

# ITU-R P.452 传播模型融合 SRTM3 高程数据的星-地反向通信链路频率干扰评估方法

殷达<sup>1,2</sup> 姚秀娟<sup>1\*</sup> 李震<sup>1</sup> 马元浩<sup>1</sup> 高翔<sup>1</sup> 李雪<sup>1</sup> 王静<sup>1</sup>

(1 中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

(2 中国科学院大学 北京 101408)

**摘 要** 针对天地一体化星座系统中星-地多类型异构通信链路间的电磁频谱兼容问题,国际上正在开展研究但尚未形成统一的完善评估模型。本文对 ITU-R P.452 与 P.2001 无线电传播模型的物理参数及计算方法进行研究,提出一种融合 SRTM3 数字高程数据评估星-地反向通信链路频率干扰的方法。以全球五个典型地区为例,对两种模型的计算数据与 ITU-R 无线电波传播研究组的实际测量数据进行对比分析,遴选出不同场景下适用的干扰评估模型。本文提出的 ITU-R P.452 融合 SRTM3 的评估方法可为卫星系统星-地反向通信链路间的频率兼容计算及在轨干扰排查提供参考。

**关键词** 频率兼容; 反向链路; 干扰评估; 天地一体化  
中图分类号 TN011

## One method integrating ITU-R P.452 with SRTM3 for interference evaluation of Satellite-Ground reverse communication link

YIN Da<sup>1,2</sup> YAO Xiujuan<sup>1\*</sup> LI Zhen<sup>1</sup> MA Yuanhao<sup>1</sup> GAO Xiang<sup>1</sup>

LI Xue<sup>1</sup> WANG Jing<sup>1</sup>

(1 *National Space Science Center, Beijing, 100190*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 101408*)

**Abstract** Regarding the electromagnetic spectrum compatibility issues among various types of the space-ground integrated system network, international research is underway. However, a unified and comprehensive evaluation model has not yet been established. This study investigates the physical parameters and algorithms of ITU-R P.452 and P.2001 propagation models to develop a methodology integrating with SRTM3 digital elevation model for evaluate the interference in the frequency range of Satellite-to-Ground reverse communication link. Through a comparative evaluation of ITU-R Study Group 3 measurement data against predicted data from two models across five globally representative regions, this study identifies appropriate interference assessment models in

different scenarios. The methodology that ITU-R P.452 model integrating SRTM3 provides references for investigation of in-orbit interference and frequency compatibility assessment on Satellite-to-Ground reverse communication link.

**Key words** Frequency compatibility; Reverse communication link; Interference assessment; The space-ground integrated system

## 0 引言

近年来,全球卫星发射数量陡增,特别是非静止卫星轨道(Non-Geostationary Satellite Orbit, NGSO)的大规模星座系统发展迅猛。据国际电联无线电通信组(The International Telecommunication Union Radiocommunication Sector, ITU-R)的统计数据显示,2022年以来ITU-R每年受理的卫星申报数量已超过两千颗,包括Starlink、OneWeb、Telesat在内的大规模星座系统占有了其中的大部分份额。截至2025年4月,仅Starlink一个星座的在轨服役卫星就超过了7600颗。多卫星系统间的频率共存成为了迫切需要解决的问题之一。

按照地面站与卫星的上下行通信链路方向,星-地之间的干扰可以分为同向链路干扰和反向链路干扰。同向链路干扰指两个卫星系统的上行链路之间或两个卫星系统的下行链路之间产生的干扰;反向链路干扰指一个卫星系统的上行链路对另一个卫星系统的下行链路或分别反向传输而产生的干扰。

通信星座系统间同向链路的干扰评估是卫星通信领域的研究热点。主要通过比较两个卫星系统在动态时空的一段时间内运行时干扰噪声比(I/N)超过阈值的累计时间占比。为了降低同向链路间的I/N,Zhang等<sup>[1]</sup>提出基于最优空间隔离角的NGSO系统上行链路干扰抑制方法,通过遗传算法进行非线性规划,确定低轨卫星的最佳空间隔离角,降低NGSO系统同向链路间有害的干扰时间的累计概率;Yin等<sup>[2]</sup>考虑链路距离和链路之间的角度的联合影响,提出了NGSO卫星波束控制的优化方法,减少地面站受到其它NGSO卫星的干扰;Jalali等<sup>[3]</sup>提出了地面站的功率和低轨卫星波束斜率的联合控制方案,分别减少地面站对地球同步轨道(Geostationary Satellite Orbit, GSO)卫星的干扰以及NGSO卫星对GSO卫星地面站的干扰。

随着大规模星座系统地面用户特别是手机直连卫星用户的增多,终端用户的上行通信链路对其他同频、邻频卫星系统的下行通信链路产生反向干扰的概率增加,属于空间无线电业务和地面无线电业务的交叉应用领域,国际上缺少完善的计算模型。为了定量地计算和评估不同系统间的反向通信链路干扰,本文对ITU-R P.452与P.2001无线电传播模型的物理参数及计算方法进行研究,提出一种采用ITU-R P.452传播模型融合航天飞机雷达地形测绘任务3(Shuttle Radar Topography Mission 3, SRTM3)数字高程数据的星-地反向通信链路频率干扰评估方法,并通过在全球五个典型地区的比对实验,遴选出不同场景下适用的无线电传播模型。

1 典型卫星系统星-地链路频率重叠情况

通过对 ITU-R 登记的频率数据和相关公开资料的统计分析，典型 GSO 卫星系统与 NGSO 大规模星座系统反向通信链路的频率重叠情况如表 1-1 所示<sup>[4]</sup>。

表 1-1 典型卫星（星座）系统 10~30GHz 反向链路重叠频段  
Tabel 1-1 Typical satellite (constellation) systems 10~30GHz overlapping frequency bands of reverse communication link

| 卫星（星座）名称    | GSO/NGSO | 上行通信链路/<br>（GHz） | 下行通信链路/<br>（GHz） | 频率重叠带宽/<br>（GHz） |
|-------------|----------|------------------|------------------|------------------|
| STARLINK    | NGSO     | 14.0-14.5        | 10.7-12.7        | 3.6              |
|             |          |                  | 12.75-13.25      |                  |
|             |          |                  | 17.8-18.6        |                  |
|             |          |                  | 18.8-19.3        |                  |
|             |          |                  | 27.5-29.1        |                  |
| ASIASAT     | GSO      | 15.112-15.336    | 19.7-20.2        | 0.5              |
|             |          |                  | 14.0-14.5        |                  |
| VSSRD       | GSO      | 15.112-15.336    |                  | 0.05             |
| LOBSTER EYE | NGSO     |                  | 15.3-15.35       | 0.05             |
| SAILSPACE   | NGSO     | 18.1-18.6        |                  | 0.5              |
| CSN         | NGSO     | 18.8-20.2        |                  | 1                |
| MEASAT      | GSO      | 22.55-23.55      |                  | 0.01             |
| CTDRS       | GSO      |                  | 22.995-23.005    | 0.01             |
| SKYWALKER-A | NGSO     |                  | 27.5-30.0        | 1.6              |

统计数据可见，部分卫星系统和星座系统之间存在多个频段的频率重叠。以 Starlink 星座系统为例，在 10~30GHz 的频段内，其上行频率与亚洲卫星公司（AisaSat）的 GSO 卫星<sup>[5]</sup>使用的 14.0~14.5GHz 下行频率、北京和德宇航公司“天行者”（Skywalker）星座<sup>[6]</sup>使用的 27.5~30GHz 下行频率等存在频率重叠，其下行频率与千帆（SailSpace）星座<sup>[7]</sup>使用的 18.1~18.6GHz 上行频率存在重叠，重叠情况如图 1-1 所示。

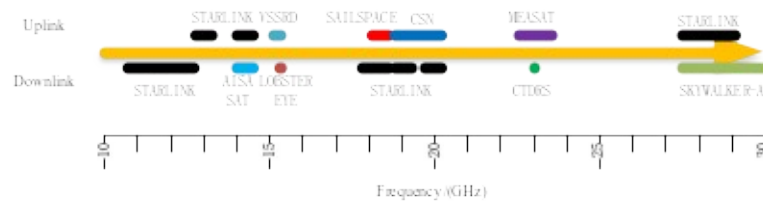


图 1-1 典型卫星（星座）系统反向链路重叠频段示意图

Fig. 1-1 Typical satellite (constellation) system 10-30GHz overlapping frequency bands of reverse communication link

## 2 典型电波传播模型及适用场景

反向链路干扰场景包含地面段和空间段，属于地面业务和空间业务的交叉部分，如图 2-1 所示。图中深色的三角形为正常通信链路，红色的三角形为反向链路干扰。两个星地通信系统在不同上下行方向同时运行时可能导致地面干扰。



图 2-1 反向链路干扰场景示意图

Fig.2-1 Schematic diagram of interference scenario on reverse communication link

根据目前国际上相关领域的研究情况，适用于空间段的电波传播模型主要有 ITU-R P.618<sup>[8]</sup>模型、Dissanayake-Allnutt-Haidara(DAH)<sup>[9]</sup>模型、Crane-Global<sup>[10]</sup>模型等；适用于地面段的传播模型主要有 Okumura-Hata<sup>[11]</sup>模型、Stanford University Interim(SUI)<sup>[12]</sup>模型、COST 231-Hata<sup>[13]</sup>模型、ITU-R P.452<sup>[14]</sup>模型、ITU-R P.2001<sup>[15]</sup>模型、Longley-Rice<sup>[16]</sup>模型等。

在星地通信系统重，地面站发射天线的主瓣指向卫星时，天线的旁瓣会不可避免地将信号逸散至其它地面接收天线从而造成反向链路干扰。随着通信需求的增加及频率资源分配的紧张，上下行链路的用频重叠情况增多，在设置新的星地通信链路时不能不考虑来自地面的反向链路干扰。反向链路干扰的大小取决于收发天线所处的地表环境，故选用地面段的电波传播模型来计算。

根据第一节对 NGSO 通信星座重叠频段的分析，适用于该频段范围的反向链路干扰评估的模型包括 ITU-R P.452 模型、ITU-R P.2001 模型、Longley-Rice 模型等。其中，Longley-Rice 模型最终给出的是传播损耗中值，不能直接用于短时间干扰的分析。因此，本文将重点对 ITU-R P.452 模型及 ITU-R P.2001 模型进行参数分析和仿真计算，并对计算结果与国际实测数据进行对比和总结归纳，遴选出不同场景下适用的反向链路干扰评估模型。

## 2.1 ITU-R P.452 无线电传播模型

ITU-R P.452 模型通过计算电台之间的路径传播损耗来评估电台之间的干扰。该模型考虑了四种基本类型的传播机制——视距、衍射（即绕射）、对流层散射、异常传播（大气波导和层反射/折射），计算结果与天线的方向性无关。ITU-R P.452 模型定义的长期干扰传播机制和异常（短期）干扰传播机制如图 2-2<sup>[14]</sup>所示。

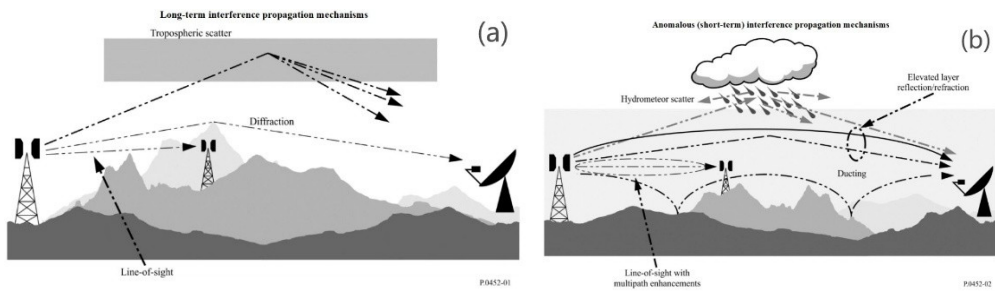


图 2-2 ITU-R P.452 模型传播机制示意图

Fig 2-2 Schematic diagram of ITU-R P.452 propagation mechanisms

ITU-R P.452 模型重视时间百分比  $p\%$ ，适用于计算  $0.001\% < p\% < 50\%$  范围的传播损耗， $p\%=50\%$  即对应传播损耗的中位数。在计算衍射损耗时不同的  $p\%$  值将适用不同的应用场景，因此模型的传播损耗并不一定在  $p\%=50\%$  时取得最大值<sup>[14]</sup>。

表 2-1 ITU-R P.452 模型计算方法

Tabel 2-1 Computational method of ITU-R P.452

| 传播损耗机制  | 计算公式（dB）                                                               | 说明                          |
|---------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| 视距传播    | $L_{bfsq} = 92.4 + 20 \log_{10} f + 20 \log_{10} d_{fs} + A_g(d_{fs})$ | $f$ : 频率（GHz）               |
|         |                                                                        | $d_{fs}$ : 发射天线到接收天线的距离（km） |
|         |                                                                        | $d$ : 大圆路径距离（km）            |
|         |                                                                        | $h_{ts}$ : 海平面之上的发射天线高度（m）  |
|         |                                                                        | $h_{rs}$ : 海平面之上的接收天线高度（m）  |
| 对流层散射传播 | $L_{bs} = 190 + L_f + 20 \log_{10} d + 0.573\theta - 0.15 N_1$         | $A_g$ : 总的气体吸收（dB）          |
|         |                                                                        | $d$ : 大圆路径距离（km）            |
|         |                                                                        | $\theta$ : 路径角向距离（mrad）     |

$N_0$ : 路径中心海平面的表面折射率

$L_f$ : 与频率有关的损耗

$L_c$ : 天线与媒质间的耦合损耗

异常传播损耗

$$L_{ba}=A_f+A_d(p)+A_g$$

$A_f$ : 大气内在天线和异常传播结构之间的固定耦合损耗的综合

ITU-R P.452 模型采用基于 Bullington 构建和球形地球衍射方法的组合计算衍射损耗  $L_{bd}$ , 基本传输损耗  $L_b$  由  $L_{bd}$ 、 $L_{ba}$ 、 $L_{bs}$  加权计算得到。在大多数情况下,  $L_b$  近似等于  $L_{bd}$ 、 $L_{ba}$ 、 $L_{bs}$  三者中最小值。这一计算衍射损耗的方法给出了所有类似路径的衍射损耗估计值, 包括海上、内陆、沿海陆地, 光滑地面和粗糙地面, 视距和超视距等场景, 在 ITU-R P.526 建议书<sup>[17]</sup>中有详细描述, 本文不再赘述。

2.2 ITU-R P.2001 无线电传播模型

ITU-R P.2001 模型是 30MHz 至 50GHz 频率范围广泛通用的地面传播模型, 特点之一是文本编写逻辑和实现代码编写逻辑相符, 容易转化为代码。ITU-R P.2001 模型包括四个独立的子模型: 近地球表面的普通传播(视距及衍射)子模型; 不规则传播(大气波导/层反射)子模型; 对流层散射子模型; 散射-E 子模型。除了这四个子模型, 还有多个相关损耗参量需要考虑, 实际应用中是根据场景由多个模型相互结合, 从而得到传播路径上的总损耗。

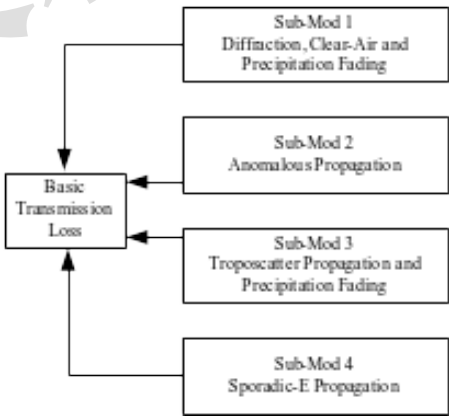


图 2-3 ITU-R P.2001 模型示意图

Fig 2-3 Schematic diagram of ITU-R P.2001 model

表 2-2 ITU-R P.2001 模型计算方法

Tabel 2-2 Computational method of ITU-R P.2001

| 子模型 | 计算公式 (dB) | 说明 |
|-----|-----------|----|
|-----|-----------|----|

近地球表面的普通传播  
(视距及衍射传播)

$$L_{bm1} = L_{bfs} + L_d + A_1 + F_{wvr} (A_{wrsur} - A_{wsur}) + A_{gsur}$$

$L_{bfs}$ : 自由空间基本传输损耗

$L_d$ : 不超出 p% 时间的衍射损耗

$A_1$ : 结合晴空和雨/湿雪的衰减

$F_{wvr}$ : 水蒸气衰减

$A_{wrsur}$ : 无雨条件下由水蒸气造成的气态衰减

$A_{wsur}$ : 有雨条件下由水蒸气造成的气态衰减

$A_{gsur}$ : 无雨条件下总气态衰减

不规则传播 (大气波导/层反射传播)

$$L_{bm2} = L_{ba} + A_{gsur}$$

$A_{gsur}$ : 无雨条件下总气态衰减

$L_{ba}$ : 不规则传播的基本传输损耗

对流层散射传播

$$L_{bm3} = L_{bs} + A_2 + 0.5 (F_{wvrtx} + F_{wvrrx}) (A_{wrs} - A_{ws}) + A_{gs}$$

$L_{bs}$ : 对流层散射基本传输损耗

$A_2$ : 超过 q% 时间 (q=100-p) 的对流层散射路径衰减

$F_{wvrtx}$ : 发射机至散射点路径段有雨条件下的水蒸气衰减

$F_{wvrrx}$ : 散射点至接收机路径段有雨条件下的水蒸气衰减

$A_{wrs}$ : 无雨条件下的水蒸气造成的气态衰

散射-E（电离层散射传播）

$$L_{be} = \begin{cases} L_{bEs1}, L_{bEs1} < L_{bEs2} - 20 \\ L_{bEs2}, L_{bEs2} < L_{bEs1} - 20 \\ -10 \log_{10} (10^{-0.1 L_{bEs1}} + 10^{-0.1 L_{bEs2}}), \text{其他情况} \end{cases}$$

减

$A_{ws}$ : 有雨条件下的水蒸气造成的气态衰减

$A_{os}$ : 氧气造成的气态衰减

$A_{gs}$ : 无雨条件下的总气态衰减

$L_{bEs1}$ : 电离层一跳传输损耗

$L_{bEs2}$ : 电离层两跳传输损耗

对子模型 1 和子模型 2 结合后的基本传输损耗为:

$$L_{bm12} = L_m - 10 \log_{10} [10^{-0.1(L_{bm1} - L_m)} + 10^{-0.1(L_{bm2} - L_m)}] \text{ dB} \quad \text{式 (1)}$$

其中:

$$L_m = \min(L_{bm1}, L_{bm2}) \quad \text{式 (2)}$$

进一步运算, 得到 ITU-R P.2001 传播损耗的预测模型:

$$L_b = L_m - 5 \log_{10} [10^{-0.2(L_{bm12} - L_m)} + 10^{-0.2(L_{bm3} - L_m)} + 10^{-0.2(L_{bm4} - L_m)}] \text{ dB} \quad \text{式 (3)}$$

其中:

$$L_m = \min(L_{bm12}, L_{bm3}, L_{bm4}) \quad \text{式 (4)}$$

## 2.3 两个模型对比

ITU-R P.452 模型、ITU-R P.2001 模型均可以用于计算点对点的地面传播损耗。两个模型都包含了视距传播、绕射传播、大气波导传播以及对流层散射传播的损耗计算方法。

ITU-R P.452 模型的特点是包含了水凝物散射干扰预测模型，可以计算出波长小于水凝物尺寸的干扰信号（约 5GHz 以上）的强度。ITU-R P.2001 模型除了考虑了降雨的影响，应用过程中更易于模块化编程。

### 3 ITU-R P. 452 融合 SRTM3 的计算方法

#### 3.1 融合计算方法

ITU-R P.452 模型需要利用传播路径上的剖面点海拔高度进行视距及衍射这两种传播方式的判断，若为衍射传播还需要使用剖面点海拔高度进行衍射角度的计算，对传播损耗的影响将在下文 3.2.3 实验三中验证。模型计算所需的剖面点海拔高度可以从 SRTM3<sup>[18]</sup>中得到，SRTM3 是美国国家航空与航天局和美国国家地理空间情报局通过雷达干涉测量生成的近全球陆地高程数据产品，其分辨率有 30m 和 90m 两种。在十公里级别的传播路径中可以使用 90m 级分辨率的 SRTM3 数据。

ITU-R P.452 模型对剖面点的选取没有特别规定，在实验过程中以反应地形情况为目的，实际测量场景则可根据具体的应用需求选择剖分的颗粒度。对于十公里级别的距离尺度，可认为传播路径上等间隔的经纬度对应于等间隔的实际距离。为简化计算，本文在传播路径上等经纬度地选取剖面点。

在传播路径的地形构建中，所采用的剖面点的经纬度往往与 SRTM3 的数据点的经纬度不完全重合，若直接采用距离最近的数据点代表剖面点进行插值则可能导致传播路径地形失真。对于二维网格数据，除了最邻近插值法以外，还有双线性插值、三次样条插值、最小曲率法、克里金插值等方法。本文使用的地图数据的分辨率为 90m，相邻数据点的大小变化不会过大，不需要特意选用较为复杂的光滑的插值方法。因此，本文采用对数据点相邻的四个数据进行双线性插值的方法计算剖面点的海拔高程数据。

如图 3-1 所示，第  $i$  个剖面点的高程数据在式（5）中由四个 SRTM3 数据  $H(x_1, y_1)$ 、 $H(x_2, y_1)$ 、 $H(x_1, y_2)$ 、 $H(x_2, y_2)$  及该剖面点的经纬度确定。

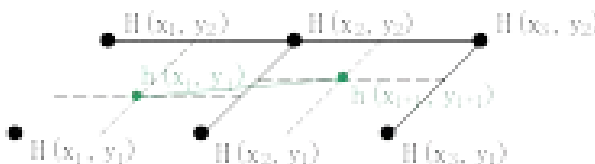


图 3-1 双线性插值计算剖面点高程数据

Fig 3-1 Calculating elevation of profile points using bilinear interpolation

$$h(x_i,y_i)=H(x_1,y_1)(x_2-x_i)(y_2-y_i)+H(x_2,y_1)(x_i-x_1)(y_2-y_i)+H(x_1,y_2)(x_2-x_i)(y_i-y_1)+H(x_2,y_2)(x_i-x_1)(y_i-y_1)$$

式（5）

依照上述方法，依次计算传播路径中每一个剖面点的海拔高度，得到整个传播路径的地形。在十公里左右的传播距离和 90m 的分辨率下，设置数十个或更多的剖面点足以反应传播路径的地形情况。本文中的所有实验场景均取 40 个剖面点。若地形较为复杂，可通过减小剖面点颗粒度的方法实现精细化计算。

在得到传播路径上的剖面点海拔高度后，将剖面点距离和海拔高度数据导入 ITU-R P.452 模型，即得到传播路径损耗。将同样的剖面点海拔高度输入 ITU-R P.2001 模型，得到对应的传播路径损耗。ITU-R P.2001 模型要求剖面点必须是等间隔的。

3.2 实验数据对比

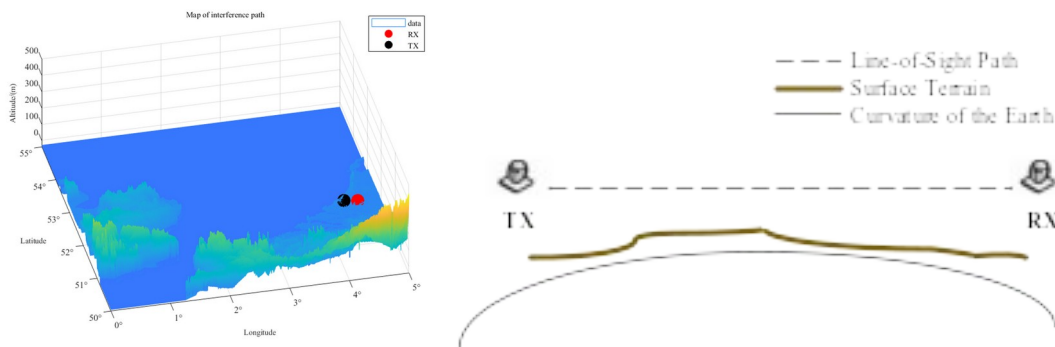
为了对比 ITU-R P.452 模型和 ITU-R P.2001 模型在反向链路干扰评估场景下的适应性，分别采用两种模型融合 SRTM3 数字高程数据，对全球典型地区的传播损耗预测值进行了仿真，并与实际测量值进行对比分析。其中，实际测量值由 ITU-R 无线电波传播研究组的数据库<sup>[19]</sup>中取得。从数据库中随机选取了不同地理位置的五组数据，为了区分，分别命名为 NL 组、DE 组、AU 组、GB 组、JP 组，时间百分百选用 p=1（%）和 p=0.1（%）。

3.2.1 实验一 NL 组

NL 组传播路径位于荷兰滨海 Boskoop 至 Leidshendam 之间的平原地区，地势平坦。路径长度为 15.85 km，频率选用 Starlink 星座与 CSN 星座的重叠频段，频点选用 19.76 GHz。经对比分析，仿真结果与实测值差距小于 10dB，ITU-R P.452 模型和 ITU-R P.2001 模型均将该场景判断为视距传播。

表 3-1 Boskoop 至 Leidshendam 路径传播损耗实验数据  
Table 3-1 Statistics of path propagation loss on the Boskoop to Leidshendam

| 数据来源                | 损耗值（dB） |           |
|---------------------|---------|-----------|
|                     | （p%=1%） | （p%=0.1%） |
| ITU-R P.452 模型仿真数据  | 139.00  | 136.90    |
| ITU-R P.2001 模型仿真数据 | 139.47  | 136.16    |
| ITU-R 无线电波传播研究组实测数据 | 135.2   | 127.8     |



(a) Boskoop(TX)至 Leidshendam(RX)地形图 (b) 传播路径示意图

图 3-2 NL 组 荷兰滨海区域

Fig. 3-2 NL: A set of data in the Netherlands

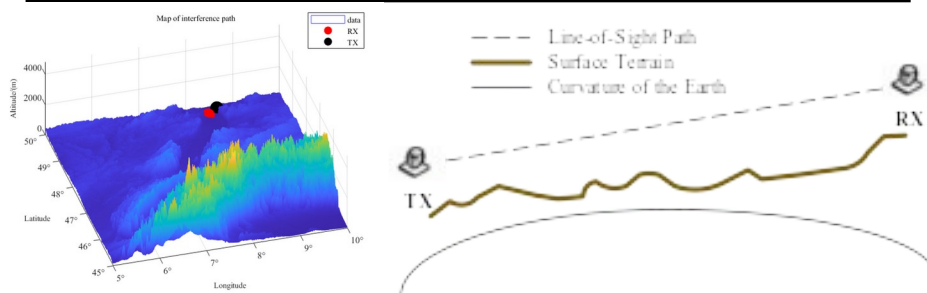
### 3.2.2 实验二 DE 组

DE 组传播路径位于德国 Nordheim 至 Darmstadt 之间的莱茵河谷，整体地势较平缓，收发站之间海拔落差约为 45 米。该路径长度 26 km，频点选用 29.6 GHz。

表 3-2 Nordheim 至 Darmstadt 路径传播损耗实验数据

Table 3-2 Statistics of path propagation loss on the Nordheim to Darmstadt

| 数据来源                | 损耗值 (dB) | 损耗值 (dB)  |
|---------------------|----------|-----------|
|                     | (P%=1%)  | (P%=0.1%) |
| ITU-R P.452 模型仿真数据  | 181.91   | 179.49    |
| ITU-R P.2001 模型仿真数据 | 149.54   | 146.57    |
| ITU-R 无线电波传播研究组实测数据 | 136.1    | 129.5     |



(a)Nordheim (TX)至 Darmstadt(RX)地形图 (b)传播路径示意图

图 3-3 DE 组 德国莱茵区域

Fig. 3-3 DE: A set of data in the Deutschland

本组实验中，采用 ITU-R P.452 模型的仿真数据与 ITU-R 实测值产生了约 46dB（p%=1%）的损耗差距，远大于采用 ITU-R P.2001 模型的约 13dB 的损耗差距。这一差异来源于 P.452 模型计算了约 34dB 的衍射损耗。ITU-R P.452 模型与 ITU-R P.2001 模型在计算衍射损耗时所采用的发射机至剖面点的斜率  $S_{tim}$  略有不同，而  $S_{tim}$  决定了两个模型是否需要考虑衍射损耗。

$$S_{tim} = \begin{cases} \max \left( \frac{h_i + 500 C_e d_i (d - d_i) - h_{ts}}{d_i} \right) m/km (P.2001) \\ \max \left( \frac{g_i + 500 C_e d_i (d - d_i) - h_{ts}}{d_i} \right) m/km (P.452) \end{cases} \quad (式 6)$$

其中：

$$g_i = \begin{cases} h_i + \text{第 } i \text{ 个剖面点的代表性地物高度 (m)}, i=1, \dots, n-1 \\ h_0, i=0 \\ h_n, i=n \end{cases} \quad (式 7)$$

另一方面，该路径本身存在一定起伏，处于视距与超视距路径的临界状态。由于增加了代表性地物高度，抬高了剖面点的高度，ITU-R P.452 模型判断视距已被遮挡，因此需要计算衍射损耗。若人为地去除衍射损耗，则 ITU-R P.452 模型与 ITU-R P.2001 模型所计算得结果基本一致。

### 3.2.3 实验三 AU 组

AU 组传播路径位于奥地利 Michelbachberg 至 Lustbuehel 之间的山区，整体地形起伏较大。路径长度 9.09 km，频点选用 11.8 GHz。

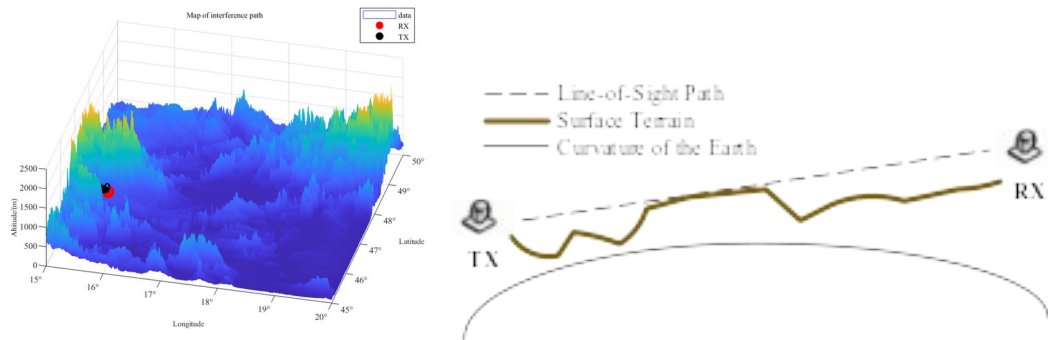
表 3-3 Michelbachberg 至 Lustbuehel 路径传播损耗实验数据

Table 3-3 Statistics of path propagation loss on the Michelbachberg to Lustbuehel

| 数据来源               | 损耗值 (dB) |           |
|--------------------|----------|-----------|
|                    | (P%=1%)  | (P%=0.1%) |
| ITU-R P.452 模型仿真数据 | 169.10   | 167.38    |

ITU-R P.2001 模型仿真数据164.37162.14

ITU-R 无线电波传播研究组实测数据125.9116.8



(a)Michelbachberg (TX)至 Lustbuehel(RX)地形图 (b)传播路径示意图

图 3-4 AU 组 奥地利区域

Fig. 3-4 AU: A set of data in the Austria

该组仿真实验中，两个模型均判断视距路径被遮挡。在传播路径被遮挡的基础上，两个模型均在预测结果中加入了约 35dB 的衍射损耗，这是预测值与实测值差异的主要来源。计算发射机到剖面点的最大斜率 $S_{um}=12\text{ m/km}$ ，与视距斜率 $S_r=6\text{ m/km}$ 。这一微小的差异（约  $0.34^\circ$ ）并没有导致实际的传播路径在最大斜率剖面点发生衍射，而是发生了视距传播，从而导致了预测值与实测值在衍射部分的差异。

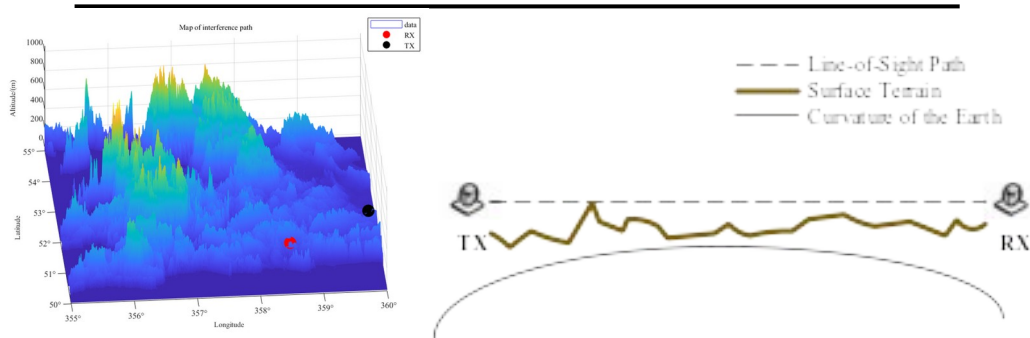
3.2.4 实验四 GB 组

GB 组传播路径位于英国东南部 Chilbolton 至 Baldock 之间，路径长度 131 km，频点选用 11.2 GHz。路径中存在一个与例 3 相近的临界遮挡情况。

表 3-4 Chilbolton 至 Baldock 路径传播损耗实验数据

Table 3-4 Statistics of path propagation loss on the Chilbolton to Baldock

| 数据来源                | 损耗值（dB） | 损耗值（dB）   |
|---------------------|---------|-----------|
|                     | （P%=1%） | （P%=0.1%） |
| ITU-R P.452 模型仿真数据  | 219.49  | 210.36    |
| ITU-R P.2001 模型仿真数据 | 221.73  | 207.28    |
| ITU-R 无线电波传播研究组实测数据 | 147.9   | 139.2     |



(a)Chilbolton (TX)至 Baldock (RX)地形图 (b)传播路径示意图

图 3-5 GB 组 英国东南部区域

Fig.3-5 GB: A set of data in Great Britain

由于例 4 的传播路径相较前例更长，实际的坡度变化会比示意图中显示的更平缓。发射机至剖面点的最大斜率  $S_{tm}=10\text{ m/km}$ ，视距斜率  $S_{tr}=0\text{ m/km}$ ，同样相差很小（约  $0.63^\circ$ ）。例 4 中，ITU-R P.452 和 ITU-R P.2001 模型同样是因为对视距传播的严格判定而增加了对传播损耗的预测。两个模型均给出约 77dB 的衍射损耗。

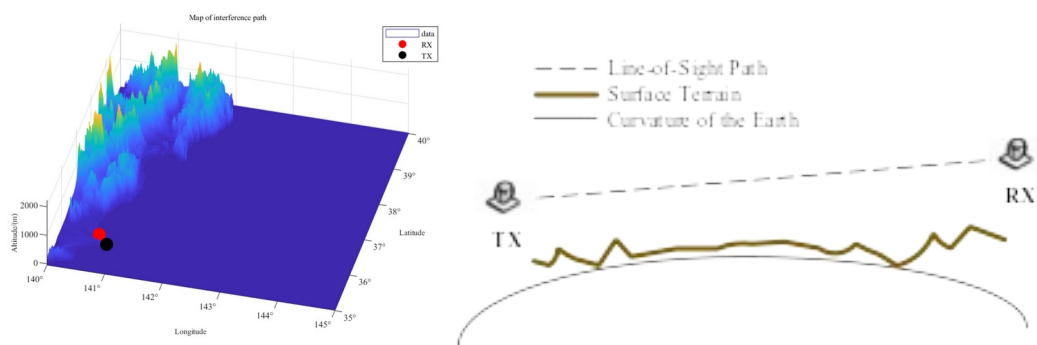
### 3.2.5 实验五 JP 组

JP 组传播路径位于日本 Kashima 至 Inubo 之间，路径长度 32.7 km，频点选用 14.3 GHz。

表 3-5 Kashima 至 Inubo 路径传播损耗实验数据

Table 3-5 Statistics of path propagation loss on the Kashima to Inubo

| 数据来源                | 损耗值（dB） |           |
|---------------------|---------|-----------|
|                     | （P%=1%） | （P%=0.1%） |
| ITU-R P.452 模型仿真数据  | 142.6   | 140.48    |
| ITU-R P.2001 模型仿真数据 | 141.5   | 138.10    |
| ITU-R 无线电波传播研究组实测数据 | 140     | 134       |



(a)Kashima (TX)至 Inubo (RX)地形图 (b)传播路径示意图

图 3-6 JP 组 日本西南区域

Fig. 3-6 JP: A set of data in Japan

该传播路径位于日本的临海平坦地区，路径的平均海拔高度为 8.9 米，仿真实验使用的收发天线高度分别为 70m、43m，ITU-R P.452 模型与 ITU-R P.2001 模型均判断传播方式为视距传播，与实测结果接近。

根据两种模型对是否符合视距传播条件的判断，可将以上五组的实验数据分为三个类别。

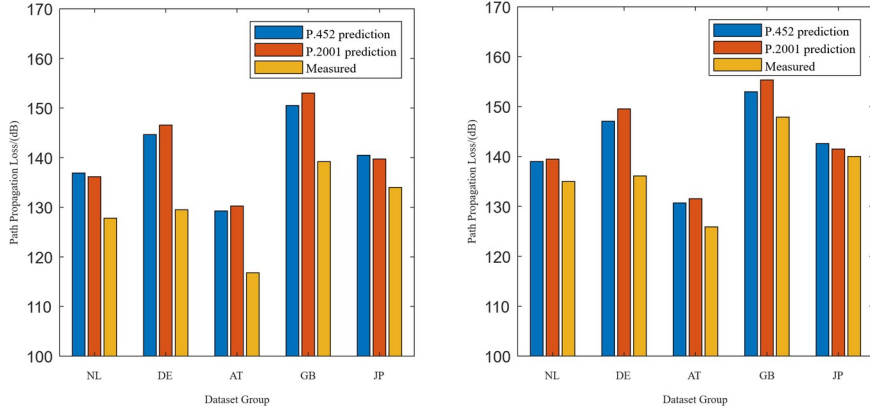
表 3-6 模型预测结果对照表

Table 3-6 Comparison of models prediction results

| 数据来源                | NL 组 | DE 组  | AU 组  | GB 组  | JP 组 |
|---------------------|------|-------|-------|-------|------|
| ITU-R P.452 模型预测结果  | 视距传播 | 非视距传播 | 非视距传播 | 非视距传播 | 视距传播 |
| ITU-R P.2001 模型预测结果 | 视距传播 | 视距传播  | 非视距传播 | 非视距传播 | 视距传播 |

### 3.3 实验结果分析

本次模型对比的参数范围主要在 10 至 30GHz 频段，10 至 30km 距离范围内。在这一范围内，容易出现临界的视距传播情况，即传播路径上的剖面点与发射机的最大斜率略微大于发射机与接收机的路径斜率，二者相差不到 1°。这种情况下，可能仍然会发生视距传播，不需要考虑衍射损耗，但 ITU-R P.452 模型与 ITU-R P.2001 模型则会直接判断干扰信号会以衍射传播的方式传播到受扰天线，从而忽视潜在的干扰源，导致模型判断的不受扰区域过大。



(a) p%=1%时的对比结果

(b) p%=0.1%时的对比结果

图 3-7 模型预测值与实测值对比

Fig. 3-7 Model-predicted values vs. measured values

如果忽略这种情况下的衍射损耗，对比两个模型所预测的数据和实测的数据，采用 ITU-R P.452 模型的仿真数据与实测值的差值的均方根为 2.77 (p%=1%) 和 24.37 (p%=0.1%)，采用 ITU-R P.2001 模型的仿真数据与实测值的差值的均方根为 3.41 (p%=1%) 和 26.13 (p%=0.1%)。在数值上，ITU-R P.452 模型的预测结果更贴合实测数据，但 ITU-R P.452 模型由于其计算  $S_{tim}$  的公式与 ITU-R P.2001 模型不同，所以更容易判断传播路径为非视距，从而在计算中引入衍射损耗。当 p%=0.1% 时，两种模型的仿真数据与实测数据偏差较大。

天线高度同样是影响预测效果的重要条件。对于理想的光滑地球表面，2m 高度的天线约可以覆盖 5km 视距范围，5m 高的天线约可以覆盖 8km 视距范围，10m 高的天线约可以覆盖 11km 视距范围。在对应距离内，地形是模型判断视距传播的敏感因素。

## 4 结论

本文针对不同卫星（星座）系统上行通信链路与下行通信链路反向链路的干扰分析场景，研究国际上常用的无线电传播模型与 SRTM3 数字高程数据的融合方法，并对 ITU-R P.452 与 ITU-R P.2001 模型对全球五个典型地区的传播路径损耗进行预测计算，通过与 ITU-R 无线电波传播研究组的实际测量数据进行对比分析，遴选反向链路干扰评估场景下适用的传播模型。

实验数据表明，在忽略视距传播临界条件时产生的衍射损耗的情况下，ITU-R P.452 模型对视距传播损耗的预测精度略优于 ITU-R P.2001 模型，两者都很接近实测值，均可以用于计算反向链路干扰。在预测精度要求较高的场景下，宜采用 ITU-R P.452 模型进行反向链路干扰计算评估。在路径剖面点最高斜率  $S_{tim}$  与视距斜率  $S_v$  相差小于  $1^\circ$  的情况下，则可以考虑在计算路径损耗时忽略衍射损耗。实验发现，天线高度对是否满足视距传播条件的判断也有较大的影响。研究成果可以为卫星通信系统间星-地反向通信链路干扰的量化计算评估与在轨干扰排查提供参考。

## <sup>1</sup>参考文献

- [1] ZHANG Y Q, WU D, HU T. Uplink interference mitigation technology for NGSO constellation systems based on optimal spatial isolation angle[C]//2022 2nd International Conference on Computer Science, Electronic Information Engineering and Intelligent Control Technology (CEI). Nanjing, China: IEEE, 2022: 219-223. DOI: 10.1109/CEI57409.2022.9950072
- [2] YIN L, YANG R N, YANG Y Z, *et al.* Beam pointing optimization based downlink interference mitigation technique between NGSO satellite systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, **10**(11): 2388-2392. DOI: 10.1109/LWC.2021.3101246
- [3] JALALI M, ORTIZ F, LAGUNAS E, *et al.* Joint power and tilt control in satellite constellation for NGSO-GSO interference mitigation[J]. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 2023, **4**: 545-557. DOI: 10.1109/OJVT.2023.3302511
- [4] International Telecommunication Union. BR Space Information System[DB/OL]. (2015-07-16)[2025-04-09]. <https://www.itu.int/itu-r/space/apps/public/spaceexplorer/networks-explorer>
- [5] International Telecommunication Union. BR Space Information System: ASIASEAT-CKW[DB/OL]. (2024-08-20)[2025-04-09]. <https://www.itu.int/itu-r/space/apps/public/spaceexplorer/networks-explorer/space-stations/dashboard/non-plans/APSTAR-H1/122520097>
- [6] International Telecommunication Union. BR Space Information System: SKYWALKER-A[DB/OL]. (2024-10-15)[2025-04-09]. <https://www.itu.int/itu-r/space/apps/public/spaceexplorer/networks-explorer/space-stations/dashboard/non-plans/SKYWALKER-A/120545324>
- [7] International Telecommunication Union. BR Space Information System: SAILSPACE-2-M[DB/OL]. (2024-12-10)[2025-04-09]. <https://www.itu.int/itu-r/space/apps/public/spaceexplorer/networks-explorer/space-stations/dashboard/non-plans/SAILSPACE-2-M/123545250>
- [8] International Telecommunication Union. Recommendation ITU-R P.618-14 Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Earth-Space Telecommunications Systems[S/OL]. Geneva: ITU, (2024-06-21) [2025-04-09]. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.618-14-202308-I/en>
- [9] DISSANAYAKE A, ALLNUTT J, HAIDARA F. A prediction model that combines rain attenuation and other propagation impairments along earth-satellite paths[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1997, **45**(10): 1546-1558
- [10] SUN C, CHENG J, OHIRA T. Handbook on Advancements in Smart Antenna Technologies for Wireless Networks[M]. Hershey: IGI Global, 2009
- [11] HATA M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1980, **29**(3): 317-325. DOI: 10.1109/T-VT.1980.23859
- [12] ERCEG V, GREENSTEIN L J, TJANDRA S Y, *et al.* An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1999, **17**(7): 1205-1211. DOI: 10.1109/49.778178
- [13] DROZDOVA V G, AKHPASHEV R V. Ordinary least squares in COST 231 Hata key parameters optimization based on experimental data[C]// Proceedings of the 2017 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). Novosibirsk, Russia: IEEE, 2017: 236-238
- [14] International Telecommunication Union. Recommendation ITU-R P.452-18 Prediction Procedure for the Evaluation of Interference Between Stations on the Surface of the Earth at Frequencies Above About 100MHz[R]. Geneva: ITU, 2023
- [15] International Telecommunication Union. Recommendation ITU-R P.2001-5 A General Purpose Wide-Range Terrestrial Propagation Model in the Frequency Range 30 MHz to 50 GHz[R]. Geneva: ITU, 2023
- [16] LONGLEY A G, RICE P L. Prediction of Tropospheric Radio Transmission Loss Over Irregular Terrain: A Computer Method-1968[R]. Washington: U.S. Government Printing Office, 1968
- [17] International Telecommunication Union. Recommendation ITU-R P.526-15 Propagation by Diffraction[R]. Geneva: ITU, 2019
- [18] U.S. Geological Survey. EarthExplorer[DB/OL]. (2000-02-22)[2025-04-09]. <https://earthexplorer.usgs.gov>
- [19] International Telecommunication Union. Study Group 3 Databanks: DBSG3[DB/OL]. (2017-08-31)[2025-04-09]. <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg3/Pages/dtbank-dbsg3.aspx>