新概念认知卫星导航系统研究

谢军^{1,2}, 张建军^{1,2*}

1. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094;

2. 中国空间技术研究院, 北京 100094

* E-mail: zhangjlij@163.com

收稿日期: 2017-11-24; 接受日期: 2018-07-06; 网络版发表日期: 2018-12-04

国家自然科学基金(批准号: 61203226)和国家自然科学基金重大项目(编号: 91538109)资助项目

摘要 从国际电报联盟(ITU)给出的频谱划分可知, 当前的卫星导航频率空间已经非常拥挤, 四大卫星导航系统除了GLONASS外, GPS, Galileo和COMPASS系统的频段部分重叠或完全重叠, 导致卫星导航频谱信号互干扰客观存在, 不可避免. 虽然新的导航信号设计体制提供了缓解卫星导航信号互干扰的方法, 但从长远看不能从根本上解决卫星导航信号兼容性问题. 本文针对全球卫星导航系统工作模式及机理, 以人脑的工作模式与机理为参考, 提出基于认知卫星导航系统的基本概念和内涵, 构建认知卫星导航系统架构模型和信息闭环生命周期, 将电磁环境特性和信号兼容特性融入系统的整体结构中, 以便使系统性能随电磁环境变化和频谱利用率特性的不同而自适应地改变, 分析认知卫星导航系统的工作流程, 梳理系统发展关键技术, 并针对系统频谱感知模块进行了仿真, 验证了方法的准确性.

关键词 全球卫星导航系统, 认知技术, 电磁环境, 频谱兼容

1 引言

卫星导航是一种利用空间高远位置优势、通过无线电载波信号而服务于各类用户进行导航、定位和时间传递的应用卫星系统, 能为地球表面和近地空间的各类用户提供全天候、全天时、高精度的位置、速度和时间等信息服务. 当前, 美国为了继续保持世界导航领域的领先地位, 正在全力推进GPS的现代化升级, 力争在未来导航领域中拥有绝对优势. 欧洲为了摆脱对GPS的依赖, 已全面启动伽利略卫星导航系统(Galileo)计划. 俄罗斯为应对GPS和Galileo系统快速发展所带

来的挑战, 确定了GLONASS优先发展计划, 以全面恢复GLONASS的开发与应用. 我国正积极推动第二代卫星导航系统建设, 已经在2012年建成区域卫星导航系统, 并将逐步扩展为全球卫星导航系统^[1].

导航卫星在距离地球表面20000 km的范围内以10 W量级的能量传送各种导航信号, 信号功率分散在比地球更大的区域, 覆盖面广, 功率低, 这使得接收机接受的信号能量少于1 mW的数量级, 在干扰信号的时候比接收机内噪声产生的能量还低, 尤其是脉冲干扰、窄带干扰和匹配谱干扰等, 导致干扰电平无法忍受, 使得导航信号无法正常接收, 严重影响到卫星导

引用格式: 谢军, 张建军. 新概念认知卫星导航系统研究. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 63–75

Xie J, Zhang J J. Research on new concept cognitive satellite navigation system (in Chinese). Sci Sin Tech, 2019, 49: 63–75, doi: 10.1360/N092017-00408

航系统的导航定位性能. 如何构建卫星导航系统在复杂环境下的感知能力, 避免电磁环境的有意或无意干扰, 在保持精确导航业务的同时, 提高系统整体的稳健性, 已成为当前研究的热点问题.

目前, 卫星导航系统在避免干扰上提出的主要技术手段, 在空间段主要是点波束天线增强, 在地面段包括天线增益调零, 虽然在系统局部环节提高了适应性和鲁棒性, 但这些技术不能根据复杂环境的变化, 自适应提高抗干扰能力有待提高.

与此同时, 当前的卫星导航频率空间已经非常拥挤, 全球定位系统、伽利略系统和我国的北斗卫星导航系统频段部分重叠或完全重叠, 这导致卫星导航频谱信号互干扰难以避免, 不容忽视. 现在已经提出并设计的新的导航信号设计体制虽然能有效缓解卫星导航信号互干扰的方法, 但从长远看不能从根本上解决卫星导航信号兼容性问题.

为了保证复杂电磁环境下卫星导航系统和电磁环境的最佳匹配, 同时在现有的频谱分配政策状态下, 从提高单位使用率的角度解决频谱短缺问题, 寻求新的颠覆性的卫星导航系统架构体系, 将电磁环境特性和信号兼容特性融入系统的整体结构中, 以便使系统性能随电磁环境变化和频谱利用率特性的不同而自适应地改变, 从理论上提出一种高性能的对环境参数和模型参数感知的卫星导航系统, 这就是卫星导航系统未来的发展方向.

将认知技术与卫星导航系统交叉融合产生的认知卫星导航系统属于新概念卫星导航系统. 认知从本质上是与感情、动机、意志等心理活动相对应的理智思维过程, 属于心理活动的一部分. 将认知的概念演化到信息科学, 认知是在信息处理基础上如何对周围环境做出反应的过程. 基于认知技术的卫星导航系统利用干扰特性和电磁环境的先验知识, 通过学习, 不断地调整系统的工作参数和工作方式, 使卫星导航系统始终处于最佳工作状态, 实现系统和电磁环境的最佳匹配, 提高卫星导航系统的工作效率.

本文在分析现有卫星导航系统工作模式的基础上, 针对系统频谱静态配置的局限性, 提出认知卫星导航系统的基本概念、体系框架和工作过程, 以及关键技术, 认知卫星导航系统融入了电磁环境、频谱特性以及测控人员的先验知识, 并在系统中引入反馈, 通过反馈实时地改变系统的工作状态. 因此, 认知卫星

导航系统是一个高度智能化的系统.

2 卫星导航系统工作模式及机理

2.1 信号调制模型

目前的卫星导航信号及未来现代化升级的信号(除GLONASS外)均为码分多址(code division multiple access, CDMA)信号. 一般导航信号的调制是将码速率较低的导航数据与码速率较高的伪随机码相乘, 从而对导航数据进行频谱扩展, 再与副载波相乘得到基带信号(BPSK调制不乘), 最后经载波调制成射频信号. 卫星导航基带信号可表示为

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} D_n x(t - nT_d), \quad (1)$$

式中, D_n 为导航数据流, $x(t)$ 为扩频调制码序列, 表达式为

$$x(t) = \omega(t) \sum_{l=-\infty}^{\infty} c_l \phi(t - lT_c), \quad (2)$$

式中, $\omega(t)$ 为时间长度为 $T_d=1/f_d$ 的窗函数, f_d 为导航数据的码速率. c_l 为码元序列电平值, T_c 为码片长度、码周期为 $T_{\text{code}}=NT_c$ 、码片形状为 $\phi(t)$ 的伪随机码序列, 而码片形状函数即为副载波. 将基带信号使用载波调制生成射频信号经天线发射出去, 射频信号的复数表示形式为

$$s_{\text{RF}}(t) = \text{Re} \left\{ \sqrt{2C} \sum_{n=-\infty}^{\infty} D_n x(t - nT_d) e^{j(2\pi f_0 t + \theta_0)} \right\} + \eta(t), \quad (3)$$

式中, C 为信号平均功率, f_0 和 θ_0 分别为载波频率和初始相位, $\eta(t)$ 为功率谱密度为 $N_0/2$ 的高斯白噪声.

2.2 信号接收模型

接收机天线接收到的卫星导航信号可以建模表示为

$$r_{\text{RF}}(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{i=1}^M s_{\text{RF},i}(t - \tau_i) e^{j2\pi f_{D,i} t} \right\} + \eta(t), \quad (4)$$

其中, $s_{\text{RF},i}(t)$ 表示来自第 i 颗卫星的信号, $f_{D,i}$ 为其多普勒频率, M 为可见星数目, τ_i 为信号传输过程造成的时延. 图1表示的是一般数字接收机的结构图.

全球导航卫星系统(GNSS)射频信号由接收机的

图 1 一般数字接收机的方框图

天线接收, 经滤波、放大处理后, 再由本地混频下变频为模拟中频信号:

$$\begin{aligned}
 r_{\text{IF}}(t) &= [R_{\text{RF}}(t) * h(t)]L_c(t) \\
 &= \text{Re} \left\{ \left[\sum_{i=1}^L s_i(t - \tau_i) * h_B(t) \right] \right. \\
 &\quad \times \sqrt{2P} e^{j[2\pi(f_0 + f_{D,i})t + \theta_0]} \left. \right\} \\
 &\quad \times \text{Re} \left[\sqrt{2} e^{j[2\pi(f_0 - f_{\text{IF}})t + \theta_{\text{IF}}]} \right] + \eta(t) \\
 &= \text{Re} \left\{ \left[\sqrt{P} \sum_{i=1}^L s_i(t - \tau_i) * h_B(t) \right] \right. \\
 &\quad \times e^{j[2\pi(f_{\text{IF}} + f_{D,i})t + \theta_0 - \theta_{\text{IF}}]} \left. \right\} + \eta(t) \\
 &= \sqrt{P} \left[\sum_{i=1}^L s_i(t - \tau_i) * h_B(t) \right] \\
 &\quad \times \cos[2\pi(f_{\text{IF}} + f_{D,i})t + \delta\theta] + \eta(t), \quad (5)
 \end{aligned}$$

式中, $h(t)$ 为滤波器的冲激响应, $L_c(t)$ 为本地产生用于混频的信号, $h_B(t)$ 是其冲激响应, f_{IF} 为中频信号的频率, θ_{IF} 为中频信号的载波相位, $\delta\theta = \theta_0 - \theta_{\text{IF}}$, 经过捕获与跟踪过程可对 3 个未知量 (f_0 , τ , θ) 进行粗估与精估。

2.3 不同GNSS的频段分布

不同的GNSS信号的载波频率和结构在原则上并不一定必须相同。如果不同的GNSS导航信号采用相同的载波中心频率, 共享同一个波段, 那么这种信号波段选择方案有利于频谱资源的有效分配, 有利于GNSS联合接收机发射频率前端的简单设计, 有利于实现GNSS之间的兼容性。

采用不同的中心频段, 接收机便需要增加不同的射频前端, 增加设备的成本和复杂性, 而增加新的载频会导致导航解算中的频率偏差, 每个增加的频率都

会导致一项不确定性, 虽然增加可见星数目可以减少这种不确定性, 但会消耗更多的观测量。然而, 实现兼容性一个隐含前提是需要缜密地考虑所设计信号与同波段和相邻波段上各个GNSS之间相互的干扰, 特别是在那些共享拥挤不堪的L波段上的各个GNSS之间的相互干扰^[2-4]。

由图2可知, L1/E1/B1频段最为拥挤, 所有系统在该频段都布设若干种类型的导航信号, 其次为L5/E5/B2频段。另外, 不同的系统提供商在相同频段的布设相似或相同的信号来实现互操作, 如GPS, Galileo和COMPASS三个系统将在L1/E1/B1频段布设MBOC(6, 1, 1/11)互操作信号以实现相互间的互操作, GPS L5, Galileo E5a和COMPASS B2a等信号也具有良好的互操作能力。正是由于各个国家和地区意识到卫星导航系统的重要性, 越来越多导航系统的出现使频谱越来越拥挤而出现兼容问题。虽然新的导航信号设计体制提供了缓解卫星导航信号互干扰的方法, 但从长远看不能从根本上解决卫星导航信号兼容性问题。

3 空间认知技术及其发展

目前, 针对卫星导航系统复杂环境认知能力, 国外还没有科研机构提出系统的科学理论和实用的关键技术, 但利用认知技术与空间系统交叉融合, 进行新机理、新概念、新体制的研究正逐渐成为国际科研机构研究的热点^[5,6]。

在信息领域, “认知技术”最早发展于认知无线电(cognitive radio, CR), 认知无线电的概念起源于瑞典皇家学院无线系统研究中心Mitola^[7]的开创性研究。2003年12月, 美国联邦通信委员会(FCC)公布了智能无线电工作草案修正案, 把任何具有自适应频谱感知能力的无线电设备统称为认知无线电。目前, 认知无线

图2 GNSS卫星信号频谱分布

电尚无统一的定义. FCC对认知无线电的定义是: 认知无线电是指能够通过与工作环境的交互来改变发射机参数的无线电设备.

加拿大麦克马斯特大学Haykin等人^[8]正式提出了认知雷达的概念. 认知雷达将脑科学和人工智能融入雷达系统, 赋予了雷达系统感知环境、理解环境、学习、推理并判断决策的能力, 提高雷达系统的性能. 认知雷达一经提出便掀起了雷达系统研究领域内的新热潮, 引起了国内外学者的广泛关注. 美国国防部高级研究计划局的Guerci^[9]出版了关于认知雷达的专著, 书中分析了MIMO体制下具有自适应最优发射及基于知识的处理的认知雷达技术. 此后, Sharma^[10~14]陆续提出认知动态系统新理论, 认知动态系统将原有相互分立的认知无线电、认知雷达等基于认知的系统概念高度融合, 开拓了一个崭新的研究领域. 认知动态系统综合了包括神经学、计算机学、数学、物理以及工程学等学科的知识, 为不同领域的认知技术应用提供了参考.

认知技术在地面无线网络中的应用研究成果较为丰富, 但在卫星领域中的应用成果较少, 属于起步阶段. 美军的移动用户目标系统(mobile user objective

system, MUOS)中利用频谱感知和频谱判决技术寻找上行链路(310 MHz)和下行链路(370 MHz)中心频点附近5 MHz范围内的黑空间. 并使用认知技术将自身传输信号的发射功率降低, 以实现宽带通信并且不对其他系统产生干扰. 同时这一技术也可以保证MUOS卫星通信系统的抗干扰能力大幅提升, 并在MUOS系统的基础上研究动态频率接入技术在1200 km高度的LEO卫星系统中的应用, 进行机会接入建模, 给出一种最大化系统吞吐量的频率接入.

总结认知技术与卫星系统交叉融合的特点, 主要体现在环境自感知、处理自适应、能力自提高. 环境自感知是指卫星能够自主感知外界环境, 解析战场态势, 分析干扰样式; 处理自适应是指卫星能够自主地分配系统资源, 选择处理策略, 认知收发处理; 能力自提高是指卫星能够自主记忆处理结果, 推演最优算法, 更新知识结构.

目前, 国内认知技术在卫星领域的应用研究尚处于初级阶段, 前期以技术概念和跟踪研究为主, 研究方向分散和重复, 对关键技术研究的力度和深度不够, 且尚未开展地面半物理闭环测试验证技术研究. 近期, 随着我国对空间信息网络的日益重视, 高校、研究所

等纷纷开展认知无线电技术在空间信息领域研究, 在频谱感知、频谱选择、地面试验等方面抢占技术的制高点。

4 认知卫星导航系统模型设计

4.1 基本概念

现在的频谱分配政策具有单一性、静态性, 不同的频段只能分配给独有的授权用户使用。卫星频率是不可再生或“一次性”资源, 按照《无线电规则》关于“先登先占”的程序原则, 优先的卫星网络申报将获得优先的频率资源使用地位。从可供太空系统使用的频率资源看, VHF到L, S频段资源已近枯竭; 在对地静止轨道上, C, Ku等频段资源被美国、俄罗斯、欧洲等国家和地区瓜分殆尽, 现阶段申报一份使用C, Ku频段的卫星网络资料面临需要与数十甚至上百份卫星网络资料进行协调的艰难处境。但从另外的层面来看, 频谱利用率较低, 先前被占用的频谱资源很多处于闲置状态。造成这一问题的原因是频谱分配政策造成的频谱使用不均衡, 并非是可用频谱不足。目前为提高频谱资源的单位利用率催生众多新技术, 例如多天线技术、多载波频率复用技术、新型编码技术以及复合调制技术等, 上述技术减缓了迫在眉睫频谱不够的问题, 但上述技术无法从根本上解决频谱资源使用不均衡的难题。

认知卫星导航系统的核心是“全自适应的智能化认知处理”, 这是整个系统构建的灵魂, 其采用先进的信息体系直接提升了系统的整体性能, 其以人脑的工作模式为基础, 通过对电磁环境, 尤其是对信道参数的自适应感知, 掌握信道位置完好性、信道带宽可限性、信道干扰规律, 通过建立复杂电磁环境下信道带宽的时变、空变数学模型, 确定使用哪个频率节点进行导航, 以保证卫星导航系统的正常运行, 从根本上颠覆了现有卫星导航系统静态的频谱应用模式, 也使系统具备了环境的感知能力。基于认知技术主动寻找空间中的空闲频谱, 动态灵活配置频谱资源, 通过天地一体整体协作的联动, 实现系统对环境的自动适应调整, 这种灵活的频谱管理模式满足不同卫星导航系统的业务和服务需求, 为在有限的频谱资源下提高频谱利用率开辟了新的技术途径, 从本质上解决卫星导航系统频谱兼容性, 对在复杂电磁环境下提升卫星导航能力具有重要意义。

认知卫星导航系统具备3个重要属性。

(1) 智能信息感知。它的主要任务是通过与导航卫星外部空间环境的不断交互, 持续对电磁环境特性进行分析, 并依据不同电磁环境特点选择合适的信号处理方式, 获得导航卫星对整体运行环境的认知;

(2) 频谱信息及其相关信息的学习、存储、记忆。通过不同电磁环境频谱信息学习, 提高导航卫星频谱认知的精准程度, 认知卫星导航系统的主要特征之一是采用动态知识库存储电磁环境信息并利用反馈信息进行认知学习, 动态更新知识库。

(3) 行为效果反馈。行为效果是根据频谱信息处理、智能推理信息做出决策, 然后将其反馈给星务处理系统, 使得导航卫星根据决策信息自适应调节频点。从空间信息技术趋势分析, 发展基于认知技术的卫星导航系统, 从智能感知环境、频谱信息学习、存储和记忆, 频率自适应调整, 以及实时效果评估, 实现完整闭环认知能力, 具有“行为效果反馈”功能, 从而更为有效地执行其任务。

4.2 体系框架

认知技术模拟人脑认知的本质, 显示了认知过程中感觉、思考和行动三者相互关联的基本行为。感觉即是搜集原始数据的过程, 除了被动的接收信息, 它还具有主动探查和交互能力, 从而获取信息; 思考即是处理原始感受数据的过程, 同时在新数据与已有知识之间建立联系, 进而建立、匹配和扩展可能涉及的复杂理论陈述; 行动即是认知主体对认知对象的行为和操作进行表达的过程。认知过程的特征性结构是感觉、思考和行动三者之间的相关性和循环不可越过性。感觉为思考提供基本数据, 行动则是主动获取新的数据。对外部环境的复杂认知是主体通过3个基本行为的不断重复和循环形成的, 感觉要经过思考之后才能行动, 而行动又会带来新的感觉, 从而促进新的思考, 而思考的结果又会形成理论陈述并产生具体的行动方案。

将认知技术引入信息论, 认知是关于如何获取信息, 并在信息处理基础上如何对周围环境做出反应的过程。基于认知技术以及信息理论提出一种简单认知系统体系结构, 该结构主要分为信息感知、可信融合、学习推理以及响应控制, 如图3。

(1) 信息感知通过类似于人体各类神经元的智能

图3 (网络版彩图)认知技术简化框图

感知设备(如温度、湿度传感器、计程仪等)实现物理世界环境信息的采集, 信息感知数据被存储在本地信息库中; (2) 可信融合模拟人类的丘脑(丘脑是视觉、听觉、触觉、嗅觉、味觉等各种感觉信号的信息处理中心, 负责对外周神经系统传入的各种多媒体、多模式的感觉信号进行时空整合与信息融合), 具有识别和理解等“感知智能”; (3) 学习推理是信息处理的核心, 模拟人类的大脑(人脑分为左脑和右脑, 左右脑相互连接构成认知中枢), 主要功能是进行思维、产生决策、控制行为, 具有联想、记忆、分析、判断、推理、决策等“思维智能”, 依据对象需求和相关环境构建认知结构, 并基于先验知识库的检索与推理实现决策选择; (4) 响应控制解决信息的智能处理和交互接口问题, 模拟人类的小脑(小脑的主要功能是协调人体的运动和平衡, 通过低级中枢神经系统及外围神经系统对人体全身的运动和姿态进行协调控制), 具有对智能终端设备行为进行协调、计划、优选、调度和管理等“行为智能”。

认知不仅仅获取的是信息还获取知识, 信息与知识在认知过程中是紧密相连的, 由图4的多层认知环呈现这一过程, 内层环路从环境、需求和资源出发, 分别完成认知、决策以及重构等步骤, 而外侧环路通过具体动作描述了整个认知行为过程, 特别是数据、信息、知识三者的运动机理。

在多层认知环中, 感知的对象不仅包括信息环境, 也包括多样化的用户需求和实际可用的资源。因此, 认知起源于对当前的环境、需求与资源的实时感知。通

图4 (网络版彩图)多层认知环

过具体的感知技术, 可以获取大量的感知数据, 将这些数据以一定的方式进行存储和处理, 能够得到感知数据库。感知数据库中所包含的是数据, 是信息载体, 未经语义提炼, 所以相对冗余; 对感知数据库中的数据进行分析处理, 可获取认知信息, 并构成认知信息库。类似地, 将认知信息库用于数据挖掘, 可获取知识并构成知识库, 当然, 也可直接将感知数据库用于数据挖掘而获取知识。认知信息库和知识库中所包含的是信息的语义。通过认知过程的3个步骤, 同时实现了知识发现, 决策过程包括推理和资源调控两个步骤。在相关知识的作用下, 将数据分析中所获取的认知信息用于推理, 可以制定出对应于不同环境、需求与资源条件下的特定策略, 并构成策略库。这里的相关知识不仅包括在推理机中预置的知识, 也包括从知识库中提取、

由特定的认知信息所激活的知识, 依据制定出的策略, 能够对资源池中的可用频谱资源进行合理调控, 以实现多样化的用频需求. 认知环是一个开放的系统, 可以与其他的多层认知环进行交互. 一个认知环中所得到的感知数据库、认知信息库、知识库和策略库, 可以作为另一个认知环中先验的相应库. 此外, 一个认知环的资源池中所包含的资源来自其他多层认知环所释放的资源.

在基于认知技术的卫星导航系统基本概念的牵引下, 综合认知技术的循环过程, 形成基于认知技术的卫星导航系统架构, 其在卫星导航系统不仅实现了环境感知-学习-存储-记忆-决策的闭环, 同时实现动态数据库的应用-评估-更新的闭环, 如图5所示. 系统在充分考虑导航卫星系统的结构, 同时集成“理解-构建”频谱所需要的各种功能, 使各个功能模块既能相互协作, 又保持清晰的界面, 做到高效可靠.

认知卫星导航系统架构, 系统功能组成可划分为五大部分.

(1) 频谱信息感知

利用各种传感测量手段获取导航卫星电磁环境工作状态数据和信息, 包括对无线传播环境干扰度(interference temperature)的估计以及频谱空穴(spectrum holes)的检测; 信道的确认, 包括对信道状态信息的估计以及对信道容量的预测; 发射功率控制及动态频谱管理等, 作为后续数据存储的数据源.

(2) 动态数据库

认知卫星导航系统作为大型智能系统, 在数据管理上引入了动态知识库模块. 动态知识库作为整个智能学习决策系统的信息存储及信息交换中心, 按照数据统计的时间长短分为短期知识和长期知识两种形式. 其中, 短期知识表示系统工作的外部环境工作参数的当前状态, 包括由于感知数据具有空时频多维属组织数据的存储结构, 并且考虑到卫星运行的周期回归性特点, 对于不同周期的数据分别建立数据表格进行存储; 长期知识分为规则信息和案例信息.

(3) 认知模型自适应频谱辨识

结合数据处理结果, 根据相关算法对整星及分系统健康状态进行分析, 主要包括频谱知识挖掘和预测.

图5 认知卫星导航系统架构示意图

频谱知识挖掘在综合考虑环境信息、无线参数信息以及相关任务规则信息的基础上推导出参数与系统性能之间的相互作用关系, 由于频谱感知数据具有空、时、频等多维特性增加了可以进行数据挖掘的层次, 对感知数据挖掘算法的要求实际上由频率选择的需求决定, 系统拟采用增量数据挖掘算法, 在原有挖掘数据和结果的基础上基于增量数据(新增加的数据)的进一步分析和挖掘。

(4) 自治操作与管理

根据频谱评估结果, 对发生干扰或可能产生干扰的阶段进行决策处理, 并将处理结果及报警信息下传执行机构。

(5) 执行机构

指卫星导航系统根据对频谱的辨识、预测结果自主发出的包括状态设置、频谱切换等频谱修复、更换或重构指令。

在基于认知技术的卫星导航系统信息感知、动态数据库、认知模型自适应频谱辨识、执行机构的系统架构中, 存在着各种维度的信息关联, 不同感知环境直接影响着内部信息关联的强弱程度, 并具有循环认知特性, 能够感知当前卫星导航状态获取所需信息, 并进行智能决策、动态重构等实现对环境的动态自适应, 其信息生命周期为“物理数据→单个参数信息→多维度参数信息→多模态融合信息→关联参数知识→参数耦合知识→动态配置→行为控制”, 如图6所示, 基于认知技术的卫星导航系统就是沿着有效的传递, 以及充分的应用方向不断的流动及演进转化, 形成循环往复闭环信息生命周期。

5 认知卫星导航系统的工作流程

5.1 认知卫星导航系统组成

区别于传统卫星导航系统, 认知卫星导航系统具体组成。

(1) 频率可调节导航信号发送器: 信号发生器主要完成用户导航卫星与地面用户的动态频谱认知导航任务。根据地面控制中心分系统通过数据提取和预测技术生成频率图谱, 并通过信号发送器内的工作频点可调滤波器及分频比可调的频率合成器联合实现对信号发送器工作频点的调节, 实现卫星导航频率的捷变。

(2) 认知用户终端: 认知用户终端主要包括频谱感

图6 基于认知技术的卫星导航系统信息闭环示意图

知、频谱数据压缩和频率选择功能。

(3) 地面控制中心: 控制中心主要包括频谱数据解压缩, 数据提取和频率态势图谱绘制功能模块。

认知卫星导航系统系统层次设计如图7所示。

5.2 认知卫星导航系统工作过程

认知卫星导航系统灵活的频谱管理模式满足不同卫星导航系统的业务和服务需求, 其具体工作原理可分为A、B两个阶段, 如图8所示。

A阶段: 初始导航链路稳态运行阶段。该阶段包含两个层面的工作: 一是外部电磁环境的变化导致的频谱的实时感知; 另一个方面是频谱的存储、统计和挖掘。导航卫星通过对射频前端信号进行时域变换得到实时的频谱感知数据; 同时, 导航卫星和认知用户终端将感知数据压缩后回传到地面数据控制中心, 数据控制中心对数据进行存储与统计, 并采用数据挖掘算法完成规律进行的提取。

B阶段: 天地一体认知导航链路建立阶段。系统通过导航卫星、认知用户终端和数据控制中心的协同完成频率选择功能。该阶段包含两个层面的工作, 首先, 数据控制中心根据频谱规律的挖掘制定导航频谱的频率态势图, 指示系统即将到达的信道位置上进行导航所建议使用的频率, 该频率态势图通过控制链路上传到导航卫星和认知用户终端; 另外一个层面, 由于频率图谱的制定是以历史数据为依据的, 无法应对突发性的干扰或者违反规律的频谱占用情况。因此, 在终

图 7 (网络版彩图)认知卫星导航系统流程图

图 8 (网络版彩图)卫星导航系统认知链路建立过程

端该频率图谱并不作为频率选择的唯一根据，终端还将结合即时频谱感知数据和结果等信息，考虑噪声和干扰水平、窄带干扰情况、可能的导航质量和信道时长进行最终的频率选择，从而通过频谱跳换的方式完成导航数据的传输。

该阶段具体实现如图8所示。

6 认知卫星导航系统的关键技术

(1) 频谱检测技术

频谱检测技术是认知卫星导航系统工作的基础,能够获取周围的无线频谱环境信息,在此基础上调整系统的导航参数,实现频谱利用的最大化,并且避免对授权用户造成干扰。本文研究在现有的技术中选择了一种无需先验信息,适用于宽带频谱感知的能量检测技术,并在系统设计中给出了动态频谱环境下该检测技术的应用。

(2) 频谱共享技术

频谱共享技术是指卫星导航系统非授权用户与授权用户,或者非授权用户之间在互不干扰的条件下在相同频段内有效利用频谱资源进行导航。在这方面,本文主要研究了适用于卫星导航场景的星地协同频率选择技术,给出了在不干扰授权用户的条件下,使系统容量最大化的频率选择功能在动态频谱协同认知导航系统中的实现方法。

(3) 频谱数据挖掘技术

根据卫星导航系统频谱信息在时域、频域、空域、解调域等多域特点,结合信号检测的原语表达,构建新的存储架构和快速搜索引擎,设计最优的本地动态模板,通过本地动态模板进行大幅度的数据压缩、存储和更新,实现信号的精确描述表征;导航卫星周期性运行规律使的卫星认知频谱环境的变化特性在各维度上具有缓变特性和规律性,为从存储在本地动态模板中海量数据中挖掘有用的信息提供了技术可能,要求设计的模板不仅能够通过接收信号进行实时的自我学习能力,而且能够将检测数据删除冗余,从而发掘能有效反映频谱状态、便于维护且易于指导频率选择的感知数据信息。

(4) 动态频谱管理技术

动态频谱管理是指认知卫星导航系统根据当前频谱环境状态,结合用户导航业务要求,在所有可用频带中判断出满足业务要求且性能最好的频带,并智能地调整相关参数进行通信。在本项研究中采用的技术是认知引擎,这也是认知卫星导航系统区别于传统卫星导航系统的关键部件。本项研究频谱管理方面的技术包括频谱数据的压缩处理,频谱数据挖掘,基于预测的频率图谱技术等,主要构件能够将智能化的认知技术应用于卫星导航的场景中,使其具备实现的可行性。

(5) 面向多参数优化控制的系统动态重构技术

动态重构是使卫星导航系统具有认知性的关键,其工作基础是由环境检测得到的认知信息库,通过机

器学习、软计算等方法解决系统配置中的半结构化和非结构化的问题。研究基于认知技术的动态重构体制,要求系统可以根据在时间和空间不停变化的环境中追踪感知到的环境信息特性,提出优化控制决策的资源配置信息,为导航系统选择最优的工作参数,克服传统卫星导航系统配置过多依赖人工,成本维护增加的不足。

(6) 基于认知技术的卫星导航接收机设计

基于认知技术卫星导航接收机不同于传统的卫星导航接收机设计,传统的卫星导航接收机只需要实现信号接收、信号检测、信号解调和解码等功能即可,认知卫星导航系统中的接收机除了实现上述功能之外,还要实现认知技术所特有的功能,如频谱空穴检测、信道容量的估计、功率控制、动态频谱管理等功能。因此,为了保证卫星导航的实效性,对复杂环境中干扰信号的分析、特征提取、样式辨识、参数估计以及频谱调制等必须实时完成,研究高速宽带的信号分析与处理算法,完成认知卫星导航接收机原理模型的研制。

7 典型系统模块模拟仿真

频谱感知是认知卫星导航系统工作的基础,能够获取周围的频谱环境信息,在此基础上调整系统的导航参数,实现频谱利用的最大化,并且避免对主用户造成干扰。卫星导航系统涉及空间段、地面控制系统和导航终端等部分,系统中的星座和导航终端移动性较强,所处的空-时-频域都可能发生变化,同时,在实际应用中,对于卫星导航系统,信号到达接收端功率很低,一般低于热噪声约15 dB,空间环境噪声情况复杂,其微弱的目标信号特性,以及与之相比较高的杂波环境,使得微弱信号频谱检测方法称为系统成功实施的关键。

7.1 模型算法

卫星导航信号的循环谱在非零循环频率处具有明显峰值,而噪声为平稳信号,仅分布在零循环频率上,因此,基于循环谱的信号检测有利于抑制噪声,提高对低信噪比条件下的检测能力,准确判断干扰温度。具体实现分为以下3个步骤。

首先,计算 $x(n)$ 的时间长度为 $T=NT_s$ 的 N 点频谱:

$$X_T(k) \triangleq \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi nk/N}, \quad (6)$$

其次, 计算谱相关:

$$S_{xT}^{\alpha}(k) = (1/N) X_T(k + \alpha/2) X_T^*(k - \alpha/2), \quad (7)$$

最后, 计算谱平滑:

$$S_{xT}^{\alpha}(k)_{\Delta f} = (1/M) \sum_{m=-M/2}^{M/2-1} S_{xT}^{\alpha}(k+m). \quad (8)$$

7.2 仿真验证

运用该方法对BPSK信号载频、符号重复周期等参数进行了估计。

图9是高斯白噪声的谱相关函数。可以明显看出白噪声循环谱只在 $\alpha=0$ 处出现峰值, 其余地方的值较小, 但不是理论预测的零值, 这可能是因为白噪声的随机特性不理想。

图10是纯净的BPSK信号的谱相关函数。采样率为载波频率的10倍, 循环频率轴是以采样率为标准归一化的。从谱相关函数的投影上可看出谱相关函数在载波频率的整数倍处均有峰值出现。对比噪声的谱相关函数, 发现信号和噪声的谱相关函数差异明显, 可用谱相关函数进行频谱检测。

图11是BPSK信号的循环谱。采样率为载波频率的10倍, 循环频率轴以采样率为标准归一化。可看出虽然噪声能量已远远大于信号能量, 但在载频的整数倍处, 仍然有清晰的峰值出现。通过和噪声的循环谱投影对

图9 高斯白噪声的谱相关函数

图10 BPSK信号的谱相关函数

图11 信噪比为-10 dB时的谱相关函数

比, 主峰对应于载频信息, 次峰对应于符号重复周期信息, 在低信噪比情况下, 循环谱估计方法能够准确检测出信号的基本参数, 易得出认知主用户信号存在的结论。

8 总结与建议

(1) 从国际电报联盟(ITU)给出的频谱划分可见, 当前的卫星导航频率空间已经非常拥挤, 导致卫星导航频谱信号互干扰客观存在, 不可避免。虽然新的导航信号设计体制提供了缓解卫星导航信号互干扰的方法, 但从长远看不能从根本上解决卫星导航信号兼容性问题。本文寻求新的颠覆性的卫星导航系统架构体系, 从理论上提出一种高性能的对环境参数和模型参数感

知的卫星导航系统,从认知角度来看,未来的卫星导航系统必然是具有“行为效果反馈”能力的,必定向具有“认知”能力方向发展。卫星导航系统认知能力的增加将使系统从信息感知,再通过信息传输,到达信息应用终端,再到实时效果评估,实现闭环。

(2) 认知卫星导航系统涉及导航卫星、地面控制中心和用户终端等部分,系统复杂,涉及很多比较难的新方法,尽管我们已经迈出了重要的第一步,但仍

有一些关键理论模型亟待突破,应及早开展相关研究和开发工作,突破理论瓶颈,为系统技术走向实用化奠定坚实的理论基础,特别是针对人脑高级神经系统的简化系统结构模拟、系统架构模型设计等,应加快研究的步伐,集中全国相关领域的优势力量,确保模型的科学性和技术的先进性,并通过跨领域、多学科的融合,确保取得实质性突破,为系统技术走向实用化提供有力支撑。

参考文献

- 1 Rizos C. The future of global navigation satellite systems. Technical Report. University of New South Wales, 2007
- 2 Psimoulis P A, Stiros S C. A supervised learning computer-based algorithm to derive the amplitude of oscillations of structures using noisy GPS and Robotic Theodolites (RTS) records. *Comput Struct*, 2012, 92-93: 337-348
- 3 Moschas F, Stiros S. PLL bandwidth and noise in 100 Hz GPS measurements. *GPS Solut*, 2015, 19: 173-185
- 4 Li P, Zhang X. Integrating GPS and GLONASS to accelerate convergence and initialization times of precise point positioning. *GPS Solut*, 2014, 18: 461-471
- 5 Haykin S, Thomson D J, Reed J H. Spectrum sensing for cognitive radio. *Proc IEEE*, 2009, 97: 849-877
- 6 Khozimeh, F, Haykin, S. Self-organizing dynamic spectrum management for cognitive radio networks. In: The 8th Conference on Communication Networks and Services Research, 2010. 1-8
- 7 Mitola J, Maguire G Q. Cognitive radio: Making software radios more personal. *IEEE Pers Commun*, 1999, 6: 13-18
- 8 Haykin S, Zia A, Xue Y, et al. Control theoretic approach to tracking radar: First step towards cognition. *Digital Signal Process*, 2011, 21: 576-585
- 9 Guerci J R. Cognitive Radar: The Knowledge-Aided Fully Adaptive Approach. Boston: Artech House, 2010
- 10 Sharma S K, Chatzinotas S, Ottersten B. Interference alignment for spectral coexistence of heterogeneous networks. *J Wireless Com Network*, 2013, 2013: 46
- 11 Sharma S K, Chatzinotas S, Ottersten B. Satellite Cognitive Communications and Spectrum Regulation. In: Hofmann M. International Regulations of Space Communications. Brussels: Larrier, 2013
- 12 Sharma S K, Chatzinotas S, Ottersten B. Spatial filtering for underlay cognitive SatComs. In: Dhaou R, Beylot A L, Montpetit M J, et al., eds. Personal Satellite Services. PSATS 2013. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, vol 123. Cham: Springer, 2013. 186-198
- 13 Sharma S K, Chatzinotas S, Ottersten B. Cognitive beam hopping for spectral coexistence of multibeam satellites. In: Future Network and Mobile Summit (Future Network Summit). Lisboa: IEEE, 2013. 1-10

Research on new concept cognitive satellite navigation system

XIE Jun^{1,2} & ZHANG JianJun^{1,2}

¹ *Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;*

² *China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China*

According to the spectrum division given by the International Telegraph Union (ITU), the current satellite navigation frequency space is particularly crowded. In addition to GLONASS, the four satellite navigation systems partially or completely overlap the frequency bands of GPS, Galileo and COMPASS systems, resulting in satellite navigation signal interference exists objectively and inevitable. Although the new navigation signal design system provides a method of alleviating the mutual interference of satellite navigation signals, however, it can not fundamentally solve the problem of satellite navigation signal compatibility in the long run. Aiming at the demand of compatibility of global satellite navigation system and taking the work pattern and mechanism of human brain as a reference, this paper proposes the basic concept and connotation based on cognitive satellite navigation system and constructs the cognitive satellite navigation system architecture model and information closed-loop life cycle. The electromagnetic environment characteristics and signal compatibility characteristics into the overall structure of the system in order to make the system performance changes with the electromagnetic environment and spectral characteristics of different adaptive changes, in theory, put forward a high-performance environmental model parameter perception Satellite navigation system architecture model, which is the future direction of satellite navigation system development.

global satellite navigation system, cognitive technology, electromagnetic environment, compatible spectrum

doi: [10.1360/N092017-00408](https://doi.org/10.1360/N092017-00408)