

低轨星座通信系统与地面 IMT 业务系统 频率兼容性仿真方法

赵冬¹, 陈宏¹, 秦屹昂¹, 李辉², 李文越¹

(1. 中国电信集团卫星通信有限公司, 北京 100035;

2. 北京羽寻科技有限公司, 北京 100191)

摘 要: 针对近年来低轨星座通信系统与地面 IMT 业务系统频率共用兼容性分析中, 双方系统在时间维度、空间维度存在大尺度差异的问题, 提出一种仿真建模方法, 即在传统空间业务系统和地面 IMT 系统建模仿真的基础上, 增加以时空换算为手段的微观与宏观系统间映射关系进行建模的仿真方法。

关键词: 低轨星座; 频率共用; 仿真建模

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2023022

Simulation Method for Frequency Compatibility between LEO Constellation Communication System and Ground IMT Service System

ZHAO Dong¹, CHEN Hong¹, QIN Yiang¹, LI Hui², LI Wenyue¹

1. China Telecom Satellite Communication Co., Ltd, Beijing 100035, China

2. Beijing Yuxun Technology Co., Ltd, Beijing 100191, China

Abstract: In response to the compatibility analysis of frequency sharing between low orbit constellations and IMT systems in recent years, which has caused large-scale differences in time and spatial dimensions between the two systems, a simulation modeling method was proposed that added a mapping relationship between micro and macro systems used spatiotemporal conversion as a means of modeling on the basis of traditional space business system and ground IMT system modeling and simulation.

Keywords: low orbit constellation, frequency sharing, simulation modeling

0 引言

近年来, 空间业务与地面业务频谱共用形势严峻, 双方系统间的兼容性是决定星座通信系统与国际移动通信 (IMT) 业务系统各自进行全球布局的重大技术约束。传统卫星系统间、地面移动通信系统间的兼容性分析方法有各自的适用条件, 在分析低轨星座通信系统与地面 IMT 业务系统的频率共用兼容性场景下具有宏观尺度仿真与微观尺度仿真缺乏融合手段的问题。

地面系统 (陆地移动通信系统, 主要是以 5G/4G 为代表的采用 OFDM 方式的移动通信系统, 以下统一称为地面系统) 与空间系统 (卫星通信系统, 以下统一称为空间

系统) 之间, 存在系统工作时间、系统运行的空间、系统承载的用户、系统内业务特征等 4 个领域的巨大差异, 如图 1 所示。进行地面系统对空间系统的干扰仿真工作时, 必须进行特殊的处理和建模。本文以地面系统对空间系统的干扰场景为例, 着重阐述微观与宏观相互转换的干扰建模方法, 同时其也适用于空间系统对地面系统的干扰场景。

由以上两个类型的系统自身特性和常用仿真手段来看, 要进行地面系统对空间系统干扰的仿真分析和建模, 必须解决空间系统、地面系统在上述方面的维度转换/统一的问题。

1 总体解决思路

为解决上述问题, 本文提出微观到宏观的建模与计算

收稿日期: 2023-02-03; 修回日期: 2023-05-23

基金项目: 民用航天技术预先研究项目 (No.D030103)

Foundation Item: Civil Space Technology Pre Research Project (No.D030103)

方法，总体思路如下。

首先，在空间维度方面，卫星单次过境弧段内，跨越了多种陆地移动通信场景，如密集城区、城区、郊区等。以此维度区分移动通信场景的主要原因是，对于地面系

统，这些场景内的网络拓扑和频率等参数配置存在显著差异。这些差异直接影响到对应区域产生的同频/邻频干扰强度和频度。以地面系统下行干扰空间系统下行场景为例，微观系统对宏观系统干扰的空间关系如图 2 所示。

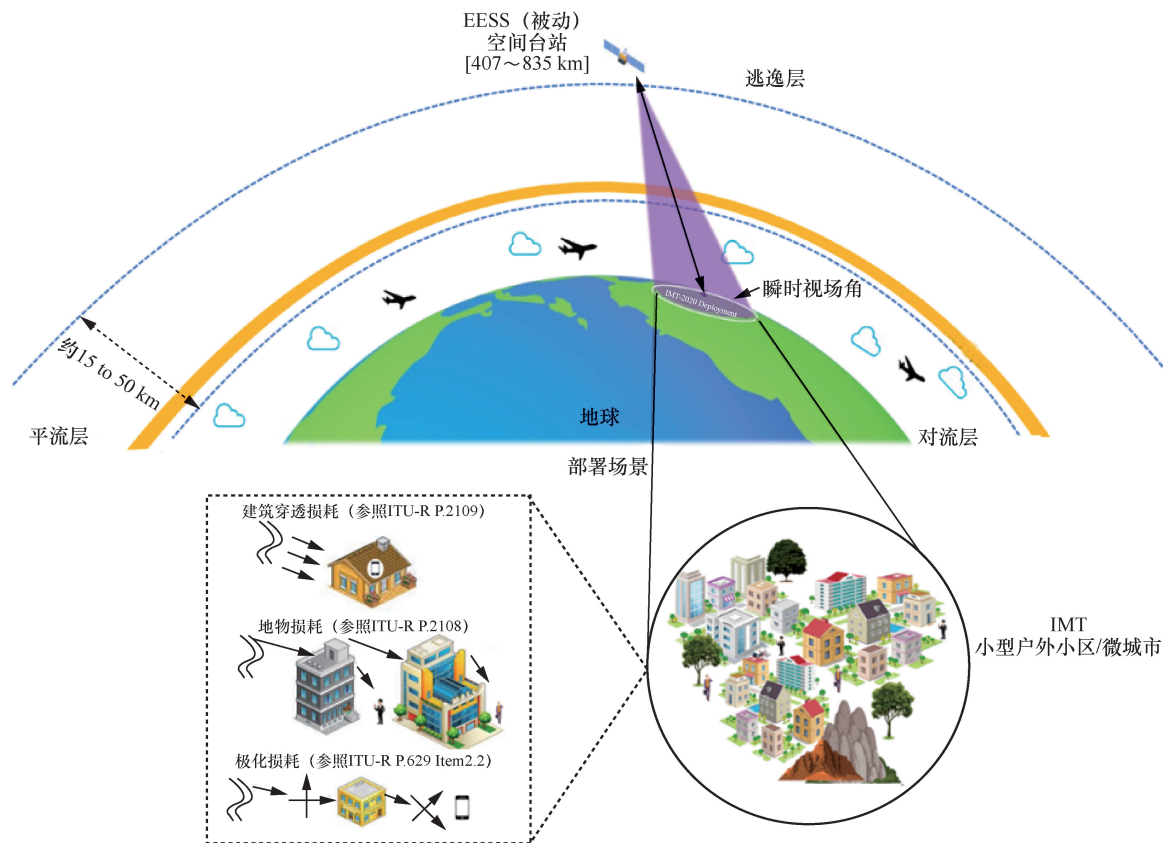


图 1 空间系统（宏观系统）与地面系统（微观系统）间的时空尺度差异

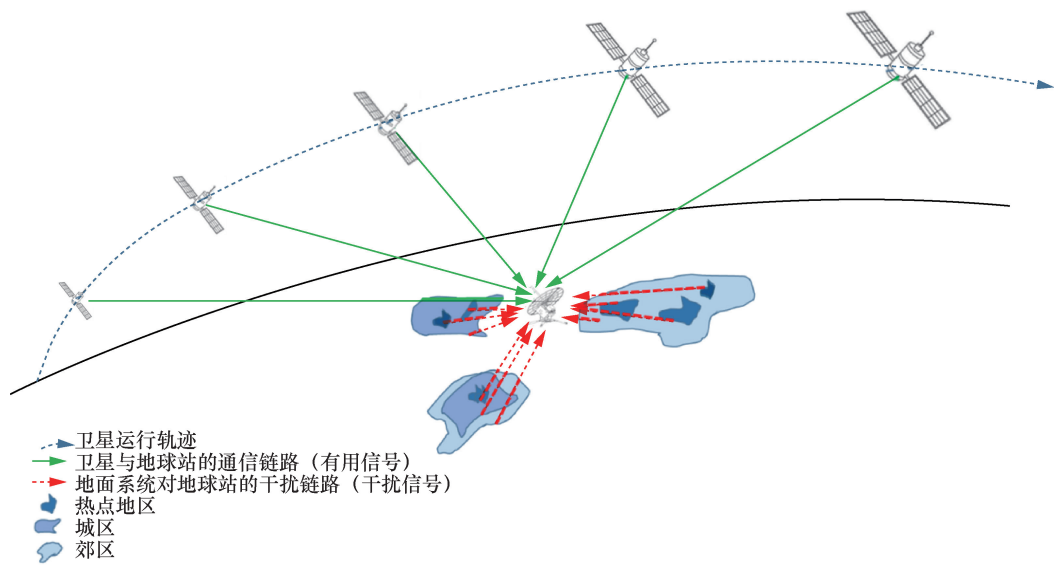


图 2 微观系统对宏观系统干扰的空间关系

针对微观空间维度到宏观空间维度的转换,提出以下核心解决思路:

- (1) 以城市规模和密度为基本单位的等效过境区域建模;
- (2) 以离散抽样为基础的地面系统干扰强度统计建模;
- (3) 基于统计模型映射的等效干扰强度建模与仿真设计。

在时间维度方面,地面系统与空间系统之间的差异是十分巨大的。微观系统对宏观系统干扰的时间关系如图3所示。

地面系统仿真模型工作在毫秒量级,仿真时长约为几秒。空间系统仿真模型工作在分钟量级,仿真时长在几十天,甚至一年。因此,无论在仿真步长还是仿真时长的角度,都无法直接对接两个系统。

针对时域建模匹配的问题,核心解决思路如下:

- (1) 微观系统时域统计模型建模与仿真设计;
- (2) 宏观系统时域统计模型建模与仿真设计;
- (3) 以时空换算为手段的微观与宏观映射建模。

2 解决方案

2.1 系统特征差异分析

地面 IMT 系统和空间系统之间在时域、空域、承载用户业务方面的典型差异如下。

(1) 系统运行的空间领域特点分析

地面系统的拓扑单元是以基站为基本单元,按照蜂窝式连片拓展在地表区域的系统。对于每一个基站来说,其覆盖范围在几百米,甚至几千米的半径区域内。因此,地

面系统仿真建模通常以若干个小区(如7个小区、19个小区等)组成的基站簇为网络拓扑单元。仿真关注处于这个基站簇内的多个用户的业务通信质量和干扰问题。

卫星通信系统,特别是近地 NGSO 卫星通信系统,由于其卫星轨道的特性,模型的拓扑单元围绕着地球的 NGSO 轨道空间。典型的 NGSO 通信链路是 NGSO 卫星与地面站之间的通信链路。卫星通信系统仿真传统建模是建立在 NGSO 星座与单个地面站之间的通信过程模拟,关注于 NGSO 星座围绕地球运行期间通信链路接受到的总的干扰强度。

(2) 系统工作时间域特点分析

地面系统采取的动态调度方案,以毫秒量级的时间频率灵活地分配基站与不同用户终端通信使用的无线资源。即使是与同一个用户通信,其通信持续过程中,不同毫秒量级用户之间所使用的无线频率资源也会不同。且对于地面系统业务来讲,一次业务持续时间在几十秒到几分钟。受到移动通信业务本身特性的影响,一般仿真时长根据业务类型的不同在几千到上万个时间单元(毫秒量级的时间单元)。

根据 NGSO 轨道特性,一般卫星一次回归周期在几十分钟到几小时。由于轨道特性导致卫星轨道并非严格回归,因此,业内进行卫星系统干扰仿真时,仿真时长相对较长。根据卫星系统干扰研究对象的差异,仿真时长最短几天,也有几十天、1个月,最长不超过1年。

(3) 系统承载的用户

地面系统的用户持有移动手持终端,相对体积小。随着用户行走、乘车出行等活动,移动终端以不同速度和

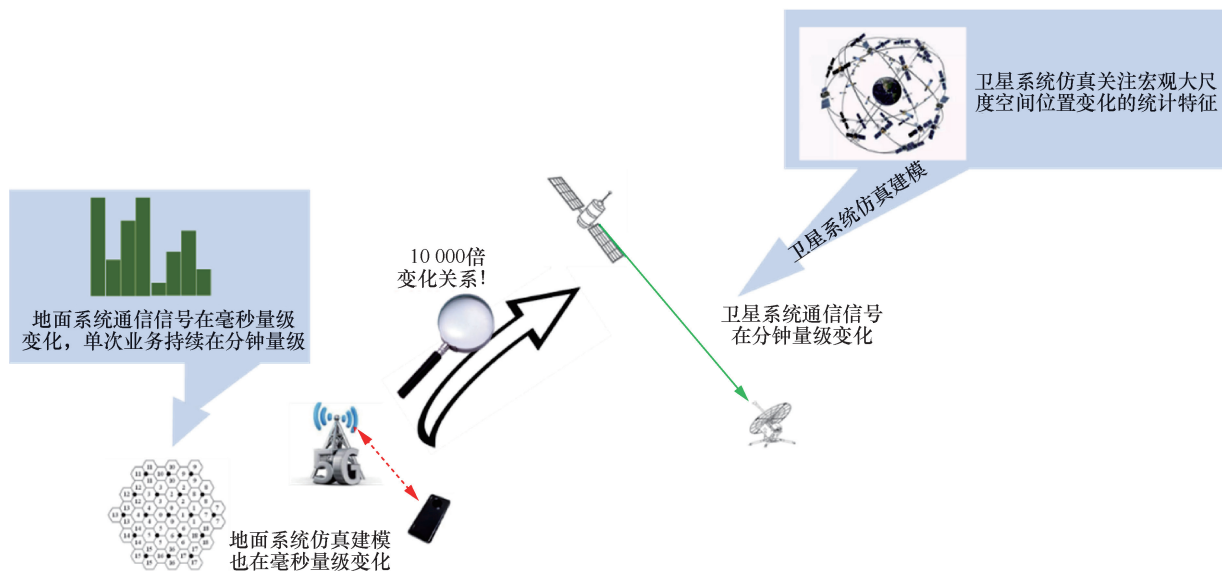


图3 微观系统对宏观系统干扰的时间关系

不同方向移动。因此,在进行地面系统用户建模时,以用户/业务激活率表示在全部待机的手机用户中,同时有业务产生的用户占比。

NGSO 卫星通信系统的用户,主要在地球站。地球站站址普遍固定,且采取直径较大的接收和发射天线(相对于陆地移动通信的手机天线而言)。部分 NGSO 卫星通信系统也存在手持终端设备,主要用于专业通信网络的高可靠性全球通信业务。对于地球站来说,由于卫星可见的时段相对较短,因此地球站普遍以能够与一颗可见卫星建立通信链路的时段作为其业务的通信时间。

(4) 系统内业务特征

地面系统承载的业务种类繁多,从概念上来说,分为宽带数据业务(以增强型移动宽带(eMBB)业务为典型代表)、超低时延和超高可靠性3种类型。根据4G和5G实际业务发展情况来看,主要以eMBB业务为主。在eMBB业务中,可以根据数据内容特点进一步划分,比如视频会议、视频电话、即时短消息(例如微信)、语音通话(例如VoNR、VoLTE)等。地面系统对数据业务普遍采用动态调度策略(语音业务采用半动态调度),动态调度周期在毫秒量级,因此,通常仿真步长按照调度周期设置,例如1ms或0.5ms。

由于NGSO卫星通信系统承载业务的特性差异较大,且卫星系统通信制式的限制,一般卫星通信系统业务一次持续时间相对较长,使用的频率资源相对稳定。一般在干扰分析建模中,地球站与一颗卫星一次建链开始到结束的弧段内,两者间的通信链路频率不会改变。而NGSO卫星单次过境可见持续时间,根据轨道特性差异,从几分钟到几十分钟不等。由于上述卫星通信系统具有自身运行空间范围大、仿真时长长的特点,因此,在卫星通信系统干扰仿真建模中,通常以分钟量级为仿真步长。

需要指出的是,上述无论是卫星通信系统仿真步长(分钟量级)还是地面系统仿真步长(毫秒量级),这里所说的仿真步长,以及整体仿真时长,其单位是对应于真实系统而

言的,而这些时间长度并不是实际计算机软件运行每一次仿真计算的真正耗时,仅代表仿真中不同系统的物理含义。

2.2 总体架构设计

鉴于上述两个系统在空间、时间、用户和业务维度的明显差异,同时两种类型的系统在各自的行业领域关于系统级仿真均有一定的技术发展和积累,因此,本文总体架构设计,分别以地面系统独立仿真、NGSO卫星通信系统独立仿真为核心模块,在两个核心模块的上层架设系统间干扰传递的模块,从而实现由微观的地面系统向宏观的空间系统的干扰信号传递和计算。

如图4所示,总体架构由3个独立设计的模块组成。

地面系统模块,核心基于地面系统的系统级仿真架构设计并实现。在参考ITU-R M.2101^[1]完成系统架构的基础上,基于3GPP TR 37.842^[2]实现天线波束模型,基于ITU-R P系列建议书或ITU-R报告既有模型设置传播模型,基于ITU-R M.2135^[3]计算基站与终端之间的路径损耗。此外,在对当前地面系统主要业务和发展趋势调研的基础上,针对以eMBB业务为典型代表的主要业务进行建模,丰富了地面系统仿真中的用户业务模型;参考采用地面蜂窝移动通信市场典型的用户渗透率、在网用户激活率等数据指标,以给定区域的人口总量为基数,折算某个时刻同时激活的用户数量,该用户数量是仿真中建模地面网络对卫星系统产生干扰量的重要技术数据。

NGSO卫星通信系统模块,以NGSO卫星轨道预测为空间位置计算的基础,围绕对地通信链路特征分别建模空地链路(下行)和地空链路(上行)通信链路模型,建立Walker标准星座和非标准星座的灵活星座建模方案,并建模空间系统常见的主要星座选星策略(最长可见、最大仰角等),基于ITU关于卫星干扰指标的相关标准分别实现C/I等主要卫星通信系统干扰测算指标。NGSO卫星通信系统模块接收来自微观到宏观转换模块处理的宏观等效干扰数据,并在NGSO卫星通信系统模型中叠加该干扰,计算最终作用在空间系统有用链路上的干扰信号强度并

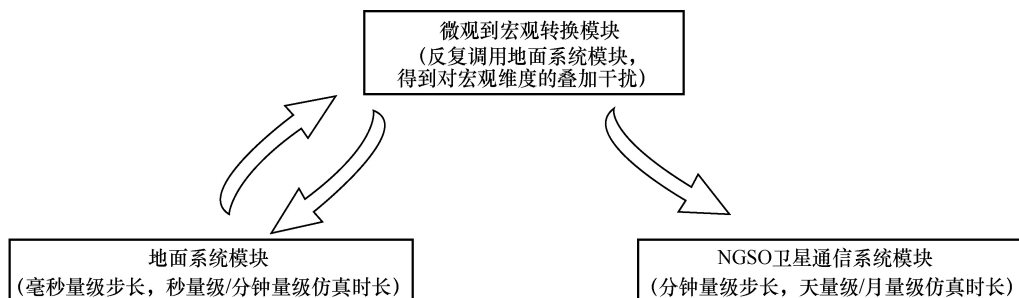


图4 总体架构示意

统计干扰指标和干扰超标时间百分比。根据卫星通信系统干扰判定规则,判定干扰是否超出标准规定。

微观到宏观转换模块,是整个系统的总控模块。该模块负责根据卫星通信系统仿真参数(特别是轨道参数)换算出宏观系统涉及的微观场景分类。根据每种微观场景类型,首先计算微观场景下的地面系统部署场景(密集城区、城区、郊区、农村等)的数量、面积和规模;其次,针对每种部署场景设置该场景内的地面系统参数和其他仿真条件;再次,每个部署场景调用地面系统模块,得到该场景的干扰信号收集;最后,根据第一个步骤得到的微观和宏观的映射关系,叠加微观场景的干扰值(包括干扰的方向和在某方向上的等效干扰计算),输出给 NGSO 卫星通信系统模块。

2.3 地面系统产生集总干扰的仿真建模

2.3.1 集总干扰的时空特征

相对于空间系统的大时空尺度,地面系统属于微观系统。其集总干扰特性映射到仿真模型中主要包括如下 4 个部分。

(1) 单元微观系统仿真调用。在一种确定的基站密度下,单元微观系统仿真是指地面系统仿真。地面系统到空间系统之间存在时空映射的需求,因此,在建立微观到宏观的干扰计算过程中,需要多次调用地面系统仿真得到不同基站密度(城区、郊区等)下的地面系统干扰结果。因此这一步骤解决如何根据待仿真的场景数量,有序调用地面系统仿真的问题。

(2) 统计特征等效建模。主要方法是以城市规模和密度为基本单位的等效过境区域建模。在这一步建模中,重点考虑的是过境区域所经历的城区/郊区/其他区域的规模和数量,如何将这与具体地理位置进行等效的抽取。最终得到的统计特征,可以脱离对具体地理位置的个体性影响。通过这一步骤可对多个不同类型的地面网络场景区域进行配置,实现卫星可见弧段内的来自地面网络的综合干扰建模。

(3) 部署区域站点数目计算。在明确了以何种配置可以代表统计特征之后,需要对代表统计特征的配置内的每种部署场景(基站密度)进一步细化。细化的第一层次即计算部署场景内的基站数目。得到基站数目后,根据地面系统仿真的单次仿真基站数目可以得到该场景可以等效为调用地面系统仿真的倍数。这个步骤决定了单次运行地面仿真结果后叠加多少倍数用于得到等效干扰的问题。

(4) 微观系统仿真结果的统计等效。这一步骤,基于上述 3 个步骤的层层调用和换算,基于逐个仿真结果,最终计算得到统计等效后的干扰。

2.3.2 建模方案

上面主要解决微观系统到宏观系统映射过程的空间方位关系和集总关系。本小节主要讨论对微观系统(地面系统)和宏观系统(空间系统)进行干扰分析中的时间统计等效关系建模。

对于地面系统而言,其数据业务占用的频谱资源是在毫秒量级的基础上动态变化的。尽管每一次调度占用的频率有细微的差异(在地面系统的工作带宽内,以 OFDM 子载波间隔的整数倍关系变换频率,这个变换关系取决于地面系统的同时通信用户数量和基站采用的资源调度算法)。对于空间系统而言,只要满足频率重叠即存在干扰风险,需要进行定量评估。考虑到每个 OFDM 子载波的带宽,在进行干扰计算的时候,需要根据地面系统调度分配的频率资源量决定叠加的干扰频率宽度(OFDM 子载波的整数倍)。

同时,地面系统一次业务的持续时间从几十秒到几分钟不等,而空间系统的业务持续时间一般是卫星地球站建链到释放的时间(仅考虑卫星地球站与所选卫星的一次连续通信时段)。根据 NGSO 卫星系统轨道参数的不同,单次可见持续的时间从十几分钟到几十分钟不等。由此可见,地面系统业务(干扰)持续的时间是远低于空间系统业务(有用信号)的。因此,不能直接将微观系统即地面系统计算得到的毫秒量级的干扰信号值直接在分钟量级的空间系统有用信号上叠加计算。

由于时间维度尺度的差异,地面系统相对于空间系统又属于快变系统,因此,需要在地面系统单次仿真时长的时间范围内按照不同干扰强度持续的时间百分比进行划分。即地面系统输出向空间系统的干扰值,在时域上还包括的信息是单次地面系统仿真时长内取得该干扰值(离散后)的时间概率。时空切分建模(单次地面系统仿真时长内的干扰输出表示例)见表 1。

以时空换算为手段的微观与宏观映射建模还需要处理的一个重要内容是,基于单次地面系统仿真输出的离散干扰样本点,采用插值法获取连续角度对应的干扰值和时间概率插值结果,采用以下时空单元的方位角近似方法实现。

在本模型中,插值对应的自变量参数有两个:空间-水平角、空间-仰角。插值对应的因变量也有两个:时间-干扰值、时间-百分比。

由插值公式

$$y = y_0 + (x - x_0) \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} = y_0 + \frac{(x - x_0)y_1 - (x - x_0)y_0}{x_1 - x_0}$$

可得到针对单一自变量的线性插值比例因子

$|(y-y_0)/(y_1-y_0)|$ 。求两个自变量的比例因子均值,作为分别作用在两个因变量上的插值比例因子,分别得到插值对应的时间-干扰值、时间-百分比。

表 1 时空切分建模(单次地面系统仿真时长内的干扰输出表示例)

序号	空间-水平角 (离散值)	空间-仰角 (离散值)	时间-干扰值 (离散值)	时间-百分比 (连续值)
1	0°	10°	-3 000 dBm (无干扰)	55%
2	0°	.....	-200 dBm	16%
.....	0°	.....	.....	.....
	0°	90°	30 dBm	.....
.....	5°	10°	50 dBm	.....
	5°	.....	-100 dBm	.....
	5°	.....	.....	.....
	5°	90°	10 dBm	.....
.....				
.....	30°	10°	-140 dBm	.....
	30°	.....	-70 dBm	.....
	30°	.....	.....	.....
	30°	90°	25 dBm	.....

2.3.3 微观系统仿真结果的统计等效

(1) 单元微观系统仿真调用

单元微观系统仿真调用流程如图 5 所示。按照该仿真中共同涉及的场景、每个场景下涉及的配置这两个层级进行双层循环。每次循环,首先根据场景的配置参数生成单次调用地面系统仿真的输入参数文件。为本次调用生成

相应的文件夹并将仿真必须的辅助文件拷贝到该文件夹中,然后程序调用地面仿真可执行程序。地面仿真可执行程序自动查找所在文件夹下对应的输入配置文件的位置并读取仿真配置参数,执行地面系统仿真,在预设的输出文件夹输出仿真结果。当执行完所有场景的所有配置后,统计这些仿真结果作为单元微观系统仿真调用的输出。

(2) 统计特征等效建模

该建模的核心思想是以城市规模和密度为基本单位的等效过境区域建模。重点考虑的是过境区域所经历的城区/郊区/其他区域的规模和数量,并讨论将具体地理差异通过统计等效特征建模得到等效的分布模型的方法。

这种对应关系的建模,根据链路方向的不同,需要分卫星链路下行和卫星链路上行分别建模。

无论在上行还是下行,根据卫星地球站所在位置可以将地表区域划分为 A 区和 B 区。A 区是指卫星地球站所在的区域属于地面系统某场景(城区/郊区)的区域。B 区是没有卫星地球站在地面系统场景内的区域。含有 A 区和 B 区的下行场景示意和上行场景示意分别如图 6 和图 7 所示。

(3) 部署区域站点数目计算

采用以离散抽样为基础的地面系统干扰强度统计建模。一个局部地区的 IMT 系统部署密度值主要针对城市热点地区(人口密集的地区,如高层建筑物的地区和附近拥挤的地区)和郊区热点地区,适用于部署单个热点或一小群 IMT 小区。需要根据热点面积占研究总面积的比例调整部署密度值。

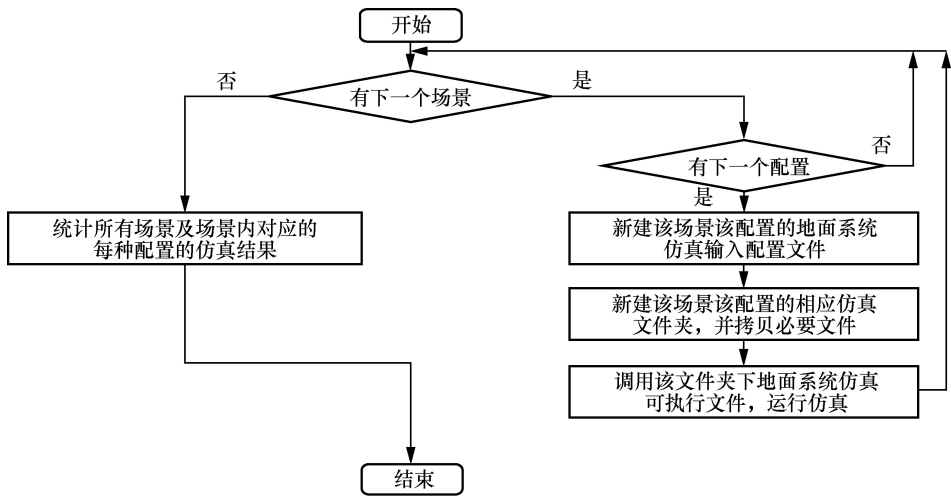


图 5 单元微观系统仿真调用流程

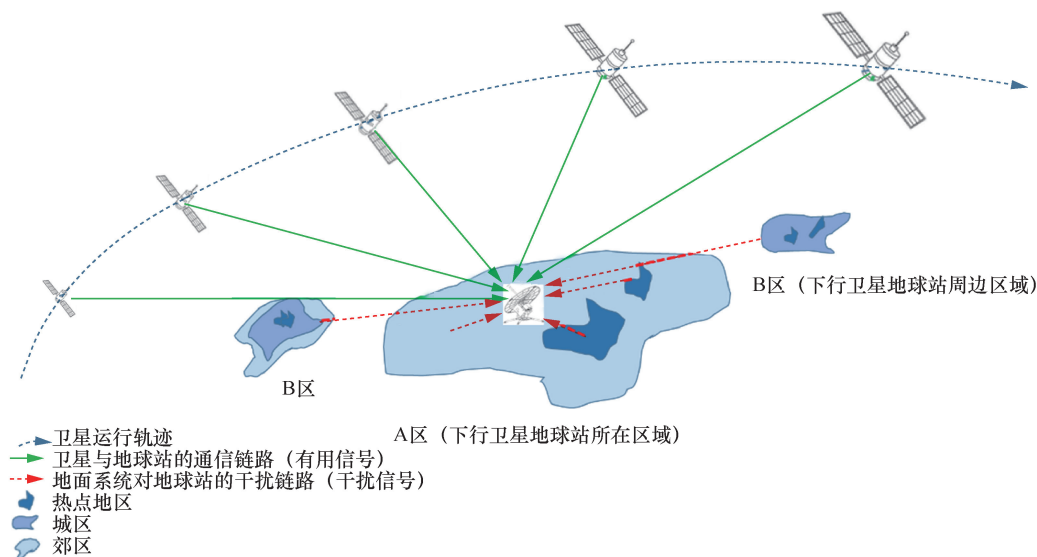


图 6 统计特征建模示意 (空间系统卫星下行场景)

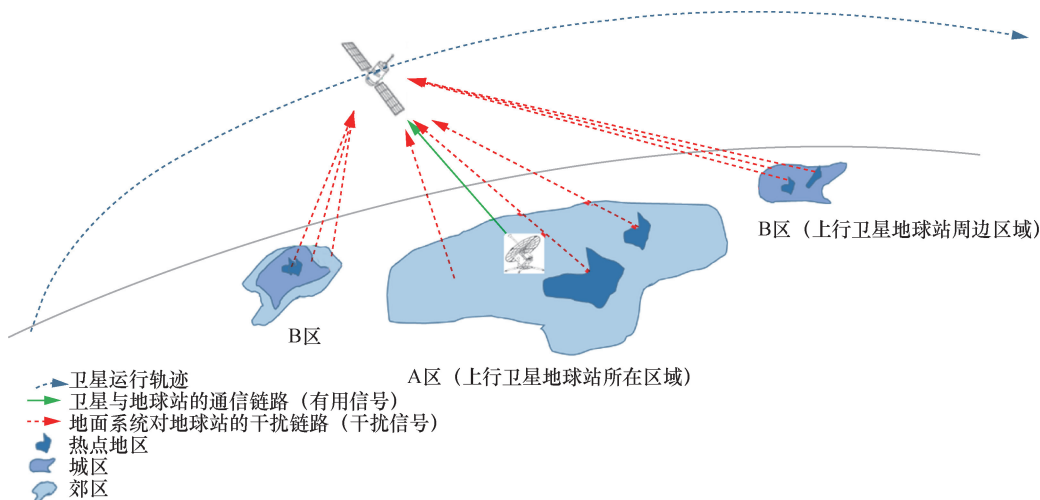


图 7 统计特征建模示意 (空间系统卫星上行场景)

用于共享研究的大面积部署的密度值 D_1 根据以下公式计算^[4]

$$D_1 = D_s \times R_a \times R_b \quad (2)$$

其中, D_s 表示室外热点地区的密度值, 即同时发送的终端的密度或每平方千米的基站数量; R_a 表示热点地区面积与城市建成区面积的比例; R_b 表示城市建成区面积与总研究区域面积的比例。

首先需要部署密度值进行调整, 以优化热点地区与城市建成区总面积之比。对于 24 GHz 以上频率的 IMT 部署, 热点地区总面积将主要由密集城区中的热点地区组成。密集的城市面积与城市建成区总面积之间的典型比例显著低于 10%, 热点部署的比例 (R_a) 通常小于 10%。对于 24.25 ~ 86 GHz 频段的 IMT 共存和兼容性研究, 应使用城区 7% 和郊区 3% 的 R_b 值。

对于在更大的区域 (如一个国家或地区) 进行 IMT 部署的研究, 需要进一步调整 IMT 的部署密度值, 以便考虑没有 IMT 的城市建成区以外的大面积地区。需要根据城市建成区面积占总体面积的比例进一步调整部署密度值。一个国家/地区内城市建成区面积与总研究区域面积之比 (R_b) 的典型值通常小于 5%。对于 24.25 ~ 86 GHz 频段的 IMT 共用和兼容性研究, 应使用 5% 的 R_b 值。

R_a 和 R_b 的值用于涉及大面积 24.25 ~ 86 GHz 频段的 IMT-2020 部署的研究, 取值见表 2。

表 2 IMT 系统大规模部署时 R_a 、 R_b 的取值

参数	值
R_a	城区 7%, 郊区 3%
R_b	5%

根据式(2)提供的计算大面积部署密度值的方法, IMT 基站或用户终端数量可以通过下式计算

$$N_{\text{Tot_BS/UE}} = \sum_{i=1}^M S_{\text{area}} \times D_{\text{s_BS/UE}_i} \times R_{\text{a}_i} \times R_{\text{b}_i} \quad (3)$$

其中, $N_{\text{Tot_BS/UE}}$ 表示 IMT 基站或用户终端的总数量; M 表示共存研究考虑区域内不同类型的地面网络场景数量; S_{area} 表示共存研究考虑的区域尺寸; $D_{\text{s_BS/UE}_i}$ 表示 IMT 基站或用户终端的密度; R_{a_i} 表示热点地区面积与城市建成区面积的比值; R_{b_i} 表示城市建成区面积与总研究区域面积的比值。

在部署面积较小的情况下, 对于 R_{a} 的使用方法可以有两种考虑。其中一种认为在部署区域内城区与郊区是不可分的, 另外一种则认为在部署区域内可以将城区与郊区加以区分。在不区分城区与郊区的情况下, 需要根据整个部署区域面积考虑城区与郊区基站的数量。在区分城区与郊区的情况下, 认为部署区域范围内一部分为城区, 另一部分为郊区, 且根据城区部署区域面积考虑城区基站数量, 根据郊区部署区域面积考虑郊区基站数量。

在部署面积较大的情况下, 需要根据大范围部署面积额外考虑 R_{b} 。大面积部署情况下 R_{a} 和 R_{b} 的数值都应根据可应用的数据库得出。在共存研究涉及地面路径并且仅考虑单个热点地区或一小簇 IMT 小区的情况下, 应考虑 R_{a} 和 R_{b} 均为 1。

(4) 微观系统仿真结果的统计等效(基于时空单元的方位角, 对微观干扰经过天线增益过滤分量的计算)

微观系统仿真结果的统计等效核心在于基于统计模型映射的等效干扰烈度建模与仿真设计。

综上, 地面系统根据卫星地球站位置关系可以分为 A 区和 B 区。A 区主要特征是卫星地球站位于地面系统仿真场景内, 属于最强干扰场景。B 区是分布于卫星地球站周边的地面系统相对集中的部署区域。考虑到地面系统用于不同场景的组网频率一般是不同的, 因此, B 区在某一个指定频段内, 可能是以多个离散的地面系统仿真区的形式存在的。

图 8 给出了针对一个卫星地区站可能存在的多个离散的地面系统仿真区的 B 区示意。在图 8 中蓝色框线区域内, 选取城区/郊区区域作为离散的 B 区。蓝色框线的范围, 需要将卫星地球站在地表的直视距离作为上限半径。而蓝色框线的下限半径, 可以考虑以卫星地球站接收干扰强度大于给定门限(判定某个地面系统的干扰属于强干扰)时, 按照仿真频段的传播路径损耗和地面系统最大发射功率, 求得下限半径值。

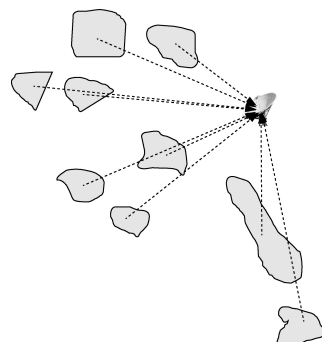


图 8 多个离散的地面系统仿真区的 B 区示意

进一步地, 每一个 B 区的面积与对应的具体城市的城区/郊区范围有关。一般来说, 城区范围是超过单次地面系统仿真的 19 个基站覆盖面积的。因为地面系统仿真本身已经考虑过边界效应, 因此在 B 区的干扰计算中可以考虑边界效应影响。那么需要关注的是两个方面: 一方面, 是一个 B 区可以等效为多少个单次地面系统仿真规模(19 个基站面积); 另一方面, 对于 B 区来说, 卫星地球站位于 B 区外, 以图 8 蓝色框线圆半径为半径的圆弧上的某点。而针对每一种卫星地球站在弧段上的方位角来计算一次地面系统仿真, 从运算量的角度来看, 显然是不现实的选择。因此, 需要考虑卫星地球站在弧段不同位置上是否可能等效。图 9 给出了在单次地面系统仿真的 19 个基站场景内, 卫星地球站所处弧段的等效几何关系。对于单次地面系统仿真来说, 输出弧段标记范围内等间隔的方向角上的对外干扰信号值即可。

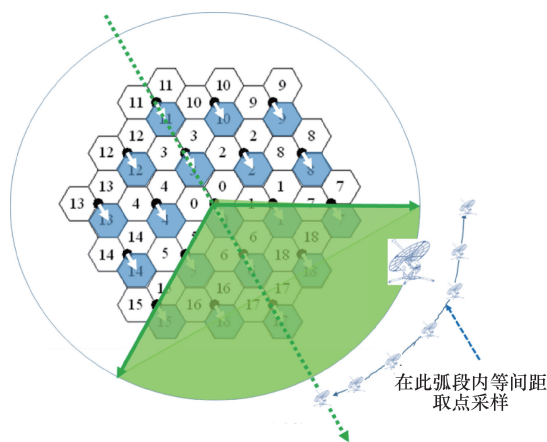


图 9 卫星地球站所处弧段的等效几何关系

对于 B 区场景, 即卫星地球站在地面系统覆盖区域外的情况, B 区中心到卫星地球站的距离通常远大于小区半径。因此, 在地面系统的干扰信号叠加计算中, 可近似认为需要计算的方向角即等于图 9 弧段上离散取值的方向角, 如图 10 所示。

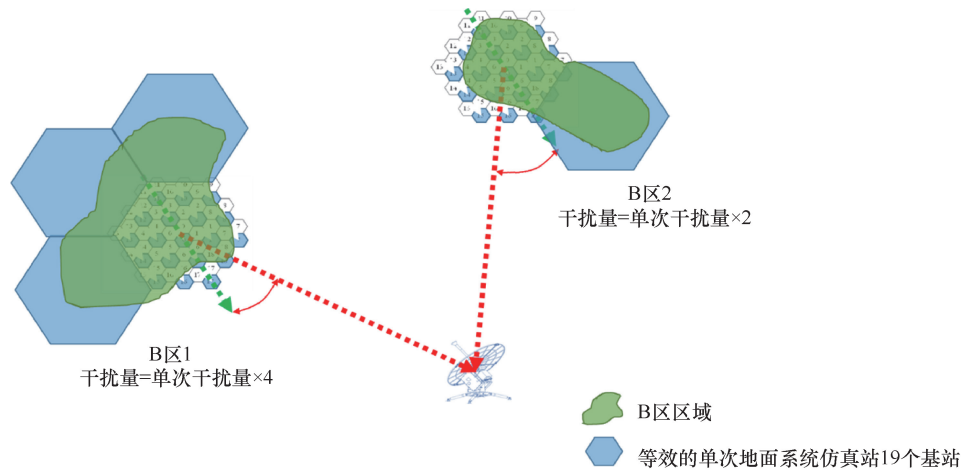


图 10 统计特征建模（等效干扰方位角和叠加量）

按照上述步骤操作，即可通过迭代调用单次地面系统仿真可执行程序得到不同 B 区方位角和叠加量的 B 区对一个卫星地球站的干扰累计量。

上述操作步骤可以直接匹配通过数据库精确确定给定经纬度的卫星地球站的周边 B 区范围内需要计算的干扰叠加量。

3 典型场景的仿真案例

为了验证上述仿真原理，本文以 Ka 频段的 NGSO 卫星系统与 IMT 系统为例进行仿真验证，IMT 系统由微基站和用户组成，仿真其系统内基站对卫星以及卫星地面用户在一定隔离距离上造成的干扰情况，以 I/N 作为干扰情况评估指标。Ka 频段 NGSO 卫星星座系统参数见表 3。Ka 频段 LEO 卫星星座链路参数见表 4。Ka 频段 IMT 系统参数（异构系统）见表 5。

表 3 Ka 频段 NGSO 卫星星座系统参数

参数	值
轨道类型	NGSO
轨位	NA
波束中心频率/MHz	DL(18 000)
	UL(30 000)
轨道面数/个	12
每个轨道面卫星数/颗	20
高度 (a)/km	880
倾角 (i)	86°
偏心率 (e)	0°
近地点俯角 (w)	0°
首面升交点赤经 $RNNA(\Omega)$ /面间差	0°/30°
首星相位 (ω)/相位差	0°/18°

表 4 Ka 频段 LEO 卫星星座下行链路参数

参数	值
波束方向	下行
卫星天线最大增益/dBi	35
卫星天线方向图	ITURS1528
中心频点/MHz	18 000
带宽/MHz	200
接收系统噪声温度/K	120
最大发射功率/dBW	-74
最大发射功率密度/(dBW · Hz ⁻¹)	-74
最小发射功率/dBW	-74
最小发射功率密度/(dBW · Hz ⁻¹)	-74
地球站名称	KaES
经度	110.5°E
纬度	39.9°N
高度/km	10
最低工作仰角	5°
地球站天线增益/dBi	40
地区站方向图	ITUR465
极化方式	M
波束指向	地球站
传播模型	自由空间
地球站选星策略	最长可见

本仿真项目涉及星地间的干扰链路中采用了自由空

间传播模型。在涉及地对地的干扰链路中采用了 ITU-R P.452 建议书^[5]传播模型以及 ITU-R P.2108 建议书^[6]光滑地球地物损耗模型。

仿真结果如图 11 所示。

表 5 Ka 频段 IMT 系统参数 (异构系统)

参数	值
地面系统工作中心频率/MHz	20 000
地面系统工作带宽/MHz	100
接收机噪声温度/K	120
每个小区微基站数量/个	3
每个微基站接入用户数/个	1
微站下倾角	6°
微站发射功率/dBm	23
微站天线类型	全向天线
用户最大发射功率/dBm	22
用户最大调制编码等级	256
用户支持的业务类型	满缓冲区
用户天线类型	全向天线

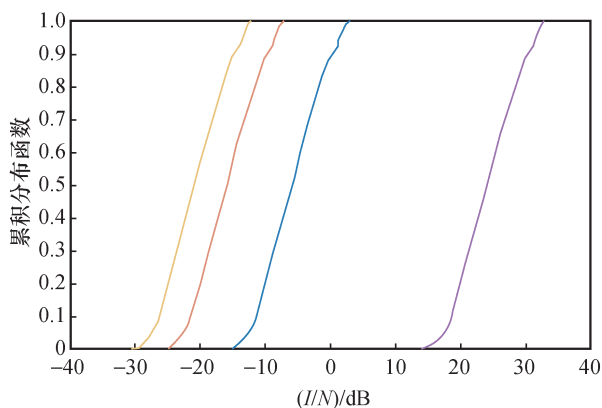


图 11 IMT 基站发射干扰卫星地球站接收 (从左至右依次为 70 km、60 km、50 km、40 km 的 IMT 系统与卫星地球站间隔距离)

为满足 IMT 系统对空间系统的保护要求, 卫星地球站的干噪比需在整个周期 90% 时间内小于 -12.2 dB, 根据仿真结果, 需要 70 km 的隔离距离来保障具有上述部署方式以及系统性能的 IMT 系统与卫星地面系统可以同频共存。此外, 采用有效的不同系统间波束避让策略、划分频率隔离带等方式可以有效降低上述场景所需的隔离距离。

4 结束语

本文针对 NGSO 卫星系统与 IMT 系统进行宏观与微观系统的大小尺度结果转换面临的问题进行分析, 并给出仿真方法设计的解决方案、软件系统设计方案, 以供相关干扰共存研究参考。

参考文献

- [1] Recommendation ITU-R. Modelling and simulation of IMT networks and systems for use in sharing and compatibility studies: M.2101-0[S].
- [2] 3GPP. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA) and universal terrestrial radio access (UTRA; radio frequency (RF) requirement back ground for active antenna system (AAS) base station (BS): TR 37.842[S].
- [3] Recommendation ITU-R. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced: M.2135[S].
- [4] Recommendation ITU-R. Characteristics of terrestrial IMT systems for frequency sharing/interference analyses in the frequency range between 24.25 GHz and 86 GHz, WP5D Document 5D/TEMP/265(Rev.3)[S].
- [5] Recommendation ITU-R. Prediction procedure for the evaluation of interference between stations on the surface of the earth at frequencies above about 0.1 GHz: P.452[S].
- [6] Recommendation ITU-R. Prediction of clutter loss: P.2108[S].
- [7] Recommendation ITU-R. Detailed specifications of the terrestrial radio interfaces of international mobile telecommunications advanced (IMT-Advanced): M.2012[S].
- [8] Recommendation ITU-R. Characteristics of terrestrial IMT-Advanced systems for frequency sharing/interference analyses: M.2292[S].
- [9] CHEN X M, WU S E, SUN Y F, et al. Mobile data offloading techniques in 4G and 5G networks: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018.
- [10] UNAR I, SHEN Y L, RAZA R A, et al. Modelling and performance evaluation of LEO satellite networks[J]. IEEE Access, 2019.

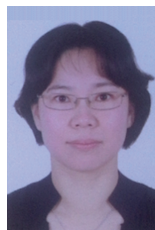
[作者简介]



赵冬 (1981—), 中国电信股份有限公司卫星应用技术研究院前沿研究团队负责人, 主要从事无线电频率与法规研究、干扰及兼容性技术、星地融合技术研究等工作。



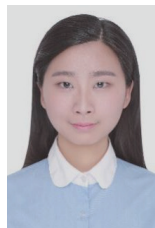
陈宏（1982—），中国电信集团卫星通信有限公司技术总工程师，主要从事卫星通信系统和中继卫星系统论证、建设、管理的总体技术工作。



李辉（1972—），北京羽寻科技有限公司创始人/总工程师，主要从事卫星无线电频率与轨道资源管理法规研究、无线电频率兼容共用技术与标准研究工作。



秦屹昂（1997—），中国电信股份有限公司卫星应用技术研究院工程师，主要从事频率兼容性分析与干扰仿真相关研究工作。



李文越（1995—），中国电信集团卫星通信有限公司工程师，主要从事卫星通信系统研究以及技术项目管理工作。