

# 临近空间增强定位系统的设计与分析

张雷

(中国科学院上海技术物理研究所 上海 200083)

**摘要** 将GPS的技术优势和临近空间的发展需求相结合,分析了临近空间平台应用的技术特点,提出了设计临近空间增强定位系统,从系统融合和增强定位的角度分析了约束问题及其技术处理方法,较为详细地对系统的完好性监测做了讨论。通过对系统设计和算法流程的分析,研究预示着临近空间定位平台的发展是对空天地一体化导航定位的重要技术保障。

**关键词** 临近空间,全球定位系统,完好性

## Design and Analysis of the Augmentation Positioning System in Near-space

ZHANG Lei

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract** Combining the technology advantages of GPS with the development requirements of near-space, this paper analyzed the application proprieties of near-space platform and proposed the augmentation system in near-space and analyzed the constrain problems and their solutions based on system fusion and augmentation positioning, and then discussed in detail the system integrity. Through the analysis of the system design and the algorithm process, the paper indicated that the development of the near-space positioning platform is the important technical support to the integration system of space and air and earth.

**Keywords** Near-space, GPS, Integrity

20多年来, GPS已广泛应用于军民导航定位领域。但GPS卫星的信号发射功率有限,经两万多公里到达接收机天线的信号强度一般为 $-130\text{dBm}$ ,因此系统的脆弱性面临着干扰的挑战。而且GPS的定位精度和可靠性极大地依赖于卫星的可视数目和几何分布。在高楼林立的城市和室内因信号受到遮挡或无法穿透而影响定位精度,甚至无法直接使用GPS信号来导航定位<sup>[1]</sup>。

临近空间通常是指距离地面20~100公里的大气平流层、中间大气层和部分电离层区域,是进行情报、监视、侦察和通信的可靠平台,因此极易实施对地观测、通信和导航<sup>[2]</sup>。鉴于临近空间的技术发展优势,设计增强GPS定位的高精度时空信息平台,研究得到增强后的GPS定位系统及其性能,为部署临近空间的高精度定位打下技术基础,并探索适合现代战争的导航定位需求。

### 1 临近空间平台的特点分析

临近空间是在传统意义上的卫星和航空平台所在领域之间的空域,长期以来由于没有充分认识和挖掘临近空间的军事应用价值以及技术上的限制,从而缺少系统性、战略性的开发利用,至今没有实用的军事装备。

由于该空域的气象条件稳定,可以采用无人机、飞艇、热气球等作为临近空间的飞行器。在搭载各种功能载荷后的飞行器能有效实现战略层面的制空权。因此,分析临近空间平

台及其在开发、应用中的特点极为重要。

(1)广阔的信号覆盖范围:临近空间平台在应用中增加了信号天线的有效高度,减少了地球曲率对电波视距传播的影响,使得传输路径开阔,接近自由空间的传播条件。

(2)复杂的电磁环境:因为临近空间平台的使用空间有限,天线较多且相隔距离较近的情况在所难免。信号发射功率较大,接收灵敏度高,工作频段宽,电磁信号密集,平台内部不但有各种电子、电气设备产生高低频干扰,而且还易受外部雷电等自然干扰和来自敌方的截获与干扰。

(3)无人值守模式:不管飞行器是有人驾驶还是无人驾驶,都要求平台上载荷的控制与管理无须人的干预,通过地面指令对平台载荷进行遥控操作,由地面系统统一观测遥控管理。

(4)恶劣的工作环境:与地面载荷相比,搭载在临近空间平台上的载荷要求有更高的可靠性、要防振、抗冲击、耐湿、耐高低温、防雷电;载荷要坚固耐用、高可靠、体积小、重量轻、功耗小、互换性好、维修方便。

因此,平台上的载荷在研制中要注意模块化、方便配置。定位载荷、通信载荷是具有信道化、模块化结构的开放式架构,能根据不同用途改变相应模块,以实现空中与地面信号的联合协调工作。

### 2 临近空间增强定位的系统设计

在临近空间的区域范围内,如某些因素致使GPS系统的

定位信号受到干扰,临近空间飞行器搭载定位信号源来增强 GPS 系统,从而实现临近空间的增强定位或独立定位,系统组成如图 1 所示。

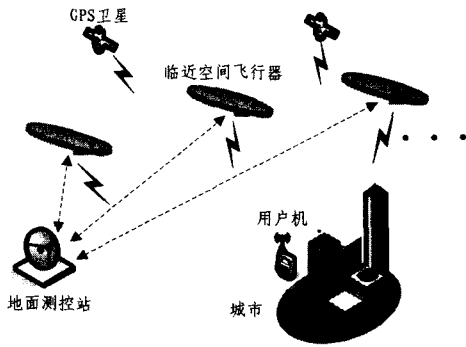


图 1 临近空间增强定位系统的组成

临近空间增强 GPS 定位系统包括可视 GPS 卫星、若干临近空间飞行器、地面观测站(测控临近空间飞行器)以及在城市环境下的用户机。定位信号源作为载荷之一搭载在临近空间飞行器上,当联合 GPS 可视卫星时可进行增强定位,而当 GPS 卫星不可用时可独立组成临近空间定位系统。

根据 GPS 定位原理和“伪卫星”技术的增强原理可知,临近空间增强定位系统能有效增加用户机的可视星数量和改善星座的几何分布,提高了区域范围内的用户机定位精度<sup>[3]</sup>。

### 3 临近空间增强定位的实现原理

临近空间飞行器上的定位信号源需要发射类似于 GPS 的测距信号和导航电文,并工作在 GPS 的载波频率上,这样才能确保用户机同时接收 GPS 信号和临近空间飞行器上的增强定位信号。飞行器在临近空间漂浮,天然地与 GPS 卫星进行天基组网(如果飞行器建立独立定位系统,则飞行器的数量建议至少 4 个)。从研究组网后的几何分布特点来看,垂直定位精度因子得到了明显改善。

GPS 信号和增强定位信号的原始信息都是二进制格式<sup>[4]</sup>。由于增强定位信号源一般较难实现与 GPS 时钟的瞬间同步,需要在增强定位信号源的二进制原始数据中消除一个偏差常量(该偏差常量可以通过观测的原始历元获得)。这样,增强定位系统在定位应用中就能同时处理和分析 GPS 数据和临近空间飞行器上增强定位信号源的观测值。

临近空间飞行器上的增强定位信号源发射信号功率较强,容易干扰 GPS 信号在用户机上的接收,在同时观测时通常有因信号阻塞而出现的短暂时历元丢失现象。在静态情况下,载波相位观测值的变化较平滑,但周跳难于直接观测到。通过实验发现,相邻的两个相位观测值高阶差呈偶然误差。在本文的分析中提出采用高阶函数拟合的方法来研究,即根据  $n$  个相位观测值拟合一个  $m$  阶函数多项式,并用这个多项式来预测下一个观测值;再将预测的观测值和实测值比较,发现和修正整周计数。在数学模型上,对给定一组数据点  $(X_i, Y_i)$ ,其中  $i=0, 1, 2, \dots, n$ , 构造一个  $m$  阶函数多项式  $Y=f(X)$  来逼近这些数据点,并使得偏差的加权平方和最小,即:

$$\begin{cases} \Gamma(a_0, a_1, \dots, a_m) = \sum_{i=0}^n \delta_i (f(x_i) - y_i)^2 \\ f(x) = a_0 + a_1 x + \dots + a_m x^m \quad m < n \end{cases}$$

使得  $\Gamma(a_0, a_1, \dots, a_m)$  取最小,加权系数  $\delta_i > 0$ ,通常可取

$\delta_i = 1, i=0, 1, 2, \dots, n$ 。在计算分析中函数多项式拟合一般取 4~5 阶,因为四次差或五次差一般呈偶然误差特性而无法用函数多项式来拟合。

用户机在同时捕获、跟踪后进行的一系列信号处理与坐标解算如图 2 所示,具体过程与 GPS 原理有着本质的相似性,本文不再赘述。

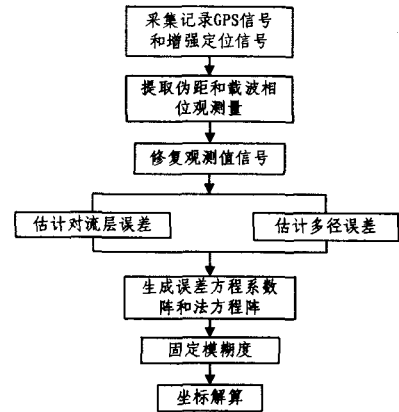


图 2 定位系统信号处理的流程

### 4 增强定位研究中的技术约束分析

本文设计和研究的临近空间增强定位系统具有单一 GPS 定位系统在定位应用中出现的各种误差效应(如多径、远近和延迟)和信号脆弱等特点<sup>[1]</sup>。本文就系统研究中出现的若干关键问题进行分析并提出若干技术处理方法,确保天基组网系统具有高可用性、可靠性和稳定性。

#### 4.1 小仰角约束

在单一 GPS 系统中,较低仰角(或称高度角)的卫星在信号处理时通常被舍弃,主要是避免带来严重的多路径效应、电离层和对流层延迟误差。而临近空间飞行器一般的飞行高度为 30 公里,搭载的定位信号源具有小仰角特征。对用户机的研究过程中,需要进行判断和限制,确保排除较低仰角的 GPS 卫星而解算小仰角的临近空间定位信号源。

采用增强或联合定位系统,GNSS 卫星和临近空间飞行器的仰角分布差别很大,在一定程度上互补,但也会引入新的几何关系约束问题,本文不再展开讨论。

#### 4.2 地球曲率对可视的约束

地球的半径为 6374 公里,根据几何原理,当临近空间飞行器在 30 公里漂浮时,最远的可视距离为 619 公里。也就是说由于地球曲率对可视的约束,临近空间飞行器信号覆盖区域的最大直径为 619 公里,显然有效的服务区域在半径小于 300 公里的地球面上。这也是选择  $5^\circ$  为小仰角门限的一个原则。

临近空间增强定位系统一般覆盖的信号区域是局部的,在飞行器发射信号功率允许的情况下可以折衷考虑小仰角门限和地球曲率对可视约束的问题。

#### 4.3 系统的时间同步约束

GPS 卫星携带的时钟精确度一般都高于  $10^{-9}$ ,假如临近空间飞行器采用了精确度为  $10^{-9}$  的时钟,那么它在 1s 中产生的偏差是  $1\mu\text{s}$ ,5s 后的时间偏差接近  $300\mu\text{s}$ (这对定位而言,其等效测距误差为 90m)。系统中的设备一般不可能全部配备高精度的时钟源,因此必须设置时间同步网,基于一个基准

时钟源来校准系统的时间信息,实现系统时间同步的约束。

在临近空间的特殊应用中有着恶劣的电磁波干扰,并且需要在长时间内保持高稳定度和高精度的基准时间信息。由于系统的复杂性,研究中采用标准时间接口约束技术,时间服务器同时接收 GPS 卫星、地面观测站和临近空间飞行器搭载本地原子钟的时间信息源,通过数据融合算法输出高精度和高稳定度的时间信息源,并向临近空间系统进行广播。

临近空间增强定位系统中的用户设备定期或不定期地检测自身时间偏差是否大于约束的偏差阈值,如果大于则分配给自身该时隙内的校准数据报 TC,并在数据包中加入当前的时间信息  $T_A$ 。当时间服务器收到校准数据报 TC 时,记录数据报的到达时间  $T_B$ ,进行应答时回传的数据报中包含  $T_A$ ,  $T_B$  和应答数据报发送时间  $T_C$ ,当用户设备收到时间服务器回传的数据报时记录时间信息  $T_D$ 。上述校准过程如图 3 所示。

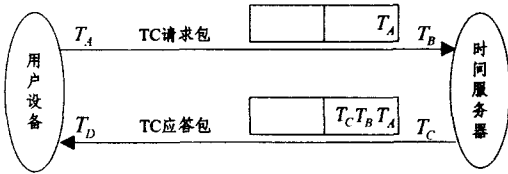


图 3 时间同步约束的校准流程

时间校准的过程中,利用  $T_A$ ,  $T_B$ ,  $T_C$  和  $T_D$  时间信息可以算出用户设备和时间服务器的时延参数  $D_T$  和时钟偏差  $B_T$ ,并建立以下方程:

$$\begin{cases} T_A + D_T + B_T = T_B \\ T_C + D_T - B_T = T_D \end{cases}$$

显然可得:

$$\begin{cases} D_T = ((T_B + T_D) - (T_A + T_C)) / 2 \\ B_T = ((T_B - T_D) - (T_A - T_C)) / 2 \end{cases}$$

以时间服务器为核心的时间同步约束和校准方法,可以将高精度和高稳定度的时间信息源广播至临近空间系统的各个设备(不包括 GPS 卫星),从而实现整个系统的时间同步,本文的研究是将误差允许值设为  $10^{-12}$  (GPS 卫星的时钟精度)。

#### 4.4 系统的信号体制选择

目前的卫星导航系统是采用 BPSK 调制信号,由于技术和法规的限制,导航频段越来越拥挤,各通信信号的相互干扰日益严重;定位精度要求越来越高,对测距精度也提出了更高的要求;通信环境中除背景噪声外,通常还存在不容忽视的人为干扰,抗干扰能力较差;地面导航接收机电磁环境差,多径问题严重等。为了适应临近空间增强定位系统的需要,提出选择 BOC 调制,即 Binary Offset Carrier(二进制偏移载波)。BOC 调制是 GPS 现代化提出的新型调制方式,其功率谱密度形状由一些主瓣和副瓣构成,相关函数具有多个峰值。

BPSK 调制信号与 BOC 调制信号相比,BOC 调制信号具有良好的频谱分离能力,可以有效地实现频谱隔离,可以将较大功率 BOC 信号与 BPSK 信号同时发射,进而提高 BOC 调制信号的传输效率,同时具有更强的抗干扰能力,这对于解决导航频段拥挤带来的军用信号和民用信号在频谱上相互干扰问题具有十分重要的意义。同时,配以合理的接收处理方法,就可以达到信号的正确捕获和精确跟踪。BOC 调制的相关

函数相对相同码速率的 BPSK 方式更陡峭,从而具有更高的码跟踪精度和更好的多径分辨能力。这对于卫星导航用相关特性来测时延测距离有很重要的意义。

## 5 临近空间增强定位系统的完好性研究

根据 GPS 原理,卫星导航系统的完好性监测技术主要有:卫星自主完好性监测、地面信号质量监测和接收机自主完好性监测。在临近空间增强定位系统中开展飞行器自主监测和增强定位相结合的完好性研究<sup>[5]</sup>。

飞行器自主监测是飞行器一旦发现信号完好性有问题,就会给信号处理器发送一条信息来改变发射信息,从而立刻通知该信号不可用。这能使得在几秒内发出告警成为可能,满足目前预想的告警时间要求。因此,飞行器自主监测可以实现不依靠其它设备而自主监测,但只能监测飞行器本身完好性对定位精度的影响,不能监测信号广播过程中误差源对定位精度的影响。

临近空间增强定位系统的建设在概念上是广域增强定位系统,采用增强定位相结合的完好监测,主要考虑报警阈值、报警时间、完好概率和保护水平。结合地面观测站广播差分改正数及其误差估计信息,与 GPS 卫星星历和时间服务器钟差改正相应的误差一般称为用户差分伪距误差(UDRE)。考虑完好性的概率要求和临近空间的特点,UDRE 可定义为定位系统服务区内可视定位信号源(GPS 卫星和飞行器)星历及钟差改正数误差相应的伪距误差的置信限制(置信度为 99.9%)。

基于直接观测量进行 UDRE 估计能限定实际的 GPS 轨道、临近空间飞行器的空间位置和钟差,对异常情况的出现能做出快速反应。但同时也会引入局部误差改正后的残差影响,如多径效应、对流层延迟和接收机钟差等。为了尽量减小局部误差,计算伪距差时可加入如下限制条件:

- (1)定位信号源至少在两个地面观测站可视;
- (2)如果卫星在两个或以上地面观测站的仰角均大于  $5^\circ$ ,则放弃小于  $5^\circ$  的观测量;
- (3)如果仰角大于  $5^\circ$  的地面观测站少于 2 个,则用仰角最大的两个地面观测站;
- (4)否则,UDRE 被标识为“未被监测”。

UDRE 每秒计算一次,按更新频率要求周期性地广播给用户,采样数据可用当前历元及之前历元的观测数据。因此,临近空间增强定位系统的 UDRE 监测算法流程如图 4 所示。

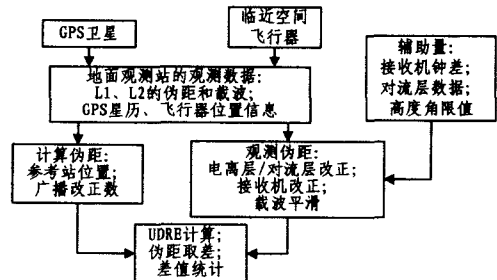


图 4 用户差分伪距的完好性算法流程

结束语 临近空间增强定位系统是将 GPS、飞行器和地面进行一体化定位的高技术研究,为临近空间平台的发展及其关键技术的拓展作了进一步探索。各国在争相发展的思路

的使用数量,当 PCA 主成分数量在 20 到 180 之间变化时,对 Fisherface, D-LDA 和本文方法进行了性能比较。各类算法在 ORL 人脸数据库上的识别率曲线如图 4 所示。图 4 表明抽取每类前 5 个样本组成训练样本集,在最终特征维数为 39(C-1)的情况下,本文算法相比于其它特征抽取算法在 PCA 降维阶段主成分数量发生变化时,识别性能始终有效且稳定。

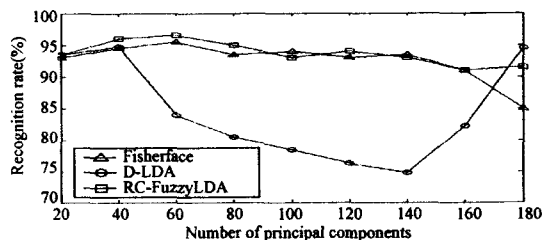


图 4 不同主成分数目下抽取前 5 个训练样本集的 ORL 识别率的比较

通过表 1、表 2、图 3 和图 4 的实验数据可以看出,本文提出的 RC-FuzzyLDA 算法的性能优于传统的 Fisherface, D-LDA 方法和 Kwak 等提出的 Fuzzy Fisherface 方法,实验证明该算法在解决人脸识别特征模糊化的问题中是有效的。

**结束语** 本文提出了一种基于松弛归一化条件下的改进模糊线性鉴别分析方法,通过松弛隶属度函数中的归一化条件,将每一个样本的隶属度信息根据它对散布矩阵重定义所做的贡献按照松弛条件融入到特征抽取的过程中,从而得到完整有效的模糊特征样本向量集。实验结果表明,该算法同传统模糊线性鉴别分析方法相比有效地解决了小样本和离群样本问题。而如何设计更有效的模糊隶属度矩阵从而获得最佳散布矩阵的重定义,是进一步的研究方向。

### 参 考 文 献

[1] 段鸿,程义民,王以孝,等. 基于 Kanade-Lucas-Tomasi 算法的人脸特征点跟踪方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(3): 279 - 283

[2] 曲延锋,李卫军,徐健,等. 复杂背景下多姿态人脸快速检测算法

[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(1): 45-50

[3] 王宇博,艾海舟,武勃,等. 人脸表情的实时分类[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(6): 1296-1301

[4] 武宇文,刘宏,查红彬. 基于特征分组加权聚类的表情识别[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(11): 2394-2401

[5] Kirby M, Sirovich L. Application of the KL procedure for the characterization of human faces [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(1): 103-108

[6] Turk M, Pentland A. Eigenfaces for recognition [J]. Journal of Cognitive Neuroscience, 1991, 3(1): 71-86

[7] Belhumeur P N, Hespanha J P, Kriegman D J. Eigenfaces vs Fisherfaces: Recognition using class specific linear projection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(7): 711-720

[8] Swets D L, Weng J. Using discriminant eigenfeatures for image retrieval [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996, 18(8): 831-836

[9] Kwak K C, Pedrycz W. Face recognition using a fuzzy fisherface classifier [J]. Pattern Recognition 2005, 38(10): 1717-1732

[10] Keller J M, Gray M R, Givens J A. A fuzzy k-nearest neighbor algorithm [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics 1985, 15(4): 580-585

[11] AT&T Laboratories Cambridge. ORL face database [OL]. [2008-05-12]. Http://www.cam.ac.uk/facedatabase.htm

[12] Yu H, Yang J. A direct LDA algorithm for high-dimensional data-with application to face recognition[J]. Pattern Recognition, 2001, 34(11): 2067-2070

[13] Yang J, Frangi A F, Yang J Y, et al. KPCA plus LDA: A complete kernel Fisher discriminant framework for feature extraction and recognition [J]. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2005, 27(2): 230-244

[14] Lu J W, Plataniotis K N, Venetsanopoulos A N. Regularization studies of linear discriminant analysis in small sample size scenarios with application to face recognition [J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26(2): 181-191

(上接第 91 页)

中始终围绕着新形势下获取持久的指挥、控制、通信、情报、监视和侦察能力,本文分析和研究的增强定位系统能使用临近空间飞行器来确保用户机的定位导航能力优于采用单一卫星定位系统(如 GPS)的性能,能实现卫星导航定位系统可用性、可靠性和稳定性的区域增强。信号体制采用 BOC 调制方式,能有效提高频段利用率、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。这对于提高军用通信、反应和作战能力有着重要的意义;对于民用,如高精度航空定位,也有着改善信号完好性的整体优势。本文就临近空间系统研究的独特性,对有别于 GPS 定位系统的实现原理、技术约束和完好性等进行了分析,为系统性能的验证提供了参考。

### 参 考 文 献

[1] El-Rabbany, Ahmed. Introduction to GPS: the global positioning system[M]. Artech House, Boston, London, 2002

[2] 刘毅,阳曙光,李为民. 临近空间及其在防空反导作战中的应用分析[J]. 现代防御技术, 2007, 35(6)

[3] 张雷,王建宇,戴宁. GPS 信号捕获跟踪的仿真分析与研究[J]. 2008, 36(2)

[4] 李洪涛,许国昌,薛鸿印,译. GPS 应用程序设计[M]. 北京: 科学出版社, 2000

[5] Kaplan E D, Hegarty C J. Understanding GPS Principles and Applications, Second Edition[M]. Artech House, Boston, London, 2006