

文章编号: 2095—0411 (2012) 01—0029—04

# 雷达稳定平台中陀螺仪矢量变换研究<sup>\*</sup>

陶 鑫, 付俊勇, 俞竹青

(常州大学 机械工程学院, 江苏 常州 213164)

**摘要:** 机载 SAR 中, 天线稳定平台是为了消除载机飞行姿态变化对成像影响的关键设备。目前的天线稳定平台一般将陀螺仪安装在稳定平台上, 由于受到高空低温、高湿和电机磁场等的干扰, 稳定平台对其陀螺仪的工作精度和可靠性要求很高, 对其防护要求也很高, 增加了平台制造的难度和成本。本文提出将陀螺仪安装在载机内部, 通过建立和分析陀螺仪矢量变换数学模型, 能够正确获得稳定平台三轴上对应的角速度信号, 并得到实验数据的证实。

**关键词:** 陀螺仪; 稳定平台; 矢量变换

**中图分类号:** TP 212

**文献标识码:** A

## Research of Gyro Vector Transformation on Stable Platform for Radar

TAO Xin, FU Jun—yong, YU Zhu—qing

(School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** In the airborne synthetic aperture radar (SAR), the stable platform of antenna is key equipment to eliminate the influence of aircraft attitude variation on the imaging. At present, the gyroscope is commonly settled on the stable platform. Unfortunately, due to the disturbances of low temperature and high humidity at high altitude as well as the magnetic field of motors, the particularly high accuracy and reliability of the gyro are required by the platform, and the protection for the gyro is also very strict. These make it difficult and costly to manufacture the platform. A method is proposed in this paper to set the gyro into the aircraft interior, and the angular velocity signals of the three—axis stable platform are correctly acquired by establishing and analyzing the mathematics model of gyro vector transformation, and it is verified by the experimental data.

**key words:** gyro; stable platform; vector transformation

机载 SAR 天线受飞机飞行姿态 (俯仰、方位、横滚) 变化的影响较大, 地物的像点由于飞行姿态的变化而改变, 导致 SAR 雷达成像不清晰, 为了消除载机飞行姿态变化的影响, 在 SAR 天线与载机之间增设三轴稳定平台来隔离飞机姿态变化引起的像移, 保持像点位置不变。机载 SAR 天线

稳定平台需要使用陀螺仪感知载机 3 个方向上的姿态变化, 并在该 3 个方向上附加相反方向的对消旋转运动使像点保持静止不动。目前, 机载 SAR 天线稳定平台一般都将陀螺仪安装在稳定平台上, 由于机载 SAR 天线稳定平台在高空中的工作环境差, 受到低温、潮湿和驱动电机磁场的干扰, 陀螺仪的

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2011—09—28

作者简介: 陶鑫 (1988—), 男, 宁夏银川人, 硕士生; 通讯联系人: 俞竹青。

性能和防护要求很高,增加了机载 SAR 天线稳定平台难度和成本。本文试图采用将陀螺仪安装在载机内控制箱中的方法,使陀螺仪工作环境显著改善和更安全。只要正确变换载机内三轴陀螺仪到稳定平台运动轴之间的矢量关系,就可以根据载机内控制箱中的 3 个正交陀螺仪信号获得平台各个转轴方向的角速度量值,指令对应轴的伺服电机做对消补偿旋转运动。

## 1 机载 SAR 天线稳定平台陀螺仪布局分析

图 1 为某三轴机载 SAR 天线稳定平台结构示意图,陀螺仪安装在稳定平台上,三轴顺序为方位  $Z$ —俯仰  $X$ —横滚  $Y$ ,将 3 个单轴陀螺仪(方位陀螺仪  $Z$ 、俯仰陀螺仪  $X$ 、横滚陀螺仪  $Y$ )分别安装在稳定平台三转轴方向上,当载机受气流干扰姿态发生变化时,每个陀螺仪探测各自方向的角速率信号量,通过信号传输输送给控制系统,由控制系统经过处理反馈给驱动系统,驱动执行元件以消除扰动<sup>[1]</sup>。

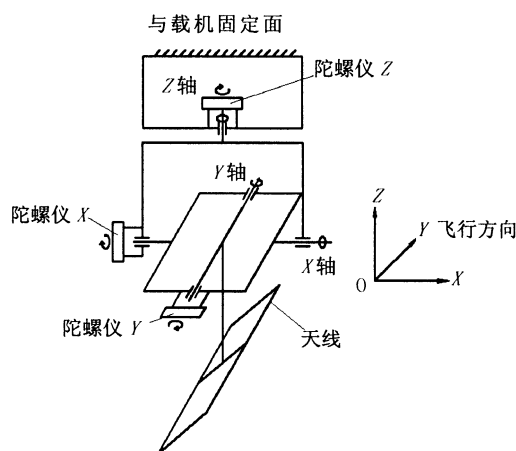


图 1 安装在稳定平台上的陀螺仪

Fig. 1 Gyros fixed on the stable platform

机载 SAR 天线稳定平台在高空中工作,工作环境较差,其工作精度和可靠性受到一定程度的影响。若将陀螺仪安装在载机内部控制箱中,如图 2 所示的正交配置的 3 个陀螺仪(方位陀螺仪  $Z_p$ 、俯仰陀螺仪  $X_p$ 、横滚陀螺仪  $Y_p$ ),则能很大程度上改善陀螺仪的工作状况,提高陀螺仪的工作精度和可靠性。这就要求进行矢量变换,根据载机内正交配置的方位陀螺仪  $Z_p$ 、俯仰陀螺仪  $X_p$ 、横滚陀螺仪  $Y_p$  的测量数据变换得到稳定平台 3 个转轴方向上的角速度分量,如同在稳定平台 3 个转轴上分别配置了 3 个虚拟单轴陀螺仪(方位陀螺仪  $Z'$ 、俯仰陀螺仪  $X'$ 、横滚陀螺仪  $Y'$ ),等效于图 1 所示稳

定平台上的陀螺仪配置状态。

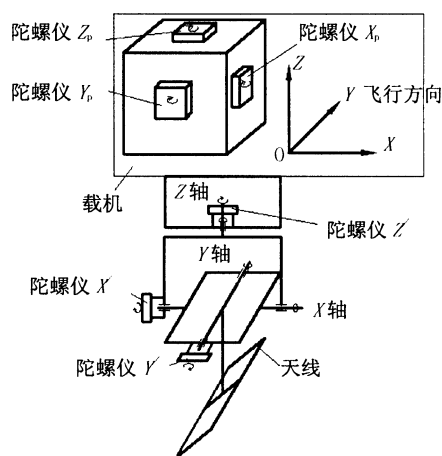


图 2 安装在载机上的陀螺仪

Fig. 2 Gyros fixed in the aircraft

## 2 陀螺仪矢量变换数学模型与原理

如图 3 所示,对于空间坐标系  $OXYZ$  中的任意非零向量  $\mathbf{ON} = [x, y, z]^T$ ,坐标系  $OXYZ$  连同向量  $\mathbf{ON}$  绕  $Z$  轴逆时针旋转  $\alpha$  角之后,得到  $Z$  坐标系  $OX_1Y_1Z_1$ ,根据矢量变换数学模型与原理<sup>[2,3]</sup>,经此变换后的向量记为  $\mathbf{ON}_1 = [x_1, y_1, z_1]^T$ 。向量  $\mathbf{ON}_x$  为向量  $\mathbf{ON}$  在  $OXY$  面上的投影,模设为  $r$ ,与  $X$  轴的夹角设为  $\phi$ ,向量  $\mathbf{ON}_{1x}$  为向量  $\mathbf{ON}_1$  在  $OX_1Y_1$  面上的投影,则有下列关系式:

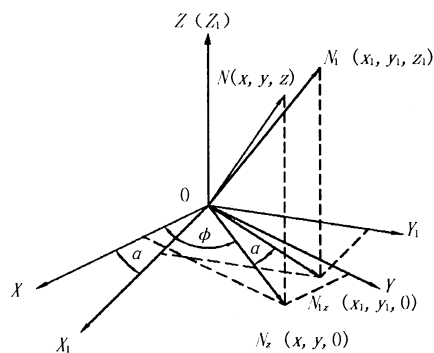


图 3 初始坐标系与 Z 坐标系的相对位置

Fig. 3 The relative situation of initial coordinate system and Z coordinate system

$$x_1 = r \cos(\phi + \alpha) = r(\cos\phi \cos\alpha - \sin\phi \sin\alpha)$$

$$y_1 = r \sin(\phi + \alpha) = r(\sin\phi \cos\alpha + \sin\alpha \cos\phi)$$

$$x = r \cos\phi$$

$$y = r \sin\phi$$

点  $N(x, y, z)$  与点  $N_1(x_1, y_1, z_1)$  的关系式为

$$x_1 = x \cos\alpha - y \sin\alpha$$

$$y_1 = x \sin\alpha + y \cos\alpha$$

$z_1 = z$

有,  $\mathbf{ON}_1 = \mathbf{T}_1 \mathbf{ON}$ , 其中

$$\mathbf{T}_1 = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

同理, 将  $Z$  坐标系  $OX_1Y_1Z_1$  连同向量  $\mathbf{ON}_1$  绕  $X_1$  轴逆时针旋转  $\beta$  角, 得到  $X$  坐标系  $OX_2Y_2Z_2$ , 经此变换后的向量记为  $\mathbf{ON}_2 = [x_2, y_2, z_2]^T$ , 有  $\mathbf{ON}_2 = \mathbf{T}_1 \mathbf{T}_2 \mathbf{ON}$ , 其中

$$\mathbf{T}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix}$$

同理, 再将  $X$  坐标系  $OX_2Y_2Z_2$  连同向量  $\mathbf{ON}_2$  绕  $Y_2$  轴逆时针旋转  $\gamma$  角, 得到  $Y$  坐标系  $OX_3Y_3Z_3$ , 经此变换后的向量记为  $\mathbf{ON}_3 = [x_3, y_3, z_3]^T$ , 有  $\mathbf{ON}_3 = \mathbf{T}_1 \mathbf{T}_2 \mathbf{T}_3 \mathbf{ON}$ , 其中

$$\mathbf{T}_3 = \begin{bmatrix} \cos\gamma & 0 & \sin\gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\gamma & 0 & \cos\gamma \end{bmatrix}$$

综合上述, 空间坐标系中任意非零向量  $\mathbf{ON}$ , 经过坐标系分别绕  $Z$ 、 $X_1$ 、 $Y_2$  轴逆时针旋转  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  后得到的向量为  $\mathbf{ON}_3$ , 有

$$\mathbf{ON}_3 = \mathbf{T}_1 \mathbf{T}_2 \mathbf{T}_3 \mathbf{ON} \quad (1)$$

将以上数学模型应用于机载稳定平台坐标系中, 定义载机坐标系为  $OXYZ$ , 坐标系中任意向量  $\mathbf{OM}$ , 载机坐标系连同向量  $\mathbf{OM}$  绕  $Z$  轴逆时针旋转  $\alpha$  角之后, 得到方位坐标系  $OX_1Y_1Z_1$  以及新的向量  $\mathbf{OM}_1$ , 方位坐标系连同向量  $\mathbf{OM}_1$  绕  $X_1$  轴逆时针旋转  $\beta$  角之后, 得到俯仰坐标系  $OX_2Y_2Z_2$  以及新的向量  $\mathbf{OM}_2$ , 俯仰坐标系连同向量  $\mathbf{OM}_2$  绕  $Y_2$  轴逆时针旋转  $\gamma$  角, 得到横滚坐标系  $OX_3Y_3Z_3$  以及新的向量  $\mathbf{OM}_3$ 。可由公式 (1) 得到  $\mathbf{OM}_3 = \mathbf{T}_1 \mathbf{T}_2 \mathbf{T}_3 \mathbf{OM}$ , 再通过反余弦公式求出向量  $\mathbf{OM}_3$  与载机坐标系 3 轴之间的夹角分别为  $\theta_x$ 、 $\theta_y$ 、 $\theta_z$ , 向量  $\mathbf{OM}_3$  与载机坐标系的位置关系如图 4 所示。

当载机有角速度矢量  $\omega_0$  时, 设  $\omega_x$ 、 $\omega_y$ 、 $\omega_z$  为载机上正交配置的 3 个陀螺仪方向的角速度矢量, 则有:

$$\omega_0 = \omega_x + \omega_y + \omega_z$$

即矢量  $\omega_0$  分解为  $\omega_x$ 、 $\omega_y$ 、 $\omega_z$  3 个正交分矢量。向量  $\mathbf{OM}_3$  方向的角速度为  $\omega$ , 有

$$\omega_0 = \omega_x \cos\theta_x + \omega_y \cos\theta_y + \omega_z \cos\theta_z \quad (2)$$

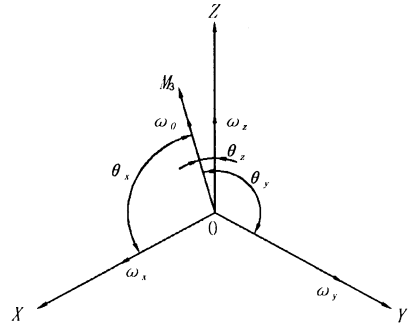


图 4 载机坐标系中向量  $\mathbf{OM}_3$

Fig. 4 Vector of  $\mathbf{OM}_3$  in aircraft coordinate system

### 3 实验与分析

根据图 2 稳定平台的结构设计简易两轴平台实验装置, 如图 5 所示, 在载机 3 轴方向分别安装陀螺仪  $X_p$ 、陀螺仪  $Y_p$ 、陀螺仪  $Z_p$ , 在稳定平台上安装横滚陀螺仪, 陀螺仪相当于图 2 中的等效陀螺仪  $Y$ 。

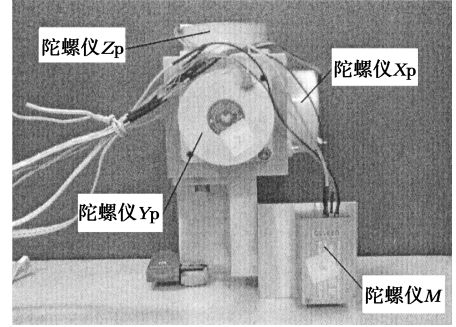


图 5 稳定平台初始状态

Fig. 5 Initial state of stable platform

平台实验装置分别沿方位转轴和俯仰转轴逆时针旋转  $\alpha = 45^\circ$  和  $\beta = 30^\circ$ , 平台上横滚陀螺仪处于新的空间位置, 如图 6 所示。陀螺仪所在轴的单位向量记为  $\mathbf{OM} = [0, 1, 0]$ , 平台分别沿方位与俯仰方向逆时针旋转  $45^\circ$  和  $30^\circ$  后, 得到新的向量  $\mathbf{OM}'$ , 通过公式 (1) 可以得到  $\mathbf{OM}' = [-\sqrt{6}/4, \sqrt{6}/4, 1/2]^T$ , 利用反余弦公式求得向量  $\mathbf{OM}$  与载机坐标系 3 轴之间的夹角分别为  $\theta_x = 127.76^\circ$ 、 $\theta_y = 52.24^\circ$ 、 $\theta_z = 60^\circ$ 。

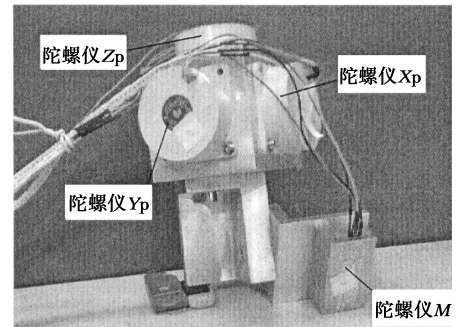


图 6 稳定平台旋转后状态

Fig. 6 State of stable platform after rotating

将实验装置任意转动，各陀螺仪测得所在轴方向的角速度信号量，计算出各轴方向角速度。在已知载机三轴方向的角速度的基础上，通过公式（2）可以计算出陀螺仪  $M$  方向的等效角速度  $\omega_{m\text{等效}}$ （注：陀螺仪  $Y_p$  测得的角速度  $\omega_y$  与坐标轴的方向

相反）。表 1 是各陀螺仪所在轴方向的角速度量值， $\omega_x$ 、 $\omega_y$ 、 $\omega_z$  分别是陀螺仪  $X_p$ 、陀螺仪  $Y_p$ 、陀螺仪  $Z_p$  方向的角速度量值， $\omega_m$ 、 $\omega_{m\text{等效}}$  分别是横滚陀螺仪  $M$  方向角速度的测量值与计算等效值。

表 1 各陀螺仪方向的角速度量值

Table1 The angular velocities in gyro directions particularly

$\omega / ( (^{\circ}) \cdot s^{-1})$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\omega_x$	−11.83	9.83	−5.17	−10.17	30.67	21.50	24.00	−15.17	−32.67	20.67
$\omega_y$	−9.25	22.42	−17.58	21.58	−60.08	−0.08	−39.25	30.75	14.92	−34.25
$\omega_z /$	−10.17	−42.33	22.67	−23.17	53.50	−22.33	6.00	1.00	10.17	31.83
$\omega_m$	17.60	−40.02	25.90	−17.85	43.84	−23.54	11.82	−8.58	−16.54	23.51
$\omega_{m\text{等效}}$	17.99	−40.92	25.27	−18.57	44.76	−24.28	12.34	−9.04	−15.95	24.23

表 1 中的实验数据表明，横滚陀螺仪  $M$  方向角速度测量值与计算等效值误差小于  $1 (^{\circ}) / s$ ，满足设计要求，表明了上述陀螺仪角速度矢量变换关系的正确性。

得到任意方向的角速度量值，并证实该方法的可行性。

参考文献：

[1] 徐建中. 雷达天线稳定平台的研究与开发 [D]. 常州：江苏工业学院，2008.

[2] 罗护，范大鹏，张智勇，等. 两轴陀螺稳定系统中陀螺安装的几种方法 [J]. 兵工学报，2005，26（3）：426—428.

[3] 黄慕欢，林茜. 正交矩阵在空间坐标变换中的作用 [J]. 高等数学研究，2009，12（2）：24—26.

4 结 论

鉴于陀螺仪工作受外界环境干扰的问题，提出了将陀螺仪安装在飞机内部控制箱中的方法，并建立了矢量变换数学模型。实验结果表明，根据载机内部陀螺仪的信号量，经过正确的矢量转换，可以

会 讯

2011 年 12 月 20 日在常州大学第二会议室召开了《常州大学学报（自然科学版）》编委会会议，主编、副主编及编委会全体成员参加了会议。

会上，根据学报发展的需要，对原编委会成员进行了补充和调整，产生了新一届的编辑委员会。编委会成员对学报近几年的发展及取得的成绩进行了充分的肯定。大家围绕学报面临的问题及如何发展各抒己见，出谋划策，对学报存在的一些问题提出了具体的解决办法。（1）通过加强编委及外校聘请的专家扩大宣传，加大约稿力度，力争使稿件质量有一个质的飞跃，为学报稿源数量和质量提高打下基础；（2）为适应学校十二五发展规划以及学科发展的要求，从 2012 年起页码扩充到 96 页，提高学报的载文数量和印刷质量；（3）与国际交流学院合作，通过向境外相关单位邮寄期刊等形式，扩大宣传，提高学报知名度，使学报向国际化发展；（4）通过开展讲座等形式规范稿件，提高来稿质量；（5）编委会要求每位成员每两年需在学报发表一篇基金项目论文或推荐一篇高质量论文；（6）学校制定相关政策，促进学报发展；（7）编辑部要进一步缩短审稿周期，提高工作效率。共同努力，使学报在促进学校教学、科研以及多出成果等方面做出更大的贡献。