

基于 EKF 算法与卫星导航的民航货运 高精度定位系统研究

卢春[†], 何祖祺, 刘友谊, 陈川

(中国南方航空股份有限公司, 广东 广州 510000)

摘 要:近年来,非线性滤波算法的进步推动了民航货运定位系统的技术革新,然而,这些系统仍面临训练速度慢、精度损失和无法高效处理大规模数据的问题。RTK 定位精度的表现受模式影响,GPS 定位误差在各方向均保持在 2.2~3.4,相对稳定。研究引入扩展卡尔曼滤波算法,实测数据分析结果显示,E 方向的定位误差最小,约为 2.2,而 N 方向的误差较大,范围为 2.5~4。结果强调了北斗系统与全球定位系统各自的系统特性差异,BDS/GPS 的联合定位方法能显著优化 PDOP 值,有效解决了由于卫星几何构型差异或可见卫星数量不足引发的问题。

关键词:EKF; 卫星导航; 民航货运; PDOP; BDS

中图分类号:TP 273

文献标识码:A

Research on High-Precision Positioning System for Civil Aviation Cargo Based on EKF Algorithm and Satellite Navigation

LU Chun[†], HE Zuqi, LIU Youyi, CHEN Chuan

(China Southern Airlines Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000, China)

Abstract:In recent years, the progress of nonlinear filtering algorithms has promoted the technical innovation of civil aviation cargo positioning systems. However, these systems still face the problems of slow training speed, loss of accuracy and inability to efficiently handle large-scale data. The performance of RTK positioning accuracy is affected by the mode, and the GPS positioning error remains between 2.2 and 3.4 in all directions, which is relatively stable. The extended Kalman filter algorithm is introduced in this study, and the analysis results of the measured data show that the positioning error in the E direction is the smallest, about 2.2, while the error in the N direction is larger, ranging from 2.5 to 4. The results highlight the differences between BDS and GPS. The BDS/GPS joint positioning method can significantly optimize the PDOP value, and effectively solve the problems caused by the difference in satellite geometry or the insufficient number of visible satellites.

Key words:EKF; satellite navigation; civil aviation freight; PDOP; BDS

随着全球经济的快速发展,民航运输业在全球范围内得到了广泛应用。据报道,在每年的货运吞吐量中,航空货运占到了 60%左右,航空运输已经成为现代社会中不可缺少的运输方式^[1,2]。为实

现对货物快速、准确的运输,机场、航空公司、货代等都急需更精确的定位系统^[3]。而目前政策研究报告显示,我国对于航空货运定位系统的研究相对较少,且多集中在室内定位^[4]。新一代的导航应该

收稿日期:2023-07-06

作者简介:卢春(1974—),男,广东广州人,硕士,高级工程师,研究方向:航空公司智能化,航空货运与科技融合,通信技术赋能航空能力建设。

[†] 通信联系人, E-mail: 1990247010@qq.com

向高效、安全和精准的方向发展,国际民航组织已经提出了全球新导航机制,我国不能继续依赖于 GPS 定位系统,要使用北斗导航和 GPS 定位系统组合,从而实现全能性和精准性的航行。在西方国家, GPS 技术与 WiFi 技术已经在定位系统中广泛应用,具有较为完善的技术体系^[5,6]。然而,因为机场多变的环境以及网络信号不稳定等问题,高精度定位系统在这些场景中的应用存在一定的挑战。EKF(Extended Kalman Filter,扩展卡尔曼滤波)算法作为一种代表性的非线性滤波方法,被研究者证明在提高定位精度和可靠性方面取得了显著的研究成果^[7,8] Yang、Hongyu 等提出了一种基于模糊度的信息系统安全状态评价方法。针对 PFPN 网络的特性,提出了基于 PFPN 网络的命题可信推断方法,以及基于 PFPN 网络的安全局势模糊推断方法。最后,以一家民航机场为例,对其进行了测试,结果表明,所提出的模型是可行的。实验证明, PFPN 方法比其他方法有更好的稳定性,且计算复杂度更小。此外,将 EKF 算法与卫星导航技术相结合,能够实现对民航货运的高精度定位,同时仿真结果表明该系统能够有效提高民航货运定位精度^[9]。横向对比了仿真和实际应用中的定位模型和其模型效能,并通过模型制定公式,得出优化后的精度模型能明显提升民航货运高精度定位系统的稳定性并提高其模糊度解算的精度^[10,11]。

1 基于 EKF 算法与卫星导航的民航货运高精度定位系统设计

1.1 基于 EKF 的民航货运高精度定位系统模型

在多天线定姿的计算中需要确定各天线的坐标,解算天线之间的基线,并确定相应的坐标框架,最后再进行定姿解算。该算法目前在全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)中的处理领域被广泛应用。简单的 EKF 在应用扩展卡尔曼滤波时,如果要估计非线性系统的状态,通常需要将非线性系统进行线性化处理,然后再应用 EKF 算法。这是因为 EKF 的基本原理是将系统状态的先验和测量信息进行线性组合来获取后验估计。线性化过程通常通过使用一阶泰勒展开或雅可比矩阵来近似非线性系统。然后,使用线性化的模型来代替非线性系统,以便使用 EKF 进行状态估计。利用实时动态测量(Real Time Kinematic, RTK)技术进行定位时首先求解

模糊度浮点解,采用 EKF 对接收机的三维坐标、整周模糊度等未知参数进行估计^[12,13]。EKF 的运作模型如图 1 所示。

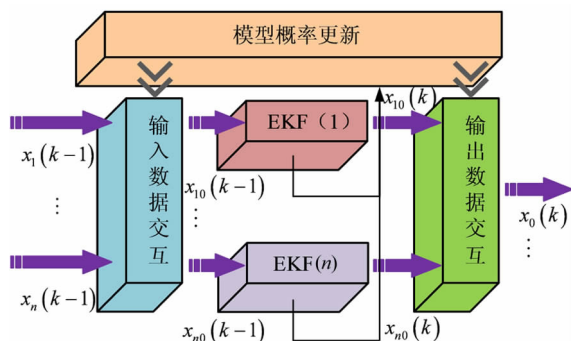


图 1 EKF 运作模型

图 1 中,该运作模型可以更好地完成定位。初始数据通过输入数据交互,进入 EKF 模型,再经由输出数据交互,最终得出最终数据,同时模型不断自更新。为了更好地完成定位任务,需要对接收机的三维坐标、整周模糊度等参数进行估计。在 EKF 模型中,通过不断地输入和输出数据,可以更加准确地估计接收机的三维坐标和整周模糊度,从而更好地完成定位任务。此外,在模型更新过程中,利用接收机的位置和速度等参数进行修正,可以更准确地估计接收机的位置和速度等参数,从而使货运定位系统更好地完成定位任务^[14]。EKF 模型的出现使得货运定位系统能够更准确地完成定位任务,使得货运定位系统更加完善。滤波增益矩阵,如式(1)所示。

$$K_k = P_k(-)H(\hat{x}_k(-)) \times [H(\hat{x}_k(-))P_k(-)H(\hat{x}_k(-))^T + R_k]^{-1} \quad (1)$$

式(1)中, K_k 为滤波增益矩阵, $+$ 、 $-$ 卡尔曼滤波测量更新前后, $H(x)$ 为偏导数矩阵, $R(x)$ 为协方差矩阵。载波相位测量值和伪距测量值,如式(2)所示。

$$\begin{cases} \Phi_i = (\Phi_{\rho,i}^{12}, \Phi_{\rho,i}^{13}, \Phi_{\rho,i}^{14}, \dots, \Phi_{\rho,i}^{1m})^T \\ P_i = (P_{\rho,i}^{12}, P_{\rho,i}^{13}, P_{\rho,i}^{14}, \dots, P_{\rho,i}^{1m})^T \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, $+$ 为载波相位测量值, P_i 为伪距测量值。GNSS RTK 模糊度解是高精度定位的前提,实时动态测量定位得到准确位置信息是保障。在模糊度解算中,由于系统的不确定性或噪声,可能会出现多个候选解。为了选择最可靠的解,需要进行解的可靠性检验。其中一种常用的方法是计算次小后验方差与最小后验方差之比,如式(3)所示。

$$R = \frac{(\hat{N}_2 - \hat{N})^T Q_N^{-1} (\hat{N}_2 - \hat{N})}{(\hat{N} - \hat{N})^T Q_N^{-1} (\hat{N} - \hat{N})} > R_{\text{thres}} \quad (3)$$

式(3)中, R 是比率因子,该因子与搜索结果的可信度密切相关, $\hat{N}_2$ 为次小固定解, $\hat{N}$ 是最小固定解^[10,11]。

1.2 基于卫星导航的民航货运高精度定位系统模型

GPS 空间系统以 1984 年世界大地坐标系 (WGS-84) 为参考, BDS 空间系统以 2000 国家大地坐标系 (CGCS2000) 为参考,这 2 个坐标系都属于地心地固系,在定义上非常接近,但存在参数差异。由于 BDS 和 GPS 的不同, BDS/GPS 组合有助于改善性能机会轨迹 (Performance Detection Overload, PDOP) 值,可以解决单系统中的卫星几何构型差或可见卫星数不足等问题^[12]。在卫星定位中,不论使用何种类型的卫星观测数据,都或多或少地会受多种因素的影响而出现偏差,并且这些偏差的程度不尽一致,有些偏差可以用技术方法加以解决,有些偏差则无法解决。在传输的过程中,因为接收器周围建筑物、地面或者其他障碍物的阻碍,受多种因素的影响,难以建立起一套完整的数学模型,因此,采用一套完整的数学模型对其进行校正是十分困难的。针对多径效应,通常采取一种预防措施,例如将接收器布置在相对开阔的空间,避免受障碍干扰,或使用具有良好屏蔽性能的接收器进行信号处理。卫星观测数据包括三种:编码伪距离观测数据、载波相位观测数据以及多普勒观测数据。编码伪距离观测数据的理论基础是对从发送到地面的距离进行估计。载波相位测定的基本理论是通过载波相位的测定来确定其在传输过程中的传输状态^[15,16]。多普勒法是通过多普勒频率偏移获得的数据,GNSS 信号结构如图 2 所示。

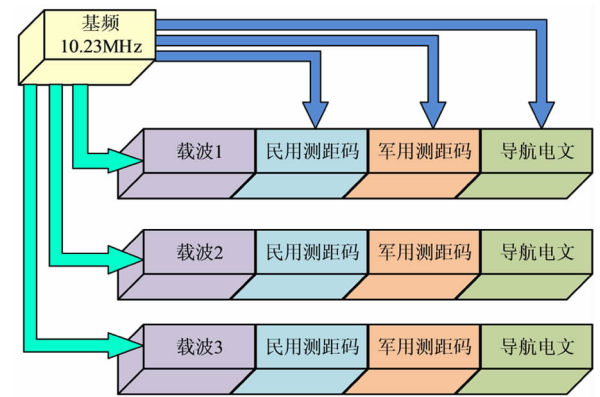


图 2 GNSS 信号结构

图 2 中,基于 GNSS 的差动建模方法能够很好地抑制或者减弱系统误差对卫星导航精度的影响,提高卫星导航精度。这是当前全球导航系统普遍采用的一种观测模式,其主要特点是对卫星信号进行微分处理。差分建模的基本功能是对卫星信号进行差分,以克服其自身的误差,进而得到更为准确的位置。另外,利用该方法可以有效地抑制卫星与接收端间的时延偏差,进而改善系统的定位准确度。利用该差动模型,可以有效地抑制接收端间的各种干扰,如接收端间的干扰、接收端间的干扰等。采用微分模式去除了误差、干扰,得到了更为准确的位置信息^[17]。民航高精度定位系统的应用场景图,如图 3 所示。

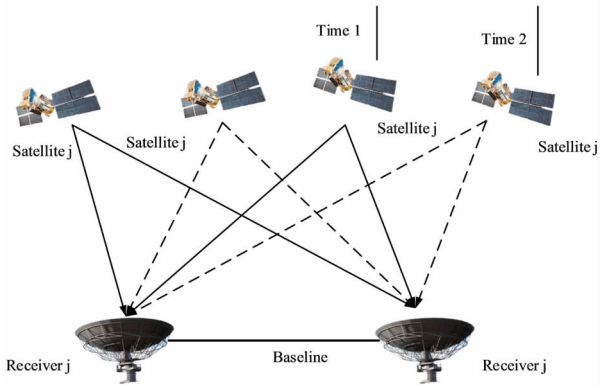


图 3 民航高精度定位系统的应用场景图

1.3 基于 EKF 和卫星导航的数据性能评估模型

一般而言,针对民航与非民航及货运与非货运的定位系统的性能需求,可以选择卫星可见性与 PDOP 值、模糊度固定率、定位精度、时间可用性与历元利用率等多个评估指标,这样就可以避免使用单一评估指标来评估卫星定位性能所带来的偶然性与不确定性。而为了对定位系统模型的性能进行评价分析,此次研究将引入误差、历元、模糊度等指标。用户等效测距误差是指接收机测量距离与真实距离之间的差异。精度因子用于描述卫星的几何分布对定位精度的影响。位置精度几何因子 (Position Dilution of Precision, PDOP) 是 DOP 中的一个指标,主要反映了卫星分布的水平几何因素对定位精度的影响。定位误差主要由用户等效测距误差 (URE) 与精度因子 DOP 决定,其中,位置精度因子 PDOP 不仅与卫星星座的几何构型有关系,而且还与所跟踪到的卫星数目有关系,PDOP 的大小是衡量卫星定位精度的一个重要指标,相对而言,PDOP 值越小,表明卫星星座几何构型越好。星座矩阵如式(4)所示。

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} a_{x1} & a_{y1} & a_{z1} & 1 \\ a_{x2} & a_{y2} & a_{z2} & 1 \\ a_{x3} & a_{y3} & a_{z3} & 1 \\ a_{x4} & a_{y4} & a_{z4} & 1 \end{bmatrix}$$

(4)

式(4)中, $a_i = (a_{xi}, a_{yi}, a_{zi})$ 为用户指向第 i 颗卫星的方向余弦向量。PDOP 计算式,如式(5)所示。

$$PDOP = \sqrt{D_{11} + D_{22} + D_{33}}$$

(5)

式(5)中, D_{ii} 是矩阵 $(\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1}$ 对角线第 i 个因素,PDOP 越小,几何构造越好,同时,在 RTK 测量中,仅当 PDOP 小于等于 6 时,卫星的观测状态才被认可。其中,整周模糊度是一个未知量,它与接收机位置、卫星位置以及开始观察的历元相关,而且它是一个整数。在高精度定位过程中,整周模糊度的准确测定是一个非常重要的问题,它直接关系到能否准确定位。模糊度固定率为固定解占有所有定位解的百分比,是判断 RTK 算法结果优劣的重要指标。表达式如式(6)所示^[18]。

$$MH = \frac{G}{D} \times 100\%$$

(6)

式(6)中,MH 表示模糊度固定率, G 和 D 分别表示固定解和所有的定位解。历元可利用率是指在有定位解的历元数量与实际观测的历元数量之间的比例,表达式如式(7)所示^[19-20]。

$$LY = \frac{DN}{SDN}$$

(7)

式(7)中,LY 表示历元可利用率,DN 和 SDN 分别表示有定位解的历元数量与实际观测的历元数量。在实际观测的历元中,有些历元所观测到的卫星数量不够,无法完成定位解算,那么这些历元就会被取消。历元可利用率愈高,则表示在观察期间,观察值的利用度愈高,且其正确性愈佳^[21]。由此,基于 EKF 和卫星导航的数据性能评估模型,如图 4 所示。卫星导航收发模块采用了高增益,低噪声的相控阵天线。其主要的空间辐射特性包括高方向性以及良好的天顶角覆盖功能。射频链主要通过 L1 和 L2 载波将导航信号从卫星传输到地面,而信号的载频分别为 1575.45 MHz(L1 载波)和 1227.65 MHz(L2 载波)。对于航空接收模块,采用了宽带天馈天线,其优点包括宽带和高收发灵敏度。空间辐射特性主要为全向性,以确保飞机在任何方位角和仰角下都能收发信号。射频链度采用的是 UHF 带,信号载频则根据具体的通信要求和频谱分配进行确定。为地面收发模块选择了高增益抛物面天线,以获得更高的接收灵敏度和更低的系统噪声。它的空间辐射特性包括了高方向性

和稳定的增益性能。在地面端,使用的射频链同样为 UHF 带,信号载频则与航空模块兼容。在收到信号后进行多步解码、消噪、解压和解调处理,高精度的定位信息最后通过解算软件进行后处理生成。这就是关键物理信号处理组件及处理流程的核心组成部分。由此,基于 EKF 和卫星导航的数据性能评估模型,如图 4 所示。

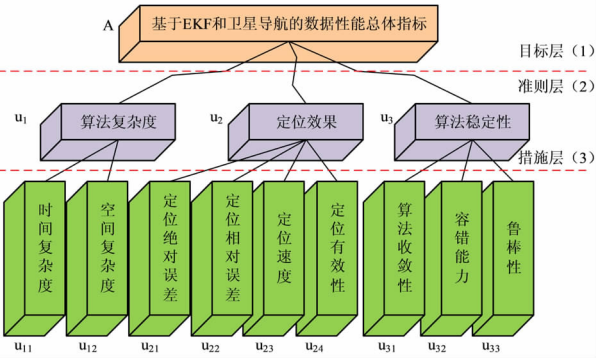


图 4 基于 EKF 和卫星导航的数据性能评估模型

图 4 中,基于 EKF 和卫星导航的数据性能评估模型分为三个层面,分别是目标层、准则层和措施层。首先,针对计算时间复杂度和空间复杂度对准则层的算法复杂度进行汇总,从而得出定位速度、定位相对误差以及定位有效性。其次,针对这些指标,可以制定出相应的评价标准,以评估模型的性能。最后,在实际应用中,可以根据这些指标来调整和优化模型的参数和算法,以提高模型的性能。而算法稳定性则是用算法收敛性、算法鲁棒性和容错能力进行体现,以此来评估模型的准确性和可靠性。在实际应用中,这些指标可以用于评估数据性能的好坏,以便更好地制定优化方案。民航高精度定位系统方法的技术流程图,如图 5 所示。

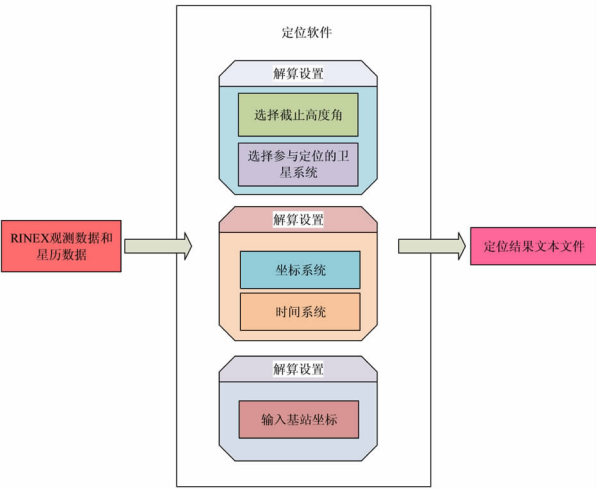


图 5 民航高精度定位系统方法的技术流程图

图 5 中,首先,将 RINEX 格式的原始数据导入到选择的解算软件中。RINEX 格式被广泛接受为卫星导航数据的标准格式,可以被各种软件读取和处理。其次,在软件中设置卫星截止高度角和选定具体的卫星系统,以进一步定制和优化定位解算过程。接着,将坐标系统和时间系统进行设置。这是对解算过程的重要调整,旨在提高定位的准确性和可靠性。最后,输入基站的实际坐标值。这为 RTK 后处理解算提供了必需的参考信息。经过上述步骤,即可进行 RTK 后处理解算。这个过程将生成具体的定位信息,从而实现民航高精度定位系统。

2 基于 EKF 算法与卫星导航的民航货运高精度定位系统构建的分析

2.1 高精度定位系统模型在民航货运领域的分析

基于 R 语言编写了解算 RTK 性能软件,该软

件能从多个方面对 RTK 定位进行性能分析,包括卫星可见性、PDOP 值、模糊度固定率、定位误差、系统内符合精度、系统外符合精度以及时间可用性。其中,静态基线性能分析内容包括定位误差、模糊度固定率、定位速度以及定位有效性;而动态基线分析内容则包括系统内符合精度和系统外符合精度,以及时间可用性。此外,该软件还可以分析 RTK 定位的卫星可见性、PDOP 值、模糊度固定率以及定位误差,并根据这些数据来评估 RTK 定位的性能。对应参数,如表 1 所示。

表 1 中,卫星导航系统为 A,频点为 B,频率(MHz)为 C,波长(cm)为 D,PTK 解算设置为 E,静态基线(5 m)为 F,动态基线为 G。数据采集点为 H,高度截止角 J,卫星观测值信号为 K,使用星历为 L,采集频率为 M。EKF 的性能分析如图 6 所示。

表 1 高精度定位系统模型参数

A	B	C	D	E	F	G
BDS	B1	1560.095	19.24	H	中国五华山山顶	中国五华山山顶
	B2	1206.146	24.81	J	10°	10°
	B3	1267.524	23.62	K	BDS;B1/B2;GPS;L1/L2	BDS;B1/B2;GPS;L1/L2
GPS	L1	1576.426	19.01	L	广播星历	广播星历
	L2	1228.586	24.40	M	1 Hz	1 Hz
	L3	1178.453	25.53	/	/	/

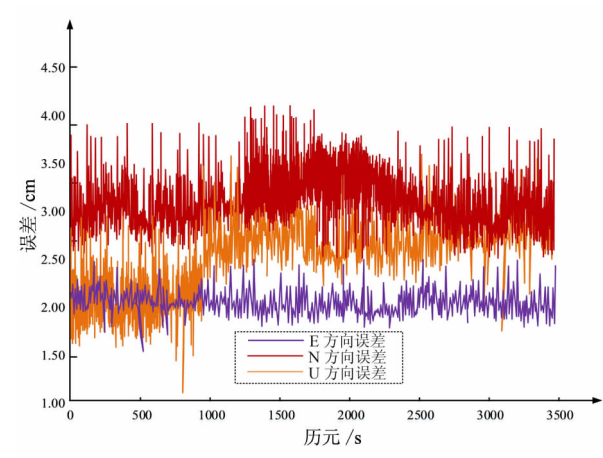


图 6 EKF 性能分析

图 6 中,通过对实测数据进行分析,可见,在 E 方向上,定位误差最小、最稳定,在 N 方向上,误差最大,在 U 方向上,误差介于二者之间,但极不稳定,变化剧烈。随着历元的增加,从 0 到 3500 s,紫色波动显示的 E 方向误差,一直维持在 2.00cm 左

右,上下波动;红色波动显示的 N 方向误差,存在大范围的浮动,在时间推移下,浮动范围在 2.5~4.3cm 之间;而黄色波动显示的 U 方向误差,上下波动虽不常见,但存在一个问题,即它容易出现断崖式的误差抬升。研究团队可以通过误差图横坐标来选择相应的历元范围,从而观察相应历元范围之间的定位误差。这有助于确定定位误差在不同历元范围之间的分布情况,以及定位误差与观测值之间的关系。基于 EKF 和卫星导航的数据性能评估模型分为三个层面,分别是目标层、准则层和措施层。目标层是指定位误差与观测值之间的关系,旨在为定位误差分析提供更好的支持。通过对算法复杂度进行汇总,可以更好地理解定位误差与观测值之间的关系,并为定位误差分析提供更好的支持。

2.2 基于 EKF 算法与卫星导航的民航货运高精度定位系统模型测验效果分析

最后的卫星定位结果仅截取了半个观察周期,并以地面坐标系统为站点中心,由 E、N、U 三个方

位进行显示。在这段时间内,卫星会持续运行,因此,它会通过不同的角度来反映观测结果。以 E 方向为例,卫星在一段时间内会绕地球运行一周,因此可以通过观察 E 方向来获得准确的卫星位

置。根据不同模式 RTK 定位误差,能发现,三种定位模式的 RTK 定位精度都达到了公分级别,这表明不同模式下的 RTK 定位精度都能够达到厘米级。如图 7 所示。

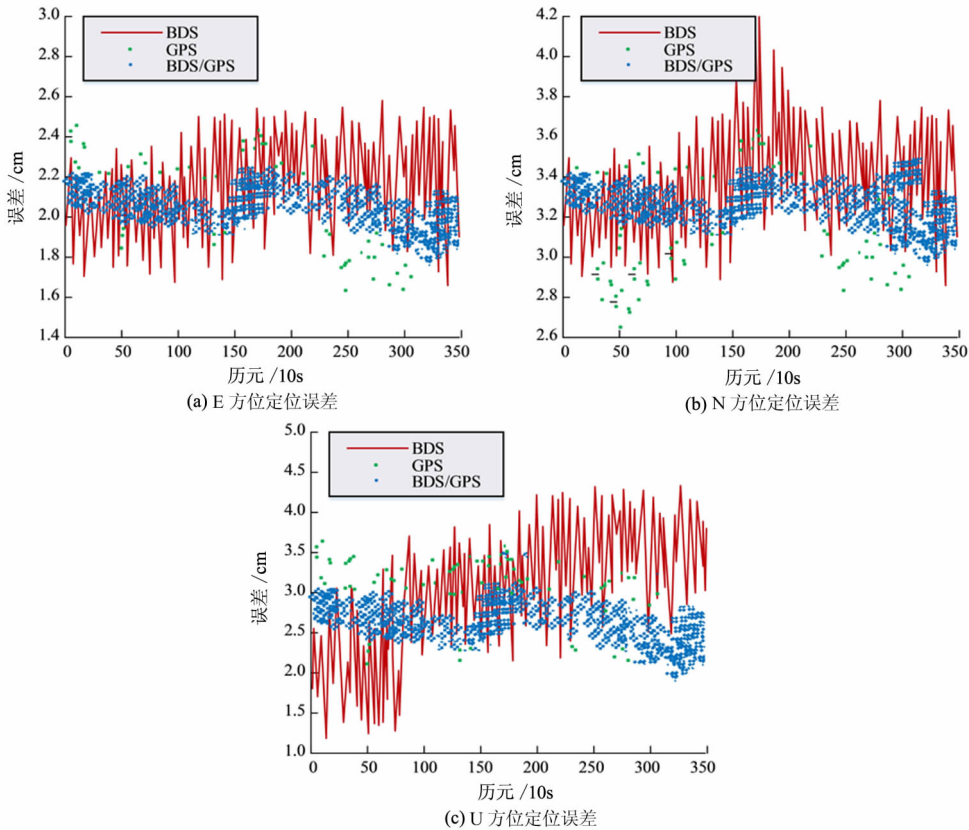


图 7 三种定位模式的定位误差

图 7 中,以坐标系为站心坐标系,从 E、N、U 三个方向来显示,可以看出 E 方向的定位误差最小,其次是 N 方向,而 U 方向的误差最大。因此,RTK 定位精度是由不同模式下的定位精度决定的,这也表明了不同模式下的 RTK 定位精度的差异。在三种方式中,BDS 在 E 向精度上优于 GPS,而 N 向和 U 向精度上则稍逊一筹,但 BDS/GPS 同时存在时,三种方式的精度都较高。在比特模型中,三个方位的稳定性最佳。而三个方向定位的模糊度,如图 8 所示。

图 8 中,单从模糊度判断,结果表明,E 向的模糊度最小,N 向的模糊度次之,U 向的模糊度最大。结果显示,在 RTK 中,模糊程度取决于各种模型的模糊程度,而这种模糊程度又存在着一定的差别。三种模式中,BDS 已向定位精度高于 GPS,N、U 方向略低于 GPS,但是 BDS 与 GPS 组合定位,三种模式定位精度均高于 GPS。这说明 BDS/GPS 组合因为卫星星座的差异,使用虚拟卫星增强技术(如卫星姿态控制技术、卫星分布优化等)也

可以改善卫星几何构型,进一步减小 PDOP 值。首先,对于刚体移动物体在地球上的定位,单个卫星导航系统往往在卫星几何构型、可见卫星数等方面存在限制。其次,有助于改善 PDOP 值,提高了整体卫星系统的可用性和稳定性。总体而言,BDS/GPS 组合是一种综合性的卫星导航定位方案,具有多种优势,既能够提高定位准确度,又能够增强整体卫星系统的可用性和稳定性。

3 结 论

提出了一种结合 EKF 算法与卫星导航技术的民航货运高精度定位解决方案。确保了精确地获取和处理地面车辆的位置信息,能够实现高精度的定位。优点为通过卫星导航技术有效地改善并解决了误差问题,利用 EKF 算法的滤波处理显著优化了定位精度和模糊度解算。根据实验结果,BDS/GPS 的组合定位方法在 E 向精度上浮动 2.65~2.75,明显优于单独 GPS 系统的定位,这进

一步证明这套系统能够显著提升定位精度。虽然在 N 向和 U 向精度方面存在部分差距,这可能是由于不同系统的测量误差带来的影响。但在 C/A 码测度上,BDS/GPS 的组合定位方法仍表现出了良好的定位精度,为 2.35~2.48。总结而言,该 EKF 算法与卫星导航技术相结合的民航货运高精度定位系统,是一种高效、可靠、准确的高精度定位解决方案,有着广泛的应用场景和显著的潜力。同时,可帮助设备开发团队优化软件开发和校准流程,进一步提升解算质量和效率,为民航行业带来更优质的定位服务。

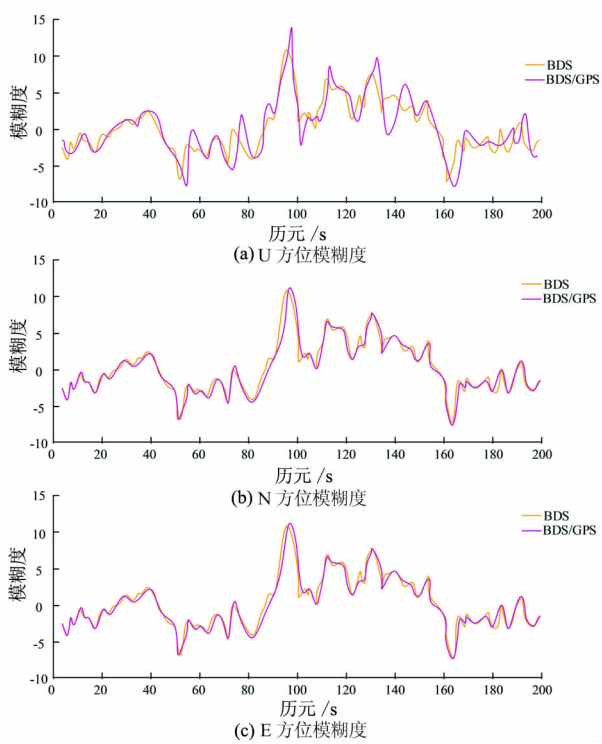


图 8 三种定位模式的模糊度比对

参考文献

[1] 刘金海,张睿,涂锐,等.北斗三号试验卫星对短基线 RTK 定位性能影响分析[J]. 导航定位学报,2018,6(4):42-45.

[2] 蔡洪亮,孟铁男,耿长江,等.北斗三号全球导航卫星系统服务性能评估:定位导航授时、星基增强、精密单点定位、短报文通信与国际搜救[J]. 测绘学报,2021,50(4):427-435.

[3] 吴汤婷,刘丽晶,陈江楠,等.低成本 u-blox 接收机单频 BDS RTK 定位性能评估[J]. 东华理工大学学报(自然科学版),2020,43(2):170-173.

[4] 刘海波,杨杰,张旭,等.复杂环境下 BDS+GPS 系统 RTK 短基线定位算法研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2022,44(3):451-460.

[5] 祝会忠,李军,王楚扬,等.北斗卫星导航系统双差网络 RTK 方法[J]. 测绘科学,2017,42(12):1-13.

[6] 罗卫国.基于北斗的网络 RTK 实时定位服务分析[J]. 北京测绘,2019,33(7):787-791.

[7] 倪博文.基于 STK 的典型机场 BDS 性能分析[J]. 全球定位系统,2020,45(05):46-50.

[8] 牛慧军,杨开伟,邱利军.中长基线 RTK 定位算法研究及性能验证分析[J]. 电子测量技术,2020,43(10):174-178.

[9] 李团,章红平,牛小骥等. RTK/INS 紧组合算法在卫星数不足情况下的性能分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2018,43(03):478-484.

[10] 罗杰.不同截止高度角下 BDS-2/BDS-3 短基线 RTK 定位性能分析[J]. 地理空间信息,2021,19(11):44-47.

[11] XIONG J , HAN F . Positioning performance analysis on combined GPS/BDS precise point positioning [J]. Geodesy and Geodynamics,2020,11(1):78-83.

[12] 王剑,周子健,姜维,等. GPS/BDS 联合解算的列车高精度实时定位方法[J]. 交通运输工程学报,2021,21(5):286-296.

[13] 倪育德,陈君,蔚保国,等.基于 STK 的 BDS 星座仿真和性能分析[J]. 计算机测量与控制,2016,24(1):281-288.

[14] 沈笑云,保宁鑫,焦卫东. BDS RTK 定位性能分析[J]. 信号处理,2019,35(8):1392-1401.

[15] 温泉. GPS 定位系统和北斗导航系统在民航中的应用[J]. 科技创新与应用,2019,284(28):168-169.

[16] GONG X, GU S, LOU Y , et al. Research on empirical correction models of GPS Block IIF and BDS satellite inter-frequency clock bias[J]. Journal of Geodesy, 2020, 94(3):1-11.

[17] 张立川,屈俊琪,潘光,等.基于几何解释的集群 AUV 协同定位误差及编队构型分析[J]. 西北工业大学学报,2020,38(4):755-765.

[18] 谭涵,吴家齐.星间单差模糊度固定的低轨卫星精密定轨精度分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2022,47(9):1460-1469.

[19] 郭磊,王甫红,桑吉章,等.一种新的利用历元间位置变化量约束的 GNSS 导航算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2020,45(1):21-27.

[20] TAN W , YUAN X , WANG J , et al. A fatigue-conscious dual resource constrained flexible job shop scheduling problem by enhanced NSGA-II: An application from casting workshop[J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 1(160):160.

[21] YANG H , FENG Y . A Pythagorean fuzzy Petri net based security assessment model for civil aviation airport security inspection information system[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2021, 36(5):2122-2143.