

# 卫星认知无线电 CDMA 上行链路功率控制

陈鹏<sup>1</sup>, 邱乐德<sup>2</sup>, 王宇<sup>1</sup>

(1. 中国空间技术研究院西安分院, 陕西 西安 710100; 2. 中国空间技术研究院, 北京 100094)

**摘要:** 功率控制和动态频谱接入是提高卫星通信中频谱利用率的关键技术。非注册用户以频谱租赁方式可对注册用户付出的代价进行补偿, 亦可完成自身通信需求。针对注册用户和非注册用户给出不同的效用函数, 对由两种用户作为参与者建立的博弈模型进行纳什均衡求解, 之后通过最大化系统容量条件完成效用占优选择, 得到最优功率分配策略。该策略可满足两种用户自身需求, 亦可使系统通信容量最大。对于其性能, 给出了两种用户数量和发送功率的关系, 仿真结果表明, 非注册用户数量在系统容限内愈多则系统总容量愈大, 注册用户所要求的最低信干噪比则在一定范围内最佳。

**关键词:** 卫星认知通信; 功率控制; 动态频谱租赁; 码分多址; 纳什均衡; 系统容量

**中图分类号:** TN 927.23

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1001-506X.2012.11.29

## Uplink power control for CDMA satellite cognitive radio

CHEN Peng<sup>1</sup>, QIU Le-de<sup>2</sup>, WANG Yu<sup>1</sup>

(1. China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100, China;

2. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Power control and dynamic spectrum access are key technologies for improving spectrum utilization ratio in satellite communication. Primary users are rewarded for allowing secondary users to communication in their licensed spectrum by dynamic spectrum leasing. A game theoretic framework with primary users and secondary user as players and with two different utility functions is developed. An optimal power allocation strategy that could satisfy both types of users and could max system throughput by payoff dominance selection of Nash equilibrium is addressed. The relation between users number and transfer power is performed, and simulation results show the increase of the secondary users number that system could afford and the minimum SINR required by primary users within the confines of a certain extent could enhance system throughput.

**Keywords:** satellite cognitive communication; power control; dynamic spectrum leasing; code-division-multiplex-access (CDMA); Nash equilibrium; system throughput

## 0 引言

在频谱资源日益稀缺的今天, 已注册的频谱使用率存在着利用不充分的现象<sup>[1]</sup>。在空间通信中, 由于卫星通信频段在卫星发射前便已经注册, 频率资源更显珍贵。然而不同的卫星工作在不同的地域, 提供着不同的服务, 甚至随着时间的推移其工作状态也不同, 这造成卫星频段并未完全应用。因此, 如何更为充分地利用卫星频谱资源是人们讨论的一项重大课题。

认知无线电技术<sup>[2-3]</sup>的提出正是出于提高频谱利用率的目的, 其灵活的实现方式<sup>[4]</sup>为卫星通信提高频谱效率提

供了更多的选择和参考。对于卫星通信中接入认知无线电固然可以使卫星频谱变得更为有效, 然而认知用户对卫星系统中原有的注册用户会产生干扰, 严重则会损害注册用户的利益。鉴于此, 寻求保证注册用户通信质量不受影响的同时最大化认知系统通信容量或最大化整个卫星系统通信容量的方法成为人们的研究目标。

通常, 实现最大化系统容量主要通过功率控制 (power control, PC) 和动态频谱接入 (dynamic spectrum access, DSA) 来进行, 而多数 PC 和 DSA 联系密切, 当给某个认知用户分配频谱时, 将其允许发射功率设定为某个值, 当没有分配时, 将发射功率设定为 0。因此, PC 和 DSA 可看作是

收稿日期: 2012-02-27; 修回日期: 2012-05-21。

基金项目: 国家预研基金项目(9140A21050910HT0501)资助课题

作者简介: 陈鹏(1981-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为空间通信。E-mail: ertiao9912@gmail.com

一种联合资源管理。

目前,对于地面认知无线电中 PC 算法的研究正在如火如荼地进行着,文献[5]介绍了一种合作 DSA 时的 PC 方法,以接收端信干噪比(signal to interference plus noise ratio, SINR)为服务质量(quality of service, QoS)指标,通过限定系统 SINR 总和,对 QoS 指标进行最大化。文献[6]对上下行的 PC 均采用了迭代的算法,算法混合了分布式和集中式处理的方法,假设主要用户(primary users, PU)合作,之后在信道分配上采用了最大加权双边匹配算法。文献[7]讨论了次要用户(secondary users, SU)在 PU 网络中以非合作方式博弈过程进行功率分配,通过加入定价机制使整个系统达到最大收益,最终使整个系统所获收益趋于最大同时也趋于稳定。文献[8]描述了一种层级接入的动态频谱租赁(dynamic spectrum leasing, DSL)场景,分别证明了在 SU 进行匹配滤波接收和线性最小均方误差接收下的 PC 博弈中纳什均衡的存在性和唯一性。

与此同时,针对卫星认知通信的 PC 算法尚不多见。文献[9]对高度为 1 200 km 的低轨卫星进行了机会接入建模,定义效用函数为考虑优先级的系统吞吐量,以最大效用函数为目标进行功率分配。

本文正是出于提高卫星资源利用率的目的,以 underlay 方式对卫星码分多址(code division multiple access, CDMA)通信中 DSL 模型下的上行链路 PC 进行了研究,并以此为切入点对卫星实现认知无线电的可行性及影响因素进行了讨论。本文后续内容安排如下:第 1 节对基于卫星 CDMA 的 DSL 系统进行了建模,在此基础上分别给出了 PU 和 SU 的效用函数以及系统目标函数;第 2 节将通信系统模型抽象为博弈模型,并求出其纳什均衡,给出结合系统目标函数对所求均衡进行效用优先选择,得到最优解;第 3 节赋予卫星系统模型参数,并在此基础上讨论了最优解的性能以及影响系统容量的因素;第 4 节对全文进行了总结。

## 1 系统模型与问题描述

一个基于卫星 CDMA 的 DSL 系统包括一个卫星同时作为主 PU 基站和 SU 基站(即作为公共接收机)、 $L$  个 PU 和  $K$  个 SU。其中,PU 为卫星通信的注册用户,SU 在保证 PU 正常通信的前提下通过付出代价的频谱租赁进行通信,所付代价则用作对 PU 注册代价的补偿。此时,PU 在满足自身通信需求下尽量降低自身注册代价,即争取更多的代价补偿;SU 则在支付相应的代价之后尽可能获得更多的通信容量从而进行自身通信。

对于  $\forall k \in \{1, \dots, K\}, l \in \{1, \dots, L\}$ ,假定  $h_k^s$  为第  $k$  个 SU 与公共接收机之间的信道增益; $h_l^p$  为第  $l$  个 PU 与公共接收机之间的信道增益; $Q_l$  为第  $l$  个 PU 干扰阈值, $Q_l$  表示了 PU 接收机对其他所有用户总干扰的最大容忍量; $P_l$  为第  $l$  个 PU 的发射功率; $p_k$  为第  $k$  个 SU 的发射功率。

假定各个用户同处于同一个卫星通信区域,采用同样长度的扩频序列,拥有相同的通信条件与扩频增益  $G$ ,为简便起见,令  $h_k = h_l^p = h, 0 \leq h \leq 1$ 。根据天气的变化卫星通

信存在着不同的  $h$ ,干扰阈值也会随之变动。在 QoS 不变时, $P_l$  直接决定了  $Q_l$ ,因此在本模型中,假设 PU 通过调整发射功率  $P_l$  完成频谱租赁,并且要求 PU 应该首先保证自身的 QoS,其次才是租赁频谱。

第  $l$  个 PU 在星上接收的 SINR 为

$$\gamma_l^{(P)} = \frac{Gh^2 P_l}{\sum_{k=1}^K h^2 p_k + \sum_{i=1, i \neq l}^L h^2 P_i + \sigma^2} = \frac{Gh^2 P_l}{I_l^p + I_l^{pp} + \sigma^2} = \frac{Gh^2 P_l}{I_l^p + \sigma^2} \quad (1)$$

式中,  $I_l^p = \sum_{k=1}^K h^2 p_k$  为所有 SU 给 PU 带来的总干扰; $I_l^{pp} = \sum_{i=1, i \neq l}^L h^2 P_i$  为其他 PU 带来的总干扰; $I_l^p = I_l^p + I_l^{pp}, \sigma^2$  为接收噪声功率。

当第  $l$  个 PU 以功率  $P_l$  进行发射,完成自身通信要求最低的 SINR 为  $\bar{\gamma}_l$  时,其干扰阈值  $Q_l$  为

$$Q_l = \frac{Gh^2 P_l}{\bar{\gamma}_l} - \sigma^2 \quad (2)$$

第  $k$  个 SU 在星上的接收 SINR 为

$$\gamma_k^{(S)} = \frac{Gh^2 p_k}{\sum_{i=1, i \neq k}^K h^2 p_i + \sum_{i=1}^L h^2 P_i + \sigma^2} = \frac{Gh^2 p_k}{I_k^s + I_k^{sp} + \sigma^2} = \frac{Gh^2 p_k}{I_k^s + \sigma^2} \quad (3)$$

式中,  $I_k^s = \sum_{i=1, i \neq k}^K h^2 p_i$ , 为其他 SU 对 SU $k$  的总干扰, $I_k^{sp} = \sum_{i=1}^L h^2 P_i$ , 为所有 PU 对 SU $k$  的总干扰, $I_k^s = I_k^s + I_k^{sp}$ 。

为了满足自身通信需求,SU 必须付出相应的代价进行数据传输,定义代价系数  $\lambda_k$  为第  $k$  个 SU 传送单位功率所需付出的代价。则第  $k$  个 SU 传送数据实际付出的代价为  $\lambda_k p_k$ , PU 系统的代价补偿(收益)为  $B = \sum_{k=1}^K \lambda_k p_k$ 。

对于卫星通信系统而言,提高总的系统容量,即提高 PU 和 SU 通信量的总和为其主要目标。其中,PU 系统的主要目的是最大化收益  $B$ ,这意味着 PU 系统向 SU 用户提供最多的服务,这要求每个 PU 在满足目标 SINR 后以最低的功率进行数据传输。对于 PU $l$ ,满足  $Q_l \geq I_l^p$ ,就能满足其目标 SINR 的需要。SU 的主要目的是在付出代价后达到最大效率的传输。由此可以分别定义每个 PU 和 SU 的效用函数:

$$U_l^p(Q_l, \mathbf{P}^{p,l}) = Q_l - \mu_1 [(Q_l - I_l^p)^2 \varepsilon(Q_l - I_l^p)] - \mu_2 [(e^{(I_l^p - Q_l)} - 1) \varepsilon(I_l^p - Q_l)] \quad (4)$$

$$U_k^s(p_k, \mathbf{p}^{s,k}) = \ln(1 + \gamma_k^{(S)}) - \lambda_k p_k = \ln\left(1 + \frac{Gh^2 p_k}{I_k^s + \sigma^2}\right) - \lambda_k p_k \quad (5)$$

对于 SU $k$ ,其外界行动矢量(即不包括 SU $k$  的行动矢量)表示为  $\mathbf{p}^{s,k}$ ,对于 PU $l$ ,其外界行动矢量表示为  $\mathbf{P}^{p,l}$ 。

$\varepsilon(\cdot)$  为阶跃函数,即  $\varepsilon(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$ ,  $\mu_1, \mu_2$  分别为正的惩罚系数。

式(4)中的第 2、3 项保证了 PU 所需的 SINR 满足传输要求。对于 PU 瞬时 SINR 低于目标 SINR, 即  $Q_l < I_l^p$  时, PU 由于没有达到相应的传输质量而会被严重惩罚; 对于 PU 瞬时 SINR 高于目标 SINR, 即  $Q_l > I_l^p$  时, PU 同样会遭受一定惩罚, 这是因为 PU 达到目标 SINR 后, 并不需要发送更高的功率, 相反地, 发射功率的增加会浪费更多的能源, 对其他用户造成干扰以及降低收益。换句话说, 由其他用户带来的总干扰应尽可能地接近于干扰阈值  $Q_l$ 。

式(5)中第 1 项代表了 SU $k$  的香农容量, 其中为计算方便以  $\ln$  运算代替了  $\log_2$  运算, 第 2 项则代表了完成数据传输所付出的代价。这说明了 SU $k$  总是希望获得大的通信容量而降低支付的代价。

卫星通信系统的吞吐量包括 PU 吞吐量与 SU 吞吐量的总和, 此时最佳的功率分配策略必须使 PU 和 SU 在达到均衡的情况下满足最大化系统吞吐量, 即满足式(6):

$$\max_{\lambda_k \geq 0} F(P_l, p_k) = \sum_{l=1}^L \ln(1 + \gamma_l^{(P)}) + \sum_{k=1}^K \ln(1 + \gamma_k^{(S)})$$

s. t.

$$\begin{aligned} 0 &\leq p_k \leq p_{\max} \\ I_l^p &= I_l^p + I_l^{sp} \leq Q_l \\ \gamma_k^{(S)} &\geq \Gamma_{\min} \end{aligned} \quad (6)$$

式中,  $p_{\max}$  为 SU 发射机最大发射功率;  $\Gamma_{\min}$  为 SU 满足通信需求所要求的最小 SINR。

## 2 纳什均衡求解

在实际中卫星通信体制确立的情况下  $G, h, \lambda_k, \Gamma_{\min}, \bar{\gamma}_l$  以及  $\sigma^2$  均为已知。根据问题描述, 可以建立博弈模型:

### (1) 参与者

包括  $L$  个 PU 和  $K$  个 SU:  $l \in \{1, \dots, L\} \cup k \in \{1, \dots, K\}$ , 其中,  $l$  代表 PU,  $k$  代表 SU, 所有参与者均为理性且有共同认识。

### (2) 行动集

$A = \tilde{P}_1 \times \tilde{P}_2 \times \dots \times \tilde{P}_L \times \tilde{p}_1 \times \tilde{p}_2 \times \dots \times \tilde{p}_K$ , 其中,  $\tilde{P}_l = [0, \bar{P}_{\max}]$ , 表示 PU $l$  的行动集;  $\tilde{p}_k = [0, p_{\max}]$  表示 SU $k$  的行动集;  $\bar{P}_{\max}$  表示第  $l$  个 PU 最大允许发射功率。行动向量表示为  $\mathbf{p} = [P_1, \dots, P_L, p_1, \dots, p_K]$ , 其中  $P_l \in \tilde{P}_l, p_k \in \tilde{p}_k$ 。

PU 和 SU 的效用函数分别如式(4)、式(5)所述。最终博弈结果为每个参与者能够按自身要求进行数据传输, 使整个通信系统达到最大通信容量。对于有限的博弈者, 在有限的纯策略下总存在着纳什均衡<sup>[10]</sup>, 在纳什均衡下, 每个博弈者的行为都是对其他博弈者行为的最优回应。

PU 作为博弈的参与者, 由其效用函数决定着它的行为, 对式(4)进行求导置零, 可以得到对于每一个 PU $l$  来说, 效用函数取最大值时最优干扰阈值为  $Q_l^*$ , 其等效结果是 PU 选择发射功率  $P_l^*$ :

$$Q_l^* = I_l^p + \frac{1}{2\mu_1} \quad (7)$$

$$P_l^* = \frac{\bar{\gamma}_l(Q_l^* + \sigma^2)}{Gh^2} = \frac{\bar{\gamma}_l}{G} \left[ \sum_{k=1}^K p_k + \sum_{i=1, i \neq l}^L P_i + \frac{1}{2h^2\mu_1} + \sigma'^2 \right] \quad (8)$$

式中,  $\sigma' = \frac{\sigma}{h}$ , 对于 SU 而言, 需要严格保证 PU 的通信质量, 因此需要在 PU 的限制下进行剩余资源最优化分配, 即在式(7)的约束下使得式(5)中的效用函数最大化。对式(5)进行求导置零, 可以得出对于每一个 SU $k$  而言, 其发射功率的最佳取值  $p_k^*$  能使效用函数最大化。

$$p_k^* = \frac{1}{Gh^2} \cdot \left[ \frac{Gh^2}{\lambda_k} - I_k - \sigma^2 \right] = \frac{1}{\lambda_k} - \frac{1}{G} \cdot \left[ \sum_{i=1, i \neq k}^K p_i + \sum_{i=1}^L P_i + \sigma'^2 \right] \quad (9)$$

对于一个行动矢量  $\mathbf{p}$ , 若满足式(7)和式(9), 即使得每个 PU 或 SU 都是对其他博弈者的最优回应, 此时的  $\mathbf{p}$  为该博弈模型的一个纳什均衡。为了最大限度提高卫星系统容量, 选择满足式(6)的纳什均衡  $\mathbf{p}$  是本文的最终目标。将式(6)作为整个系统的效用函数, 运用效用占优的选择方法<sup>[10]</sup>能够确定系统唯一的最优功率分配。

在卫星认知通信中, 原有注册地面站作为 PU, 在保证自身通信情况下向 SU 提供租赁, 在单次博弈中, PU 和 SU 数量保持不变, 经过式(7)~式(9)反复迭代可以得出在该情况下, PU 和 SU 的行动策略向量。如果行动策略是唯一的, 那么该策略就是最优的; 如果行动策略不是唯一的, 则通过式(6)寻找最优行动策略。在找到最优行动策略之后, 对于每一次 PU 或 SU 加入、退出造成的数量变化, 行动策略需要及时更新, 以便保持系统吞吐量最大化的同时保证系统的稳定性。在现实中, 卫星了解所有用户信息, 由星载处理器构建所有用户博弈模型并计算出最优行动策略, 继而下发给各用户, 便可完成稳定的、最佳的 PC 算法。

## 3 性能分析

本节将对本文前两节中所提出的 DSL 博弈模型通过仿真的形式予以讨论。对于一个理论模型, 首先应考虑其用户容量, 即能够分别容纳 PU 和 SU 的数量上限; 其次是在满足数量要求的基础上对单体的行动进行建模, 明确每个单体的行为以及经过迭代、最优化之后最终做出的最优行为选择; 再次, 通过每个单体的行为选择, 分析整个系统所能达到的最大容量, 比较使用本文算法前、后的差异; 最后分析各个单体所能得到的效用, 并给出结论。另外, 由于算法在星载处理器上实现, 还须给出完成算法的计算量。

假设卫星通信参数分别为:  $G = 30$  dB,  $h^2 = -200$  dB,  $\lambda_k = 2$ ,  $\Gamma_{\min} = 10$  dB,  $\bar{\gamma}_l = 12$  dB 以及  $\sigma^2 = -100$  dBW,  $\mu_1 = 10/h^2$ ,  $\mu_2 = 100/h^2$ ,  $\bar{P}_{\max} = 25$  W,  $p_{\max} = 20$  W。为了更为直观地分析性能, 假定在同一场景内, 各个 PU 的所有参数相同, 各个 SU 的参数相同。

### 3.1 SU 容量

在此场景下, 不加外界噪声时 PU 和 SU 数量的关系如图 1 所示。图 1 反映了在一个已经存在 PU 的 CDMA 网络中, 仅考虑 SU 以一定功率发送信号而带给 PU 的干扰, 在 PU 和 SU 均满足传输信噪比时, 系统可容纳的最多用户个

数。从图 1 中可以直观地看出,在没有 PU 存在的情况下,不管 SU 发送功率为何值,系统均能容纳 101 个 SU,而且随着 PU 数量的增加,可容纳的 SU 数量呈现递减趋势;另一方面,当 SU 发送功率越小时,系统容纳用户数量越多。当 SU 发送功率是 PU 功率的 0.5 倍时,系统在不存在 PU 与存在 1 个 PU 两种情况下对 SU 的容纳能力差别不大,随着 PU 数量的增多,其容纳能力呈平缓递减趋势,在网络中存在 10 个 PU 后还可容纳 80 个 SU;而当 SU 发送功率是 PU 功率的 1.5 倍时,系统在不存在 PU 与存在 1 个 PU 两种情况下对 SU 的容纳能力差别一倍以上,之后随着 PU 个数的增多,其容纳能力亦呈平缓递减趋势,网络中存在 10 个 PU 后可容纳不足 40 个 SU。

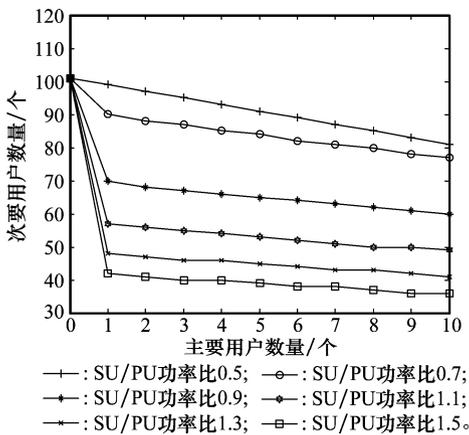


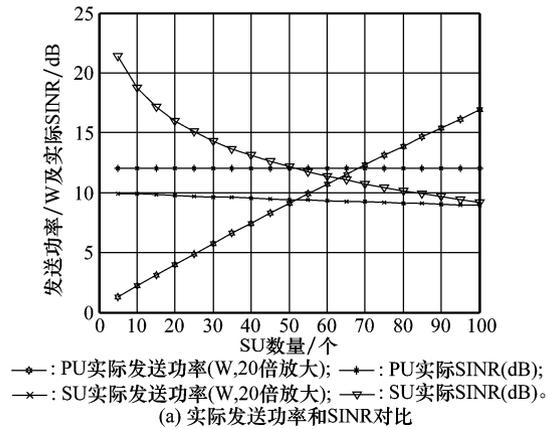
图 1 在不同 PU 数量下, SU 以不同功率比发送时的最大用户容量

通过图 1 可以看出,系统在 SU 以不同功率发送数据时,其允许的 SU 个数上限是不同的。这意味着在一个通信区域内,PC 算法必须要考虑 PU 和 SU 的数量,而当 SU 数量超过系统容纳上限时对整个通信系统的影响将是致命的。

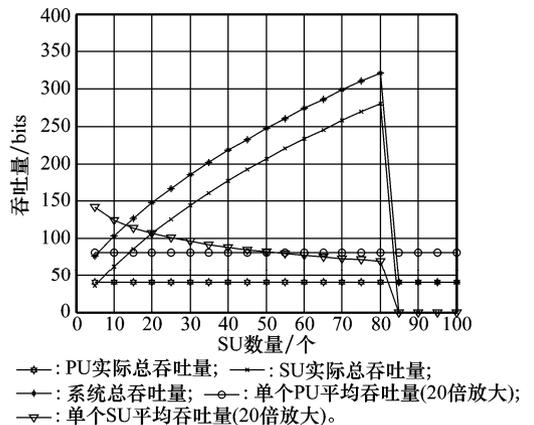
### 3.2 不同 SU 数量场景

对于卫星通信而言,一个通信区域内的注册用户数量往往是恒定不变的,在此假设对某一通信区域内 PU 的数量为 10,不同 SU 数量情况下的参数对比曲线如图 2 所示。在 PU=10 的基础上以每次递增 5 个 SU 的幅度加入 SU,分析其个体行为,得到结果如图 2(a)所示。在只有 5 个 SU 时,PU 按照自身通信 SINR 要求进行通信,此时 SU 数量最少,对 PU 子系统所带来的干扰最小,因此 PU 以较低的功率进行发射即可满足 SINR 要求,同时能够租赁给 SU 的系统容量最大,每个 SU 以相同的发射功率可以获得最多的 SINR,在付出相同代价的同时获得最大的通信容量;随着 SU 数量的增多,PU 必须通过提高发射功率来维持自身的 SINR,确保自身通信质量,而 SU 只能通过略微减少发射功率来降低 SINR 或通信量从而减少彼此的干扰和对 PU 造成的干扰。当 SU 数量达到 85 个时,每个 SU 能够获得的 SINR 已经到达确保通信的底限, SU 数量已经逼近图 1 中给出的系统容纳上限。这意味着增加更多的 SU 将造成每个

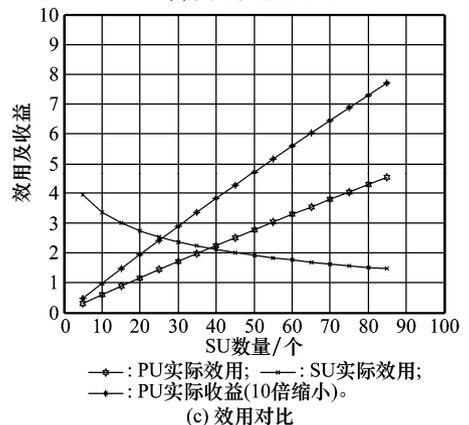
SU 无法获得足够的 SINR 而造成通信中断,对于当次 PC 意味着失败。但由于无法完成通信,有些 SU 选择退出,之后的 PC 将在系统容纳范围内进行。通过图 1 和图 2(a)的比较,一方面可以看出 SU 数量与 PU 发射功率之间的关系,当 SU 数量少时,PU 选择较低的发射功率, SU 和 PU 的功率比大,此时系统对 SU 的容纳上限也较低; PU 选择大功率发射时,系统对 SU 的容纳上限也随之增加。另一方面,可以得到 SU 在数量上和单体容量上的关系,在数量上满足系统容纳上限时,随着数量的增加,单体容量呈递减趋势;在数量达到系统容纳上限时, SU 将无法进行通信。



(a) 实际发送功率和 SINR 对比



(b) 实际吞吐量对比



(c) 效用对比

图 2 PU 数量为 10 时,不同 SU 数量情况下的参数对比

在确定 SU 和 PU 数量后,经过迭代可以得到单次博弈的子博弈完美纳什均衡,之后经过式(6)进行效用占优选择得到最优的 PC 行动策略,使每个用户能够以最优的策略进行通信。在 PU 数量固定为 10 时,通过对不同数量 SU 的场景分别进行吞吐量的分析,可以得到图 2(b)。每个 PU 在满足自身通信需求后维持自身的 SINR 不变,因此每个 PU 的通信容量维持不变,单个 PU 吞吐量与 PU 实际总吞吐量保持不变。而单个 SU 的吞吐量随着 SU 数量增多而逐渐下降,这是由于 SU 数量越多,彼此干扰越大造成的。实际上,SU 总的吞吐量随着 SU 数量的增多而呈现单调递增,这是由于 SU 数量呈线性递增,而单个 SU 的吞吐量呈现凹函数非线性下降趋势,最终导致 SU 总吞吐量呈凸函数非线性递增。同样地,当 SU 用户个数超过了系统容纳能力时,单个 SU 的吞吐量为 0,SU 总吞吐量亦为 0。从系统上看,系统总的吞吐量为 PU 总吞吐量和 SU 总吞吐量之和,PU 的吞吐量保持不变,系统总吞吐量与 SU 总吞吐量增长趋势一致,当 SU 数量超过容限后,系统总吞吐量与 PU 总吞吐量相等。

对于单个 SU 而言,效用函数为其所获得的通信容量与付出代价之差,在一个 SU 和 PU 均为确知的场景下,功率分配的最优行动策略唯一,因此 SU 所获得的效用函数在该场景下为确定值。若改变场景,将 PU 数量固定,SU 数量取不同值,可以分别得到每个场景下 SU 和 PU 的效用函数,如图 2(c)所示。由于随着 SU 数量的增加,单个 SU 发送功率变化不大,而传输容量下降明显,因此其效用呈单调递减趋势;对于单个 PU 而言,在  $Q_i \geq I_i^p$  时,随着  $I_i^p$  的增加  $Q_i - I_i^p$  呈现递减趋向,进而单个 PU 效用函数呈现递增趋向。实际上,由于 SU 的增多,每一个 SU 发送功率变化不大,而 SU 向 PU 支付的代价补偿  $B = \sum_{k=1}^K \lambda_k p_k$  增加,分配给各个 PU 的补偿相应增加,这正是 PU 减小干扰阈值  $Q_i$ ,增加 SU 通信容量的目的所在。

### 3.3 不同 PU 最低 SINR 要求场景

在确定数量的 PU 和 SU 场景下,改变 PU 对 SINR 要求所得到的实际发送功率和 SINR 如图 3(a)所示。为了保证 PU 的最小通信质量要求,PU 必须根据场景进行功率调整,在 PU 和 SU 数量均为固定时,PU 获得的 SINR 愈大则发送功率愈大,当 PU 获得的 SINR 为 17 dB 时,其发送功率超出了最大功率限制,此时 SU 的发送功率未有明显下降,SU 获得的 SINR 下降趋势明显,但仍然高于  $\Gamma_{\min} = 10$  dB,因此可以保证 SU 正常通信。当 PU 的 SINR 超过 17 dB 时,非但造成 PU 发送功率超标,还导致 SU 的 SINR 急剧下降,通信中断,此时 SU 为了节省代价也会急剧降低发送功率。

同样场景下,PU、SU 以及系统总的吞吐量如图 3(b)所示。可以看出,PU 最低 SINR 的增加使得单个 PU 吞吐量和 PU 吞吐量总和呈线性递增趋势,而 SU 的吞吐量却呈现开始平缓递减而后急剧递减的状态,这是由于在 PU 发送功率超标后 SU 放弃通信所造成的。而系统总吞吐量随

着 PU 最低 SINR 的增加平缓递增,在 SINR 处于 12~16 dB 这一区间总吞吐量达到最大值,之后急剧减小。在 PU 发送功率超标后 SU 吞吐量的下降幅度远大于 PU 吞吐量的增长幅度,这造成了此时系统总吞吐量的急剧下降。

而该场景下的效用函数对比如图 3(c)所示,随着 PU 最低 SINR 的增加,PU 的效用函数呈递增趋势,PU 最低 SINR 小于 17 dB 时,PU 的实际收益基本维持不变,而 SU 的效用则缓慢递减。这意味着当 PU 最低 SINR 增加时,SU 以相同的代价将会获得更小通信容量,若要获得相当的通信容量则需发送更大的功率,付出更大的代价。

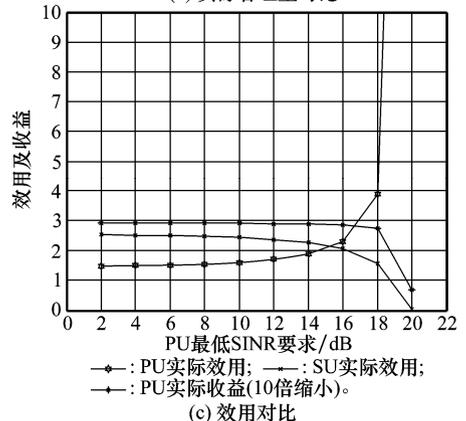
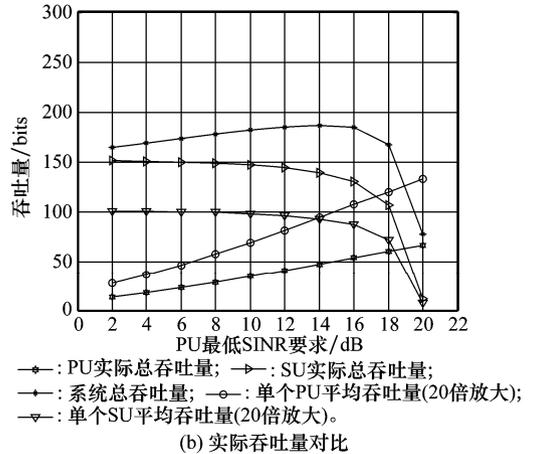
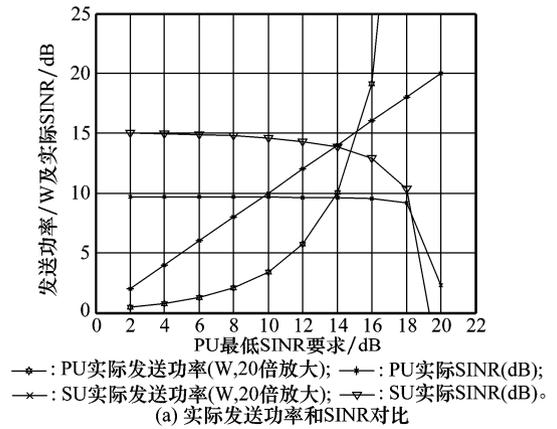


图 3 PU 数量为 10, SU 数量为 30 时, PU 不同 SINR 要求下的参数对比

过高地设定 PU 最小 SINR 会导致整个卫星通信系统的使用率下降,违背了最大化系统通信容量的初衷。因此,在满足 PU 通信需求的同时合理设计最低 SINR 取值才能使系统获得最大的容量,在本实验场景中,取 PU 最低 SINR 处于 12~16 dB 这一范围可使系统容量最大。

本节对比了不同 SU 用户数和 PU 取不同最低 SINR 值两种场景。通过对比可以看出,SU 数量和 PU 最低 SINR 值均对系统容量有影响,根据具体应用选择合理的用户范围和 PU 通信质量是提高系统总容量的关键所在。

### 3.4 复杂度分析

在实际情况中,对于每一次 SU 数量改变,最优功率分配行动策略也会更新一次,星载设备硬件限制使得单次更新的算法复杂度和系统存储量显得尤为重要。

在任何一次更新中,假定当时 PU 数量为  $L$ ,SU 数量为  $K$ 。根据式(7)~式(9)进行一次迭代计算需要进行  $o(K+L)$  次加法运算,而反复迭代之后通过式(6)进行均衡选择需要进行  $o(K+L)$  次加法运算。仿真结果表明,在赋予初始值后,通过式(7)~式(9)进行迭代次数不多于 6 次即可达到纳什均衡,因此整个求解过程所需计算量为  $o(K+L)$ 。

在迭代过程中,保持上一次迭代结果是计算本次迭代的必需,即需要两倍的存储单元来保存上次及本次迭代结果,之后释放上次结果用以保存下次迭代结果。因此,需要存储器保存的变量有:  $2K$  个  $p_k$ 、 $2L$  个  $P_l$ 、 $2L$  个  $Q_l$ 、 $K$  个  $\lambda_k$ 、 $L$  个  $\bar{\gamma}_l$  以及  $G$ 、 $h$ 、 $\Gamma_{\min}$ 、 $\sigma$ 、 $\mu_1$ 、 $\mu_2$ 、 $\bar{P}_{\max}$ 、 $p_{\max}$  等常量参数,总体而言,需要存储单元约为  $3(K+2L)$  个,依照应用场合的精度要求不同存储单元大小亦有所不同。

本次复杂度分析仅给出完成一次功率分配所需的最低计算和存储量,对于卫星具体应用中某些中间参数(如实时 SINR 等)的推测并未进行讨论。依照目前星载设备的处理水平,求解最优功率分配行动策略是足以应对的。

## 4 结 论

随着资源的日益稀缺,提高卫星通信的频谱利用率变得日益重要。本文正是出于这样的目的,将认知无线电中 underlay 方式引入了卫星 CDMA 通信,以非注册的临时用户向注册用户系统进行代价补偿的方式使双方均有意愿进行合作从而到达最大化系统容量的目的。在 DSL 模型下对 PC 的纳什均衡进行求解,之后经过精炼而得到系统容

量达到最大值的最优解。在此基础上,讨论了系统对非注册用户的容纳能力,给出了非注册用户数量和注册用户最低 SINR 对注册用户及整个系统的影响。

实验结果表明,SU 数量超过系统容纳上限时对整个通信系统的影响将是致命的,而过高地设定 PU 最小 SINR 会导致整个卫星通信系统的使用率下降。因此提前对于非注册用户接入数量和注册用户的 QoS 进行合理的规划将会使各个用户有序地进行自身传输,而系统达到最大容量。

### 参考文献:

- [1] Federal Communication Commission, Spectrum Policy Task Force. Report of the spectrum efficiency working group, FCC 02-155[R]. US: Federal Communication Commission, 2002.
- [2] Mitola J III, Maguire G Q. Cognitive radio: making software radios more personal[J]. *IEEE Personal Communications*, 1999, 6(4):13-18.
- [3] Haykin S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communication[J]. *IEEE Journal on Selected Areas Communications*, 2005, 23(2): 201-220.
- [4] Goldsmith A, Jafar S A, Maric I, et al. Breaking spectrum gridlock with cognitive radios-an information theoretic perspective[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(5): 894-914.
- [5] Gatsis N, Georgios A G M. Power control for cooperative dynamic spectrum access networks with diverse QoS constraints[J]. *IEEE Trans. on Communications*, 2010, 58(3):933-944.
- [6] Hoang A T, Liang Y C, Islam M H. Power control and channel allocation in cognitive radio networks with primary users' cooperation[J]. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2010, 9(3): 348-360.
- [7] Yu H, Gao L, Li Z, et al. Pricing for uplink power control in cognitive radio networks[J]. *IEEE Trans. on Vehicular Technologies*, 2010, 59(4): 1769-1778.
- [8] Jayaweera S K, Li T M. Dynamic spectrum leasing in cognitive radio networks via primary-secondary user power control games[J]. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2009,8(6): 3300-3310.
- [9] Bayhan S, Gur G, Alagoz F. Satellite assisted spectrum agility concept[C]//*Proc. of the IEEE Military Communications Conference*, 2007:1-7.
- [10] 涂志勇. 博弈论[M]. 北京:北京大学出版社,2009.(Tu Z Y. *Game theory*[M]. Beijing: Peking University Press, 2009.)