

# 船舶塔康天线稳定平台的数学模型

金鸿章, 郭 健, 陈 放

(哈尔滨工程大学自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

## 摘 要

介绍利用旋转矩阵的方法建立塔康天线稳定平台的数学模型, 并利用仿真来验证所建模型的正确性。所建模型要实现的控制目的是: 当船舶作摇荡运动时控制塔康天线始终指着同一个方向, 以达到塔康天线的定向目的。还研究了对船舶摇摆引起的线位移作补偿的平台数学模型, 研究了船舶有线运动时的平台的数学模型。

**关 键 词:** 旋转矩阵; 稳定平台; 数学模型

**中图分类号:** U666.1 **文献标识码:** A

## (一) 引 言

船舶在海上航行时, 由于受到波浪、海风及海流等海洋环境扰动的作用, 不可避免地要产生各种摇荡。船舶空中导航系统(简称塔康)其天线的信号在水平方向上有心形方向特性。为了保证塔康能在船舶摇荡时定向工作, 要求塔康天线有一个运动稳定平台, 以保证天线信号有定向性。

在研究天线运动稳定平台时, 首先必须研究船舶在风浪中的运动模型, 研究地理坐标系, 船体坐标系和运动稳定平台坐标系之间的关系, 找出天线运动稳定平台控制系统的被控对象的运动模型。坐标系是从几何观点引出的, 它是量测物体质心或质点在空间的相对位置, 以及物体在空间的相对方位所使用的基准线组。本文的关键是建立坐标系。建立好的坐标系, 会使建立模型工作达到事半功倍的效果。在船舶运动稳定平台方面有了一些研究, 例如对猎雷声纳稳定平台的研究<sup>[1]</sup>, 利用旋转矩阵的方法来建立模型。但不足之处是, 它们仅仅考虑了平台坐标系与航向坐标系的中心点重合的情况, 限制了所建模型的适用范围。对于塔康天线运动稳定平台, 它的运动中心与船舶运动中心离得比较远, 利用上述方法必将带来很大的误差。本文也研究了船舶有线位移时的运动稳定平台的建模方法。

## (二) 坐标系及各参量符号的定义

本文采用了如下几个坐标系。

### (1) 地理坐标系 $E-\xi\eta\zeta$

分别取  $E\xi$ 、 $E\eta$ 、 $E\zeta$  为北、东、地心方向以构成一右手坐标系, 称之为地理坐标系。坐标原点  $E$  可以取为地面上的任意一点, 如图 1 所示。

### (2) 航向坐标系 $h-X_H Y_H Z_H$

取船的艏艉向为  $hX_H$ , 右舷方向为  $hY_H$ ,  $hZ_H$  指向地心, 点  $h$  可以取船的重心或中心, 以构成航向坐标系, 如图 1 所示。地理坐标系与航向坐标系的关系如图 1 所示, 其夹角为航向角  $K$ 。

收稿日期: 2001-11-12; 修改稿收稿日期: 2002-03-10

### (3) 平台坐标系 $f-X_f Y_f Z_f$

以  $fX_f$  平行于  $E\xi$  轴,  $fY_f$  平行于  $E\eta$  轴,  $fZ_f$  平行于  $E\zeta$  轴, 点  $f$  为平台中心, 建立右手坐标系, 称之为平台坐标系, 此系为一动坐标系。平台坐标系与航向坐标系的关系如图 2 所示。

### (4) 船舶坐标系 $G-X_h Y_h Z_h$

如图 3 所示, 船舶坐标系相对航向坐标系绕  $hZ_h$  轴转船的首摇角  $\psi$  (在水平面内), 绕  $hY_h$  轴转船的纵摇角  $\theta$ , 再绕  $hX_h$  轴的转船的横摇角  $\phi$  (在肋骨面内)。点  $G$  的取法与点  $h$  的取法一致。

假设初始时刻船舶坐标系与平台坐标系是平行的。

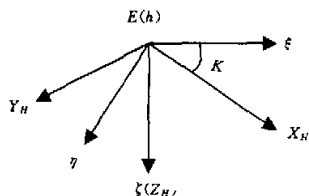


图 1 地理坐标系与航向坐标系的关系

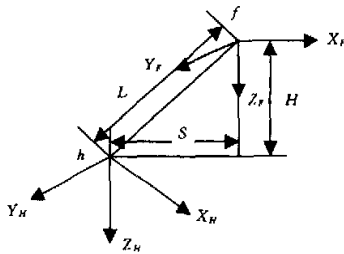


图 2 平台坐标系与航向坐标系的关系

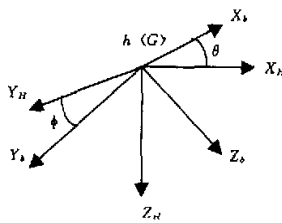


图 3 船舶坐标系与航向坐标系的关系

## (三) 平台运动数学模型

应用坐标系之间的关系, 推导信息变换的数学模型。不考虑由船的角运动及线运动引起的平台中心点  $f$  的线位移。

在图 4 中,  $f-X_f Y_f Z_f$  为平台坐标系,  $h-X_h Y_h Z_h$  为航向坐标系,  $E-\xi\eta\zeta$  为地理坐标系。点  $f'$  为平台坐标系中心点  $f$  在  $X_h h Y_h$  平面上的投影点。点  $A$  为飞机(目标点)所在的位置。过  $f$  点作坐标系  $f-X_f Y_f Z_f$  平行于坐标系  $h-X_h Y_h Z_h$ 。点  $B$  是  $A$  点在  $X_h f Y_h$  平面上的投影, 点  $C$  为  $A$  点在  $X_h h Y_h$  平面上的投影。目标点  $A$  与坐标系  $f-X_f Y_f Z_f$  的夹角如图 4 所示。其中点  $h$  在地理坐标系中的位置可以用地理坐标  $(X_h, Y_h, Z_h)$  来表示, 目标点  $A$  的地理坐标  $(X_a, Y_a, Z_a)$  为已知。

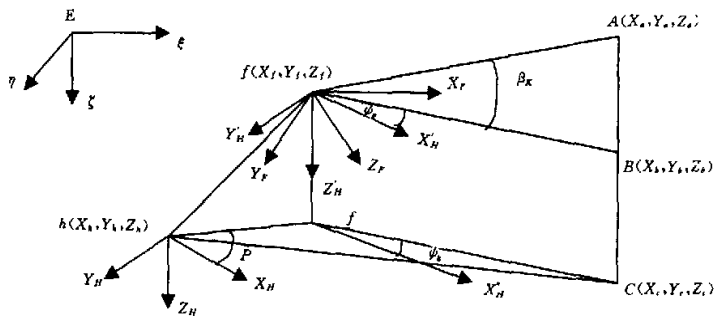


图 4 地理坐标系、航向坐标系、平台坐标系及目标点之间的关系

### 1. 确定各点坐标及其关系

从图 4 中可以看出, 需要确定坐标的点为  $f$ ,  $h$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  及  $f'$ 。其中  $h$  及  $A$  点的地理坐标已知, 且  $hf'$  与  $hX_h$  的夹角  $P$  已知,  $L$ ,  $S$ ,  $H$  也均为已知。

从图 4 中的作图步骤及几何关系, 可以确定出  $f$ ,  $B$ ,  $C$  及点  $f'$  的地理坐标为  $f(S\cos(P-K)+X_h, -S\sin(P-K)+Y_h, Z_h-H)$ ,  $B(X_a, Y_a, Z_a-H)$ ,

$$C(X_a, Y_a, Z_h), f'(S\cos(P-K)+X_h, -S\sin(P-K)+Y_h, Z_h)$$

## 2. 确定距离及角度

以  $f$  为中心作  $f-X_H Y_H Z_H$  平行于航向坐标系  $h-X_H Y_H Z_H$ 。目标点  $A$  与坐标系  $f-X_H Y_H Z_H$  的关系如图 4 所示。要想使平台能稳定跟踪到目标, 必须确定出  $\Psi_k$  与  $\beta_k$  的大小。因此, 需要确定出某些距离作为辅助手段来求这两个角度。

### (1) $\beta_k$ 的求解

已知  $f$ 、 $A$  及  $B$  在地理坐标系中的地理坐标, 根据空间两点距离公式, 可以求出:

$$\beta_k = \cos^{-1} \left[ \frac{\sqrt{[x_a - S\cos(P-K) - x_h]^2 + [y_a + S\sin(P-K) - y_h]^2}}{\sqrt{[x_a - S\cos(P-K) - x_h]^2 + [y_a + S\sin(P-K) - y_h]^2 + (Z_a - Z_h + H)^2}} \right] \quad (1)$$

### (2) $\Psi_k$ 的求解

过  $f'$  点作  $f'X'_H$  平行于  $fX_H$ , 则  $\angle cf'X'_H = \Psi_k$  (见图 4)。可以看出:  $\Psi_k = P - \angle f'hc - \angle f'ch$ 。由两点距离公式, 及三角形余弦定理, 可得:

$$\Psi_k = p - \cos^{-1} \left[ \frac{\cos(P-K)(x_h - x_a) - \sin(P-K)(y_h - y_a)}{\sqrt{(x_h - x_a)^2 + (y_h - y_a)^2}} \right] - \cos^{-1} \left[ \frac{(x_h - x_a)^2 + S\cos(P-K)(x_h - x_a) + (y_h - y_a)^2 - S\sin(P-K)(y_h - y_a)}{\sqrt{(x_h - x_a)^2 + (y_h - y_a)^2} \sqrt{[S\cos(P-K) + x_h - x_a]^2 + [-S\sin(P-K) + y_h - y_a]^2}} \right] \quad (3)$$

## 3. 模型建立

(1) 从图 4, 假设目标所在的坐标系为  $f-X_k Y_k Z_k$ , 其与坐标系  $f-X_H Y_H Z_H$  的关系为:  $f-X_k Y_k Z_k$  是  $f-X_H Y_H Z_H$  绕  $Z_H$  转  $\Psi_k$ , 然后再绕  $fY_H$  转  $\beta_k$  得到的, 因此, 二者之间具有一一对应的关系, 用数学式表示为:

$$\begin{bmatrix} X_k \\ Y_k \\ Z_k \end{bmatrix} = R_1(\beta_k) R_2(\Psi_k) \begin{bmatrix} X_H \\ Y_H \\ Z_H \end{bmatrix} \quad (4)$$

(2) 初始时刻平台坐标系平行于船舶坐标系, 且  $f-X_H Y_H Z_H$  平行于  $h-X_H Y_H Z_H$ 。则船舶坐标系与航向坐标系的关系可以等同于平台坐标系  $f-X_f Y_f Z_f$  与  $f-X_H Y_H Z_H$  之间的关系, 即可以用数学式子表示为

$$\begin{bmatrix} X_f \\ Y_f \\ Z_f \end{bmatrix} = R_X(\phi) R_Y(\theta) R_Z(\Psi) \begin{bmatrix} X_H \\ Y_H \\ Z_H \end{bmatrix} \quad (5)$$

现假设平台绕自身的轴分别转过  $\alpha, \gamma, \beta$  角后, 平台保持稳定且对准目标, 即此时平台不仅克服了船摇摆的影响, 而且完成了控制指令角  $\Psi_k, \beta_k$ , 指向了目标所在的方向, 用数学式子表示为:

$$\begin{bmatrix} X_k \\ Y_k \\ Z_k \end{bmatrix} = R_{Y_f}(\beta) R_{X_f}(\gamma) R_{Z_f}(\alpha) \begin{bmatrix} X_f \\ Y_f \\ Z_f \end{bmatrix} \quad (6)$$

令  $R_{Y_f}(\beta) R_{X_f}(\gamma) R_{Z_f}(\alpha) = T$ ,  $R_X(\phi) R_Y(\theta) R_Z(\Psi) = T_1$  则有

$$\begin{bmatrix} X_k \\ Y_k \\ Z_k \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} X_f \\ Y_f \\ Z_f \end{bmatrix} = TT_1 \begin{bmatrix} X_H \\ Y_H \\ Z_H \end{bmatrix} \quad (7)$$

由(4)式与(7)式得

$$R_1(\beta_k)R_2(\Psi_k) \begin{bmatrix} X_H \\ Y_H \\ Z_H \end{bmatrix} = TT_1 \begin{bmatrix} X_H \\ Y_H \\ Z_H \end{bmatrix} \quad (8)$$

所以:

$$T = R_1(\beta_k)R_2(\Psi_k)T_1^{-1} \quad (9)$$

由旋转矩阵可得

$$T_1 = \begin{bmatrix} \cos\Psi\cos\theta & \sin\Psi\sin\theta & -\sin\theta \\ \cos\Psi\sin\theta\sin\phi - \sin\Psi\cos\phi & \sin\Psi\sin\theta\sin\phi + \cos\Psi\cos\phi & \cos\theta\sin\phi \\ \cos\Psi\sin\theta\cos\phi + \sin\Psi\sin\phi & \sin\Psi\sin\theta\cos\phi - \cos\Psi\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\text{则 } R_1(\beta_k)R_2(\Psi_k)T_1^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\beta_k & 0 & -\sin\beta_k \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta_k & 0 & \cos\beta_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\Psi_k & \sin\Psi_k & 0 \\ -\sin\Psi_k & \cos\Psi_k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} T_1^{-1} \quad (11)$$

$$T = R_{Y_I}(\beta)R_{X_I}(\gamma)R_{Z_I}(\alpha)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\beta\cos\alpha - \sin\beta\sin\alpha\sin\gamma & \cos\beta\sin\alpha + \sin\beta\sin\gamma\cos\alpha & -\sin\beta\cos\gamma \\ -\cos\gamma\sin\alpha & \cos\gamma\cos\alpha & \sin\gamma \\ \sin\beta\cos\alpha + \cos\beta\sin\alpha\sin\gamma & \sin\beta\sin\alpha - \cos\beta\sin\gamma\cos\alpha & \cos\gamma\cos\beta \end{bmatrix} \quad (12)$$

由  $T = R_1(\beta_k)R_2(\Psi_k)T_1^{-1}$  得

$$\alpha = \text{ctg}^{-1}[-\text{tg}\theta\sin\phi + \cos\phi\text{ctg}(\Psi_k - \Psi)/\cos\theta] \quad (13)$$

$$\gamma = \sin^{-1}[-\sin\theta\cos\phi\sin(\Psi_k - \Psi) - \sin\phi\cos(\Psi_k - \Psi)] \quad (14)$$

$$\beta = \text{tg}^{-1} \frac{\cos\beta_k\sin\theta\cos\phi\cos(\Psi_k - \Psi) - \cos\beta_k\sin\phi\sin(\Psi_k - \Psi) - \sin\beta_k\cos\theta\cos\phi}{\sin\beta_k\sin\theta\cos\phi\cos(\Psi_k - \Psi) - \sin\beta_k\sin\phi\sin(\Psi_k - \Psi) + \cos\theta\cos\phi\cos\beta_k} \quad (15)$$

(13)式, (14)式和(15)式即为所求得的平台运动信息变换的数学模型。用此模型求出的  $\alpha, \beta, \gamma$  来控制平台, 即可使平台保持稳定且对准目标。

#### (四) 模型的仿真实验

##### 1. 验证的思路

为了验证模型的正确性, 可以采取以下的思路: 将所建模型的  $\alpha, \beta, \gamma$  当作已知条件, 在平台坐标系中取一点, 使其随着船舶的摇摆经控制绕自身的轴转动  $\alpha, \beta, \gamma$  后, 到达一新的位置, 看该点此时与  $f-X_H Y_H Z_H$  的控制指令角  $\Psi'_k, \beta'_k$  是否与已知的  $\Psi_k, \beta_k$  相等, 若相等则说明所建模型正确。

##### 2. 仿真结果

本次仿真采用的已知条件有:  $S=50; H=30; P=\pi/3; K=\pi/6; \Phi=\sin(2\pi t/6.5); \theta=0.5\sin(2\pi t/3.5); \Psi=0.5\sin(2\pi t/10.0); \Phi, \theta, \Psi$  仿真曲线如图 5(a)所示。

(1)  $X_a=1000; Y_a=500; Z_a=-150; X_k=200; Y_k=100; Z_k=-2$ ; 仿真曲线如图 5(b)所示

(2)  $X_a=10000; Y_a=6000; Z_a=-250; X_k=800; Y_k=800; Z_k=-3$ ; 仿真曲线如图 5(c)所示

其中:  $\Delta\Psi_k = \Psi'_k - \Psi_k, \Delta\beta_k = \beta'_k - \beta_k$

由以上仿真曲线可知,  $\Delta\Psi_k$  和  $\Delta\beta_k$  近似为零, 即平台轴上的点在船摇摆的影响下, 通过控制平台绕自身轴转过  $\alpha, \beta, \gamma$  后, 该点与平台中心点、目标点在同一条直线上, 说明平台经过控制绕自身的轴转过  $\alpha, \beta, \gamma$  角度后, 可以对准目标, 证明所建模型是正确的。

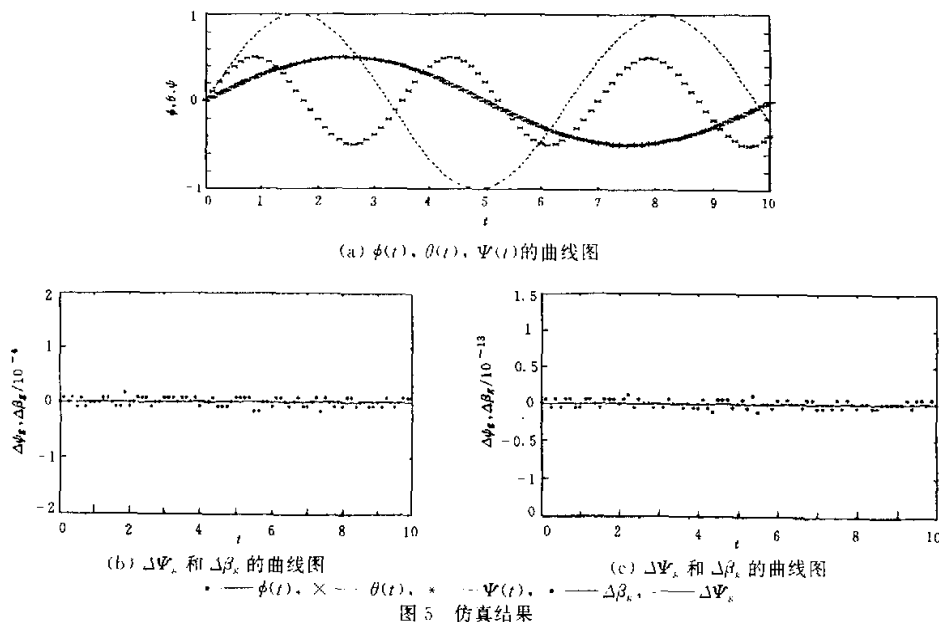


图 5 仿真结果

## (五) 对船舶角运动影响的补偿

### 1. 补偿的原因及方法

在不考虑平台线位移影响的情况下,建立了克服平台角运动影响的坐标变换的数学模型式(13)、式(14)和式(15),用来控制平台实现控制指令角  $\Psi_k$ ,  $\beta_k$ 。实际上,由于平台中心与船舶的摇摆中心不重合,在船摇摆的影响下,平台会有线位移增量,使平台偏离原来的指向。控制后的平台不可能准确指向目标,需要对线位移引起的平台指向偏离加以修正,其方法是:假设平台没有线位移运动,目标点有线位移运动到一新的目标点,求出新的目标点相对坐标系  $f-X_H Y_H Z_H$  的指令角  $\Psi'_k$ ,  $\beta'_k$ ,然后就可以求出由于线位移的影响所需要的修正量  $\Delta\Psi_k$ ,  $\Delta\beta_k$ 。

这里所指的线位移,是指平台摇摆中心线位移的增量。平台摇摆中心在某一方向上线位移增量为零,说明平台在该方向上没有线位移运动,线位移增量绝对值越大,则平台摇摆中心偏离原中心点越远,为此需要加以修正的角度就有可能越大。计算线位移的增量,可以用旋转矩阵的方法。

### 2. 角运动引起的修正角模型

用以上方法,求出指令角  $\Psi'_k$ ,  $\beta'_k$  为

$$\beta'_k = \cos^{-1} \left[ \frac{(\sqrt{[\text{Scos}(P-K) + x_h - x_u + \Delta x_f]^2 + [-\text{Ssin}(P-K) + Y_h - Y_u + \Delta Y_f]^2})}{\sqrt{[x_u - \Delta x_f - \text{Scos}(P-K) - x_h]^2 + [Y_u - \Delta Y_f + \text{Ssin}(P-K) - Y_h]^2 + (Z_u - \Delta Z_f - Z_h - H)^2}} \right] \quad (16)$$

$$\Psi'_k = P - \cos^{-1} \left\{ \frac{\cos(P-K)(x_u - \Delta x_f - x_h) - \sin(P-K)(Y_u - \Delta Y_f - Y_h)}{\sqrt{(x_h - x_u + \Delta x_f)^2 + (Y_h - Y_u + \Delta Y_f)^2}} \right\} \\ - \cos^{-1} \left\{ \frac{[(x_h - x_u + \Delta x_f)^2 + \text{Scos}(P-K)(x_h - x_u + \Delta x_f) + (Y_h + \Delta Y_f - Y_u)^2 - \text{Ssin}(P-K)(Y_h - Y_u + \Delta Y_f)]}{\left[ \sqrt{[\text{Scos}(P-K)x_h - x_u + \Delta x_f]^2 + [-\text{Ssin}(P-K) + Y_h - Y_u + \Delta Y_f]^2} \right]^2} \right\} \\ \left[ \sqrt{(x_h - x_u + \Delta x_f)^2 + (Y_h - Y_u + \Delta Y_f)^2} \right]^{-1} \quad (17)$$

式中,  $\Delta X_f$ 、 $\Delta Y_f$ 、 $\Delta Z_f$  为平台中心点  $f$  的线位移增量,  $(X_f', Y_f', Z_f')$  为点  $f$  在航向坐标系  $h-X_H Y_H Z_H$  中的坐标。且:

$$\Delta X_f = \cos \Psi \cos \theta X_f' + \sin \Psi \cos \theta Y_f' - \sin \theta Z_f' - X_f'$$

$$\Delta Y_f = (\cos \Psi \sin \theta \sin \phi - \sin \Psi \cos \phi) X_f' + (\sin \Psi \sin \theta \sin \phi + \cos \Psi \cos \phi) Y_f' + \cos \theta \sin \phi Z_f' - Y_f'$$

$$\Delta Z_f = (\cos \Psi \sin \theta \cos \phi + \sin \Psi \sin \phi) X_f' + (\sin \Psi \sin \theta \cos \phi - \cos \Psi \sin \phi) Y_f' + \cos \theta \cos \phi Z_f' - Z_f'$$

$$X_f' = S \cos P \quad Y_f' = -S \sin P \quad Z_f' = -H$$

由于  $\Psi_k$  与  $\Psi_e$  在同一平面内,  $\beta_k$  与  $\beta_e$  在同一平面内, 可以线性相加, 所以有:

$$\Delta \Psi_k = \Psi_k' - \Psi_k \quad (18)$$

$$\Delta \beta_k = \beta_k' - \beta_k \quad (19)$$

$\Delta \Psi_k$  和  $\Delta \beta_k$  实际上是对控制指令角的修正。因此, 只需要将修正后的指令角代入原数学模型中即可达到对由于线位移使平台指向偏离的修正, 这样可使修正过程简化。修正后的模型为:

$$\alpha_1 = \text{ctg}^{-1}[-\text{tg} \theta \sin \phi + \cos \phi \text{tg}(\Psi_k' - \Psi + \Delta \Psi_k)] / \cos \theta \quad (20)$$

$$\gamma_1 = \sin^{-1}[-\sin \theta \cos \phi \sin(\Psi_k' - \Psi + \Delta \Psi_k) - \sin \phi \cos(\Psi_k' - \Psi + \Delta \Psi_k)] \quad (21)$$

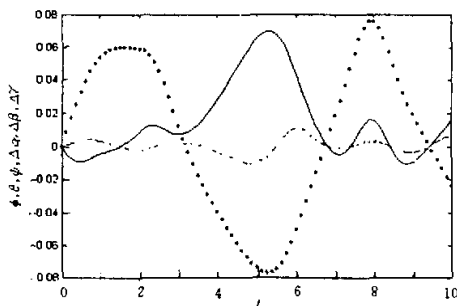
$$\beta_1 = \text{tg}^{-1}\{-[\cos(\beta_k' + \Delta \beta_k) \sin \theta \cos \phi \cos(\Psi_k' - \Psi + \Delta \Psi_k) - \cos(\beta_k' + \Delta \beta_k) \sin \phi \sin(\Psi_k' - \Psi + \Delta \Psi_k) - \sin(\beta_k' + \Delta \beta_k) \cos \theta \sin \phi][\sin(\beta_k' + \Delta \beta_k) \sin \theta \cos \phi \cos(\Psi_k' - \Psi + \Delta \Psi_k) + \cos \theta \cos \phi \cos(\beta_k' + \Delta \beta_k)]^{-1} \quad (22)$$

### 3. 修正模型的仿真实验

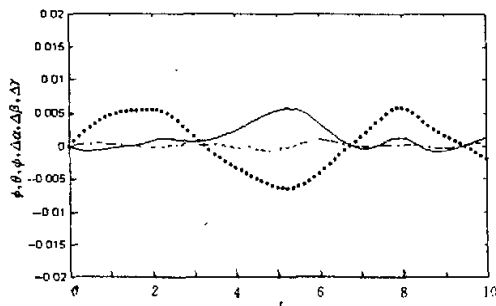
仿真的已知条件同上, 仿真曲线如图 6 所示。其中:

$$\Delta \alpha = \alpha_1 - \alpha, \quad \Delta \beta = \beta_1 - \beta, \quad \Delta \gamma = \gamma_1 - \gamma$$

从以上的仿真可以看出, 随着目标距离的加大, 经补偿后的控制平台转动的角度  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$ ,  $\gamma_1$  与未补偿前的控制平台转动的角度  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  之差  $\Delta \alpha$ ,  $\Delta \beta$ ,  $\Delta \gamma$  变小。说明距离远时, 船的角运动的影响可以忽略不计。但距离较近时, 必须进行补偿。



(a)



(b)

· · ·, - · ·, 分别代表  $\Delta \alpha$ ,  $\Delta \beta$ ,  $\Delta \gamma$

图 6 对船舶角运动引起的线位移的补偿的仿真

## (六) 对船舶线运动影响的补偿

### 1. 补偿的原因及方法

船舶在风浪中航行时, 除了角运动处, 还有线性运动。平台会有线位移增量, 使平台偏离原来的指向, 从而使控制后的平台不能准确对准目标。因此, 需要对线位移引起的平台指向偏离加以修正。

采取类似于前面所述的方法, 求出由于线位移的影响所需要的修正量  $\Delta \Psi_k$ ,  $\Delta \beta_k$ 。

### 2. 线位移引起的修正角模型

根据上面所述的方法, 可以求出由于船的线位移影响后的控制指令角  $\Psi_k'$ ,  $\beta_k'$  为:

$$\beta_k = \cos^{-1} \left[ \frac{\sqrt{(x_u - S \cos(P - K_1) - x_{h1})^2 + (y_u + S \sin(P - K_1) - y_{h1})^2}}{\sqrt{[x_u - S \cos(P - K_1) - x_{h1}]^2 + [y_u + S \sin(P - K_1) - y_{h1}]^2 + (Z_u - Z_{h1} + H)^2}} \right] \quad (23)$$

$$\Psi_k^* = P - \pi + \cos^{-1} \left\{ [S^2 + (S \cos(P - K_1) + x_h - x_u)^2 + (-S \sin(P - K_1) + y_{h1} - y_u)^2 - (x_{h1} - x_u)^2 - (y_{h1} - y_u)^2] / [2S \sqrt{(S \cos(P - K_1) + x_h - x_u)^2 + (-S \sin(P - K_1) + y_{h1} - y_u)^2}] \right\} \quad (24)$$

式中,  $K_1$ : 船运动到另一位置时的航向角;  $(x_{h1}, y_{h1}, z_{h1})$ : 船运动到另一位置时航向坐标系中心点的坐标。

同理可得:

$$\Delta \Psi_{k1} = \Psi_k^* - \Psi_k - K_1 + K \quad (25)$$

$$\Delta \beta_{k1} = \beta_k^* - \beta_k \quad (26)$$

修正后的数学模型为:

$$\alpha_2 = \text{ctg}^{-1} [-\text{tg} \theta \sin \phi + \cos \phi \text{ctg}(\Psi_k - \Psi + \Delta \Psi_{k1} + K_1 - K) / \cos \theta] \quad (27)$$

$$\gamma_k = \sin^{-1} [-\sin \theta \cos \phi \sin(\Psi_k - \Psi + \Delta \Psi_{k1} + K_1 - K) - \sin \phi \cos(\Psi_k - \Psi + \Delta \Psi_{k1} + K_1 - K)] \quad (28)$$

$$\beta_2 = \text{tg}^{-1} \{ -[\cos(\beta_k + \Delta \beta_{k1}) \sin \theta \cos \phi \cos(\Psi_k - \Psi + \Delta \Psi_{k1} + K_1 - K) - \cos(\beta_k + \Delta \beta_{k1}) \sin \phi \sin(\Psi_k - \Psi + \Delta \Psi_{k1} + K_1 - K) - \sin(\beta_k + \Delta \beta_{k1}) \cos \theta \cos \phi] / [\sin(\beta_k + \Delta \beta_{k1}) \sin \theta \cos \phi \cos(\Psi_k - \Psi + \Delta \Psi_{k1} + K_1 - K) - \sin(\beta_k + \Delta \beta_{k1}) \sin \phi \sin(\Psi_k - \Psi + \Delta \Psi_{k1} + K_1 - K) + \cos \theta \cos \phi \cos(\beta_k + \Delta \beta_{k1})] \} \quad (29)$$

### 3. 线运动修正模型的仿真验证

仿真的已知条件同上, 仿真曲线如图 7 所示。其中  $\Delta \alpha = \alpha_2 - \alpha$ ,  $\Delta \beta = \beta_2 - \beta$ ,  $\Delta \gamma = \gamma_2 - \gamma$

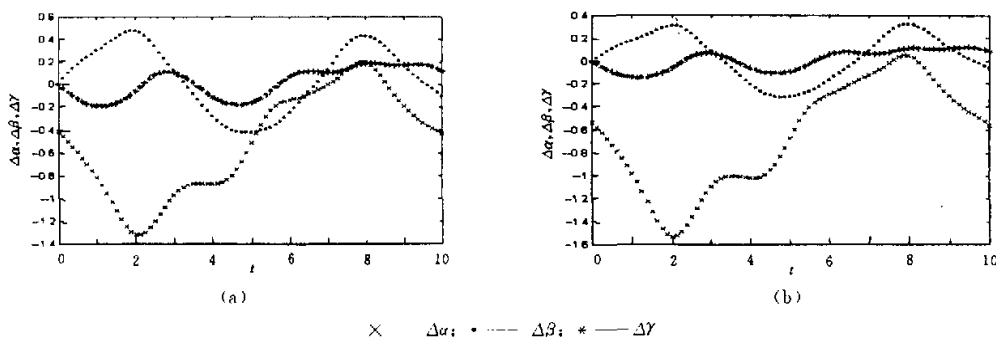


图 7 船舶线运动补偿的仿真

从以上的仿真曲线可以看出, 随着目标距离的加大, 角度之差  $\Delta \alpha$ ,  $\Delta \beta$ ,  $\Delta \gamma$  越来越大, 所以有补偿的必要性。还可以看出, 由船舶线运动的影响所引起的控制平台转动的角度之差随距离的变化规律同由船的角运动的影响所产生的变化规律相反。

## (七) 结 论

利用旋转矩阵的方法建立了塔康天线稳定平台数学模型, 考虑了船舶摇摆引起的平台的转角的控制, 也考虑对平台线位移的补偿控制和船舶线运动对平台的补偿控制。这种补偿控制数学模型可以提高塔康天线稳定平台的控制精度, 减小控制系统的控制难度, 利用此数学模型, 还可以建立塔康天线的数学平台, 与物理平台结合, 可以有效地减小塔康平台的体积、简化物理平台的结构。

本文的数学模型可用于船舶上其他运动稳定平台,特别适用于稳定平台摇摆中心与船舶摇摆中心距离较大的运动稳定平台。

### 参 考 文 献

- 1 金鸿章,姚绪梁.船舶控制原理[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2001.
- 2 刘 胜.舰载捷联式猎雷声纳基阵姿态控制系统研究与实现[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学博士学位论文,2000.
- 3 Abkowitz M A. Stability and Motion Control of Ocean Vehicles. MIT, 1970.
- 4 Hammond J T. Development of a six Degree of Freedom Motion Simulation Model for Use in Submarine Design Analysis [Z]. AD A078410. 1978.
- 5 戚尚菊.水下基阵控制稳定运动系统的信息变换及仿真研究[D].哈尔滨工程大学硕士学位论文,1996.
- 6 金鸿章.船舶特种装置控制系统[M].北京:国防工业出版社,1995.
- 7 孙诗南.自动化船舶的发展[J].船电通讯,1997年,(1):11~14.
- 8 马玉明.潜艇空间运动控制系统的设计与仿真[D].哈尔滨工程大学硕士学位论文,1997.

## Mathematical Model of TACAN Antenna Stable Platform of Naval Vessels

JIN Hong-zhang, GUO Jian, CHEN Fang

(Automatic Control Institute, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

### Abstract

This article establishes a TACAN antenna mathematic model by using rotating matrix method. The model is verified by simulation. The intent of this model is, to control the TACAN antenna of the ship to point the same direction aiming at the goal when the ship is shaking. This article also builds up platform mathematical model of compensating linear displacement caused by ship's shaking and platform mathematic model of the ship's linear moving.

**Key words:** rotating matrix; stable platform; TACAN antenna; mathematic model

### 作 者 简 介

**金鸿章** 男,教授,博士生导师。主要研究工作为船舶控制理论和系统,船舶控制装置,控制理论及应用,从事船舶控制系统研究与设计30余年。通讯地址:黑龙江哈尔滨工程大学自动化学院,150001。

**郭 健** 女,硕士研究生。主要进行控制理论与控制工程的研究。

**陈 放** 男,博士研究生。主要进行船舶运动控制研究。



## 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](http://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](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、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](http://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>