第 25 卷 第 5 期　　电子与信息学报　　Vol.25 No.5
2003 年 5 月　　JOURNAL OF ELECTRONICS AND INFORMATION TECHNOLOGY　　May 2003

基于双台链罗兰 C 导航仪的双曲线导航定位算法 [1]

闵思鹤　　王甲池　　江太辉　　田震华 *

(五邑大学信息学院　江门　529020)

*(广州海格通信有限公司　广州　510656)

摘　要　该文提出了一种直接解法与牛顿迭代计算相结合的方法来求解船位. 首先用直接解法在球面上求得组合双曲线方程组的一个解, 当作船位的概位解, 然后应用牛顿迭代法, 求解 $\Delta\varphi$, $\Delta\lambda$, 当此差值小于某个预先给定的收敛门限 ε 时, 则所求船位为真实解. 一般只要迭代二、三次就可得到秒级精度的船位解.

关键词　双台链罗兰 C, 双曲线导航, 牛顿迭代法

中图号　TN961

1 引 言

传统的双曲线导航定位是采用三台二基线相交于主台的方式, 在接收到同一个罗兰台链的一个主台和两个副台的信号时, 测量出两条时差线, 再利用数学方法求出两条时差线的交点位置, 即船位. 上述方法即为单台链定位, 这种方法受布台方式的限制, 定位区比实际作用区要小得多, 最佳定位区只能是正基线的一侧的一个有限扇形区, 其它区域的资源未能充分利用. 为了有效地定位出全部覆盖区域, 并增加布台的灵活性, 充分发挥罗兰 C 台链的定位潜力, 本文采用双台链定位技术, 在同时接收到多个台链信号时, 得到比单台链更多的时差线 [1], 再利用双台链算法技术, 组合两条可用的时差线 (不管是否相连), 从而得到更好的定位结果, 提高罗兰 C 的定位精度和定位可用性.

2 在球面上求两基线隔开台链的直接解

首先我们采用地心纬度法把椭圆体上的岸台坐标、船位初值 (前次船位或推导出来的船位) 投影到球面上.

$$\varphi = \tan^{-1}[(1-e^2)\tan u], \quad \lambda = \omega \tag{1}$$

式中 u, ω 分别为大地纬度和经度 φ, λ 为球面纬度和经度.

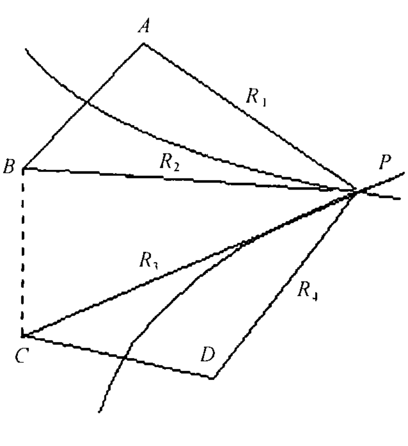

图 1　隔开的台链的定位

下面是在球面上来求船的位置的情况, 其岸台配置情况如图 1 所示. $ABCD$ 为 4 个岸台, A-B 为第一个台链的台对, C-D 为第二个台链的台对. 台对 A-B 上的一条双曲线与台对 C-D 上的一条双曲线在 P 点相交, 交点为船位. 各岸台球面经、纬度为 $A(\varphi_1,\lambda_1)$, $B(\varphi_2,\lambda_2)$, $C(\varphi_3,\lambda_3)$ 和 $D(\varphi_4,\lambda_4)$, P 点到各岸台的球面距离分别为 R_1, R_2, R_3 和 R_4 .

假设 P 点的球面经、纬度为 (φ,λ), P 点到各岸台的球面上的距离差为 α_1 和 α_2 . 依据球面三角形的余弦定理, 有如下方程:

---

[1] 2001-10-22 收到, 2002-04-15 改回

广东省自然科学基金资助项目 (编号: 000872)

$$\cos R_1 = \sin\varphi_1 \sin\varphi + \cos\varphi_1 \cos\varphi \cos(\lambda - \lambda_1) \tag{2}$$

$$\cos R_2 = \sin\varphi_2 \sin\varphi + \cos\varphi_2 \cos\varphi \cos(\lambda - \lambda_2) \tag{3}$$

$$\cos R_3 = \sin\varphi_3 \sin\varphi + \cos\varphi_3 \cos\varphi \cos(\lambda - \lambda_3) \tag{4}$$

$$\cos R_4 = \sin\varphi_4 \sin\varphi + \cos\varphi_4 \cos\varphi \cos(\lambda - \lambda_4) \tag{5}$$

$$\alpha_1 = R_1 - R_2 \tag{6}$$

$$\alpha_2 = R_4 - R_3 \tag{7}$$

其中 α_1, α_2 的正负性可按实际中各基线的主、副台的关系确定 (所有变量单位：弧度)．将以上 6 个方程联合解得

$$K_1 \tan^2\varphi + 2q_1 \tan\varphi + p_1 + K_1 = 0 \tag{8}$$

$$K_2 \tan^2\varphi + 2q_2 \tan\varphi + p_2 + K_2 = 0 \tag{9}$$

其中 K_1, K_2, q_1, q_2, p_1 和 p_2 为推导过程中所算得的中间变量参数 [2]．

由组合球面双曲线方程组 (8) 式和 (9) 式得

$$\tan^4\lambda + b\tan^3\lambda + c\tan^2\lambda + d\tan\lambda + e = 0 \tag{10}$$

其中 b, c, d 和 e 为推导过程中所算得的中间变量参数 [2]．

解 (10) 式，则可求出 P 点球面经度 λ 值 (一般有 4 个解，在本文方法中可以得到满足当前船位条件的一个实根解)，对于 P 点的球面纬度，用如下方法可得

$$\varphi = [\cos^{-1}((-p_i - 2K_i)/p_i \times \cos\eta_i) + \eta_i]/2 \tag{11}$$

其中 $\eta_i = \tan^{-1} 2q_i/p_i$, $(i = 1, 2)$, φ 值内可求出二个解，二者应相互一致，以资检验．

3 进行牛顿迭代求解

由于在连续航行中，前一时刻的位置可看作是后一时刻的概位．因此连续航行中导航仪只是进行概位修正计算，仅在启航或导航仪重新加电开机时才进行概位计算或手工输入概位．其中手工输入概位一般是在直接船位解不能定位时即船位在发散区时．

由球面三角的余弦定理，可得船位到 4 个台的大圆距离为

$$\cos\sigma_i = \sin\varphi_i \sin\varphi + \cos\varphi_i \cos\varphi \cos(\lambda - \lambda_i), \quad i = 1, 2, 3, 4 \tag{12}$$

又分别由正弦定理以及余弦定理 (在一个球面三角形中)，可得

$$\sin\alpha_i = \cos\varphi_i \sin(\lambda - \lambda_i) / \sin\sigma_i \tag{13}$$

$$\cos\alpha_i = (\sin\varphi_i - \sin\varphi \cos\sigma_i)/(\cos\varphi \sin\sigma_i) \tag{14}$$

由 (8) 和 (9) 式可得 $\alpha_i = \arctan\frac{\cos\varphi_i \sin(\lambda-\lambda_i)}{\sin\varphi_i \cos\varphi - \sin\varphi \cos\varphi_i \cos(\lambda-\lambda_i)}$．所以，可形成两个距离差方程为 (单位：弧度)

$$S_{12} = \sigma_1 - \sigma_2, \quad S_{34} = \sigma_4 - \sigma_3 \tag{15}$$

(15) 式就是球面上以 (φ, λ) 为未知参数的位置线方程组，它是非线性方程组，我们以牛顿迭代方法求解，即把非线性方程组进行线性化．

根据上面所算得的初始船位 (φ_0, λ_0)，可得位置线方程，即

$$S'_{12} = \sigma_1(\varphi_0, \lambda_0) - \sigma_2(\varphi_0, \lambda_0) \tag{16}$$

$$S'_{34} = \sigma_4(\varphi_0, \lambda_0) - \sigma_3(\varphi_0, \lambda_0) \tag{17}$$

根据修正船位 $(\varphi_0+\Delta\varphi, \lambda_0+\Delta\lambda)$，可得位置线方程，即

$$S_{12}=\sigma_1(\varphi_0+\Delta\varphi,\lambda_0+\Delta\lambda)-\sigma_2(\varphi_0+\Delta\varphi,\lambda_0+\Delta\lambda) \tag{18}$$

$$S_{34}=\sigma_4(\varphi_0+\Delta\varphi,\lambda_0+\Delta\lambda)-\sigma_3(\varphi_0+\Delta\varphi,\lambda_0+\Delta\lambda) \tag{19}$$

把 (18), (19) 式在 (φ_0,λ_0) 泰勒展开，取线性项，再减去对应方程 (16) 和 (17) 式．得位置线误差方程如下：

$$\left(\frac{\partial\sigma_1}{\partial\varphi}-\frac{\partial\sigma_2}{\partial\varphi}\right)_{(\varphi_0,\lambda_0)}\cdot\Delta\varphi+\left(\frac{\partial\sigma_1}{\partial\lambda}-\frac{\partial\sigma_2}{\partial\lambda}\right)_{(\varphi_0,\lambda_0)}\cdot\Delta\lambda\approx S_{12}-S'_{12} \tag{20}$$

$$\left(\frac{\partial\sigma_4}{\partial\varphi}-\frac{\partial\sigma_3}{\partial\varphi}\right)_{(\varphi_0,\lambda_0)}\cdot\Delta\varphi+\left(\frac{\partial\sigma_4}{\partial\lambda}-\frac{\partial\sigma_3}{\partial\lambda}\right)_{(\varphi_0,\lambda_0)}\cdot\Delta\lambda\approx S_{34}-S'_{34} \tag{21}$$

(20) 和 (21) 式就是修正量 $\Delta\varphi$ 和 $\Delta\lambda$ 的线性方程组．经过推导 [3]，可得 $\left.\frac{\partial\sigma_i}{\partial\varphi}\right|_{(\varphi_0,\lambda_0)}=-\cos\alpha_i$, $\left.\frac{\partial\sigma_i}{\partial\lambda}\right|_{(\varphi_0,\lambda_0)}=\cos\varphi_0\sin\alpha_i$，因而 (20) 和 (21) 式可变成

$$(\cos\alpha_1-\cos\alpha_2)\cdot\Delta\varphi+\cos\varphi_0(\sin\alpha_1-\sin\alpha_2)\cdot\Delta\lambda=S'_{12}-S_{12} \tag{22}$$

$$(\cos\alpha_4-\cos\alpha_3)\cdot\Delta\varphi+\cos\varphi_0(\sin\alpha_4-\sin\alpha_3)\cdot\Delta\lambda=S'_{34}-S_{34} \tag{23}$$

记为 $A_1=\cos\alpha_1-\cos\alpha_2$, $B_1=\sin\alpha_1-\sin\alpha_2$, $C_1=S'_{12}-S_{12}$, $A_2=\cos\alpha_4-\cos\alpha_3$, $B_2=\sin\alpha_4-\sin\alpha_3$, $C_2=S'_{34}-S_{34}$．所以

$$\left.\begin{aligned}\Delta\varphi&=\frac{C_1B_2-C_2B_1}{A_1B_2-A_2B_1}, & \Delta\lambda&=\frac{A_1C_2-A_2C_1}{A_1B_2-A_2B_1}\cdot\frac{1}{\cos\varphi_0}\\ \varphi&=\varphi_0+\Delta\varphi, & \lambda&=\lambda_0+\Delta\lambda\end{aligned}\right\} \tag{24}$$

迭代计算过程如下：迭代初值为 (φ_0,λ_0)，首先以新的更好的概位代替老的概位，即 $\varphi\Rightarrow\varphi_0$, $\lambda\Rightarrow\lambda_0$；然后重新计算 (22) 和 (23) 式，得到新的方程，新的结果，直到 $|\Delta\varphi|<\varepsilon$ 并且 $|\Delta\lambda|<\varepsilon$ 为止． ε 是预先给定的收敛门限．实际计算表明，只要迭代二、三次就可得到秒级精度．

最后将迭代结果按地心纬度反解得 [4]

$$u=\tan^{-1}[\tan\varphi/(1-e^2)],\quad \omega=\lambda \tag{25}$$

此时的 (u,ω) 即为对应于原始时间差 TD_1 和 TD_2 的船位大地经度和纬度．

4 仿真导航定位实验及结果

由于单台链接收机由一个台链转入另一个台链时必须人工转换台链号，重新搜索信号需要一段时间，在此期间不能定位．双台链罗兰 C 接收机在转入一个台链前，早就已经收到该台链的信号，所以双台链技术在跨台链时能连续定位．下面就经过南海海域 (6780 台)、东海海域 (8390 台) 和北海海域 (7430 台) 中的 4 个位置进行实验，结果如表 1 所示．

表中 $\Delta\varphi$, $\Delta\lambda$ 是假设两时差线各有传播误差 $+1\mu s$ 时 (比接收机本身误差 $0.1\mu s$ 大 10 倍) 所引起的位置误差，用来说明该处位置发散程度的大小．时差线的不同组合，位置发散程度就不同．表中 TD_1 和 TD_2 分别为舰船所接收到对应两个台的时间差值．

由上述计算的实验结果可知，本文提出的直接解与迭代算法相结合的方法求得的船位达到了导航或海上测量定位精度的要求．并且双台链技术可以在较大范围内使用多台链组合定位来提高定位精度．双台链定位技术会自动组合现有的位置线，给出最佳组合定位结果．本方案已成功应用于研制的双台链罗兰 C 导航仪中．

表 1　实验结果

测点位置	对应的时差 (μs)	所选用台链号时差	定位结果	定位误差	各增 $+1\mu s$ 引起的误差
23°37′ 118°27′	28494.10 11565.57	6780 台：TD_2 8390 台：TD_1	23°37.0083′ 118°26.992′	$\Delta\varphi = -0.02199'$ $\Delta\lambda = 0.007804'$	$\Delta\varphi = -1.13'$ $\Delta\lambda = -0.92'$
22°40′ 117°30′	12873.47 11095.64	6780 台：TD_1 8390 台：TD_1	22°40.0074′ 117°30.001′	$\Delta\varphi = -0.00770'$ $\Delta\lambda = -0.00081'$	$\Delta\varphi = 0.55'$ $\Delta\lambda=0.39'$
25°26′ 119°	12896.40 28549.00	6780 台：TD_1 8390 台：TD_1	25°26.0214′ 118°59.996′	$\Delta\varphi = -0.02140'$ $\Delta\lambda = 0.003279'$	$\Delta\varphi = -0.21'$ $\Delta\lambda = -0.29'$
32°30′ 124°30′	16034.97 28647.36	8390 台：TD_1 7430 台：TD_1	32°30.7848′ 124°29.998′	$\Delta\varphi = -0.07848'$ $\Delta\lambda = 0.001748'$	$\Delta\varphi = -0.46'$ $\Delta\lambda = -0.27'$

参 考 文 献

[1] 秦卫华，杨致友，等，多台链罗兰 C 信号搜索方法研究，导航， 1996, 32(2), 53-58.

[2] 丁佳波，关于不同台链组合双曲线导航系统的定位计算，导航， 1994, 30(4), 70-77.

[3] 杨致友，罗兰导航数学方法，西安，西北工业大学出版社， 1991, 177-244.

[4] G. W. A. Offermans, D. van Willigen, A. W. S. Helwig, Vincent, Loran-C & Galileo, An European navigation solution, Proc. of the 29th Annual Technical Symposium of the International Loran Association, Paris, November, 2000, 649-661.

THE CALCULATION RESEARCH OF HYPERBOLIC NAVIGATION POSITION FIXING BASED ON DOUBLE STATION CHAINS LORAN C NAVIGATOR

Min Sihe　Wang Jiachi　Jiang Taihui　Tian Zhenhua

(*School of Information, Wuyi Univ., Jiangmen* 529020, *China*)

Abstract　This paper presents a method which links direct solution and Newton iterative method to calculate ship's position. First, a result of the combination hyperbolic equations is got using the direct solution on the sphere and is taken as the ship's approximate position. Then, Newton iterative method is applied to caculate $\Delta\varphi$ and $\Delta\lambda$. When $\Delta\varphi$ and $\Delta\lambda$ are less than ε which is given as a convergent standard beforehand, the ship's position calculated is the correct one. In general, only iterating two or three times, the calculating accuracy is about one second.

Key words　Double station chains LORAN C, Hyperbolic navigation, Newton iterative method

闵思鹤：　男， 1976 年生，硕士生，目前主要研究领域为信号检测与处理和语音处理与通信.

王甲池：　男， 1971 年生，硕士生，目前主要研究领域为信号检测与处理和语音处理与通信.

江太辉：　男， 1945 年生，教授，主要从事语音处理与通信等方面的研究.

田震华：　男， 1969 年生，高级工程师，主要从事无线电导航信号检测与处理.