
无人机导航与定位问题综述

摘要：近几年来由于无人机（Unmanned Aerial Vehicle）具有体积小、机动性强、易操作性等优点，使得越来越多的行业都使用无人机来进行相应的作业。对无人机的室外控制需要通过卫星导航系统获得其所在位置和方向，这对无人机定位精度提出了很高的要求。因此本文将围绕卫星定位问题，对各种目前基于 Kalman 滤波方法提高无人机导航与定位精度的相关研究进行总结和评价，并指出值得进一步研究的地方。

关键词： 无人机；定位；卫星导航；

1 引言

随着科学技术的发展和工业化的需求，无人机逐渐应用于各行各业，并且也进入了普通消费者手中。无人机提高了许多行业的生产效率，比如将无人机应用于建筑工地的 3D 建图、农业植保等。

无人机由飞行器机架、飞行控制系统、推进系统、遥控器、遥控信号接收器和云台相机等 6 大构成部分，其中飞行控制系统（Flight Control System）简称飞控，一般内置了控制器、陀螺仪、加速度计和气压计等传感器。无人机便是依靠这些传感器来稳定机体，再配合 GPS 及气压计数据，便可将无人机锁定在指定的位置和高度。

在无人机的使用中一般需要远程控制无人机的飞行。远程操控无人机飞行不同于驾驶汽车，虽然可以通过机载摄像头获得周围环境状态，但是据此操控无人飞机还是具有一定的危险性的，比如可能因为位置不准确与周围建筑物发生碰撞等。通过提高无人机的定位精度，可以通过比对地图中的所在位置与其他建筑物达到避障功能，同时也可以提高植保作业的效率

无人机一般通过全球导航卫星系统进行定位。使用卫星导航系统定位会产生误差，通常是因为外部误差（电离层、对流层时延）和系统性误差（参考坐标系和实际物理坐标误差，地图标点误差等）所导致的。因为外部误差是随机的而且又符合一定的概率分布，所以为了降低上述误差对定位结果的影响提出了 Kalman 滤波方法。在 Kalman 滤波方法的基础上又提出了扩展 Kalman 滤波方法（EKF），粒子滤波方法（PF）等。

2 GNSS 发展现状

GNSS 即全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System），是北斗（中国）、GPS（美国）、伽利略（欧洲）、GLONASS（俄罗斯）卫星导航系统的统称。

北斗卫星导航系统（BDS）是中国自行研制的全球导航卫星系统。自 1994 年正式启动北斗卫星导航系统建设工程至今在轨卫星达到 39 颗，在 2020 年再发射 2~4 颗卫星后，北斗全球系统将全面完成。北斗系统的定位精度 10 米，测速精度 0.2 米/秒，授时精度 10 纳秒。北斗系统具有以下特点：一是北斗系统空间段采用三种轨道卫星组成的混合星座，与其他卫星导航系统相比高轨卫星更多，抗遮挡能力强，尤其低纬度地区性能特点更为明显。二是北斗系统提供多个频点的导航信号，能够通过多频信号组合使用等方式提高服务精度。三是北斗系统创新

融合了导航与通信能力，具有实时导航、快速定位、精确授时、位置报告和短报文通信服务五大功能[北斗卫星系统介绍[39][40]。

GPS，即全球定位系统，是由美国在 20 世纪 70 年代开始研制，于 1994 年全面建成，具有在海、陆、空进行全方位实时三维导航与定位功能的新一代卫星导航与定位系统。该系统包括太空中的 31 颗 GPS 人造卫星；地面上 1 个主控站、3 个数据注入站和 5 个监测站，及作为用户端的 GPS 接收机。最少只需其中 4 颗卫星，就能迅速确定用户端在地球上所处的位置及海拔高度。

伽利略卫星导航系统（Galileo satellite navigation system），是由欧盟于 199 年 2 月公布，主要原因是摆脱欧洲对 GPS 的依赖程度和打破垄断。该系统全部卫星数量为 30 颗（24 颗工作卫星，6 颗备份卫星），计划于 2020 年全部发射部署完毕。

俄罗斯全球导航卫星系统（GLONASS），是由前苏联于 80 年代开始建设的与美国 GPS 系统相类似的卫星定位系统。GLONASS 系统单点定位精度水平方向为 16 米，垂直方向为 25 米。

3 卫星导航定位基本原理

无人机定位是通过其携带的 GPS 或北斗定位模块接收卫星信号，通过相应计算和转换获得当前位置信息[5]。一般通过载波相位测量法进行定位，其大致原理如下：

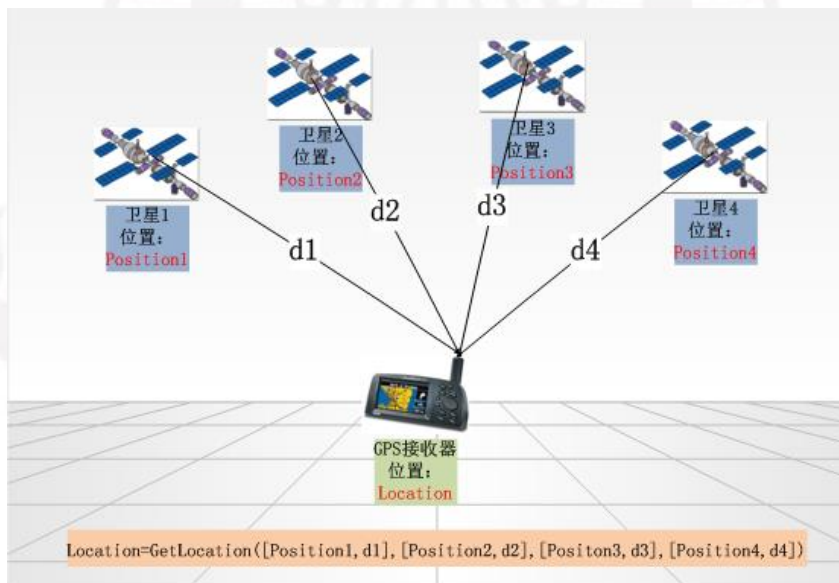


图 1

如图 1 所示，图中的 GPS 接收器位置为当前要确定位置的设备即无人机，卫星 1、2、3、4 为此时刻可以接收到信号的四颗卫星（在某一时刻定位模块可能接收到 4 颗以上卫星的信号，但是在少数情况下会接收到少于 4 颗卫星的信号则对将无法准确的定位）。其中 Position 1 为卫星 1 的当前位置（空间坐标，已知），d1 为卫星 1 与 GPS 接收器之间的距离（已知），Location 为要定位的卫星接收器的位置（待求）。

Position1 的位置信息从何而来？运行于宇宙空间的 GPS 卫星每时每刻都在不间断的通过卫星信号向全世界广播自己的当前位置坐标信息。任何一种类型的

GPS 接收器都可以通过天线接收到此类信号并且识别这些信号。

D1 距离信息从何而来? 在 GPS 卫星广播自己位置的同时, 也会附加上该数据包发出时的时间戳。GPS 接收器用当前时间和时间戳进行比较获得数据包在空中传输所用时间 t_1 , 数据包的理想速度是光速 c , 则获得距离 $d_1 = t_1 * c$ 。

如何获得 Location? 在三维空间中可以通过 3 对(Position, D)数据确定一个点。如公式 1 所示。

$$\begin{cases} d_1^2 = (X - X^1)^2 + (Y - Y^1)^2 + (Z - Z^1)^2 \\ d_2^2 = (X - X^2)^2 + (Y - Y^2)^2 + (Z - Z^2)^2 \\ d_3^2 = (X - X^3)^2 + (Y - Y^3)^2 + (Z - Z^3)^2 \end{cases} \quad \text{公式 1}$$

在上文中指出必须要 4 颗卫星才可以获得准确的定位结果, 但是公式 1 只需要 3 颗卫星就可以进行计算。因为 GPS 接收器的时间与导航卫星的时间可能会有不同步现象, 所以计算出的距离 d 与实际距离相比具有相应的误差, 并且这个误差是很大。同时速度 c 也会受到空中电离层的影响也会有误差产生。因此为了降低上述误差就导入了第四颗卫星数据进行计算 (在实际使用中, 一般进行位置计算的卫星数量大于 4 颗)。

4 研究进展

卡尔曼滤波 (Kalman filtering) 是一种利用线性系统状态方程, 通过系统输入输出观测数据, 对系统状态进行最优估计的算法。由于观测数据中包括系统中的噪声和干扰的影响, 所以最优估计也可看作是滤波过程。

无人机进行定位时首先接收由北斗或 GPS 卫星发送至地面的广播信息, 接收机处理接收到的信息。信息中包括定位卫星当前位置、接收机与卫星之间的距离, 待求信息为接收机位置。由于电离层延迟、多路径效应、接收机钟误差等原因接收机与卫星之间的距离会与实际真实距离有误差, Kalman 滤波和其他相关算法就是在消除该误差对定位结果的影响。

4.1 基于 GPS/北斗的室外无人机定位

Arreola L 等人[1]使用 Kalman 滤波算法将导航卫星数据和摄像头数据相结合提高了无人机悬停作业和轨迹跟踪作业的精度。在摄像头数据中主要依靠稠密光流算法计算无人机移动的矢量方向和矢量位移。通过对比实验, Arreola L 等人提出的方法将悬停作业精度提高了 0.3 米左右, 轨迹跟踪作业精度提高了 1 米左右。但是作者提出的方案对摄像头所拍摄地面有很高的要求。在纹理不清晰 (比如水面, 玻璃地面) 或者无光照的情况下对定位精度没有有效的提升。

在无人机飞行时将不可避免的进入 GPS 信号微弱区域, 此时只能依赖 INS (惯性导航系统) 进行定位。INS 在运行时会有误差的累计, 所以持续一段时间后, 定位误差会显著增大。Zhou Y 等人[6]提出将卡尔曼滤波和反向传播神经网络结合的方法, 当 GPS 信号不可用时对系统进行补偿。通过仿真实验结果可以看出作者提出的方法对定位精度的提升有很大的改善。

Salma Zainab Farooq 等人[15]在北斗单频率接收机上进行实验比较了 EKF 和最小二乘方法在不同固定地点的定位结果, 在实验结果中可以看到 EKF 方法较

于最小二乘方法将定位精度提高了 1~3 倍。EKF 即扩展卡尔曼滤波方法，其中思想是将非线性系统线性化后再做 Kalman 滤波处理，EKF 是局部线性的模型。

Kalman 滤波器在预测模型不能很好估计状态向量时可能出现计算错误，Xingjuan Wang 等人[4]在 Kalman 滤波算法中加入自适应方法(adaptive approach)提出了一种自适应健壮 Kalman 滤波算法，根据模拟实验可以看出算法可以很好的将定位误差控制在可接受范围内。

Yufu Guo[33]等人针对精确点定位 (PPP) 信号衰减和卫星缺失情况下的 Kalman 滤波发散问题提出了一种带衰减因子的卡尔曼滤波方法，算法的基本思想是当滤波模型产生误差时，增加新观测值的权值，同时减少旧观测值的权重以防止滤波发散。

无人机在室外进行飞行作业时，不可避免的将进入比较复杂的环境导致 GPS 信号消失或者变弱使无人机无法获得准确的定位信息。因此 Bao S 等人[3]基于 FKF (Federated Kalman Filter) 提出了空气动力模型/GPS/INS 容错导航方法，其中使用卡方检验 (Chi-square Test) 检测是否有故障发生。气动模型辅助导航是一种不需要 GPS 就可以正常工作的新型导航技术。当 GPS 或空气动力模型其中一个发生错误时，系统将对其进行隔离。通过实验可以看出无人机系统容错能力得到很大的提高，提高了无人机导航精度。并且不需要附加其他额外的传感器，具有很好的实际应用价值。

无人机使用一般使用 GPS/INS 进行导航和定位，INS 系统的误差随着时间逐渐累积。INS 系统可以计算无人机的飞行速度、姿态和位置信息。Zhang Y[8]等人对 Kalman 滤波方法进行了改进，其中使用 GPS 信号对 INS 系统提高有效信息达到降低 INS 系统累积误差的目的。

4.2 其他定位问题

在无人机飞行作业时，GPS/北斗信号如果丢失时间过久会使无人机操作变得十分危险。INS 系统可以在一段时间内提供精确的较高的定位，因此如何使用其他信息对无人机进行定位是一个具有挑战性的问题。其中合适的视觉系统可以与 GPS 和 INS 系统相结合，作为无人机轨迹状态估计的补充定位系统。该视觉系统可以增强 GPS 中断情况下的状态估计鲁棒性。大多数无人机的有效载荷包中都有摄像机。该摄像机可用于捕获覆盖区域的图像，这些图像可与无人机系统中存储的地理定位的航空(或卫星)图像相关联。然后通过相关过程估计无人机的位置。

Braga J R G 等人[26]针对 GNSS 导航定位系统失效问题，提出了一种基于航拍图像、飞行时采集图像和航拍地理坐标图像的无人机位置匹配系统。图像匹配通过神经网络实现，网络结构通过多粒子碰撞算法(MPCA)确定。该算法的优点是在低功耗、低成本的计算上正常运行，可以有效降低无人机机载计算机工作时对续航的影响。

Goforth H 等人[10]提出使用无人机摄像头拍摄的图像与已有卫星图像进行比对获得无人机位置，难点在于无人机拍摄的图像与卫星图像可能会有光照、季节和角度等变化。通过飞行试验，在直线飞行距离为 600 米时平均 2D 欧几里得误差是 25 米，平均高度误差为 7.7 米。作者提出的方法与 GPS 定位相比误差变得更大，但是对无人机的安全飞行提供了更多的保障。并且当 GPS 信号变差时

可以使用此方法进行定位误差的修正。

GNSS 定位技术在室内因为信号丢失使得无人机无法获得安全保障，使用视觉方式需要昂贵的计算设备进行运算。因此 Tiemann J 等人[18]将超宽带定位系统 (UWB, ultra-wideband) 应用于无人机的室内定位。超宽带定位技术是采用超带宽无线通信的定位技术，其中超带宽通信是指通过发送和接收纳秒或纳秒级以下的极窄脉冲传输数据，从而具有 GHz 带宽的无线通信技术。最终实验结果显示该系统在水平面的定位精度未 10 厘米，并且可以将位置保持在半径 50cm 内。

同步定位与定位(SLAM)是 GPS 信号消失环境下的另一种导航技术[34][35]。SLAM 是一种技术，用于定位环境中的机器人(空中或地面的)，同时绘制它的地图。SLAM 技术不需要事先了解机器人所穿越的环境。然而，为了减少位置估计误差，SLAM 要求机器人返回之前访问过的位置。

为了降低对机载电脑性能的要求，光流算法应用于无人机的定位问题。这个方法是通过观察蜜蜂的所获得的，蜜蜂使用光流进行着陆或者飞行速度的调节和避障。例如，来自 BYU[36]的 MAGICC 实验室对多个光学鼠标传感器进行了修改并安装在无人机上，以测量沿不同视角的光流。光学流量测量用于距离估计，以实现使用微无人机[37]在山谷内避障和导航。类似地，光流传感器连同陀螺仪已被用于支持 30 克微型无人机[6]的室内导航。此外，CentEye 公司开发了用于实现高度保持和避障[38]的视觉芯片。综上所述，目前关于光流的文献大多使用简单的 1D 摄像机或特殊的光流传感器。在实际飞行中，通过常用的数字摄像机来获取光流的研究较少。这部分是由于难以将光流与旋转/平移速度和验证距离信息整合在一起。更重要的是，在光流成为室内外导航的可靠来源之前，需要对其精度进行系统的定量分析。在系统校准后，通过随机滤波器与 INS 和距离测量融合后，光流可用于速度、方向和距离估计。这种/INS 系统有很大的潜力支持小型或微型无人机在不依赖 GPS 的情况下进行近距离导航，类似于昆虫的视觉导航系统。

5 结论

无人机的定位问题可以主要分为室内定位、室外定位。室外定位一般基于 GPS/北斗进行定位。室内定位一般使用摄像头、激光雷达和超声波进行定位。

在室外定位时需要考虑 GPS 信号丢失或者 GPS 信号变差的问题，为了提高无人机的可靠性基于 Kalman 滤波方法结合其他传感器信息是一个良好的解决方案。由 Goforth H 和其他学者提出的基于比对卫星图片进行定位对无人机定位方案提供了更多的可能。室内定位由于 GPS/北斗信号无法正常接收，所以一般都是基于视觉或者激光雷达测距进行定位。

随着北斗三号全球系统核心星座部署完成，我们相信在不久的将来无人机的室外定位将变得更加精准，无人机室外飞行将变得更加安全和可靠。

参考文献

- [1] Arreola L, de Oca A M, Flores A, et al. Improvement in the UAV position estimation with low-cost GPS, INS and vision-based system: Application to a quadrotor UAV[C]//2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). IEEE, 2018: 1248-1254.
- [2] ur Rahman S, Kim G H, Cho Y Z, et al. Positioning of UAVs for throughput maximization in software-defined disaster area UAV communication networks[J]. Journal of Communications and Networks, 2018, 20(5): 452-463.
- [3] Bao S, Lai J, Chen Z, et al. Aerodynamic model/INS/GPS failure-tolerant navigation method for multirotor UAVs based on federated Kalman Filter[C]//2017 Chinese Automation Congress (CAC). IEEE, 2017: 1121-1125.
- [4] Wang X, Liang M. GPS positioning method based on Kalman filtering[C]//2018 International Conference on Robots & Intelligent System (ICRIS). IEEE, 2018: 77-80.
- [5] 王敬平, 姜鑫, 褚少鹤, 等. 北斗卫星导航系统定位精度研究[J]. 软件, 2019, 40 (10): 152-154.
- [6] Zhou Y, Wan J, Li Z, et al. GPS/INS integrated navigation with BP neural network and Kalman filter[C]//2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). IEEE, 2017: 2515-2520.
- [7] 陈文静. 多旋翼无人飞行器气动模型/惯性/GPS 容错导航技术[D].南京航空航天大学,2017.
- [8] Zhang Y, Wang H, Wang H. Integrated navigation positioning algorithm based on improved Kalman filter[C]//2017 International Conference on Smart Grid and Electrical Automation (ICSGEA). IEEE, 2017: 255-259.
- [9] Huang S, Huang J, Tang D, et al. Research on UAV Flight Performance Test Method Based on Dual Antenna GPS/INS Integrated System[C]//2018 IEEE 3rd International Conference on Communication and Information Systems (ICCIS). IEEE, 2018: 106-116.
- [10] Goforth H, Lucey S. GPS-Denied UAV Localization using Pre-existing Satellite Imagery[C]//2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2019: 2974-2980.
- [11] Kwon H, Sharma R, Yoder J, et al. Robust mobile ground target localization using ground image features with UAV position compensation techniques[C]//2012 12th International Conference on Control, Automation and Systems. IEEE, 2012: 454-458.
- [12] Vanegas F, Gonzalez F. Uncertainty based online planning for UAV target finding in cluttered and GPS-denied environments[C]//2016 IEEE Aerospace Conference. IEEE, 2016: 1-9.
- [13] Marcon P, Janousek J, Kadlec R. Vision-Based and Differential Global Positioning System to Ensure Precise Autonomous Landing of UAVs[C]//2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama). IEEE, 2018: 542-546.
- [14] Li D, He G, Wu C, et al. Algorithm for autonomous navigation of mobile robot measurements based on Beidou/laser radar[C]//2017 2nd Asia-Pacific Conference

-
- on Intelligent Robot Systems (ACIRS). IEEE, 2017: 305-309.
- [15] Farooq S Z, Hong X, Yang D, et al. Point Positioning using Extended Kalman Filtering in Single Frequency Beidou Receivers[J]. 2018 Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation and Location-Based Services (UPINLBS), 2018: 1-5.
- [16] Hajiyeve C, Cilden-Guler D, Hacizade U. Two-Stage Kalman Filter for Estimation of Wind Speed and UAV Flight Parameters based on GPS/INS and Pitot Tube Measurements[C]//2019 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST). IEEE, 2019: 875-880.
- [17] Kutsenko O V, Ilytska S I, Kondratyuk V M, et al. Unmanned aerial vehicle position determination in GNSS landing system[C]//2017 IEEE 4th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD). IEEE, 2017: 79-83.
- [18] Tiemann J, Schweikowski F, Wietfeld C. Design of an UWB indoor-positioning system for UAV navigation in GNSS-denied environments[C]//2015 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). IEEE, 2015: 1-7.
- [19] Perez-Grau F J, Ragel R, Caballero F, et al. An architecture for robust UAV navigation in GPS-denied areas[J]. Journal of Field Robotics, 2018, 35(1): 121-145.
- [20] Pan Y, Bhargava B, Ning Z, et al. Safe and efficient UAV navigation near an airport[C]//ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2019: 1-6.
- [21] Peng X Z, Lin H Y, Dai J M. Path planning and obstacle avoidance for vision guided quadrotor UAV navigation[C]//2016 12th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA). IEEE, 2016: 984-989.
- [22] Balamurugan G, Valarmathi J, Naidu V P S. Survey on UAV navigation in GPS denied environments[C]//2016 International conference on signal processing, communication, power and embedded system (SCOPE5). IEEE, 2016: 198-204.
- [23] Stavros Timotheatos, Stylianos Piperakis, Antonis Argyros. Vision Based Horizon Detection for UAV Navigation. International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region. Springer, 2018:181-189.
- [24] Popov A, Miller A, Miller B, et al. Optical flow and inertial navigation system fusion in the UAV navigation[J]. Unmanned/Unattended Sensors and Sensor Networks XII, 2016, 9986: 998606.
- [25] Pham H X, La H M, Feil-Seifer D, et al. Autonomous uav navigation using reinforcement learning[J]. arXiv preprint arXiv:1801.05086, 2018.
- [26] Braga J R G, Velho H F C, Conte G, et al. An image matching system for autonomous UAV navigation based on neural network[C]//2016 14th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV). IEEE, 2016: 1-6.
- [27] Joe Khalife, Zaher M Kassas. Precise UAV navigation with cellular carrier phase measurements. 2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). IEEE, 2018:978-989.
- [28] Khalife J, Shamaei K, Bhattacharya S, et al. Centimeter-accurate UAV navigation with cellular signals[C]//Proceedings of ION GNSS Conference. 2018: 2321-2331.

-
- [29] Yoo J, Hong Y, Yoon S. Autonomous UAV navigation with domain adaptation[J]. arXiv preprint arXiv:1712.03742, 2017.
- [30] Chao H, Gu Y, Gross J, et al. A comparative study of optical flow and traditional sensors in UAV navigation[C]//2013 American Control Conference. IEEE, 2013: 3858-3863.
- [31] Tang H, Shen Z. An attitude estimate method for fixed-wing UAV s using MEMS/GPS data fusion[C]//2017 First International Conference on Electronics Instrumentation & Information Systems (EIIS). IEEE, 2017: 1-5.
- [32] Deep A, Mittal M, Mittal V. Application of Kalman Filter in GPS Position Estimation[C]//2018 IEEE 8th Power India International Conference (PIICON). IEEE, 2018: 1-5.
- [33] Guo Y, Chai S, Cui L. GNSS Precise Point Positioning Based on Dynamic Kalman Filter with Attenuation Factor[C]//2018 37th Chinese Control Conference (CCC). IEEE, 2018: 4734-4738.
- [34] Kim J, Sukkarieh S. Real-time implementation of airborne inertial-SLAM[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2007, 55(1): 62-71.
- [35] Lemaire T, Berger C, Jung I K, et al. Vision-based slam: Stereo and monocular approaches[J]. International Journal of Computer Vision, 2007, 74(3): 343-364.
- [36] Griffith S, Saunders J, Curtis A, et al. Maximizing miniature aerial vehicles—Obstacle and terrain avoidance for MAVs[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2006, 13(3): 34-43.
- [37] Zufferey J C, Floreano D. Toward 30-gram autonomous indoor aircraft: Vision-based obstacle avoidance and altitude control[C]//Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2005: 2594-2599.
- [38] Fixed and flapping wing aerodynamics for micro air vehicle applications[M]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2001.
- [39] 李昕,张小红,曾琪,潘林,朱锋.北斗卫星伪距偏差模型估计及其对精密定位的影响[J].武汉大学学报(信息科学版),2017,42(10):1461-1467.
- [40] 李宏玺.北斗系统的兼容与高精度应用前景分析[J].军民两用技术与产品,2018,(4):26.DOI:10.3969/j.issn.1009-8119.2018.04.024.