 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v5i8.3237

Research on Carrier Phase Technology of Carrier Satellite Guided Takeoff and Landing

Wentao Dai

China Electronics Technology Group Corporation Tenth Research Institute, Chengdu, Sichuan, 610000, China

Abstract

The takeoff and landing of carrier based aircraft is a technical challenge that troubles the world today, with a high dependence on climate environment, pilot psychological quality, and the experience of ship surface guides. Compared with other guidance methods, satellite guided aircraft carrier based takeoff and landing technology has the characteristics of high accuracy and all-weather capability. The paper focuses on the carrier phase characteristics of satellite signals, studies the fusion and smoothing of high-precision carrier phase characteristics with pseudorange observations, and investigates the combination method for solving integer ambiguity. Based on the motion characteristics of ship aircraft, this paper innovatively proposes a dynamic EKF-LAMBDA algorithm to solve the integer ambiguity. Through simulation analysis, the three methods studied in this paper can effectively improve the accuracy of satellite guided takeoff and landing differential calculation and observation for aircraft carriers.

Keywords

satellite guidance; carrier phase; pseudorange smoothing; combination method; dynamic EKF-LAMBDA

航母舰载机卫星引导起降载波相位技术研究

代文涛

中国电子科技集团公司第十研究所，中国 · 四川 成都 610000

摘　要

航母舰载机起降是困扰当今世界的技术难题，对气候环境、飞行员心理素质、舰面引导员经验等依赖度较大。基于卫星引导的航母舰载机起降技术相较其它引导手段，具有精度高、全天候的特征。论文着眼于卫星信号载波相位特性，研究了将载波相位高精度特性与伪距观测量融合平滑，研究了组合法求解整周模糊度。根据舰机运动特性，论文创新提出一种动态EKF-LAMBDA算法求解整周模糊度。通过仿真分析，论文研究的三种方法均可以较好地提高航母舰载机卫星引导起降差分解算观测量精度。

关键词

卫星引导；载波相位；伪距平滑；组合法；动态EKF-LAMBDA

1 引言

航空母舰被誉为“海战之王”，充当远洋海战的军事基地，具有强大的综合作战能力。航母舰载机不仅可以执行对海、陆、空目标攻击，还具备预警、侦察、电子对抗等作战能力。目前世界上最大型的航母甲板最长不过 300 多米，而能够提供给舰载机起飞 / 着舰使用的只有其中 100 米左右。因此，甲板上空间小、舰上扰流大、战场环境复杂等因素导致航母舰载机起降成为一项惊心动魄的任务。

全世界现有的航母舰载机起降引导方式主要包括：光学引导、仪表引导、微波引导、激光引导、雷达引导和卫星引导。

卫星引导作为一种全天候、高精度起降引导方式，适用于战斗机、直升机、无人机多平台起降引导，通过计算航母舰载机与航母的精确相对位置，使舰载机能够精确跟踪母舰运动，减少起降偏差，在未来具有广阔的应用前景。

2 卫星引导起降基本原理

卫星引导起降系统可支撑航母舰载机起飞、返航、着舰、复飞等应用场景，其基本原理是航母接收卫星原始观测量，通过通信数据链将观测量值送到舰载机，舰载机将航母的原始观测量与自身接收的卫星原始观测量做差分解算，计算得到相对距离矢量，从而完成舰机相对位置确定（见图 1）。

【作者简介】代文涛（1989–），男，中国四川泸州人，硕士，工程师，从事通信与信息系统研究。

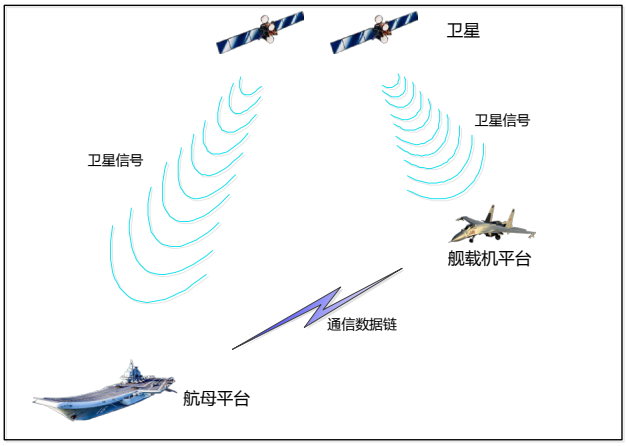

图 1 卫星引导起降示意图

差分解算工作原理不同，可将他们分为三类，即位置差分、伪距差分、载波相位差分。目前，卫星接收机的载波相位测量精度一般为 l~2mm，所以在高精度测量定位中，普遍采用载波相位测量定位方法。载波相位测量是测定载波信号在传播路程上的相位变化值，以确定信号传播的距离。卫星 S 时刻 t 发出一个相位为 φ_s 的载波信号，经距离 ρ 传播到接收机 k 处后，信号的相位为 φ_k，则由 S 至 k 的相位变化为（φ_s–φ_k）。（φ_s–φ_k）包括了整周数和不足一周的小数部分，为方便计，载波相位均以周数为单位。如果能测定（φ_s–φ_k），则卫星 S 至接收机 k 的距离 ρ 即为：

$$\rho = \lambda(\varphi_s - \varphi_k) = \lambda(N_0 + \Delta\varphi) \quad (1)$$

式中：N_0——载波相位（φ_s–φ_k）(t 时刻) 的整周数部分；

$\Delta\varphi$——不足一周的小数部分；

λ——载波的波长，为已知值。

载波信号是一种周期信性的正弦信号，实际相位测量只能测定不到一周的小数部分，因此存在整周数 N_0 模糊度问题。整周模糊度是载波相位测量的关键变量，是影响航母舰载机卫星引导起降差分解算定位精度的重要因子 [1]。

3 载波相位技术研究

航母舰载机起降过程中，可能存在信号变化导致差分解算状态在位置差分、伪距差分和载波相位差分三种状态中切换。位置差分和伪距差分精度相对载波相位差分精度更低。

论文主要研究内容为载波相位高精度特性与差分解算观测量融合提高差分解算精度：一方面将载波相位信息融合到伪距观测量中平滑伪距抖动，提高伪距差分精度；另一方面通过组合法、动态 EKF-LAMBDA 方法求解整周模糊度，提高载波相位观测量准确度，确保航母舰载机卫星引导起降精度。

3.1 载波相位平滑伪距研究

卫星导航系统测码伪距的测量噪声远大于载波相位观测，受多路径影响的程度比载波相位观测严重。载波相位观测量尽管有很高的精度，但由于整周模糊度的存在，其应用受到了很大的限制。因此，利用实时的高精度的载波相位观测量对测码伪距进行相位平滑，能够有效地抑制接收机测量噪声和多路径效应的影响，大大提高测码伪距的精度。相位平滑后的伪距观测量不存在整周模糊度，且具有计算效率高、对数据传输的要求低以及易于实现等特点。

从仿真可以看出，载波相位信息融合到伪距观测量后，可以大幅提高原始观测量的平滑度，使其在差分解算时不会产生大幅度定位值抖动。在工程应用中，根据定位解算的平滑性与实时性要求，平滑算法的历元参数可采用滑动窗等形式动态调整。

3.2 整周模糊度求解方法研究

目前行业内求解整周模糊度的值一般分为三种方法：

①长时间迭代法：接收机静止不动，卫星运动足够长的时间后会增加方程组个数，将欠定方程组转换成超定方程组，从而可以迭代求解出整周模糊度的值和基线向量。并且该方法能够平滑掉一部分多径信号的影响和接收机测量噪声的影响，最大的缺点就是迭代收敛时间较长，因为天上卫星至少运动 20 分钟才会增加一个有用的方程组，而迭代出正确的整周模糊度又需要多组方程，一般需要数小时方可求解出正确的整周模糊度值。

②搜索整周模糊度法 ：就是建立合适的搜索条件和搜索空间，争取以最快的速度和精度搜索出整周模糊度的值，具有代表性的算法有：LAMBDA 算法、LMS 算法、FARA 算法、AFM 算法和 FASF 算法。

③直接求解整周模糊度：比如逐级模糊度求解法、交换天线位置法。

论文对组合法和动态 EKF-LAMBDA 方法求解整周模糊度开展理论研究与仿真分析。

3.3 动态 EKF–LAMBDA 方法求整周模糊度方法研究

接收机静止状态下，EKF-LAMBDA 算法求解整周模糊度，是无法求解的，因为卫星和接收机位置不变，其方程组的系数矩阵不变，方程个数小于未知数个数，即欠定方程组无法求解，而卫星运动速度相对较慢，信息迭代周期较长。通常的 GNSS 系统中，是利用双差观测方程建立关于基线向量和整周模糊度的欠定方程组。该方程组也是无法直接迭代求解的，需要先解出整周模糊度的值，再求基线向量，从而得出相对位置 [2]。

在码距精度 2 米以内时，我们的卫星定位系统首选方法是逐级模糊度求解法。码距精度超出 2 米后，结合机舰运动特性，论文创新性提出一种动态 EKF-LAMBDA 方法来求解整周模糊度。

载波相位观测方程如下：

$$\lambda \cdot \phi = \sqrt{(x_1 - x_u)^2 + (y_1 - y_u)^2 + (z_1 - z_u)^2} + c \cdot \delta t + \lambda \cdot N \quad (2)$$

将非线性方程在（$x_{u0}, y_{u0}, z_{u0}, \delta t_0, N_0$）处一阶泰勒级数展开：

$$\lambda \cdot \phi = R_0 + \frac{\partial R}{\partial x_u}|_{x_{u0}} \cdot (x_u - x_{u0}) + \frac{\partial R}{\partial y_u}|_{y_{u0}} \cdot (y_u - y_{u0}) + \frac{\partial R}{\partial z_u}|_{z_{u0}} \cdot (z_u - z_{u0}) + c \cdot \delta t + \lambda \cdot N \quad (3)$$

即：

$$\lambda \cdot \phi - R_0 + \frac{\partial R}{\partial x_u}|_{x_{u0}} \cdot x_{u0} + \frac{\partial R}{\partial y_u}|_{y_{u0}} \cdot y_{u0} + \frac{\partial R}{\partial z_u}|_{z_{u0}} \cdot z_{u0} = \frac{\partial R}{\partial x_u}|_{x_{u0}} \cdot x_u + \frac{\partial R}{\partial y_u}|_{y_{u0}} \cdot y_u + \frac{\partial R}{\partial z_u}|_{z_{u0}} \cdot z_u + c \cdot \delta t + \lambda \cdot N \quad (4)$$

可以看到该方程组是欠定方程组，无法直接求解，但是航母和舰载机在运动过程中会增加方程组个数，再使用扩展卡尔曼滤波方程迭代收敛求解出整周模糊度浮点解和状态变量的协方差矩阵。具体而言包括以下五步：

第一步：状态预测。

$$\mathrm{xNow} = \mathrm{coeA} * \mathrm{xLast} + \mathrm{coeB}$$

第二步：协方差矩阵预测。

$$\mathrm{covNow} = \mathrm{coeA} * \mathrm{covLast} * \mathrm{coeA}' + covQ$$

第三步：卡尔曼增益求解。

Kg=covNow * coeH’ * inv(coeH * covNow * coeH’ + covR)

第四步：量测值更新。

xLast_temp = xNow + Kg * (Zmeasure - coeH * xNow)

第五步：协方差矩阵更新。

covLast = covNow - Kg * coeH * covNow

通过上述扩展卡尔曼滤波算法可以得到整周模糊度的浮点解和协方差矩阵，再使用 LAMBDA 算法对浮点解搜索便能求出整周模糊度的固定解 [3]。

基于上述研究内容，论文开展了仿真验证：将整周模糊度初始化值为码距 / 波长和载波相位测量值取整值的差值，四颗卫星整周模糊度值分别为 N1-N4，待求整周模糊度预设为 10，码距高斯误差的标准差为 2.0 米，仿真历元 5000 次，卡尔曼滤波观测方程的协方差矩阵初始化为 2.01，整周模糊度求解仿真结果见图 2。

从仿真可以看出，在历元 2100 左右四个整周模糊度值开始收敛于正确值 10 附近抖动，最终可以迭代求解出整周模糊度的值。

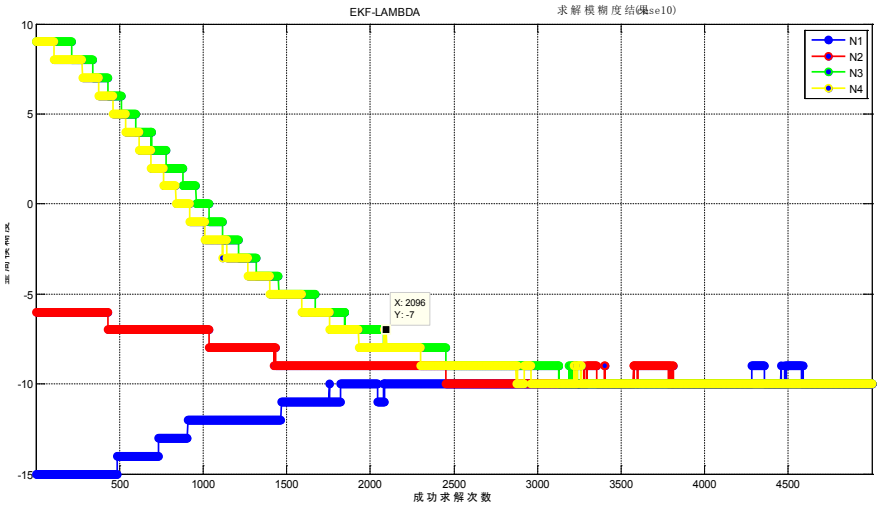

图 2 动态 EKF–LAMBDA 方法求解整周模糊度收敛仿真曲线

4 结语

航母舰载机起降引导手段中，差分卫星引导可靠性、稳定性优于其它技术手段，而差分卫星解算的伪距差分、载波相位差分两种技术，均可以利用载波相位高精度的特征进行信息融合，从而有效提高原始观测量精度，使得起降精度得到提升。论文针对载波相位融合伪距原始观测量的仿真表明，融合后的伪距观测量抖动小，可提高伪距差分定位的精度。组合法求解双频整周模糊度的方法利用了宽窄巷拍频后的信号特征，忽略了观测量噪声等因素，在一定范围内可以解算整周模糊度。

参考文献

[1] 张发兴,王大千,员航.基于实时动态载波相位差分的无人机起降引导系统研制[J].湘潭大学学报自然科学版,2023(6).

[2] 吴家鸣.航母舰载机起降方式特点分析及全球现役航母简介[J].设计开发,2011(9).

[3] 任小伟.载波相位差分相对定位的模糊度求解[J].导航定位学报,2014(12).