

星地融合网络中基于三维频谱感知的空时频谱机会检测

杨 宁, 郭道省

(陆军工程大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)

摘 要: 研究星地融合网络下行链路频谱共享场景中三维频谱机会检测。首先, 定义星地融合网络的三维时空频谱机会, 并将机会在空间域进一步划分为主要用户通信区域、通信保护带和自由接入区域; 然后, 基于所提出的三维机会模型, 分别推导出用户级和网络级检测概率和虚警概率的闭合表达式。为了进一步利用空间频谱机会, 通过三维频谱感知确定认知用户的功率控制方案, 即干扰约束。仿真结果表明, 所提出的功率控制方案可以实现对三维频谱机会的检测。

关键词: 频谱感知; 卫星通信; 数据融合; 协作感知

中图分类号: TP927

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2022044

Detection of 3D Spatial-Temporal Spectrum Opportunity in Satellite-Terrestrial Integrated Network

YANG Ning, GUO Daoxing

College of Communications Engineering, Army Engineering University, Nanjing 210007, China

Abstract: The detection of 3D spectrum opportunities in the downlink sharing scenario in satellite-terrestrial integrated networks was investigated. First, defined the 3D space-time spectrum opportunities in the satellite-terrestrial integrated networks, and further divided the opportunities into three areas in the spatial domain: the communication area of primary user, the communication protection belt, and the free access area. Then, based on the proposed 3D opportunity model, derived the closed expressions of the detection and false alarm probability at the user-level and the network-level, respectively. In order to further utilized the spatial spectrum opportunity, a power control scheme of the cognitive user was determined through 3D spectrum sensing, i.e., interference constraint (IC). The simulation results demonstrated that the proposed power control scheme could realized the detection of 3D spectrum opportunity.

Keywords: spectrum sensing, satellite communication, data fusion, cooperative sensing

0 引言

频谱资源是重要亦匮乏的战略性资源。近年来, 随着经济的发展, 社会的不断进步, 无线设备的数量爆发性增长, 频谱资源的需求日渐增加, 频谱赤字随之日益严峻。同样, 在面向万物互联的6G时代, 随着无线设备的激增以及用户服务的不断拓展, 频谱资源稀缺这一问题将会更加严峻。对星地融合网络中的高频空时机会的不断挖掘, 将是缓解频谱资源稀缺以及提升频谱利用率的一个有效途径^[1-3]。

在星地融合网络中, 与传统地面认知无线电类似, 卫星认知无线电旨在通过频谱共享的方式, 使得地面认知用户可以在不影响卫星通信的前提下有效利用卫星的频段, 从而提高整个网络的频谱资源利用率。现有的绝大多数研究聚焦于对地面一维或者二维的频谱机会检测, 且研究的大都是同构的频谱机会^[4]。值得注意的是, 认知用户在检测接入机会时, 通常采用非合作或者合作感知的方式^[5]。具体地, 针对非合作感知, 认知用户可根据自己的接收信号判断频谱机会的有无^[6]; 同时, 针对合

收稿日期: 2022-08-01; 修回日期: 2022-11-01

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目 (No. BK20191328)

Foundation Item: The Jiangsu Provincial Natural Science Foundation of China (No. BK20191328)

作感知,大多数都是通过不同类型的权值运算^[7],最终结果用以判断是否存在频谱机会^[8]。星地融合网络中,因为卫星信号的低信噪比,以及波束的方向性,无论是采取哪种方式,均有明显问题。若采用非合作感知方案,低信噪比会使得检测性能很差;若盲目地采用合作感知方案,因传感器遍布整个网络,检测性能可能不佳,整个网络的频谱利用率随之降低^[9]。

受此启发,星地融合网络中的三维空时频谱机会检测非常有意义。总的来说,对星地融合网络中三维空时频谱机会的挖掘可以在很大程度上缓解频谱紧张。但如何合理地实现空时频谱的检测是很重要的,这是因为感知方案的设计和整个网络的频谱利用率有着很大的关系。

1 系统模型

1.1 星地下行链路频谱共享模型

如图1所示,本文考虑星地下行链路的频谱共享模型。传统的星地融合网络中,卫星的接收机往往只有卫星地球站,然而在实际中,在卫星的业务范围内的设备诸如移动卫星车、卫星电话等均可看作主用户接收机。因此,为更贴近实际应用,本文将图1中卫星业务范围内的设备看作主用户的接收机。考虑将整个卫星波束的覆盖范围在空域上划分为以下3个区域。

(1) 主用户通信区(黑区)

图1中以卫星地球站为圆心,底面半径为 D_B 的黄色圆锥 A_B ,与传统认知无线网络中的频谱机会黑区类似,目的是保障主用户的通信,因此,该范围由拥有卫星业务通信设备接收机的最小接收灵敏度所决定。在 A_B 内,卫星业务通信设备接收机可正常工作,但在 A_B 外,因为其接收信噪比低于其最小接收灵敏度,所以某些灵敏度较低的接收机可能无法正常工作。在此范围内,对于地面认知用户而言,只存在时域频谱机会,当且仅当卫星不工作的时候,地面认知用户才能在相应的频段传输数据,实现同频时分复用。

(2) 通信保护带(灰区)

图1中蓝色的 A_G 区域,底面半径为 D_G ,由地面认知用户的峰值发射功率决定。可以注意到,虽然星地融合网络中,地面认知用户可能分布在主用户通信区之外,但还是有可能对主用户的接收机造成影响,同时危害主用户的通信质量。这些用户所造成的干扰主要是由卫星业务通信设备接收机和地面认知用户(次用户发射机)之间的距离以及地面认知用户的发射功率决定的。因此,引入通信保护带进一步在空域上保护主用户的通信,其区域主要由主用户的干扰约束以及次用户的峰值发射功率决定。值得注意的是,在通信保护带的地面认知用户不仅拥有时域上的频

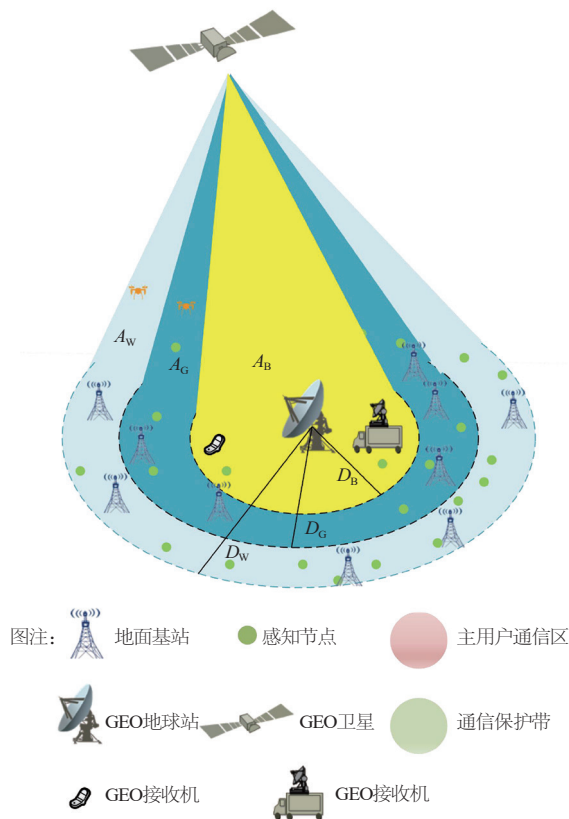


图1 星地下行链路频谱共享模型

谱机会,而且它们还可以在在进行一定功率控制的约束下,实现空域上的频谱共享。

(3) 自由接入区(白区)

如图1中淡蓝色的 A_W 区域的半径 D_B 由卫星波束的覆盖范围和地面认知用户的检测灵敏度所决定范围的较小者决定。这个假设是合理的,因为在通常情况下,地面认知用户的检测灵敏度高于卫星业务通信设备接收机的接收灵敏度,即满足 $D_G > D_B$ 。该区域内地面认知用户的发射功率不再受到限制,可以自由接入卫星频段,也不会对卫星的接收机造成影响。这是因为在此范围之外,就算地面认知用户以其峰值发射功率进行工作,对于主用户接收机而言,也不会超过其检测灵敏度。因此,在此区域内地面认知用户可对卫星频段分别进行时分复用以及空分复用。

1.2 空时三维频谱机会建模与性能指标

1.2.1 空时三维频谱机会建模

根据图1给出的星地下行链路频谱共享模型,针对星地融合网络中三维频谱机会进行数学建模。当提到频谱机会时,传统的检测如果是时域频谱机会的检测,通常可以建模为如下二元假设检验^[10]

$$\begin{cases} H_0: x_i[m] = w_i[m], & m = 0, 1, 2, \dots, M-1 \\ H_1: x_i[m] = \sqrt{P_i(l_i)} s_i[m] + w_i[m], & m = 0, 1, 2, \dots, M-1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, H_0 和 H_1 分别表示卫星信号不存在和存在, M 为一次感知周期内的样本数量, 特别地, 当 $M=0$ 时, 是指地面认知用户自己的感知样本数据。 $P_i(l_i) = P_0 G_{0,i}(\theta_{0,i}) (\frac{c}{4\pi f_c d_{0,i}})^2$ 表示第 i 个感知节点或者地面认知用户来自卫星的接收功率, P_0 为卫星的发射功率, $G_{0,i}(\theta_{0,i})$ 为其在 $\theta_{0,i}$ 方向上的增益, $\theta_{0,i}$ 为第 i 个地面认知用户与卫星的夹角, c 为光速, f_c 为中心频率, $w_i[m]$ 为高斯白噪声的采样值, $s_i[m]$ 为采样信号, 如图2所示 $d_{0,i}$ 为感知节点 i 到卫星的距离。根据ITU-R建议^[1], $G_{0,i}(\theta_{0,i})$ 可表述为

$$G_{0,i}(\theta_{0,i}) = \begin{cases} G_{s,\max} - 3(\frac{\theta_{0,i}}{\theta_{s,b}})^2, & \theta_{s,b} < \theta_{0,i} \leq b\theta_{s,b} \\ G_{s,\max} + L_n, & b\theta_{s,b} < \theta_{0,i} \leq c\theta_{s,b} \\ G_{s,\max} + L_n + 20 \\ -25\log(\frac{\theta_{0,i}}{\theta_{s,b}}), & c\theta_{s,b} < \theta_{0,i} \leq \theta_1 \\ 0, & \theta_1 < \theta_{0,i} \leq 90^\circ \\ 3, & 90^\circ < \theta_{0,i} \leq 180^\circ \end{cases} \quad (2)$$

其中, $G_{s,\max} = 47$ dBi为本文所参考的卫星天线的最大增益, $\theta_{s,b}$ 为其3 dB波束带宽的一半, L_n 是相对于峰值增益的期望旁瓣电平。当式(3)为真时, θ_1 为 $\theta_{0,i}$ 的值。当 $L_n = -20$ 时, b 和 c 的值分别是2.58和6.32。

$$G_{0,i}(\theta_{0,i}) = G_{s,\max} + L_n + 20 - 25\log(\frac{\theta_{0,i}}{\theta_{s,b}}) = 0 \quad (3)$$

类似地, 针对空域机会检测, 可建模为

$$\begin{cases} S_0: l_i \in A_G \cup A_W \\ S_1: l_i \in A_B \end{cases} \quad (4)$$

其中, S_0 和 S_1 分别表示地面认知用户处于灰区、白区或

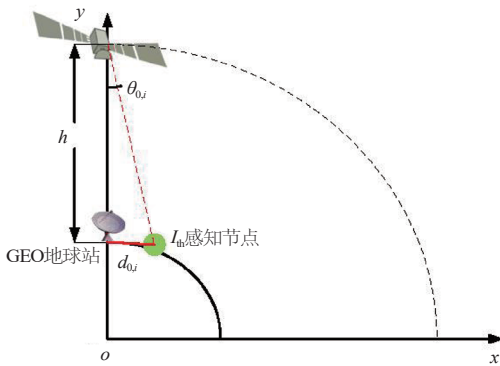


图2 感知节点 i 与卫星地球站的夹角

者黑区。值得注意的是传统的空域频谱感知, 其仅仅聚焦于非黑即白的频谱机会, 然而只要合理地控制地面认知用户的发射功率, 灰区的机会也是可以得到有效利用的, 因此, 在不影响卫星通信的情况下, 整个星地融合网络的频谱利用率会得到很大提升。

为更进一步地提升频谱利用率, 考虑挖掘空时频谱机会, 如式(5)所示。

$$\begin{cases} O_0: x_i[m] = \begin{cases} w_i[m] \\ \sqrt{P_i(l_i)} s_i[m] + w_i[m], & l_i \in A_G \cup A_W \end{cases} \\ O_1: x_i[m] = \sqrt{P_i(l_i)} s_i[m] + w_i[m], & l_i \in A_B \end{cases} \quad (5)$$

其中, O_0 表示存在可用的三维频谱机会, O_1 表示不存在可用的三维频谱机会。具体地, O_0 中的上式是指无论地面认知用户处于何处(黑区灰区白区), 当卫星不工作的时候, 均可实现时分复用; 下式指的是当卫星工作时, 地面认知用户可在通信保护带以及自由接入区实现空分复用。不同于传统的非黑即白型的共享方案, 本小节考虑将空时异构的灰色机会也作为可用的频谱机会, 因为只要干扰在一定范围内, 合理的共享频谱可以进一步提升网络的频谱效率。

1.2.2 检测性能指标

在对星地融合网络中三维频谱机会进行数学建模的基础上, 分别引入虚警概率和检测概率, 针对用户级以及网络级的检测性能进行评估。不管是虚警概率导致的频谱利用率低下还是漏检概率导致的频谱秩序受扰, 检测概率都是维护频谱秩序同时反映检测性能的有效指标, 所以, 引入虚警概率和检测概率作为性能指标是合理的。具体地, 对于用户 i , 其虚警概率 $P_{f,i}^{\text{user}}(t)$ 和检测概率 $P_{d,i}^{\text{user}}(t)$ 分别定义如式(6)、式(7)所示。

$$\begin{aligned} P_{f,i}^{\text{user}}(t) &= P\{\delta_i^{\text{user}}(T_i(t), \alpha) = O_1 | O_0\} \\ &= \begin{cases} P\{T_i(t) > \alpha | H_0\}, & l_i \in A_B \\ P\{T_i(t) > \alpha | H_1\} P_1 + P\{T_i(t) > \alpha | H_0\} (1 - P_1), & l_i \in A_G \cup A_W \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

$$P_{d,i}^{\text{user}}(t) = P\{\delta_i^{\text{user}}(T_i(t), \alpha) = O_1 | O_1\} = P\{T_i(t) > \alpha | H_1\}, \quad l_i \in A_B \quad (7)$$

其中, δ_i^{user} 为由检验统计量 $T_i(t)$ 以及判决门限 α 决定的用户级判决函数, $P_1 = \lambda / (\lambda + \mu)$ 为主用户信号存在的概率。

类似的, 对于整个星地融合网络, 其网络级虚警概率和检测概率分别如式(8)、式(9)所示。

$$P_f^{\text{net}} = \frac{1}{|\mathbb{T}| |\mathbb{N}|} \sum_{t \in \mathbb{T}} \sum_{i \in \mathbb{N}} P_{f,i}^{\text{user}}(t) \quad (8)$$

$$P_d^{\text{net}} = \frac{1}{|\mathbb{T}| |\mathbb{N}_{\text{in}}|} \sum_{t \in \mathbb{T}} \sum_{i \in \mathbb{N}_{\text{in}}} P_{d,i}^{\text{user}}(t) \quad (9)$$

其中, $|\mathbb{T}|$ 表示连续感知周期集合的大小, $|\mathbb{N}|$ 表示网络

内所有认知用户, $|\mathbb{N}_{in}|$ 表示主用户通信区内的所有认知用户。式(6)、式(7)与式(8)、式(9)之间的差别主要是由 $|\mathbb{N}|$ 和 $|\mathbb{N}_{in}|$ 带来的, 这是由网络级虚警形成的原因的差异性造成的。具体地, 对于时域共享时, 虚警是因为认知用户错误地将无信号 (H_0) 判为了有信号 (H_1); 同样对于空域共享时, 虚警是因为认知用户错误地将自身处于主用户通信区内 (A_B 内) 判为了在主用户通信区外。然而, 对于网络级检测概率而言, P_d^{net} 仅仅与主用户通信区内 (A_B 内) 的用户有关, 这是因为处于主用户通信区外的用户始终存在空域频谱机会。

2 时空三维协作和非协作感知分析

2.1 时空三维频谱机会非协作感知 (NCS)

对于每一个地面认知用户, 其基于能量检测的方式, 通过累计当前时隙的所收集到的信号能量值独立判断是否存在空时频谱机会, 对应的检验统计量可表示为

$$E_i(t) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} [x_i(m)]^2 \quad (10)$$

根据中心极限定理, 即当样本数 M 足够大 ($M \gg 10$) 时, 检验统计量 $E_i(t)$ 近似服从正态分布^[8]

$$E_i(t) \sim \begin{cases} \mathcal{N}(\mu_0, \sigma_0^2), & H_0 \\ \mathcal{N}(\mu_1(l_i), \sigma_1^2(l_i)), & H_1 \end{cases} \quad (11)$$

其中,

$$\begin{cases} \mu_0 = \sigma_n^2 \\ \sigma_0^2 = 2\sigma_n^4 / M \\ \mu_1(l_i) = (1 + \text{SNR}_i) \sigma_n^2 = (1 + \text{SNR}_i) \mu_0 \\ \sigma_1^2(l_i) = 2(1 + 2\text{SNR}_i) \sigma_n^4 / M = (1 + 2\text{SNR}_i) \sigma_0^2 \end{cases} \quad (12)$$

SNR_i 为每个认知用户的接收信噪比, $\text{SNR}_i = P_i(l_i) / \sigma_n^2$ 。

因为在非协作方案中, 将 $T_i(t) = E_i(t)$ 分别代入式(6)、式(7), 可得到

$$P_{f,i}^{\text{user}}(t) = \begin{cases} Q\left(\frac{\alpha - \mu_0}{\sigma_0}\right), & l_i \in A_B \\ P_1 Q\left(\frac{\alpha - \mu_1(l_i)}{\sigma_1(l_i)}\right) + (1 - P_1) Q\left(\frac{\alpha - \mu_0}{\sigma_0}\right), & l_i \in A_G \cup A_W \end{cases} \quad (13)$$

$$P_{d,i}^{\text{user}} = Q\left(\frac{\alpha - \mu_1(l_i)}{\sigma_1(l_i)}\right), \quad l_i \in A_B \quad (14)$$

进一步地, 根据式(8)、式(9), 网络级空时虚警概率

P_f^{net} 和检测概率 P_d^{net} 可表示为

$$P_f^{\text{net}} = \frac{1}{|\mathbb{N}|} \left\{ \sum_{i \in \mathbb{N}_{in}} Q\left(\frac{\alpha - \mu_0}{\sigma_0}\right) + \sum_{i \in \mathbb{N}_{out}} \left[P_1 Q\left(\frac{\alpha - \mu_1(l_i)}{\sigma_1(l_i)}\right) + (1 - P_1) Q\left(\frac{\alpha - \mu_0}{\sigma_0}\right) \right] \right\} \quad (15)$$

$$P_d^{\text{net}} = \frac{1}{|\mathbb{N}_{in}|} \sum_{i \in \mathbb{N}_{in}} Q\left(\frac{\alpha - \mu_1(l_i)}{\sigma_1(l_i)}\right) \quad (16)$$

其中, $\mathbb{N}_{in}$ 和 $\mathbb{N}_{out}$ 为主用户通信区内外地面认知用户的集合。

2.2 时空三维频谱机会协作感知 (CS)

传统的协作频谱感知, 主要是基于软值合并的。本节主要考虑利用最大比合并 (MRC) 的方案来进行感知数据的合并, 这是因为其线性运算的特性且可在低信噪比的环境中使得性能接近最优合并 (OC)^[1]。

因此, 其检验统计量可以表示为

$$E_{\text{CS,MRC}} = \sum_{i=1}^N w_i E_i \quad (17)$$

其中, $w_i = \text{SNR}_i / \sqrt{\sum_{k=1}^N \text{SNR}_k}$ 表示各个地面认知用户的权重, E_i 表示地面认知用户 i 所收集的能量值。由式(11), E_i 服从正态分布, 所以其线性组合 $E_{\text{CS,MRC}}$ 同样服从正态分布^[9]

$$E_{\text{CS,MRC}} \sim \begin{cases} \mathcal{N}(\mu_{\text{CS},0}, \sigma_{\text{CS},0}^2), & H_0 \\ \mathcal{N}(\mu_{\text{CS},1}, \sigma_{\text{CS},1}^2), & H_1 \end{cases} \quad (18)$$

其中,

$$\begin{cases} \mu_{\text{CS},0} = \sum_{i=1}^N \omega_i \sigma_n^2 \\ \sigma_{\text{CS},0}^2 = \sum_{i=1}^N 2\omega_i^2 \sigma_n^4 / M \\ \mu_{\text{CS},1}(l_i) = \sum_{i=1}^N (1 + \text{SNR}_i) \omega_i \sigma_n^2 \\ \sigma_{\text{CS},1}^2(l_i) = \sum_{i=1}^N (1 + 2\text{SNR}_i) \omega_i^2 \sigma_n^4 \end{cases} \quad (19)$$

这样一来, 分别联立式(6)、式(7), 可以得到用户级的检测概率和虚警概率如下

$$P_{f,i}^{\text{CS-user}}(t) = \begin{cases} Q\left(\frac{\alpha - \mu_{\text{CS},0}}{\sigma_{\text{CS},0}}\right), & l_i \in A_B \\ P_1 Q\left(\frac{\alpha - \mu_{\text{CS},1}(l_i)}{\sigma_{\text{CS},1}(l_i)}\right) + (1 - P_1) Q\left(\frac{\alpha - \mu_{\text{CS},0}}{\sigma_{\text{CS},0}}\right), & l_i \in A_G \cup A_W \end{cases} \quad (20)$$

$$P_{d,i}^{\text{CS-user}}(t) = Q\left(\frac{\alpha - \mu_{\text{CS},1}(l_i)}{\sigma_{\text{CS},1}(l_i)}\right), \quad l_i \in A_B \quad (21)$$

类似的, 也可通过联立式(8)、式(9)得到系统级的检测概率和虚警概率如下

$$P_{f,\text{net}}^{\text{CS}} = \frac{1}{|\mathbb{N}|} \left\{ \sum_{i \in \mathbb{N}_{in}} Q\left(\frac{\alpha - \mu_{\text{CS},0}}{\sigma_{\text{CS},0}}\right) + \sum_{i \in \mathbb{N}_{out}} \left[P_1 Q\left(\frac{\alpha - \mu_{\text{CS},1}(l_i)}{\sigma_{\text{CS},1}(l_i)}\right) + (1 - P_1) Q\left(\frac{\alpha - \mu_{\text{CS},0}}{\sigma_{\text{CS},0}}\right) \right] \right\} \quad (22)$$

$$P_{d,\text{net}}^{\text{CS}} = \frac{1}{|\mathbb{N}_{\text{in}}|} \sum_{i \in \mathbb{N}_{\text{in}}} Q\left(\frac{\alpha - \mu_{\text{CS},1}(l_i)}{\sigma_{\text{CS},1}(l_i)}\right) \quad (23)$$

3 空时三维频谱机会异构数据融合的检测方法

针对空域以及时域的感知数据，本节采用的是能量检测的方案。具体地，针对时域感知数据，一般情况下，卫星信号的有无随时间变化缓慢，因此相邻时隙的感知结果往往相关，但卫星工作状态也确实存在转换，即当前周期和历史周期的感知结果的相关性可能存在差异。因此，有效的时域感知方案应能区分出不同感知周期之间的时域相关性。针对空域感知数据，若针对特定空间，不同认知用户的感知结果的相关性随其相对距离的增大而减弱。因此，有效的感知方案要能区分不同距离的认知用户的空域相关性。

基于空时域相关性，本节提出一种同时利用时域和空域相关性的三维感知框架，如图3所示。

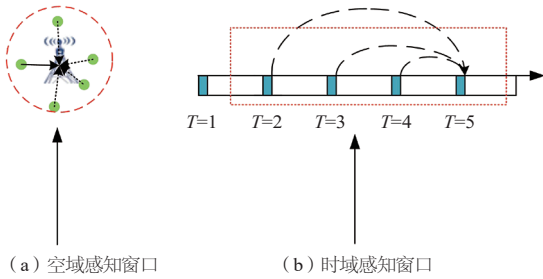


图3 三维感知框架

基于时域相关性，时间分集增益可通过每个认知基站对多个感知时隙结果的线性融合的方式获得。由于不同周期之间的时域相关性各有不同，因此，在这里以卫星工作状态维持不变的最小周期数作为时域感知窗口，窗口大小为 $l = \min[1/(\lambda T_p), 1/(\mu T_p)]$ 。第 i 个认知用户在第 t 周期的检验统计量可以表示为

$$\hat{T}_i(t) = \sum_{k \in T} \omega_k E_i(k), \quad i = 1, \dots, N \quad (24)$$

其中， $E_i(k)$ 是第 i 个认知用户在周期 k 的感知数据， ω_k 为归一化加权系数，可以进一步表示为

$$\omega_k = \frac{\varphi_k}{\sum_{k \in T} \varphi_u} \quad (25)$$

其中， $\varphi_k = e^{-\tau(t-k)}$ 表示 $E_i(k)$ 和 $E_i(t)$ 之间的时域相关性， τ 为可调参数。其次，基于空域相关性，针对地面认知用户而言，将它与其相邻的感知节点所得到的检验统计量进行空域数据融合，进而获得空间分集增益。为避免盲目融合，且度量自身感知结果与不同相邻感知结果相关性的差异性，对于每个地面认知用户 i ，引入空间感知窗口

S ，其半径为 D_s 的圆形区域，地面基站可以获得处于该区域内的感知节点的感知数据，进而进行数据融合

$$T_i(t) = \sum_{j \in S} \rho_j \hat{T}_j(t), \quad i = 1, \dots, N \quad (26)$$

类似地， ρ_j 为认知基站和第 j 个相邻感知节点感知结果之间的归一化加权系数，可以定义为

$$\rho_j = \frac{\phi_j}{\sum_{v \in S} \phi_v} \quad (27)$$

其中， ϕ_j 表示为认知基站和第 j 个相邻感知节点感知结果之间的空间相关系数，满足 $\phi_j = e^{-\theta|l_i - l_j|}$ 。 $|l_i - l_j|$ 表示第 i 个认知基站和第 j 个相邻感知节点的距离（ $\theta = 0.002$ ）。最后，进行空时域的机会检测。

$$T_i(t) = \sum_{k \in T} \sum_{j \in S} \omega_k \rho_j E_j(k) \stackrel{Q_1}{>} \stackrel{Q_0}{<} \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (28)$$

因此根据式(28)，三维空时联合检测的检验统计量满足如下分布

$$E_{3D} \sim \begin{cases} \mathcal{N}(\mu_{3D,0}, \sigma_{3D,0}^2), & H_0 \\ \mathcal{N}(\mu_{3D,1}(l_i), \sigma_{3D,1}^2(l_i)), & H_1 \end{cases} \quad (29)$$

其中，

$$\begin{cases} \mu_{3D,0} = \sum_{j \in S} \rho_j \sum_{k \in T} \omega_k^2 \sigma_n^2 \\ \sigma_{3D,0}^2 = \sum_{j \in S} \rho_j^2 \sum_{k \in T} 2\omega_k^2 \sigma_n^4 / M \\ \mu_{3D,1}(l_i) = \sum_{j \in S} \rho_j \sum_{k \in T} (1 + \text{SNR}_j) \omega_k^2 \sigma_n^2 \\ \sigma_{3D,1}^2(l_i) = \sum_{j \in S} \rho_j^2 \sum_{k \in T} (1 + \text{SNR}_j) 2\omega_k^2 \sigma_n^2 \end{cases} \quad (30)$$

所以，其用户级检测概率和虚警概率如下

$$P_{f,i}^{\text{user-3D}}(k) = \begin{cases} Q\left(\frac{\lambda - \mu_{3D}}{\sigma_{3D}}\right), & l_i \in A_B \\ (1 - P_1)Q\left(\frac{\lambda - \mu_{3D,0}}{\sigma_{3D,0}}\right) + P_1 Q\left(\frac{\lambda - \mu_{3D,1}(l_i)}{\sigma_{3D,1}(l_i)}\right), & l_i \in A_G \cup A_W \end{cases} \quad (31)$$

$$P_{d,i}^{\text{user-3D}}(k) Q\left(\frac{\lambda - \mu_{3D,1}(l_i)}{\sigma_{3D,1}(l_i)}\right), \quad l_i \in A_B \quad (32)$$

类似的，网络级检测概率和虚警概率如下

$$P_f^{\text{net-3D}} = \frac{1}{|N|} \sum_{i \in \mathbb{N}_{\text{in}}} Q\left(\frac{\lambda - \mu_{3D,0}}{\sigma_{3D,0}}\right) + \sum_{i \in \mathbb{N}_{\text{out}}} \left[(1 - P_1) Q\left(\frac{\lambda - \mu_{3D,0}}{\sigma_{3D,0}}\right) + P_1 Q\left(\frac{\lambda - \mu_{3D,1}(l_i)}{\sigma_{3D,1}(l_i)}\right) \right] \quad (33)$$

$$P_d^{\text{net-3D}} = \frac{1}{|N_{\text{in}}|} \sum_{i \in N_{\text{in}}} Q\left(\frac{\lambda - \mu_{3D,1}(l_i)}{\sigma_{3D,1}(l_i)}\right) \quad (34)$$

4 基于频谱感知的分布式功率控制方案

虽然本文主要的研究工作聚焦于针对地面认知用户 i 频谱机会是否存在，即判断其有无。然而，在实际应用中，人们不仅关心其存在性，也很关心机会的大小，即很关心可达的最大传输速率，因此，本节引出干扰约束这一概念来描述认知用户的发射功率上界。为方便对比，下面简要介绍一些经典的功率控制方案。

(1) 非黑即白的功率控制方案

假设在此方案中，频谱机会的检测是理想检测，并且空域机会为非黑即白。在这种情况下，功率控制的方案如下：一旦检测到频谱机会，就按照最大发射功率工作，否则就不工作。

(2) 黑灰白理想功率控制方案

与前者假设类似，并且假设地面认知用户和卫星地球站之间的距离是已知的。在空间域上，通信保护带的机会被挖掘，频谱效率得以提升。在此方案下，每个地面认知用户 i 的最大可发射功率如下

$$\Pi_{\text{IC}}^i = \begin{cases} 0, & l_i \in A_B, H_1 \\ I_{\text{th}}(l_i - D_B)^n, & l_i \in A_G, H_1 \\ \Pi_{\text{peak}}, & l_i \in A_w, H_1 \\ \Pi_{\text{peak}}, & H_0 \end{cases} \quad (35)$$

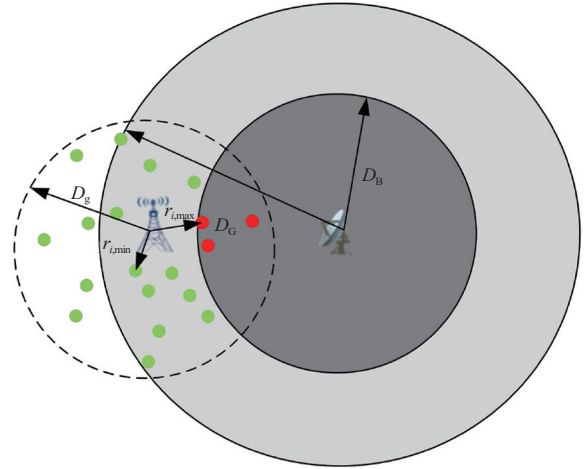
其中， I_{th} 为主用户通信区边界处主用户接收机的干扰门限。

然而，在实际应用的过程中，人们通常希望在卫星收发机某些先验信息未知的情况下还能合理并充分利用星地融合网络中自由接入区和通信保护带的空域频谱机会。机会与挑战并存：首先，实际中虚警和漏检切实存在；其次，地面认知用户还需满足来自卫星业务通信设备接收机的严格干扰约束。

不同地面认知用户所面临的机会往往不同，就算两个地面认知用户都有机会，其机会大小也不一定一样。

基于上述观察，本文提出一种基于三维频谱感知的分布式功率控制方案。在此方案中，通过前文提出的三维感知方案获得感知结果。如图4所示，地面认知用户 i 通过融合自身和邻居感知节点的感知结果来计算自身的干扰约束。需要特别指出的是，此处每个地面认知用户的邻居区域为以该用户为圆心，半径为 $D_g = \sqrt[n]{\Pi_{\text{peak}} / I_{\text{th}}}$ ，落在该区域内的感知节点为其邻居。

具体地，如图4所示，当次用户 i ，其自身判定结果为 O_1 （无机会）时，则其干扰约束为 $\Pi_{\text{IC}}^i = 0$ ；当判定结果



图注：● 判定结果为不存在机会 ● 判定结果为存在机会

图4 基于三维频谱感知的分布式功率控制示意

为 O_0 （有机会）时，还需进一步考察其邻居的判定结果。当它和它的所有邻居都判定为有机会时，很可能主用户信号不存在或者它处于通信保护带之外，因此 $\Pi_{\text{IC}}^i = \Pi_{\text{peak}}$ 。然而，当其部分邻居判定无机会时，它很可能处于通信保护带内。此时，定义一个保守的IC和一个激进的IC。

$$\Pi_{\text{IC},i}^{\text{con}} = I_{\text{th}}(r_{i,\text{max}})^n \quad (36)$$

其中， $r_{i,\text{max}}$ 表示次用户 i 和离它的邻居中最远的感知节点的距离。

$$\Pi_{\text{IC},i}^{\text{agg}} = I_{\text{th}}(r_{i,\text{min}})^n \quad (37)$$

其中， $r_{i,\text{min}}$ 表示次用户 i 和离它的邻居中最近的感知节点的距离。在实际中，可以采用两种策略的折中方案。

5 仿真实验

5.1 仿真参数设置

仿真参数设置见表1。

5.2 性能分析

如图5所示，在虚警概率为0.1时，随着认知用户与卫星地球站之间距离的增大，接收信噪比持续减小，因而NCS用户级检测概率随之减小。

表1 仿真参数设置

符号	物理意义	值
T	感知周期	100 ms
P_1	卫星信号存在的概率	0.9
I_{th}	干扰门限	-120 dBm
c	光速	3×10^8 m/s
τ	时域感知窗口参数	2.5
θ	空域感知窗口参数	0.002
f_c	中心频率	18.48 GHz

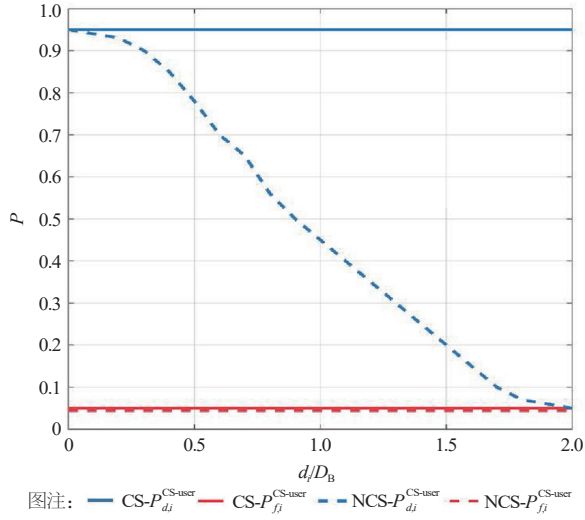


图5 三维时域频谱机会检测性能对比

由于CS方案的空间分集增益,其检测概率随时间距离的变化不明显,因此,CS方案有着比NCS方案更好的检测性能。

如图6所示,当认知用户位于主用户通信区时,即 $d_i/D_B < 1$ 的区域, NCS方案的检测性能随着距离增大明显呈下降趋势,而CS方案的检测性能却基本维持不变,这是由于CS利用了分集增益所致,体现了其优越性。此外,CS方案在主用户通信区外,即 $d_i/D_B > 1$ 的区域,有着高于NCS方案的虚警概率,这是由于利用了距离该认知用户很远的感知节点观测到的数据——盲目协作所致。

图7给出了不同方案下的网络级检测概率与虚警概率的关系,可以看出,由于同时利用了时域和空域相关性,获得了时间分集以及空间分集增益,所提三维空时频谱检测算法明显优于纯时域、纯空域以及非合作的频谱感知算法。

图8给出了平均干扰约束与认知用户最大发射功率之间的关系,可以看出,随着认知用户最大发射功率的增大,非黑即白的功率控制方案的网络平均干扰约束先增大后减小。这是因为只有通信保护带之外的用户的干扰约束才会随着其最大发射功率的增大而增大,而通信保护带却会随着其最大发射功率不断增大。由于该方案没有利用灰区(通信保护带内)的频谱机会,因此,平均干扰约束先增大后减小。黑灰白理想功率控制方案充分利用了通信保护带以及自由接入区的空域频谱机会,因而平均干扰约束随着最大发射功率的增大不断增大。不同于上述两种方案,本文所提基于三维频谱感知的分布式功率控制方案因其不需要知道主用户位置的先验信息,所以性能相较于理想方案略有不足,但是高于非黑即白的功率控制方案。

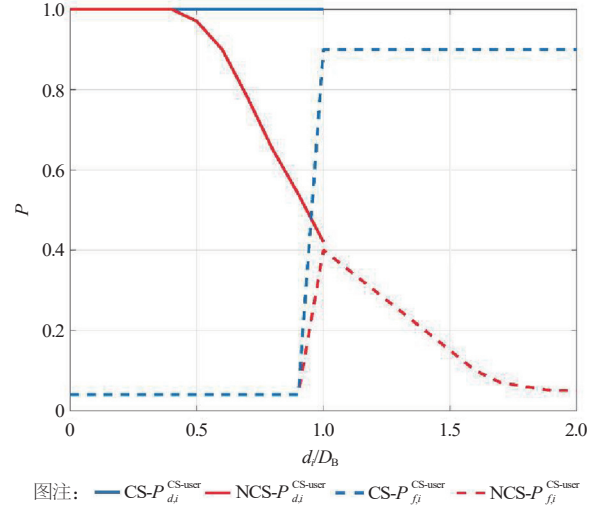


图6 用户级检测性能对比

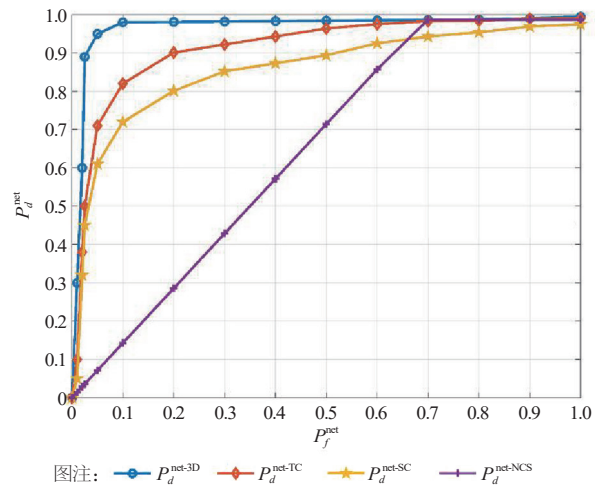


图7 网络级检测性能对比

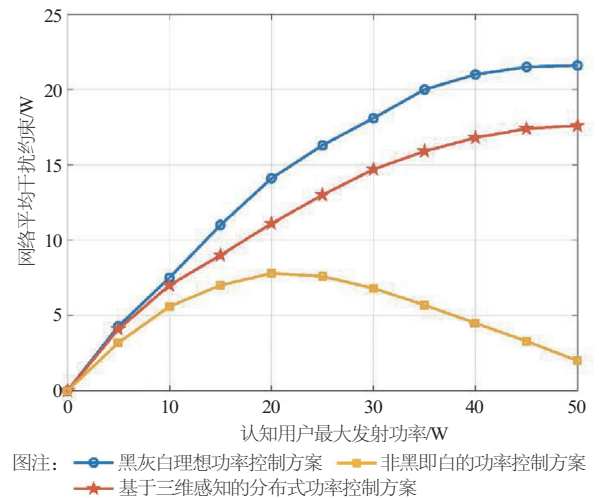


图8 平均干扰约束与认知用户最大发射功率的关系

参考文献：

- [1] SHARMA S K, CHATZINOTAS S, OTTERSTEN B. Satellite cognitive communications: interference modeling and techniques selection[C]//Proceedings of 2012 6th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (ASMS) and 12th Signal Processing for Space Communications Workshop (SPSC). Piscataway: IEEE Press, 2012: 111-118.
- [2] TANDRA R, MISHRA S M, SAHAI A. What is a spectrum hole and what does it take to recognize one? [J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(5): 824-848.
- [3] WANG B B, LIU K J R. Advances in cognitive radio networks: a survey[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2011, 5(1): 5-23.
- [4] MA J, ZHAO G D, LI Y. Soft combination and detection for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(11): 4502-4507.
- [5] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220.
- [6] ZHANG L Y, DING G R, WU Q H. Detecting abnormal power emission for orderly spectrum usage[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(2): 1989-1992.
- [7] QUAN Z, CUI S G, SAYED A H. Optimal linear cooperation for spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2008, 2(1): 28-40.
- [8] JIANG C X, CHEN Y, LIU K J R, et al. Renewal-theoretical dynamic spectrum access in cognitive radio network with unknown primary behavior[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(3): 406-416.
- [9] LIU Y, ZHANG B N, GUO D X, et al. Detection of spectrum misuse behavior in satellite-terrestrial spectrum sensing based on multi-hypothesis tests[J]. IEEE Access, 2020(99): 50399-50413.
- [10] ZHANG L Y, DING G R, WU Q H, et al. Spectrum sensing under spectrum misuse behaviors: a multi-hypothesis test perspective[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2018, 13(4): 993-1007.
- [11] ZHANG C, JIANG C X, KUANG L L, et al. Spatial spectrum sharing for satellite and terrestrial communication networks[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55(3): 1075-1089.
- [12] 盛骤. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- SHENG Z. Probability Theory and Mathematical Statistics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.

[作者简介]



杨宁（1995—），男，陆军工程大学博士生，主要研究方向为卫星通信、空天地一体化网络、无人机通信、区块链等。



郭道省（1973—），男，博士，陆军工程大学教授，主要研究方向为卫星通信、通信抗干扰、空天地一体化网络、物理层安全、无人机通信等。