

现代卫星导航系统技术特点与发展趋势分析

陈忠贵*, 帅平, 曲广吉

中国空间技术研究院总体部, 北京 100094

* E-mail: chenzhonggui@cast.cn

收稿日期: 2008-08-23; 接受日期: 2008-10-17

国家高技术研究发展计划(“863”计划)(批准号: 2008AA12Z304)资助项目

摘要 简要介绍了美国GPS系统、俄罗斯GLONASS系统、欧洲Galileo系统、中国北斗卫星导航系统、以及日本和印度的区域卫星导航系统的发展状况. 重点研究了GPS系统星座维持、有效载荷、自主导航、信号调制和地面站改造等最新技术特征, 以及GPS III系统技术及研究进展, 分析论证了卫星导航系统技术的发展趋势, 为我国卫星导航系统建设规划提供参考.

关键词

卫星导航系统
星座维持
自主导航
星间链路
导航信号调制

现代战争以陆、海、空、天一体化战场环境为其主要特征, 在空间攻防对抗中卫星导航系统为各类运载工具和先进武器提供高精度时空基准和精确制导信息. 近10余年来, GPS系统在几次局部战争中的成功实践, 充分展示了现代卫星导航系统的重大军事利用价值; 同时, GPS在国民经济的各个领域得到广泛应用, 已发展成为对全球经济有相当影响的巨大产业, 倍受世界各国关注. 目前, 已建成和正在规划建设卫星导航系统除美国的GPS系统外, 还有俄罗斯的GLONASS系统、欧洲的Galileo系统、中国的北斗卫星导航系统、以及日本和印度的区域卫星导航系统.

本文在简要论述现代卫星导航系统技术发展现状基础上, 重点研究近年来GPS系统的最新技术特征, 以及GPS III系统技术与发展规划, 并分析论证卫星导航系统技术的发展趋势, 为我国卫星导航系统建设规划提供参考.

1 卫星导航系统发展状况

1.1 美国的GPS系统

自2000年以来, 为了进一步提高GPS系统导航

定位精度, 增强系统的连续性、完好性、可用性、抗干扰性和自主生存能力, 美国积极推进GPS系统的现代化, 使之成为国际卫星导航的标准系统. GPS系统现代化采取的技术措施和步骤包括: (1)关闭选择可用性(SA)软件; (2)新增军用M码和民用L2C码; (3)增设民用频率L5; (4)实施新一代GPS III系统计划^[1]. 当前, 正处于GPS系统现代化的第2阶段, 部署现代化改造卫星系列Block II R-M.

截至2007年7月, GPS星座拥有30颗在轨运行卫星, 包括15颗Block II A卫星、12颗Block II R卫星和3颗Block II R-M卫星. 其中, 在第1~4轨道面上各有5颗卫星; 在第5轨道面上有4颗卫星; 在第6轨道面上有6颗卫星. 当前的GPS星座已不是早期设计的经典Walker 24/3/2星座构形, 而是趋向于一种6个轨道平面的卫星均匀分布与非均匀备份混合星座构形^[2]. 这样的星座设计能够保证导航卫星信号的全球连续性覆盖, 满足系统可用性指标要求, 有利于实现接收机自主完好性监测(RAIM), 获得安全可靠的高精度导航信息.

用户测距误差(URE)是评价卫星导航系统性能的关键指标, 与卫星导航系统地面控制部分和空间

星座部分密切相关, 由卫星星历及时钟误差在用户至卫星视线方向的投影计算得到. 在图 1 中展示了 1990~2005 年 URE 均方根误差(RMS, 即用户测距精度)的长期统计结果. 从图 1 中可以看到, 自 1995 年 GPS 星座具备完全可操作能力以来, 用户测距精度提高了 62%, 到 2005 年已达到 1.1 m. 随着 GPS Block II R/II R-M 卫星系列的部署, 加入星间链路测距数据, 进一步减小 URE 值. 2007 年 2 月 21 日, 统计 GPS 星座 30 颗卫星的平均 URE 值已达到 0.74 m.

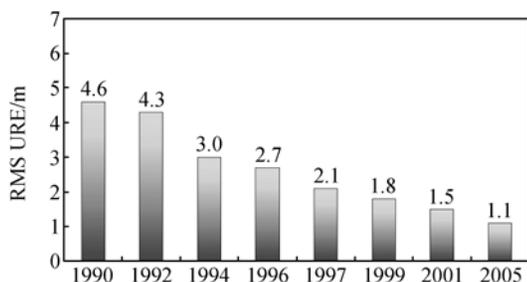


图 1 GPS 系统用户测距精度持续改进过程

可见, GPS 系统用户测距精度逐渐提高是 GPS 卫星系统技术不断演化及地面控制站升级和完善的结果, 满足军民用户高精度导航应用需求.

1.2 俄罗斯的 GLONASS 系统

GLONASS 系统与 GPS 系统具有相似的系统构成、定位原理和服务方式, 其差异在于采用不同的信号通信体制、坐标参考系统、时间基准系统和广播星历格式^[4]. GLONASS 星座现有 17 颗卫星在轨运行, 其中第 I, II 和 III 轨道平面分别有 8 颗、3 颗和 6 颗卫星, 4 颗卫星为临时关闭状态, 1 颗卫星尚处于测试阶段, 仅有 12 颗卫星能够正常工作. 目前, GLONASS 星座全球可用性为 85%, 每天平均中断时间在 2.1 h 以上. 俄罗斯政府宣布, 将在 2007 年下半年进行 2 次发射(6 颗卫星), GLONASS 星座卫星数可达到 18 颗, 以满足初步导航应用能力; 2009 年, 恢复全部 24 颗卫星星座, 具备完全可操作能力^[3].

到目前为止, 已发射 95 颗 GLONASS 卫星, 包括 88 颗 GLONASS 卫星和 7 颗 GLONASS-M 卫星. GLONASS 卫星在 G1(1591~1610 MHz)和 G2(1240~1256 MHz)频段上采用频分多址(FDMA)方式调制军用和民用信号. 新型的卫星系列 GLONASS-K 和 GLONASS-KM/NG 正在研制和开发之中. GLONASS-K

卫星设计寿命为 10 年, 增加 G3(1190~1212 MHz)导航频段、星间链路和搜救载荷等设计, 并可能在 GLONASS-K 卫星 G1, G3 频段上采用码分多址(CDMA)方式调制导航信号, 以同 Galileo, GPS 民用导航信号兼容. GLONASS-K 卫星预计 2008 年以后发射入轨, GLONASS-KM/NG 卫星预计 2011 年以后才能发射^[4,5].

1.3 欧洲的 Galileo 卫星导航系统

2002 年 3 月 26 日, 启动欧洲民用导航卫星计划——Galileo 卫星导航系统. Galileo 卫星星座由 30 颗 MEO 卫星组成, 采用 Walker 27/3/1 星座构形, 并有 3 颗在轨备份卫星. 卫星轨道倾角为 56°, 轨道高度为 23616 km, 轨道交点周期为 14 h 22 min. 卫星在轨重量约为 650 kg, 功耗 700 W, 设计寿命为 20 年^[6].

Galileo 卫星采用码分多址(CDMA)扩频通信体制, 以及二进制补偿载波(BOC, 或二进制偏置载波)和二进制移键控(BPSK)信号调制方式, 在 E5(1164~1215 MHz), E6(1260~1300 MHz)和 E2-L1-E1(1559~1591 MHz)频段上调制 10 个导航信号, 并在 L6(1544~1545 MHz)频段内广播搜救信号^[7]. Galileo 系统提供 5 种基本的服务方式: 开放服务(OS)、商业服务(CS)、生命安全服务(SOL)、公共管理服务(PRS)和搜救服务(SAR).

2005 年 12 月 28 日, 成功发射第 1 颗 Galileo 试验卫星——GIOVE-A, 对导航频段、导航信号、星载原子时钟、空间辐射环境、以及卫星激光测距(SLR)等进行在轨测试验证. Galileo 系统原计划 2006 年完成在轨测试验证, 2008 年前完成全部 30 颗卫星发射与组网. 现计划推迟为: 2007 年底发射第 2 颗试验卫星 GIOVE-B; 2009 年发射 Galileo 卫星和在轨测试验证; 2012 年前完成全部星座卫星部署, 并进入工程应用阶段.

1.4 中国的北斗卫星导航系统

2000 年 10 月, 我国成功发射了第 1 颗北斗导航卫星, 现已独立建成具有 3 颗北斗卫星的导航试验系统. 该系统采用主动式导航体制, 为我国境内及周边地区的中、低动态用户或静止用户提供定位和授时服务, 对我国国民经济建设起着积极的推动作用.

2007 年 4 月 14 日, 我国在西昌卫星发射中心又成功发射了一颗北斗导航卫星, 进入高度为 21500 km 的中圆轨道, 标志着我国自行研制的北斗卫星导航

系统进入新的发展建设阶段. 我国将在未来几年里陆续发射北斗导航卫星系列, 并进行星座组网和试验, 逐步扩展为全球卫星导航系统. 该系统采用单向时间测距的被动式导航体制, 具有定位、测速和授时等功能, 主要用于国家经济建设, 为交通运输、气象、石油、海洋、森林、通信、公安等部门以及其他特殊行业提供高效的导航定位服务.

1.5 日本和印度的区域卫星导航系统

2006年, 日本政府提出建立区域卫星导航系统——准天顶卫星系统(QZSS). QZSS 星座由7颗卫星组成, 包括3颗倾斜地球同步椭圆轨道(IGSEO)卫星、1颗 GEO 卫星和3颗 HEO 卫星, 计划2009年发射第1颗卫星. QZSS 卫星导航信号与GPS和Galileo 卫星兼容, 包括 L1C, L1-C/A, L2C, L5和 L1-SAIF 等信号. QZSS 地面控制系统包括10个监测站和1个主控站, 时间尺度与国际原子时(TAI)相差 19 s, 坐标系统与GPS 系统偏差小于 0.02 m.

印度的区域卫星导航系统(IRNSS)星座将采用3GEO+4IGSO 构形, 卫星将在 L1 和 L5 频段上调制导航信号, 并利用 C 频段对卫星测距, 用 S 频段进行卫星测控. 计划2009年发射1颗GEO卫星, 用于辅助GPS区域增强导航, 并进行 IRNSS 系统技术初步试验验证.

2 GPS II 系统的最新技术特征

2.1 GPS 星座在轨备份与维持技术

GPS星座在轨备份策略随着星座演化而不断完

善, 取得了良好的实际工程应用效果. 每次发射进入GPS星座的替补卫星, 并不是对退役卫星站位的简单替换, 其具体站位是由备份策略优化计算得到的. 近8年来, GPS 星座在轨卫星数量一直保持在28颗以上, 表1中给出了在此期间发射的GPS卫星及相应的退役卫星轨道面和站位分布情况. 从表1中可以看到, 发射GPS替补卫星与相应的退役卫星在分布轨道平面和站位上没有必然联系, 甚至不在同一轨道平面上.

事实上, GPS 星座在轨备份策略是根据星座全球连续覆盖监测结果、系统性能指标、星座卫星健康状态、运载和发射能力、新型卫星研制状况、卫星及星座可靠性预算、发射时刻、发射场地、以及系统现代化进程等多种因素的量化数据, 采用GPS星座备份策略优化设计与分析软件, 计算得到替补卫星的部署轨道面和站位. 针对退役卫星对星座全球覆盖性能的影响评估结果, 对星座卫星站位进行动态配置. 例如, 在2003年7月至2007年7月间, 就对4颗GPS Block II A 卫星进行站位调整, 以满足星座全球连续覆盖性能指标要求(如表2所示).

可见, 导航星座在轨备份与长期维持策略属于多元决策变量、多目标和复杂函数的优化问题. GPS 星座的长期维持策略逐渐由“按计划发射”方式向“按需发射”方式过渡. GPS 替补卫星部署轨道面和站位随发射时刻动态优化确定, 以满足全球定位精度、连续性、完好性和可用性等系统性能指标要求.

表1 近8年来发射的GPS替补卫星与退役卫星分布情况

| PRN 编号 | 替补卫星 | | | 退役卫星 | | |
|--------|---------|------------|-------|---------|------------|-------|
| | 卫星系列号 | 发射日期 | 轨道面站位 | 卫星系列号 | 退役日期 | 轨道面站位 |
| 16 | IIR-8 | 2003.01.29 | B/1 | II-3 | 2000.03.04 | E/3 |
| 21 | IIR-9 | 2003.03.31 | D/3 | II-8 | 2002.09.25 | E/2 |
| 22 | IIR-10 | 2003.12.21 | E/2 | II A-18 | 2002.12.03 | B/6 |
| 19 | IIR-11 | 2004.03.20 | C/3 | II-4 | 2001.09.11 | A/4 |
| 23 | IIR-12 | 2004.06.23 | F/4 | II A-10 | 2003.11.13 | D/5 |
| 02 | IIR-13 | 2004.11.04 | D/1 | II-2 | 2004.05.12 | B/5 |
| 17 | IIR-14M | 2005.09.26 | C/4 | II-5 | 2005.02.23 | D/6 |
| 31 | IIR-15M | 2006.09.25 | A/2 | II A-19 | 2004.12.28 | C/3 |
| 12 | IIR-16M | 2006.11.17 | B/5 | - | - | - |
| 15 | - | - | - | II-9 | 2007.03.14 | D/5 |

表 2 GPS Block II A 卫星站位动态调整情况

| PRN 编号 | 卫星系列号 | 轨道平面 | 站位编号 | |
|--------|---------|------|------------|------------|
| | | | 2003 年 7 月 | 2007 年 7 月 |
| PRN24 | II A-11 | D | 1 | 6 |
| PRN25 | II A-12 | A | 2 | 5 |
| PRN01 | II A-16 | F | 4 | 6 |
| PRN07 | II A-20 | C | 4 | 5 |

2.2 GPS 卫星系列与长寿命特征

目前, 美国已发射 5 种 GPS 卫星系列, 即 Block I, Block II, Block II A, Block II R 和 Block II R-M, 共计 55 颗卫星, 其中 Block I-7 和 II R-1 两颗卫星发射失败. 表 3 中分别给出了 5 种卫星系列的重量、功率、原子时钟类型及数量、设计寿命、首次发射时间以及已发射数量等主要技术参数. 从表 3 中可以看到, GPS Block II R 卫星系列都采用铷钟频标, 已取代铯钟空间应用. 星载铷钟稳定度为 $1 \times 10^{-13} \sim 4 \times 10^{-14}/24 \text{ h}$, 具有较小的热系数, 毋需专门作外部热控系统, 对于不可预见的热环境, 由附加的基板加热器负责环境温度调节, 保证铷钟正常工作^[8].

在图 2 中展示了已发射的 55 颗 GPS 卫星实际寿命情况. 其中, 卫星编号“11”表示 Block I-1 卫星; “21”表示 Block II-1 卫星; “2A10”表示 Block II A-10; “2R1”表示 Block II R-1; “16M”表示 Block II R-16M. 从图 2 中可以看到: 在已成功发射并退役的 23 颗卫星中, 仅有 3 颗卫星 Block I-5, Block II-7 和 Block II A-13 未达到设计寿命要求; Block II-9 卫星在轨运行时间最长, 达到 16.6 年, 是其设计寿命的 2.3 倍; 已成功发射并退役的 10 颗 Block I 卫星和 13 颗 II/II A 卫星的平均使用寿命分别为 9.6 年、11.5 年. 可见, GPS 卫星设计和研制技术, 以及星座长期维持与运行管理技术已相当成熟. GPS 卫星的长寿命特征是 GPS 系统获得空前成功的重要保障条件.

表 3 已发射 GPS 卫星系列的主要技术参数

| 指标类别 | 卫星系列 | | | | |
|---------|------------|------------|------------|------------|--------------|
| | Block I | Block II | Block II A | Block II R | Block II R-M |
| 在轨重量/kg | 500 | 774 | 987 | 1075 | 1075 |
| 功率/W | 400 | 710 | 700 | 1136 | 1136 |
| 铯钟数 | 1 | 2 | 2 | 0 | 0 |
| 铷钟数 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| 设计寿命/yr | 5 | 7.3 | 7.8 | 10 | 10 |
| 首次发射时间 | 1978.02.22 | 1989.02.14 | 1990.11.26 | 1997.01.17 | 2005.09.25 |
| 已发射数量 | 11 | 9 | 19 | 13 | 3 |

2.3 GPS 卫星有效载荷技术演化

根据 GPS 系统现代化进程, 剩余的 5 颗 Block II R-M 卫星系列, 将在 2007 年下半年以后的 1 年内发射部署完毕. 2008 年, 将发射 GPS Block II F 后续卫星系列. GPS Block II F 卫星在轨重量为 1545 kg, 功率为 2900 W, 设计寿命为 12 年. 2013 年, 将实施新一代 GPS 系统计划——GPS III. GPS 卫星有效载荷技术演化过程如下^[9].

(1) GPS Block I 卫星. Block I 卫星系列属于双频率 L1(1575.42 MHz) 和 L2(1227.60 MHz) 基本型卫星, 在 L1 频率上调制 C/A 码、P1 码和导航电文信号; 在 L2 频率上调制 P1 码和导航电文信号, 因此也被称为原始概念验证卫星. 该卫星系列由 Rockwell 公司负责研制, 反映了系统开发阶段的技术水平.

(2) GPS Block II 卫星. Block II 卫星系列是由 Rockwell 公司负责研制的标准型卫星. 除具有 Block I 卫星基本功能外, 卫星有效载荷增加功能包括: 核爆探测系统(NDS)载荷; 人为降低广播星历和时钟参数精度的 SA 软件; 采取反电子欺骗(A-S)措施, 将军用 P 码加密为 P(Y)码; 以及具有 14 天的导航电文存储能力. NDS 信息通过 L3(1381.05 MHz) 频率下传到地面信息分析中心, 同时 L3 频率还用于传输导弹预警信息和其他应用.

(3) GPS Block II A 卫星. Block II A 为 Block II 的增强型卫星系列, 具有 180 天的导航电文存储能力, 在缺乏地面控制系统信息支持的情况下, 卫星自主播发导航电文, 用户导航定位精度逐渐下降.

(4) GPS Block II R 卫星. Block II R 为 Block II /II A 的替补卫星系列, 由 Lockheed Martin 公司负责研制, 增加了星间测距与通信链路设计, 具有自主导航功能. 同时, 卫星还具有在轨可编程能力, 并设计

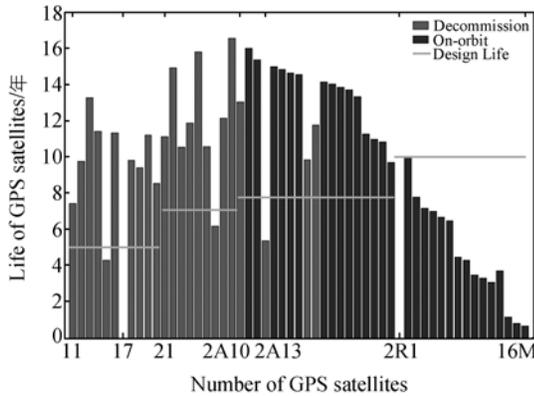


图2 GPS 卫星使用寿命统计结果

了针对星载铷钟性能的先进时间保持系统, 实现星上时间系统保持和无缝切换。可见, 该卫星系列对有效载荷做了较大的技术改进, 满足现代卫星导航系统性能需求。

(5) GPS Block II R-M卫星。Block II R-M是对8颗Block II R卫星进行现代化改造的卫星系列, 该卫星在L1和L2频率上播发新的军用M码, 并在L2频率上将播发民用测距码(L2C)。L2C码具有灵活的信号结构、较强的数据恢复和信号跟踪能力, 普通用户可利用双频测量伪距修正电离层延迟误差。M码比P(Y)具有较强的发射功率、抗干扰能力和保密性能, 以及有利于直接捕获等优点, 更好地满足军用需求^[10,11]。

(6) GPS Block II F卫星。Block II F属于Block II A/II R的后续卫星系列, 由Boeing公司负责研制。该卫星增加民用频率L5(1176.45 MHz), 有利于保障民航安全, 修正电离层延迟误差, 实时解算载波相位模糊度, 削弱多路径效应影响等。同时, 卫星采取柔性的有效载荷软硬件设计, 增强星间链路数据处理、网络通信、以及高速的上下行链路数据传输能力。卫星上行和下行数据传输率分别到达2 Kbps和1.9 Mbps^[12]。

2.4 GPS 卫星自主导航技术

GPS Block II R/II R-M卫星具有自主导航功能。所谓自主导航是指导航星座卫星在长时间得不到地面测控系统支持的情况下, 通过星间双向测距、数据交换以及星载处理器滤波处理, 不断修正地面站注入的卫星长期预报星历及时钟参数, 并自主生成导航电文和维持星座基本构形, 满足用户高精度导航定位应用需求的实现过程。其中, 星间测距与通信链

路是GPS卫星自主导航的核心技术, 由星间信号发射机、信号接收机、馈电网络、发射天线单元、接收天线单元以及信号与数据处理单元组成。GPS卫星自主导航模式和技术特点如下。

(1) 星间链路天线。星间链路发射天线采用独立天线单元, 而接收天线由9个单元组成的平面直射阵列组成, 其中1个单元位于阵列中心, 其余8个单元围绕中心单元均匀布置, 且馈电相位与中心单元反相, 馈电幅度按比例配置。接收天线波束相位中心稳定, 波束边缘增益可达到7 dBi左右。

(2) 星间链路拓扑结构。根据GPS星座构形和星间链路天线赋形设计, 星间链路距离可达到49465 km。对于24颗卫星星座, 可以建立8~16条同轨道面向前和后向链路, 以及异轨道面侧向链路。

(3) 星间链路通信体制。星间通信采用时分多址(TDMA)扩频通信体制, 通信频段为UHF(250~290 MHz)频段。每颗卫星分配1.5 s的时间间隔用于双频测距或通信。对于24颗卫星星座, 36 s为1个子帧, 900 s为1个主帧。GPS II R/II R-M卫星星间链路测距周期可选择15 min, 1, 2, 3, 4和6 h, 其中1 h为缺省值设置^[13]。

(4) 自主导航信息处理流程。星间测距与数据交换→星间测距与时钟参数修正→星座卫星完好性监测与评估→更新星历和时钟参数→修正星座整体旋转误差→重新拟合卫星星历和时钟参数→修正卫星时钟偏差→保存每小时检测点数据→生成导航电文。

(5) 自主导航工作模式。GPS II R/II R-M卫星自主导航采取4种工作模式: 关闭模式, 仅进行星间测距和数据存储; 滑行模式, 星间测距、数据存储和递推、导航电文生成, 以及更新电文播发至用户; 隔离模式, 不使用其他卫星数据, 卫星处理原有数据; 正常模式, 执行全部自主导航操作。

将GPS Block II R/II R-M卫星星间测距数据下传到地面主控站进行分析处理, 计算得到卫星自主导航URE时间序列(如图3所示)。从图3中可以看到: 在大多数情况下, 75天的GPS卫星自主导航URE值小于3 m; 在无地面系统支持情况下, 40天以后的URE值具有逐渐增大的趋势。

GPS II R/II R-M卫星自主导航设计指标要求是在180天时间内URE值小于6 m, 用户导航定位精度

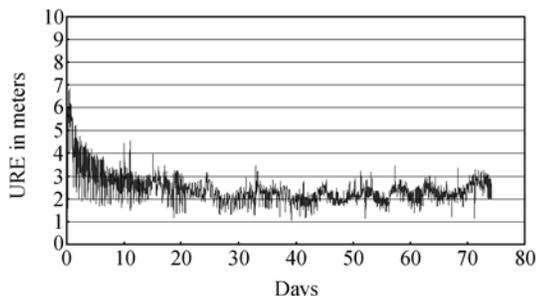


图 3 GPS 卫星自主导航 URE 时间序列

不会有明显下降. 事实上, 基于星间链路信息的导航星座自主导航, 由于缺乏外部时空基准信息, 不能消除或抑制星座整体旋转误差、地球自转的非均匀性误差和极移残差随时间累积, 致使星座难于长时间自主运行^[14]. 因而, 在 GPS II F 卫星设计中, 其自主导航指标要求更改为具有 60 天自主导航能力, URE 值小于 2 m^[12,15].

此外, 正考虑采用一种导航星座“抛锚”技术, 解决 GPS 自主导航星座整体旋转问题^[16]. 通过地面站定期向星座卫星发射测距信号和调制数据信息, 卫星自主进行信息处理, 抑制星座不可观测性误差随时间累积. 但是, 这种通过建立星地链路的解决方式, 又违背了导航卫星长时间自主运行的原则.

2.5 GPS 卫星 M 码信号 BOC 调制技术

在 GPS Block II R-M 卫星上增加的军用 M 码采用了 BOC 调制技术. BOC 技术不同于传统的 BPSK 和 QPSK 调制, 是一种通过分裂频谱信号将能量偏移远离载波频带中心的有效信号的调制方式^[17]. 利用 BOC 技术调制的导航信号优势如下.

- (1) 实现导航频段重用, 减少信号相干损耗, 抑制信号多路径效应, 提高伪码测量跟踪精度.
- (2) 增强信号抗干扰性能、以及简化信号微波处理单元和多工器设计.
- (3) 提高军用信号发射功率而不会干扰民用弱信号捕获, 有利于实现军用和民用导航信号的分离.

BOC 常用表达形式为 $BOC(m, n)$, 其中, m, n 分别表示相对于次载波频率和扩频码速率与星载时钟基准频率的比值; m 与 n 之比值称为 BOC 调制系数. 对于 GPS 卫星, 时钟基准频率为 1.023 MHz, 在图 4 中分别展示了 $BOC(5, 5)$, $BOC(8, 4)$, $BOC(9, 3)$,

$BOC(10, 2)$ 和 BPSK(10) 调制信号跟踪测距精度与载噪比之间的关系. 从图 4 中可以看到: 伪码跟踪测距精度随载噪比增大而提高; 在载噪比一定的情况下, BOC 调制信号跟踪测距精度高于 BPSK 调制信号; BOC 调制系数越大, 其测距精度就越高.

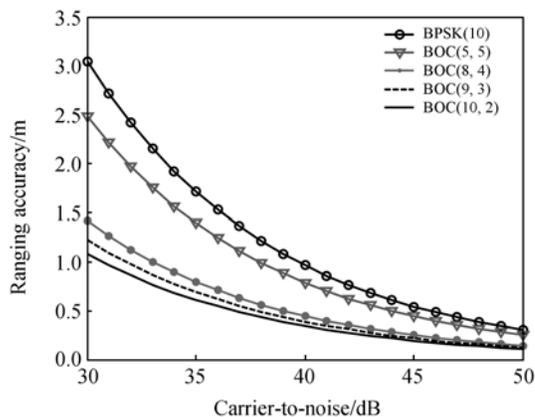


图 4 基于 BOC 信号调制方式的测距误差与载噪比的关系

尽管采用 BOC 调制导航信号具有诸多优点, 但是 BOC 调制信号的捕获与跟踪存在模糊度问题. BOC 调制信号的自相关函数属于多个峰值函数, 主峰和次峰幅度差异较小, 次峰幅度达到主峰值的 70% 以上. 若接收机错误锁定了次峰位置, 将会带来较大的伪距测量误差. 因此需要采用不同于传统调制信号的捕获与跟踪新算法, 以检测正确的自相关峰值^[18].

GPS Block II R-M 卫星在 L1 和 L2 频段上采用 $BOC(10,5)$ 调制 M 码信号. 2005 年 9 月 26 日, 成功发射第 1 颗现代化卫星 GPS Block II R-14M. 2005 年 12 月 16 日, 该卫星正式播发 M 码信号, Raytheon 公司率先对其成功捕获和跟踪, 测试验证了 M 码信号的跟踪测量精度、编码加密、抗干扰等性能, M 码信号功率较 P(Y) 码增强 10 dB 以上^[12].

2.6 GPS 系统地面控制站技术改造

GPS 地面控制站现代化改造是增强 GPS 系统性能的重要内容, 包括软件和硬件 2 个方面. GPS 精度改进议案(AII)提出了地面控制站技术改造措施, 其目标是进一步减小卫星星历及时钟误差, 提高用户导航定位精度^[19].

目前, GPS地面控制系统软件已升级到V5.2版本, 软件修改内容包括: 改进卫星轨道测定及预报算法; 改善卫星时钟管理与监测机制; 缩短导航电文数据龄期; 减小监测站位置误差; 完善分布式Kalman滤波算法、传输软件 and 数据处理流程等. 地面控制站技术改造包括: 更换地面监测和注入站天线、原子时钟、计算机及其网络设备; 在原有5个监测站的基础上, 将卡拉维尔角(cape canaveral)预发射协调站扩建为监测和注入站; 改造分布于全球的美国国家影像制图局(NIMA/NGA)的11个GPS跟踪站, 纳入地面控制系统网络, 目前已改造完成8个NGA站已投入使用, 其余3个站正在改建之中^[20]. 此外, 还要在美国西部的范登堡(Vandenberg)空军基地再建设1个主控站作为备份^[21]. 这样, 确保任意时刻GPS星座中的每一颗卫星信号能同时被3个以上监测站跟踪, 以提高卫星轨道及时钟参数预报精度, 增强卫星信号完好性监测能力, 提高控制系统的数据处理与传输能力, 减小用户测距误差, 持续改进GPS系统性能.

3 GPS III系统技术与研究进展

尽管GPS II系统应用获得了空前成功, 但是其系统结构框架源于20世纪70, 80年代的规划设计和技术基础, 存在诸多自身难以克服的缺陷, 包括导航信号精度、可用性、完好性、安全性、可监测性和抗干扰性能, 以及星座异常事件的快速反应能力等, 不能满足未来军事、民用和商业用户的更高要求. 因此, GPS III将采用全新的设计方案, 融合配置各种技术资源, 克服GPS II系统缺陷, 并具有向后技术兼容能力, 以满足未来30年系统技术扩展和用户需求^[21-23].

3.1 GPS III系统发展规划

2000年5月, 美国空军宣布启动新一代GPS系统计划——GPS III, 由美国Aerospace公司负责系统顶层与星间链路分析论证, Lockheed Martin, Spectrum Astro和Boeing公司共同负责系统设计与实现. 该计划分为4个阶段实施: 2000~2005年为系统概念研究和可行性论证阶段; 2006~2008年为关键技术攻关与仿真试验阶段; 2009~2012年为工程研制阶段; 2013年以后进入GPS III卫星发射部署和试验验证阶段.

目前已完成GPS III系统结构与需求定义、需求

分析研究、操作概念模式研究、以及通信网络与星间链路论证等, 并开发了一套性能强大的集成GPS仿真系统(I-GPSS)软件, 进行星座设计与系统性能分析^[24]. GPS III将采用3个或6个轨道平面, 轨道倾角为 55° , 轨道高度暂定20196 km, 27颗MEO与4颗或9颗GEO配置的星座设计方案, 确保由GPS II到III星座的平稳过渡.

3.2 GPS III卫星技术特征

GPS Block III卫星系列将继承和完善以前GPS卫星平台及有效载荷的成熟技术, 具备柔性的在轨可编程和冗余硬件自主管理功能, 并在L1, L2, L3, L4, L5和L6频段上调制导航及相关信号. 卫星设计寿命为15年, 重量为1796 kg, 可以常年发射到任意轨道平面, 不存在发射窗口约束问题, 其主要技术特征如下.

(1) 高速和精确指向的星间链路. GPS III卫星将继续提供更高速率的星间链路网络, 保证星间信息传输和地面控制系统的实时测控操作.

(2) 高功率的点波束发射天线. 在强干扰的敌对环境条件下, GPS III卫星启用点波束发射天线, 同时增强2个指定区域的信号功率, 保证军用接收机能够接收导航信号, 且导航定位精度不受影响. 利用点波束天线使卫星信号功率增强27 dB, 而军用接收机天线和信号处理模块可以获得11 dB增益, 因此系统具有38 dB的抗干扰能力, 满足美国军用导航战需求.

(3) 实时完好性监测功能. GPS III系统建立高速的星地和星间链路网络, 提供了故障事件的近实时报警和处理机制. 只要接收到1颗卫星信号, 就可以获得整个星座信息, 卫星自主进行故障诊断和处理, 确保用户获得安全可靠的导航信息.

(4) 星载灾害报警系统. GPS III卫星增加灾害报警系统, 提供基本搜救服务. 通过在UHF(406 MHz)频段上调制紧急事件呼救信号, 并转发至GPS III卫星. GPS III卫星通过L6(1544 MHz)频率及时播发呼救信息至地面搜救中心, 将增强现有的国际卫星灾害报警系统Cospas-sarsat卫星的搜救能力.

(5) 增加L4(1379.91 MHz)频率. GPS III卫星考虑增加L4频率, 用于修正由太阳辐射电离产生的大气层延迟误差, 进一步减小用户等效测距误差, 提高

导航定位精度.

(6) 增加 L1C 码信号. GPS III 卫星将在 L1 频段上增加 L1C 码信号, 并采用 BOC(1,1) 调制方式, 与欧洲 Galileo 系统 L1 频段信号兼容, 进一步提高民用导航系统性能.

3.3 GPS III 系统信息传输体制

GPS III 系统信息传输网络设计, 要求支持导航信息可靠传输、自主导航、完好性监测和具有可扩展能力, 降低对海外测控站的依赖^[25]. GPS III 系统信息传输体制包括星间测距与通信链路网络和星地通信链路网络 2 个方面.

(1) 星间测距与通信链路网络. 当前 GPS 星间链路采用 UHF 频段, GPS III 将考虑采用 Ka(22.55~23.55 GHz), V(59.3~64 GHz) 和激光频段建立星间链路, 以满足星间精密测距和高速信息传输需求. 星间链路网络设计包括网络拓扑结构、通信性能、测距性能、鲁棒性能、数据流的路由处理方案等. 星间信息包括上传更新卫星信息、控制指令、星间测距数据、星载传感器数据、星上更新软件、多任务通信、以及用户设备更新软件等.

(2) 星地通信链路网络. GPS III 要求构建高速的卫星跟踪、遥测与遥控(TT&C)星地通信链路网络, 其上下行数据传输速率要求高于 Block II F, 分别达到 200 Kbps 和 6 Mbps. 当前 GPS 采用的 TT&C 通信频段 S(1755~1850 MHz) 将用于地面电信通信业务, 因此 GPS III 将考虑采用 USB 测控体制, 其频段为 (2025~2110 MHz). 同时, 还考虑采用 C 频段测控体制. 2003 年国际电信联盟(ITU)规定: C(5.0~5.03 GHz) 频段为无线电导航卫星专用频段, 其中 C(5.0~5.01 GHz) 和 C(5.01~5.03 GHz) 频段分别用于上、下行测控和导航信息传输. C 频段上行信息包括控制指令、星上更新软件和用户设备更新软件等; C 频段下行信息包括遥测信息、星载传感器数据、测距数据和多任务通信等.

4 卫星导航系统技术发展趋势

综合分析国内外现代卫星导航系统发展状况和技术特点, 多个卫星导航系统兼容性与组合导航定位技术、广域增强技术、导航信号增强与调制技术、自主导航星座运行管理技术、以及导航与通信一体化

技术等将成为卫星导航系统技术的发展方向.

4.1 卫星导航系统兼容性与组合导航定位技术

未来 5 年, 以 GPS, GLONASS 和 Galileo 等为代表的卫星导航系统将完成现代化技术改造和星座组网, 系统性能大幅度提升. 卫星导航系统将从独立建设走向合作开发利用, 共享空间信息资源和国际卫星导航用户市场. 多个系统共用 L 导航频段, 存在相互干扰问题, 因此美国、俄罗斯和欧洲空间局就卫星导航系统的民用信号兼容与互操作性问题进行了多轮谈判, 达成了基本共识: 修改新型导航卫星系列的相关设计方案, 遵从开放接口协议和频段共用原则, 避免卫星导航系统相互干扰, 共同开发卫星导航空间资源. 多个卫星导航系统信号兼容, 研制多模式组合接收机, 获得更高精度、连续性、有效性、可用性和可靠性的导航定位信息.

4.2 卫星导航系统的广域增强技术

利用 GEO 卫星进行辅助测距和导航信息转发的天基卫星增强系统, 是提高导航定位精度和系统完好性监测的有效手段, 如美国的广域增强系统(WASS)和欧洲地球静止卫星导航重叠服务(EGNOS)等. 对卫星星历及钟差参数, 以及电离层延迟误差进行短时预报, 并通过卫星播发至用户, 大大缩短导航数据龄期, 使民用定位精度达到 2 m 水平, 并为导航信息安全提供了保障. 在一些高精度导航应用领域, 如机场和港口等, 采用地基局域增强系统(LAAS)和伪卫星技术, 实时定位精度可达到厘米量级, 并能近实时监测导航信息, 增强系统完好性和可用性能. 因此, 在未来 10 年卫星导航系统增强技术将继续得到发展, 满足人们日益增长的高精度、安全可靠导航应用需求.

4.3 卫星导航信号区域功率增强、加解密与 BOC 调制技术

在强干扰环境条件下, 导航卫星利用点波束天线, 增强指定区域信号功率, 专用接收机能够接收导航信号, 且不会降低导航定位精度. 同时, 对导航信息进行加密处理, 具有抗电子欺骗能力, 以满足特定用户的实际应用需求. 因此, 卫星导航系统的抗干

扰、多点波束信号增强、小型化的高增益接收天线、导航信号编码与加密、以及专用信号加解密模块等技术将是卫星导航系统技术的发展方向。

随着卫星导航事业的迅速发展, 导航信号频段已相当拥挤, 频段重用技术是解决频段资源短缺的可行方式. 利用 BOC 技术调制导航信号, 具有提高频段利用率、抑制信号多路径效应误差、减少信号相干损耗、提高信号跟踪测量精度、增强信号抗干扰性能、以及解决强弱信号压制问题等优点, 已成为导航卫星信号的有效调制方式. 因而, 导航卫星信号的 BOC 调制、捕获与跟踪技术将得到深入研究和工程验证.

4.4 导航星座自主导航与运行管理技术

导航星座自主导航与运行管理的工程意义在于: 能够有效地减少地面测控站的布设数量, 减少地面站至卫星的信息注入次数, 降低系统长期维持费用; 实时监测导航信息完好性, 增强系统生存能力; 在有地面测控系统支持的情况下, 通过星间双向测距能够提供一种独立的校验卫星星历及时钟参数的手段, 并能进一步改善系统性能和提高导航定位精度. 因此, 星座自主导航、运行管理与实时监控技术是新一代卫星导航系统研究的热门课题和发展方向.

基于星间链路信息的导航星座自主导航, 不能修正星座整体旋转误差、地球自转非均匀误差和极移参差, 致使星座难于长时间自主运行. X 射线脉冲星导航技术以脉冲星辐射的 X 射线信号作为外部信息基准, 能够高精度确定导航卫星轨道、时间和姿态参数, 不存在星座整体旋转误差累积问题, 为导航星座自主导航技术研究提供了一种新的思路和实现途径^[26].

4.5 基于星地星间链路高速宽带网络的导航与通信一体化技术

导航定位精度、完好性、可用性和连续性是设计和评价卫星导航系统的顶层性能指标, 也是新一代卫星导航系统技术改造的目标要求. 建立高速的星地、星间宽带通信网络, “接入到一颗卫星, 等效于接入整个星座”, 实现对星座的实时、连续和动态监视, 保障导航信息的实时性和有效性, 全面满足系统顶层性能指标要求.

随着地面移动通信技术的发展, 人们日益意识到时间、地点和事件等基本信息要素的重要性. 例如, 城市车载卫星导航系统应用, 已提供方便快捷的信息服务. 但是, 对于大范围, 乃至“地球村”实时信息获取, 则有赖于卫星通信网络的支持. 新一代卫星导航系统的星地、星间高速宽带通信网络, 必然促进导航与通信技术的一体化, 实现全球无缝接入和实时信息获取.

5 结束语

现代卫星导航系统已成为及时获取高精度导航信息的空间基础设施, 具有极高的军民利用价值, 倍受世界各国青睐. 当前, 美国的 GPS 系统正在进行现代化和新一代卫星导航系统规划; 俄罗斯积极恢复 GLONASS 系统星座; 欧洲的 Galileo 试验卫星进行在轨测试验证; 中国的北斗卫星导航系统建设取得标志性进展; 日本和印度将发展区域卫星导航系统.

卫星导航系统技术发展趋势体现在卫星导航系统兼容性、组合导航定位、广域增强系统、区域信号增强、信号加解密与调制、星座自主导航、以及导航与通信一体化等技术方向. 参考现代卫星导航系统技术特征和发展趋势, 积极开展关键技术研究, 促进我国卫星导航系统技术发展.

参考文献

- 1 帅平, 曲广吉, 向开恒. 现代卫星导航系统技术的研究进展. 中国空间科学技术, 2004, 24(3): 46—53
- 2 Kelley C W, Davis K F. Hybrid GPS constellations to provide high availability of Cat I precision approach, RAIM and continuity. In: Proceedings of the 13th International Technology Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Salt Lake: The Institute of Navigation, 2000. 2184—2190
- 3 Loddo S, Crews M C, Revnivikh S G. News from satellite navigation systems. In: 2007 Munich Satellite Navigation Summit. Munich Germany: International Union of Navigation, 2007
- 4 Cook G L. GLONASS: The next generation? In: Proceedings of the 15th International Technology Meeting of the Satellite Division

- of the Institute of Navigation. Portland: The Institute of Navigation, 2002. 1204—1213
- 5 Rizos C. The future of global navigation satellite systems. Technical Documents, University of New South Wales, 2007
 - 6 Onidi. GALILEO is launched. In: Proceedings of the 15th International Technology Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Portland: The Institute of Navigation, 2002. 245—248
 - 7 Hein G W, Godet J, Jean-Luc I, et al. Status of galileo frequency and signal design. International of Navigation GPS. Portland: European Space Agency, 2003
 - 8 Bolt S W. NAVSTAR atomic frequency standard constellation status update. In: Proceedings of the 13th International Technology Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Salt Lake: The Institute of Navigation, 2000. 2539—2542
 - 9 Rajan J A, Irvine J. GPS II R and II F: Payload modernization. In: Proceedings of the 18th International Technology Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. San Diego: The Institute of Navigation, 2005. 508—514
 - 10 Barker B C, Betz J W, Clark J. Overview of the GPS M code signal. In: Proceedings of the 2000 National Technical Meeting: Navigation into the New Millennium. Anaheim: The Institute of Navigation, 2000. 542—549
 - 11 Fontana R D, Cheung W, Stansell T. The modernized L2 civil signal: Leaping forward in the 21st century. GPS World, 2001, 11(10): 28—34
 - 12 Januszewski J. Modernization of satellite navigation systems and their new maritime applications. Technical Document, Lockheed Martin Inc, 2007. 77—82
 - 13 Rajan J A. Hights of GPS II R autonomous navigation. In: Proceedings of the ION 58th Annual Meeting. Albuquerque: The Institute of Navigation, 2002. 345—363
 - 14 帅平, 曲广吉, 陈忠贵. 导航星座自主导航技术研究. 中国工程科学, 2006, 8(3): 20—30
 - 15 Fisher S C, Ghassem K. GPS II F—the next generation. In: Proceedings of the IEEE. IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1999. 24—47
 - 16 Rajan J A, Brodie P, Rawicz H. Modernization GPS autonomous navigation with anchor capability. In: Proceedings of the 16th International Technology Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Portland: The Institute of Navigation, 2003. 1534—1542
 - 17 Betz J W. Design and performance of code tracking for the GPS M code signal. In: Proceedings of the 13th International Technology Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Salt Lake: The Institute of Navigation, 2000. 2140—2150
 - 18 Martín N, Leblond V. $Boc(x, y)$ signal acquisition technique and performances. In: Proceedings of the 16th International Technology Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Portland: The Institute of Navigation, 2003. 188—197
 - 19 Hay C. The GPS accuracy improvement initiative. GPS World, 2000, 10(6): 56—61
 - 20 Pullen S, Enge P. A civil user perspective on near-term and long-term GPS modernization. Technical Document, Stanford University, 2005. 1—11
 - 21 Lazar S. Satellite navigation: Modernization and GPS III, Crosslink. The Aerospace Corporation Magazine of Advance in Aerospace Technology, 2002, 22(2): 42—53
 - 22 Luba O, Boyd L, Gower A, et al. GPS III system operation concepts. In: Proceedings of the 16th International Technology Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Portland: The Institute of Navigation, 2003. 1561—1570
 - 23 Maine K P, Anderson P, Langer J. Crosslinks for the next-generation GPS. In: IEEE Aerospace Conference. IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2003. 1—8
 - 24 Johnson K, Diefes D. GPS architecture evaluations based on algorithmic service volume model. In: Proceedings of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation. Anaheim: The Institute of Navigation, 2003. 513—520
 - 25 Maine K P, Anderson P, Bayuk F. Communication architecture for GPS III. In: IEEE Aerospace Conference. IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers 2004. 1532—1539
 - 26 帅平, 陈绍龙, 吴一帆, 等. X 射线脉冲星导航技术研究进展. 空间科学学报, 2007, 27(2): 169—176