

频谱资源从占用到有效利用之路

李 辉

(北京羽寻科技有限公司, 北京 100191)

摘 要: 对当前卫星无线电频率申报、协调与投入使用工作中普遍存在的以频谱占用为主的现状和原因进行分析, 通过对当前卫星频率协调兼容性分析中的几个典型问题的具体研究, 得到如何提高卫星频率轨道资源有效利用的具体措施, 为卫星业务无线电频率有效共用提供发展思路和技术方法。

关键词: 频谱资源; 占用; 有效利用

中图分类号: TN393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2021006

From Frequency Spectrum Occupation to Efficiently Utilization

LI Hui

Beijing SpaceKey Technology Co. Ltd., Beijing 100191, China

Abstract: The situation and causes of satellite frequency occupation in the current satellite network filing publication, coordination and operation was analyzed. Through the specific research on several typical topics in the current satellite frequency coordination compatibility analysis, specific measures were proposed to improve the effective utilization of satellite frequency orbit resources, so as to provide the effective sharing of satellite radio frequency technical methods.

Keywords: frequency spectrum, occupation, efficiently utilization

1 引言

长期以来, 卫星频谱资源已经成为各国激烈争夺的稀缺性战略资源, 这种局面的形成, 既源于各行业发展对频谱资源不断增长的正常需求, 即高效利用, 也源于行业内外出于对其鲜明资源属性的认识而想尽办法囤积居奇, 即频谱占用。

2 卫星频率申报协调与使用的困境

当前卫星频率申报协调中普遍面临的困难, 即卫星网络资料铺天盖地, 实际特性扑朔迷离。这些资料, 在国际电信联盟无线电通信组 (ITU-Radio communication Sector, ITU-R) 频率申报协调程序的规则框架下, 拥有统一的技术文件格式和相似的技术参数特性 (同类业务系统), 若想通过ITU公布的这些卫星网络资料技术属性挖掘出其背后的申报动机、使用意图并预判其未来操作状态, 在过去几乎是一件不可能完成的任务。

然而, 技术是发展的。当前是媒体信息空间发达的

社会, 将数据挖掘、数据分析领域的算法应用于对卫星网络资料申报情况统计、分析、预测 (包括发现新的申报机会), 识别、规避协调风险、对未来申报态势进行预判等提供决策参考, 是近年来各国主管部门和研究机构都在积极开展研究的领域。长期以来, 通过人工搜集、筛选、分析各种卫星信息数据的工作模式已经在改变。

3 频率协调干扰分析中的几个典型问题

频谱效率一直以来是一个比较纯粹的技术问题, 通信理论、ITU各相关建议书中, “频谱效率”都有明确的定义和适用场景。但在频率协调干扰评估工作中, “频谱效率”的概念却很少出现, 这是因为现行规则决定了协调的直接目标是兼容共用, 而地位优先的操作者往往出于多方面考虑, 即使存在提高频谱效率的可能, 也不会为了协调对象主动采取措施, 通常只能由协调地位落后的操作者采取措施消除潜在干扰。由于很少能够得到地位优先协调方的配合, 往往需要寻求协调的一方尽一切可能找到与地

位优先系统的共用措施，这一过程中，后来者天然具有努力提高频谱效率的动力和责任。

3.1 静止轨道卫星通信链路不再“静止”，精算带来频谱效率提升

回顾频率协调的发展历程，静止轨道通信卫星的频率协调是历史最长、全球范围内开展最普遍的。通信卫星在轨数量/网络资料数量巨大，地球静止轨道（Geostationary Satellite Orbit, GSO）作为稀缺的自然资源，是各国发展通信卫星技术最早、最成熟的领域，在各种频率轨道资源中，卫星固定业务（Fixed Satellite Service, FSS）GSO的频率轨道资源算是刚需。

长期以来，GSO通信卫星频率协调工程师投入了巨大的精力进行相关卫星网络的频率协调。幸运的是，通过《无线电规则》相关条款与附录、《程序规则》、ITU-R S系列建议书，GSO通信卫星频率协调所需要的所有条件都基本具备。

但是近年来，随着FSS向更高频段发展，非地球静止轨道（Non-Geostationary Satellite Orbit, NGSO）FSS星座系统的引入，传统的GSO通信卫星的频率干扰协调方法已经越来越不能适应当前频率共用环境下的需要，以往那种静态的GSO通信链路分析方法不断被挑战，甚至被颠覆。

2019年ITU-R 4B工作组讨论的一个重点问题，就是采用自动编码调制（Adaptive Coding and Modulation, ACM）的卫星链路性能指标确定方法，并最终获得通过。

为了便于理解该建议书提出的方法对GSO通信卫星动态链路分析的影响，首先简单介绍该建议书的内容。

传统通信卫星链路（例如C频段）主要用于电话或低速率数据通信的持续链路，相对的空间传播衰减较小。而在当前双向卫星连接主要承载互联网流量的应用场景下，这些连接通常是不对称的，其主站通常使用TDM（Time-Division Multiplexing，时分复用）或时分多址（Time-Division Multiple Access, TDMA）技术实现速率传输，而用户站的传输速率远低于主站，并且具有较低的占空比。这种系统通常需要利用更高频段（例如Ku、Ka甚至Q、V频段），并且依赖于ACM以获得高频谱效率下的可靠吞吐量。

针对高频段卫星通信链路，由于雨衰（即功率补偿量）影响大（动态范围大，Q频段一般可达30 dB），需要通过自动编码调制和自动功率控制，对降水造成的链路衰减进行动态补偿，即通信卫星链路的 C/N 不再是一个确定的值，而是随雨衰变化。当然，这种补偿不是雨衰有多大，就补偿多少，而是尽量保持链路通连的前提

下，满足既定的误码率即可。此时总的系统吞吐量会有一定程度的下降，即吞吐量下降可以与频谱效率（ C/N 的函数）相关。利用这个假设，吞吐量可以计算为 C/N 的函数， C/N 随传播和干扰条件而变化。

由于现有的误码性能相关的建议书（例如，建议书ITU-R S.1062-4）只针对恒定比特率的参考链路，因此不适用于使用ACM技术的系统。ACM的一个重要特征是，各种调制编码模式的误码率特性相对于 C/N 表现出快速的下降，其中 N 是链路中的总噪声，包括热噪声和干扰。对于给定的调制编码状态，例如， 1×10^{-8} 的工作误码率和 1×10^{-3} 的严重退化误码率之间的 C/N 差约为0.25 dB。

为此需要为采用ACM的通信卫星链路建立一个新的干扰评估指标：吞吐量，即衡量通信卫星链路受到的干扰影响导致吞吐量恶化，当恶化超过一定程度，则认为干扰是不可接受的。具体的方法可以概况为以下3个步骤。

（1）确定被干扰卫星链路参数

这些参数项包括：

- ①调制编码模式，例如：16 APSK、77/90；
- ②信道调制速率，例如：34 megabaud/s；
- ③每包字节数，例如：188 byte。

（2）确定干扰对性能的影响

每个通信卫星系统应提供自己 C/N 对应的系统可用度要求。以下是美国佛罗里达州南部一个典型的工作于38.5 GHz频段的通信卫星链路使用DVB-S2X的示例。当仅考虑雨衰时，使用ITU-R P.618的模型，可以计算出在平均年份中超过一定时间的 C/N 值。例如 C/N 低于-4.69 dB的时间不得超过0.4%，系统可用度为99.6%（即99.6%的时间 C/N 都大于-4.69 dB，此时链路恶化最大29.413 dB）； C/N 低于17.879 dB的时间不得超过5%，即95%的时间 C/N 都大于17.879 dB，此时链路恶化最大6.849 dB；以此类推。

假设由于外部其他系统的干扰导致该链路性能恶化，可容忍的恶化裕度为1 dB，衰减将导致0.4%的系统不可用，相当于99.6%的可用度。上述链路的衰减动态范围近30 dB，如图1所示。

（3）计算吞吐量恶化率

使用以下公式分别计算不同 C/N 对应时间概率下的频谱效率

$$\eta(\gamma)=0.593\ 3+0.141\ 5\gamma+0.009\ 6\gamma^2, \quad -5 \leq \gamma < 0 \quad (1)$$

$$\eta(\gamma)=0.593\ 3+0.138\ 8\gamma+0.003\ \gamma^2, \quad \gamma \geq 0 \quad (2)$$

使用以下公式分别计算不同 C/N 对应时间概率下的吞吐量恶化率

$$MAT_{\text{put}} = \text{Maximum Channel Rate}(\text{bit/s}) \times \text{Time}(\text{s}) \quad (3)$$

$$DT_{\text{put}} = \sum \text{Channel Rate}(C/N)_i(\text{bit/s}) \times \text{Time}_i(\text{s}) \quad (4)$$

$$LT_{\text{put}} = MAT_{\text{put}} - DT_{\text{put}} \quad (5)$$

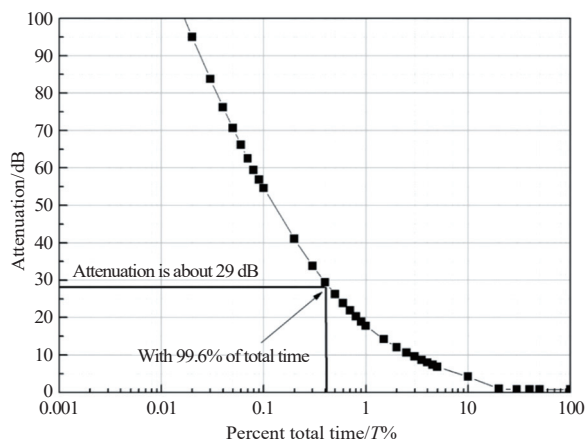


图1 使用ACM卫星链路（美国南佛罗里达州区域）传播损耗衰减统计示例

$$\%DT_{\text{put}} = LT_{\text{put}} / MAT_{\text{put}} \times 100 \quad (6)$$

其中， MAT_{put} 为最大吞吐量； DT_{put} 为提供吞吐量； LT_{put} 为下降吞吐量； $\%DT_{\text{put}}$ 为吞吐量恶化率。

步骤（2）示例中的频谱效率和吞吐量恶化率的计算结果如图2所示。

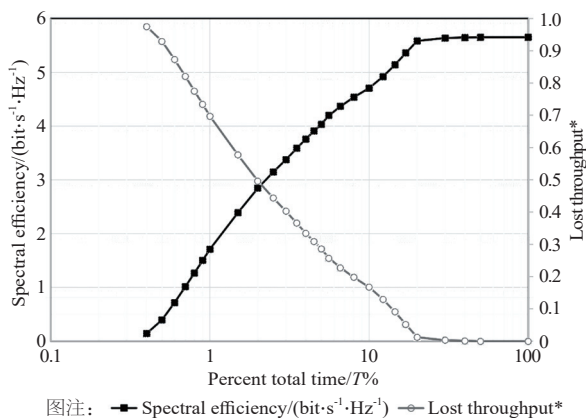


图2 使用ACM卫星链路（美国南佛罗里达州）的频谱效率和损失吞吐量统计结果示例

频谱效率低于0.141的时间不超过0.4%，吞吐量下降到0.975；不超过1%的时间频谱效率低于1.707，吞吐量下降到0.698，以此类推。

通过上述方法，通信卫星链路以不同时间百分比的吞吐量的下降率为干扰保护标准。与传统 C/I 、 $\Delta T/T$ 等指标参数最大的不同在于该方法中干扰保护标准不再是单一的、固定的值。例如引入链路恶化超标概率的概念，即链路指标恶化（该方法中为吞吐量）超一定限值的时间百分比不得超过多少，以链路性能恶化程度和时间占比两个维度衡量系统受到干扰的程度。

由于该建议书并未限制适用的通信系统轨道特性，显然，采用ACM编码调制体制的GSO卫星系统也是适用的。2020年8月俄罗斯在WP4A CG关于WRC-1.2议题C频段全球移动通信系统（International Mobile Telecommunication, IMT）与卫星系统的共存研究卫星系统参数的输入文稿中，就提出采用ACM编码调制体制的GSO卫星系统应考虑采用ITU-R S.2131-0建议书的方法。

显然，采用超标时间概率的干扰保护标准比传统那些简单、单一、固定的干扰指标计算方法要复杂得多，但由于其能够反映实际卫星系统的动态链路特点，对其他同频系统干扰的评估更准确，从而提出的保护要求更合理，客观上有利于提高卫星频谱效率，并将成为一种频谱共用技术发展趋势。静止轨道链路从来都不是静止的，只不过在当前更高频段、更多NGSO系统共用的环境下，让这个问题变得空前敏感。

3.2 极化隔离度在频谱效率提升中的用武之地

ITU给出的建议书针对GSO卫星系统、距离较近的卫星链路间计算干扰时考虑不同链路间极化隔离度；但在GSO FSS系统间协调时，一般不考虑极化隔离度的影响。原因有几个：一是，绝大多数通信卫星转发器的设计都是双极化的，很少存在双方极化方式相反的情况，出于最坏条件的协调原则的考虑，没有必要计算这种几乎不存在的场景，直接按双方信号同极化的最坏情况处理；二是，当GSO位置间隔不是特别近，尤其是当双方地球站的地理位置可能使得干扰信号和被干扰信号链路产生较大的隔离角时，双方信号不再以正交极化的方向同时进入接收天线，即两个正交极化信号由于入射方向不同导致极化隔离度不再是正交的，这时很多操作者会选择使用《无线电规则》附录8提供的极化隔离度，具体见表1。

表1 《无线电规则》附录8极化隔离度

极化		极化隔离度（数值比） γ
卫星网络R	卫星网络R'	
LHC	RHC	4
LHC	L	1.4
RHC	L	1.4
LHC	LHC	1
RHC	RHC	1
L	L	1

其中，LHC（Left Hand Circular）为左旋圆极化（逆时针）；RHC（Right Hand Circular）为右旋圆极化（顺时针）；L为线极化

针对同样的天线，交叉极化隔离度（Cross-Polarization Discrimination, XPD）通常可达30 dBi；即使对于典型的圆极化天线，也可以达到27 dBi。但考虑干扰与被干扰信号入射角度的差异，除极端情况下（干扰信号与被干扰信号极化角趋近于0），极化隔离度无法达到上述理想状态；并且随着极化角增加而在相当大的范围内动态变化，使干扰分析变得烦琐，因此目前的卫星系统兼容性分析中很少考虑计划隔离因素。

GSO FSS系统间的协调尚且如此，当前NGSO系统间的干扰分析由于复杂星座动态干扰的引入，本来的干扰场景就十分复杂，卫星位置动态变化，干扰信号在被干扰站方向的增益、干扰信号到达被干扰站的距离、被干扰站在干扰信号方向的增益都在动态变化，同时还要考虑双方系统星站链路不停切换和链接。针对特定地球站干扰信号可见/不可见与被干扰信号可见/不可见多种组合状态形成不同干扰模式，如果再考虑极化隔离度的影响，无疑会进一步增加计算的复杂性。但是，这种复杂性不是白白付出的，它能换来的不仅是计算的准确性，还有解决NGSO系统同频干扰的有效措施。

涉及NGSO星座系统的典型干扰场景可以分为NGSO与GSO间共用、NGSO星座系统间共用。以当前典型的Ka星座为例，考虑到Ka频段通信（包括GSO和NGSO）通常都采用一定的星上处理，因此在链路分析中可分别考虑上行同频干扰模式和下行同频干扰模式，而一般不需要考虑整个链路的效应。任何NGSO卫星系统对GSO卫星系统同频共用的干扰模式（同频同向情况下）如图3所示。

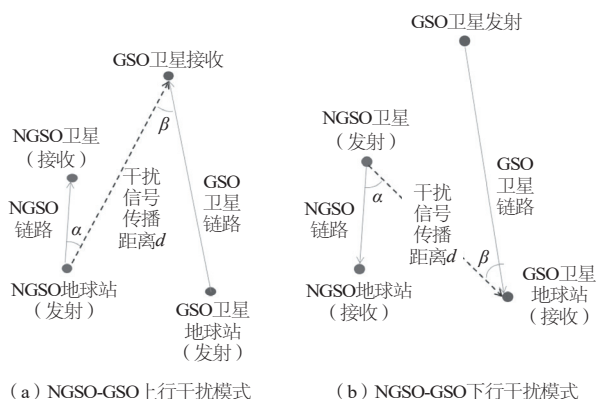


图3 NGSO卫星系统对GSO卫星系统同频共用的干扰模式（同频同向情况下）

由于GSO系统星站空间位置相对固定，信号传播路径特性也基本不变，所以传输同样的载波（C/M门限、

带宽、频率）所需的能量是一定的。当保持GSO链路有用信号功率不变，即C不变的情况下，影响干扰程度的主要因素包括：

- （1）干扰信号发射天线在被干扰信号接收方向的旁瓣特性 α ；
- （2）被干扰信号接收天线在干扰信号发射方向的旁瓣特性 β ；
- （3）干扰信号到被干扰信号接收端的传播距离 d 。

无论哪种模式，当被干扰链路功率特性不变时， α 、 β 、 d 越小，干扰越严重，即干扰通常发生在干扰系统星站与被干扰系统星站间夹角较小的情况下。

分析至此，极化隔离在NGSO星座系统频率共用中的潜在贡献已经呼之欲出。当干扰与被干扰系统双方采用正交极化时，干扰越严重的场景（ α 、 β 、 d 较小）下，隔离度越好，即此场景下考虑极化隔离度对频率共用的评估结果影响重大；反之，在干扰不太容易超标的场景（ α 、 β 、 d 较大）下，干扰信号与被干扰信号的极化隔离度反而会由于信号极化角较大而深度恶化，即极化隔离度严重下降，乃至对干扰的评估优化作用十分微弱。

极化复用本来就是频率复用的一种经典技术，是提高频谱效率的一种传统手段。为什么在NGSO星座发展中频率资源竞争如此激烈的整体环境下，极少有人提及这种极化复用技术呢？原因无非是以下两点：

- （1）双方系统极化复用设计方案无法通过公开渠道准确获知；
- （2）干扰信号和被干扰信号极化角动态变化，计算复杂。

对于信息渠道问题，频率协调工程师自然有自己的应对方法，有条件的调研实际特性，没条件的使用网络资料特性，也可以通过合理假设加适当穷举，得到相应条件下的分析结果。需要说明的是，输入条件对于分析结果的影响是决定性的，任何技术分析，不管是理论推导，还是仿真建模得到的分析结果，都必须以特定的输入边界条件为前提。

对于极化角动态变化的计算问题，如同计算地球站仰角、信号自由空间损耗和C/I或I/N等链路指标一样，极化角本身的计算并不复杂，其动态特性主要是由于卫星位置的实时变化引起的。对于大规模星座系统的仿真计算，无非是再引入几个变量，不会对整个星座的仿真计算造成本质影响。

当然，要实现NGSO系统干扰分析中关于极化隔离特性的影响，有许多问题需要考虑解决。例如：在被干扰系统使用线极化、椭圆极化等极化轴比不为“1”的情况下，还需要考虑极化面旋转的仿真实现，从通用性角

度出发再多引入一个变量是不可避免的。

另外,高频段通信链路中雨衰的影响不可忽略,因此雨衰(包括云、冰、电离层法拉第旋转等因素)导致的通信信号去极化效应需要适当考虑。

毫无疑问,这些因素都将使NGSO星座的干扰评估更加复杂。但如果这些因素的引入对系统间频率共用,提高整体频谱效率是有益的,在当前十分成熟的云计算平台的硬件环境下付出一些计算复杂度的代价自然是值得的。国内已有相关单位提出这方面的算法乃至专利,用以解决大规模星座链路参数仿真的问题。

3.3 基础算法是干扰分析有效提升频谱效率的核心

20世纪90年代以铱星为代表的第一轮星座热潮中,关于低轨通信星座频率兼容性的研究就已经开始并快速成熟起来。现行关于NGSO星座系统频率共用的规则和技术成果,包括《无线电规则》22条的最初版本,都是在WRC-1995/1997/2000年期间形成的,著名的Visualyse Professional干扰仿真软件系统也是当时研究的产物。

多年来,在无线电频率轨道资源的基础研究方面,我们始终在卫星网络资料申报、协调的传统领域深耕细作。当星座系统大规模仿真分析的实际需求摆上桌面时,我们才发现,缺少一样重要的东西,即自主的、适用的频率兼容性仿真分析软件工具。

于是,政府相关主管部门、各研究机构、各卫星操作者,都在想尽办法通过各种渠道,筹集资金、设立项目鼓励、推动自主频率兼容性软件的开发研制。当前业内已经形成了一些共识,比如:

(1) 这将是一个行业通用软件,能满足NGSO星座系统、GSO卫星和地面业务间的兼容性分析;

(2) 这将是一个针对大规模星座的高效仿真系统,要区别于以往的软件工具针对具体场景、典型链路分析的开发思路;

(3) 这将是一个实用的、既满足ITU相关协调要求又满足实际星座系统技术操作特性的软件,不能过于理想化,更不能过于简化。

以WRC-23 1.2议题IMT与卫星C频段共存研究的卫星系统短时干扰保护标准要求 I/N 超过-6 dB的时间概率不超过0.000 4%为例。

本文不讨论该保护标准的合理性,只讨论对于这样的干扰保护标准,需要设置的仿真时长为多少。

假设:

(1) 总仿真时长60天,仿真步长1 min(总计86 400样点);

(2) 被干扰系统有效工作时间82 060 min(近95%的

时间在工作);

(3) 被干扰系统对干扰系统可见50 000个样点,超标样点1个。

得到超标概率 $=1/82\ 060=0.001\ 2\%$,超过0.000 4%保护标准。

这个结果正确吗?从数据上看,当然是正确的。但是稍微运用统计学基础就明白,0.000 4%的保护标准意味着,每250 000个样点中只允许一个点超标;当仿真样点数不足250 000个时,只要出现一个超标点,就会导致结果超标;但实际上,如果仿真样点数达到250 000个甚至更多,超标点数仍旧为1个时,则仿真结果不超标。

这就是说,仿真时长的选择不能过分随意,至少其中一个条件是与干扰保护标准所需的基本样点数相关。通常情况下,为了让结果能够充分反映统计概率,需要让有效样点数达到干扰保护标准时间的2~10倍。上例中,干扰保护标准为0.000 4%,需要的有效样点数至少为500 000个,即被干扰系统有效工作时长为500 000 min,如果仿真步长为1 min,同时被干扰系统有效工作时长可以达到总仿真时长的95%,则仿真时长应该设置为365.5天。

通过以上简单的举例可以看到,简单满足仿真功能的软件开发容易实现,但想真正有效解决兼容性分析中的问题,准确反映、认识、理解兼容性技术状态,不是软件本身能解决的,需求对频率干扰本身的产生机理、干扰模式、干扰保护指标的依据和根源研究透彻,才能得到有效的结果,真正用于星座设计、协调和使用。

3.4 小结

(1) 在变化中寻找机会

长期以来,基于ITU相关规则和建议书技术标准的协调方法一旦形成则很少改变,传统方法中卫星操作者能够找到的解决干扰问题的技术措施非常有限。只有当新业务、新应用出现时,伴随新的兼容性分析场景提出,或新的技术准则的提出,才有可能引入新的机制和方法。正是从这一点认知出发,新业务、新应用出现带来的干扰模式、兼容性评估方法的任何细微变化,都可能帮助我们探寻卫星系统间频率兼容性可能的技术措施。

(2) 精确分析成为必须

有经验的卫星频率协调工程师都知道,双方系统间的频率兼容性取决于很多技术特性,特别是针对复杂通信系统,双方系统的载波特性和星座构型、地球站位置、频率复用、天线方向性等,都会在干扰分析中起一定作用,调整任何一项参数,都能改变分析结果。例如,降低干扰信号功率永远是最直接、有效的减缓干扰的措施,但在多数情况下,操作者需要在兼顾卫星系统

性能与功能要求的前提下采取措施减缓干扰，这些措施往往不宜单独改变某一项参数，而是多个关联参数组合形成的最终效果。虽然这种组合的尝试必然会带来巨大的工作量，但这意味着以尽可能小的系统约束实现频率安全共用，这个代价是值得的。

4 结束语

促进无线电频谱资源“合理、公平、有效、经济适用”，始终是无线电工作者追求的目标和责任。全球范围内空间业务领域，特别是星座互联网等复杂系统空前繁荣的发展环境带来了迎头赶上、弯道超车的历史机遇，而当前逆全球化的国际形势也带来了自主创新、夯实基础研究上的挑战。

无线电频谱轨道资源作为一种稀缺的自然资源和发展国家航天项目的前提条件，需要将以占用为特征的争夺策略和高效利用为最终目的的实用技术相结合，“大处着眼，小处着手”，回归技术本质，通过透彻的研究逐步奠定扎实的基础，争取并获得合理的频谱使用权益。

参考文献：

- [1] ITU. Estimation of polarization discrimination in calculations of interference between geostationary-satellite networks in the fixed-satellite service : ITU-R S.736-3[S].1997.
- [2] ITU. Method for the determination of performance objectives for satellite hypothetical reference digital paths using adaptive coding and modulation: ITU-R.S.2131-0[S]. 2019.
- [3] ITU. Radiation diagrams for use as design objectives for antennas of earth stations operating with geostationary satellites: ITU-R S.580-6[S]. 2003.
- [4] ITU. "Radio Regulations"Appendix 8[Z]. 2016.

【作者简介】



李辉（1972-），北京羽寻科技有限公司研究员，主要研究方向为无线电频率规则和频率技术。