

文章编号: 1001-2486 (2001) 06-0074-04

基于相位差变化率方法的单站无源定位技术*

单月晖, 孙仲康, 皇甫堪

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 无源定位技术有着广阔的应用前景, 文中在现有单站无源定位方法的基础上, 介绍了相位差变化率定位法。该方法利用观测平台上两个相互正交的相位干涉仪接收目标辐射电磁波的相位差获取目标的方向信息, 利用对应的相位差变化率获取目标的径向距离信息, 从而实现目标的实时高精度交叉定位。还给出了观测平台水平直线匀速飞行且无飞行姿态变化条件下的定位表达式。仿真结果表明, 该方法是一种极具发展前途的单站无源定位方法。

关键词: 相位差; 变化率; 单站; 无源定位; 方向; 径向距离

中图分类号: TN958.97; TN959.1 **文献标识码:** A

Research on Single Observer-Passive Location Technology Based on Method of Phase Difference Rate of Change

SHAN Yue-hui, SUN Zhong-kang, HUANGFU Kan

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Technology of passive location has broad prospects for application. The single observer-passive location method of phase difference rate of change is introduced based on existing methods. We can obtain the direction of the target with phase difference information of two orthogonal interferometers on the observer and the radial distance with corresponding phase difference rate of change information. Then the target can be located with high speed and precision. Some locating expressions are given when the observer is flying along a horizontal beeline without any posture change. Simulations show that this method is effective.

Key words: phase difference; rate of change; single observer; passive location; direction; radial distance

采用被动方式工作的无源定位技术相对于有源定位技术具有作用距离远、隐蔽接收、不易被对方发觉的优点, 对于增强系统在复杂电磁环境下的生存能力和工作能力具有重要意义, 在海上遇难救援、火控系统对目标的定位跟踪、电子侦察定位、空间飞行器的测控、卫星定位等领域有着广阔的应用前景。其中, 单站无源定位只利用一个观测平台对目标进行定位, 设备量小, 成本低。然而由于单站所能获取的信息量相对少于多个观测站的情况, 单站无源定位实现难度相对较大。单站无源定位技术实现的传统方法主要有^[1, 2]: 测向定位法、到达时间定位法、多普勒频率定位法、方位/到达时间定位法和方位/多普勒频率定位法。这些方法总的来说定位时间较长, 精度较低, 并且定位精度对方向测量误差非常敏感, 在客观上对测量设备提出了较高的要求。

1 相位差变化率方法的定位原理

相位差变化率方法可以利用两个相互正交的相位干涉仪接收目标辐射电磁波的相位差及其变化率信息, 解算出目标的方位及其与观测平台之间的径向距离^[3], 从而实现目标的无源定位。

在目标慢速运动的情况下, 忽略地球曲率的影响, 同时假定机载观测平台水平向前匀速直线飞行并且没有发生姿态变化。选空间某一固定点为原点 O 建立三维直角坐标系, OX 轴方向为沿机身纵轴且指向机头方向, OY 轴与 OX 轴在同一水平面上且指向左侧机翼方向, OZ 轴按照右手关系确定

* 收稿日期: 2001-04-01

基金项目: 国家 863 计划项目

作者简介: 单月晖 (1975-), 女, 博士生。

为垂直于 OXY 平面且指向上方。观测平台在此坐标系下的位置和速度可以通过导航设备获取。另外，在机腹下机身轴与机翼轴的交点 O' 处建立载机坐标系 $O' - X'Y'Z'$ ，与固定坐标系 $O - XYZ$ 平行。

在机载观测平台上布设两个互相正交的相位干涉仪，共三个单元天线，一个天线位于 O' 处，一个天线沿机身轴布设在机尾一侧，另一个天线沿机翼轴布设在左侧机翼靠近机身一侧。这里假定目标辐射电磁波的频率不变并且观测平台获取的目标方向信息全部来自相位干涉仪接收目标辐射电磁波的相位差信息。在无相位模糊的情况下，机载运动平台上两个相位干涉仪（共三个单元天线）接收目标辐射电磁波相位差信息的几何解释见图 1。

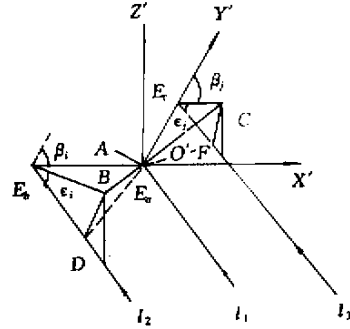


图 1 观测平台接收目标辐射电磁波信息的几何解释
Fig.1 Geometrical explanation of receiving electromagnetic wave from the target on the observer

图中 E_a, E_b 为安装在机身轴上相位干涉仪的两个单元天线，间距即基线长度为 d_x ， E_a, E_c 为安装在机翼轴上相位干涉仪的两个单元天线，间距即基线长度为 d_y ， l_1, l_2, l_3 分别为 E_a, E_b, E_c 接收到的目标辐射电磁波的方向。由于目标和观测平台之间的距离远远大于 d_x 及 d_y ，因而可以认为 $l_1 \parallel l_2 \parallel l_3$ 。目标相对于观测平台的方位角（以 Y' 轴正向为基准）和俯仰角（与 $X'O'Y'$ 平面的夹角）分别为 $\beta(t), \epsilon(t)$ ， E_aA, E_bB, E_cC 分别为 l_1, l_2, l_3 在观测平台所在的水平面上的投影，并且有： $E_aB \perp E_bB, E_aC \perp E_cC$ 。过 B 作 $BD \perp E_bD$ 于 D ，过 C 作 $CF \perp E_cF$ 于 F ，从而有： $E_aD \perp E_bD, E_aF \perp E_cF$ 。故有： E_bD 即为 E_a, E_b 接收目标辐射电磁波的波程差， E_cF 为 E_a, E_c 接收目标辐射电磁波的波程差。根据图 1 有如下关系：

在 $Rt\Delta E_aBE_b$ 中，

$$E_bB = E_aE_b \cos\angle E_aE_bB = d_x \cos(\beta - 90^\circ) = d_x \sin\beta$$

在 $Rt\Delta BDE_b$ 中，

$$\angle BE_bD = \epsilon, \quad E_bD = E_bB \cos\epsilon = d_x \sin\beta \cos\epsilon \quad (1)$$

同理，在 $Rt\Delta E_aCE_c$ 中，

$$E_cC = E_aE_c \cos\angle E_aE_cC = d_y \cos(180^\circ - \beta) = -d_y \cos\beta$$

在 $Rt\Delta CFE_c$ 中，

$$\angle CFE_c = \epsilon, \quad E_cF = E_cC \cos\angle CFE_c = -d_y \cos\beta \cos\epsilon \quad (2)$$

从而可得机身轴相位干涉仪的二单元天线阵 E_a, E_b 接收目标辐射电磁波的相位差为：

$$\phi_x(t) = \omega_T \Delta t_x = 2\pi f_T \frac{d_x}{c} \sin\beta \cos\epsilon = k_x f_T \sin\beta \cos\epsilon, \quad k_x = \frac{2\pi d_x}{c} \quad (3)$$

对应的相位差变化率为：

$$\dot{\phi}_x(t) = k_x f_T (\dot{\beta} \cos\beta \cos\epsilon - \dot{\epsilon} \sin\beta \sin\epsilon) \quad (4)$$

而机翼轴相位干涉仪的二单元天线阵 E_a, E_c 接收目标辐射电磁波的相位差为：

$$\phi_y(t) = \omega_T \Delta t_y = 2\pi f_T \frac{d_y}{c} (-\cos\beta \cos\epsilon) = -k_y f_T \cos\beta \cos\epsilon, \quad k_y = \frac{2\pi d_y}{c} \quad (5)$$

对应的相位差变化率为：

$$\dot{\phi}_y(t) = k_y f_T (\dot{\beta} \sin\beta \cos\epsilon + \dot{\epsilon} \cos\beta \sin\epsilon) \quad (6)$$

上面各式中 ω_T 为到达观测平台处的来波角频率， f_T 为对应的来波频率， Δt_x 为来波到达 E_a, E_b 的时间差， Δt_y 为来波到达 E_a, E_c 的时间差， c 为光速。由 (3)、(5) 两式可得目标的方向信息：

$$\sin\beta = \frac{\phi_x(t) \mathcal{Y} k_x f_T}{\sqrt{[\phi_x(t) \mathcal{Y} k_x f_T]^2 + [-\phi_y(t) \mathcal{Y} k_y f_T]^2}} = \frac{k_y \phi_x(t)}{\sqrt{k_y^2 \phi_x^2(t) + k_x^2 \phi_y^2(t)}} = \frac{d_y \phi_x(t)}{\sqrt{d_y^2 \phi_x^2(t) - d_x^2 \phi_y^2(t)}} \quad (7)$$

$$\cos\beta = \frac{-\phi_y(t) \mathcal{Y} k_y f_T}{\sqrt{[\phi_x(t) \mathcal{Y} k_x f_T]^2 + [-\phi_y(t) \mathcal{Y} k_y f_T]^2}} = \frac{-k_x \phi_y(t)}{\sqrt{k_y^2 \phi_x^2(t) + k_x^2 \phi_y^2(t)}} = \frac{-d_x \phi_y(t)}{\sqrt{d_y^2 \phi_x^2(t) + d_x^2 \phi_y^2(t)}} \quad (8)$$

$$\sin\epsilon = \sqrt{1 - [\phi_x(t) \mathcal{Y} k_x f_T]^2 - [-\phi_y(t) \mathcal{Y} k_y f_T]^2} = \sqrt{k_x^2 d_y^2 f_T^2 - k_y^2 \phi_x^2(t) - k_x^2 \phi_y^2(t) \mathcal{Y} k_x k_y f_T} \quad (9)$$

$$\cos\epsilon = \sqrt{[\phi_x(t) \mathcal{Y} k_x f_T]^2 + [-\phi_y(t) \mathcal{Y} k_y f_T]^2} = \sqrt{k_y^2 \phi_x^2(t) + k_x^2 \phi_y^2(t) \mathcal{Y} k_x k_y f_T} \quad (10)$$

由式 (4) (6) 并联合式 (7) (8) (9) (10) 可得：

$$\dot{\beta} = \frac{d_x d_y [\dot{\phi}_x(t) \dot{\phi}_y(t) - \phi_x(t) \dot{\phi}_y(t)]}{d_y^2 \dot{\phi}_x^2(t) + d_x^2 \dot{\phi}_y^2(t)} \quad (11)$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{-d_y^2 \dot{\phi}_x(t) \dot{\phi}_x(t) - d_x^2 \dot{\phi}_y(t) \dot{\phi}_y(t)}{\sqrt{d_y^2 \dot{\phi}_x^2(t) + d_x^2 \dot{\phi}_y^2(t)} \sqrt{k_x^2 d_y^2 f_T^2 - d_y^2 \phi_x^2(t) - d_x^2 \phi_y^2(t)}} \quad (12)$$

记观测平台的位置为 (x_O, y_O, z_O) , 目标的位置为 (x_T, y_T, z_T) , 目标到观测平台的径向距离为 r 。由几何关系可知, 在 i 时刻：

$$\begin{aligned} \text{tg}\beta(t) &= \frac{x_{Ti} - x_{Oi}}{y_{Ti} - y_{Oi}} \triangleq \text{tg}\beta_i, \quad \text{tge}\epsilon(t) = \frac{z_{Oi} - z_{Ti}}{\sqrt{(x_{Ti} - x_{Oi})^2 + (y_{Ti} - y_{Oi})^2}} \triangleq \text{tge}\epsilon_i \\ \dot{\beta}_i &= \frac{(\dot{x}_{Ti} - \dot{x}_{Oi})(y_{Ti} - y_{Oi}) - (x_{Ti} - x_{Oi})(\dot{y}_{Ti} - \dot{y}_{Oi})}{(x_{Ti} - x_{Oi})^2 + (y_{Ti} - y_{Oi})^2} = \frac{\dot{x}_i \cos\beta_i - \dot{y}_i \cos\beta_i}{r_i \cos\epsilon_i} \end{aligned} \quad (13)$$

$$r_i = \frac{\dot{x}_i \cos\beta_i - \dot{y}_i \sin\beta_i}{\dot{\beta}_i \cos\epsilon_i} \quad (14)$$

其中, $x_i = x_{Ti} - x_{Oi}, y_i = y_{Ti} - y_{Oi}, z_i = z_{Ti} - z_{Oi}, \dot{x}_i = \frac{dx_i}{dt}, \dot{y}_i = \frac{dy_i}{dt}, \dot{z}_i = \frac{dz_i}{dt}$,

$$r_{pi} = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} = x_i \sin\beta_i + y_i \cos\beta_i, \dot{r}_{pi} = \dot{x}_i \sin\beta_i + \dot{y}_i \cos\beta_i$$

$$r_i = \sqrt{(x_{Ti} - x_{Oi})^2 + (y_{Ti} - y_{Oi})^2 + (z_{Ti} - z_{Oi})^2} = \sqrt{r_{pi}^2 + (z_{Ti} - z_{Oi})^2}$$

用 (14) 式计算 r_i 时所用到的 $\dot{\beta}_i$ 由式 (11) 确定。

分析 (14) 式, 不难发现它代表一个极坐标系下球的方程, 球心为 (x_{Oi}, y_{Oi}, z_{Oi}) , 半径为 $r_i = (\dot{x}_i \cos\beta_i - \dot{y}_i \sin\beta_i) / (\dot{\beta}_i \cos\epsilon_i)$, 该球过目标位置点 (x_{Ti}, y_{Ti}, z_{Ti}) , 可称其为 $\phi_{xi} - \phi_{yi}$ 定位球。从几何角度看, 它与目标方位角 β_i 、俯仰角 ϵ_i 所决定的定位射线 (可称为 $\beta_i - \epsilon_i$ 定位射线) 必然交于目标位置点 (x_{Ti}, y_{Ti}, z_{Ti}) , 从而可求出目标的位置 (x_{Ti}, y_{Ti}, z_{Ti}) 。这就是在已知观测平台的速度 V_{Oi} 和位置坐标 (x_{Oi}, y_{Oi}, z_{Oi}) 以及目标运动速度 V_{Ti} 、辐射频率 f_n 的条件下, 利用相位差信息 ϕ_{xi}, ϕ_{yi} 及其变化率信息 $\dot{\phi}_{xi}, \dot{\phi}_{yi}$ 对目标进行交叉定位的原理。由此可得目标定位表达式为：

$$x_{Ti} = x_{Oi} + \beta_i^{-1} (\dot{x}_i \cos\beta_i - \dot{y}_i \sin\beta_i) \sin\beta_i \quad (15)$$

$$y_{Ti} = y_{Oi} + \beta_i^{-1} (\dot{x}_i \cos\beta_i - \dot{y}_i \sin\beta_i) \cos\beta_i \quad (16)$$

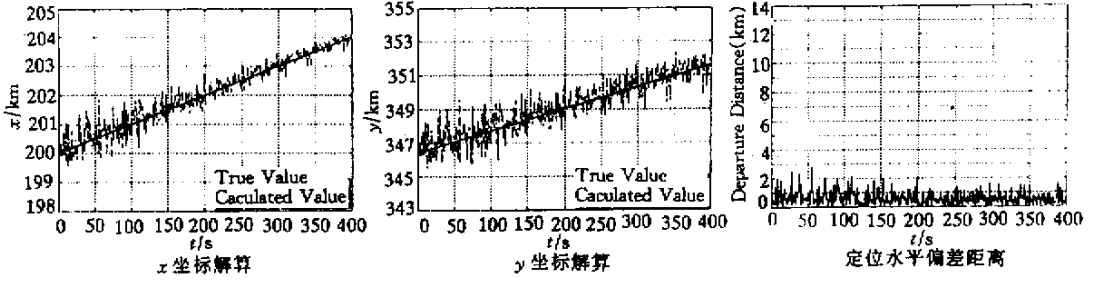
其中 $\sin\beta_i, \cos\beta_i, \sin\epsilon_i, \cos\epsilon_i, \dot{\beta}_i$ 分别由式 (7) (8) (9) (10) (11) 确定。测距定位过程中用到的参数有： $\{d_x, d_y, f_T, \phi_{xi}, \phi_{yi}, \dot{\phi}_{xi}, \dot{\phi}_{yi}, x_{Oi}, y_{Oi}, z_{Oi}, \dot{x}_{Oi}, \dot{y}_{Oi}, \dot{x}_{Ti}, \dot{y}_{Ti}\}$ 。

值得注意的是, 以上讨论是基于观测平台的飞行姿态无变化、目标辐射电磁波的频率不变、目标运动速度已知、观测平台的相位干涉仪接收目标辐射电磁波的相位差变化率已知的条件进行的。当以上条件不具备时, 应用相位差变化率方法对地/海面远距离慢速目标进行无源定位有所不同。

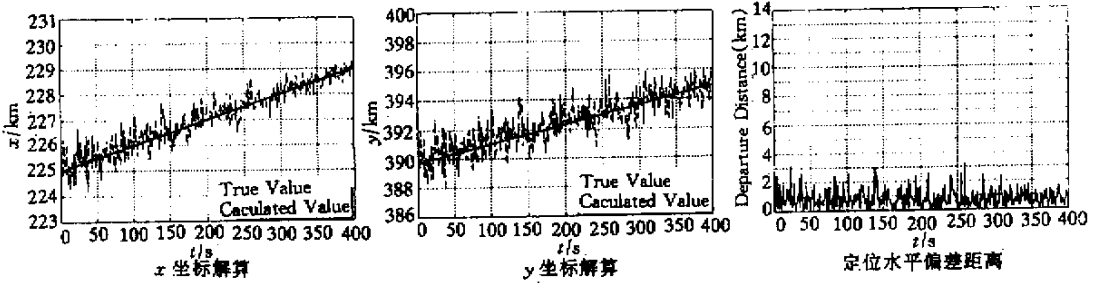
2 仿真验证

这里面向对 400 km 以外的地/海面目标进行发射前瞄准定位的应用需求, 给出三种情况下的仿真结果, 有关的测量数据为： $d_x = 10 \text{ m}, d_y = 5 \text{ m}, f_T = 3 \times 10^9 \text{ H}$ 测量精度为： $\sigma_\phi = 35 \text{ mrad}, \sigma_\phi =$

7.5 mrad/s $\sigma_{f_T} = 10^4$ Hz $\sigma_V = 0.1$ m/s $\sigma_p = 16$ m。仿真结果见图 2。



(a) 目标运动起点为(200, 200 $\sqrt{3}$, 0)km 速度为(10, 13, 0)m/s。观测平台的运动起点为(1, 1, 8)km 速度为(300, 0, 0)m/s



(b) 目标运动起点为(225, 225 $\sqrt{3}$, 0)km 速度为(10, 13, 0)m/s。观测平台的运动起点为(1, 1, 8)km 速度为(300, 0, 0)m/s

图 2 有关的仿真结果

Fig.2 Corresponding simulations

3 结论

结合空中对地/海面远距离慢速目标定位的应用需求，介绍了相位差变化率单站无源定位方法。给出了在机载观测平台水平直线匀速飞行且无姿态变化条件下的定位原理和目标定位表达式，概念直观清晰，计算简便快捷。仿真结果证明了该方法的有效性。在强调隐蔽性、快速性和准确性的呼声日益高涨的今天，紧密跟踪技术的发展，综合运用多种手段，解决好该无源定位方法在需求与可能之间的矛盾，应用前景是非常令人鼓舞的。

参考文献：

[1] 孙仲康, 陈辉煌. 定位导航与制导 [M]. 北京：国防工业出版社, 1987.
 [2] 孙仲康, 周一宇, 何黎星. 单多基地有源无源定位技术 [M]. 北京：国防工业出版社, 1996.
 [3] 许耀伟. 一种快速高精度无源定位方法的研究 [D]. 长沙, 1998.

