的I/N、PFD/EPFD、保护裕量 $\xi$ 的动态仿真统计结果如表5所示, 保护IMT终端所需的最小隔离距离为272 km, 对应的PFD统计值

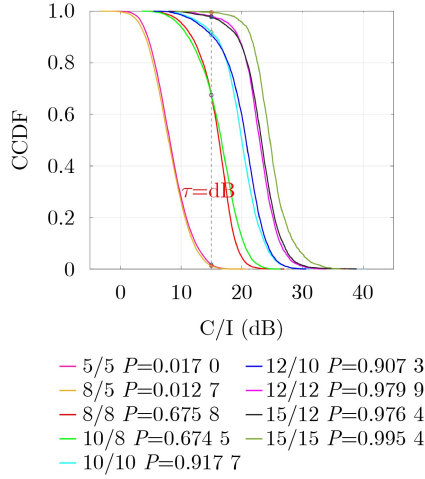


图 5 Starlink-1在不同隔离角度组合下的C/I CCDF

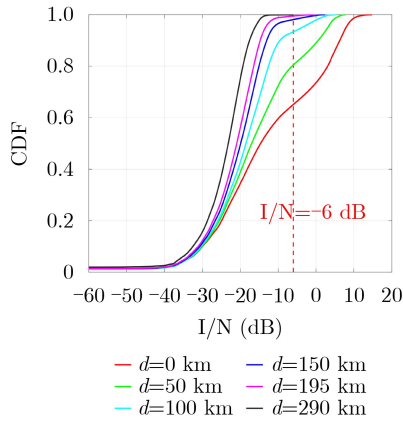


图 6 不同隔离距离下 Starlink-1 干扰 IMT 终端的 I/N CDF

为 $-102.88$  dBW/m<sup>2</sup>/MHz; 保护IMT基站所需的最小隔离距离为420 km, 对应的EPFD统计值为

表 4 Starlink-1干扰 IMT 终端和基站的动态仿真数值结果 ( $(I/N)_{th} = -6$  dB,  $\kappa=99.5\%$ )

$d$ (km)	IMT 终端			IMT 基站		
	I/N (dB)	PFD 统计值 (dBW/m <sup>2</sup> /MHz)	裕量 $\xi$ (dB)	I/N (dB)	EPFD 统计值 (dBW/m <sup>2</sup> /MHz)	裕量 $\xi$ (dB)
0	11.35	-85.37	-17.35	17.25	-106.27	-23.25
100	2.46	-94.26	-8.46	11.25	-112.28	-17.25
195	-6.12	-102.84	0.12	1.47	-122.06	-7.47
290	-13.71	-110.43	7.71	-6.37	-129.90	0.37

表 5 Starlink-2干扰 IMT 终端和基站的动态仿真数值结果 ( $(I/N)_{th} = -6$  dB,  $\kappa=99.5\%$ )

$d$ (km)	IMT 终端			IMT 基站		
	I/N (dB)	PFD 统计值 (dBW/m <sup>2</sup> /MHz)	裕量 $\xi$ (dB)	I/N (dB)	EPFD 统计值 (dBW/m <sup>2</sup> /MHz)	裕量 $\xi$ (dB)
0	10.73	-85.99	-16.73	16.74	-106.79	-22.74
100	4.19	-92.53	-10.19	13.81	-109.72	-19.81
272	-6.16	-102.88	0.16	-0.55	-124.07	-5.45
420	-14.15	-110.87	8.15	-6.21	-129.74	0.21

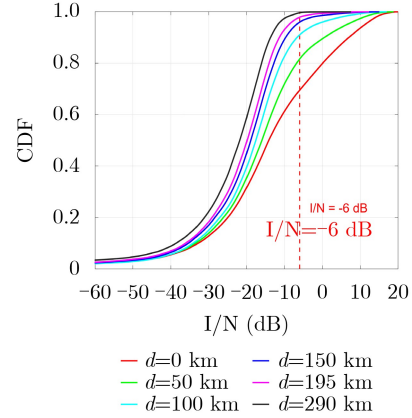


图 7 不同隔离距离下 Starlink-1 干扰 IMT 基站的 I/N CDF

$-129.74$  dBW/m<sup>2</sup>/MHz。如考虑同时保护IMT终端和基站, 则最终的隔离距离应取420 km。

### 5.3 敏感性测试

本节以Starlink-1为例, 对关键参数进行敏感性测试。为方便对比, 将5.2.1节仿真结果定为基线, 其所用参数记为默认配置, 逐个对关键参数进行独立替换, 其余参数保持不变。敏感性测试的主要结果汇总如表6所示。为解释部分参数变化引起的非线性甚至非单调结果, 引入活跃波束中心到边境的最短距离 $d_{border}$ 、最小几何离轴角 $\theta_{min}$ 作为辅助诊断量。相关诊断量的具体定义,  $d_{border}$ 分布直方图,  $\theta_{min}$ 经验CDF曲线, 以及详细机理分析见增强出版材料中的附录B。

(1)保护百分位 ( $\kappa$ ): 由默认 $\kappa=99.50\%$ 提高到 $\kappa=100\%$ 后, IMT终端/基站侧的聚合I/N分别由11.35/17.25 dB 上升至14.77/19.95 dB, 对应

表 6 关键参数变化对 Starlink-1 干扰IMT系统仿真结果的敏感性测试

参数	波束隔离角	链路数量	$(I/N)_{UE}$ (@ $d=0$ )	$(PFD)_{UE}$ (@ $d=0$ )	$d_{min}^{UE}$	$(I/N)_{BS}$ (@ $d=0$ )	$(EPFD)_{BS}$ (@ $d=0$ )	$d_{min}^{BS}$
基线(默认配置)	(12°, 12°)	9010	11.35	-85.37	195	17.25	-106.27	290
$\kappa=100\%$	(12°, 12°)	9010	14.77	-81.95	304	19.95	-103.58	560
$P_{shield}=0.2$	(12°, 12°)	9010	11.07	-85.37	193	17.25	-106.27	290
$P_{shield}=0.5$	(12°, 12°)	9010	10.43	-85.37	173	17.25	-106.27	290
$P_{shield}=0.8$	(12°, 12°)	9010	9.06	-85.37	141	17.25	-106.27	290
$P_{shield}=1.0$	(12°, 12°)	9010	-8.35	-85.37	0	17.25	-106.27	290
极化复用	(12°, 12°)	15817	12.41	-84.31	222	18.78	-104.75	360
同频波束数=1	(12°, 12°)	7839	11.68	-85.04	207	17.23	-106.30	270
同频波束数=16	(10°, 10°)	16962	11.75	-84.97	192	17.57	-105.96	330
最低仰角=10°	(15°, 15°)	2597	9.75	-86.97	340	16.30	-107.23	460
最低仰角=35°	(12°, 12°)	36608	12.92	-83.79	101	15.79	-107.74	150
建链策略 2 (UE-MaxElevation)	(10°, 10°)	75836	14.19	-82.53	80	12.83	-110.70	180
建链策略 3 (Sat-Random)	(12°, 12°)	6379	9.89	-86.83	180	16.59	-106.94	270
建链策略 4 (UE-Random)	(15°, 15°)	4169	8.68	-88.04	192	14.92	-108.61	340

PFD/EPFD也随之提高, 从而使最小隔离距离由195/290 km增至304/560 km。调整 $\kappa$ 并不改变干扰链路几何关系或建链结果, 而是改变从同一组样本中提取“尾部事件”的统计口径; 当 $\kappa=100\%$ 时, 相当于以全样本最大值约束, 保护距离自然更大。

(2) 地物遮挡概率( $P_{shield}$ ): 将 $P_{shield}$ 由默认值0(无遮挡)依次提高到{0.2, 0.5, 0.8, 1.0}后, IMT终端侧的 $\kappa$ 分位聚合I/N由11.35 dB逐步降低至11.07/10.43/9.06/-8.35 dB, 相应的 $d_{min}^{UE}$ 由195 km减小为193/173/141/0 km。该趋势来源于P.2108终端遮挡衰减修正: IMT终端天线高度(1.5 m)低于典型地物高度( $H_0=10$  m), 故遮挡以概率 $P_{shield}$ 触发并叠加损耗, 有效降低进入尾部分位的干扰。相比之下, IMT基站天线高度始终大于 $H_0$ , 其遮挡修正为0, 故 $d_{min}^{BS}$ 始终保持为290 km。

(3) 发射极化: 将卫星发射极化由默认的单一右旋圆极化切换为双圆极化复用后, 异极化波束之间由于交叉极化隔离对C/I贡献很小, 因此角隔离约束仅对同极化波束施加, 可激活的同频链路数量由9010增至15817。由于反极化波束仍会对IMT接收机形成同频干扰, 聚合干扰随之增强: 终端/基站侧 $\kappa$ 分位I/N分别由11.35/17.25 dB增至12.41/18.78 dB, 所需最小隔离距离由195/290 km增至222/360 km。可见, 极化复用在提升SD2D系统容量的同时, 也会对邻国边境的IMT网络造成更高的干扰风险。

(4) 同频波束数( $J$ ): 将单星同频波束数 $J$ 由默认6调整为1后, IMT终端侧最小隔离距离由195 km增至207 km, 而基站侧由290 km降至270 km; 当 $J$ 增至16时, 终端侧距离为192 km, 基站侧增至330 km。该结果表明,  $J$ 的影响并非简单等同于干扰源数量的线性缩放, 而是由“复用强度 + 选束机制”共同改变强干扰样本进入尾部分位的方式。特别是在高分位统计下, 少数小离轴角强样本可能主导 $d_{min}^{UE}$ , 而更多同频波束叠加则可能增强基站侧尾部干扰。因此, 同频波束数需要与波束隔离规则和建链策略联合考虑。

(5) 最低工作仰角( $\epsilon_{min}$ ): 将 $\epsilon_{min}$ 由默认20°调整为10°/35°时, 所需隔离距离出现显著变化。 $\epsilon_{min}=10^\circ$ 时,  $d_{min}^{UE}/d_{min}^{BS}$ 增至340/460 km;  $\epsilon_{min}=35^\circ$ 时, 则降至101/150 km。其原因在于, 最低工作仰角不仅改变可见链路数量, 更会改变服务几何与波束指向, 重塑边境区域的尾部干扰样本。较低仰角更易引入小离轴角的不利几何, 而较高仰角可系统性地剔除强干扰样本。因此,  $\epsilon_{min}$ 对跨境保护距离具有主导敏感性, 应优先作为可执行约束项。

(6) 建链策略: 为表征建链/调度策略实现差异带来的不确定性, 本文在默认Sat-MaxElevation基线外, 引入UE-MaxElevation、Sat-Random、UE-Random三种策略。结果表明, 建链策略影响显著: UE-MaxElevation下,  $d_{min}^{UE}/d_{min}^{BS}$ 由195/290 km降至80/180 km; Sat-Random下, 降至180/270 km;

UE-Random下则变为192/340 km。该差异主要源于不同策略对边境附近活跃波束中心分布的重塑,而非单纯由链路数量决定。若监管层面难以约束建链策略,可采用“更贴边、更聚集”的保守策略作为基线,或进一步对边境附近活跃波束密度、波束中心贴边概率等施加可执行约束,以形成可验证、可落地的协调口径。

#### 5.4 后瓣遮挡衰减的影响分析

为检验后瓣遮挡衰减是否影响最终隔离距离,本文对Starlink-1基线场景进行了分侧消融和参数敏感性测试,完整结果详见增强出版材料中的附录C。结果表明,无论双侧同时加入遮挡、完全不加遮挡,还是仅在卫星侧或基站侧加入遮挡,最终 $d_{\min}^{\text{UE}}$ 、 $d_{\min}^{\text{BS}}$ 均仅发生很小变化;当 $B_{\max}$ 与 $\gamma$ 在典型范围内变化时,隔离距离也总体保持稳定。因此,本文给出的保护距离主要由前/侧向小离轴角干扰样本控制,后瓣遮挡衰减不改变总体结论。

#### 5.5 稳定性验证

针对高分位尾部统计下最小隔离距离结果的稳定性,本节补充考察了两个典型系统在不同采样间隔( $\Delta t=10/5/1$  min)、不同仿真时长( $T=1/3$  天)以及典型随机种子(Seed=1/11/21)条件下的( $d_{\min}^{\text{UE}}$ ,  $d_{\min}^{\text{BS}}$ )变化,结果见表7。需要说明的是,本文最终关注的并非连续干扰功率本身,而是 $\kappa=99.5\%$ 分位I/N跨越保护门限所对应的最小隔离距离。因此,底层高分位I/N的微小差异经过经验分位提取与阈值判决后,可能映射为若干公里甚至十余公里的距离跳变;再叠加仿真时长与随机实现波动,结果不必然表现为“随 $\Delta t$ 细化而严格单调收敛变化”。

由表7可知,Starlink-1的结果已表现出较好的实用稳定性。相对于基线结果(195 km, 290 km),不同采样间隔、仿真时长和随机种子下得到的终端/基站侧最小隔离距离分别位于195–210 km和290–300 km。这表明,当 $\Delta t$ 由10 min细化至5 min或1 min,或改变仿真时长和随机种子时,Starlink-1的基线结果总体保持在较窄波动范围内;其中基线值处于波动范围下沿,但未改变基站侧主导最终协调距离的结论。对于Starlink-2,稳定性测试结果相对基线结果(272 km, 420 km)的波动更明显,终端/基站侧最小隔离距离分别位于266–290 km和370–420 km。这说明,在更大星座规模和更复杂的可见卫星/波束组合条件下,高分位尾部统计受采样间隔、仿真时长及随机实现的影响更大。尽管如此,Starlink-2在各组测试中仍由IMT基站侧约束主导,其总体工程结论保持不变。

上述区间并非对所有轨道相位、业务分布或调

度策略的统计置信区间,也不代表任意部署条件下的绝对上下界,而是基于本文表7所列采样间隔、仿真时长与随机种子组合得到的稳定性验证范围。因此,本文提到的195/290 km和272/420 km均应理解为基线配置下的代表性结果;在工程协调或监管应用中,可结合目标保守程度,在相应稳定性验证范围内选取适当的保护距离或附加裕量。

## 6 结论

本文围绕SD2D下行对邻国地面IMT网络的同频干扰场景,建立了面向工程实现的动态仿真评估框架,并在可控计算复杂度下同时评估IMT终端与基站的受扰情况。在此基础上,通过分段搜索优化算法,给出了满足IMT保护要求的最小隔离距离及PFD/EPFD统计数值。主要结论如下:

(1) **可追溯性验证:** 在最小隔离点处,动态仿真的 $\kappa$ 分位PFD/EPFD统计值与确定性限值保持一致(残余裕量 $<0.5$  dB),从而验证了“确定性限值—动态统计—地理隔离”之间的闭环映射关系。

(2) **协调隔离距离:** 在代表性基线设置及稳定性测试范围内,按照I/N门限 $-6$  dB、 $\kappa=99.5\%$ 准则,典型系统Starlink-1保护IMT终端/基站所需的最小隔离距离位于195–210 km/290–300 km范围内,Starlink-2的相应结果位于266–290 km/370–420 km;其中,195/290 km和272/420 km分别为两类系统在基线配置下的代表性结果,而非严格收敛的唯一取值。若需同时保护终端与基站,则协调隔离距离应取两者最大值,且通常由基站侧主导。

(3) **主导敏感参数:** 保护百分位 $\kappa$ 作为概率参数,不改变干扰链路几何关系或建链结果,仅改变从样本中提取“尾部事件”的统计口径,使所需隔

表 7 采样间隔、仿真时长与随机种子稳定性验证结果

系统	( $\Delta t, T, \text{Seed}$ )	( $d_{\min}^{\text{UE}}, d_{\min}^{\text{BS}}$ )
Starlink-1	(10, 1, 1)(基线)	(195, 290)
Starlink-1	(5, 1, 1)	(206, 300)
Starlink-1	(1, 1, 1)	(200, 300)
Starlink-1	(10, 3, 1)	(206, 300)
Starlink-1	(10, 1, 11)	(210, 300)
Starlink-1	(10, 1, 21)	(202, 290)
Starlink-2	(10, 1, 1)(基线)	(272, 420)
Starlink-2	(5, 1, 1)	(266, 370)
Starlink-2	(1, 1, 1)	(275, 410)
Starlink-2	(10, 3, 1)	(290, 390)
Starlink-2	(10, 1, 11)	(290, 390)
Starlink-2	(10, 1, 21)	(280, 410)

离距离在不同分位处重新取值。相比之下, 地物遮挡概率提升可显著抑制终端侧干扰, 但对天线高度较高的IMT基站影响有限。极化复用、同频波束数、最低工作仰角、建链策略等关键参数会改变活跃链路/波束的选择与空间分布, 重塑尾部干扰统计特性, 并可能导致非单调的隔离距离变化, 其中最低工作仰角与建链策略对结果影响尤为显著。

综上, 跨境协调不应仅依赖“干扰链路数量”的直觉判断, 而应将IMT保护准则显式转化为可执行的系统侧义务(技术或操作限制条件), 如最小波束隔离角、最低服务仰角、地理回缩/禁入区以及(必要时)对建链/调度策略的约束。本文给出的干扰分析与动态仿真方法可为相关SD2D系统部署、边境协调及监管提供参考。特别是在未预设统一调度或动态协同机制的条件下, 本文给出的PFD/EPFD限值—隔离距离映射关系可作为初始协调基准或监管筛查的保守上界。后续将研究其它干扰场景(如多系统聚合干扰等), 并拓展 IMT网络部署特性及业务模型(如城市/郊区场景、新型有源阵列基站天线、网络负载因子等)。

论文相关开源数据网址:

<https://www.scidb.cn/detail?dataSetId=053d4fce509a42708fa000af118589f0>

### 参 考 文 献

- [1] 何元智, 肖永伟, 张世杰, 等. 全球泛在连接新模式: 手机直连卫星关键技术及挑战[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(5): 1591–1603. doi: [10.11999/JEIT240032](https://doi.org/10.11999/JEIT240032).  
HE Yuanzhi, XIAO Yongwei, ZHANG Shijie, *et al.* A novel pattern for global ubiquitous interconnection: Key technologies and challenges of direct-to-smartphone[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2024, 46(5): 1591–1603. doi: [10.11999/JEIT240032](https://doi.org/10.11999/JEIT240032).
- [2] HE Yuanzhi, XIAO Yongwei, ZHANG Shijie, *et al.* Direct-to-smartphone for 6G NTN: Technical routes, challenges, and key technologies[J]. *IEEE Network*, 2024, 38(4): 128–135. doi: [10.1109/MNET.2024.3383671](https://doi.org/10.1109/MNET.2024.3383671).
- [3] TAHA H, VÁRI P, and LAPSÁNSZKY A. Direct-to-device satellite communications in the European union: Spectrum allocation and regulatory pathways within the ITU framework[J]. *IEEE Access*, 2025, 13: 190556–190581. doi: [10.1109/ACCESS.2025.3627536](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3627536).
- [4] LIU Quan, WANG Lichong, HOU Rui, *et al.* Co-frequency interference analysis of satellite-direct-to-device system on terrestrial IMT cellular network[C]. 2025 3rd International Conference on Ubiquitous Communication (Ucom), Hangzhou, China, 2025: 294–298. doi: [10.1109/Ucom67224.2025.11336981](https://doi.org/10.1109/Ucom67224.2025.11336981).
- [5] WP4C Chair and ITU-R. Working document on sharing and compatibility studies under WRC-27 Agenda Item 1.13[R]. 2025. (查阅网上资料, 未找到本条文献信息, 请确认).
- [6] WP5D Chair and ITU-R. Working document on studies for the regulatory considerations to protect terrestrial IMT Systems under WRC-27 Agenda Item 1.13[R]. 2025. (查阅网上资料, 未找到本条文献信息, 请确认).
- [7] FCC. Single network future: Supplemental coverage from space[R]. 2024. (查阅网上资料, 未找到本条文献信息, 请确认).
- [8] Ofcom. Enabling satellite direct to device services in mobile spectrum bands[R]. 2025. (查阅网上资料, 未找到报告编号, 请确认).
- [9] 3GPP. Non-terrestrial networks (NTN) related RF and coexistence aspects[S]. 2025. (查阅网上资料, 未找到本条文献信息, 请确认).
- [10] HEYDARISHAHREZA N, HAN T, and ANSARI N. Spectrum sharing and interference management for 6G LEO satellite-terrestrial network integration[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2025, 27(5): 2794–2825. doi: [10.1109/COMST.2024.3507019](https://doi.org/10.1109/COMST.2024.3507019).
- [11] SHANG Bodong, WANG Zheng, LI Xiangyu, *et al.* Spectrum sharing in satellite-terrestrial integrated networks: Frameworks, approaches, and opportunities[J]. *IEEE Network*, 2025: 1–11. doi: [10.1109/MNET.2025.3600150](https://doi.org/10.1109/MNET.2025.3600150).
- [12] PASTUKH A, TIKHVINSKIY V, and DEVYATKIN E. Exploring interference issues in the case of n25 band implementation for 5G/LTE direct-to-device NTN services[J]. *Sensors*, 2024, 24(4): 1297. doi: [10.3390/s24041297](https://doi.org/10.3390/s24041297).
- [13] PASTUKH A, TIKHVINSKIY V, DYMKOVA S, *et al.* Challenges of using the L-band and S-band for direct-to-cellular satellite 5G-6G NTN systems[J]. *Technologies*, 2023, 11(4): 110. doi: [10.3390/technologies11040110](https://doi.org/10.3390/technologies11040110).
- [14] 简晨, 陈媛, 倪文钰. Starlink手机直连卫星系统对地面IMT系统的干扰仿真分析[J]. 中国无线电, 2024(8): 33–38.  
JIAN Chen, CHEN Yuan, and NI Wenyu. Simulation analysis of interference from starlink satellite direct-to-device systems on terrestrial IMT systems[J]. *China Radio*, 2024(8): 33–38.
- [15] ITU-R. Recommendation ITU-R M. 1036–7 Frequency arrangements for implementation of the terrestrial component of International Mobile Telecommunications in the bands identified for IMT in the Radio Regulations[S]. Geneva: ITU-R, 2023.
- [16] 3GPP. 3GPP TS 38.101–1 V18.9. 0 (2025–04) User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone[S]. 3GPP, 2025. (查阅网上资料, 未找到本条文献出版地信息, 请确认).

- [17] FCC. FCC approves next-gen satellite constellation[EB/OL]. <https://www.fcc.gov/document/fcc-approves-next-gen-satellite-constellation>, 2026.
- [18] SpaceX. SpaceX MSS system LOA[EB/OL]. [https://fccprod.servicenowservices.com/icfs?id=ibfs\\_application\\_summary&number=SAT-LOA-20250916-00282](https://fccprod.servicenowservices.com/icfs?id=ibfs_application_summary&number=SAT-LOA-20250916-00282), 2026.
- [19] ITU-R. Recommendation ITU-R S. 1528 Satellite antenna radiation patterns for non-geostationary orbit satellite antennas operating in the fixed-satellite service below 30 GHz[S]. Geneva: ITU-R, 2001.
- [20] WP5D Chair and ITU-R. Characteristics of terrestrial component of IMT for sharing and compatibility studies in preparation for WRC-23[R]. 2021. (查阅网上资料, 未找到本条文献信息, 请确认).
- [21] ITU-R. Recommendation ITU-R F. 1336 Reference radiation patterns of omnidirectional, sectoral and other antennas for the fixed and mobile service for use in sharing studies in the frequency range from 400 MHz to about 70 GHz[S]. Geneva: ITU-R, 2019.
- [22] ITU-R. Characteristics of terrestrial IMT-Advanced systems for frequency sharing/interference analyses[R]. Report ITU-R M. 2292, 2013.
- [23] WU D C F and RUDDUCK R C. Directive gain of circular Taylor patterns[R]. Technical Report 1691-32, 1969.
- [24] ITU-R. Recommendation ITU-R P. 619-6 Propagation data required for the evaluation of interference between stations in space and those on the surface of the Earth[S]. Geneva: ITU-R, 2025.
- [25] ITU-R. Recommendation ITU-R P. 618-14 Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems[S]. Geneva: ITU-R, 2023.
- [26] ITU-R. Recommendation ITU-R P. 2108-1 Prediction of clutter loss[S]. Geneva: ITU-R, 2021.
- [27] ITU. Radio Regulations (Edition of 2024)[M]. Geneva: ITU, 2024.
- 刘全: 男, 高工, 研究方向为卫星通信系统、星地融合网络。  
赵伟松: 男, 高工, 研究方向为卫星互联网、卫星通信系统。肖娜: 女, 研究员, 研究方向为卫星互联网、卫星通信系统。  
肖娜: 刘全: 男, 高工, 研究方向为卫星通信系统、星地融合网络。  
宋艳军: 男, 高工, 研究方向为卫星互联网、卫星通信系统。周萌: 女, 高工, 研究方向为卫星互联网、卫星通信系统。  
周萌: 刘全: 男, 高工, 研究方向为卫星通信系统、星地融合网络。  
张志丽: 女, 研究员, 研究方向为卫星互联网、卫星通信系统。  
王金海: 男, 研究员, 研究方向为卫星互联网、卫星通信系统。  
王丽冲: 女, 高工, 研究方向为卫星互联网、卫星通信系统。

责任编辑: 廖海贝

## Co-Frequency Interference Analysis and Dynamic Simulation Validation of Satellite-Direct-to-Device Systems Against Terrestrial IMT Networks in Cross-Border Scenarios

LIU Quan<sup>①②</sup> ZHAO Weisong<sup>①</sup> XIAO Na<sup>①</sup> SONG Yanjun<sup>①</sup> ZHOU Meng<sup>①</sup>  
ZHANG Zhili<sup>①</sup> WANG Jinhai<sup>①</sup> WANG Lichong<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation,  
Shijiazhuang, 050081, China)

<sup>②</sup>(China Communication System Company Ltd., Beijing, 100070, China)

### Abstract:

**Objective** Satellite-Direct-to-Device (SD2D) systems that reuse terrestrial IMT spectrum may generate harmful downlink interference to incumbent IMT networks in adjacent administrations, especially in cross-border deployments where SD2D downlinks overlap the receiver bands of both IMT user equipment (UEs) and IMT base stations (BSs). Therefore, a practical coexistence methodology is needed to (i) translate IMT receiver protection criteria into explicit power-flux-density (PFD) or equivalent-power-flux-density (EPFD) constraints and (ii) validate these constraints under realistic spatiotemporal dynamics so that they can be mapped to enforceable geographic coordination measures such as border isolation distances. The study focuses on the dominant interference path (SD2D downlink to IMT receivers) and establishes a traceable workflow from deterministic PFD/EPFD limits to dynamic Monte Carlo validation and the resulting minimum border

isolation distances.

**Methods** A cross-border scenario is modeled where Country A deploys an SD2D system and Country B operates a terrestrial IMT network. Two representative downlink frequencies, 1995 MHz and 2190 MHz, are evaluated for two SpaceX-related configurations, Starlink-1 and Starlink-2. The IMT network is modeled with ITU-R/3GPP-compliant characteristics, using I/N protection criteria with a threshold of -6 dB and a target percentile  $\kappa$  (baseline  $\kappa=99.5\%$ ) for both IMT UEs and BSs. Satellite transmit antennas use the ITU-R S.1528 reference pattern; IMT-BS receive antennas use the ITU-R F.1336 sector pattern; IMT-UEs are modeled as omnidirectional. A back-lobe blocking attenuation model is applied to both satellite and BS patterns to capture rear-side shielding. Propagation follows the ITU-R P.619 model with free-space loss as a conservative baseline, and an optional clutter-loss term is introduced via a shielding probability. Deterministic protection limits are obtained by back-calculating the maximum permissible aggregate PFD for IMT-UE protection and the maximum permissible aggregate EPFD for IMT-BS protection. A dynamic simulator then validates these limits and searches for the required minimum border isolation distances (Fig.4). Co-channel beam isolation is optimized through the C/I complementary cumulative distribution function (CCDF), and a segmented-search algorithm determines the minimum UE- and BS-side isolation distances together with  $\kappa$ -percentile PFD/EPFD statistics.

**Results and Discussions** The deterministic-limit derivation yields a maximum permissible aggregate PFD of -102.72 dBW/m<sup>2</sup>/MHz at 2190 MHz (IMT-UE) and a maximum permissible aggregate EPFD of -129.53 dBW/m<sup>2</sup>/MHz at 1995 MHz (IMT-BS) (Fig.3). For Starlink-1, the C/I design target gives a minimum beam-isolation angle pair of (12°, 12°) (Fig.5). Dynamic simulation shows that under the representative baseline setting and the I/N threshold of -6 dB and  $\kappa=99.5\%$ , the minimum isolation distance is 195 km for UE-protection and 290 km for BS-protection (Fig.6, Fig.7, Table 4). The coordination distance is therefore 290 km, and the  $\kappa$ -percentile simulated PFD/EPFD matches the deterministic limits with a residual margin below 0.5 dB. For Starlink-2, the optimized isolation angles increase to (15°, 15°), and under the same baseline setting, the required distances rise to 272 km (UE) and 420 km (BS) (Table 5). The baseline distances reported above should be interpreted as representative values under the specified simulation configuration, rather than strictly converged unique results. Stability verification shows that, under different sampling intervals, simulation durations, and random seeds, the UE/BS-side distances mainly fall within 195–210 km/290–300 km for Starlink-1 and 266–290 km/370–420 km for Starlink-2 (Table 7). Sensitivity results for Starlink-1 further show that the isolation distance is governed by the upper tail of the aggregate I/N distribution (Table 6). Tightening  $\kappa$  from 99.5% to 100% increases the UE/BS-side distances from 195/290 km to 304/560 km. Clutter shielding substantially reduces the UE-side distance, e.g., to 173 km at a shielding probability of 0.5, but has little effect on BS protection. Polarization reuse increases the UE/BS-side distances to 222/360 km, while increasing the number of co-channel beams to 16 raises the BS-side distance to 330 km. The minimum service elevation and link-establishment strategy are dominant operational factors: changing the elevation threshold from 10° to 35° shifts the required distances from 340/460 km to 101/150 km, while switching from Sat-MaxElevation to UE-MaxElevation reduces them to 80/180 km.

**Conclusions** The proposed workflow converts IMT receiver protection criteria into deterministic PFD/EPFD limits and validates them with a spatiotemporal simulator. Under the I/N threshold of -6 dB and  $\kappa=99.5\%$ , the baseline and stability tests jointly indicate representative UE/BS coordination-distance ranges of 195–210 km/290–300 km for Starlink-1 and 266–290 km/370–420 km for Starlink-2, rather than unique, strictly converged values. Sensitivity tests further show that the  $\kappa$ -percentile only changes the statistical criteria for extracting "tail events" from the samples, and clutter shielding mainly benefits UEs, whereas minimum elevation, polarization reuse, co-channel-beam number, and link-establishment strategy can reshape worst-case geometry and drive large (sometimes non-monotonic) changes in the required distances. The framework provides a traceable bridge from receiver criteria to enforceable border coordination measures.

**Key words:** satellite-direct-to-device (SD2D); IMT; co-frequency interference; cross-border coordination; isolation distance