

# 软件定义认知跳频多波束宽带卫星网络系统仿真与分析

李恒智<sup>1</sup>, 王春锋<sup>2</sup>

(1. 河北对外经贸职业学院, 河北 秦皇岛 066311; 2. 钱学森空间技术实验室, 北京 100094)

**摘 要:** 传统的多波束卫星由于固定带宽而不能适应变化的业务流量, 不能针对流量负荷进行动态调整, 未来多波束宽带卫星系统必须具有较大的灵活性, 能够根据业务流量的变化进行动态调整, 其中跳频多波束宽带卫星网络系统改善了传统的多波束宽带卫星网络系统性能, 而随着认知无线电技术的发展, 认知跳频多波束宽带卫星可以进一步提升频谱的利用效率, 此外, 软件定义网络技术也在卫星网络中得到应用, 可以实现对卫星资源的有效管理, 提高卫星资源的利用率。探讨了软件定义认知跳频多波束宽带卫星网络系统的原理, 分析频谱利用效率, 建立吞吐量等业务模型, 进行仿真分析, 可作为宽带卫星网络系统设计的参考。

**关键词:** 多波束卫星系统; 跳频系统; 认知系统; 软件定义空间网络

中图分类号: TN915

文献标识码: A

## Simulation and analysis of software defined cognitive frequency hopping multi beam satellite system

LI Heng-zhi<sup>1</sup>, WANG Chun-feng<sup>2</sup>

(1. Hebei Institute of International Business and Economics, Qinhuangdao 066311, China;

2. Qian Xuesen Laboratory of Space Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Traditional multi-beam satellites cannot adapt to the changing traffic because of the fixed bandwidth and cannot adjust dynamically for the traffic load. In the future, the multi-beam broadband satellite system must have great flexibility and can be dynamically adjusted according to the change of the traffic flow. Beam hopping for multi-beam broadband satellite network system has been proposed to improve the traditional multi-beam broadband satellite network system performance, whose principle is to assign different beams to different time slots, rather than the allocation of bandwidth, so that in each time slot, the entire available bandwidth is allocated to each beam, and the time window is periodically applied to the beam selection system, in the full band hopping mode, the band can be selected optimally in the duration of each beam to meet user transmission bandwidth and delay requirements. With the development of cognitive radio technology, cognitive beam hopping for multi-beam satellite system can further improve the efficiency of spectrum utilization, to meet the growing shortage of spectrum resources, to achieve large-capacity high-bandwidth broadband satellite network system, and to support the rising user service capacity and the transmission efficiency of user services under different load conditions. In addition, software definition technology is also used in satellite networks, which could achieve effective management of satellite resources to improve the utilization of satellite resources. In this paper, the principle of software-defined cognitive hopping multi-beam broadband satellite network system is discussed. The spectrum utilization efficiency and throughput are analyzed, which can be used as a reference for broadband satellite network system design.

**Key words:** multi-beam satellite, beam hopping, cognitive system, software defined space information network

## 1 引言

随着天上处理和交换技术的发展, 未来宽带卫

星网络系统将采用多星全球覆盖的多波束卫星系统。图 1 是宽带卫星网络系统架构, 包括空间段、用户段和地面段, 空间段是由多颗多波束 GEO 卫

收稿日期: 2017-09-08

基金项目: 科技部重点研发计划基金资助项目 (No.2017YFB0503300)

Foundation Item: Key Research and Development Plan of Ministry of Science and Technology (No.2017YFB0503300)

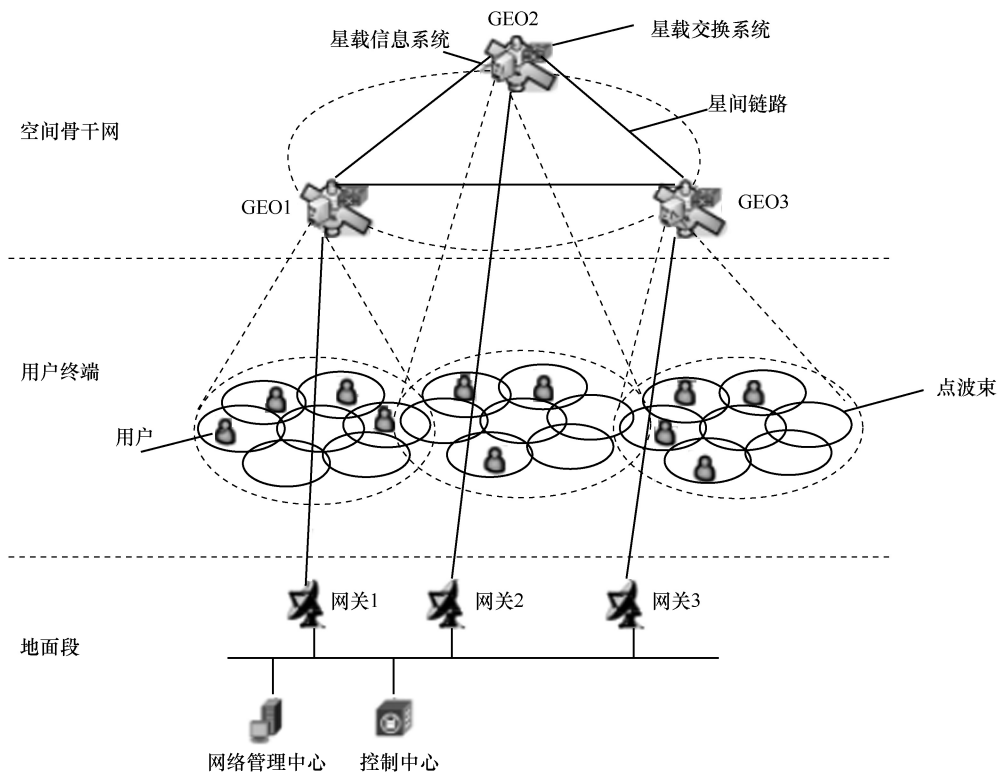


图 1 宽带卫星网络系统架构

星组成的骨干网，用户段主要是各种用户终端组成，地面段主要由各个网网站、控制中心和网络管理中心等组成。

传统的多波束卫星由于固定带宽而不能适应变化的业务流量，不能针对流量负荷进行动态调整，未来多波束宽带卫星系统必须具有较大的灵活性，能够根据业务流量的变化进行动态调整，其中，跳频多波束宽带卫星网络系统<sup>[1]</sup>改善了传统的多波束宽带卫星网络系统性能，它的原理是把不同的时隙分配给不同的波束，而不是分配带宽，这样在每一个时隙中，整个可用带宽被分配给每个波束，在全频带跳频方式工作时，时间窗口周期性地应用于波束选择系统，通过最优选择每个波束的持续时间以满足用户传输带宽和延迟要求。随着认知无线电技术的发展，认知跳频多波束卫星<sup>[2]</sup>可以进一步提升频谱的利用效率，满足在频谱资源日益短缺的情况下实现大容量高带宽的宽带卫星网络系统，以支持不断上升的用户业务容量和用户业务不同负载情况下的传输效率。此外，软件定义网络技术也在卫星网络中得到应用<sup>[3]</sup>，可以实现对卫星资源的有效管理，提高卫星资源的利用率。文献[4]研究了同一频谱在异构网络共存以提高频谱利用率方法，由于频谱的稀缺性，需要实现多波束卫星与单波速卫

星共享同一频谱情况，该方法利用干扰对准（interference alignment）机制，实现了一种衬底频谱共存（underlay spectral coexistence）机制，可以减轻认知发射机在正常上行链路模式下对主接收机的干扰。

## 2 目前几种宽带卫星网络通信系统及分析

目前研究的宽带卫星网络系统主要包括传统的额多波束宽带卫星网络系统、调频多波束卫星网络系统，以及认知多波束卫星网络系统。在传统多波束卫星网络中，负载根据用户的需求，向用户提供连续可变的带宽传输。系统由前向链路和回传链路组成，前向链路用于完成从上行网关的接收和面向用户的下行传输；回传链路用于完成用户到网关上行链路的接收和上传工作。在传统多波束卫星网络系统中，前向链路使用 DVB-S2 标准，而回传链路使用 DVB-RCS 系统。文献[5]针对宽带 Ka 卫星网络系统，实现高效的频率复用，设计了宽带卫星网络系统的不同天线和应用。文献[6]针对 DVB-RCS 标准的点波束卫星系统中，接收信号强度在波束的中心和边界之间没有很大差别的问题，研究和设计了一种基于 RCST 移动信息的自适应切换检测算法，具有优化的切换性能，提升了前向链

路频谱效率。文献[1]设计和分析了一种多波束透明传输卫星系统的前向链路，用于覆盖区稀疏用户的宽带互联网接入。

跳频多波束卫星网络系统与传统多波束卫星网络的系统架构大体相似，不同之处在于 DSP 根据系统的特性将不同的时隙分配给不同的波束，而非分配带宽。在每一个时隙中，整个带宽被分配给相关的波束。在跳频多波束卫星网络系统中，卫星使用一定数量的波束以规则的重复图案同时发送信息，这样可以减少板载放大器的数量以及有效负载上的功率需求，可以采用全频复用或部分频率复用。在全频率复用的情况下，规则的时间窗口周期性地应用于波束选择系统，整个可用带宽被分配给每个波束。通过最优选择每个光束的持续时间以满足用户传输延迟要求。在部分频率复用的情况下，总带宽被分段，并且每个波束可以用其中一段带宽发送信息。令每个时间窗口分成  $N_t$  个时间间隙，则波束矩阵  $\mathbf{T}$  由  $N_t \times N_b$  维构成，可以写作

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{21} & \cdots & T_{N_b 1} \\ T_{12} & T_{22} & \cdots & T_{N_b 2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{1N_t} & T_{2N_t} & \cdots & T_{N_b N_t} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中， $T_{ij}$  代表将第  $j$  个时隙分配给第  $i$  个波束。这样，第  $i$  个波束分配的时隙总数为  $N_{i,t} = \sum_{j=1}^{N_t} T_{ij}$ ， $T_{ij}=1$  表示将第  $j$  个时隙分配给了第  $i$  个波束。

认知多波束卫星网络系统的原理把系统分为主卫星和从卫星。认知无线电的核心思想就是无线通信设备具有发现波束空洞并对其合理利用。认知无线电的核心技术是波束感知（频谱感知），波束感知的目的是发现波束空洞，从卫星利用波束空洞传输信息，同时不能对主卫星造成有害干扰。对波束空洞的使用，主卫星比从卫星具有更高的波束接入优先权。因此，从卫星在利用波束空洞进行通信过程中，必须能够快速感知到主卫星的再次出现，并及时进行波束切换，释放所占用的波束给主卫星使用。主卫星采用每个波束单馈入（SFPB）的方式，从卫星采用每个波束多馈入（MFPB）的方式。

认知多波束卫星网络系统在发送端，被传送的信息经过调制后，得到已调制信号，再通过波束合

成器输出多波束信号。该过程与多波束系统完全相同。在接收端，认知无线电单元获取来自接收单元的信号，认知无线电单元具体工作过程如下：在每个特定的时隙，由天线接收的信号通过接收单元传给宽带射频前端，接着进行能量检测并决定多个候选可用的信道，随后信息传给 MAC 层，接着特征检测模块被用来对候选信道中接收到的信号类型进行识别，如果在此信道中发现了信号，MAC 层将选择另外一条候选信道，随后再对此信道进行检测，直到发现未被占用的信道为止。

### 3 软件定义认知跳频多波束宽带卫星网络系统

软件定义认知跳频多波束宽带卫星网络系统架构如图 2 所示。图 2 定义一个软件定义多波束宽带卫星的双星共享频谱方案，2 颗卫星都是覆盖相同区域的多波束卫星，并且工作在正常前向模式。2 颗卫星在同一地球静止（GEO）轨道上，并连接到地面上不同的网关。这些网关通过地面光纤骨干网连接。卫星网络节点是基于软件定义网络架构模式，包括一个 SDN 控制器和 SDN 交换机，此外地面还有一个地面 SDN 中心控制器，设置两级控制器保证可靠性和安全性。星载 SDN 控制器可以完成包括点波束配置和管理，协议的选择和配置等，地面 SDN 中心控制器还可完成收集网络状态信息和路由计算、全局网络状态管理，无线电设备配置管理等。

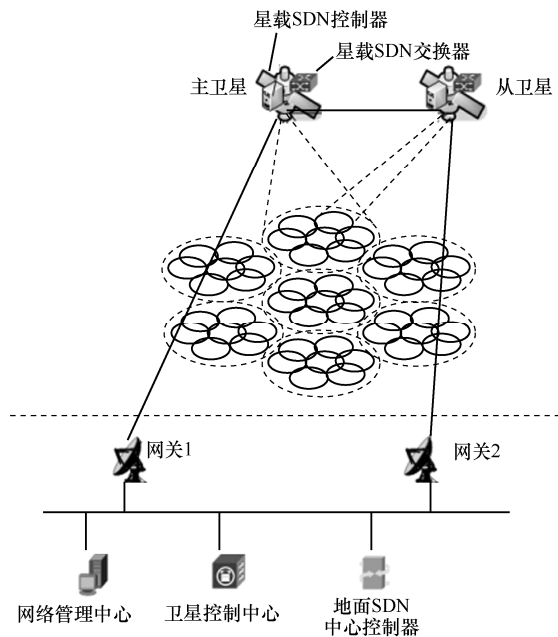


图 2 软件定义多波束卫星的双星共享频谱架构

下面主要分析和说明一下认知工作原理。主卫星部署为用于向固定用户提供高优先级宽带多媒体服务的卫星，而从卫星用于向固定用户提供需要低 QoS 的服务，如交互式服务。主卫星在较大波束下操作，而从卫星在相同覆盖区域中具有较小波束。假设较大主波束和在每个主波束内具有许多点波束的覆盖区域，并且这些点波束是从卫星的波束。通过 SDN 控制器管理将主卫星的波束选择模式和定时信息共享到从卫星来实现认知。基于对波束选择模式的先验知识，从卫星的波束选择模式被设计成使得其不影响主卫星的操作。此外，可以通过定时信息来使主卫星传输和从卫星传输同步。从卫星需要更加灵活，并配备更小的转发器。主卫星使用单波束馈电 (SFPB) 型天线子系统，从卫星使用每波束多馈电 (MFPB) 型天线子系统，如文献[5]所述。

#### 4 系统性能分析

在多波束卫星系统中，考虑频率重用因子为  $K$  的多波束卫星覆盖。这种情况的干扰主要来自相邻同信道小区的同信道干扰。第  $i$  个用户的信干噪比 (SINR) 为

$$\gamma_{\text{tradi},i} = \frac{|h_{ii}|^2 P_t}{P_t \sum_{j \in S_p} |h_{ij}|^2 + \sigma^2} \quad (2)$$

其中， $\sigma^2$  表示噪声功率， $P_t$  表示发射功率， $S_p$  表示同信道波束的集合，包括给定区域中的所有可能的同信道小区，并且相邻信道干扰不包括在式(2)中。该系统的系统吞吐量可写为

$$C_{\text{tradi}} = \frac{W}{K} \sum_{i=1}^{N_b} \text{lb}(1 + \gamma_{\text{tradi},i}) \quad (3)$$

其中， $N_b$  为系统的波束数。

在跳频多波束系统中，考虑具有时隙重用因子  $K$  的波束选择系统。每个有源波束在传统的多波束系统中使用全频率而不是部分频率重用。第  $i$  个用户的 SINR 为

$$\gamma_{\text{hop},i} = \frac{|h_{ii}|^2 P_t}{P_t \sum_{j \in S_B} |h_{ij}|^2 + \sigma^2} \quad (4)$$

其中， $S_B$  表示在特定波束跳跃时隙中有效的波束集合。该系统的系统吞吐量可写为

$$C_{\text{hop}} = W \sum_{i=1}^{N_b} \text{lb}(1 + \gamma_{\text{hop},i}) \quad (5)$$

其中， $\frac{N_b}{K}$  为系统的波束数。

在认知跳频多波束系统中，因为在特定时隙中只有全部可用波束的某一部分是活动的。主系统是具有时隙重用因子  $K$  的具有较大波束的波束系统，从系统是具有较小波束和较低发射功率的波束系统。该系统中的总系统吞吐量可以表示为

$$C_{\text{cog}} = C_{M,S} + C_{S,M} = W \left[ \sum_{i=1}^{\frac{N_b}{K}} \text{lb}(1 + \gamma_{M,i}) + \sum_{i=1}^{N_s} \text{lb}(1 + \gamma_{S,i}) \right] \quad (6)$$

其中， $C_{M,S}$  和  $C_{S,M}$  分别表示在主/从系统存在的情况下的主/从吞吐量， $\gamma_{M,i}$  表示主用户的 SINR， $\gamma_{S,i}$  表示从用户的 SINR。 $N_s$  表示活动的从波束的数量。 $\gamma_{M,i}$  的表达式为

$$\gamma_{M,i} = \frac{|h_{pii}|^2 P_{pt}}{P_{pt} \sum_{j \in S_p} |h_{pij}|^2 + P_{st} \sum_{j \in S_s} |h_{ijs}|^2 + \sigma^2} \quad (7)$$

其中， $P_{pt}$  是主系统的发射功率， $P_{st}$  是从系统的发射功率， $S_s$  表示特定时隙中的从卫星活动波束的集合。参数  $h_{pij}$  表示来自第  $j$  个主波束的第  $i$  个主用户的信道增益， $h_{ijs}$  表示来自第  $j$  个从波束的第  $i$  个主用户的信道增益。类似地， $\gamma_{S,i}$  的表达式可以写为

$$\gamma_{S,i} = \frac{|h_{sii}|^2 P_{st}}{P_{pt} \sum_{j \in S_p} |h_{ijp}|^2 + P_{st} \sum_{j \in S_s} |h_{sij}|^2 + \sigma^2} \quad (8)$$

其中， $h_{ijp}$  表示来自第  $j$  个主波束的第  $i$  个从用户的信道增益， $h_{sij}$  表示来自第  $j$  个从波束的第  $i$  个从用户的信道增益。

举例分析说明，在传统多波束卫星网络系统中，带宽需求可以在最小带宽单元 62.5 MHz 到最大带宽 1 GHz (16 × 62.5 MHz) 之间变化，经计算其频谱效率为 12 bit·s<sup>-1</sup>·Hz<sup>-1</sup>；在跳频多波束卫星网络系统中，1 GHz 下行链路带宽可分配给一个 720 Msymbol/s 单通道高速传输或 16 个通道 45 symbol/s 的低速传输，其频谱效率约为 24 bit·s<sup>-1</sup>·Hz<sup>-1</sup>。对于认知跳频多波束系统，由于其能有效地利用频谱空洞，其频带利用率可达 80 bit·s<sup>-1</sup>·Hz<sup>-1</sup>。

## 5 仿真分析

系统仿真链路采用自适应编码调制 (ACM) 原理, 基于 ACM 的链路预算分析计算出地面终端的业务能力。业务能力定义为

$$C(x, y) = R_b(x, y) = R_s SE_{ACM}[SINR(x, y)] \quad (9)$$

其中,  $R_b(x, y)$  为比特速率,  $R_s$  为符号速率,  $SE_{ACM}$  为 ACM 频谱效率函数,  $SINR(x, y)$  为信干噪比, 其表达式为

$$SINR(x, y) = \frac{S(x, y)}{[N_o(x, y)R_s + I(x, y)]} \quad (10)$$

其中,  $S(x, y)$  为标称载波功率,  $N_o(x, y)$  为接收机的噪声功率密度,  $I(x, y)$  为总干扰功率, 由共道干扰、相邻信道干扰和调制间干扰之和组成。

根据以上理论, 本文对系统进行了仿真。在仿真系统中, 设置频带范围为 29.7~30.2 GHz, 单波束的总用户带宽为 1 GHz, 波束数为 80。在此参数基础上, 分别对传统多波束卫星网络、跳频多波束卫星网络、认知跳频多波束 3 种系统进行仿真。最终仿真得到的频谱效率随信噪比、用户数的变化曲线分别如图 3 和图 4 所示。从图中可以看出, 相比于传统多波束系统和跳频多波束系统, 采用认知跳频的系统频谱效率有大规模提升。

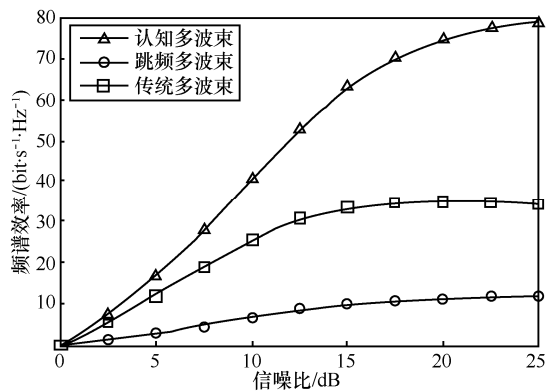


图 3 频谱效率随信噪比变化曲线

## 6 结束语

本文介绍了传统多波束卫星系统、跳频多波束卫星系统, 以及认知多波束卫星系统的基本原理, 研究了软件定义认知跳频多波束卫星网络系统的基本架构和原理, 并进行了性能分析和系统仿真。通过理论分析, 建立系统容量等业务模型, 并通过数值仿真分析了不同信噪比和用户数下的频谱效率。仿真结果表明, 相比于传统多波束系统和

跳频多波束系统, 采用软件定义认知跳频的系统频谱效率有大规模的提升。

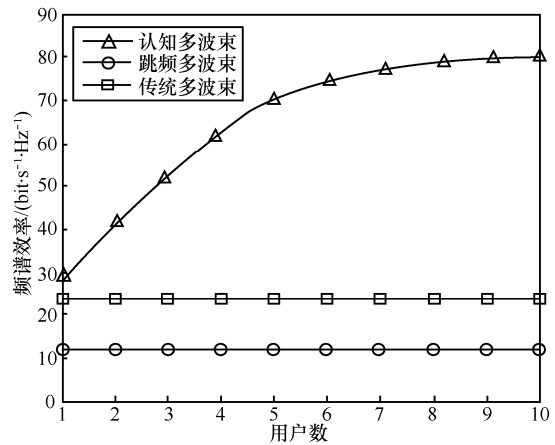
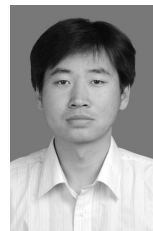


图 4 频谱效率随用户数变化曲线

## 参考文献:

- [1] PIERO A, DAVID F P, RITA R. Beam hopping in multi-beam broadband satellite systems: system performance and payload architecture analysis[C]//24th AIAA International Communications Satellite Systems Conference. 2006.
- [2] SHREE K S, SYMEON C, BJÖRN O. Cognitive beam hopping for spectral coexistence of multi beam satellites[J]. International Journal of Satellite and Networking, 2014.
- [3] LIONEL B, SAMIR M, PASCAL B, et al. Software defined networking and virtualization for broadband satellite networks[Z]. HAL, CCSD.
- [4] SHARMA S K, CHATZINOTAS S, OTTERSTEN B. Interference alignment for spectral coexistence of heterogeneous networks[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2013, 46: 1-14.
- [5] SCHNEIDER M, HARTWANGER C, WOLF H. Antennas for multiple spot beam satellites[J]. CEAS Space Journal, 2011, 2(1-4): 59-66.
- [6] JANG J N, LEE M W, KIM E K, et al. Satellite beam handoff detection algorithm based on RCST mobility information[J]. International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering, 2011, 5(9).

## 作者简介:



李恒智 (1983-), 男, 河北邢台人, 河北对外经贸职业学院讲师, 主要研究方向为网络技术。

王春锋 (1966-), 男, 陕西富平人, 博士, 钱学森空间技术实验室教授、硕士生导师, 主要研究方向为卫星网络技术。