

# 固定飞行姿态角下的相位差变化率无源定位方法研究<sup>1</sup>

单月晖 王 展 万建伟 孙仲康 皇甫堪

(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

**摘 要** 该文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,从而实现对目标的实时高精度定位。文中给出了观测平台飞行姿态角固定情况下的定位表达式并进行了定位精度分析。仿真结果表明,该方法是一种发展前途较好的单站无源定位方法。

**关键词** 单站无源定位, 相位差变化率, 固定姿态角, 方向, 径向距离

**中图分类号** TN97

## 1 引 言

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。但是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<sup>[1,2]</sup>主要有: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。这几种定位方法均要求目标与观测平台之间的相对运动非径向。另外,测向定位法的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很高的要求;当目标运动时,要求观测站必须作特殊的机动运动,而且跟踪精度直接决定于观测站运动的机动量;该方法从开始测量到完成定位所需时间较长,很难满足瞬息万变的现代战争需求。在应用多普勒频率方法对运动辐射源定位时,也必须使观测站作机动运动,而且误差和估计精度依赖于观测站的机动特性。到达时间定位法的定位速度慢,精度低,其应用还受到雷达频率漂移、跳变的影响。

本文面向空中观测平台对地面远距离固定目标定位的应用背景,介绍了一种单站无源定位的新方法——相位差变化率方法。该方法可以通过测量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实现对辐射源目标的快速高精度无源定位。但是该方法涉及的测量参数增多,加大了数据测量与处理的复杂性和难度。文中给出了观测平台飞行姿态角固定情况下的定位表达式并进行了定位精度分析。仿真结果表明了该方法的有效性。

## 2 固定飞行姿态下相位差变化率方法的定位原理及精度分析

### 2.1 固定飞行姿态下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<sup>[3]</sup>计算出目标的方位及其与观测平台之间的径向距离,从而实现对目标的无源定位。具体说明如下:

在目标固定不动的情况下,忽略地球曲率的影响。假定机载观测平台最初向前作水平匀速直线飞行并且没有发生姿态变化。选机腹下机身轴与机翼轴的交点  $O'$  作为机身的代表点,建立载机三维直角坐标系,其中  $O'X'$  轴方向为沿机身纵轴且指向机头方向,  $O'Y'$  轴与  $O'X'$  轴在同一水平面上且指向左侧机翼方向,  $O'Z'$  轴按照右手关系确定为垂直于  $O'X'Y'$  平面且

<sup>1</sup> 2001-10-26 收到, 2002-05-08 改回  
863 基金资助项目

指向上方。由此可知,飞机沿  $O'X'$  轴正向飞行。记海平面上某一固定点  $O$  为原点,建立三维直角坐标系  $O-XYZ$  与坐标系  $O'-X'Y'Z'$  平行。观测平台在固定坐标系  $O-XYZ$  下的位置  $(x_o, y_o, z_o)$  和速度  $(\dot{x}_o, \dot{y}_o, \dot{z}_o)$  可以通过导航设备获取。另外,当观测平台没有发生飞行姿态变化时,在某个定位时刻瞬间我们可以认为载机坐标系  $O'-X'Y'Z'$  是相对原坐标系  $O-XYZ$  固定不动的,在不同时刻载机坐标系随观测平台的空间位置不同而发生平移,其方向保持不变,则在各个定位时刻瞬间,我们可以认为观测平台在载机坐标系  $O'-X'Y'Z'$  下的位置为  $(0, 0, 0)$ , 速度为  $(\dot{x}_o, \dot{y}_o, \dot{z}_o)$ 。

若某时刻机载观测平台发生飞行姿态变化,机身相对于原载机坐标系  $O'-X'Y'Z'$  的滚动角为  $\theta$ , 俯仰角为  $\eta$ , 偏航角为  $\gamma$ , 瞬时角速度矢量的方向依次与  $O'X'$  轴、 $O'Y'$  轴、 $O'Z'$  轴的正向一致,形成的新载机坐标系记作  $O'-X_C Y_C Z_C$  (与坐标系  $O'-X'Y'Z'$  的设置方法相同), 则从原载机坐标系  $O'-X'Y'Z'$  到新载机坐标系  $O'-X_C Y_C Z_C$  的旋转矩阵<sup>[1]</sup> 为

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \eta \cos \gamma & \cos \theta \sin \gamma + \sin \theta \sin \eta \cos \gamma & \sin \theta \sin \gamma - \cos \theta \sin \eta \cos \gamma \\ -\cos \eta \sin \gamma & \cos \theta \cos \gamma - \sin \theta \sin \eta \sin \gamma & \sin \theta \cos \gamma + \cos \theta \sin \eta \sin \gamma \\ \sin \eta & -\sin \theta \cos \eta & \cos \theta \cos \eta \end{bmatrix}$$

不难验证,  $H$  是一个正定矩阵, 即  $H^T = H^{-1}$ 。这里我们约定观测平台的姿态变化瞬间完成, 其后它将保持新的姿态继续向前匀速直线飞行 (观测平台飞行姿态持续变化的情况将在后续文章中加以研究解决), 那么从原载机坐标系到新载机坐标系的旋转矩阵  $H$  保持不变,  $\dot{H} = 0$ 。我们的任务是利用观测平台在固定偏转姿态下测得的数据来确定目标在固定坐标系  $O-XYZ$  下的位置  $(x_T, y_T, z_T)$ 。

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  $O'$  (即  $E_a$ ) 处, 一个天线沿机身轴布设在机尾一侧  $E_b$  处, 另一个天线沿机翼轴布设在左侧机翼靠近机身一侧  $E_c$  处。  $i$  时刻目标在新载机坐标系  $O'-X_C Y_C Z_C$  下相对于观测平台的方位角 (以  $O'Y_C$  轴正向为基准) 记作  $\beta'_i$ , 俯仰角 (与  $X_C O'Y_C$  平面的夹角) 记作  $\varepsilon'_i$ 。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。在无相位差模糊 (测相位差模糊问题可以通过测时差的方法来解决, 具体内容将在后续文章中加以阐述) 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。

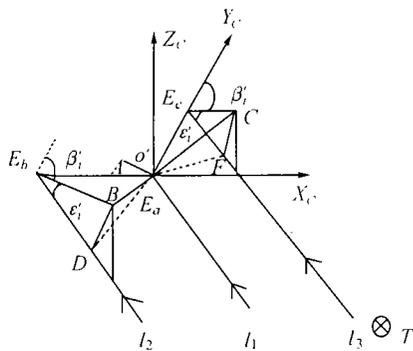


图 1 机载观测平台接收目标辐射电磁波信息的示意图

图 1 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  $l_1, l_2, l_3$  相互平行。  $E_a A, E_b B, E_c C$  分别为  $l_1, l_2, l_3$

在  $X_C O' Y_C$  平面上的投影, 并且有  $E_a B \perp E_b B$ ,  $E_a C \perp E_c C$ . 过  $B$  作  $BD \perp E_b D$  于  $D$ , 过  $C$  作  $CF \perp E_c F$  于  $F$ , 从而有  $E_a D \perp E_b D$ ,  $E_a F \perp E_c F$ . 故有  $E_b D$  即为  $E_a, E_b$  接收目标辐射电磁波的波程差,  $E_c F$  为  $E_a, E_c$  接收目标辐射电磁波的波程差. 则在  $i$  时刻根据图 1 有如下关系

$$\begin{aligned} & \text{在 } \triangle E_a B E_b \text{ 中, } E_b B = E_a E_b \times \cos \angle E_a E_b B = d_x \cos(\beta'_i - 90^\circ) = d_x \sin \beta'_i \\ & \text{在 } \triangle B D E_b \text{ 中 } \angle B E_b D = \varepsilon'_i, \quad E_b D = E_b B \times \cos \varepsilon'_i = d_x \sin \beta'_i \cos \varepsilon'_i \end{aligned} \quad (1)$$

同理

$$\begin{aligned} & \text{在 } \triangle E_a C E_c \text{ 中, } E_c C = E_a E_c \times \cos \angle E_a E_c C = d_y \cos(180^\circ - \beta'_i) = -d_y \cos \beta'_i \\ & \text{在 } \triangle C F E_c \text{ 中 } \angle C E_c F = \varepsilon'_i, \quad E_c F = E_c C \times \cos \angle C E_c F = -d_y \cos \beta'_i \cos \varepsilon'_i \end{aligned} \quad (2)$$

对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值进行解模糊处理, 可得

$$\phi'_{xi} = \omega_T \times \Delta t_{x'} = 2\pi f_T \times (d_x/c) \sin \beta'_i \cos \varepsilon'_i = k_x f_T \sin \beta'_i \cos \varepsilon'_i, \quad k_x = 2\pi d_x/c \quad (3)$$

对应的相位差变化率 (具体估计方法将在后续文章中介绍) 为

$$\dot{\phi}'_{xi} = k_x f_T (\dot{\beta}'_i \cos \beta'_i \cos \varepsilon'_i - \dot{\varepsilon}'_i \sin \beta'_i \sin \varepsilon'_i) \quad (4)$$

对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值进行解模糊处理, 可得

$$\phi'_{yi} = \omega_T \times \Delta t_{y'} = 2\pi f_T \times (d_y/c) (-\cos \beta'_i \cos \varepsilon'_i) = -k_y f_T \cos \beta'_i \cos \varepsilon'_i, \quad k_y = 2\pi d_y/c \quad (5)$$

对应的相位差变化率为

$$\dot{\phi}'_{yi} = k_y f_T (\dot{\beta}'_i \sin \beta'_i \cos \varepsilon'_i + \dot{\varepsilon}'_i \cos \beta'_i \sin \varepsilon'_i) \quad (6)$$

上面各式中  $\omega_T$  为到达观测平台处的来波角频率,  $f_T$  为对应的来波频率,  $\Delta t_{x'}$  为来波到达  $E_a, E_b$  的时间差,  $\Delta t_{y'}$  为来波到达  $E_a, E_c$  的时间差,  $c$  为光速. 由上面 4 式可得

$$\begin{aligned} \cos \varepsilon'_i \sin \beta'_i &= \phi'_{xi}/k_x f_T, \quad \cos \varepsilon'_i \cos \beta'_i = -\phi'_{yi}/k_y f_T, \quad \sin \varepsilon'_i = \frac{\sqrt{k_x^2 k_y^2 f_T^2 - k_y^2 \phi_{xi}'^2 - k_x^2 \phi_{yi}'^2}}{k_x k_y f_T} \\ \frac{d(\cos \varepsilon'_i \sin \beta'_i)}{dt} &= \dot{\phi}'_{xi}/(k_x f_T), \quad \frac{d(\cos \varepsilon'_i \cos \beta'_i)}{dt} = -\dot{\phi}'_{yi}/(k_y f_T), \\ \frac{d \sin \varepsilon'_i}{dt} &= -\frac{k_y^2 \phi_{xi}' \dot{\phi}'_{xi} + k_x^2 \phi_{yi}' \dot{\phi}'_{yi}}{k_x k_y f_T \sqrt{k_x^2 k_y^2 f_T^2 - k_y^2 \phi_{xi}'^2 - k_x^2 \phi_{yi}'^2}} \end{aligned}$$

记  $i$  时刻观测平台在原载机坐标系  $O'-X'Y'Z'$  下的位置为  $(x_{Ogi}, y_{Ogi}, z_{Ogi})$  (实为  $(0, 0, 0)$ ), 速度为  $(\dot{x}_{Ogi}, \dot{y}_{Ogi}, \dot{z}_{Ogi})$  (实为  $(\dot{x}_{O_i}, \dot{y}_{O_i}, \dot{z}_{O_i})$ ), 对应于新载机坐标系  $O'-X_C Y_C Z_C$  下的位置为  $(x'_{Ogi}, y'_{Ogi}, z'_{Ogi})$ , 速度为  $(\dot{x}'_{Ogi}, \dot{y}'_{Ogi}, \dot{z}'_{Ogi})$ . 目标在原载机坐标系下的位置为  $(x_{Tgi}, y_{Tgi}, z_{Tgi})$  (实为  $(x_{T_i} - x_{O_i}, y_{T_i} - y_{O_i}, z_{T_i} - z_{O_i})$ ), 速度为  $(\dot{x}_{Tgi}, \dot{y}_{Tgi}, \dot{z}_{Tgi})$  (实为  $(0, 0, 0)$ ), 与观测平台之间

的径向距离为  $r_i$ , 对应于新载机坐标系下的位置为  $(x'_{Tgi}, y'_{Tgi}, z'_{Tgi})$ , 速度为  $(\dot{x}'_{Tgi}, \dot{y}'_{Tgi}, \dot{z}'_{Tgi})$ , 与观测平台之间的径向距离为  $r'_i$ , 则有

$$\begin{bmatrix} x'_{Ogi} \\ y'_{Ogi} \\ z'_{Ogi} \end{bmatrix} = H \times \begin{bmatrix} x_{Ogi} \\ y_{Ogi} \\ z_{Ogi} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} x'_{Tgi} \\ y'_{Tgi} \\ z'_{Tgi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_{Ogi} + r'_i \cos \varepsilon'_i \sin \beta'_i \\ y'_{Ogi} + r'_i \cos \varepsilon'_i \cos \beta'_i \\ z'_{Ogi} - r'_i \sin \varepsilon'_i \end{bmatrix} = H \times \begin{bmatrix} x_{Tgi} \\ y_{Tgi} \\ z_{Tgi} \end{bmatrix} = H \times \begin{bmatrix} x_{Ogi} + r_i \cos \varepsilon_i \sin \beta_i \\ y_{Ogi} + r_i \cos \varepsilon_i \cos \beta_i \\ z_{Ogi} - r_i \sin \varepsilon_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\text{从而可得} \begin{bmatrix} r'_i \cos \varepsilon'_i \sin \beta'_i \\ r'_i \cos \varepsilon'_i \cos \beta'_i \\ -r'_i \sin \varepsilon'_i \end{bmatrix} = H \times \begin{bmatrix} r_i \cos \varepsilon_i \sin \beta_i \\ r_i \cos \varepsilon_i \cos \beta_i \\ -r_i \sin \varepsilon_i \end{bmatrix}.$$

考虑到目标与观测平台之间的径向距离不随坐标系的旋转而变化 (即  $r_i = r'_i$ ) 这一情况, 上式可以简化为

$$\begin{bmatrix} \cos \varepsilon_i \sin \beta_i \\ \cos \varepsilon_i \cos \beta_i \\ -\sin \varepsilon_i \end{bmatrix} = H^{-1} \times \begin{bmatrix} \cos \varepsilon'_i \sin \beta'_i \\ \cos \varepsilon'_i \cos \beta'_i \\ -\sin \varepsilon'_i \end{bmatrix} = H^T \times \begin{bmatrix} \phi'_{xi}/(k_x f_T) \\ -\phi'_{yi}/(k_y f_T) \\ -\sqrt{k_x^2 k_y^2 f_T^2 - k_y^2 \phi_{xi}'^2 - k_x^2 \phi_{yi}'^2} / (k_x k_y f_T) \end{bmatrix} \quad (9)$$

则目标的方向信息为

$$\sin \varepsilon_i = -h_{13} \frac{\phi'_{xi}}{k_x f_T} + h_{23} \frac{\phi'_{yi}}{k_x f_T} + h_{33} \frac{\sqrt{k_x^2 k_y^2 f_T^2 - k_y^2 \phi_{xi}'^2 - k_x^2 \phi_{yi}'^2}}{k_x k_y f_T} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \cos \varepsilon_i = & \left[ \left( h_{11} \frac{\phi'_{xi}}{k_x f_T} - h_{21} \frac{\phi'_{yi}}{k_x f_T} - h_{31} \frac{\sqrt{k_x^2 k_y^2 f_T^2 - k_y^2 \phi_{xi}'^2 - k_x^2 \phi_{yi}'^2}}{k_x k_y f_T} \right)^2 \right. \\ & \left. + \left( h_{12} \frac{\phi'_{xi}}{k_x f_T} - h_{22} \frac{\phi'_{yi}}{k_y f_T} - h_{32} \frac{\sqrt{k_x^2 k_y^2 f_T^2 - k_y^2 \phi_{xi}'^2 - k_x^2 \phi_{yi}'^2}}{k_x k_y f_T} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (11) \end{aligned}$$

$$\sin \beta_i = \cos^{-1} \varepsilon_i^* \left( h_{11} \frac{\phi'_{xi}}{k_x f_T} - h_{21} \frac{\phi'_{yi}}{k_y f_T} - h_{31} \frac{\sqrt{k_x^2 k_y^2 f_T^2 - k_y^2 \phi_{xi}'^2 - k_x^2 \phi_{yi}'^2}}{k_x k_y f_T} \right) \quad (12)$$

$$\cos \beta_i = \cos^{-1} \varepsilon_i^* \left( h_{12} \frac{\phi'_{xi}}{k_x f_T} - h_{22} \frac{\phi'_{yi}}{k_y f_T} - h_{32} \frac{\sqrt{k_x^2 k_y^2 f_T^2 - k_y^2 \phi_{xi}'^2 - k_x^2 \phi_{yi}'^2}}{k_x k_y f_T} \right) \quad (13)$$

对 (9) 式两边求导, 有

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta}_i \cos \varepsilon_i \cos \beta_i - \dot{\varepsilon}_i \sin \varepsilon_i \sin \beta_i \\ -\dot{\beta}_i \cos \varepsilon_i \sin \beta_i - \dot{\varepsilon}_i \sin \varepsilon_i \cos \beta_i \\ -\dot{\varepsilon}_i \cos \varepsilon_i \end{bmatrix} = H^T \begin{bmatrix} \dot{\phi}'_{xi}/(k_x f_T) \\ -\dot{\phi}'_{yi}/(k_y f_T) \\ -\dot{\varepsilon}'_i \cos \varepsilon'_i \end{bmatrix}, \quad \dot{H} = 0 \quad (14)$$

于是可得目标的方向变化率信息为

$$\dot{\beta}_i = \frac{Q_{1i} \cos \beta_i - Q_{2i} \sin \beta_i}{\cos \varepsilon_i}, \quad \dot{\varepsilon}_i = \frac{-Q_{1i} \sin \beta_i - Q_{2i} \cos \beta_i}{\sin \varepsilon_i} \quad (15)$$

其中

$$Q_{1i} = h_{11} \frac{\dot{\phi}'_{xi}}{k_x f_T} - h_{21} \frac{\dot{\phi}'_{yi}}{k_y f_T} + h_{31} \frac{k_y^2 \dot{\phi}'_{xi} \dot{\phi}'_{xi} + k_x^2 \dot{\phi}'_{yi} \dot{\phi}'_{yi}}{k_x k_y f_T \sqrt{k_x^2 k_y^2 f_T^2 - k_y^2 \dot{\phi}'_{xi}{}^2 - k_x^2 \dot{\phi}'_{yi}{}^2}} \quad (16)$$

$$Q_{2i} = h_{12} \frac{\dot{\phi}'_{xi}}{k_x f_T} - h_{22} \frac{\dot{\phi}'_{yi}}{k_y f_T} + h_{32} \frac{k_y^2 \dot{\phi}'_{xi} \dot{\phi}'_{xi} + k_x^2 \dot{\phi}'_{yi} \dot{\phi}'_{yi}}{k_x k_y f_T \sqrt{k_x^2 k_y^2 f_T^2 - k_y^2 \dot{\phi}'_{xi}{}^2 - k_x^2 \dot{\phi}'_{yi}{}^2}} \quad (17)$$

另外, 在原载机坐标系  $O'-X'Y'Z'$  中有

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \beta_i &= \frac{x_{Tgi} - x_{Ogi}}{y_{Tgi} - y_{Ogi}}, \quad \operatorname{tg} \varepsilon_i = \frac{z_{Ogi} - z_{Tgi}}{\sqrt{(x_{Tgi} - x_{Ogi})^2 + (y_{Tgi} - y_{Ogi})^2}} \\ \dot{\beta}_i &= \frac{(\dot{x}_{Tgi} - \dot{x}_{Ogi})(y_{Tgi} - y_{Ogi}) - (x_{Tgi} - x_{Ogi})(\dot{y}_{Tgi} - \dot{y}_{Ogi})}{(x_{Tgi} - x_{Ogi})^2 + (y_{Tgi} - y_{Ogi})^2} = \frac{\dot{x}_{gi} \cos \beta_i - \dot{y}_{gi} \sin \beta_i}{r_i \cos \varepsilon_i} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\dot{\varepsilon}_i = \frac{-\dot{z}_{gi} r_{pi} + \dot{r}_{pi} z_{gi}}{x_{gi}^2 + y_{gi}^2 + z_{gi}^2} = \frac{-\dot{z}_{gi} \cos \varepsilon_i - (\dot{x}_{gi} \sin \beta_i + \dot{y}_{gi} \cos \beta_i) \sin \varepsilon_i}{r_i} \quad (19)$$

故有

$$r_i = \frac{\dot{x}_{gi} \cos \beta_i - \dot{y}_{gi} \sin \beta_i}{\dot{\beta}_i \cos \varepsilon_i} = \frac{-\dot{z}_{gi} \cos \varepsilon_i - (\dot{x}_{gi} \sin \beta_i + \dot{y}_{gi} \cos \beta_i) \sin \varepsilon_i}{\dot{\varepsilon}_i} \quad (20)$$

求解  $r_i$  时所用的  $\dot{\beta}_i, \dot{\varepsilon}_i$  由 (15) 式确定。从而可得目标在原载机坐标系  $O'-X'Y'Z'$  下的位置为

$$\begin{bmatrix} x_{Tgi} \\ y_{Tgi} \\ z_{Tgi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{Ogi} \\ y_{Ogi} \\ z_{Ogi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_i \cos \varepsilon_i \sin \beta_i \\ r_i \cos \varepsilon_i \cos \beta_i \\ -r_i \sin \varepsilon_i \end{bmatrix} \quad (21)$$

最终可得目标在原固定坐标系  $O-XYZ$  下的位置为

$$\begin{bmatrix} x_{Ti} \\ y_{Ti} \\ z_{Ti} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{Tgi} \\ y_{Tgi} \\ z_{Tgi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{Oi} \\ y_{Oi} \\ z_{Oi} \end{bmatrix} \quad (22)$$

## 2.2 定位精度分析

考虑到文章篇幅问题, 这里忽略观测平台飞行姿态变化的影响(观测平台飞行姿态变化对目标定位精度的影响将在后续文章中探讨), 集中研究相位差、相位差变化率、频率和观测平台运动速度参数随机测量误差对定位精度的影响。在上述假设条件之下, 利用相位差变化率方法对远距离地面固定目标进行定位的表达式可以整理为

$$x_{Ti} = x_{Oi} + r_i \cos \varepsilon_i \sin \beta_i = x_{Oi} - \frac{\dot{x}_{Oi} d_x \dot{\phi}'_{xi} \dot{\phi}'_{yi} + \dot{y}_{Oi} d_y \dot{\phi}'_{xi}{}^2}{d_x (\dot{\phi}'_{xi} \dot{\phi}'_{yi} - \dot{\phi}'_{xi} \dot{\phi}'_{yi})} \quad (23)$$

$$y_{Ti} = y_{Oi} + r_i \cos \varepsilon_i \cos \beta_i = y_{Oi} + \frac{\dot{x}_{Oi} d_x \dot{\phi}'_{yi}{}^2 + \dot{y}_{Oi} d_y \dot{\phi}'_{xi} \dot{\phi}'_{yi}}{d_y (\dot{\phi}'_{xi} \dot{\phi}'_{yi} - \dot{\phi}'_{xi} \dot{\phi}'_{yi})} \quad (24)$$

对上面两式取全微分, 可得目标定位精度受上述参数随机测量误差影响的表达式为

$$\begin{aligned} dx_{Ti} = & \frac{\partial x_{Ti}}{\partial x_{O_i}} \delta x_{O_i} + \frac{\partial x_{Ti}}{\partial f_T} \delta f_T + \frac{\partial x_{Ti}}{\partial \dot{x}_{O_i}} \delta \dot{x}_{O_i} + \frac{\partial x_{Ti}}{\partial \dot{y}_{O_i}} \delta \dot{y}_{O_i} + \frac{\partial x_{Ti}}{\partial \phi'_{x_i}} \delta \phi'_{x_i} + \frac{\partial x_{Ti}}{\partial \phi'_{y_i}} \delta \phi'_{y_i} \\ & + \frac{\partial x_{Ti}}{\partial \phi'_{x_i}} \delta \phi'_{x_i} + \frac{\partial x_{Ti}}{\partial \phi'_{y_i}} \delta \phi'_{y_i} \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} dy_{Ti} = & \frac{\partial y_{Ti}}{\partial y_{O_i}} \delta y_{O_i} + \frac{\partial y_{Ti}}{\partial f_T} \delta f_T + \frac{\partial y_{Ti}}{\partial \dot{x}_{O_i}} \delta \dot{x}_{O_i} + \frac{\partial y_{Ti}}{\partial \dot{y}_{O_i}} \delta \dot{y}_{O_i} + \frac{\partial y_{Ti}}{\partial \phi'_{x_i}} \delta \phi'_{x_i} + \frac{\partial y_{Ti}}{\partial \phi'_{y_i}} \delta \phi'_{y_i} \\ & + \frac{\partial y_{Ti}}{\partial \phi'_{x_i}} \delta \phi'_{x_i} + \frac{\partial y_{Ti}}{\partial \phi'_{y_i}} \delta \phi'_{y_i} \end{aligned} \quad (26)$$

其中的各个偏导数分别为

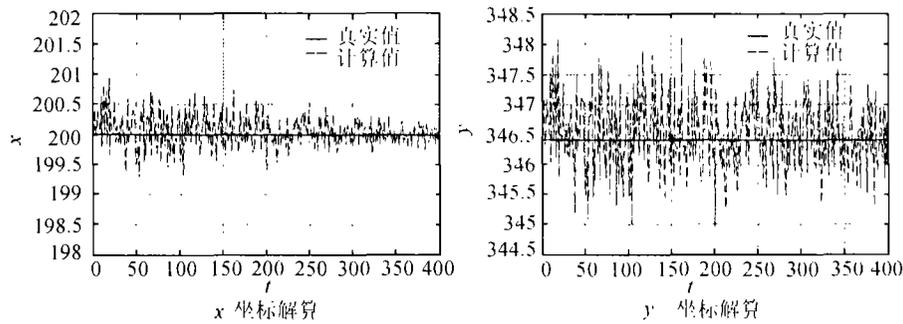
$$\begin{aligned} \frac{\partial x_{Ti}}{\partial x_{O_i}} &= 1, & \frac{\partial x_{Ti}}{\partial f_T} &= 0, \\ \frac{\partial x_{Ti}}{\partial \dot{x}_{O_i}} &= -\frac{dx\phi'_{x_i}\phi'_{y_i}}{dx(\phi'_{x_i}\phi'_{y_i} - \phi'_{x_i}\phi'_{y_i})}, & \frac{\partial x_{Ti}}{\partial \dot{y}_{O_i}} &= -\frac{dy\phi'^2_{x_i}}{dx(\phi'_{x_i}\phi'_{y_i} - \phi'_{x_i}\phi'_{y_i})}, \\ \frac{\partial x_{Ti}}{\partial \phi'_{x_i}} &= \frac{-\dot{x}_{O_i}dx\phi'_{x_i}\phi'^2_{y_i} - 2\dot{y}_{O_i}dy\phi'_{x_i}\phi'_{x_i}\phi'_{y_i} + \dot{y}_{O_i}dy\phi'^2_{x_i}\phi'_{y_i}}{dx(\phi'_{x_i}\phi'_{y_i} - \phi'_{x_i}\phi'_{y_i})^2}, \\ \frac{\partial x_{Ti}}{\partial \phi'_{y_i}} &= \frac{\phi'^2_{x_i}(\dot{x}_{O_i}dx\phi'_{y_i} + \dot{y}_{O_i}dy\phi'_{x_i})}{dx(\phi'_{x_i}\phi'_{y_i} - \phi'_{x_i}\phi'_{y_i})^2}, \\ \frac{\partial x_{Ti}}{\partial \phi'_{x_i}} &= \frac{\phi'_{x_i}\phi'_{y_i}(\dot{x}_{O_i}dx\phi'_{y_i} + \dot{y}_{O_i}dy\phi'_{x_i})}{dx(\phi'_{x_i}\phi'_{y_i} - \phi'_{x_i}\phi'_{y_i})^2}, & \frac{\partial x_{Ti}}{\partial \phi'_{y_i}} &= -\frac{\phi'^2_{x_i}(\dot{x}_{O_i}dx\phi'_{y_i} + \dot{y}_{O_i}dy\phi'_{x_i})}{dx(\phi'_{x_i}\phi'_{y_i} - \phi'_{x_i}\phi'_{y_i})^2}, \\ \frac{\partial y_{Ti}}{\partial y_{O_i}} &= 1, & \frac{\partial y_{Ti}}{\partial f_T} &= 0, \\ \frac{\partial y_{Ti}}{\partial \dot{x}_{O_i}} &= \frac{dx\phi'^2_{y_i}}{dy(\phi'_{x_i}\phi'_{y_i} - \phi'_{x_i}\phi'_{y_i})}, & \frac{\partial y_{Ti}}{\partial \dot{y}_{O_i}} &= \frac{dy\phi'_{x_i}\phi'_{y_i}}{dy(\phi'_{x_i}\phi'_{y_i} - \phi'_{x_i}\phi'_{y_i})}, \\ \frac{\partial y_{Ti}}{\partial \phi'_{y_i}} &= \frac{-2\dot{x}_{O_i}dx\phi'_{x_i}\phi'_{y_i}\phi'_{y_i} + \dot{x}_{O_i}dx\phi'_{x_i}\phi'^2_{y_i} - \dot{y}_{O_i}dy\phi'^2_{x_i}\phi'_{y_i}}{dy(\phi'_{x_i}\phi'_{y_i} - \phi'_{x_i}\phi'_{y_i})^2}, \\ \frac{\partial y_{Ti}}{\partial \phi'_{x_i}} &= \frac{\phi'^2_{y_i}(\dot{x}_{O_i}dx\phi'_{y_i} + \dot{y}_{O_i}dy\phi'_{x_i})}{dy(\phi'_{x_i}\phi'_{y_i} - \phi'_{x_i}\phi'_{y_i})^2}, \\ \frac{\partial y_{Ti}}{\partial \phi'_{x_i}} &= -\frac{\phi'^2_{y_i}(\dot{x}_{O_i}dx\phi'_{y_i} + \dot{y}_{O_i}dy\phi'_{x_i})}{dy(\phi'_{x_i}\phi'_{y_i} - \phi'_{x_i}\phi'_{y_i})^2}, & \frac{\partial y_{Ti}}{\partial \phi'_{y_i}} &= \frac{\phi'_{x_i}\phi'_{y_i}(\dot{x}_{O_i}dx\phi'_{y_i} + \dot{y}_{O_i}dy\phi'_{x_i})}{dy(\phi'_{x_i}\phi'_{y_i} - \phi'_{x_i}\phi'_{y_i})^2} \end{aligned}$$

从以上表达式中不难发现, 相位差及其变化率数据的测量精度是影响目标定位精度的主要因素。

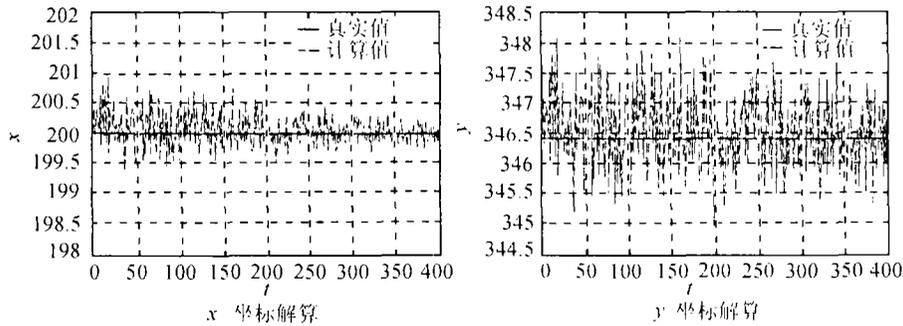
### 3 仿真实验

这里面向对 400km 以外的地面固定目标进行发射前瞄准定位的应用需求, 给出 2 种情况下的仿真结果, 有关的测量数据为  $dx = 10\text{m}$ ,  $dy = 5\text{m}$ , 参数测量精度为  $\sigma_{\phi'} = 0.035\text{rad}$ ,

$\sigma_{\dot{\phi}_i} = 0.0075 \text{ rad/s}$ ,  $\sigma_p = 16 \text{ m}$ ,  $\sigma_{f_T} = 10^4 \text{ Hz}$ ,  $\sigma_V = 0.1 \text{ m/s}$ 。仿真时假定在原固定坐标系  $O-XYZ$  下目标的位置为  $(200, 200\sqrt{3}, 0) \text{ km}$ , 机载观测平台的运动起点为  $(1, 1, 8) \text{ km}$ , 速度为  $H^{-1} \times (300, 0, 0) \text{ m/s}$ 。100 次蒙特卡洛实验的仿真结果见图 2。其中, 目标坐标参量  $x, y$  的单位为千米, 时间参量  $t$  的单位为秒。



(a)  $\theta = 30^\circ$ ,  $\eta = -5^\circ$ ,  $\gamma = 0^\circ$  (对应观测平台的偏转情况为向上爬升同时左侧机翼上抬)



(b)  $\theta = 30^\circ$ ,  $\eta = -5^\circ$ ,  $\gamma = -5^\circ$  (对应观测平台的偏转情况为向右侧偏航爬升同时左侧机翼上抬)

图 2 100 次蒙特卡洛实验的仿真结果

从以上仿真结果可以看出, 在给定的测量精度下, 对目标进行定位的  $x$  坐标偏差绝大多数情况不超过  $0.5 \text{ km}$ ,  $y$  坐标偏差绝大多数情况不超过  $0.8 \text{ km}$ , 能够满足应用需求。

## 4 结 论

本文结合空中观测平台对地面远距离固定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。文中给出了在机载观测平台飞行姿态角固定情况下的定位原理和目标定位表达式, 并进行了定位精度分析, 概念直观清晰, 计算简便快捷。仿真结果表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, 北京, 国防工业出版社, 1987 年 12 月, 35-45, 271-342.
- [2] 孙仲康, 周一宇, 何黎星, 单多基地有源无源定位技术, 北京, 国防工业出版社, 1996 年 5 月, 234-288.

[3] 许耀伟, 一种快速高精度无源定位方法的研究, [博士论文], 长沙, 国防科学技术大学, 1998 年 11 月.

RESEARCH ON PASSIVE LOCATION METHOD  
USING PHASE DIFFERENCE CHANGE RATE WITH  
FIXED FLYING POSTURE ANGLE

Shan Yuehui    Wang Zhan    Wan Jianwei    Sun Zhongkang    Huangfu Kan

(*School of Electron. Sci. and Eng., National Univ. of Defense Tech., Changsha 410073, China*)

**Abstract** In this paper, the single observer-passive location method using phase difference change rate is introduced based on existing methods. The direction of the target can be obtained with phase difference between two orthogonal interferometers on the observer and the radial distance with corresponding phase difference change rate. Then the target can be located with high speed and precision. Locating expressions are given when the observer is flying with a fixed posture angle. Simulations show that this method is effective.

**Key words** Single observer passive location, Phase difference change rate, Fixed posture angle, Direction, Radial distance

单月晖: 女, 1975 年生, 博士生, 研究方向为信号与信息处理.

王 展: 男, 1972 年生, 博士, 研究方向为图像处理、雷达信号处理.

万建伟: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为现代信号处理.

孙仲康: 男, 1930 年生, 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 研究方向为雷达信号处理.

皇甫堪: 男, 1939 年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员, 研究方向为现代信号处理.