

感知不确定下卫星认知无线网络多频谱接入优化策略

肖楠* 王伟 梁俊 刘玉磊 张振浩

(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)

摘要: 针对卫星认知无线网络频谱感知不确定性较大导致传统频谱接入机制效率降低的问题, 该文提出一种基于动态多频谱感知的信道接入优化策略。认知 LEO 卫星根据频谱检测概率与授权用户干扰门限之间的关系, 实时调整不同频谱感知结果下的信道接入概率。在此基础上以系统吞吐量最大化为目标, 设计了一种基于频谱检测概率和虚警概率联合优化的判决门限选取策略, 并推导了最佳感知频谱数量。仿真结果表明, 认知用户能够在不大于授权用户最大干扰门限的前提下, 根据授权信道空闲状态动态选择最佳频谱感知策略, 且在检测信号信噪比较低时以更加积极的方式接入授权频谱, 降低了频谱感知不确定性对信道接入效率的影响, 提高了认知系统吞吐量。

关键词: 卫星认知通信; 感知不确定; 频谱接入; 门限优化; 吞吐量

中图分类号: TN927

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)04-0818-07

DOI: 10.11999/JEIT170613

Optimized Multi-spectrum Access Strategy under Sensing Uncertainty for Cognitive Satellite Communication Network

XIAO Nan WANG Wei LIANG Jun LIU Yulei ZHANG Zhenhao

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: In allusion to the low efficiency of traditional spectrum access strategies caused by high spectrum sensing uncertainty of satellite cognitive communication network, a novel optimized channel access strategy based on dynamic multi-spectrum sensing is proposed. The cognitive LEO satellite could adjust the probability of channel access in time with different spectrum sensing results according to the relationship between spectrum detection probability and maximum interference threshold of primary user. In order to achieve the maximize throughput of cognitive system, a strategy for decision threshold selection based on joint optimization between spectrum detection probability and false alarm probability is designed, and the optimized number of sensing spectrums is derived. Simulation results indicate that cognitive LEO satellite is able to select optimized spectrum sensing strategy dynamically according to the idle states of primary channels with the interference limitation of primary user, and access primary channels more positively especially when the signal-to-noise ratio of detecting signals is low. The influence of spectrum sensing uncertainty on the efficiency of channel access is depressed and the throughput of cognitive system is improved by the proposed channel access strategy.

Key words: Cognitive satellite communication; Sensing uncertainty; Spectrum access; Threshold optimization; Throughput

1 引言

卫星认知无线网络是认知无线电技术的新兴发展与应用领域。文献[1-3]分别建立并分析了卫星认知通信的基本应用场景及其关键技术, 论证了卫星认知通信应用的潜在优势与重要研究价值。动态频

谱感知与接入技术是实现卫星认知无线网络高效频谱利用的关键。文献[4,5]在假定认知用户可以连续感知多条授权信道的基础上, 分别以信道接入时延最小化和空闲频谱发现概率最大化为优化目标, 提出了最佳频谱感知次序与感知时间的优化方法; 文献[6]通过限制系统认知用户数据包数量, 令授权用户以超时隙为单位优先使用信道, 提出一种带有接入阈值和超时隙的集中式认知无线网络频谱分配策略, 提高了认知用户的传输质量; 文献[7,8]通过允许认知用户从频谱感知、以较高的功率接入信道和以较低的功率接入信道 3 种可选策略中选择最优

收稿日期: 2017-06-27; 改回日期: 2017-12-07; 网络出版: 2018-01-23

*通信作者: 肖楠 heroamy@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61501496), 陕西省自然科学基金(2017JM6093)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61501496), The Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2017JM6093)

策略，并设计了相应的信道感知接入算法。文献[9]通过建立基于 Markov 频谱占用与信道状态预测参数的不确定性模型，提出了一种干扰环境下的卫星认知通信频谱学习与接入策略。然而，上述研究成果均假定认知用户能够实现对多条授权频谱的遍历感知，未考虑认知用户硬件条件和功率资源的有限性。文献[10,11]提出了一种基于双频谱感知的认知无线网络随机信道接入策略，该策略允许认知用户在同一时隙内连续感知两条信道，增大了认知用户的空闲频谱发现概率，提高了网络吞吐量，但是在该信道分配策略中，认知基站始终固定地为每个认知用户分配两条感知信道，不同信道状态下两条感知信道的最优性难以保证。文献[12]在文献[11]的基础上提出了一种基于多信道动态分配的信道接入策略，认知用户能够根据感知信道状态动态选择 1~3 条信道进行感知并接入，提高了信道接入灵活性和系统吞吐量。上述频谱接入策略均采用完全的 Overlay 策略进行频谱接入，且均以认知用户能够实现高质量的谱检测为前提，忽略了频谱感知不确定性对信道接入性能的影响。

在卫星认知无线网络中，认知用户频谱感知与接入的不确定性主要体现在 3 个方面：(1)感知信道数量的不确定，受星上资源的限制，认知卫星难以实现对所有授权频谱的遍历感知，需要根据空间环境和使用需求动态改变感知信道数量；(2)感知结果的不确定，与相对稳定的地面局域网络环境不同，受卫星高速运动、覆盖范围大、空间信号衰落以及其他干扰的影响，卫星所处空间网络状态随着卫星的运动也在动态变化，从而使得频谱感知结果与频谱真实状态之间的误差较大，增加了频谱感知的不确定性，例如当受到外界干扰时，认知卫星频谱检测的虚警概率可能高达 30%；(3)信道接入的不确定，受频谱检测不确定性的影响，认知用户仍然采用以频谱感知结果为主要依据的保守信道接入策略将会错失大量可用频谱资源，导致信道接入效率降低，为了提高频谱利用率，认知卫星需要根据频谱感知结果实时调整最佳接入策略，使得信道接入概率存在一定不确定性。

基于上述分析，本文首先提出了一种积极的信道接入策略，在此基础上以认知用户单条吞吐量最大化为目标，推导了最佳判决门限的优化策略，最后分析了认知卫星的最佳频谱感知数量，并通过实验仿真验证了所提频谱接入策略的有效性。

2 系统模型

假定卫星认知无线网络由 GEO/LEO 双层卫星网络组成。GEO 卫星网络拥有一段共享宽带频谱资

源。通常情况下，LEO 卫星采用地面卫星网控中心预分配的频率进行通信。然而，当 LEO 卫星预分配频率被干扰或无法满足业务传输需求时，为了提高 LEO 卫星空间环境适应能力和业务传输效率，此时 LEO 卫星可以通过频谱感知动态检测 GEO 卫星的共享频谱资源，在满足授权用户最大干扰门限的前提下发现并接入可用信道进行数据传输，如图 1 所示。

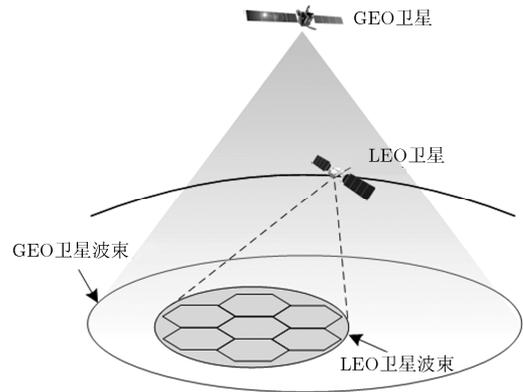


图1 系统模型

假设 GEO 卫星共享频谱被细分为 N 条互不干扰的正交子信道。系统以时隙结构运行，认知用户以时隙为周期对授权频谱进行感知。考虑到 LEO 卫星相对于 GEO 卫星的高速运动，LEO 卫星所检测到的授权信号强度也在不断变化，同时受星上资源的限制，LEO 卫星无需对所有授权频谱进行遍历检测，而是根据一定准则动态选择若干信道进行感知和接入，频谱感知模型如图 2 所示。

图 2 中， T 为 1 个时隙长度， τ 为每条信道的检测时间。假设认知用户无法在对信道感知的同时其他子信道上进行数据传输。对于 LEO 卫星而言，当 τ 确定时，感知信道数量越多，其发现高质量可用授权信道的概率越大，但是由此导致总的频谱感知时间也就越长，压缩了可用数据传输时间，影响系统吞吐量。因此，如何动态确定每个周期内的最佳感知信道数量，是提高卫星认知无线网络频

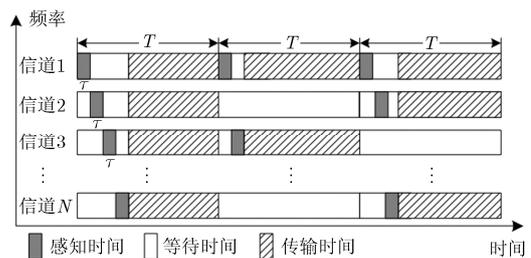


图2 多频谱感知模型

谱接入效率的关键。

假设 $P_n(H_0)$ 和 $P_n(H_1)$ 分别表示信道 n 的空闲与占用概率, 各授权信道的空闲概率各不相同, 认知用户可以通过长期的观测来估计各条授权信道的空闲概率^[13], 并在物理层采用能量检测法进行频谱感知, 则信道 n 的频谱检测概率 P_d^n 和虚警概率 P_f^n 分别可以表示为^[10]

$$P_d^n = \Pr\{H_1|H_1\} = Q\left(\left(\frac{\lambda_n}{\sigma^2} - \gamma_n - 1\right)\sqrt{\frac{\tau f_s}{2\gamma_n + 1}}\right) \quad (1)$$

$$P_f^n = \Pr\{H_1|H_0\} = Q\left(\left(\frac{\lambda_n}{\sigma^2} - 1\right)\sqrt{\tau f_s}\right) \quad (2)$$

式中, λ_n 表示信道 n 的判决门限, γ_n 为 LEO 卫星在信道 n 接收到的授权信号信噪比, f_s 表示信号采样频率, σ^2 为独立同分布的复高斯噪声功率,

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp(-t^2/2) dt.$$

3 频谱接入策略

在传统认知无线网络中, 若信道感知结果为空闲, 认知用户直接接入信道进行数据传输; 当信道感知结果为占用时, 则认知用户认为信道不可用并放弃在该信道进行接入。这种信道接入策略的有效性是建立在认知用户能够实现精确频谱感知的基础上的。然而, 在卫星认知无线网络中, 精确高效的星上频谱感知不仅会对卫星硬件能力提出较高要求, 还会消耗大量宝贵的星上资源; 另一方面, 受空间网络环境复杂性的影响, 采用经典能量检测策略时频谱感知结果与信道真实状态之间存在误差的概率较大, 导致传统信道接入策略的频谱接入效率降低。

针对上述问题, 为了进一步提高认知 LEO 卫星的频谱接入效率, 本文在考虑卫星频谱感知结果不确定性的基础上, 提出了一种更为积极频谱接入策略: 当信道感知结果为空闲(0)时, LEO 卫星以概率 $f_n(0)$ 接入信道 n ; 当信道感知结果为占用(1)时, 与传统认知用户直接放弃频谱接入不同, 此时 LEO 卫星仍然以概率 $f_n(1)$ 接入信道 n 进行数据传输。显然, 本文提出的信道接入策略既能减小漏检概率 $1 - P_d^n$ 较大时认知用户对授权用户的干扰, 又能缓解虚警概率过高导致可用频谱资源浪费的问题, 有效降低了 LEO 卫星频谱感知不确定性对信道接入的影响。

在上述频谱接入策略中, 信道接入概率 $f_n(0)$ 与 $f_n(1)$ 是影响认知用户接入效率的关键。由以上分析可知, 认知 LEO 卫星 t 时刻在信道 n 所能获得的吞吐量 $R_n(t)$ 为

$$R_n(t) = P_n(H_0) \left((1 - P_f^n) f_n(0) + P_f^n f_n(1) \right) \cdot B_n \lg(1 + \text{SNR}_n) \quad (3)$$

式中, B_n 表示信道 n 的带宽, SNR_n 表示信道 n 空闲时认知 LEO 卫星信道在 n 传输数据的信噪比。为了保证授权用户的正常通信, 要求认知用户在信道 n 上对授权用户的干扰概率 $PC_n(t) \leq \xi$, 其中 ξ 为授权用户所能容忍的最大干扰门限, 则

$$PC_n(t) = (1 - P_d^n) f_n(0) + P_d^n f_n(1) \leq \xi \quad (4)$$

定理 1 当认知 LEO 卫星在信道 n 的频谱感知参数 (P_d^n, P_f^n) 确定时, 其在信道 n 的最佳接入策略 $(f_n^*(0), f_n^*(1))$ 为

$$(f_n^*(0), f_n^*(1)) = \begin{cases} \left(1, \frac{\xi - (1 - P_d^n)}{P_d^n}\right), & \xi \geq 1 - P_d^n \\ \left(\frac{\xi}{1 - P_d^n}, 0\right), & \xi < 1 - P_d^n \end{cases} \quad (5)$$

证明 由式(3)可知, 最佳信道接入策略 $(f_n^*(0), f_n^*(1))$ 可以表示为

$$(f_n^*(0), f_n^*(1)) = \arg \max_{f_n(0), f_n(1)} \left((1 - P_f^n) f_n(0) + P_f^n f_n(1) \right) \quad (6)$$

s.t. $PC_n(t) = (1 - P_d^n) f_n(0) + P_d^n f_n(1) \leq \xi, \forall n, \forall t$

由约束条件可知:

$$0 \leq f_n(1) \leq \frac{\xi - (1 - P_d^n) f_n(0)}{P_d^n} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)可得

$$(1 - P_f^n) f_n(0) + P_f^n f_n(1) \leq f_n(0) (1 - P_f^n / P_d^n) + \xi P_f^n / P_d^n \quad (8)$$

通常情况下 $P_f^n < P_d^n$, 因此式(8)右侧是 $f_n(0)$ 的单调递增函数。显然, 当 $f_n(0)$ 取最大值且式(8)中等式关系成立时, 目标函数达到最优。由式(7)可知, 此时 $f_n(1) = [\xi - f_n(0)(1 - P_d^n)] / P_d^n$, 由于 $0 \leq f_n(1) \leq 1$, 同时考虑到 $\xi < P_d^n$, 可得

$$\frac{\xi - P_d^n}{1 - P_d^n} \leq f_n(0) \leq \frac{\xi}{1 - P_d^n} \quad (9)$$

由式(9)可知, 当 $\xi \geq 1 - P_d^n$ 时, 最佳信道接入策略为 $f_n^*(0) = 1, f_n^*(1) = \frac{\xi - (1 - P_d^n)}{P_d^n}$; 当 $\xi < 1 - P_d^n$ 时, 最佳信道接入策略为 $f_n^*(0) = \frac{\xi}{1 - P_d^n}, f_n^*(1) = 0$ 。

证毕

4 最佳判决门限

吞吐量是衡量认知用户频谱接入效率的重要指标。为了使得认知 LEO 卫星在 L 条信道所获得的

总平均吞吐量最大，只需保证其在每条信道所获得的平均吞吐量最大化即可。由式(3)可知，认知 LEO 卫星 t 时刻在信道 n 上吞吐量的优化目标函数可以表示为

$$\max_{\lambda_n} R_n(t) = \frac{T - L\tau}{T} C_n P_n(H_0) \cdot \left((1 - P_f^n(\lambda_n, \tau)) f_n(0) + P_f^n(\lambda_n, \tau) f_n(1) \right) \quad (10)$$

式中， $C_n = B_n \lg(1 + \text{SNR}_n)$ 。由于 LEO 卫星分配给每条信道的感知时间 τ 相同，因此判决门限 λ_n 是影响认知用户吞吐量的重要因素。

定理 2 对于给定的频谱感知时间 τ ， $P_d^n(\lambda_n, \tau)$ 和 $P_f^n(\lambda_n, \tau)$ 是关于 λ_n 单调递减函数。

证明 根据式(1)，对 $P_d^n(\lambda_n, \tau)$ 计算关于 λ_n 的一阶导数，可得

$$\frac{\partial P_d^n(\lambda_n, \tau)}{\partial \lambda_n} = -\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} \exp\left(-A_n^2/2\right) \sqrt{\tau f_s} \quad (11)$$

式中， $A_n = (\lambda_n/\sigma^2 - \gamma_n - 1) \sqrt{\tau f_s}$ 。显然 $\partial P_d^n(\lambda_n, \tau)/\partial \lambda_n < 0$ ， $P_d^n(\lambda_n, \tau)$ 是关于 λ_n 的单调递减函数。

根据式(2)，对 $P_f^n(\lambda_n, \tau)$ 计算关于 λ_n 的一阶导数，可得

$$\frac{\partial P_f^n(\lambda_n, \tau)}{\partial \lambda_n} = -\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} \exp\left(-B_n^2/2\right) \sqrt{\tau f_s} \quad (12)$$

式中， $B_n = (\lambda_n/\sigma^2 - 1) \sqrt{\tau f_s}$ 。显然 $\partial P_f^n(\lambda_n, \tau)/\partial \lambda_n < 0$ ， $P_f^n(\lambda_n, \tau)$ 是关于 λ_n 的单调递减函数。证毕

在实际通信中，为了保证认知用户的频谱检测和网络吞吐量性能，通常要求 $P_f^n < 0.5$ 而 $P_d^n > 0.5$ ，因此式(10)中的优化问题需要满足式(13)中的约束条件：

$$0 < L\tau < T/2, \quad \sigma^2 < \lambda_n < (\gamma_n + 1)\sigma^2 \quad (13)$$

(1) $\xi \geq 1 - P_d^n$ ：根据最佳信道接入策略，此时吞吐量优化目标函数 $R_n^1(\lambda_n, t)$ 可以写为

$$\max_{\lambda_n} R_n^1(\lambda_n, t) = \frac{T - L\tau}{T} C_n P_n(H_0) \cdot \left[1 - (1 - \xi) \frac{P_f^n(\lambda_n, t)}{P_d^n(\lambda_n, t)} \right] \quad (14)$$

上述优化问题最优解可以表示为 $\lambda_n = \arg \min_{\lambda_n} \frac{P_f^n(\lambda_n, \tau)}{P_d^n(\lambda_n, \tau)}$ ，由于 $P_d^n \geq 1 - \xi$ ，根据 $P_d^n(\lambda_n, \tau)$ 的单调递减特性，则要求认知用户频谱最佳判决门限 $\lambda_n^* \leq \lambda_{th}$ ，其中 $P_d^n(\lambda_{th}, \tau) = 1 - \xi$ 。因此，当 $\xi \geq 1 - P_d^n$ 时，认知 LEO 卫星的最佳判决门限 $\lambda_{n,1}^*$ 可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{n,1}^* &= \arg \min_{\lambda_n} \frac{P_f^n(\lambda_n, \tau)}{P_d^n(\lambda_n, \tau)} \\ \text{s.t. } \lambda_n &\leq \lambda_{th}, \sigma^2 < \lambda_n < (\gamma_n + 1)\sigma^2 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

(2) $\xi < 1 - P_d^n$ ：根据最佳信道接入策略，此时吞吐量优化目标函数 $R_n^2(\lambda_n, t)$ 可以写为

$$\max_{\lambda_n} R_n^2(\lambda_n, t) = \frac{T - L\tau}{T} C_n P_n(H_0) \cdot \left(\xi \frac{1 - P_f^n(\lambda_n, t)}{1 - P_d^n(\lambda_n, t)} \right) \quad (16)$$

上述优化问题最优解可以表示为 $\lambda_n = \arg \max_{\lambda_n} \frac{1 - P_f^n(\lambda_n, \tau)}{1 - P_d^n(\lambda_n, \tau)}$ ，由于 $P_d^n < 1 - \xi$ ，根据 $P_d^n(\lambda_n, \tau)$ 的单调递减特性，则要求认知用户频谱最佳判决门限 $\lambda_n^* > \lambda_{th}$ ，其中 $P_d^n(\lambda_{th}, \tau) = 1 - \xi$ 。因此，当 $\xi < 1 - P_d^n$ 时，认知 LEO 卫星的最佳判决门限 $\lambda_{n,2}^*$ 可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{n,2}^* &= \arg \max_{\lambda_n} \frac{1 - P_f^n(\lambda_n, \tau)}{1 - P_d^n(\lambda_n, \tau)} \\ \text{s.t. } \lambda_n &> \lambda_{th}, \sigma^2 < \lambda_n < (\gamma_n + 1)\sigma^2 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$\lambda_{n,1}^*$ 与 $\lambda_{n,2}^*$ 分别可以通过搜索寻优算法迭代获得。由于判决门限的优化目标是使得认知用户的系统吞吐量最大化，因此对于认知 LEO 卫星而言，最佳判决门限 λ_n^* 可以写为

$$\lambda_n^* = \begin{cases} \lambda_{n,1}^*, & R_n^1(\lambda_{n,1}^*, t) \geq R_n^2(\lambda_{n,2}^*, t) \\ \lambda_{n,2}^*, & R_n^1(\lambda_{n,1}^*, t) < R_n^2(\lambda_{n,2}^*, t) \end{cases} \quad (18)$$

值得注意的是，上述最佳频谱判决门限的确定综合考虑了频谱检测概率与虚警概率对系统吞吐量的影响，与认知 LEO 卫星的频谱检测性能不直接相关，即系统吞吐量最大时的判决门限无法保证认知 LEO 卫星的频谱检测性能最优，因此本文在后续仿真分析中重点考虑判决门限选取策略对系统吞吐量的影响。

5 最优感知信道数量

由于认知 LEO 卫星选择 L 条授权信道进行感知和接入，系统总吞吐量与信道的感知顺序和总的感知信道数量直接相关。在每个时隙起始时刻，认知 LEO 卫星按照信道空闲概率 $P_n(H_0)$ 由大到小的顺序选择前 L 条信道进行感知，并在感知结束后根据感知结果以不同概率接入信道。结合式(3)，认知 LEO 卫星感知 t 时刻在 n 条感知信道上所获得的平均吞吐量可以表示为

$$\Phi_n(t) = \frac{T - n\tau}{T} \sum_{k=1}^n P_k(H_0) R_k(t) \quad (19)$$

由于授权信道数量 N 是有限的, 根据最优停止理论, 认知 LEO 卫星需要对 n 条信道的吞吐量 $\Phi_n(t)$ 与 $n+1$ 条信道的平均吞吐量 $\Phi_{n+1}(t)$ 进行顺序比较:

$$\Phi_{n+1}(t) - \Phi_n(t) = \frac{T - (n+1)\tau}{T} P_{n+1}(H_0) R_{n+1}(t) - \frac{\tau}{T - n\tau} \Phi_n(t) \quad (20)$$

当 $\Phi_{n+1}(t) - \Phi_n(t) \leq 0$ 时, 表明认知 LEO 卫星继续感知第 $n+1$ 条信道已经无法进一步提高认知系统的总吞吐量, 则停止频谱感知, 并选取最佳信道感知数量 $L = n$ 。根据式(20)可得

$$\Phi_n(t) \geq \frac{T - n\tau}{T\tau} [T - (n+1)\tau] P_{n+1}(H_0) R_{n+1}(t) \quad (21)$$

因此, 最佳感知信道数量 L 可以通过式(22)进行计算:

$$\left. \begin{aligned} L &= \min n \\ \text{s.t. } \Phi_n(t) &\geq \frac{T - n\tau}{T\tau} [T - (n+1)\tau] P_{n+1}(H_0) R_{n+1}(t) \end{aligned} \right\} (22)$$

6 仿真结果分析

假定 GEO 授权网络工作在 Ku 频段, 所有授权频谱状态在一个时隙周期内保持不变, 每条授权信道带宽 $B_n = 1$ MHz, 认知 LEO 卫星接入信道 n 所获得的归一化吞吐量 $B_n \lg(1 + \text{SNR}_n) = 1$ Mbit/s, 高斯噪声功率 $\sigma^2 = 1 \times 10^{-15}$ W。GEO 卫星授权信道数量 $N = 20$, 定义信道空闲概率因子为 α , 信道空闲概率 $P(H_0) = \alpha + 0.1 \times \text{rand}(1, N)$ 。认知 LEO 卫星的信号采样率 $f_s = 1$ MHz, GEO 卫星网络帧长 $T = 30$ ms, 信道检测时间 $\tau = 1$ ms, 仿真次数为 1000。记本文所提算法为 MSAS(Multi-Spectrum Access for cognitive Satellite networks), 传统基于单频谱感知的信道接入策略记为 SSAC(Single-channel Sensing and Access for CRNs), 文献[10]中提出的基于双频谱感知与分配的信道接入策略记为 MCGA(Markov Chain based Greedy channel Assignment scheme), 不同算法的频谱接入策略均

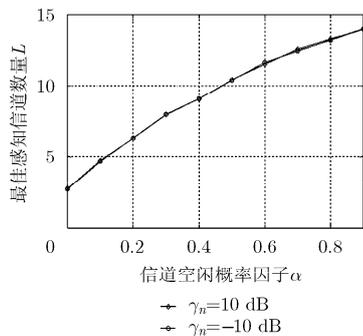


图 3 最佳感知信道数量 L 随信道空闲概率因子 α 的变化曲线

考虑对授权用户最大干扰概率的影响, 即 $P_{\text{th}} \geq 1 - \xi$ 。

图 3 给出了最佳判决门限随频谱感知时间和授权信号信噪比的变化结果。

由图 3 可知, 随着信道空闲概率因子的增大, 为了获得最大系统吞吐量, 认知 LEO 卫星所需检测的信道数量也在增加, 这是因为空闲概率因子的增大使得授权信道对于 LEO 卫星的可用度增加, 此时 LEO 卫星能够通过增加感知信道数量获得更大的系统吞吐量。另一方面, 不同信噪比下认知用户的最佳感知数量变化曲线几乎重合, 这是由于 MSAS 算法中最佳判决门限的选取综合考虑了频谱检测虚警概率与检测概率, 从而避免了授权用户信噪比对系统吞吐量的影响, 克服了卫星认知无线网络弱信号检测环境导致频谱检测性能下降对认知用户吞吐量的影响。

当信道空闲性能确定时, 单条信道上频谱接入策略对系统吞吐量的影响可以等价于频谱接入策略对信道接入成功概率的影响。图 4 为当频谱感知结果为空闲(0)时, 不同干扰概率门限下认知 LEO 卫星在单条信道上接入概率的仿真结果。

由图 4 可知, 两种算法的信道接入概率均随信噪比的增加而增大, 这是由于授权信号信噪比的增加使得频谱感知性能得到改善, 从而使得认知用户能够在满足干扰门限的前提下采用较高概率进行信道接入。但总体来看, MSAS 算法在低信噪比下的信道接入概率要高于 SSAC 算法, 且当信噪比增大到一定值时, 频谱感知性能的不确定性几乎可以忽略, 此时两种算法具有相同的信道接入性能。值得注意的是, 授权用户所能容忍的干扰门限 ξ 越大, SSAC 与 MSAS 算法达到相同信道接入性能所需要的最低信噪比越小, 这是由于较小的 ξ 使得 SSAC 算法过早地采用保守的信道接入策略以避免对授权用户的干扰, 而 MSAS 则在保证对授权用户干扰的前提下采用了较为积极的信道接入方式; 而当 ξ 较

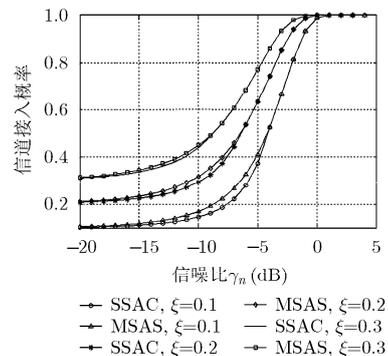


图 4 单条信道接入概率仿真结果

大时, 此时 SSAC 算法的信道接入策略也变得积极, 因此两种算法的信道接入性能相当。由此可见, MSAS 能够在保证对授权用户干扰门限的基础上有效提高弱信噪比环境下的信道接入概率, 有效改善了信道感知不确定性对频谱接入的影响。

图 5、图 6 分别为认知 LEO 卫星采用不同频谱感知与接入策略所获得吞吐量性能随信噪比的变化关系。

由图 5 可知, 在 $\xi = 0.3$ 时 3 种算法的吞吐量均随信噪比的增加而增加, 且 MSAC 算法的吞吐量性能要优于 SSAC 算法和 MCGA 算法。信道空闲概率 α 越大, MSAC 算法的吞吐量提升越明显, 这是由于 α 越大, 授权信道总体上对于 LEO 卫星的可用度越高, 由图 3 可知此时认知 LEO 卫星所检测并接入的感知信道数量也就越多, 与此同时 MSAS 算法综合考虑了频谱检测概率与虚警概率对系统吞吐量的影响, 采用较为积极的信道接入策略并且对判决门限的选取进行了优化, 较大幅度提升了吞吐量性能。反观 SSAC 与 MCGA 算法, 其所采取的单信道和双信道感知与接入策略仅在授权信道信噪比足够低 ($\gamma_n < -20$ dB) 时取得了与 MSAS 算法相当的性能, 当信噪比增加时, SSAC 与 MCGA 频谱接入策略并不能随信道质量与频谱检测性能的改善动态变化, 限制了系统吞吐量的提升。

图 6 为 $\alpha = 0.3$ 时吞吐量随信噪比的变化曲线。由图 6 可知, 授权用户的最大干扰容忍门限 ξ 越大,

3 种算法所能获得的吞吐量越高, 这是由于 ξ 越大, 认知 LEO 卫星的单条信道接入概率越大(图 4 所示)。当信噪比增大到一定值时, 不同算法在不同信噪比下所获得吞吐量性能趋于稳定且相等, 这是由于较大的信噪比克服了频谱感知不确定性对频谱接入的影响, 可见, 低信噪比导致的频谱感知的不确定性是影响认知 LEO 卫星吞吐量性能的重要因素, 而 MSAS 算法通过采用积极的频谱接入策略以及以吞吐量最大化为目标的判决门限优化机制, 较好地克服了弱信噪比环境下感知不确定性对系统吞吐量的影响, 增强了 MSAS 算法在卫星认知无线网络中的环境适应能力。

7 结束语

本文针对卫星认知无线网络中感知不确定性较大对频谱接入效率的影响, 提出了一种优化的多频谱接入策略, 认知 LEO 卫星能够在信道感知结果为空闲与繁忙的情况下分别以不同概率接入授权频谱, 改善了频谱感知结果不确定性导致可用频谱资源浪费的问题, 进而以系统吞吐量最大化为优化目标, 推导了最佳判决门限与感知频谱数量的选择方案, 并通过仿真验证了所提信道接入策略在提高认知系统吞吐量方面的有效性。此外, 当判决门限确定时, 频谱检测时间是影响信道接入效率与系统吞吐量的另一重要因素, 基于感知时间优化的多频谱接入策略是下一步研究工作中需要关注的重点。

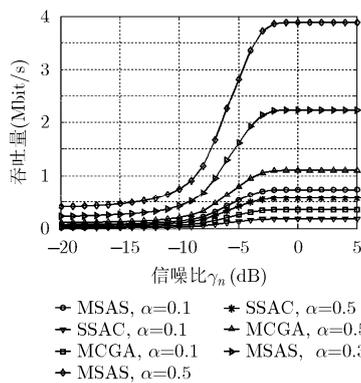


图 5 不同 α 下系统吞吐量随信噪比的变化曲线

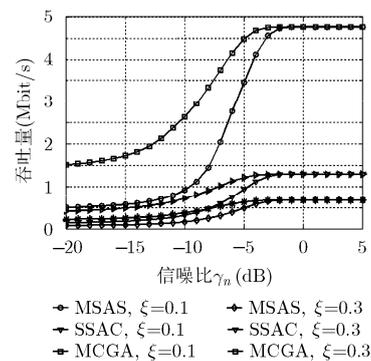


图 6 不同 ξ 下系统吞吐量随信噪比的变化曲线

参考文献

- [1] SHREE Krishna Sharma, SYMEON Chatzinotas, and BJORN Ottersten. Cognitive radio techniques for satellite communication systems[C]. IEEE 78th Conference on Vehicular Technology, Las Vegas, NV, USA, 2013: 1-5. doi: 10.1109/VTCFall.2013.6692139.
- [2] LIOLIS Konstantinos, SCHLUETER Gerald, KRAUSE Jens,

- et al.* Cognitive radio scenarios for satellite communications: the CoRaSat approach[C]. IEEE International Conference on Future Network and Mobile Summit, Lisboa, Portugal, 2013: 1-10.
- [3] DANIELE Tarchi, ALESSANDRO Guidotti, VINCENZO Icolari, *et al.* Technical challenges for cognitive radio application in satellite communications[C]. IEEE International Conference on Cognitive Oriented Wireless

- Networks, Oulu, Finland, 2014: 136–142. doi: 10.4108/icst.crowncom.2014.255727.
- [4] HYOIL K and KANG G S. Optimal online sensing sequence in multichannel cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computer*, 2012, 12(7): 1349–1362. doi: 10.1109/TMC.2012.108.
- [5] YUAN Guangxiang, RYAN C Grammenos, YANG Yang, *et al.* Performance analysis of selective opportunistic spectrum access with traffic prediction[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, 59(4): 1949–1959. doi: 10.1109/TVT.2009.2039155.
- [6] 金顺福, 代羽. 带有接入阈值和超时隙的认知无线网络频谱分配策略[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(8): 1817–1823. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01417.
- JIN Shunfu and DAI Yu. A spectrum allocation strategy with an access threshold and super-slot in cognitive radio networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(8): 1817–1823. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01417.
- [7] 郭文慧, 王亚林, 韩迎鹤. 基于POMDP的信道感知接入算法[J]. *计算机工程与应用*, 2014, 50(5): 203–207. doi: 10.3778/j.issn.1002-8331.1306-0379.
- GUO Wenhui, WANG Yalin, and HAN Yingge. Channel sensing and access algorithm based on POMDP[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2014, 50(5): 203–207. doi: 10.3778/j.issn.1002-8331.1306-0379.
- [8] LIU Keqin, ZHAO Qing, and BHASKAR Krishnamachari. Dynamic multichannel access with imperfect channel state detection[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(5): 2795–2808. doi: 10.1109/TSP.2010.2041600.
- [9] YI Shi and YALIN E S. Spectrum learning and access for cognitive satellite communications under jamming[C]. *IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS)*, Philadelphia, PA, USA, 2016: 978–986. doi: 10.1109/CNS.2016.7860538.
- [10] JIN Lai, ERYK Dutkiewicz, REN Ping Liu, *et al.* Dynamic spectrum access with two-channel sensing in cognitive radio networks[C]. *International Conference on Cognitive Radio and Networks Symposium*, Ottawa, ON, Canada, 2012: 1757–1762. doi: 10.1109/ICC.2012.6364284.
- [11] JIN Lai, ERYK D, LIU Renping, *et al.* Opportunistic spectrum access with two channel sensing in cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2015, 14(1): 126–138. doi: 10.1109/TMC.2013.152.
- [12] 肖楠, 梁俊, 刘玉磊. 基于动态多频谱感知的认知无线网络信道接入策略[J]. *上海交通大学学报*, 2016, 50(5): 788–795. doi: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2016.05.022.
- XIAO Nan, LIANG Jun, and LIU Yulei. Channel access strategy based on dynamic multi-spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2016, 50(5): 788–795. doi: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2016.05.022.
- [13] YAN Qi, YANG Jiawei, ZHANG Wen, *et al.* Optimal allocation of sensing duration among multiple channels in cognitive radio[J]. *IEICE Electronics Express*, 2011, 8(6): 346–352.
- 肖楠: 男, 1987年生, 博士, 讲师, 研究方向为空天信息网络技术.
- 王伟: 男, 1987年生, 硕士, 讲师, 研究方向为卫星移动通信技术.
- 梁俊: 男, 1962年生, 硕士, 教授, 研究方向为空间信息网络与数据链技术.
- 刘玉磊: 男, 1990年生, 博士生, 研究方向为空天信息网络技术.
- 张振浩: 男, 1994年生, 硕士生, 研究方向为空天信息网络技术.