

导航信号有害波形检测技术研究

王斌* 庞岩 刘会杰
(上海微小卫星工程中心 上海 200050)

摘要: 基于多相关器的导航卫星发射信号有害波形检测是全球导航卫星系统完好性检测的重要内容。该文定义并分析了有害波形二阶模型对接收机码环的影响,研究了基于 LAAS/WAAS 的多相关器检测系统,从简化完好性通道,缩短检测时间的角度出发,提出了星上自主导航有害波形检测方案,仿真分析了检测能力与检测效率,在星上接收信号的信噪比比地基高 20 dB 时,相关峰检测标准差减小了 0.3 个码片以上。结果表明,该文技术可有效提高导航卫星系统的完好性。

关键词: 卫星导航;完好性;有害波形;星上自主完好性检测;多相关器

中图分类号: TN967.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)07-1713-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01163

Research of Detection Technique of Navigation Signal's Evil Waveform

Wang Bin Pang Yan Liu Hui-jie

(Shanghai Engineering Center for Microsatellites, Shanghai 200050, China)

Abstract: The detection of navigation signal's evil waveform based on multicorrelator is an important issue of GNSS integrity monitoring. This paper defines the effect of 2nd-order step threat model of evil waveform on the code tracking loop, analyzes the multicorrelator technique of detection system based on Local/Wide Area Augmentation System (LAAS/WAAS). From the perspective of simplifying ground integrity channel and shortening the time consumption, this paper puts forward a new technique based on satellite autonomous integrity monitoring. The simulation of the detection capability and efficiency result in a 0.3 Tc decrease of the detection deviation of the technique based on SAIM with a 20 dB increasing of SNR over the technique based on LAAS, which makes a great significance of integrity monitoring.

Key words: Satellite navigation; Integrity; Evil waveform; Satellite Autonomous Integrity Monitoring (SAIM); Multicorrelator

1 引言

完好性是卫星导航系统重要的性能指标之一,指系统出现故障时,在一定时限内及时向用户告警的能力,一般以告警门限值、告警时间和危险误导信息(HMI)概率来表示^[1],可分为测量域完好性、定位求解域完好性两类,其中前者与导航信号有害波形密切相关。

“有害波形(Evil WaveForms, EWFs)”指导航系统中卫星(Space Vehicles, SV)的导航信号产生器异常而导致的信号波形异常,会使接收机跟踪模块的相关峰及跟踪曲线的形状发生畸变,从而影响导航系统的完好性。对于系统用户而言,未被检测的有害波形会带来定位精度的下降。1993年, GPS 系统 SV19 星的有害波形使得系统定位精度由正常时的 50 cm 下降到 2-8 m^[2], Leeds, Stanford 等大学也针对 SV19 星的异常情况进行了相关研究。基于该

有害波形影响事件及相关研究结果,国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)采用了二阶异常信号模型,并利用多相关器检测方案作为局域/广域增强系统(Local/Wide Area Augmentation System, LAAS/WAAS)中的检测手段之一,以提高 GPS 系统的完好性,保证在民航等特殊领域中的正常应用。

现代卫星导航系统中,完好性的设计及相关技术研究至关重要。本文针对有害波形的影响,在第 2 节定义并重点分析了有害波形二阶模型对 PN 码相关函数的影响;在第 3 节研究了基于多相关器检测方法,第 4 节结合星上自主完好性检测(Satellite Autonomous Integrity Monitoring, SAIM)系统结构,提出一种基于多相关器的有害波形自主检测技术,仿真分析了其性能。

2 有害波形二阶模型及其相关函数

在卫星导航系统中,有害波形检测技术的核心是检测 PN 码跟踪环路中的相关峰值畸变量。文献

[3]介绍了几种具有代表性的有害波形模型，并分析了其对 GPSSV19 星异常波形的拟合程度。ICAO 采用的二阶模型用 3 个参数来表征有害信号： Δ 表示 PN 码下降沿的延迟或提前量，单位为码片宽度； f_d 表示 PN 码在一个码片时间内的波动频率，单位为 MHz； σ 为阻尼因子，表示波动的幅度衰减，如图 1 所示^[4]。

图 1(a)和图 1(b)虚线表示 SV10 卫星正常的 PN 码，实线表示有害波形。图 1(a)表示 PN 码下降沿提前量 Δ ， $\Delta=0.3$ 码片。图 1(b)表示 PN 码的波动频率 $f_d=3$ MHz，幅度 $\sigma=2$ 。ICAO 的二阶模型分为 3 类，模型 A(Treat Model A, TMA)仅包含数字器件(码发生器)异常，即图 1(a)情形；模型 B(Treat Model B, TMB)仅包含模拟器件(上变频、射频放大器)异常，即图 1(b)情形，用公式描述为

$$e(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1 - \exp(-\sigma t) \left[\cos \omega_d t + \frac{\sigma}{\omega_d} \sin \omega_d t \right], & t \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\omega_d = 2\pi f_d \quad (2)$$

模型 C(Treat Model C, TMC)为 TMA 与 TMB 的混合。

发射端产生的信号畸变将对接收机的捕获与跟踪产生影响，过大的畸变会直接影响到信号捕获，

导致无法接收。ICAO 对模型的 3 个参数进行了取值区间的限制^[4]，使信号可以捕获与跟踪，但是跟踪的精度受到影响。

通过 matlab 仿真，采用 20 倍 PN 码片速率上采样后进行相关运算，可以得到，TMA, TMB, TMC 对应的相关函数 $R_A(\tau, \Delta)$, $R_B(\tau, f_d, \sigma)$, $R_C(\tau, f_d, \sigma, \Delta)$ 如图 2(a), 图 2(b), 图 2(c)实线所示，虚线为正常波形 $R_{nom}(\tau)$ 的相关函数。通常，GPS 用户接收机采用相关间隔为 $1d$ (d 为 PN 码码片宽度)的迟早门相关器进行相关峰位置测算，用此方法对图 2 进行测算可以得到 3 类误差模型对普通 GPS 用户的影响。图 2(a)中， $\Delta=0.3$ 时，相关峰出现平顶失真，偏移约 0.3 个码片，相当于 90 m 的距离误差。图 2(b)取 $f_d=3$ MHz， $\sigma=2$ 时，波形的扭曲失真使相关峰偏移约 0.1 个码片，造成 30 m 的距离误差。而图 2(c)同时包含了这两种失真，同样会使得 1 个码片相关间隔的迟早门锁定于 $-0.2 d$ 处，误差达到 60 m，这将对测量域完好性产生严重影响。

3 基于多相关器的有害波形检测方法

Stanford 大学提出的完好性监测平台(Integrity Monitor Testbed, IMT)中包含了信号质量监测模块(Signal Quality Monitoring)，它的多相关器可用于完成对有害波形的检测^[5,6]。由第 2 节的分析可知，

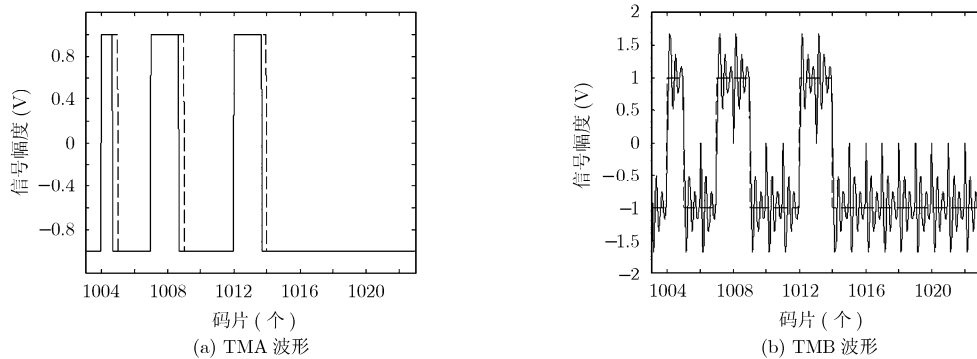


图 1 有害波形示例

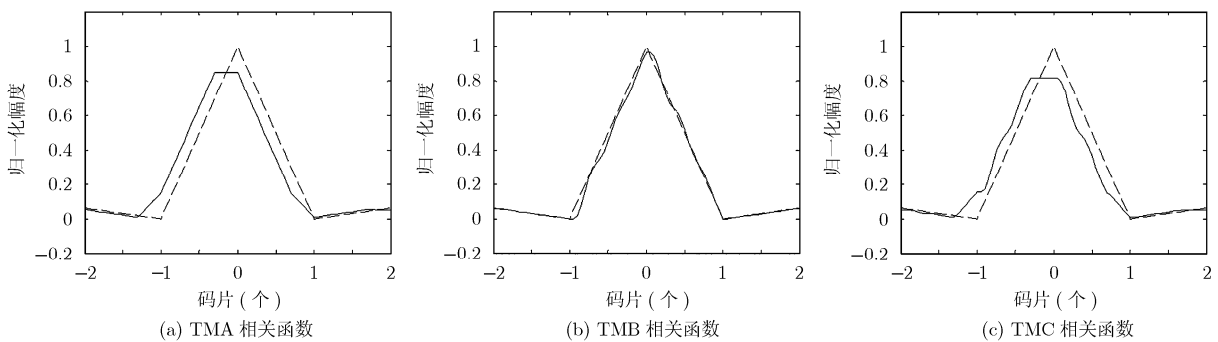


图 2 有害波形二阶模型相关函数的畸变

有害波形产生时，相关峰的幅度与位置均会有所偏差，当偏差超过一定门限时，报告检测到有害波形，而门限将由检测系统本身的噪声，报警时间与漏检、虚检概率决定。

美国 Stanford 大学 GPS 实验室提出的 SQM2b 算法使用多相关器的方法，对信号相关峰进行多点采样，并经分析处理，发现有害波形。

假设

$$\tau_{\text{nom}}(d) = \arg \{R_{\text{nom}}(\tau + d/2) - R_{\text{nom}}(\tau - d/2) = 0\} \quad (3)$$

$\tau(d)$ 表示在 d 的相关间隔下迟早门相关器锁定的相关峰位置，则

$$\Delta\tau_{\text{nom}}(d_1, d_2) = \tau_{\text{nom}}(d_1) - \tau_{\text{nom}}(d_2) \quad (4)$$

表示在无有害波形时，不同的两个相关间隔得到的相关峰位置差，如图 3。类似地， $\Delta\tau_a(d_1, d_2) = \tau_a(d_1) - \tau_a(d_2)$ 表示存在有害波形时，两个不同的相关间隔得到的相关峰位置差，则 $\Delta\tau_a(d_1, d_2) - \Delta\tau_{\text{nom}}(d_1, d_2)$ 就对应于有害波形所带来的附加峰值位置畸变量。将该畸变量与检测系统噪声相比较，就可判断是否存在有害波形。检测系统噪声即 MDE^[7,8]

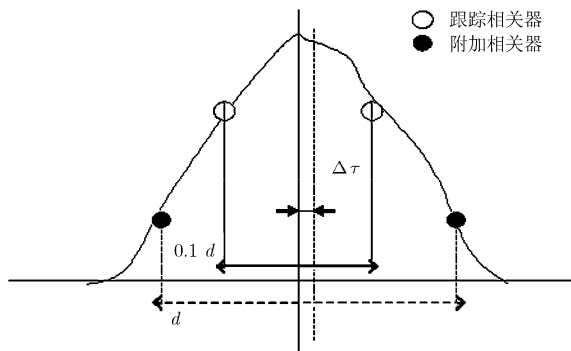


图 3 相关峰采样图

$$\text{MDE} = (K_{\text{ffd}} + K_{\text{md}}) \times \sigma_{\text{test}} \quad (5)$$

则有有害波形检测公式为

$$\beta_{PR} = \max \begin{bmatrix} \frac{\Delta\tau_a(d_1, d_2) - \Delta\tau_{\text{nom}}(d_1, d_2)}{\text{MDE}(d_1, d_2)} \\ \frac{\Delta\tau_a(d_1, d_3) - \Delta\tau_{\text{nom}}(d_1, d_3)}{\text{MDE}(d_1, d_3)} \\ \dots \\ \frac{\Delta\tau_a(d_1, d_C) - \Delta\tau_{\text{nom}}(d_1, d_C)}{\text{MDE}(d_1, d_C)} \end{bmatrix} \geq 1 \quad (6)$$

其中 C 为相关检测器个数。多对相关器在不同的相关间隔下，分别比较有害波形所带来的附加相关峰位置畸变量与检测器 MDE 之间的大小，如果某一对相关器得到了大于 MDE 的检测结果，则判定出现了有害波形。在此，MDE 决定了检测灵敏度。

实际应用中，根据不同的波形模型 TMA、TMB 以及 TMC，利用式(6)选取不同的检测量代替公式中的 $\Delta\tau_{\text{nom}}(d_1, d_2)$ 和 $\Delta\tau_a(d_1, d_2)$ ，对 TMA 引起的相关峰平顶失真，可以采用幅度比率检测(ratio test)；对 TMB 引起的相关峰扭曲失真，可以采用差值检测(Δ test)；TMC 既包含平顶失真，相关峰也产生了扭曲，可同时采用幅度比率检测与差值检测^[6]。

多相关器检测方案可以对有害波形进行有效的检测，但是也有其局限性。由式(6)， $\Delta\tau_a(d_1, d_2) - \Delta\tau_{\text{nom}}(d_1, d_2)$ 表示有害波形带来的附加峰值位置畸变量。而按照 GPS 系统设计指标 L_1 频段 C/A 码到达地面的强度约为 -150 dBw，若在星上进行相关检测，可以提升检测信噪比，提高检测精度^[9]。另一方面，地基检测需要建立完好性通道(Ground Integrity Channel, GIC)，并通过地面检测站对卫星的覆盖弧段完成检测。在极端情况下，MEO 卫星波形异常产生到地面检测的告警时间达到数小时，严重影响系统完好性。

4 基于 SAIM 的有害波形检测方法

4.1 SAIM 有害波形检测技术分析

现代卫星导航系统可采取星上自主完好性监测，在卫星发射机天线附近安装监测接收机，检测发射信号是否存在畸变，如图 4。

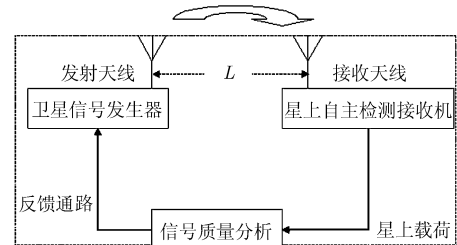


图 4 SAIM 结构示意图

星上自主检测接收机通过天线接收下行导航信号，信号质量分析模块判断信号质量，并将结果反馈至卫星信号发生器。与地基检测系统相比，星上接收信号无多径效应，大气层、电离层衰减等，通过检测系统参数设置，一方面可提供优良的检测信噪比条件，如 SNR 提升 20 dB；另一方面，可简化检测接收机设计，提高可靠性。在告警速度上，星上检测可达到实时检测，不受地面检测站覆盖面的限制，能有效保证完好性告警时限。

接收机本地 PN 码可采用发射机 PN 码，具体可采用如下两种方法：

(1) 直接采用发射机 PN 码，可以快速、高精度同步，但无法检测码发生器异常；

(2)采用不同的码发生器，但与发射机共用时钟。这样，跟踪精度会有所下降，但可以检测发射机码发生器的异常。

上述两种方案都无法检测系统时钟异常，这是星上完好性检测系统的缺陷，需要通过地面检测系统来弥补。

收发双方的天线距离预先标定为 L ， $L = \tau_{pre} \cdot c / 1.023 \text{ MHz}$ (c 为电磁波真空速度)。则接收机无需进行信号捕获，可直接在 τ_{pre} 附近进行跟踪检测。于是，式(6)可简化为

$$\beta_{PR} = \max \begin{bmatrix} \frac{\Delta\tau_a(d_1) - \tau_{pre}}{\text{MDE}(d_1)} \\ \frac{\Delta\tau_a(d_2) - \tau_{pre}}{\text{MDE}(d_2)} \\ \dots \\ \frac{\Delta\tau_a(d_C) - \tau_{pre}}{\text{MDE}(d_C)} \end{bmatrix} \geq 1 \quad (7)$$

式(7)中 τ_{pre} 为预先标定，精度要高于式(6)的随机检测量 $\Delta\tau_{nom}(d_1, d_2)$ 。根据 τ_{pre} 采用较小的相关间隔，可以以更小的 MDE 来提高检测灵敏度^[6]。相比于式(6)，式(7)码环的跟踪锁定次数由 $2C$ 次下降到了 C 次，而且无须快速捕获的过程，报警时间显著下降。

由星上的工作条件所限，检测器个数 C 会受到限制，星上检测系统需要在 τ_{pre} 距离下选择合适的相关间隔以减小漏检概率的恶化程度。

4.2 仿真分析

本文采用 matlab m 源文件对式(6)，式(7)的检

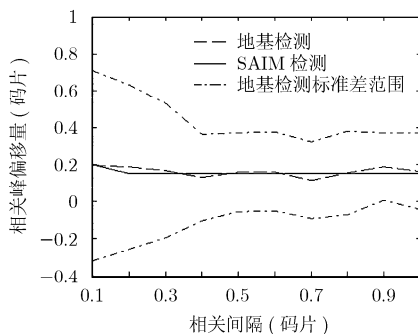
测方案进行了仿真验证，有害波形采用 1.023 MHz C/A 码的 TMC 模型， $\Delta=0.1$ 码片， $f_d=3 \text{ MHz}$ ， $\sigma=0.8$ 。假设信号通过高斯白噪声信道，地基检测站收到信号经过放大后 SNR=-20 dB, SAIM 信号经过衰减后 SNR=10 dB。本文采用文献[10]中介绍的迟早门跟踪框架，仿真了在经过 100 组高斯白噪声信道后，有害波形在星上与地基的不同 SNR 条件下，各相关间隔得到的相关峰位置畸变量，取其平均值与标准差，如表 1 所示。

表 1 中，SAIM 检测得到的有害波形相关峰畸变量均值为 $0.2 d-0.15 d$ ，由于星上信噪比条件较好，检测标准差为 0。而地基检测时，信噪比损失造成相关峰畸变量在真实值之间上下浮动，图 5(a) 两条点划线之间的范围即地基检测得到的相关峰畸变量的取值区间。与实线所表示的星上检测结果相比较，式(6)根据信道的不同，会得到偏大或偏小的检测量。偏大的检测量会带来过高的虚警概率，偏小的检测量则会造成漏检概率的升高，它们都会影响到系统的完好性。

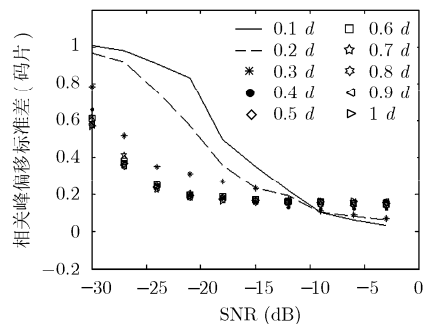
图 5(b)仿真了地基检测时，不同相关间隔的迟早门相关器所得到的相关峰偏移标准差与 SNR 之间的关系，可见 SNR 从 -3 dB 到 -30 dB，不同相关间隔下相关峰畸变标准差放大了 3-30 倍，直至 1 个码片，测距模糊度从 10 m 上升到 300 m，跟踪效果大幅下降。这说明良好的信噪比条件对检测能力的提升有较大帮助，星上检测在低信噪比损失的情况下，能发挥更好的检测性能。

表 1 地基与 SAIM 检测方案比较

| 相关间隔 d | | 0.1 d | 0.2 d | 0.3 d | 0.4 d | 0.5 d | 0.6 d | 0.7 d | 0.8 d | 0.9 d | d |
|----------|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| 均值(码片) | 地基 | 0.1965 | 0.1880 | 0.1670 | 0.1295 | 0.1575 | 0.1595 | 0.1150 | 0.1535 | 0.1865 | 0.1635 |
| | SAIM | 0.2000 | 0.1500 | 0.1500 | 0.1500 | 0.1500 | 0.1500 | 0.1500 | 0.1500 | 0.1500 | 0.1500 |
| 标准差(码片) | 地基 | 0.5150 | 0.4469 | 0.3650 | 0.2351 | 0.2140 | 0.2156 | 0.2094 | 0.2262 | 0.1839 | 0.2081 |
| | SAIM | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |



(a) SAIM 与地基检测误差比较



(b) 地基检测相关峰偏移标准差与 SNR 关系

图 5 地基与 SAIM 检测相关峰畸变量比较

通过上述仿真可以说明, 采用星上自主检测有害波形具有检测精度高, 检测速度快等优点, 并且不需要对完好性接收机结构做大的修改, 在新一代导航完好性系统中是值得考虑的。

5 结束语

本文首先阐述了导航系统完好性监测的目标和意义, 分析了其中有害波形的检测问题, 根据模型仿真了其对相关函数的影响。从多相关器检测方法的定义出发, 本文提出了其在星上自主完好性检测中的应用方案, 分析了其性能的优劣, 为进一步深入研究指明了方向。

如第 3 节所述, 实际检测中由于无法得到标准的相关函数, 需要选用合适的检测量来代替式(6)中的 $\Delta\tau_{\text{nom}}(d_1, d_2)$ 和 $\Delta\tau_a(d_1, d_2)$, 如差值检测与幅度比率检测。星上自主检测方案也会受到同样的影响, 进一步的工作可以从差值与幅度比率检测量上深入研究, 以得到式(7)的实际可操作检测方案。

另一方面, 由于星上负载限制, 所能提供的相关器数量无法与地基相比拟, 进一步的研究还需分析各种相关间隔对 3 类有害波形的检测能力, 以有限的负载达到理想的完好性要求。

参 考 文 献

- [1] 杜志远, 刘会杰, 李勇. 卫星导航系统完好性分析[C]. 卫星导航系统安全与导航战专题研讨会, 长沙, 2009: 121-126.
Du Zhi-yuan, Liu Hui-jie, and Li Yong. Analysis of the integrity of satellite navigation system[C]. Seminar on the security and war of satellite navigation system, Changsha, 2009: 121-126.
 - [2] Edgar C, Czopek F, and Barker B. A co-operative anomaly resolution on PRN-19[C]. Proceedings of the 2000 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Salt Lake City, 2000: 2269-2271.
 - [3] Enge P K, Phelts R E, and Mitelman A M. Detecting anomalous signals from GPS Satellites[C]. ICAO,GNSS/P, Toulouse, 1999: 341-349.
 - [4] Eric R, Phelts R E, and Enge P K. A simple method of signal quality monitoring for WAAS LNAV/VNAV[C]. ION GPS 2002, Portland, 2002: 800-801.
 - [5] Eric R, Phelts R E, Dennis M, Akos D M, and Enge P. Robust signal quality monitoring and detection of evil waveforms[C]. ION GPS 2000, Salt Lake City, 2000: 871-881.
 - [6] Akos D M, Phelts R E, Pullen S, and Enge P. Signal quality monitoring: test results[C]. Proceedings of the 2000 National Technical Meeting, Institute of Navigation, San Diego, CA, 2000: 536-541.
 - [7] Shively C A. Derivation of acceptable error limits for satellite signal faults in LAAS[C]. Proceedings of the 1999 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, ION GPS-99, Nashville, TN, 1999, Vol.1: 761-770.
 - [8] Shively C A and Braff R. An overbound concept for pseudorange error from the LAAS ground facility[C]. Proceedings of the IAIN World Congress in Association with the U.S.ION Annual Meeting, San Diego, CA, USA, 2000: 26-28.
 - [9] 深圳市华颖锐兴科技有限公司. GPS 接收机的灵敏度分析. <http://wenku.baidu.com/view/74ce4b7302768e9951e738c6.html>, 2009.
Hua ying rui xing science and technology CO.Ltd. The Analysis on Sensitivity of GPS Receiver. <http://wenku.baidu.com/view/74ce4b7302768e9951e738c6.html>, 2009.
 - [10] 田宇, 李国通, 杨根庆. 抗干扰插值迟早门扩频跟踪框架[J]. 中国科学院研究生院学报, 2009, 26(4): 513-516.
Tian Yu, Li Guo-tong, and Yang Gen-qing. Interpolation-based anti-jamming E-D-gate DSSS code tracking architecture[J]. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2000, 26(4): 513-516.
- 王 斌: 男, 1986 年生, 硕士生, 从事卫星导航完好性系统的研究。
庞 岩: 男, 1987 年生, 博士生, 从事卫星导航发生星座星间链路的设计。
刘会杰: 男, 1972 年生, 研究员, 从事卫星有效载荷设计。