

星地网络中基于感知的频谱共享方法

胡 婧, 边东明, 田 湘, 朱银霞, 张 剑

(中国人民解放军陆军工程大学通信工程学院, 江苏 南京 210000)

摘 要: 针对星地网络中卫星上行链路与地面网络频率共享问题, 挖掘频率共享空间可能性, 搭建基于周期感知的机会频谱接入模型; 研究感知时长与卫星上行链路吞吐量权衡问题, 证明吞吐量是关于感知时长的凹函数; 对时变信道引入多时隙感知和协作感知方法, 分析两种方法对感知性能的提升。仿真结果表明, 设计卫星网络的感知时长可以最大化上行链路吞吐量, 多时隙感知和协作感知策略可以进一步提升卫星网络吞吐量。

关键词: 星地网络; 频谱共享; 频谱感知; 吞吐量

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2021042

Sensing-Based Spectrum Sharing Method in Satellite-Terrestrial Network

HU Jing, BIAN Dongming, TIAN Xiang, ZHU Yinxia, ZHANG Jian

College of Communications Engineering, PLA Army Engineering University, Nanjing 210000, China

Abstract: Considering the spatial possibility of opportunistic spectrum sharing, sensing-based spectrum sharing method was applied in the satellite-terrestrial network. The sensing-throughput tradeoff problem was studied, and the throughput is a concave function of the sensing duration was proved. In order to further improved the satellite uplink throughput, the multi-slots sensing method and the cooperative sensing method were proposed. Computer simulations showed that the optimal sensing duration could maximized the uplink throughput, and the multi-slot sensing method or the cooperative sensing method could further improved the throughput of satellite network.

Keywords: satellite-terrestrial network, spectrum sharing, spectrum sensing, throughput

1 引言

6G通信将结合人工智能技术, 全面支持世界的数字化服务, 实现智慧的泛在可取, 推动社会走向虚拟与现实结合的“数字孪生”世界, 实现“数字孪生, 智慧泛在”的美好愿景^[1-4]。围绕这一总体愿景, 6G技术将面临诸多挑战和变革, 其中, 空天地一体化的深度融合是实现通信网络全球、全域、多维立体“泛在覆盖”的基石。

天地一体化信息网络的空间结构包含各类型不同轨道高度的卫星、临近空间平台和地面节点, 能够提供的业务种类涵盖宽带、移动、广播等, 具有多元化

的特点; 利用的频率包含低频段的特高频 (Ultra High Frequency, UHF)、中频段的L/S和高频段的Ku/Ka、Q/V、W等, 此外, 激光频段也是研究和发展的方向^[5-10]。星地网络作为天地一体化信息网络的重要组成部分, 在考虑网络运行管理、空中接口、协议适配等关键技术的同时, 频谱资源分配与使用也是亟须解决的核心问题。随着人们对无线通信服务需求的迅猛增加, 可用频率资源显得越发紧缺。此外, 由于传统静态固定分配的形式, 部分已分配频谱利用率低下, 造成了频谱“假性枯竭”的现象。因此, 探索星地网络中高效、可靠的频率

收稿日期: 2021-08-31; 修回日期: 2021-10-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61971440, No.91738201)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61971440, No. 91738201)

共享方法势在必行。

近年来, 认知无线电技术因提高了频谱效率而受到广泛关注^[11-15]。为了缓解频谱资源有限对无线网络发展带来的压力, 在星地融合网络中引入认知无线电成为一种可行的方法^[16-20]。其中, 基于对地面网络服务质量的保证, 参考文献[16]引入一种新的功率控制方法, 在保证卫星网络中断概率的同时优化地面网络的容量, 实现星地频谱资源共享。参考文献[17]针对卫星上行链路, 采用功率控制和载波分配相结合的方法实现卫星上行链路共享地面网络频谱。考虑卫星信道统计特性、传播损耗和天线方向图, 参考文献[19]针对Ka频段的星地网络频谱共享场景, 推导了基于地面固定业务干扰约束的上行链路吞吐量表达式。参考文献[20]针对卫星上行链路作为次级用户、地面网络作为主用户的场景, 提出了面向非实时移动业务的功率控制方法, 并分析讨论了地面网络信道完美估计和不完美估计两种场景。然而, 上述研究主要集中在通过设计不同约束条件控制卫星终端的发射功率, 实现与地面网络的频谱资源共享方面, 未充分考虑卫星网络具有高吞吐量需求的问题。

2 系统模型

图1给出了卫星网络上行链路和地面网络之间基于感知的频率共享模型。其中, 地面网络作为主用户, 从基站到地面用户的链路称为主用户链路; 卫星网络作为次级用户, 终端到卫星的上行链路称为次级用户链路。在该场景中, 卫星终端在为用户提供通信保障服务的同

时, 具备周期感知地面网络工作状态的能力; 同时, 卫星作为感知网络的决策中心, 能够根据终端上报的感知结果对地面网络的工作状态做出最终决策, 并且将决策结果广播至各个终端。

从卫星网络的感知结果来看, 如果发生漏检, 即当地面网络处于活动状态, 却没有被正确检测到时, 卫星网络、地面网络同时使用相同频率, 卫星不但可以收到自己终端发射的通信信号, 还会接收到来自地面基站的信号, 后者会对接收造成干扰, 因此该链路称为干扰链路。这里, 假设卫星通信上行链路和干扰链路都是加性高斯白噪声 (Additive White Gaussian Noise, AWGN) 信道, 且相互独立。本文聚焦基于感知的卫星上行链路的吞吐量问题, 对于传输链路的自由空间传播损耗、收发天线的增益和方向性等影响都在卫星接收端做归一化处理。

3 基于周期频谱感知的上行链路吞吐量

3.1 周期频谱感知性能分析

首先从单用户的周期频谱感知 (Period Spectrum Sensing, PSS) 进行介绍。图2给出了卫星单用户基于周期频谱感知的帧结构, 其中单帧长度为 T , 包括感知时长 τ 、往返时延 ψ 和数据传输时长 $(T-\tau-\psi)$ 。需要强调的是, 基于感知的模型中, 感知结果有效性的保持时间到当前帧结束, 即卫星网络每帧感知结果的有效时长为 $(T-\tau-\psi)$ 。

卫星终端对周围射频环境进行周期性的感知, 本质上讲是一个二元假设检验问题, 利用 $\mathcal{H}_1$ 表示地面网络活动状态, $\mathcal{H}_0$ 表示地面网络空闲状态。卫星终端接收到的

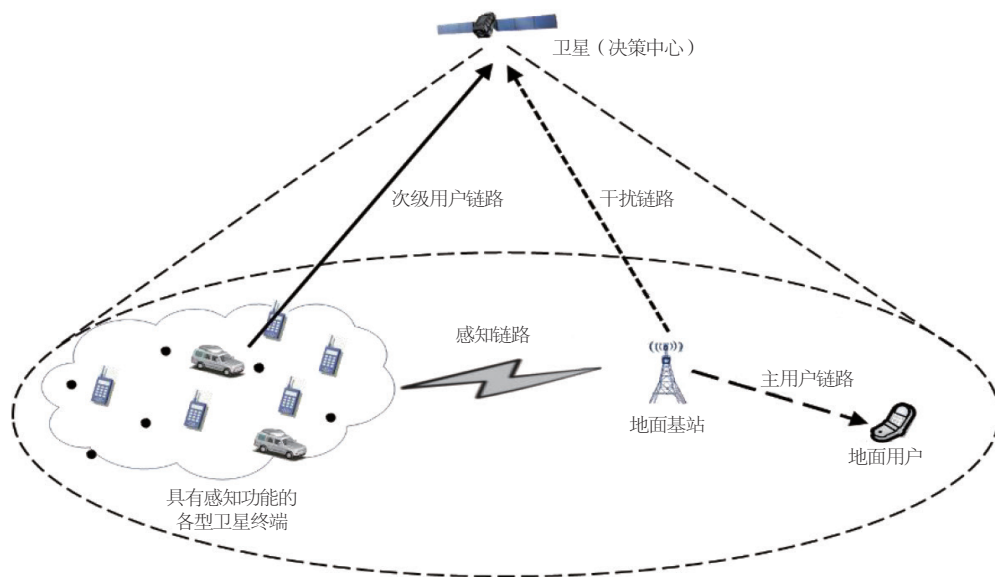


图1 基于感知的星地网络频率共享模型

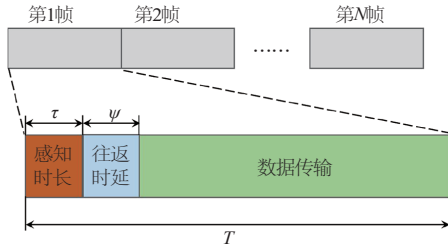


图2 卫星单用户基于周期频谱感知的帧结构

地面网络信号的离散表达式为

$$y(i) = \begin{cases} s(i) + n(i), & \mathcal{H}_1 \\ n(i), & \mathcal{H}_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $s(i)$ 是地面网络的信号, 是独立随机过程, 均值为零, 方差记为 σ_s^2 , 信号 $s(i)$ 与噪声 $n(i)$ 无关; $n(i)$ 表示均值为零、方差为 σ_n^2 的高斯白噪声。

在 $\mathcal{H}_1$ 条件下, 利用 $\gamma = \sigma_s^2 / \sigma_n^2$ 代表接收到的地面网络信号的信噪比。下面结合能量检测法分析信号检测概率和虚警概率的表达式。检测概率定义了场景 $\mathcal{H}_1$ 条件下, 感知终端正确检测到地面网络活动状态情况所对应的概率; 虚警概率则表示在 $\mathcal{H}_0$ 场景下, 感知终端错误地判定地面网络处于活动状态时所对应的概率。从地面网络的角度来看, 检测概率越高, 它可以得到的保护越多; 然而, 从卫星网络的角度来说, 虚警概率越低, 它才有更多的频谱共享机会。因此, 寻求更可靠的检测方法, 使得检测的概率尽可能高, 而虚警概率尽可能低是研究的目标。

能量检测是最基本的频谱检测方法。假设 τ 是感知时长, f_s 是采样频率, 则可以得到 N 个样本点 (N 为不大于 τf_s 的最大整数, 一般来说, $N = \tau f_s$)。能量检测器的统计量由式(2)给出

$$T(y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y(i)|^2 \quad (2)$$

在场景 $\mathcal{H}_0$ 的条件下, 随机变量 $T(y)$ 的概率密度函数 (Probability Density Function, PDF) 记为 $p_0(x)$, 假设能量检测阈值为 ε , 则虚警概率由式(3)给出

$$p_f(\varepsilon, \tau) = P_r(T(y) > \varepsilon | \mathcal{H}_0) = \int_{\varepsilon}^{\infty} p_0(x) dx \quad (3)$$

在场景 $\mathcal{H}_1$ 的条件下, 将 $p_d(x)$ 表示为数据统计 $T(y)$ 的PDF。针对一个确定的能量检测阈值 ε , 检测概率由式(4)给出

$$p_d(\varepsilon, \tau) = P_r(T(y) > \varepsilon | \mathcal{H}_1) = \int_{\varepsilon}^{\infty} p_1(x) dx \quad (4)$$

最终, 可以得到虚警概率和检测概率表达式^[21]分别为

$$p_f(\varepsilon, \tau) = Q\left(\left(\frac{\varepsilon}{\sigma_n^2} - 1\right)\sqrt{\tau f_s}\right) \quad (5)$$

$$p_d(\varepsilon, \tau) = Q\left(\left(\frac{\varepsilon}{\sigma_n^2} - \gamma - 1\right)\sqrt{\frac{\tau f_s}{2\gamma + 1}}\right) \quad (6)$$

其中, $Q(\cdot)$ 是标准高斯的互补分布函数 (Complementary Distribution Function, CDF), $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$ 。

3.2 卫星上行链路吞吐量

前面阐述了单用户利用能量检测方法得到检测概率和虚警概率的表达式。下面, 以此为基础, 分析卫星终端的感知性能与上行链路吞吐量之间的关系, 并证明存在最佳的感知时长, 在地面网络通信不受影响的情况下, 可以得到最大的上行链路吞吐量。

首先, 需要给出在基于PSS的机会接入模型中, 结合卫星终端感知结果以及地面网络的实际状态, 有4种可能出现的场景: 正确检测地面网络活动状态 (Correct Detection of the Active State, CDoAS), 此时地面网络是活动状态, 并且卫星网络正确感知到该状态; 正确检测地面网络空闲状态 (Correct Detection of the Idle State, CDoIS), 即地面网络处于空闲状态, 卫星网络正确地检测到该状态; 虚警状态 (False Detection of the PU Idle State, FDoIS), 地面网络空闲, 但卫星网络错误地检测到其处于活动状态; 漏检状态 (Miss Detection of the Active State, MDoAS), 卫星网络未检测到地面网络的工作状态。

从上述分析可知, 卫星终端基于感知策略可以实现的机会频谱共享场景及其对应的吞吐量, 包括以下两种情况。

场景一: CDoIS条件下, 卫星网络正常检测到地面网络空闲状态, 即没有发生虚警的情况。此时, 设卫星接收信号的功率为 P_s , N_0 是卫星接收机对应带宽内的噪声功率, 则卫星接收信号信噪比可以记为 $\text{SNR}_s = P_s / N_0$ 。得到对应的吞吐量 $C_0 = \log_2(1 + \text{SNR}_s)$, 则上行链路可实现的平均吞吐量记为 $((T - \tau - \psi) / T) C_0$ 。

场景二: MDoAS条件下, 即当地面网络是活动状态, 但卫星网络发生了错误检测时, 认为地面网络处于空闲状态。此时, 卫星在接收上行链路信号的同时, 也接收到地面基站发射的干扰信号。由于干扰链路与上行链路相互独立, 且都是AWGN信道。设 P_p 是卫星接收到的地面基站的干扰信号功率, 则有 $C_1 = \log_2\left(1 + P_s / (P_p + N_0)\right) = \log_2(1 + \text{SNR}_s / (1 + \text{INR}_p))$, 其中 $\text{INR}_p = P_p / N_0$, 此时上行链路可达到的吞吐量为 $((T - \tau - \psi) / T) C_1$ 。

显然, $C_0 > C_1$ 。另外, 需要说明的是, 这里卫星接收到的上行信号功率 P_s 和干扰信号 P_p 都是在AWGN信道条件下, 将自由空间传播损耗、发射信号功率、链路损

耗、收发天线的增益等做归一化处理之后的结果。

用 $P(\mathcal{H}_0)$ 和 $P(\mathcal{H}_1)$ 分别代表地面网络空闲和活动的概率,则有 $P(\mathcal{H}_1)+P(\mathcal{H}_0)=1$ 。上述两个场景的发生概率依次为 $(1-p_d(\varepsilon,\tau))P(\mathcal{H}_0)$ 和 $(1-p_d(\varepsilon,\tau))P(\mathcal{H}_1)$ 。所以可以分别定义两种场景下的上行链路平均吞吐量为

$$R_0(\varepsilon,\tau)=\frac{T-\tau-\psi}{T}C_0(1-p_f(\varepsilon,\tau))P(\mathcal{H}_0) \quad (7)$$

$$R_1(\varepsilon,\tau)=\frac{T-\tau-\psi}{T}C_1(1-p_d(\varepsilon,\tau))P(\mathcal{H}_1) \quad (8)$$

综上,上行链路的平均吞吐量为

$$R(\tau)=R_1(\varepsilon,\tau)+R_0(\varepsilon,\tau) \quad (9)$$

从上述表达式可以看出,当帧长 T 固定时,如果减小感知时长 τ ,则 $(T-\tau-\psi)$ 变长,即可以获得更多的传输时长提升吞吐量。 $Q(x)$ 是 x 的递减函数,当阈值 p_d^{th} 确定时,感知时长与虚警概率是成反比的;当感知时长增加,感知性能也提升,则虚警概率降低。这对于卫星终端来说,将获得更多的接入信道的机会。因此,本文的研究目标是在确保地面用户正常通信的基础上,确定每一帧的最佳感知时长 τ ,即寻求感知时长 τ 和上行链路吞吐量 $R(\tau)$ 的权衡。该问题的数学表达式如下

$$\max_{\tau} R(\tau)=R_1(\varepsilon,\tau)+R_0(\varepsilon,\tau) \quad (10)$$

$$\text{s.t. } p_d(\varepsilon,\tau) \geq p_d^{\text{th}}$$

其中, p_d^{th} 定义为保护地面网络正常通信所需的检测概率阈值。在实际中,当感知信号的信噪比较小时, p_d^{th} 一般略小。例如,在IEEE802.22 WRAN中,当信噪比在-20 dB时, $p_d^{\text{th}}=0.9^{[22-23]}$ 。当然,如果地面网络的频谱需要提供100%的保护时,卫星终端是不允许对频谱进行机会接入共享的。另外,不妨假设在某区域内地面网络活动状态的概率 $P(\mathcal{H}_1)$ 较小,这使得研究和探索频谱资源复用技术更有意义。实际中,由于卫星网络具备广覆盖、不受地理条件限制等特点,能够为海洋、沙漠和偏远山区提供通信服务保障,而这些区域正是地面网络覆盖有限、利用率低下的典型场景。综上,可以设 $R_0>R_1$,所以 $R_0(\varepsilon,\tau)$ 在上行链路平均吞吐量中占较大的比重。因此,优化问题可以近似为

$$\max_{\tau} \tilde{R}(\tau)=R_0(\varepsilon,\tau) \quad (11)$$

$$\text{s.t. } p_d(\varepsilon,\tau) \geq p_d^{\text{th}}$$

根据式(6),当给定感知时长 τ 时,可以利用 $p_d^{\text{th}}=p_d(\varepsilon_0,\tau)$ 计算出需要的能量检测阈值 ε_0 。当检测阈值 $\varepsilon_1<\varepsilon_0$ 时,则有 $p_d(\varepsilon_1,\tau)>p_d^{\text{th}}$,并且 $p_f(\varepsilon_1,\tau)>p_f(\varepsilon_0,\tau)$ 。因此,通过式(7)和式(8),可以得到 $R_0(\varepsilon_1,\tau)<R_0(\varepsilon_0,\tau)$ 和 $R_1(\varepsilon_1,\tau)<R_1(\varepsilon_0,\tau)$ 。因此,式(11)的最优解是在 $p_d(\varepsilon,\tau)=p_d^{\text{th}}$ 的约束下实现的。最后,由于存在 $R_0(\varepsilon_1,\tau)+R_1(\varepsilon_1,\tau)<R_0(\varepsilon_0,\tau)+R_1(\varepsilon_0,\tau)$,因此当满

足 $p_d(\varepsilon,\tau)=p_d^{\text{th}}$ 的约束时,能够得到式(10)的最优解。也就是说,为了保护地面网络, $p_d(\varepsilon,\tau)$ 越大越好,但是虚警概率 $p_f(\varepsilon,\tau)$ 也会相应的变大,则卫星网络实现通信的机会随之变小,所以权衡来说,恰好满足对地面网络保护的基本要求即可。因此上述优化问题可以等效为

$$\max_{\tau} \tilde{R}(\tau)=R_0(\varepsilon,\tau) \quad (12)$$

$$\text{s.t. } p_d(\varepsilon,\tau)=p_d^{\text{th}}$$

结合式(5)、式(6)和约束条件,可以得到

$$\tilde{R}(\tau)=C_0P(\mathcal{H}_0)\left(1-\frac{\tau+\omega}{T}\right)\left(1-Q\left(\alpha+\sqrt{\tau f_s \gamma}\right)\right) \quad (13)$$

这里 $\alpha=\sqrt{2\gamma+1}Q^{-1}(p_d^{\text{th}})$,从式(13)可以看出上行链路可达吞吐量 $\tilde{R}(\tau)$ 是一个关于感知时长 τ 的函数。

定理1:对于任何检测概率阈值,存在一个最优的感知时长,可以使卫星上行链路的吞吐量最大。

证明:对式(13)求导可以得到

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{R}'(\tau)}{C_0P(\mathcal{H}_0)} &= \frac{\gamma\sqrt{f_s}\left(1-\frac{\tau+\omega}{T}\right)}{2\sqrt{2\pi\tau}} \exp\left(-\frac{(\alpha+\sqrt{\tau f_s \gamma})^2}{2}\right) - \frac{1}{T} \\ &+ \frac{1}{T}Q(\alpha+\sqrt{\tau f_s \gamma}) \end{aligned} \quad (14)$$

其中, $Q(x)$ 是一个递减函数,并且上限为1,则有

$$\lim_{\tau \rightarrow (T-\omega)} \tilde{R}'(\tau) < C_0P(\mathcal{H}_0)\left(-\frac{1}{T}+\frac{1}{T}Q(\alpha)\right) < 0 \quad (15)$$

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} \tilde{R}'(\tau) = +\infty \quad (16)$$

从式(15)和式(16)可以看出,当 τ 较小时的时候, $\tilde{R}(\tau)$ 是递增的,当 τ 接近 $T-\omega$ 时, $\tilde{R}(\tau)$ 递减。因此在区间 $(0,T-\omega)$ 中, $\tilde{R}(\tau)$ 存在一个最大值。

进一步说,从式(9)可以看出

$$R'(\tau)=\tilde{R}'(\tau)-\frac{1}{T}C_1P(\mathcal{H}_1)(1-p_d^{\text{th}}) \quad (17)$$

因此

$$\lim_{\tau \rightarrow (T-\omega)} R'(\tau) < \lim_{\tau \rightarrow (T-\omega)} \tilde{R}'(\tau) < 0 \quad (18)$$

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} R'(\tau) = \lim_{\tau \rightarrow 0} \tilde{R}'(\tau) - \frac{1}{T}C_1P(\mathcal{H}_1)(1-p_d^{\text{th}}) = +\infty \quad (19)$$

所以,在区间 $(0,T-\omega)$ 中, $R(\tau)$ 存在一个最大值。下面,进一步证明 $p_f(\tau) \leq 0.5$ 时, $R(\tau)$ 是关于 τ 的凹函数。

定理2:当 $p_f(\tau) \leq 0.5$,在 τ 的范围内, $p_f(\tau)$ 是递减的且是凸函数。

证明:给定检测概率阈值 p_d^{th} ,可以通过式(20)计算虚警概率 p_f

$$p_f=Q\left(\sqrt{2\gamma+1}Q^{-1}(p_d^{\text{th}})+\sqrt{\tau f_s \gamma}\right) \quad (20)$$

令 $\alpha = \sqrt{2\gamma+1}Q^{-1}(p_d^{\text{th}})$ ，可以得到

$$p_f(\tau) = Q(\alpha + \sqrt{\tau f_s \gamma}) \quad (21)$$

对式(21)求 τ 的微分

$$p'_f(\tau) = \frac{dp_f(\tau)}{d\tau} = -\frac{\gamma\sqrt{f_s}}{2\sqrt{2\pi}}\tau^{-1/2}\exp\left(-\left(\alpha + \sqrt{\tau f_s}\right)^2/2\right) \quad (22)$$

当 $\tau > 0$ ，可以看出 $p'_f(\tau) < 0$ ，所以 $p_f(\tau)$ 关于 τ 是递减函数。进一步， $p'_f(\tau) \leq 0.5$ ，从式(21)可以得到 $\alpha + \gamma\sqrt{\tau f_s} \geq 0$ 。这样结合式(22)，可以得到当 $p_f(\tau) \leq 0.5$ 时， $p_f(\tau)$ 是一个随 τ 单调递减的函数。

定理3：在 τ 的取值范围内，当 $p_f(\tau) \leq 0.5$ ， $p_f(\tau)$ 是递减函数且凸函数，所以 $\tilde{R}(\tau)$ 具有凹特性。

证明：由于

$$\tilde{R}(\tau) = C_0 P(\mathcal{H}_0) \frac{T - \omega - \tau}{T} (1 - p_f(\tau)) \quad (23)$$

所以

$$\tilde{R}'(\tau) = C_0 P(\mathcal{H}_0) \left(\frac{p_f(\tau)}{T} - \left(1 - \frac{\tau + \omega}{T}\right) p'_f(\tau) - \frac{1}{T} \right) \quad (24)$$

由于 $p_f(\tau)$ 是关于 τ 的递减函数且凸函数， $p'_f(\tau)$ 是负数并且随着 τ 递增。所以从式(24)来看，当 $\tau \in [0, T - \omega]$ ， $\tilde{R}'(\tau)$ 是随着 τ 递减的，进一步证明 $\tilde{R}(\tau)$ 是一个关于 τ 的凸函数。

从定理2和定理3可以得出，当 $p_f(\tau) \leq 0.5$ 时， $R(\tau)$ 是一个关于 τ 的凹函数，并且存在一个最大值。由于 $p_f(\tau) \leq 0.5$ 关于 τ 是单调的，所以可以利用二分法搜索最佳的 τ 值。

4 多时隙感知性能

为了进一步提高卫星上行链路频率利用效率，挖掘感知性能的提升是可行途径。本节针对感知信道具有时变特性的问题，提出基于多时隙感知的频谱共享方式，从降低虚警概率的角度增加卫星终端接入信道的机会，达到提高频谱利用率的目的。

对于时变信道，多时隙的频谱感知可以获得信号的时间分集增益从而提升感知性能。多时隙感知即每帧中的检测时隙不再连续，而是被分割成多个不连续的子时隙，但每帧中总的感知时间不变。多时隙频谱感知帧结构如图3所示。每帧的时长仍然是 T ，每帧中感知持续总时间为 τ ，但被分成 M 个离散的子时隙， ζ 为每个子时隙的感知时长，则在每一帧中有 $\tau = M\zeta$ ，这样每个小的感知时隙对应的样本点数记为 $N_1 = N/M$ ，这里假设 N_1 是整数。

与前面周期感知检测类似，假设第 k 个子时隙的接收信号也有如下两种情况

$$y_k(i) = \begin{cases} h_k s_k(i) + n_k(i), & \mathcal{H}_1 \\ n_k(i), & \mathcal{H}_0 \end{cases} \quad (25)$$

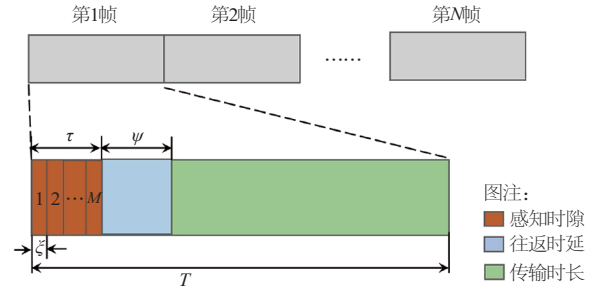


图3 多时隙频谱感知帧结构

其中，信道系数 h_k 是一个具有零均值、单位方差的高斯随机变量，并且对于所有的 M 个子时隙来说，它们之间相互独立。假设地面网络的发送信号功率和噪声功率在一帧中保持不变，即对于第 k 个时隙存在 $E[s_k(i)^2] = \sigma_s^2$ 和 $E[n_k(i)^2] = \sigma_n^2$ ，且所有 M 个子时隙中状态不会改变，也就是说地面网络都处于活动状态或空闲状态。

多时隙频谱感知的目的在于，利用一帧中 M 个子时隙的数据进行联合感知，决定地面网络的状态。本研究场景中卫星网络采用数据融合方式对多时隙采集数据进行融合判决，即卫星终端采集的各个子时隙数据将汇聚到具有决策能力的卫星，卫星接收到所有感知数据后，采用单用户连续感知类似的判决方法做最后的决策。

假设 $T_k(y)$ 是第 k 个子时隙的数据

$$T_k(y) = \frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} |y_k(i)|^2 \quad (26)$$

利用数据融合，则最终决策用的数据为

$$T(y) = \sum_{k=1}^M g_k T_k(y) \quad (27)$$

其中， $g_k \geq 0$ 是第 k 个子时隙的数据权重，且 $\sum_{k=1}^M g_k^2 = 1$ 。

对于检测概率阈值 p_d^{th} ，实现最小虚警概率的最佳 g_k 由柯西-施瓦兹不等式可证^[21]

$$g_k = \frac{|h_k|^2}{\sqrt{\sum_{k=1}^M |h_k|^4}} \quad (28)$$

当信道系数 h_k 未知时，可以通过简化的方式将 $g_k = 1/\sqrt{M}$ 。此时，可以得到虚警概率和检测概率分别为

$$p_f = Q\left(\beta_2 Q^{-1}(p_d^{\text{th}}) + \gamma \sqrt{\frac{N_1}{M}} \sum_{k=1}^M |h_k|^2\right) \quad (29)$$

$$p_d = Q\left(\frac{1}{\beta_2} Q^{-1}(p_f^{\text{th}}) - \gamma \sqrt{\frac{N_1}{M}} \sum_{k=1}^M |h_k|^2\right) \quad (30)$$

其中, $\beta_2 = \sqrt{1 + \frac{2\gamma}{M} \sum_{k=1}^M |h_k|^2}$ 。

在时变信道下, 如果要求每帧的检测概率 p_d 都等于阈值 p_d^{th} , 由于采用多时隙感知, 则每帧之间的能量检测阈值 ϵ 会不相同, 因此得到的各帧对应的虚警概率 p_f 也不尽相同。这里, 对于给定的检测时长 τ , 将所有帧的平均虚警概率表示为 $\tilde{p}_f$, 定义归一化的平均吞吐量为

$$\tilde{B}(\tau) = \frac{T - \tau - \omega}{T} (1 - \tilde{p}_f(\tau)) \quad (31)$$

基于多时隙感知结果得到的卫星上行链路的平均吞吐量, 可以结合式(12)和式(13)得到, 这里不再赘述。

5 协作感知性能

在基于感知的星地频谱共享模型中, 通过提升感知性能达到提高卫星网络上链路吞吐量的目的, 另外一种策略就是基于多用户的协作感知。在协作感知过程中, 每个卫星终端的信号帧结构如图2所示。对于第 k 个感知终端接收到的信号有以下两种情况

$$y_k(i) = \begin{cases} h_k s_k(i) + n_k(i), & \mathcal{H}_1 \\ n_k(i), & \mathcal{H}_0 \end{cases} \quad (32)$$

这里 $k=1, \dots, M$, 共 M 个协作感知卫星终端, 假设每个终端感知信道系数 h_k 都是零均值、单位方差的高斯随机变量, 并且, M 个感知终端的接收噪声是相互独立的。此外, 对于 M 个终端来说噪声功率都是恒定的, 即 $E[n_k(i)^2] = \sigma_n^2$ 。

协作感知采用决策融合方式, 即分布式的卫星终端分别采集感知数据并根据数据做出自己的判决, 再将判决结果上报卫星, 卫星对多用户感知结果做决策融合。因此, 决策融合中每一个终端都要根据自己的采样数据做出判决。对于第 k 个终端, 可以定义检测概率为 $p_d^{(k)}$, 虚警概率用 $p_f^{(k)}$ 表示。当能量检测阈值记为 ϵ_0 , 则第 k 个终端的检测概率和虚警概率分别为

$$p_d^{(k)} = Q\left(\left(\frac{\epsilon_0}{\sigma_n^2} - \gamma |h_k|^2 - 1\right) \sqrt{\frac{N}{2\gamma |h_k|^2 + 1}}\right) \quad (33)$$

$$p_f^{(k)} = Q\left(\left(\frac{\epsilon_0}{\sigma_n^2} - 1\right) \sqrt{N}\right) \quad (34)$$

根据每个终端做出判决, 将其合并变成一帧的结论有如下几种常用的准则。这里通常假设对于不同的终端相互的决策结果都是独立的。

(1) “逻辑或”规则 (OR Rule): 在当前帧内, 只要有一个终端的决策认为地面网络是活动状态, 那么最终决策的结果就认为地面网络是活动状态。则当前帧对应得到的最终检测概率和虚警概率分别为

$$p_d = 1 - \prod_{k=1}^M (1 - p_d^{(k)}) \quad (35)$$

$$p_f = 1 - \prod_{k=1}^M (1 - p_f^{(k)}) \quad (36)$$

(2) “逻辑与”规则 (AND Rule): 在当前帧内, 所有的终端都认为地面网络是活动状态, 最终决策的结果才认为地面网络是活动状态。则当前帧对应得到的最终检测概率和虚警概率分别为

$$p_d = \prod_{k=1}^M p_d^{(k)} \quad (37)$$

$$p_f = \prod_{k=1}^M p_f^{(k)} \quad (38)$$

(3) “多数”规则 (Majority Rule): 这是一种“少数服从多数”的规则, 通常来说, 在当前帧中, 有超过一半的终端认为地面网络活动, 那么这一帧的决策结果就是地面网络活动; 反之, 地面用户空闲。当然所有决策都是独立的, 并且存在 $p_d^{(1)} = \dots = p_d^{(M)} = \hat{p}_d$, 且 $p_f^{(1)} = \dots = p_f^{(M)} = \hat{p}_f$, 因此, 当前帧得到的检测概率和虚警概率分别为

$$p_d = \sum_{j=\lceil \frac{M}{2} \rceil}^M \binom{M}{j} \hat{p}_d^j (1 - \hat{p}_d)^{M-j} \quad (39)$$

$$p_f = \sum_{j=\lceil \frac{M}{2} \rceil}^M \binom{M}{j} \hat{p}_f^j (1 - \hat{p}_f)^{M-j} \quad (40)$$

其中, $\binom{c}{k} = \frac{c!}{k!(c-k)!}$ 。

在多用户协作感知场景下, 卫星网络上链路吞吐量计算与单用户周期感知类似。

6 仿真分析

本节给出不同感知策略下, 卫星上行链路吞吐量与感知时长的关系等仿真结果。假设地面网络使用的是QPSK调制信号, 加性噪声是零均值的高斯过程, 地面网络空闲概率 $P(\mathcal{H}_1) = 0.2$, 对地面网络的检测概率阈值为 $p_d^{\text{th}} = 0.9$ 。

6.1 周期频谱感知

图4给出了在相同检测概率阈值条件下, 当感知信号信噪比不同时, 虚警概率与感知时长的变化关系。从图4可以看出, 感知时长越长, 感知的性能越好, 则虚警概率越低。另外, 相同的感知时长, 感知信号的信噪比越低, 虚警概率越高, 这符合式(5)和式(6)的描述。当检测

概率阈值固定,则能量检测门限 ε 相同;当感知信号信噪比越高,出现虚警,即错误判定地面网络忙碌的概率越低;反之,当感知信号信噪比越低,虚警概率则越高。

假设卫星上行链路接收正常信号的信噪比 $\text{SNR}_s=8$ dB,接收到地面产生的干扰信号的干信比 $\text{INR}_p=0$,因此 $C_0=\log_2(1+\text{SNR}_s)=2.8698$, $C_1=\log_2(1+\text{SNR}_s/(1+\text{INR}_p))=2.0548$ 。每帧时长 $T=100$ ms,上报链路往返时延 $\omega=10$ ms。图5给出了上行链路的平均吞吐量与每帧内感知时长的关系。图5中还显示了式(9)得到的吞吐量 $R(\tau)$ 和式(13)得到的近似吞吐量 $\tilde{R}(\tau)$ 的结果,可以看出,感知信号信噪比相同时,两条曲线对应的最优感知时长几乎相同,即在相同的感知时长位置使得上行链路的吞吐量达到最大。另外,随着感知时长的增加,上行链路的吞吐量先逐渐增加后再降低,原因是当感知时长较短时,感知性能的提升对增大吞吐量影响较大;而随着感知时长逐步增加,感知性能提升对吞吐量的影响逐步变小,反而降低了传输时长,最终造成吞吐量的逐步降低。

图6给出了归一化吞吐量 $B(\tau)=((T-\omega-\tau)/T)(1-p_f)$ 随感知时长的变化曲线,其规律与图5相同,可以看出归一化的吞吐量是关于感知时长的凹函数。另外,从图5和图6可知,信噪比越小,上行链路达到最大(归一化)吞吐量越小,且需要更长的感知时长。其主要原因是信噪比越小,要得到较低的虚警概率,需要更长的感知时长。

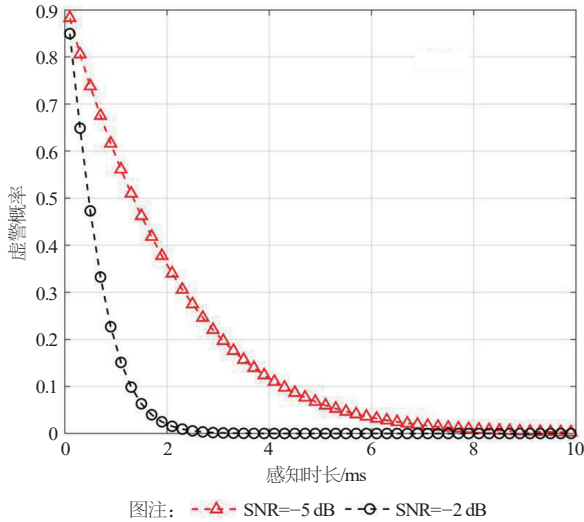


图4 虚警概率与感知时长的变化关系

6.2 多时隙感知

在 multi-slot sensing strategy 中,每帧中原来的总的感知时长 τ 被平均划分成 M 个相等的子时隙,假设每一个子时隙中检测到的感知信号信噪比是相互独立的,并且 $\text{SNR}=-5$ dB。

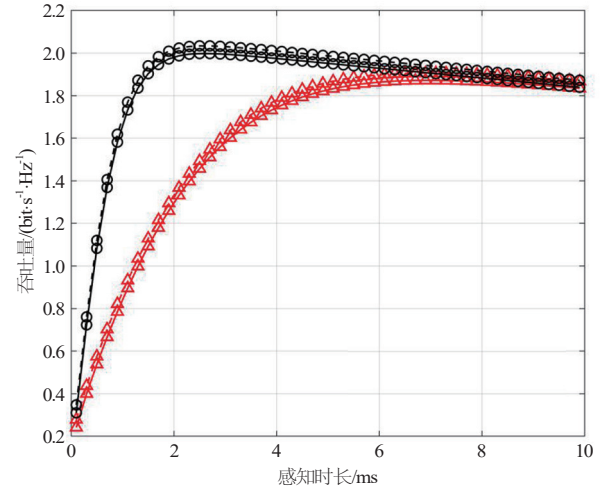


图5 上行链路的平均吞吐量与每帧内感知时长的关系

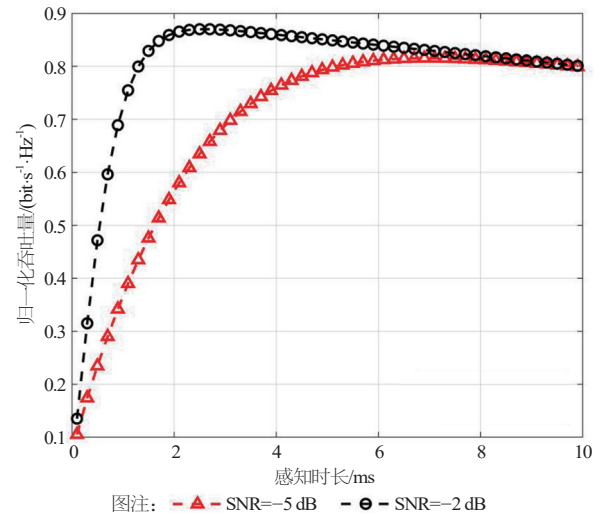
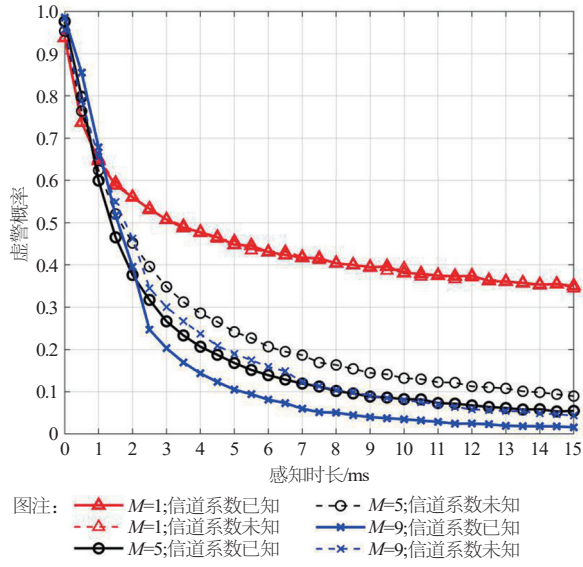


图6 归一化吞吐量 B 随感知时长 τ 的变化曲线

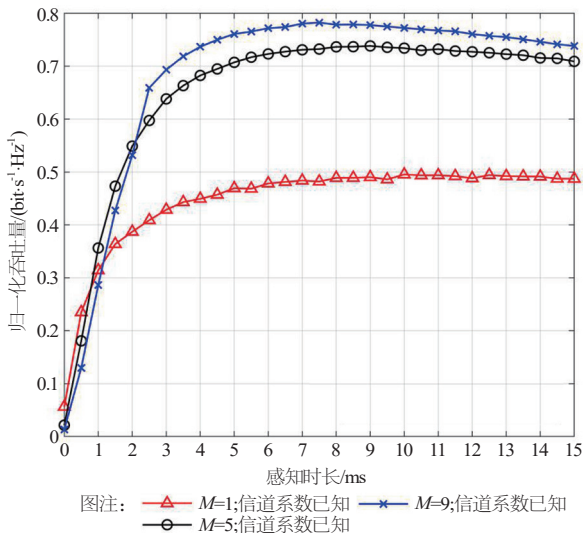
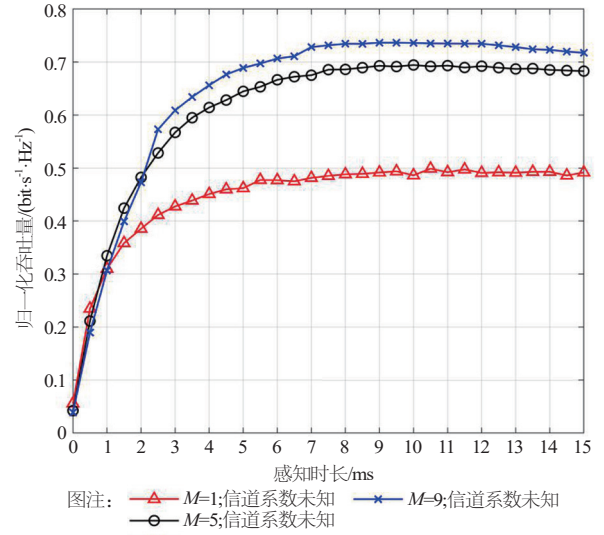
每帧的检测概率阈值为0.9,每帧的时长为 $T=100$ ms,上报链路往返时延 $\omega=100$ ms,仿真过程模拟的帧数为10 000。每个子时隙的信道衰落系数分为已知和未知两种情况。具体来说,当信道条件已知时,利用式(28),计算各个子时隙的加权系数;当信道条件未知时,加权系数可以认为对所有子时隙都是相同的,即 $g_i=1/\sqrt{M}$ 。

从图7可以看出,总感知时长不变时,分割的子时隙越多,感知性能越好。这主要是由于在时变信道中,时间分集接收可以提高接收信号的信噪比,从而降低检测的虚警概率。然而,当每一帧的时隙数量越来越多时,增益的提升空间就会降低,因为总的感知时长不变,增加子时隙数会降低每个子时隙的样本点数。从图7中还可

图7 多时隙感知虚警概率随感知时长 τ 的变化曲线

以看出,当感知时长增加,样本点数足够多时,信道系数未知和已知情况的虚警概率差异会逐渐缩小。

图8和图9分别给出了不同信道条件下,采用式(31)计算的卫星网络的归一化平均吞吐量 $\bar{b}$ 随感知时长 τ 的变化曲线。从图8~图9可看出,相同的总感知时长 τ ,子时隙数量增加,可以为感知性能带来更高的时间分集增益,则对应的 $\bar{b}$ 更大;同理,当 $\bar{b}$ 取得最大值时,对应的最优总感知时长 τ 随着子时隙数量的增加而减小。例如,在图8信道条件已知的情況下,当分别利用9个和5个子时隙时,得到最大 $\bar{b}$ 为0.787和0.739,对应总感知时长 τ 约7.5 ms和9 ms。另外,当信道条件已知时,多时隙感知性能较

图8 信道条件已知归一化平均吞吐量 $\bar{b}$ 随感知时长 τ 变化曲线图9 信道条件未知归一化平均吞吐量 $\bar{b}$ 随感知时长 τ 变化曲线

信道条件未知时更好,所得到的结果更优。例如,同样利用9个子时隙,当信道条件为已知和未知状态时,对得到的最大 $\bar{b}$ 分别为0.787和0.739,并且,信道条件已知状态的最优感知时长更短。在图10中,比较了两种信道状态下,不同最小时隙数量对应的最大归一化平均吞吐量的变化情况。可以看出,当时隙数量增加时,两种情况下的最大平均归一化吞吐量之间存在恒定的差异。

6.3 协作感知

多终端协作感知场景采用决策融合方式,假设每个终端从地面网络接收到的感知信号信噪比都相等。图11给出SNR=-5 dB时,不同融合策略下,最优感知时

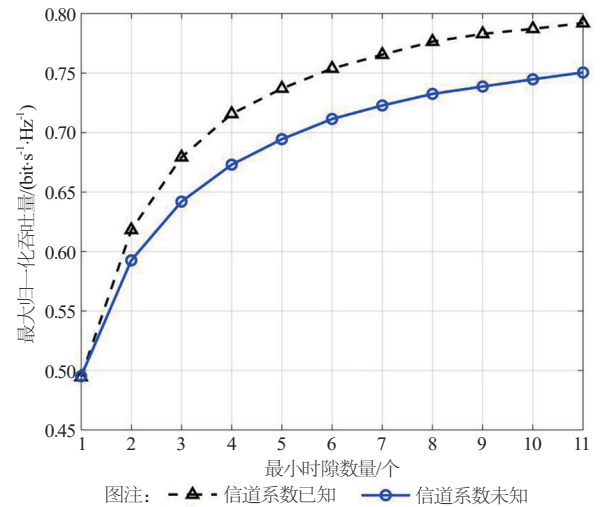


图10 两种信道状态下不同最小时隙数量对应的最大归一化平均吞吐量的变化情况

长随感知终端数量的变化趋势。可以看出，对于所有的策略，随着协作卫星终端数量的增加，相同的感知时长下，数据样本数量增加，所以最优感知时长随着卫星终端数量的增加而减少；在相同的协作感知终端数量下，“Majority Rule”的感知性能较其他两种策略更好。图12则给出了不同数量的协作终端感知得到的最大归一化吞吐量的变化趋势，可以看出最大归一化吞吐量结果与协作感知终端数量成正比。

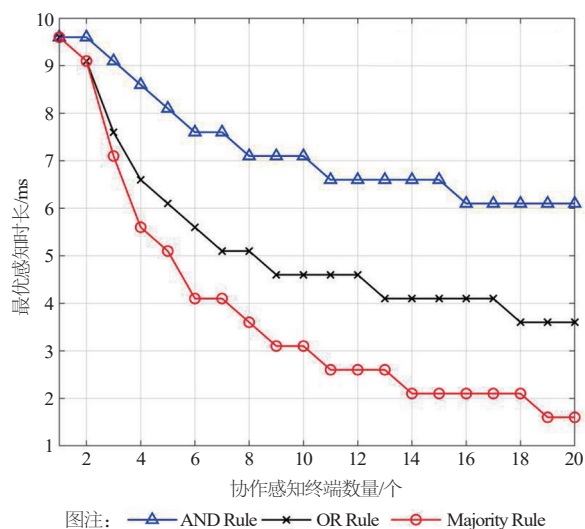


图11 不同融合策略下最优感知时长随感知终端数量的变化趋势

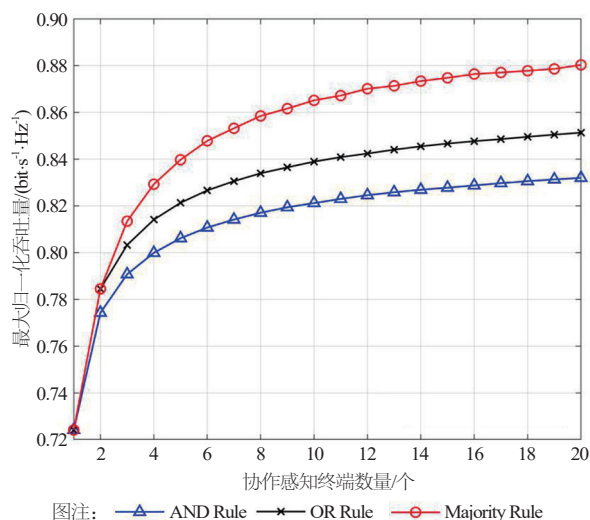


图12 不同数量的协作终端感知得到的最大归一化吞吐量的变化趋势

参考文献：

- [1] 吴晓文, 焦侦丰, 凌翔, 等. 面向6G的卫星通信网络架构展望[J]. 电信科学, 2021, 37(7): 1-14.
- [2] 李少谦. 6G: 继续体系结构的变革[J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(2): 43-44.
- [3] 杨震, 枫月. 通信技术简史 谁能执6G通信之牛耳? [J]. 世界博览, 2021(6): 62-65.
- [4] 柴蓉, 邹飞, 刘莎, 等. 6G移动通信: 愿景、关键技术和系统架构[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(3): 337-347.
- [5] JIANG C X, WANG X X, WANG J, et al. Security in space information networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(8): 82-88.
- [6] DAI K, ZHU C M. A new architecture design of space information networks[C]//Proceedings of 2012 Sixth International Conference on Internet Computing for Science and Engineering. Piscataway: IEEE Press, 2012: 217-220.
- [7] REN F, FAN J L. An adaptive distributed certificate management scheme for space information network[J]. IET Information Security, 2013, 7(4): 318-326.
- [8] ZHANG W, ZHANG G X, XIE Z D, et al. A hierarchical autonomous system based space information network architecture and topology control[J]. Journal of Communications and Information Networks, 2016, 1(3): 77-89.
- [9] ZHANG W, BIAN D M, XIE Z D, et al. A novel space information network architecture based on autonomous system[C]//Proceedings of 2015 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP). Piscataway: IEEE Press, 2015.
- [10] 李德仁, 沈欣, 龚健雅, 等. 论我国空间信息网络的构建[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(6): 711-715, 766.
- [11] ROIVAINEN A, YLITALO J, KYRÖLÄINEN J, et al. Performance of terrestrial network with the presence of overlay satellite network[C]//Proceedings of 2013 IEEE International

- Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2013: 5089-5093.
- [12] ZHOU F H, WU Y P, LIANG Y C, et al. State of the art, taxonomy, and open issues on cognitive radio networks with NOMA[J]. IEEE Wireless Communications, 2018, 25(2): 100-108.
- [13] JIA M, LIU X, GU X M, et al. Joint cooperative spectrum sensing and channel selection optimization for satellite communication systems based on cognitive radio[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2017, 35(2): 139-150.
- [14] CHATZINOTAS S, EVANS B, GUIDOTTI A, et al. Cognitive approaches to enhance spectrum availability for satellite systems[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2017, 35(5): 407-442.
- [15] HU H, HUANG Y C, DA X Y, et al. Optimization of energy management for UAV-enabled cognitive radio[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(9): 1505-1508.
- [16] VASSAKI S, POULAKIS M I, PANAGOPOULOS A D, et al. Power allocation in cognitive satellite terrestrial networks with QoS constraints[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(7): 1344-1347.
- [17] LAGUNAS E, SHARMA S K, MALEKI S, et al. Resource allocation for cognitive satellite communications with incumbent terrestrial networks[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2015, 1(3): 305-317.
- [18] AN K, LIN M, ZHU W P, et al. Outage performance of cognitive hybrid satellite-terrestrial networks with interference constraint[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(11): 9397-9404.
- [19] AN K, LIANG T, ZHENG G, et al. Performance limits of cognitive-uplink FSS and terrestrial FS for ka-band[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55(5): 2604-2611.
- [20] VASSAKI S, POULAKIS M I, PANAGOPOULOS A D. Optimal iSINR-based power control for cognitive satellite terrestrial networks[J]. Transactions on Emerging Telecommunications

Technologies, 2017, 28(2): 1-10.

- [21] LIANG Y C, ZENG Y H, PEH E C Y, et al. Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(4): 1326-1337.
- [22] ETSI. Satellite earth stations and systems (SES); overview of present satellite emergency communications resources: TR 102 641 V1.2.2[S]. 2013.

[作者简介]



胡婧 (1981-), 女, 博士, 陆军工程大学通信工程学院副教授, 主要研究方向为卫星通信、信号处理、频谱监测。



边东明 (1976-), 男, 博士, 陆军工程大学通信工程学院副教授, 主要研究方向为卫星通信、天地一体化、卫星测控。



田湘 (1982-), 女, 硕士, 陆军工程大学通信工程学院讲师, 主要研究方向为卫星通信、卫星导航。



朱银霞 (1986-), 女, 硕士, 陆军工程大学通信工程学院讲师, 主要研究方向为卫星通信、微波器件。



张剑 (1980-), 男, 博士, 陆军工程大学通信工程学院讲师, 主要研究方向为卫星通信、混沌通信、同步技术。