

多天线 GPS 船艇定位和船艇姿态测量解算

逢金雷

(公安海警高等专科学校 宁波 315801)

摘要：本文阐述了载波相位实时动态 GPS 定位的原理，不同坐标系中的坐标转换。船艇具体情况，给出了其定位和姿态测定公式。

关键词：GPS 载波相位差分定位 方位角 姿态测定 坐标系

1. 引言

为了保证船艇装备的导航设备能正常发挥其功能，需要研究与解决船艇的真航向问题。多天线 GPS 船艇航向角的姿态测量及定位，可以提供高精度的船艇位置和真航向。高精度的位置外，还可以解决以下问题：

1) 船艇航行中需要的真航向；2) 提供的真航向，可供测消磁罗经自差使用，使磁罗经自差测定与消除不受天气及海区的限制；3) 提供的航向，经信息转换，代替陀螺罗经的使用，解决小型船艇因空间小、陀螺罗经价格贵和启动需要时间较长等因素而不装备陀螺罗经的实际问题；4) 雷达/自动雷达标绘仪——ARPA 功能对真航向的需要，利用多天线 GPS 卫星导航仪提供的真航向信息，来解决目前雷达在无陀螺罗经和计程仪情况下航向和航速信息的输入问题，以保证雷达能充分发挥其避碰功能，为船舶的航行安全提供必要的技术保障。

2. 载波相位实时动态 GPS 系统的原理

实时动态差分 GPS 系统(以法国 Dassault Sercel NP 生产的 Scorpio 6001 / 2MK&SK 为例)的最低配置包括三个部分：①基准站接收机。②流动站接收机，流动站还包括支持实时动态差分的软件系统。③数据链。基准站接收机设在具有已知坐标的参考点位上，连续接收所有可视 GPS 卫星信号，并将测站坐标，观测值，卫星跟踪状态及接收机工作状态通过数据链发送出去，流动站接收机在跟踪 GPS 卫星信号的同时接收来自基准站的数据，载波相位实时动态差分(RTK)较之伪距差分精度高 1—2 个数量级，可以得到 1—2 厘米的定位精度，满足短基线的方位和姿态测定。载波相位 RTK 是通过 OTF(On-The-Fly) 算法解求载波相位整周模糊度，再由相对定位模型获取流动站所在点相对基准站的坐标和精度指标。OTF 算法是 RTK 的关键技术。

2. 1. 相对定位模型

载波相位观测量是接收机接收到的卫星信号与本机产生的信号相位之差。其载波相位观测方程为：

$$\psi_i^p = \frac{f}{c}(p_i^p - I_i^p + T_i^p) + f(dt^p - dt_i) + N_i^p + \varepsilon \quad (1)$$

式中 ψ_i^p 为接收机 i 接收到的卫星 p 的载波相位观测量， dt^p 为卫星钟差， dt_i 为接收机钟差， p_i^p 为卫星发送信号时刻至接收机的几何距离， I_i^p 、 T_i^p 、 c 、 f 分别为电离层、对流层的传播延迟、真空光速和载波频率， N_i^p 载波相位整周模糊度， ε 是观测误差。

若在 t 时刻两台接收机 i ， j 同时对卫星 p 进行载波相位测量，其观测值分别为 φ_i^p ， φ_j^p 在这两个载波相位测量值间求差，其站间单差观测值为 $\Delta\varphi_{ij}^p$ ：

$$\Delta\varphi_{ij}^p = \frac{f}{c}(\Delta p_{ij}^p - \Delta I_{ij}^p + \Delta T_{ij}^p) + f(\Delta dt_j - \Delta dt_i) + \Delta N_{ij}^p + \Delta \varepsilon_{ij}^p \quad (2)$$

式中： Δp_{ij}^p 为接收机 i ， j 至卫星 p 的站星距之差； ΔT_{ij}^p 为接收机 i ， j 至卫星 p 的对流层延迟之

差: ΔI_{ij}^p 为接收机 i, j 至卫星 p 的电离层延迟之差, ΔN_{ij}^p 为接收机 i, j 至卫星 p 的整周模糊度之差。

站间单差消去了卫星钟差的影响, 大大削弱了电离层和对流层延迟的影响。

若在同一时刻接收机 i, j 还对卫星 q 进行了观测, 则对两个站间单差观测值求差得到站星载波相位双差观测值 $\nabla \Delta \varphi_{ij}^{pq}$:

$$\nabla \Delta \varphi_{ij}^{pq} = \frac{f}{c} (\nabla \Delta p_{ij}^{pq} - \nabla \Delta I_{ij}^{pq} + \nabla \Delta T_{ij}^{pq}) + \nabla \Delta N_{ij}^{pq} + \nabla \Delta \varepsilon_{ij}^{pq} \quad (3)$$

式中: $\nabla \Delta p_{ij}^{pq} = \Delta p_{ij}^p - \Delta p_{ij}^q$, $\nabla \Delta I_{ij}^{pq} = \Delta I_{ij}^p - \Delta I_{ij}^q$, $\nabla \Delta T_{ij}^{pq} = \Delta T_{ij}^p - \Delta T_{ij}^q$, $\nabla \Delta N_{ij}^{pq} = \Delta N_{ij}^p - \Delta N_{ij}^q$, $\nabla \Delta \varepsilon_{ij}^{pq} = \Delta \varepsilon_{ij}^p - \Delta \varepsilon_{ij}^q$ 。双差观测值消除了单差中的接收机钟差, 进一步削弱了电离层和对流层延迟的影响。

(3)式是一个非线性方程, 将其在流动站天线的近似位置 (x_j^*, y_j^*, z_j^*) 处线性化, 得到其线性化载波相位双差观测方程:

$$\nabla \Delta \varphi_{ij}^{pq} - \nabla \Delta \varphi_{ij}^{pq*} = \frac{\partial \varphi_{ij}^{pq}}{\partial x_j} dx_j + \frac{\partial \varphi_{ij}^{pq}}{\partial y_j} dy_j + \frac{\partial \varphi_{ij}^{pq}}{\partial z_j} dz_j + \nabla \Delta N_{ij}^{pq} + \varepsilon \quad (4)$$

式中 $\nabla \Delta \varphi_{ij}^{pq*}$ 为 (x_j^*, y_j^*, z_j^*) 处的载波相位双差的计算值, 并包含经模型处理后的残余电离层和对流层延迟: $dx_j = x_j - x_j^*$, $dy_j = y_j - y_j^*$, $dz_j = z_j - z_j^*$, dx_j , dy_j , dz_j 的系数是由卫星 p、q 的轨道坐标与流动站近似位置以及近似距离组成的, ε 是线性化后的观测方程的观测误差。假设两接收机在 t 时刻同时跟踪 $(m+1)$ 颗卫星信号, 则可以构成 m 个独立的相位双差, 可列出 m 个误差方程:

$$V = A \delta X + B \lambda + 1 \quad (5)$$

式中 δX , λ 为流动站天线的近似坐标的改正数和载波相位整周模糊度二次差。1 是常数项, A, B 为系数矩阵。利用最小二乘法, 构成法方程, 求出流动站天线的近似坐标的改正数, 进而给出精确坐标。

2. 2. 双频 P 码扩频技术求载波相位整周模糊度

(5)式中只有求出载波相位整周模糊度, 才能精确求出流动站坐标, 而流动站又是处于运动之中的, 因此, OTF 算法是 RTK 的关键技术。一般方法是首先在未知点的近似坐标和协方差的基础上确定整周模糊度的搜索空间, 在搜索空间内计算所有可能的模糊度解, 然后通过比较最小方差选择最可能的解, 最后比较最优解和次优解决定最后的模糊度解。这些方法为了利用纯相位观测值需要进行一个繁琐的计算和搜索过程, 本文采用的动态双频 GPS 接收机能够获得精确 P 码, 采用双频 P 码扩频技术搜索整周模糊度解可以减小搜索空间, 提高解算速度, 是能够获取 P 码观测值的接收机快速解求整周模糊度解最简单最有效的方法。

令 L1 和 L2 的相位 φ_1 , φ_2 , 频率为 f_1 , f_2 , 整周模糊度 N_1 , N_2 , P 码伪距为 P_1 , P_2 , 则有方程:

$$\varphi_w \lambda_w - \frac{f_1 P_1 + f_2 P_2}{f_1 + f_2} = N_w \lambda_w \quad (6)$$

式中 $\lambda_w = \frac{C}{f_1 - f_2}$ 是宽巷波长, 约等于 86cm, $\varphi_w = \varphi_1 - \varphi_2$, $N_w = N_1 - N_2$ 分别为宽巷观测值

和宽巷整周模糊度，上式只有 N_w 是未知数，通过几个历元的观测，用相位平滑伪距观测可以提高它的精度。有了 N_w 可以通过下式求出 N_1 ， N_2 ：

$$N_1 = \varphi_1 - \frac{f_1 + f_2}{f_1 f_2} A - (\varphi_1 - \varphi_2 - N_w) f_1 / (f_1 - f_2) \quad (7)$$

$$N_2 = \varphi_2 - \frac{f_1 + f_2}{f_1 f_2} A - (\varphi_1 - \varphi_2 - N_w) f_2 / (f_1 - f_2) \quad (8)$$

上式中 A 为电离层对整周模糊度的影响系数，如果 φ ， N 是二次差分就与(4)和(5)式统一起来了，且两台接收机距离不长时，电离层对整周模糊度的影响很小。

3. 方位角计算和船艇的姿态测定

GPS 除精确测定观测瞬间天线的空间坐标外，同时还可以测定船艇观测时的真实方位。量测的方法是利用动态 GPS 接收机可以快速测定船艇上多个 GPS 天线的位置的坐标，根据两点的平面坐标增量(dx , dy)计算坐标方位角 α 一般采用反正切函数计算 $R = \arctg(dy/dx)$ ，但 R 的值域在 $[-\pi/2, \pi/2]$ ，而 α 在 $[0, 2\pi]$ 之间，因此还要根据 dx , dy 的正负，确定 α 和 R 的关系，得出正确的坐标方位角。

利用 GPS 可以精确测定天线平台的姿态。提供船艇航行的真航向。GPS 平台的姿态通常包括俯仰角、横滚角和航向角，俯仰角和横滚角的测定，定位坐标要求是与 GIS 统一的高斯平面直角坐标系，而姿态测定又必须建立平台坐标系。高斯平面直角坐标系的 x 轴为所选定的中央子午线，指北； y 轴为赤道在高斯平面上的投影，指东。GPS 平台坐标系选平台的后右角为坐标原点，平台横轴为 X 轴，由右指向左； y 轴与平台纵轴平行且与坐标原点相连。测定平台纵轴线一前一后两点形成一条基线可以计算俯仰角；测定横轴线一左一右两点形成另一条基线（其中一点还可以与纵轴线的一点公用），两条基线互相垂直，可以计算横滚角。GPS 天线典型的布点方案是“+”字型、或“L”形，“L”形只需三个点。

地面直角坐标系向平台坐标系的转换采用相似变换的方法，其转换模型为：

$$\begin{aligned} \tilde{x}_i &= \delta_x + \mu(x_i \cos \alpha + y_i \sin \alpha) \\ \tilde{y}_i &= \delta_y + \mu(-x_i \sin \alpha + y_i \cos \alpha) \end{aligned} \quad (9)$$

式中 (x_i, y_i) , $(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$ 表示 i 点在两个坐标系中的平面坐标， δ_x , δ_y 为平移参数， μ 为旋转参数，取为 1，这里的 α 就取平台的方位角，平台坐标系各点的高程可直接取地面直角坐标系的高程。

设横轴线一左一右两点形成的基线长度为 l ，在平台坐标系中的坐标为 (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) ，则其横滚角：

$$\theta = \sin^{-1}((z_2 - z_1)/l) \quad (10)$$

$$l = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (11)$$

同样的方法，可以求出纵轴线的俯仰角，这里就不再赘述。

5. 结论

GPS 姿态系统具有定位和姿态测量的双重功能。具有合适的精度，适用于船舶等的导航应用，具有广阔的应用。

参考文献

- [1] 刘基余, 李征航, 王跃虎, 桑吉章, 全球定位系统原理及其应用, 测绘出版社, 北京, 1993, p62—82。
- [2] 陈小明, 高精度 GPS 动态定位的理论与实践, 武汉测绘科技大学博士学位论文, 武汉, 1997。
- [3] 陈永奇, 张正禄, 吴于安等, 高等应用测量, 武汉测绘科技大学出版社, 武汉, 1996, p60—65。
- [4] 魏于卿, 葛茂荣, GPS 相对定位的数学模型, 测绘出版社, 北京, 1998, p115—118。
- [5] Teunissen, P.J.G. (1999b), The Probability distribution of the GPS baseline for a class of integer ambiguity estimators, *Journal of Geodesy* (1999)73: 275—284.
- [6] Teunissen, P. J. G. (1999c), An optimality property of the integer least-squares estimator, *Journal of Geodesy* (1997)73: 587—593.
- [7] XIONG, YOngliang, Researches on theory and algorithms for GPS baselines Solutions and its applications to deformation monitoring, Ph.D. thesis, Department of Surveying Engineering, Southwest Jiaotong University, 2000.

逢金雷,男,1967.11 出生,副教授,1990 年毕业于海军大连舰艇学院
0574-86166256,13008991928

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>