

星地混合移动回传系统的干扰规避和减缓技术

张晓燕¹, 王 贺²

(1.国家无线电监测中心, 北京 100037;

2.国家无线电监测中心检测中心, 北京 100041)

摘要: 为了更有效地利用稀缺的频谱资源, 最好的办法之一是让卫星和地面共享频谱。考虑在星地混合移动回传系统中加入诸如天线阵列、多天线通信技术、智能回传节点、干扰感知功率分配和授权共享访问等干扰规避和减缓技术来阐述如何增强系统容量且无干扰地共享频谱。通过对所提系统的理论分析和数值仿真, 说明使用上述干扰规避和减缓技术可以达到满足未来回传网络容量需求、减轻地面传输负担、减轻同信道间干扰、节省硬件成本、降低能耗以及改善频谱使用效率的目的。

关键词: 星地混合网络; 移动回传系统; 干扰规避; 干扰减缓; 频谱共享

中图分类号: TN927

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2021004

Interference Avoidance and Mitigation Techniques for Hybrid Satellite-Terrestrial Mobile Backhaul System

ZHANG Xiaoyan¹, WANG He²

1. The State Radio Monitoring Center, Beijing 100037, China

2. The State Radio Monitoring Center Testing Center, Beijing 100041, China

Abstract: One of the best ways is to assume that satellite and terrestrial segments share the same spectrum in order to utilize more efficiently the scarce and expensive spectrum resource. The interference avoidance and mitigation technologies such as antenna arrays, multi-antenna communication technologies, intelligent backhaul nodes, interference-aware power allocation method, and licensed shared access (LSA) were deployed in a hybrid satellite-terrestrial mobile backhaul (MBH) system to demonstrate how to enhance the overall capacity of the hybrid system and reuse the spectrum at different systems on a noninterfering basis. Through theoretical analysis and numerical simulations, it is observed that these interference avoidance and mitigation techniques mentioned above could be used efficiently to meet the enormous capacity demands of future backhaul networks, off-load the terrestrial segment, manage intrasystem (terrestrial) and the intersystem (satellite-terrestrial) co-channel interference (CCI), lead to hardware costs and energy-consumption savings, and improve spectrum utilization efficiency.

Keywords: hybrid satellite-terrestrial network, mobile backhaul system, interference avoidance, interference mitigation, spectrum sharing

1 引言

随着用户对随时随地无缝访问高清电视、交互式多媒体和宽带互联网接入等期望的不断提升, 在可见的未来由于视频数据等的传输, 移动数据流量会呈指数增长^[1-3], 尤其是下行链路, 从基站发射到用户终端 (User Terminal, UT) 接收的链路容量更是增长迅速, 但用于蜂窝接入和其他远程无线通信的6 GHz以下无线电频谱非

常稀缺。为了满足系统的容量需求, 有以下措施: 一是利用厘米波段 (3~30 GHz) 和毫米波段 (30~300 GHz) 的丰富可用频谱^[1-2, 4-5]; 二是利用诸如先进的大规模多输入多输出 (MIMO) 技术等实现无干扰地重用频谱^[1-2, 6]; 三是通过部署超密集网络实现在整个服务区域中积极地重用可用频率^[1-3, 7]; 四是将一部分系统容量分流到卫星、Wi-Fi等网络中, 从而达到增强系统容量的目的^[1, 8]。

收稿日期: 2021-01-10; **修回日期:** 2021-03-03

基金项目: 国家重点研发计划 (No.2020YFB1807900)

Foundation Item: The National Key R&D Program of China(No.2020YFB1807900)

对移动通信系统容量的巨大需求给移动回传 (Mobile Backhaul, MBH) 带来了沉重的负担^[1-3]。为了避免容量需求和现有回传容量供给间存在的矛盾, 可通过采用增强系统容量的技术和采用新颖的网络架构来解决。卫星通信因其更高的性价比, 可补充地面通信不足的能力, 为更广泛的地理区域 (包括农村、交通不便的地方以及城市、郊区) 终端用户提供电信服务, 在无线通信领域发挥着至关重要的作用。卫星回传是为那些很难部署铜缆和光纤等有线回传设施的区域, 或由于成本和实施问题移动运营商无意部署有线或地面无线回传的区域, 或需要紧急部署回传的区域 (如救援和救灾等) 提供电信服务的理想解决方案。与地面回传相比, 卫星回传不仅可以降低架设基础设施的成本, 而且还可以作为地面回传链路的备用解决方案, 用于在地面链路出现故障或在具有高流量需求的地方/事件中实现负载均衡。尤其是新兴的高通量卫星 (High Throughput Satellite, HTS) 系统和非对地静止轨道 (Non-Geostationary Orbit, NGSO) 卫星星座可从架构角度整合卫星和地面系统, 从而使卫星通信系统成为通信接入网的活跃部分而不是地面通信系统的另一个透明回传媒介。为了实现此目的, 将软件定义网络 (Software Defined Network, SDN) 和网络功能虚拟化 (Network Functions Virtualization, NFV) 的概念引入星地融合系统中。设想将现有的、基于硬件的系统设计和实现, 彻底转向软件化, 用基于SDN和NFV的这些解决方案, 实现灵活和自适应的星地融合通信系统, 满足终端用户多样化的服务质量 (Quality of Service, QoS) 要求^[1-3,8]。

为了满足系统容量需求, 实现星地融合通信, 最需要解决也是比较有挑战的方面是让卫星和地面共享同一频谱。由于卫星段和地面段需要共享频谱, 必然会导致同信道干扰 (Co-Channel Interference, CCI) 的出现。为了避免和减缓混合星地移动回传系统中的同信道干扰, 本文通过在星地混合移动回传系统中加入天线阵列、多输入多输出天线、智能 (感知) 回传节点、干扰感知功率分配和授权共享访问等技术, 然后通过仿真分析说明这些技术不仅可以明显地改善混合星地移动回传网络中的同信道干扰, 而且同时还可以增强系统的整体容量。

2 混合星地移动回传系统

本文研究的混合星地移动回传系统如图1所示。从网络架构角度来看, 这种混合移动回传网络除了常规的、连到地面基站的地面回传节点 (Backhaul Node, BN) 外, 还配备了一些智能混合回传节点。这些智能混合回传节点既具有与地面通信的能力也具有与卫星通信的能

力。此外, 这种混合MBH网络还需要一个用于确定路由流量和星地MBH负载均衡的混合网络管理器 (Hybrid Network Manager, HNM)^[8], 即HNM基于智能混合回传节点收集的相关信息和要求的服务质量策略, 计算拓扑路由, 从而优化MBH网络上的流量传输 (如吞吐量、时延和数据包错误率等QoS指标), 并增强系统的弹性。HNM做出决策后会直接返回智能混合回传节点; 智能混合回传节点随后会根据这些决策采取相应的对策, 如利用具有多波束的高通量卫星, 将一部分地面回传流量分流到卫星段。为了集成不同的模块, HNM可配备各种接口, 如外部无线电资源管理模块和干扰分析模块。这些接口都可进行实时分析和功能, 并且允许以自主的方式直接执行操作。

图1的混合MBH系统中使用了天线阵列和单用户多输入多输出 (Single User Multiple Input Multiple Output, SU-MIMO) 通信技术, 以适应密集小小区中经常存在的非视距 (Non-Line-of-Sight, NLOS) 传播环境。天线可放置在街道 (如灯柱上), 而且相对于用户终端这样的小尺寸设备, 在BN上装配几副天线也相对容易。使用负载控制寄生天线阵列 (Load Control Parasitic Antenna Array, LC-PAA) 可对天线辐射方向图 (波束) 进行自适应赋形和控制, 如此才可灵活动态地建立或重新配置链路, 从而执行HNM做出的路由决策。负载控制寄生天线阵列利用了天线元件的互耦, 使得寄生元件拥有额外有效的自由度, 从而可以更好地控制波束赋形操作, 即在达到特定的阵列自由度目标数量下, LC-PAA具有比数字天线阵列更少的射频单元^[1,9]。所以, 可以用最小的附加成本换来性能的提高, 或可以在给定性能下节省成本和能耗。

下面将对图1的场景进行分析建模。

2.1 SU-MIMO信号和干扰建模

对于图1中的星地混合移动回传使用场景, 考虑到

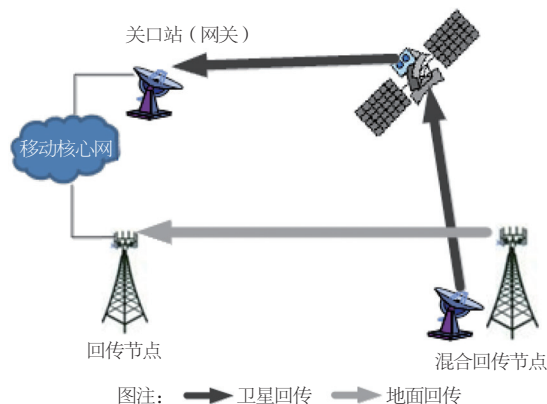


图1 星地混合移动回传系统示意

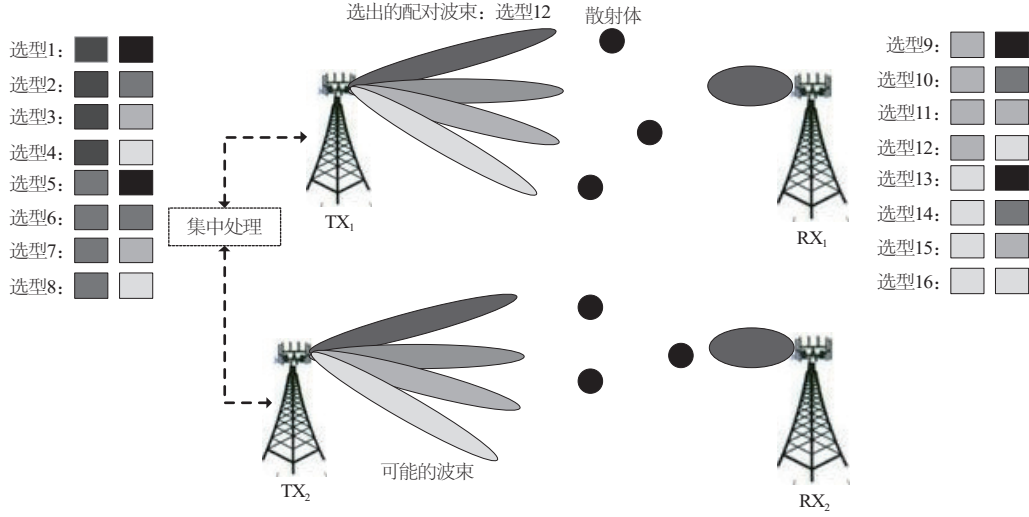


图2 配备有LC-PAA的两个发射和两个接收地面回传节点组成的协作多点系统示意

SU-MIMO设置中混合回传节点的两种（地面和卫星）节点位于同一位置，并在同一频带上运行。设混合回传节点和卫星间的链路由 TX_A-RX_A 表示，混合回传节点和地面基站间的链路由 TX_B-RX_B 表示，每个地面发射机和接收机都配备了负载控制寄生天线阵列，可在每个时隙中生成4种可能的波束模式之一。如图2所示，共16种组合。卫星发射机（Transmitter, TX）天线为10 dB增益的喇叭天线，地面接收机（Receiver, RX）天线为30 dB增益的碟形天线。选择使用哪组最佳波束组合，由TX节点基于RX节点的信干噪比或反馈的信道状态信息决定。LC-PAA借助低成本数字控制电路来调节寄生负载的阻抗，从而控制天线的电流幅度和相位，使得我们可以根据需要在阵列天线的能力范围内动态地调整和控制天线的远场辐射方向图。

接下来，通过地面回传链路来建模使用了MIMO天线可能产生的信道干扰，如图3所示。首先需要对每个链路的信号进行建模，假定链路1的TX由 k 个天线元（有源）组成、RX由 l 个天线元组成，而链路2的TX由 m 个天线元、RX由 n 个天线元组成。则链路1的RX接收到的信号可被建模为

$$y_1 = H_1 s + H_{21} x + n \quad (1)$$

链路2的RX接收到的信号为

$$y_2 = H_2 x + H_{12} s + v \quad (2)$$

链路1和链路2的传输信号分别用均值为零的复高斯分布 $s \in \mathbb{C}^k$ 和 $x \in \mathbb{C}^m$ 表示。从第 j 个TX天线元到第 i 个RX天线元的信道增益表示为 h_{ij} ，因此对于图3中的信道增益，有 $H_1 \in \mathbb{C}^{l \times k}$ 、 $H_2 \in \mathbb{C}^{n \times m}$ 、 $H_{21} \in \mathbb{C}^{l \times m}$ 和 $H_{12} \in \mathbb{C}^{n \times k}$ ，并假定

它们是固定和频率平坦的。另外，假定噪声 $n \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_n^2 I_n)$ 和 $v \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_v^2 I_n)$ 是加性白循环复高斯过程，且信号和噪声均互不相关。

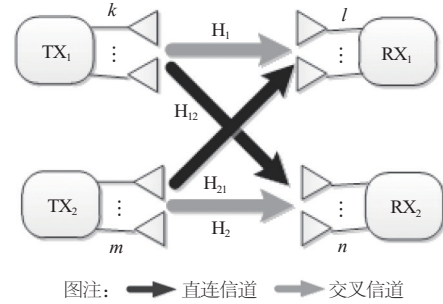


图3 两个并置MIMO链路和相应的直连及交叉信道示例

对于星地混合回传链路，假设链路1是地面回传链路，配备了 4×4 MIMO全向天线，即 $n=4, m=4$ ， TX_1 和 RX_1 之间的距离为500 m；链路2为对地静止轨道（Geostationary Orbit, GSO）单输入单输出（Single Input Single Output, SISO）卫星回传链路，即 $k=1, l=1$ ； RX_1 与 RX_2 并置，且 RX_2 的位置比 RX_1 高10 m。

2.2 授权共享访问建模

授权共享接入（Licensed Shared Access, LSA）是依据一组通用的、达成了共识的频谱使用规则或条件协议，允许持有LSA牌照的网络运营商在没有运营商（或其中一部分频段没有运营商）使用该频段的情况下，访问和使用此频段。采用LSA的目的是使该频段的卫星和地面

系统都可以无干扰地受控共享使用。还有另一种非授权共享方式,即在不干扰主要用户(Primary User, PU)的前提下,次要用户(Secondary User, SU)以不保证服务质量的方式接入预留频谱。不论哪种共享方式,都是一方面可以节省当前业务使用的频谱,另一方面也可以从当前业务(运营商)占用的频谱中挤出适用于其他业务(运营商)的频谱,从而极大地提高频谱的使用效率。

实施授权共享接入的框架和方法如图4所示。首先,需要识别现有业务(用户)的使用场景和使用模式。本文通过频谱数据库技术来获得频谱认知。频谱数据库方法的基本原理是,在任何频带中直到SU可以从数据库成功获得它打算使用频谱的信道信息后,才有可能允许SU接入预留频谱。完成第一步对现有业务或用户的识别后;第二步根据现有业务的技术特点和保护标准,进行干扰分析以确定SU需要遵守的共享规则和条件,此步是授权共享接入方法的核心。详细的干扰特性还可用于研究在SU上如何部署干扰缓解技术。第三步和第四步分别是,如果SU满足共享规则和条件即可授权其共享使用频谱,并对加入后的频谱使用情况和兼容性进行监测。

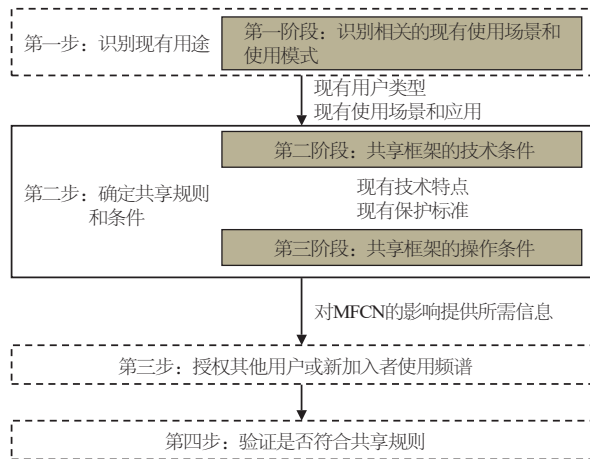


图4 实施LSA的框架和方法

下面对PU为固定业务(Fixed Service, FS)台(站)、SU为卫星固定业务(Fixed Satellite Service, FSS)地球站的共存场景进行建模。假定它们共享17.7~19.7 GHz频段,共享该频段的主要目的是增加系统的容量。由于地面系统会干扰卫星上行链路,因此在上行链路中进行频谱共享更具挑战性。17.7~19.7 GHz为FSS系统前向链路所用频率,在此频段中的地面系统大多是地面微波链路。由于信号间存在空间隔离,可利用动态载波和干扰感知功率分配技术增强次要用户的服务质量。按照图4的步骤,首先获得地面业务部署数据库。理想情况下,该数据库应包含有关FS

台(站)的位置、天线高度、天线尺寸和峰值增益、天线指向、传输功率、载波频率、占用带宽以及业务类型、系统为点对点(Peer to Peer, P2P)或点对多点(Point to Multipoint, P2MP)部署等信息。

通过图5的干扰分析框图,确定来自合法用户和对合法用户产生的潜在干扰电平。接收机接收到的干扰功率 P_I 为

$$P_I = \sum_{n=0}^{N_I} \text{eirp}_{\text{TX}}(n) - G_{\text{TX},\text{max}}(n) + G_{\text{TX}}(n) + L_{\text{path}}(n) + G_{\text{RX}}(n) + B_c(n) \quad (3)$$

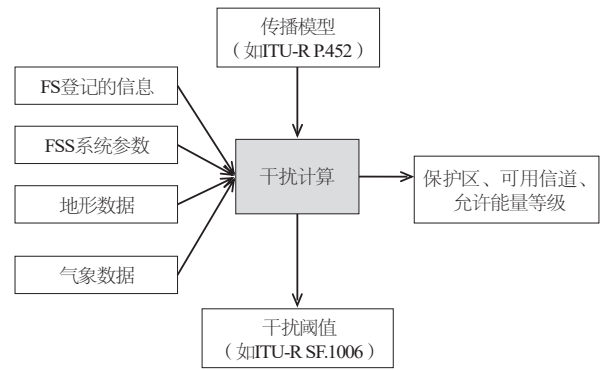


图5 FS-FSS共享频谱的干扰分析框图

其中, P_I 是接收机接收到的干扰功率,单位为dBW/MHz; N_I 是干扰源的数量; $\text{eirp}_{\text{TX}}(n)$ 是发射机的等效全向辐射功率,单位为dBW/MHz; $G_{\text{TX}}(n)$ 是干扰源在接收机方向上的天线增益,单位为dBi; $G_{\text{TX},\text{max}}(n)$ 是干扰源的最大天线增益,单位为dBi; $L_{\text{path}}(n)$ 是干扰源和接收机间的路径损耗,单位为dB; $G_{\text{RX}}(n)$ 是接收机在干扰源方向上的天线增益,单位为dBi; $B_c(n)$ 是附加的校正因子,用以表示干扰源和接收机占用带宽不完全重叠时的校正,单位为dB。本文使用最坏情况,即被干扰带宽和干扰载波带宽完全重叠, $B_c(n)=0$;FSS前向链路只考虑经历了自由空间损耗。

将ITU-R F.699^[10]、ITU-R F.1245^[11]和ITU-R F.1336^[12]建议书中的天线方向图分别用于点对点地面固定业务台(站)和点对多点固定业务台(站),ITU-R S.465建议书^[13]中的天线方向图用于FSS地球站。路径损耗模型采用ITU-R P.452建议书^[14]中的定义,并将其简化为仅考虑短链路距离和最坏情况的干扰条件,即路径损耗可写为

$$L_{\text{path}} = 92.5 + 20 \lg f + 20 \lg d + L_d(p) + A_g + A_h + E_{\text{sp}}(p) \quad (4)$$

其中, f 是频率,单位为MHz; d 是路径长度,单位为km; $L_d(p)$ 是衍射损耗,单位为dB, p 表示未超过计算的基本传输损耗的时间百分比; A_g 是总气体吸收量,

$A_g = [\gamma_0 + \gamma_\omega(\rho)]$, 单位为dB, γ_0 和 $\gamma_\omega(\rho)$ 分别是干燥空气和水蒸气导致的特定衰减^[15], ρ 是水蒸气密度, 单位为 g/m^3 , ω 是含水蒸气总路径的一部分, 单位为 km ; A_h 是修正的高度因子, 单位为dB, 表示包含在本地地物杂波中的天线附加衍射损耗, 使用ITU-R P.526建议书^[16]中所述的球形地球模型来考虑衍射损耗; $E_{sp}(p)$ 是对应百分比 p 时, 修正的多径效应和聚焦效应, 单位为dB。

3 仿真计算

分别针对上节中设置进行数值仿真计算, 评估加入干扰规避和减缓策略后, 系统容量的变化以及频率共享成功的概率。

3.1 SU-MIMO设置

为了对SU-MIMO设置进行数值评估, 进行了两组实验。第一组考虑两个 3×3 MIMO的地面回传链路。第二组考虑星地混合移动回传链路。假定所有回传链路均在19 GHz频率下工作, 信号在窄带上传输, 信道为瑞利衰落且干扰约束值为 P_I , 运行10 000次蒙特卡罗仿真后求平均, 得出仿真结果。地面链路的TX和RX处均为阵列天线; 而卫星链路的TX为具有10 dB增益的喇叭天线, 地面RX (FSS地球站) 为具有30 dB增益的碟形天线, 卫星链路收发天线间的路径损耗简化为自由空间损耗。本文将比较从标准注水功率分配算法^[11]得出的上述两种设置的系统容量, 并针对各种干扰约束值评估容量的损耗百分比。此外, 还评估了各种干扰门限的累积分布函数 (Cumulative Distribution Function, CDF)。

首先来看在地面回传链路中加入SU-MIMO天线阵列、干扰感知功率分配后, 链路容量的变化情况。

3.1.1 地面回传链路

假定地面回传链路为两路 3×3 MIMO (即图3中的链路1和链路2的 $n=3$ 、 $m=3$ 、 $k=3$ 、 $l=3$), 链路2为干扰链路, 需要使链路1的容量最大化。

通过仿真计算发现, 对于不受干扰约束的链路1 (未考虑干扰约束), 即 $P_I = \infty$, 采用标准注水法得出的链路平均容量为 $2.4 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$; 而对于受到干扰约束的链路1, 即采取了干扰感知功率分配方案, 根据标准注水功率分配算法1得出的链路平均容量如图6所示。从图6可以看出, 在干扰约束越严格的区域 ($P_I \rightarrow 0$), 系统的平均容量越低, 当 P_I 大于 $8 \text{ dBm}/\text{MHz}$ 后, 采用干扰感知功率分配方案的链路平均容量几乎与不受干扰约束的链路平均容量相同。可见采用干扰感知功率分配方案一方面可以提高链路的系统容量, 另一方面从侧面说明采用干扰感知功率分配方案有利于频谱共享。从图7 (a) 可以看出, 地面链路

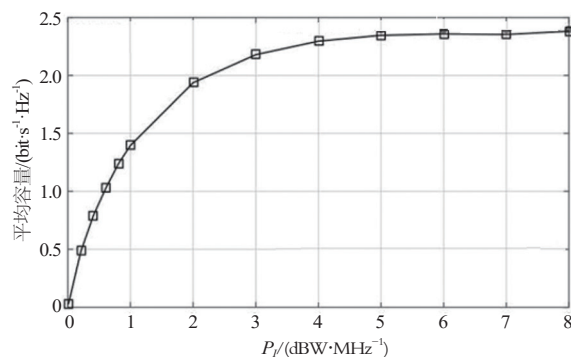
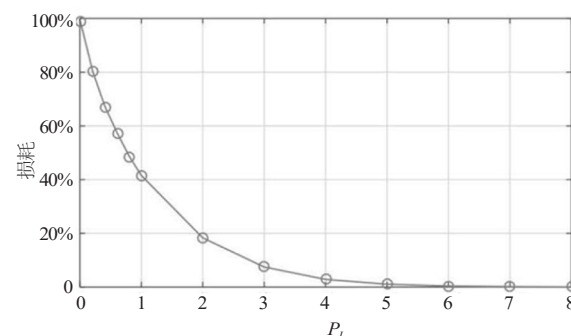


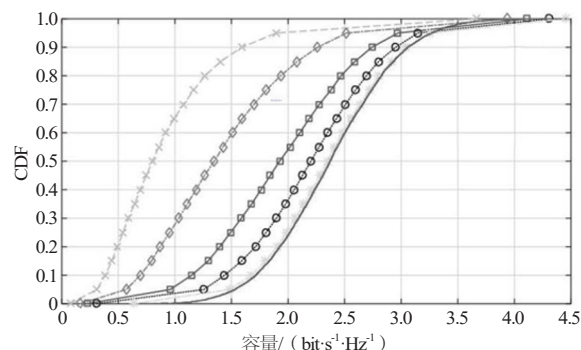
图6 3×3 MIMO地面回传链路采用了干扰感知功率分配方案后的链路平均容量

1和地面链路2共存时需要遵循的约束规则 (条件) 越严格, 即 P_I 越小, 则链路容量越小, 即为了满足约束条件需要付出更大的代价。从图7 (b) 可以看出, 对于较小的 P_I 值, 累积分布函数远未达到无约束条件时的理想情况。实际情况是, 需要满足链路1和链路2共存, 而不对链路1造成过多干扰, 并不意味着要绝对保证链路1不受任何干扰运行, 而是要达到将链路2产生的干扰保持在某个门限以下, 从而保证不对链路1的服务质量产生影响。

3.1.2 星地混合回传链路



(a) 链路容量损耗百分比



图注: $\times$ $P_I=0.5$ $\circ$ $P_I=1$ $\square$ $P_I=2$ $\times$ $P_I=3$ $\times$ $P_I=4$ $—$ $P_I=\infty$

(b) CDF

图7 对应于不同 P_I 的 3×3 MIMO地面回传链路计算结果

接下来分析星地混合MBH链路的情况。假定所需的链路1配备了 4×4 MIMO全向天线, 即 $n=4$ 、 $m=4$ 。TX₁和RX₁之间的距离为500 m。旨在保护的干扰链路2为具有40 dB天线增益的GSO卫星SISO链路, 即 $k=1$ 、 $l=1$, 且干扰和受干扰链路都工作在相同频带上。

通过仿真计算发现, 对于不受干扰约束的地面回传链路, 即 $P_I = \infty$, 采用标准注水法得出的链路平均容量为4 bit/(s·Hz); 而对于受到干扰约束的地面回传链路, 即采取了干扰感知功率分配方案, 根据标准注水功率分配算法得出的链路平均容量如图8所示。图8评估了对应不同干扰约束值 P_I , 4×4 MIMO地面回传链路可达到的链路容量。从图8可以看出, 在干扰约束越严格的区域($P_I \rightarrow 0$), 系统的平均容量越低, 当 P_I 大于2 dBm/MHz后, 采用干扰感知功率分配方案的地面回传链路平均容量几乎与不受干扰约束的链路平均容量相同。通过比较图6和图8, 还发现单一地面回传链路与星地混合回传链路相比, 在相同约束条件下, 星地混合回传链路中的地面链路可获得更大的链路容量。由此可以推出在频谱共享和复用设置下, 干扰感知功率分配方法更适合用于星地混合场景。

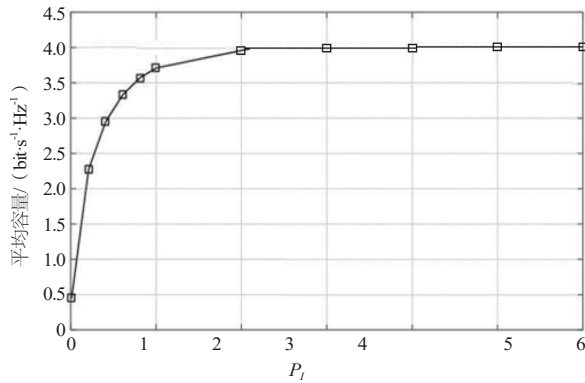
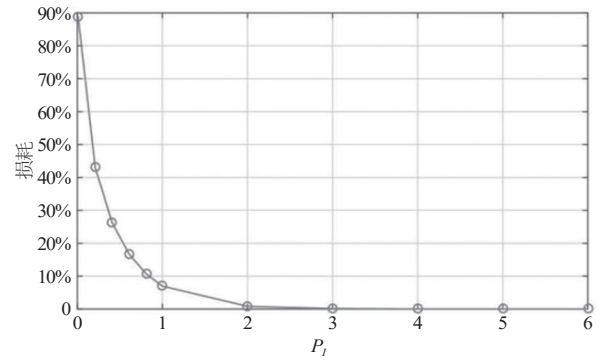
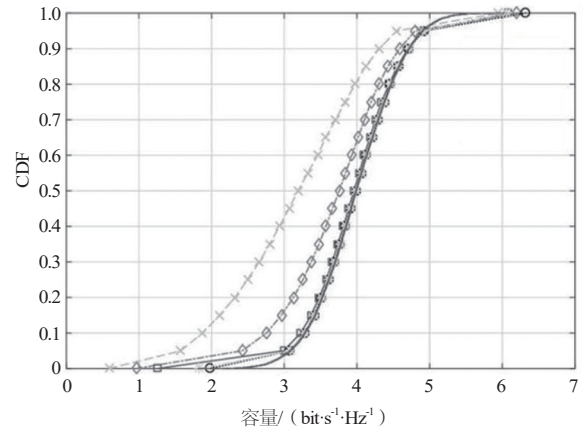


图8 采用了干扰感知功率分配方案后, 4×4 MIMO地面回传链路的平均容量

从图9可以得到与图7类似的结论, 即地面回传链路和卫星回传链路共存时, 需要遵循的约束条件越严格(P_I 越小), 链路容量就越小, 为了满足共享约束条件, 需要付出更大的代价; 且对于较小的 P_I 值, 累积分布函数未达到无约束条件时的理想情况。除此之外, 比较图7和图9还可以发现, 对于星地混合回传链路, 即使 P_I 很小时, 其对应的CDF也很接近无约束条件下链路容量的理想情况, 更不用说对于相同的 P_I , 混合星地回传链路比单一地面回传链路的链路容量大得多。可见在不对卫星回传链路造成过多干扰的情况下, 干扰感知功率



(a) 链路容量损耗百分比



图注: $\times$ $P_I=0.5$ $\circ$ $P_I=1$ $\blacksquare$ $P_I=2$ $\bullet$ $P_I=3$ $+$ $P_I=4$ $—$ $P_I=\infty$

(b) CDF

图9 对应于不同 P_I 的 4×4 MIMO地面回传链路计算结果

分配方法更适合用于星地混合场景。

3.2 授权共享接入

为了研究固定业务台(站)对卫星固定业务地球站产生的干扰电平, 将17.7~19.7 GHz频段划分为32个62.5 MHz带宽的信道。62.5 MHz带宽为数字视频广播DVB-S2标准中使用的前向链路信道带宽。FSS地球站指向其对应的卫星方向。在每个划分的网格中, 随机地放置100座FSS地球站, 并按照式(3)进行干扰功率计算。

通过分析数据库中相关频段的台站信息发现, 固定业务台(站)并未完全使用所有信道。在大多数地区, FSS地球站受到干扰的可能性非常小, 甚至在某些区域和信道上完全没有受到干扰。在这些区域, 频段内FSS地球站可以被轻松地设置和使用。在其他区域, 如果没有空闲信道, 首先授权共享框架的控制器需要根据FS台(站)和拟用FSS地球站的天线指向、最大发射功率、频率等信息, 根据式(3)计算得出FS台(站)周围的禁区或保护区等干扰约束条件。然后, 在这些禁区(约束条件)之外, 授权共享控制器做出是否允许请求的终端

用户接入频谱的决定。如果允许请求的终端用户接入频谱,即FSS地球站须以不超过最大发射功率的发射功率运行。如果想提高系统容量和频率共享成功的概率,还需要加入更多的干扰约束条件,如天线指向约束等。或者利用不同的干扰规避和缓解技术消除来自FS链路的干扰,提高接入共享频谱的概率。由于我国国土面积很庞大,对所有区域划分网格进行仿真计算,几乎很难实现,因此一般先获得全国FS台(站)位置、载波频率等信息,并筛选出感兴趣的干扰场景。对感兴趣场景的划分网格,利用式(3)计算网格分析区域的干扰电平。通过随机撒点仿真出FSS地球站接入感兴趣区域可以成功的概率。通过分析最差情况,即在城市FS台(站)分布密集的区域,FSS地球站位于最差位置情况下,FSS地球站也能够以65%以上的概率使用17.7~19.7 GHz频段。如果这种最差位置情况放在农村地区,FSS地球站更可以以95%概率使用到17.7~19.7 GHz频段。上述这些仿真都是基于卫星链路经历自由空间损耗的假设,从FSS的角度来看,没有地形数据的建模是最坏的情况,如果干扰计算中包含了地形、气象等数据还可以更显著地提高频率共享的可能性。

参考文献:

- [1] SHARMA S K, CHATZINOTAS S, ARAPOGLOU P D. Satellite communication in the 5G era[M]. London: The Institution of Engineering and Technology, 2018.
- [2] MUECK M, JIANG W, SUN G, et al. White paper: Novel spectrum usage paradigms for 5G[M]. Piscataway, N.J: IEEE Special Interest Group Cognitive Radio in 5G, 2014.
- [3] LIU C, ZHANG L, ZHU M, et al. A novel multi-service small-cell cloud radio access network for mobile backhaul and computing based on radio-over-fiber technologies[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(17), 2869-2875
- [4] GUIDOLIN F, NEKOVEE M, BADIAL L, et al. A study on the coexistence of fixed satellite service and cellular networks in a mmWave scenario[C]//IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2015: 2444-2449.
- [5] RAPPAPORT T, HEATH J R, DANIELS R C, et al. Millimeter wave wireless communications[M]. Upper Saddle River NJ: Prentice Hall, 2015.
- [6] LARSSON E, EDFORS O, TUFVESSON F, et al. Massive MIMO for next generation wireless systems[J]. IEEE Communications Magazine. 2014, 52(2), 186-195.
- [7] KAMEL M, HAMOUDA W, YOUSSEF A. Ultra-dense networks: A survey[J]. IEEE Communications Surveys Tutorials, 2016, 18(4), 2522-2545.
- [8] FANG Y, YU J, ZHANG J, et al. Ultrahigh-capacity access network architecture for mobile data backhaul using integrated w-band wireless and free-space optical links with OAM multiplexing[J]. Optics letters, 2014, 39(14): 4168-4171.
- [9] KALIS A, KANATAS A G, PAPADIAS C B. Parasitic antenna arrays for wireless MIMO systems[M]. New York: Springer Verlag, 2014.
- [10] ITU. Recommendation ITU-R F.699, reference radiation patterns for fixed wireless system antennas for use in coordination studies and interference assessment in the frequency range from 100 MHz to 86 GHz[S]. 2018.
- [11] ITU. Recommendation ITU-R F.1245, mathematical model of average and related radiation patterns for point-to-point fixed wireless system antennas for use in interference assessment in the frequency range from 1 GHz to 86 GHz[S]. 2019.
- [12] ITU. Recommendation ITU-R F.1336, reference radiation patterns of omnidirectional, sectorial 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]. 2019.
- [13] ITU. Recommendation ITU-R S.465, reference radiation pattern for earth station antennas in the fixed-satellite service for use in coordination and interference assessment in the frequency band from 2 to 31 GHz[S]. 2010.
- [14] ITU. Recommendation ITU-R P.452 prediction procedure for the evaluation of interference between stations on the surface of the earth at frequencies above about 0.1 GHz[S]. 2015.
- [15] ITU. Recommendation ITU-R P.676, attenuation by atmospheric gases[S]. 2019.
- [16] ITU. Recommendation ITU-R P.526, propagation by diffraction[S]. 2019.

[作者简介]



张晓燕 (1982-), 国家无线电监测中心高级工程师, 主要研究方向为空间业务频率和轨道资源管理、电磁兼容分析和电波传播等。



王贺 (1984-), 国家无线电监测中心检测中心工程师, 主要研究方向为无线电信号射频测试。