

# 卫星通信地面照射范围特征研究

## Study on Characteristics of Satellite Illuminating Area on the Ground

刘吉凤,周 瑶,李福昌(中国联通研究院,北京 100048)

Liu Jifeng,Zhou Yao,Li Fuchang(China Unicom Research Institute,Beijing 100048,China)

### 摘 要:

为方便卫星业务与地面业务的共存研究,合理评估地面业务对卫星业务的集中干扰,同时,为卫星业务的地面部署提供参考。研究了一种量化卫星通信地面照射范围的方法,该方法对系统间共存研究和自系统网络部署同时适用,并通过仿真对比验证了该量化方法的性能。

### 关键词:

共存研究;卫星业务;地面业务;量化;照射  
doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2023.04.012  
文章编号:1007-3043(2023)04-0053-05  
中图分类号:TN929.5  
文献标识码:A  
开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

### Abstract:

To facilitate the coexistence of satellite service and terrestrial service, reasonably evaluate the integrated interference of terrestrial service on satellite service, or provide reference for the ground deployment of satellite service, a calculation method to quantify satellite illuminating area is studied, which is applicable to both inter-system coexistence and self-system network deployment. The performance of the quantization method is verified by simulation.

### Keywords:

Coexistence; Satellite service; Terrestrial service; Quantification; Illuminating

引用格式:刘吉凤,周瑶,李福昌. 卫星通信地面照射范围特征研究[J]. 邮电设计技术,2023(4):53-57.

## 1 概述

卫星通信中,地面照射范围即瞬间视场(IFOV),是衡量卫星波束覆盖范围的重要考量参数,同时,在卫星业务与地面业务共存研究中,卫星的瞬间视场将降低地面业务对基站数量的需求,因此,瞬间视场大小在空地共存研究中同样属于重要考量参数。

对于无线通信,由于天线提前设计,可认为卫星天线方向图已知;在国际、国内标准会议中瞬间视场一般定义为3 dB波束宽度在地面的投影,且普遍采用

椭圆进行简化抽象。通过蒙特卡罗仿真可以逼近瞬间视场,但是,由于蒙特卡罗仿真运算量大,时间开销太大,因此,在干扰共存和网络规划平台中一般采用估算方法。本文重点研究了瞬间视场的长半轴以及短半轴的估算方法,给出一种可以抽象椭圆的表征方法。

## 2 卫星通信及瞬间视场

### 2.1 卫星通信中关键参数

卫星通信业务是多种星载业务的总称,包括固定卫星业务、卫星地球探测业务(有源)、移动卫星业务等。卫星沿飞行方向前进,其天底指向地球的中心。

收稿日期:2023-02-22

天线主波束与地球表面法线之间形成一定入射角( $^{\circ}$ ), 同时, 与星下点形成一定偏星下角( $^{\circ}$ ), 具体参见图1。

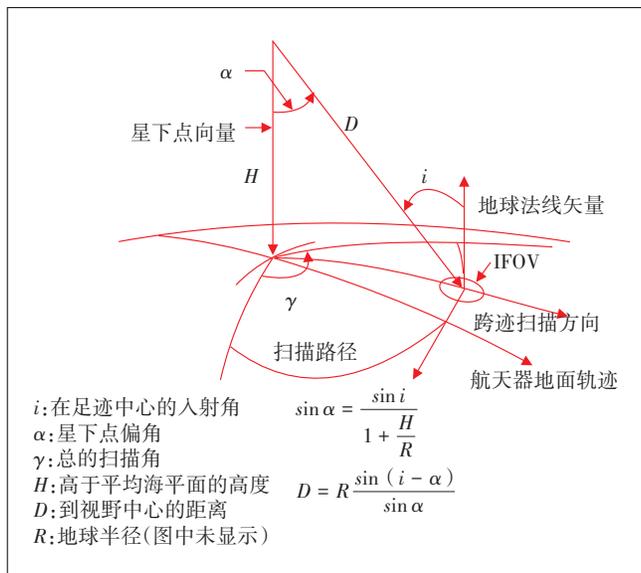


图1 锥形扫描散射仪典型的扫描配置

根据ITU-R RS.2105, 瞬间视场(IFOV)指的是飞行器实施测量的区域。通过了解卫星的高度, IFOV的大小可以在星下点的地球表面上计算得到, IFOV通常用 $\text{km} \times \text{km}$ 表示。

在扫描系统中, IFOV指的是扫描动作停止时飞行器对向的立体角。对圆锥扫描雷达, 通常可以计算2个值。

- a) 沿迹: 该平台动作的方向(沿在轨方向)。
- b) 跨迹: 正交于传感器平台动作的方向。

## 2.2 瞬间视场估算方法

图2所示为卫星主波束照射地面示意。瞬间视场是卫星主波束覆盖区域, 决定自身系统容量以及链路性能, 同时, 系统间共存研究中, 瞬间视场决定干扰系统或被干扰系统收发信机数量, 因此, 瞬间视场无论对卫星系统设计还是对干扰研究都至关重要。虽然业界一般通过椭圆法逼近真实瞬间视场, 但是, 目前并没有形成方法论, 下文分别从沿迹和跨迹2个维度给出半轴长度估算方法。

### 2.2.1 沿迹方向上半轴长估算

如图3所示, 卫星位置Sat, 星下点Nadir, 地心 $o$ , 主波束指向point, 其中, 偏星下角 $\alpha$ 、沿迹方向上波束宽度 $\gamma$ , 以及卫星高度alt均已知。则在通过直线Sat- $o$ 且垂直于平面Sat- $o$ -point的平面中, 与直线Sat-point形成 $\gamma/2$ 的直线Sat-width, 与地面相交于Width。此

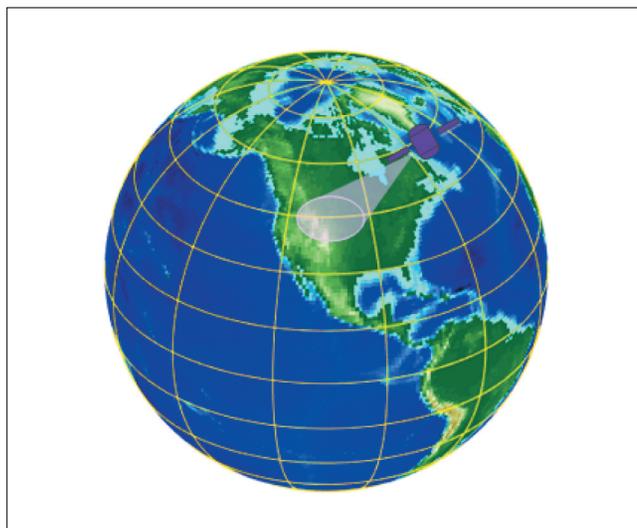


图2 卫星主波束照射地面示意图

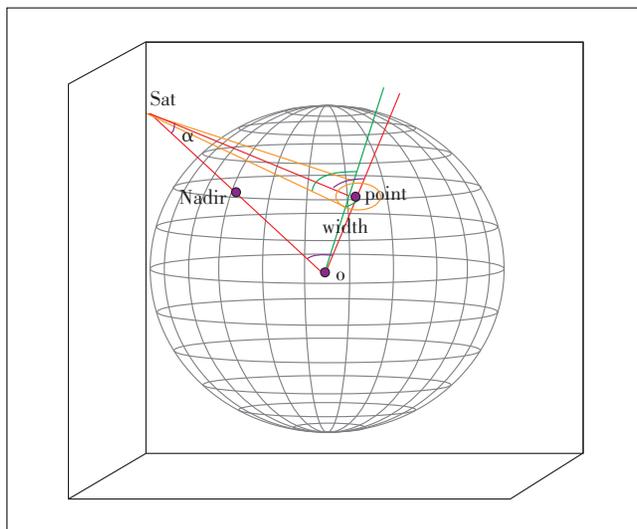


图3 主波束在沿迹方向示意图

时, Width与point间大圆弧长则为该方向的半轴长。为得到半轴长, 则需要获知Width与point间直线距离, 然后通过三角公式获知Width与point在地心夹角, 最后通过圆弧公式即可计算出2点间弧长距离。对于Width与point间直线距离的获取, 由于Width与point在卫星Sat的夹角 $\gamma/2$ 已知, 若获知Width与point分别与卫星Sat间距离, 则通过余弦定理也可计算得出。

具体的计算方法如下。

步骤1: 确定3 dB波束跟偏星下点的角度。

为了便于描述, 将垂直平面Sat- $o$ -point和Sat-width-point简化成垂直平面SOP和SWP。

如图4所示, 取SP为单位向量, OP和WP分别垂直于SP,  $\alpha$ 为OP与平面夹角, SW为平面内一直线,  $\gamma/2$

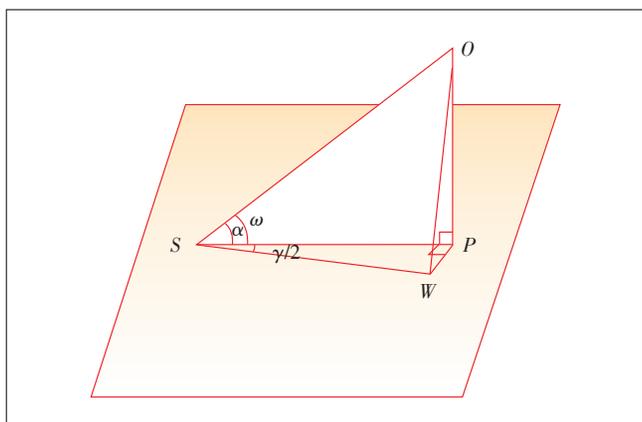


图4 沿迹方向三角图例

为SW与SP夹角,求OP与SW夹角 $\omega$ 。

在直角 $\triangle OSP$ 中, $\omega$ 以及 $|SP|=1$ 已知,则:

$$|OP| = \tan \alpha$$

$$|OS| = \frac{1}{\cos \alpha}$$

在直角 $\triangle WSP$ 中, $\gamma/2$ 以及 $|SP|=1$ 已知,则:

$$|WP| = \tan \frac{\gamma}{2}$$

$$|WS| = \frac{1}{\cos \frac{\gamma}{2}}$$

在直角 $\triangle WOP$ 中, $|OP|$ 以及 $|WP|$ 已知,则:

$$|OW| = \sqrt{|OP|^2 + |WP|^2} = \sqrt{(\tan \alpha)^2 + \left(\tan \frac{\gamma}{2}\right)^2}$$

在直角 $\triangle WOS$ 中, $|OS|$ 、 $|WS|$ 以及 $|OW|$ 已知,

则:

$$\cos(\omega) = \frac{|OS|^2 + |WS|^2 - |OW|^2}{2 \times |OS| \times |WS|} =$$

$$\frac{\left(\frac{1}{\cos \alpha}\right)^2 + \left(\frac{1}{\cos \frac{\gamma}{2}}\right)^2 - \left[(\tan \alpha)^2 + \left(\tan \frac{\gamma}{2}\right)^2\right]}{2 \times \frac{1}{\cos \alpha} \times \frac{1}{\cos \frac{\gamma}{2}}} =$$

$$\frac{1}{2} \times \left[ \frac{\cos \frac{\gamma}{2}}{\cos \alpha} + \frac{\cos \alpha}{\cos \frac{\gamma}{2}} - \frac{(\sin \alpha)^2 \cos \frac{\gamma}{2}}{\cos \alpha} - \frac{\left(\sin \frac{\gamma}{2}\right)^2 \cos \alpha}{\cos \frac{\gamma}{2}} \right]$$

步骤2:确定卫星分别到主波束指向以及3 dB波束指向的距离 $|SatPoint|$ 和 $|SatWidth|$ ,图5所示为沿迹剖面示意。

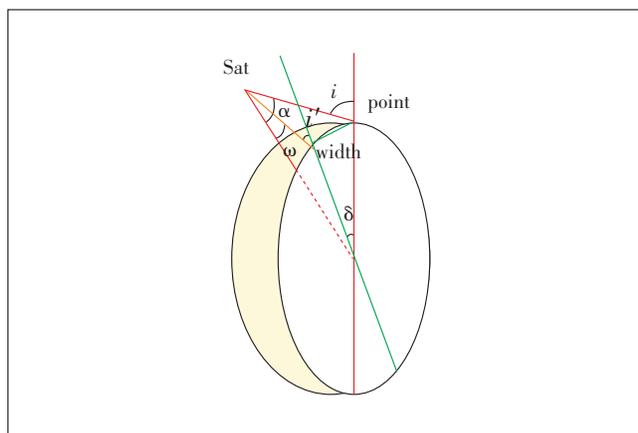


图5 沿迹剖面图

根据图1中的公式可知:

$$\sin i = \left(1 + \frac{\text{alt1}}{R}\right) \times \sin \alpha$$

$$|SatPoint| = R \times \frac{\sin(i - \alpha)}{\sin \alpha}$$

同理:

$$\sin i' = \left(1 + \frac{\text{alt1}}{R}\right) \times \sin \omega$$

$$|SatWidth| = R \times \frac{\sin(i' - \omega)}{\sin \omega}$$

步骤3:确定主波束指向到3 dB波束指向的直线距离 $|PointWidth|$ ,为了简化公式,令 $S_p = |SatPoint|$ , $S_w = |SatWidth|$ ,则

$$|PointWidth| = \sqrt{S_p^2 + S_w^2 - 2 \times S_p \times S_w \times \cos \frac{\gamma}{2}}$$

步骤4:确定主波束指向到3 dB波束指向的地心角度:

$$\cos \delta = \frac{2R^2 - |PointWidth|^2}{2R^2}$$

步骤5:确定主波束指向到3 dB波束指向的地面距离:

$$|PW| = R \times \delta$$

### 2.2.2 跨迹方向上半轴长估算

如图6所示,卫星位置Sat,星下点Nadir,地心o,主波束指向point,其中,偏星下角 $\alpha$ 、跨迹方向上波束宽度 $\gamma'$ ,卫星高度alt均已知。则在平面Sat-o-point中,与直线Sat-point形成 $\gamma'/2$ 的直线Sat-width,与地面相交于width。此时,Width与point间大圆弧长则为该方向的半轴长。为得到半轴长,则需要获知Width与point在地心夹角,然后通过圆弧公式即可计算出2

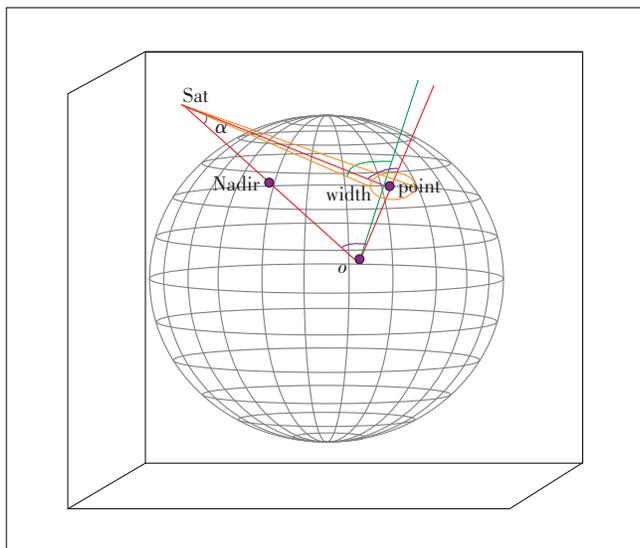


图6 主波束在跨迹方向示意图

点间弧长距离。对于 Width 与 point 在地心夹角的获取, 则可通过 2 点入射角补角公式获得。

具体的计算方法如下。

步骤 1: 确定卫星主波束指向以及 3 dB 波束指向在地面入射角  $i$  和  $i'$ , 图 7 所示为跨迹剖面示意。

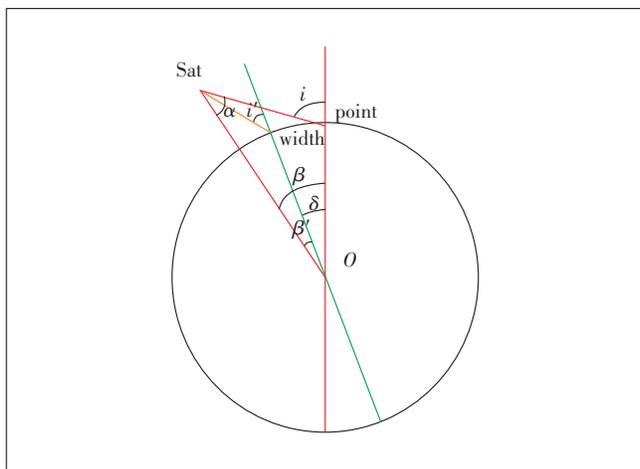


图7 跨迹剖面图

根据图 1 中的公式可知:

$$\sin i = \left(1 + \frac{\text{alt}1}{R}\right) \times \sin \alpha$$

同理:

$$\sin i' = \left(1 + \frac{\text{alt}1}{R}\right) \times \sin \left(\alpha - \frac{\gamma'}{2}\right)$$

步骤 2: 确定主波束与 3 dB 波束地面入射线在地心夹角。

在直角  $\triangle OSatPoint$  中,  $i = \alpha + \beta$

在直角  $\triangle OSatWidth$  中,  $i' = \alpha - \frac{\gamma'}{2} + \beta'$

则:

$$\delta = \beta - \beta' = i - i' - \frac{\gamma'}{2}$$

步骤 3: 确定主波束指向到 3 dB 波束指向的地面距离。

$$|\widehat{PW}| = R \times \delta$$

### 2.3 瞬间视场估算结果

采用第 2.2 节的计算方法, 在给定参数的基础上, 对瞬间视场进行估算, 结果如表 1 所示。

表 1 计算结果示例

卫星高度/km	514	514	514	514	514	514	514	514
偏星下角/ $^\circ$	18	20	25	30	35	40	45	50
沿迹 3 dB 波束宽度	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53
跨迹 3 dB 波束宽度	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13
沿迹方向半轴/km	2.51	2.54	2.65	2.78	2.96	3.20	3.51	3.94
跨迹方向半轴/km	5.66	5.81	6.31	7.01	7.98	9.38	11.46	14.73

### 2.4 性能分析

为分析本文估算方法的性能, 本节采用蒙特卡洛仿真方法, 通过撒点法, 对比分析本方法的逼近效果。为减少仿真假设对仿真结果的影响, 本仿真采用圆波束照射地面, 即卫星照射天底时, 瞬间视场则为标准圆形, 随着偏星下角的增大, 瞬间视场逐渐变成不规则图形。以波束指向为中心, 以一定经度范围和纬度范围在球面画小格子, 使其至少包含不规则瞬间视场, 形成规则撒点区。在规则撒点区均匀撒放采样点, 并判断各采样点是否位于瞬间视场范围内。为简化仿真实现, 偏星下角采用东西打向, 则经度差以及纬度差对应大圆弧长则为瞬间视场的长轴或短轴。

#### 2.4.1 仿真假设

仿真参数如表 2 所示。为提高仿真性能, 采用  $50 \times 50 \text{ km}^2$  内撒放 1 000 000 采样点, 即  $50 \times 50 \text{ m}^2$  内均匀出

表 2 蒙特卡罗仿真假设

卫星高度/km	514
沿迹 3 dB 波束宽度	1.1
跨迹 3 dB 波束宽度	1.1
星下点(经纬度)/ $^\circ$	(-100, 35)
偏星下角/ $^\circ$	18/20/25/30/35/40/45/50
规则撒点区/ $\text{km}^2$	$50 \times 50$
样点数	1 000 000
精度/km	0.025

现一个采样点,对应精度为 25 m。

### 2.4.2 仿真结果

图 8 所示为偏星下角 18° 仿真撒点图,其中黄色代表瞬间视场,蓝色为其他区域。

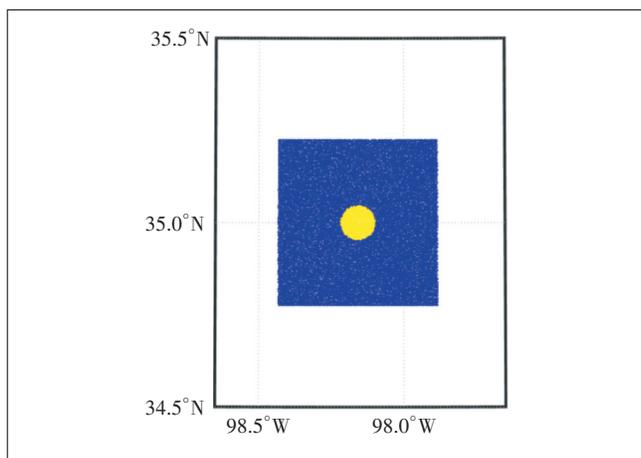


图 8 偏星下角 18° 仿真撒点图

估算法相对蒙特卡罗仿真结果的差异分析如表 3

表 3 估算法相对蒙特卡罗仿真结果的差异分析

参数	卫星高度/km	514	514	514	514	514	514	514	514
	偏星下角/°	18	20	25	30	35	40	45	50
	沿迹 3 dB 波束宽度	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
	跨迹 3 dB 波束宽度	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
蒙特卡罗	沿迹方向半轴/km	5.02	5.11	5.26	5.53	5.93	6.49	7.11	8.08
	跨迹方向半轴/km	5.38	5.42	6.01	6.67	7.52	8.84	10.99	14.26
估算法	沿迹方向半轴/km	5.21	5.28	5.49	5.78	6.15	6.64	7.29	8.18
	跨迹方向半轴/km	5.51	5.66	6.14	6.82	7.77	9.13	11.16	14.35
估算法相对蒙特卡罗差异	沿迹方向/%	3.79	3.31	4.43	4.45	3.67	2.24	2.47	1.20
	跨迹方向/%	2.38	4.41	2.21	2.25	3.35	3.32	1.51	0.63

9 600 MHz [EB/OL]. [2022-12-08]. <https://www.itu.int/rec/R-REC-RS.2043-0-201402-I/en>.

[2] ITU. RS.2105-0(07/2017): Typical technical and operational characteristics of Earth exploration-satellite service (active) systems using allocations between 432 MHz and 238 GHz [EB/OL]. [2022-12-08]. <https://www.itu.int/rec/R-REC-RS.2105-0-201707-S/en>.

[3] ITU. RS.1861-0(01/2010): Typical technical and operational characteristics of Earth exploration-satellite service (passive) systems using allocations between 1.4 and 275 GHz [EB/OL]. [2022-12-08]. <https://www.itu.int/rec/R-REC-RS.1861-0-201001-S/en>.

[4] ITU. ITU-R TG5.1 Contribution 478: Annex 05 Part 3 - Sharing and compatibility of the EESS/SRS(passive) systems in the 36 37 GHz frequency band and IMT operating in the 37 43.5 GHz frequency range [EB/OL]. [2022-12-08]. <https://www.itu.int/md/R15-TG5.1-C-0478/en>.

所示。

通过上述对比数据,可以看出:通过估算法计算获得的数据相比蒙特卡罗仿真数据稍大,数据差异在 5% 以内。

### 3 结论

本文给出了一种量化卫星通信地面照射范围的估算方法,并基于蒙特卡罗仿真数据进行效果评估。评估结果表明该方法可以简单有效地抽象瞬间视场的大小,可以替代蒙特卡罗仿真方法,方便应用于共存仿真平台实现,也可以作为卫星系统地面部署的依据,即可以作为卫星业务与地面业务干扰共存研究中评估干扰范围的依据,是一种可平衡地面业务和空间业务双向评估方案。

### 参考文献:

[1] ITU. RS.2043 (02/14): Characteristics of synthetic aperture radars operating in the Earth exploration-satellite service (active) around

[5] YOUNG G S, SIKORA T D, WINSTEAD N S. Inferring Marine Atmospheric Boundary Layer Properties from Spectral Characteristics of Satellite-Borne SAR Imagery [J]. Monthly Weather Review, 2010, 128(128):1506-1520.

[6] DANDAN Z, XIAOLAN C, DONGHUI H, et al. Analysis of Geosynchronous Satellite-Air Bistatic SAR Clutter Characteristics from the Viewpoint of Ground Moving Target Indication [J]. Journal of Radars, 2013, 2(3):348-356.

### 作者简介:

刘吉凤,高级工程师,硕士,主要从事移动通信频率规划、频率重耕以及共存仿真平台搭建研究工作;周瑶,高级工程师,硕士,主要从事移动通信频率研究工作;李福昌,教授级高级工程师,博士,主要从事5G/B5G/6G无线技术研究及管理工作。