

# 多模态信号同步策略研究与仿真设计

潘成胜<sup>1,2</sup> 刘芳<sup>2,3</sup> 冯永新<sup>3</sup>

(南京理工大学控制科学与工程系 南京 210094)<sup>1</sup>

(沈阳理工大学 沈阳 110168)<sup>2</sup> (大连大学 大连 116622)<sup>3</sup>

**摘要** 考虑新扩频方式、新调制方式以及频率共享等特性要求,单用途的同步接收已不能满足需要。以 GPS 系统及 Galileo 系统中的 L1, L5 频段信号为例,在对其信号机理、特性进行研究的基础上,重点通过相应的控制策略及数据处理方法,对通道、积累时间、处理方式等进行合理选取,从而达到对多模态信号同步接收的目的。进一步的仿真实验表明了此方法的可行性、合理性及有效性。

**关键词** 多模态信号, L1, L5, 同步, 仿真

**中图分类号** TN914.53, TN96 **文献标识码** A

## Research and Simulation of the Multi-mode Signals Synchronization Strategy

PAN Cheng-sheng<sup>1,2</sup> LIU Fang<sup>2,3</sup> FENG Yong-xin<sup>3</sup>

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)<sup>1</sup>

(Shenyang Li Gong University, Shenyang 110168, China)<sup>2</sup> (Dalian University, Dalian 116622, China)<sup>3</sup>

**Abstract** Considering the new spread spectrum technology, the new signal modulation system and the frequency sharing characteristic, the synchronization method of single purpose haven't meet the need. Based on the studying of signal mechanism and characteristic of the L1 and L5 frequency signals in GPS and Galileo system, the control technology and data process method were weighty studied, the channels, accumulate time and process method were rationally choiced. Therefore, the purpose of multi-mode signals receiving and synchronization was gained, furthermore the simulation and performance test were implemented, providing the feasibility, rationality and validity of the method.

**Keywords** Multi-mode signals, L1, L5, Synchronization, Simulation

军民两用的卫星导航系统正迅猛发展,对其相关技术的研究也越来越深入,特别是以 GPS 及 Galileo 为代表的导航系统<sup>[1]</sup>中导航信号及其同步接收策略的研究更备受关注。然而,为了更好地满足军事需要,扩展民用市场和应用的需求,各国政府都制定了现代化改进计划。例如, GPS 系统中在采用了 C/A 码、P(Y)码信号的基础上,进一步提出了 L1C, L2C, L5, M 码等信号; Galileo 系统中也采用了 E5, E6, E1 等频段的信号。因此,鉴于导航系统的发展及新特性、新要求信号的出现,考虑多信号的频率共享、信号带宽更高等特性,单用途的接收处理已不能满足需要。为此,多模态同步接收技术的研究也就势在必行,同时国内外对其研究也给予了很大的重视。为此,从研究具有不同频率、扩频方式、调制方式等信号的协同处理方法展开,进行了多模态信号同步接收策略的研究及仿真设计。

### 1 多模态卫星信号

GPS 作为美国的天基无线电定位、导航和授时系统,具有强有力的政府背景和广泛的军事、商业应用,其主要工作频段为 1575.42MHz 的 L1 和 1227.6MHz 的 L2,以及为 safety-

of-life 而采用 1176.45MHz 的 L5 频段等;而 Galileo 是欧洲联盟制定的一个独立的、能和 GPS 等效和兼容的卫星导航系统。如图 1 所示,在 Galileo 拟订的 4 个工作频率中,用于公共导航的 E2-L1-E1 波段与 GPS 现在正在使用的民用导航信号频率(L1)重合,1176.45MHz 的 E5a 波段与 GPS 的 L5 波段重合,两者都采用 CDMA 的方式,这表明 Galileo 系统的用户终端在导航功能上可与 GPS 完全兼容,为此针对 L1 频段及 L5 频段的导航信号进行了研究与分析。

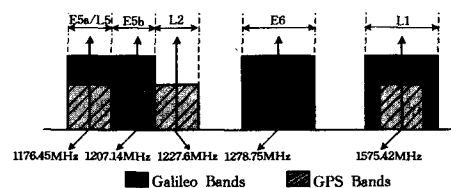


图 1 GPS 与 Galileo 系统的导航信号频段结构

#### 1.1 L1 频段卫星信号

对于 GPS 的 L1<sup>[2]</sup>频段而言,其扩频伪码除民用 C/A 外,还应用了 P(Y)码信号。另外,新型军用信号提出了 TDDM 扩频 BOC 调制的 M 码信号。对于 Galileo 的 E1 频段而言,

到稿日期:2009-01-09 返修日期:2009-04-14 本文受国家自然科学基金(No. 60802031),辽宁省创新团队资助。

潘成胜(1962-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为空间通信、电子对抗, E-mail: panacs@sohu.com; 刘芳,女,博士,讲师,研究方向为空间通信、电子对抗; 冯永新,女,博士,教授,研究方向为电子对抗、无线移动网络。

也采用了 BOC 调制方式的伪码信号。由于对短码 C/A 码的研究已较为成熟,为此在 L1 频段中主要对 P 码、M 码及 E1 信号进行研究与仿真分析。

### (1)GPS-P 码信号

GPS-P 码速率为 10.23MHz,序列周期为 266.41 天,序列长度为  $15345000 \times 15345037 = 2.357 \times 10^{14}$ ,信号采用较为常用的 BPSK 调制方式。P 码信号具有良好的相关、宽带特性,从而增加了信号的抗干扰能力,其发展和应用已逐渐成熟和广泛,在此不再详细介绍。

### (2)GPS-M 码信号

对于 GPS-M 码信号而言,随美国 GPS 现代化的不断推进而新增了军用 PRN 码,其抗干扰性能优于 P(Y)码。M 码<sup>[3]</sup>信号是经 TDDM<sup>[4]</sup>(Time Division Data Modulation)扩频处理后,再经 BOC(Binary Offset Carrier)调制的裂谱信号。其中,TDDM 是一种改进的扩频方式,允许数据在 1/2 时间内存在、在 1/2 时间内不存在的扩频方式,主要是采用对导航电文进行奇调偶不调策略,并以扩频码的速率交错改变。进一步,对扩频后序列进行 BOC<sup>[5]</sup>(10,5)调制处理,其中副载波频率为 10.23MHz。扩频码速率为 5.115MHz,GPS-M 码信号产生原理如图 2 所示。

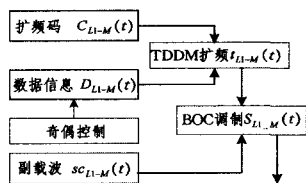


图 2 GPS-M 码信号产生原理

### (3)Galileo-E1 信号

Galileo 系统中的 E1<sup>[6]</sup>信号由 E1-B 和 E1-C 组成,其传输频段为 L1 的 1559-1610MHz。其中 E1-B 信号中加载了数据信息,而 E1-C 信号未加载数据信息,因此分别称数据通道和非数据通道。两通道都采用 BOC(1,1)调制方式,副载波频率为 1.023MHz,扩频码速率为 1.023MHz,其产生原理如图 3 所示。

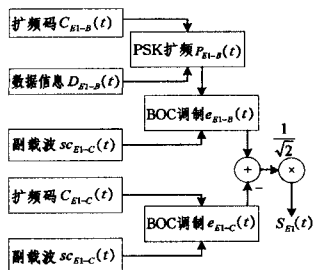


图 3 Galileo-E1 信号产生原理

基于机理与特性的研究,对 L1 频段的信号频谱进行仿真,结果如图 4 所示。GPS-P、GPS-M、Galileo-E1 信号的中心频点相同,即为 L1 的 1575.42MHz,GPS-P 码信号带宽为 20.46 MHz,频谱最大值出现在 L1 中心频点;GPS-M 码信号带宽为 30MHz,而且频谱出现了分裂,能量主要集中在中心频点的左右 10.23MHz;Galileo-E1 信号带宽为 2.046MHz,同样频谱也分裂为左右两个部分,能量主要集中在中心频点的左右 1.023MHz。

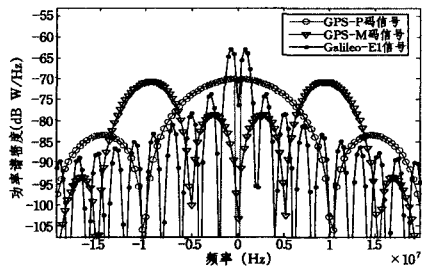


图 4 L1 频段信号频谱仿真结果图

## 1.2 L5 频段卫星信号

随着现代化的发展及需要,L5 频段的应用也越来越受关注。其中以 GPS-L5 信号及 Galileo-E5 信号为典型代表,为此对其进行研究与仿真分析。

### (1)GPS-L5 信号

GPS-L5<sup>[7]</sup>信号的基本结构与 GPS-L1 信号的相似,即载波用随机噪声码进行二进制相调制和预先加载数据流。但与 GPS-L1 和 GPS-L2 信号比较而言,其有特有的组成和优点。即 GPS-L5 信号由两部分组成:一个是预先加载导航数据流,另一个是不加载导航数据流,分别称为 I5 和 Q5 通道。两者被不同的伪随机噪声码(PRN)调制,I5 通道上 PRN 调制码的结构是含有 10 个字符的 NH 码对经过检查和改正、载有数据信息的 PRN 码进行调制的结果,而 Q5 通道上 PRN 调制码的结构是含有 20 个字符的 NH 码对不载有数据信息的 PRN 码进行调制的结果,其原理如图 5 所示。

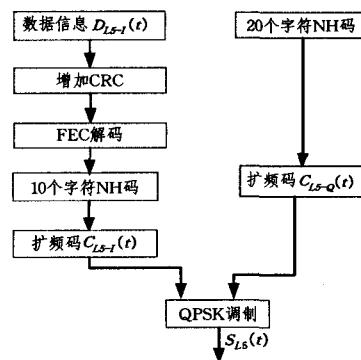


图 5 GPS-L5 信号产生原理

### (2)Galileo-E5 信号

Galileo 系统的 E5 频段信号采用了改进的 BOC 调制 AltBOC(Alternate Binary Offset Carrier)<sup>[8,9]</sup>技术,思想和处理方法同 BOC 调制类似,只是副载波为复指数形式,即  $e_r = c_r + j s_r = \text{sgn}(\cos(2\pi f_x t)) + j \text{sgn}(\sin(2\pi f_x t))$ 。E5 频段可分为 E5a 和 E5b 两个频段,中心频率分别为 1176.45MHz 和 1207.14MHz。E5 频段 AltBOC 调制后信号的频谱不再是分裂开来的两部分,而是整体单侧偏移,所以可以考虑将两个不同的基带信号通过 AltBOC 调制后释放到不同的边带上,从而实现在 BOC 调制信号的上下两个边带上分别承载不同的信息,其原理如图 6 所示。

同样基于机理与特性的研究,对 L5 频段的信号频谱进行了仿真,结果如图 7 所示。GPS-L5 信号带宽为 20MHz,能量主要集中在 1176.45MHz 中心频段;Galileo-E5 信号的频谱包括两部分,总带宽为 50MHz,其中 E5a 信号与 GPS-L5 信号中心频点重叠。

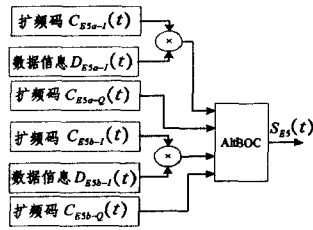


图6 Galileo-E5信号产生原理

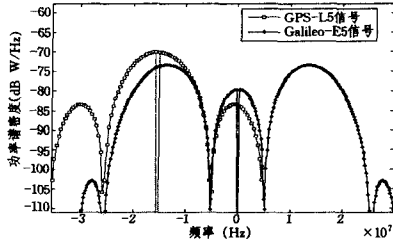


图7 L5频段信号频谱仿真结果图

## 2 多模态信号同步策略

由于卫星导航系统及其新信号的出现,对新信号的同步接收<sup>[10-12]</sup>的研究也引起了人们的重视,国内外已对其进行了深入的研究。然而大都是针对P码信号的捕获<sup>[13-16]</sup>及跟踪<sup>[17,18]</sup>处理方法,对M码及L5频段信号的同步方法研究还较少,处于初探阶段。

因此,在研究新信号机理及特性的基础上,结合了较为有效的长码同步方法,通过相应的数据处理方法及相应的控制策略,对通道、积累时间、处理方式等进行合理选取,从而达到多模态信号同步处理的可重构化。为此,从GPS及Galileo系统的频段角度展开仿真设计。总体仿真设计如图8所示。

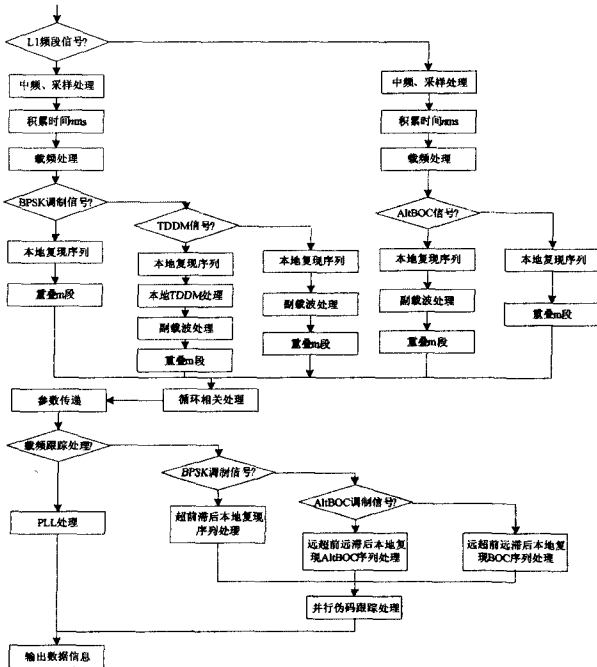


图8 多模态信号的同步策略仿真设计

输入接收信号为

$$s(t) = \sqrt{2P_T} d'(t) SW(f_x) PN(t) \cos(\omega_L t + \theta)$$

通过接收通道的前端预处理进行L1及L5频段选取。

其中,  $f_x$  为信号副载波频率:

$$f_x = \begin{cases} 0, & (\text{GPS-P}) \\ 10.23\text{MHz}, & (\text{GPS-M}) \\ 1.023\text{MHz}, & (\text{Galileo-E1}) \\ 0, & (\text{GPS-L5}) \\ 15.345\text{MHz}, & (\text{Galileo-E5}) \end{cases}$$

而  $d'(t)$  为导航电文的数据信息,其扩频方式为

$$d'(t) = \begin{cases} d_{\text{BPSK}}(t), & (\text{GPS-M}) \\ d_{\text{TDDM}}(t), & (\text{other}) \end{cases}$$

接收信号进入相应的处理频段通道,通过对接收信号进行中频及采样处理,使其满足捕获阶段的处理要求,进一步对其进行时间积累  $nms$ 。同时,对当前积累时间内的数据进行载频处理:

$$\begin{aligned} s'(t) &= \sqrt{2P_T} d(t) SW(f_x) PN(t) \cdot \cos(\omega_L t + \theta) \cdot \cos(\omega_L t + \theta) \\ &\approx \sqrt{2P_T} d(t) SW(f_x) PN(t) \end{aligned}$$

从而弥补了频率偏差带来的影响。进一步,通过调制方式对L1频段内的GPS-P码、GPS-M码、Galileo-E1信号,对L5频段内的GPS-L5、Galileo-E5信号进行选择处理,从而通过对本地复现的序列进行相应处理并进行重叠  $m$  段处理,使得搜索范围从  $nms$  扩大到  $m \times nms$ ,因此也达到了参数的可重构化。进一步,对选择通道进行循环相关处理:

$$R(m) = \text{abs}(IFFT(FFT(local(m)) \cdot FFT^*(receive(m))))$$

相关结果为:

$$s''(t) = \sqrt{2P_T} d(t) SW(f_x) PN(t) * s_{\text{local}}(t)$$

并对相应的结果进行参数传递,为跟踪阶段提供依据。由于频段的不同对跟踪阶段起不到决定性影响,因此载波跟踪都采用了PLL环,而伪码跟踪方法则根据信号调制方式引起的相关峰值数的不同进行相应选取,从而精确地跟踪解调结果,输出数据信息。

由于此多模态信号的同步策略在捕获阶段已缩小了不确定范围,因此跟踪阶段的处理速度可以满足处理要求。而同步的处理时间主要由捕获的处理时间所决定,所以进一步对同步方法的捕获处理时间进行分析。时间设为:

$$T = T_1 + T_2, T_1 = (\sum_N T_d \cdot N_d), T_2 = (\sum_J T_b \cdot N_b)$$

设初捕获时间为  $T_1$ 。其中,  $T_d$  为每个单元的驻留时间,  $N_d$  为每个单元的驻留次数,  $N_s$  为搜索单元数。

$T_d = N' \cdot T_m \cdot T_y \cdot T_c$ ,  $N'$  为驻留因子,  $T_m$  为积累处理时间,  $T_y$  为预处理时间,  $T_c$  为相关时间。设定相关数据长度为  $l$ ,分段系数为  $J$ ,则实施相关需要进行  $l$  点FFT,  $l$  点IFFT和  $l$  点数据相乘操作,所需时间为  $l$  的函数,可记为  $T_{\text{FFT}}(l)$ ,  $T_{\text{IFFT}}(l)$  和  $T_c(l)$ ,  $\mu$  为并行FFT的时间延迟量,因此  $T_c = (\mu \times T_{\text{FFT}}(l) + T_{\text{IFFT}}(l) + T_c(l))$ 。积累处理时间  $T_m = T_s \cdot L + \gamma \cdot (J-1) \cdot T_a(l)$ ,其中  $L = l \times J$ ,  $\gamma$  为累加时间延迟量,  $T_s$  为采样时间,  $T_a(l)$  为累加处理时间。时间偏差  $\Delta t_{\text{max}}$  所导致的需搜索验证的采样点数为  $\Delta t_{\text{max}}$  的函数,可记作  $L_{\text{Total}}(\Delta t_{\text{max}})$ 。在较大偏移的本地码中搜索较短的接收码,不一定能一次搜索到整个范围  $L_{\text{Total}}(\Delta t_{\text{max}})$ ,所以需要进行多次来完成整个不确定区域的搜索,因此:

$$N_s = \frac{L_{\text{Total}}(\Delta t_{\text{max}})}{L}$$

设精捕处理时间为  $T_2$ ,其中  $T_b$  为每个子单元驻留时间,

$N_b$  为每个子单元驻留次数。

$$T_b = N'' \cdot (\mu \times T_{FFT}(L) + T_{IFFT}(L) + T_s(L))$$

其中,  $N''$  为子单元驻留因子。完成该捕获事件所需总时间为:

$$\begin{aligned} T &= (\sum_{N_s} T_d \cdot N_d) + (\sum_j T_b \cdot N_b) \\ &= \sum_{N_s} N' \cdot T_m \cdot T_y \cdot T_c \cdot N_d + \sum_j N'' \cdot (\mu \times T_{FFT}(L) + \\ &\quad T_{IFFT}(L) + T_s(L)) \cdot N_b \\ &= \sum_{N_s} N' \cdot (T_i \cdot L + \gamma \cdot (J-1) \cdot T_a(L)) \cdot T_y \cdot (\mu \times \\ &\quad T_{FFT}(L) + T_{IFFT}(L) + T_s(L)) \cdot N_d + \sum_j N'' \cdot (\mu \times \\ &\quad T_{FFT}(L) + T_{IFFT}(L) + T_s(L)) \cdot N_b \end{aligned}$$

设虚警验证中的虚警概率为  $P_{FA}$ , 检测概率为  $P_D$ , 假设捕获方法在发生  $n$  次漏检、 $k$  次虚警后, 于第  $q$  次完成了捕获。假设捕获位置出现在不确定性范围内的概率为均匀分布, 则第  $n+1$  次搜索过程中, 捕获发生在第  $q$  次相关的概率为  $\frac{1}{Q}$  ( $Q=N_s$ )。因此, 在捕获过程中  $n$  次漏检和  $k$  次虚警后, 在第  $n+1$  次捕获搜索的第  $q$  次相关后完成捕获的发生概率为:

$$P(q, n, k) = \frac{1}{Q} \cdot P_D \cdot (1-P_D)^n \cdot \binom{m}{k} \cdot (P_{FA})^k \cdot (1-P_{FA})^{m-k}$$

而发生  $n$  次漏检的概率为  $(1-P_D)^n$ , 第  $q$  次完成捕获的概率为  $P_D$ 。因此, 平均捕获时间为:

$$\begin{aligned} \bar{T} &= T(q, n, k) \cdot P(q, n, k) = [\sum_{N_s} N' \cdot (T_i \cdot L + \gamma \cdot (J-1) \cdot \\ &\quad T_a(L)) \cdot T_y \cdot (\mu \times T_{FFT}(L) + T_{IFFT}(L) + T_s(L)) \cdot \\ &\quad N_d + \sum_j N'' \cdot (\mu \times T_{FFT}(L) + T_{IFFT}(L) + T_s(L)) \cdot \\ &\quad N_b] \cdot \left[ \frac{1}{Q} \cdot P_D \cdot (1-P_D)^n \cdot \binom{m}{k} \cdot (P_{FA})^k \cdot (1-P_{FA})^{m-k} \right] \end{aligned}$$

### 3 仿真分析

基于仿真环境, 对此同步策略进行分析。由于分段重叠段  $m$  为此方法的动态可调参数, 对处理精度起到了决定性的因素, 因此从不同分段角度着手进行仿真, 其中分段数与比例峰值的关系如图 10 所示。可见, 随着分段数的增加, 其比例峰值的变化趋势越慢。还可见, 分段数对比例峰值的影响较大, 即对处理精度的影响较大; 分段数与处理时间的关系如图 11 所示。可见, 在单次相关处理阶段, 随着分段重叠段数的增加, 处理时间增加得并不明显。由于同步接收系统的时钟同步存在一定的误差, 由此引起的搜索范围扩大, 相关处理次数增加, 因而在搜索 20ms 情况下, 随着分段数的增加, 其处理时间下降趋势较大, 处理速度明显提高。经理论验证与测试分析并综合考虑其对精度与速度的影响后, 分段数选择 4~8。

进一步, 在不同信噪比环境下对 3ms 积累信号进行测试与分析, 并通过数据拟合得其结果, 如图 12 所示。可见, 当信噪比  $> -25$  dB 情况下, 随着信噪比的减小, 其相关的比例峰值变化趋势较小; 而当信噪比  $= -25$  dB 左右, 其相关比例峰值趋于 0, 将无法满捕捕获要求, 因此, 此方法适用环境的信噪比须  $> -25$  dB。同时, 在信噪比为  $-12$  dB 情况下应解调导航电文, 如图 13 所示, 可见此同步策略可以正确输出数据信

息。

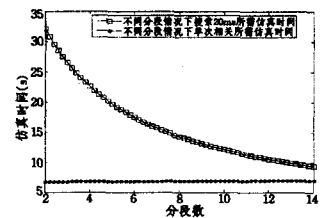
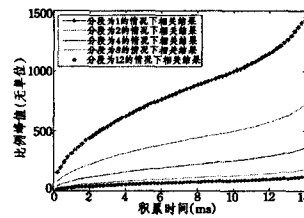


图 10 不同分段情况下比例峰值关系图 图 11 分段数与处理时间的关系图

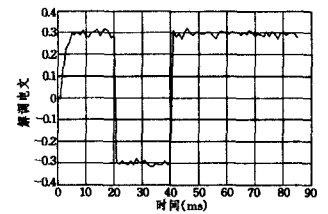
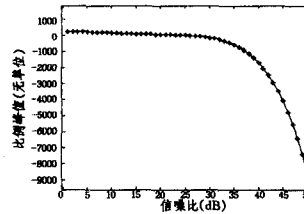


图 12 不同信噪比情况下相关结果 图 13 解调导航电文仿真结果

**结束语** 对 GPS 及 Galileo 系统的 L1, L5 频段信号, 尤其是 BPSK, BOC, AltBOC, TDDM 等调制方式信号进行了机理研究, 并基于此对多模态信号的同步策略进行了深入研究, 进一步进行了理论分析与仿真测试。结果表明, 此多模态信号同步策略可以合理、有效地达到接收多频、多信号的目的。本研究成果及相关技术, 可以很好地应用于新一代卫星导航领域, 尤其是为多模态接收机接收的研制提供了关键技术支撑, 具有一定的科学意义及应用前景。

### 参考文献

- [1] Alkan R M, Karaman H, Sahin M. GPS, GALILEO and GLO-NASS Satellite Navigation Systems & GPS Modernization [C] // Proceedings of 2th International conference of Recent Advances in Space Technology, 2005; 390-394
- [2] L1 band part of Galileo Signal in Space ICD (SIS ICD) [S]. Galileo Joint Undertaking, 2005
- [3] Lillo W E, Ward P W, Abbott A S. Binary Offset Carrier M-Code Envelope Detector [P]. United States Patent Application Publication, Pub. No. US 2005/0281325 A1, Pub. Date: 22 Dec. 2005
- [4] Holmes J K, Raghavan S. A summary of the new GPS IIR - M and IIF modernization signals [J]. 0-7803-8521-7/ 04 2004 IEEE, 2004, 26(1): 4116-4126
- [5] Nunes F, Souna F, Leitao J. Innovations-based Code Discriminator for GPS/Galileo BOC Signals [J]. VTC2004-Fall, 2004 IEEE 60th, 2004(6): 4127-4131
- [6] Galileo Open Service Signal in Space Interface Control Document (OS SIS ICD) [S]. Galileo Joint Undertaking, 2006
- [7] Holmes J K Dr. GPS Modernization Signal Update Summary [J]. BGPS Modernization Presentation, 2003
- [8] Gerein N. Hardware Architecture for Processing Galileo Alternate Binary Offset Carrier (AltBOC) Signals [P]. United States Patent Application 0050012664
- [9] Song Di-er, Zhan Xing-qun. Structure analysis and simulation of Galileo E5 signal [J]. Micro-computer Information, 2006, 22(10-1)

- [10] Ganguly S Dr. Real-time Dual Frequency Software Receiver[C] // Position Location and Navigation Symposium. 2004;366-374
- [11] Sleewaegen J M, Wilde W D. Galileo AltBOC Receiver[C] // GNSS. 2004
- [12] Peter R R, Bertelsen N. Design of a single frequency GPS Software Receiver[D]. Alborg University, 2004
- [13] Fantino M, Dovic F, Presti L L, et al. Acquisition Performance Analysis for BOC Modulated Signals[C] // The 2004 International Symposium on GNSS/GPS. December 2004
- [14] Fischer S, Guerin A, Berberich S. Acquisition concepts for Galileo BOC(2,2) signals in consideration of hardware Limitations [C] // 2004 IEEE 59th Vehicle Technology Conference. 2004 (5):2852-2856
- [15] De Wilde W, leewaegen J-M, Simsky A, et al. New Fast Signal Acquisition Unit for GPS Galileo Receivers[C] // ENC GNSS 2006. Manchester, 2006:1-11
- [16] Betz J W. getting to M-direct acquisition of the new military signal[J]. GPS world, Apr. 2005
- [17] Fantino M, Dovic F. Design of a reconfigurable low-complexity tracking loop for galileo signals[C] // IEEE ISSSTA. 2004; 736-740
- [18] Julien O, Cannon M E, Lachapelle G, et al. A New Unambiguous BOC(n,n) Signal Tracking Technique[C] // Europe Navigation Conference GNSS. Netherlands; EUGIN, DGON, 2004
- 
- (上接第 13 页)
- [46] Sroubek F, Flusser J. Multichannel blind iterative image restoration[J]. IEEE Trans. Image Processing, 2003, 12(9): 1094-1106
- [47] Sroubek F, Flusser J. Multichannel blind deconvolution of spatially misaligned images [J]. IEEE Trans. Image Processing, 2005, 14(7): 874-883
- [48] Sroubek F, Critsabal G, Flusser J. A Unified Approach to Super-resolution and Multichannel Blind Deconvolution [J]. IEEE Trans. Image Processing, 2007, 16(9): 2322-2332
- [49] Freeman W T, Pazstor E C. Learning low - level vision [J]. Springer International Journal Computer Vision, 2000, 40(1): 25-47
- [50] Baker S, Kanade T. Hallucinating faces[A] // IEEE Int. Conf. Automatic Face & Gesture Recognition (AFGR) [C]. Mar. 2000; 83-88
- [51] Freeman W T, Jones T R, Pazstor E C. Example-based super-resolution[J]. IEEE Trans. Computer Graphics & Applications, 2002, 22(2): 56-65
- [52] Pickup L C, Roberts S J, Zisserman A. A sampled texture prior for image super-resolution[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2003; 1587-1594
- [53] Baker S, Kanade T. Limits on super-resolution and how to break them[J]. IEEE Trans. Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2002, 24(9): 1167-1183
- [54] Dedeoglu G, Kanade T, August J. High-zoom video hallucination by exploiting spatio-temporal regularities[A] // IEEE Computer Society Conf. Computer Vision & Pattern Recognition (CVPR) [C]. Washington, DC. June 2004, 2; II-151-II-158
- [55] Jia K, Gong S G. Generalized Face Super-resolution[J]. IEEE Trans. Image Processing, 2008, 17(6): 873-886
- [56] Capel D, Zisserman A. Super-resolution from multiple views using learnt image models[A] // IEEE Society Conf. Computer Vision & Pattern Recognition [C]. Kauai, Hawaii, USA, Dec. 2001, 2; II-627-II-634
- [57] Gunturk B K, Batur A U, Altunbasak Y, et al. Eigenface-domain super-resolution for face recognition [J]. IEEE Trans. Image Processing, 2003, 12(5): 597-606
- [58] Liu C, Shum H Y, Zhang C S. A two-step approach to hallucinating faces; global parametric model and local nonparametric model[A] // IEEE Society Conf. Computer Vision & Pattern Recognition [C]. Kauai, Hawaii, USA, Dec. 2001, 1(1): I-192-I-198
- [59] Li Y, Lin X Y. An improved two-step approach to hallucinating faces[A] // IEEE Int. Conf. Image & Graphics [C]. Hongkong, China, Dec. 2004; 298-301
- [60] Li Y, Lin X Y. Face Hallucination with Pose Variation[A] // IEEE Int. Conf. Automatic Face & Gesture Recognition [C]. Seoul, Korea, May 2004; 723-728
- [61] Sun J, Zheng N N, Tao H, et al. Image hallucination with primal sketch priors [A] // IEEE Computer Society Conf. Computer Vision & Pattern Recognition [C]. Madison, Wisconsin, USA, June 2003, 2; II-729-II-736
- [62] Hertzmann A, Jacobs C E, Oliver N, et al. Image Analogies[A] // SIGGRAPH Annual Conf. Series Computer Graphics Processing [C]. Los Angeles, California, USA, Aug. 2001
- [63] Chang H, Yeung D Y, Xiong Y M. Super - resolution through neighbor embedding [A] // Computer Society Conf. Computer Vision & Pattern Recognition (CVPR) [C]. Washington, DC, USA, June 2004, 1; 275-282
- [64] Liu W, Lin D H, Tang X O. Hallucinating faces; TensorPatch super-resolution and coupled residue compensation[A] // Proc. IEEE Computer Vision & Pattern Recognition (CVPR) [C]. San Diego, California, USA, June 2005, 2; 478-484
- [65] Kim K I, Franz M O, Scholkopf B. Iterative Kernel Principal Component Analysis for Image Modeling[J]. IEEE Trans Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2005, 27(9): 1351-1366
- [66] Park J S, Lee S W. An Example-based Face Hallucination Method for Single-frame, Low-resolution Facial Images [J]. IEEE Trans. Image Processing, 2008, 17(10): 1806-1816
- [67] Ni K S, Nguyen T Q. Image Superresolution Using Support Vector Regression[J]. IEEE Trans. Image Processing, 2007, 16(6): 1596-1610
- [68] Narasiman S G, Nayar S K. Enhancing Resolution Along Multiple Imaging Dimensions Using Assorted Pixels[J]. IEEE Trans. Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2005, 27(4): 518-530