

# GPS III 首星空间信号质量监测评估

饶永南<sup>1,2</sup>, 王 萌<sup>1,2,3</sup>, 康 立<sup>1,2,3</sup>, 杨德进<sup>1,2</sup>, 卢晓春<sup>1,2,4</sup>, 王 雪<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院国家授时中心, 陕西西安 710600; 2. 中国科学院精密导航定位与定时技术重点实验室, 陕西西安 710600;  
3. 中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 101408; 4. 中国科学院大学天文学院, 北京 101408)

**摘 要:** GPS (Global Positioning System) 在新一代卫星载荷中采用了大量新技术, 首颗卫星成功发射后, 官方尚未系统公布各导航信号的调制方式、复用方法等关键信息, 因而其在轨测试阶段的空间信号质量评估具有重要的意义. 该文选择地面接收功率、功率分配、相位关系、调制特性和测距性能等评估参数, 深入分析了 GPS III 卫星 L1 频点空间信号质量, 剖析了该卫星上多种新技术的信号特征. 论文成果对其它 GNSS (Global Navigation Satellite System) 卫星载荷设计及信号体制设计等方面具有重要的参考意义.

**关键词:** GNSS 信号; GPS III 卫星; 卫星导航; 空间信号质量; 测距性能; 频谱分析

**中图分类号:** TN967.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2020)02-0407-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.02.026

## Signal-in-Space Quality Monitoring and Assessment for the First GPS III Satellite

RAO Yong-nan<sup>1,2</sup>, WANG Meng<sup>1,2,3</sup>, KANG Li<sup>1,2,3</sup>, YANG De-jin<sup>1,2</sup>, LU Xiao-chun<sup>1,2,4</sup>, WANG Xue<sup>1,2,3</sup>

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710600, China;

2. Key Laboratory of Precision Navigation and Timing Technology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710600, China;

3. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China;

4. College of Astronomy, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

**Abstract:** GPS III (Global Positioning System) satellites have adopted a large number of new technologies in payload. After the successful launch of the first satellite, the official has not yet published effective information such as the modulation method of each navigation signal and multiplexing method. Therefore, it is meaningful to evaluate the signal-in-space quality. In this paper, the evaluation parameters such as ground receiving power, signal component power distribution, phase relationship, modulation characteristics and ranging biases were selected. Signal-in-space quality of GPS III satellite L1 frequency was analyzed comprehensively, and the characteristics of various new technologies adopted by the satellite were analyzed. The results of this paper have important technical reference value for other GNSS (Global Navigation Satellite System) satellite payload design and signal system design.

**Key words:** GNSS signal; GPS III satellites; satellite navigation; signal-in-space quality; ranging performance; spectrum analysis

## 1 引言

为了继续保持 GPS (Global Positioning System) 的先进性, 美国提出了 GPS III 导航卫星的研制计划, 该类型卫星大量使用了更为先进的技术, 具有更高的抗干扰能力和更长的使用寿命, 特别是在 L1 频点增加的新型民用 L1C 信号, 其定位精度比当前的卫星提高了三

倍<sup>[1]</sup>. 美国当地时间 2018 年 12 月 23 日, 首颗 GPS III 卫星在佛罗里达卡纳维拉尔角肯尼迪航天中心成功发射. 2019 年 1 月 22 日, 中国科学院国家授时中心利用昊平观测站 (Hao Ping Observation, HRO) 的 GNSS 空间信号质量评估系统 40m 大口径天线对该卫星进行了可视范围内的连续监测.

本文利用评估系统的频谱分析仪对信号的功率谱和

地面接收功率进行了连续高精度监测,40m 天线实现高信噪比的数据采集,在信号功率配比、相位关系、调制特性和测距性能等方面详细分析了 L1 频点新信号的基本性能和信号质量.成功捕获了该卫星的民用信号( PRN 编号 4),同时完成了 L1M 信号伪码的盲解析与信号的稳定跟踪.根据即时支路跟踪结果求解出 L1 频点各信号分量的功率分配信息,依据各信号分量的载波环路输出结果确定了信号的相位关系,利用星座图分析了 L1 信号的调制特性.最后,采用 S 曲线过零点偏差(S-Curve Biases, SCB)定量分析出各信号分量的测距偏差.

## 2 GNSS 空间信号质量评估系统

中国科学院国家授时中心建设的 GNSS 空间信号质量评估系统位于中国陕西省的秦岭山脉中,能够实现 GNSS 卫星导航系统空间导航信号的连续监测,实现 GNSS 信号质量的精细性能评估,是中国第一套基于高增益大口径天线的信号质量评估系统,在北斗全球系统建设过程中发挥了重要的作用<sup>[2]</sup>.系统的核心设备是 40m 大口径天线,接收右旋圆极化信号,增益 51.2dBi@1.1GHz,采用单脉冲自跟踪方式.评估系统核心的高增益信号接收链路包括了天线、通道、终端、校准、时频参考等部分,通过铯原子钟维持高稳定的时频性能,利用大口径天线实现高增益的信号接收,高精度校准设备能够在线测定接收通道性能变化,高性能采集设备则实现了低失真的数据采集.



图1 40m天线远景图

## 3 功率监测与调制特性分析

GPS 官方未公布 L1 频点信号的具体调制方式,信号的先验信息不足,给信号质量评估带来一定难度.本节从功率谱、地面接收功率两个方面进行 GPS III 首星信号监测,通过不同时刻 L1 频点的采集数据进行信号调制特性分析,研究 L1 信号分量间的相位关系.

### 3.1 功率监测

功率谱是分析卫星导航信号结构的重要参数,采用 Welch 方法能够有效解决功率谱方差和分辨率的矛盾<sup>[3]</sup>.利用民用信号 L1C/A 对射频信号进行跟踪和解调,得到 L1 频点的同相、正交支路功率谱如图 2 所示,同

相支路中可明显观测到 L1C/A 信号 BPSK(1) 和 L1M 信号 BOC(10,5) 调制功率谱<sup>[1,7]</sup>,正交支路无法区分出信号调制类型.受数字失真的影响信号功率谱中会出现明显的尖峰谱,该现象是快速判断信号是否发生数字失真的方法<sup>[4]</sup>.显然,新发射的 GPS III 卫星载荷技术获得了提升,成功解决了数字失真的问题.本次观测,卫星俯仰角为  $10^{\circ} \sim 38^{\circ}$ ,监测时长约 5h,利用频谱仪对 GPS III 卫星各频点进行通道功率监测得到图 3 所示的结果.监测结果表明,L1 频点信号地面接收功率最大,最大值约为  $-148.25\text{dBW}$ ,L2 频点信号地面接收功率最小,最大值约为  $-152.20\text{dBW}$ ,L5 频点信号地面接收功率较为平稳,最大值约为  $-151.63\text{dBW}$ .受地球曲率和卫星轨道的影响观测站的最大观测仰角不到  $40^{\circ}$ ,地面接收功率监测结果小于该 GPS III 卫星的最大地面接收功率.

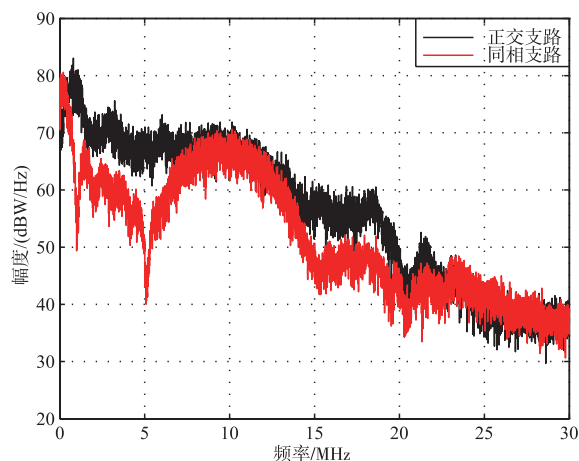


图2 I/Q支路功率谱密度

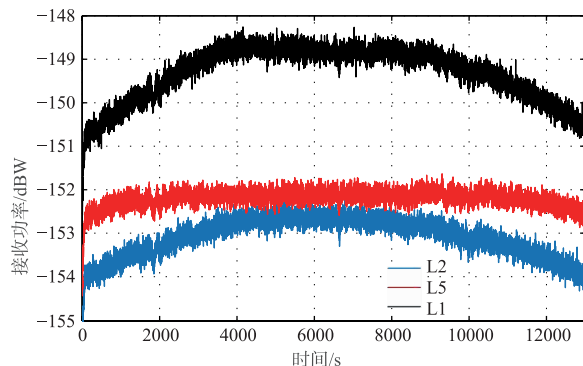


图3 地面接收功率

### 3.2 调制特性

利用 L1C/A<sup>[5]</sup>、L1C 本地码<sup>[6]</sup>对采集数据进行捕获跟踪后剥离载波获得基带信号,根据基带信号幅度统计数据绘制星座图.如图 4 所示,黑色与红色四方体的顶点为不同时刻的 GPS III 卫星 L1 频点星座图.L1 频点星座图包含 8 个顶点,合路信号未分布在单位圆上,为非恒包络调制.卫星载荷中一般通过信号恒包络调

制技术保障高功率放大器的信号传输特性,非恒包络信号通过高功率放大器的传输存在幅度和相位的失真,但是恒包络调制复用效率较低不利于星上资源充分利用.GPS III 卫星有可能采用了新型技术,削弱了高功率放大器给非恒包络调制带来的幅度失真和相位失真影响.

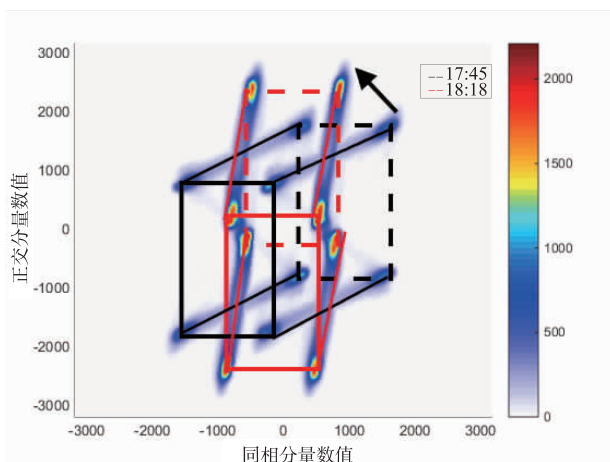


图4 L1不同时刻基带信号星座图

利用本地码捕获跟踪分别获得 L1C/A、L1Cd、L1Cp 信号参数,在同一时刻提取信号分量间相位信息,假定 L1C/A 信号载波相位为  $0^\circ$ ,此时 L1Cd、L1Cp 载波相位约为  $90^\circ$ ,表 1 给出了不同时段 L1 频点民用信号各分量间的相位关系,其中 L1C 与 L1C/A 正交,L1Cd 和 L1Cp 同相.

表 1 不同时刻 L1 频点各信号分量相位关系统计表(单位:  $^\circ$ )

信号分量	L1Cd	L1Cp	L1C/A
时段 1	90.67	90.82	0.00
时段 2	88.73	88.42	0.00
时段 3	88.67	88.98	0.00
均值	89.36	89.41	0.00

## 4 信号质量分析

GPS III 首星尚未完成在轨测试,公开文献中未见信号质量评估方面的研究成果,本文包含军用及民用信号的信号质量参数分析尚属首次.本节从信号的功率分配、相位关系、调制性能、测距偏差 4 个方面对 GPS III 卫星进行了精细的信号质量评估.

### 4.1 授权信号特性分析

依据 3.1 节分析可知,该数据中 GPS III L1 频点存在授权信号 L1M,调制方式为 BOC(10,5) [7].根据图 2 中 I/Q 支路功率谱密度中同相支路功率谱特征,解析 L1M 授权信号的伪码序列 [8].同相支路  $s_1(n)$  表达式为:

$$s_1(n) = \beta_{CA} d_{CA} c_{CA}(n) + \beta_M d_M c_M(n) \quad (1)$$

其中  $\beta_{CA}$  和  $\beta_M$  分别为 L1C/A 和 L1M 信号的幅度因子,  $d_{CA}$  为 L1C/A 信号电文符号,  $d_M$  为 L1M 信号伪码符号和电文的乘积.利用本地生成的 BOC(10,5) 信号副载波  $c_1(n)$  与  $s_1(n)$  点乘,得到:

$$c_1(n) \cdot s_1(n) = \sum_{n=1}^N (\beta_{CA} d_{CA} c_1(n) c_{CA}(n)) + \sum_{n=1}^N (\beta_M d_M c_1(n) c_M(n)) \quad (2)$$

L1C/A 信号伪码码片宽度内包含了 4 个 BOC(10,5) 信号副载波,因而  $c_1(n)$  与  $c_{CA}(n)$  信号的乘积之和为 0,式(2)可改写为:

$$c_1(n) \cdot s_1(n) = \sum_{n=1}^N (\beta_M d_M c_1(n) c_M(n)) \quad (3)$$

通过式(3)可判断出 L1M 信号的伪码符号,图 5 为 L1M 伪码解析信号和同相支路信号的互相关曲线,图 6 为 L1M 伪码解析信号和正交支路信号的互相关曲线.可见 L1M 信号在同相、正交支路均存在能量分布,但功率大小存在变化,表 2 给出了不同时段 L1M 信号相关功率变化情况.

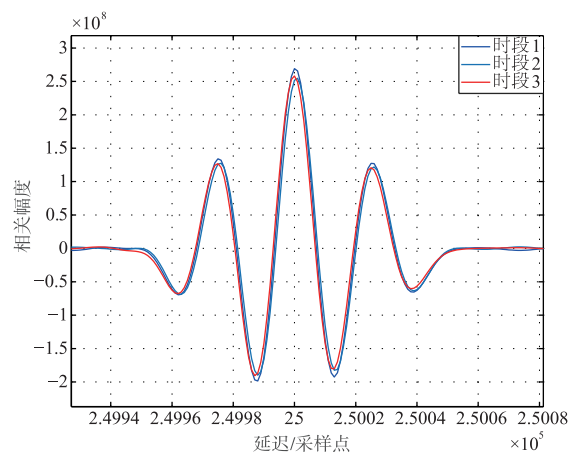


图5 L1M信号和同相支路互相关曲线

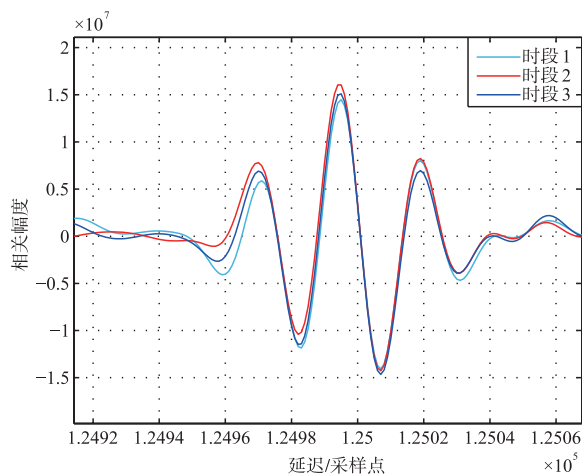


图6 L1M信号和正交支路互相关曲线

表 2 不同时刻 L1M 信号分量相关功率统计表

信号支路	同相	正交
时段 1	2.59e8	1.54e7
时段 2	2.58e8	1.56e7
时段 3	2.54e8	1.48e7

## 4.2 功率分配和相位关系

利用 L1M 伪码解析数据采用跳峰法对采集信号进行跟踪,载波环路和码环路均跟踪稳定,图 7 为跟踪结果.

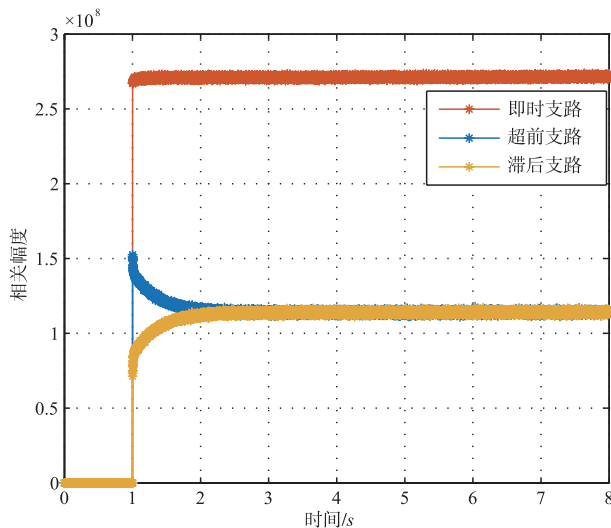


图 7 L1M信号跟踪结果

基于图 7 L1M 信号跟踪结果,结合其他民用信号分析结果,求解信号分量间功率比关系<sup>[9]</sup>.表 3 为 L1 频点各信号分量相关功率统计结果,其中 L1M > L1Cp > L1C/A > L1Cd.以 L1Cd 信号功率为基准,信号分量间功率比为 3.40:2.77:2.37:1.00.

表 3 不同时刻 L1 频点各信号分量功率配比统计表

信号分量	L1Cd	L1Cp	L1C/A	L1M
时刻 1	1.00	2.82	2.44	3.43
时刻 2	1.00	2.74	2.39	3.38
时刻 3	1.00	2.75	2.38	3.40
均值	1.00	2.77	2.37	3.40

## 4.3 测距性能分析

信号预处理过程中滤波器带宽设置为 40.92MHz,为了充分削弱信号间互干扰对测距偏差的影响,对 SCB 曲线进行 100 次累加平均,得到测距偏差变化曲线, $\delta$  范围为  $[0, \delta_{\max}]$ :

$$\delta_{\max} = \begin{cases} 1.5/(4m/n - 1), & \text{BOC}(m, n) \\ 1.5, & \text{BPSK}(n) \end{cases} \quad (4)$$

统计 SCB 最大值,如表 4 所示,L1Cp 分量最大,为 1.10ns,其他分量小于 0.5ns.L1Cp 为导频信号,一般不

用于测距,可见 L1 频点受信号特性影响产生的测距偏差最大不超过 0.15m.

表 4 L1 信号 SCB 最大值统计表

信号分量	L1C/A	L1Cd	L1Cp	L1M
相关间隔区间(chip)	[0 1.5]	[0 0.5]	[0 0.06]	[0 0.21]
SCB 最大值(ns)	0.37	0.23	1.10	0.06

## 5 总结与分析

本文利用国家授时中心 GNSS 空间信号质量评估系统对 GPS III 首颗卫星进行了监测分析,利用 2019 年 1 月份的采集数据对 L1 频点信号进行了详细的分析评估:

(1)GPS III 卫星采用新的基带信号生成技术,L1 信号中无 GPSII 存在的数字失真现象.

(2)GPS III L1 信号中解析出 L1C/A、L1Cd、L1Cp 和 L1M 共 4 路信号,其中 L1Cd 和 L1Cp 信号同相,L1C/A 与 L1Cd、L1Cp 正交.GPS III 卫星互操作信号的相位设计与 Galileo 一致,而 BDS-3 中 B1Cd 与 B1Cp 正交<sup>[10]</sup>.

(3)GPS III L1 频点信号分量相关功率 L1M > L1Cp > L1C/A > L1Cd,L1M 功率最大,充分保障了 GPS 的军事应用.

(4)Galileo E1 频点调制了 3 路有效信号,BDS-3 B1 频点调制了 5 路有效信号.GPS III 卫星 L1 频点调制了 5 路信号,包括 L1C/A<sup>[5]</sup>、L1Cd<sup>[6]</sup>、L1Cp<sup>[6]</sup>、L1M<sup>[7]</sup> 和 L1P(Y)<sup>[11]</sup>.

(5)本次数据分析未观测到 L1P(Y)信号,该数据只包含了 L1C/A、L1Cd、L1Cp、L1M 分量.观测时段内 GPS III 首星处于在轨测试阶段,信号在持续调整中,该信号状态应属于 GPS III L1 频点的试验验证体制.

(6)GPS III L1 信号中 L1Cp 与 L1Cd 的功率配比为 2.77:1 与 BDS-3 互操作信号相当,B1Cp: B1Cd 为 3:1<sup>[10]</sup>,与 Galileo 互操作信号不同,E1B: E1C 为 1:1<sup>[11]</sup>.

(7)L1M 信号与同相、正交支路均存在相关性,且相关功率不同时段存在变化,推测该 L1M 信号独立于同相及正交支路,GPSIII L1 频点采用的是新型调制方式.

(8)GPS III L1 频点受信号特性影响产生的测距偏差最大不超过 0.15 m,具有良好的测距性能.

综上,数字调制技术已广泛应用于现代化的 GNSS 系统中逐步取代了传统的模拟调制技术,GPS III 卫星信号设计优先考虑了军事应用,在非恒包络与高功率放大、互干扰抑制方面已经走在了 GNSS 技术发展的前沿.

## 参考文献

- [1] IS-GPS-800 (2018) Interface specification IS-GPS-800: Global Positioning Systems Directorate Systems Engineering & Integration[S]. <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-800.pdf>, Accessed 25 Apr, 2018.
- [2] He C Y, GUO J, LU X C, et al. A new evil waveforms evaluating method for new BDS navigation signals [J]. GPS Solutions, 2018, 22 (2): 37. DOI: 10. 1007/s10291-018-0698-x.
- [3] LU X C and Zhou H W. GNSS signal-in-space quality analysis and research [J]. China Science: Physics, Mechanics and Astronomy, 2010, 40(5): 528-533. DOI: 10. 1360/2010-40-5-528.
- [4] HEGARTY C J and DIERENDONCK A J V. Recommendations on digital distortion requirements for the civil GPS signals [A]. Proceeding of 2008 IEEE/ION: Position, Location and Navigation Symposium [C]. Monterey, CA, USA: ACM, 2008. 1090 – 1099. DOI: 10. 1109/PLANS. 2008. 4570116.
- [5] IS-GPS-800 (2018) Interface specification IS-GPS-800E: Global Positioning Systems Directorate Systems Engineering & Integration[S]. <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-800E.pdf>, Accessed 25 Apr, 2018.
- [6] IS-GPS-800E (2018) Interface specification IS-GPS-800E: Global Positioning Systems Directorate Systems Engineering & Integration[S]. <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-800E.pdf>, Accessed 25 Apr, 2018.
- [7] European GNSS (Galileo) Open Service: Signal in Space Interface Control Document; Navigation solution powered by Europe [S]. 2015.
- [8] 康立, 卢晓春, 王雪, 贺成艳, 饶永南, 杨德进. GPS L1 频点授权信号质量评估[J]. 电子与信息学报, 2018, 40 (4): 905-911. DOI: 10. 11999/JEIT170440.
- [9] RAPISARDAM, HANNES D, BURGER T, et al. The off-line SIS quality analysis (OASIS) tool: Design, development and validation [A]. Proceedings of the 22nd international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation (ION GNSS 2009) [C]. Savannah, GA, USA: ACM, 2009. 2899 – 2910.
- [10] 中国卫星导航系统管理办公室: 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件公开服务信号 B1C (1.0 版) [S]. 北京, 2017. 12.
- [11] European GNSS (Galileo) Open Service: Signal In Space Interface Control Document [S] Issue 1.2, November 2015.

## 作者简介



饶永南 男, 1982 年 12 月出生, 出生于福建龙岩, 现为中国科学院国家授时中心导航与通信研究室副研究员. 主要研究方向为导航信号测试及性能评估研究工作.

E-mail: ryn@ntsc.ac.cn



王萌 女, 1993 年 6 月出生, 出生于陕西西安, 现为中国科学院国家授时中心导航与通信研究室在读博士生. 主要研究方向为 GNSS 信号处理及信号质量评估工作.

E-mail: wangmeng@ntsc.ac.cn



康立 男, 1990 年 5 月出生, 出生于湖南省汨罗市. 中国科学院国家授时中心导航与通信研究室博士. 从事 GNSS 新型导航信号质量评估方法研究工作.

E-mail: 1039086352@qq.com