文章编号:1002-2082(2010)06-0888-05

机载光电稳瞄系统实时被动测距方法研究

朱银生[1]，赵创社[1]，史志富[1,2]，韩 瑞[1]
(1. 西安应用光学研究所，陕西 西安 710065；2. 第二炮兵工程学院，陕西 西安 710025)

摘 要：针对现有直升机机载光电稳瞄系统高精度角度测量和角速率测量的特点，提出一种利用测量目标相对角度和角度变化率等参数实现目标实时被动测距的方法。建立了机载稳瞄平台对地面固定目标定位的数学模型，提出利用系统旋转变压器测量目标角度，利用惯性速率陀螺测量目标角度变化率。该方法使得目标角度变化率的测量精度（优于0.1 mrad/s）比一般光学方法提高了一个数量级。利用扩展卡耳曼滤波（EKF）算法提高目标距离估算精度，保证测量结果的稳定性。理论仿真和外场验证实验结果表明，该方法可以实时估算目标相对载机的距离，适合于武装直升机快速实时目标定位。

关键词：机载光电稳瞄；被动测距；扩展卡尔曼滤波；无源定位
中图分类号：TN206 **文献标志码**：A

Real-time passive ranging for airborne electro-optical stabilized sight system

ZHU Yin-sheng[1], ZHAO Chuang-she[1], SHI Zhi-fu[1,2], HAN Rui[1]
(1. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China;
2. The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China)

Abstract: Since the angle and angular rate measurement of the existing helicopter-borne stabilized sight system is very accurate, a real-time target passive ranging method is put forward based on these measurements. The mathematical model for locating fixed ground target by helicopter-borne stabilized sight system was established, a rotary variable differential transformer was used to measure target angle and an inertial gyroscope was used to measure target angle variation rate. The measurement accuracy is better than 0.1 mrad/s, which is ten times accurate than before. The stability and precision of ranging measurement system are improved by extend Kalman filter (EKF). The simulation and experiment results indicate, it can make real-time target range estimation, which is suitable for the real time target position of attack helicopter.

Key words: airborne electro-optical stabilized sight; passive ranging; extend Kalman filter; passive location

引言

直升机机载光电稳瞄系统是直升机的眼睛，它主要实现战场搜索、目标瞄准、跟踪、激光测距和激光指示，为火控系统武器发射提供瞄准线指向等功能，是直升机升级换代和信息化改造的重中之重[1]。现代武装直升机机载光电稳瞄系统装有电视

收稿日期：2010-04-09； **修回日期**：2010-08-16
基金项目：中国博士后科学研究基金(20090461316)
作者简介：朱银生(1982—)，男，山东菏泽人，硕士，主要从事光电稳定与跟踪技术方面的研究工作。
E-mail：yinsheng2-120 @163.com

视频跟踪器和红外热像仪,能够全天候为飞行员实时提供稳定清晰的视频图像,实时报告光电系统瞄准线的方位角和俯仰角,但不能直接测量出目标与载机间的距离信息,不能实现可疑目标快速定位这一重要战场信息,不利于信息共享。目前通过激光测距的方法单次测量目标距离信息,实时性、隐蔽性都很差,而且增加了平台质量这一重要指标和115 V大功率供电的多重不便,使得系统可靠性降低。目前在研的机载光电稳定平台多为两轴四框架高精度惯性空间稳定系统,角度测量精度高达1 mrad,其伺服控制器速度环信号通过惯性角速率陀螺精确测量角速率值,精度约为0.1 mrad/s,可以实时提供高精度角度和角度变化率值。针对现代武装直升机机载稳瞄系统,本文提出测量角度和角度变化率的一种无源被动测距方法,借鉴文献[2-3]的数学建模和数据处理方法,提出利用系统旋变测量目标角度,利用惯性速率陀螺测量角度变化率,使目标距离测量精度提高了一个数量级,在直升机机载稳瞄平台上实现对固定目标的相对定位。利用扩展卡耳曼滤波(EKF)方法提高距离估算的稳定性和精度,实现对固定目标的快速实时定位。

1　固定目标单机被动定位基本原理

1.1　角度和角度变化率的被动测距模型

根据实际的目标跟踪过程建立如图1所示的几何关系数学模型。O-XYZ坐标系为载机坐标系,以载机运动方向为Y轴,以机体两翼方向为X轴,以垂直向上方向为Z轴,组成右手直角坐标系。光电稳瞄平台安装在直升机正前方。在以载机平台的初始位置为原点建立的坐标系中,目标静止不动($V_T=(0,0,0)$),载机以速度$V_0(t)=(\dot{x}_0(t),\dot{y}_0(t),\dot{z}_0(t))$运动。目标方位角$\beta$、俯仰角$\varepsilon$都是时间的函数。

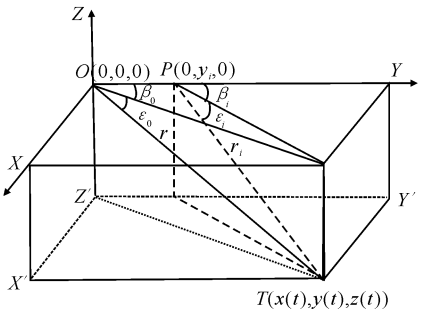

图1　机载平台与被测目标几何关系示意图

Fig. 1　Illustration of airborne platform and the target

令目标相对于机载平台的向量为$X=(x(t),y(t),z(t))$,则β和ε的定义为

$$\beta(t)=\arctan\frac{x(t)}{y(t)} \tag{1}$$

$$\varepsilon(t)=\arctan\frac{z(t)}{\sqrt{x^2(t)+y^2(t)}} \tag{2}$$

(1)式和(2)式分别对时间t求导:

$$\beta'=\frac{x'y-xy'}{x^2+y^2} \tag{3}$$

$$\varepsilon'=\frac{-zxx'-zyy'-(x^2+y^2)z'}{(x^2+y^2+z^2)(x^2+y^2)^{1/2}} \tag{4}$$

对于固定目标,$x'_T=y'_T=z'_T=0$,机载平台与目标间的相对运动速度为

$$x'_T=x'_T-x'_0=z'_0=0$$

$$y'_T=y'_T-y'_0=-y'_0(t)$$

$$z'_T=z'_T-z'_0=z'_0(t)$$

联合(1)～(4)式得到目标距离求解公式:

$$\boldsymbol{r}=-\frac{x'_0\cos\beta-y'_0\sin\beta}{\beta'\cos\varepsilon} \tag{5}$$

以上各式中目标位置对时间的导数即表示在某一方向上的对应速度,直升机载机光电稳瞄转塔运动参数即($V_0(t)=(\dot{x}(t),\dot{y}_0(t),\dot{z}_0(t))$)可由导航系统测量,结合稳瞄系统实时给出的目标方位角β、俯仰角ε、稳瞄转塔陀螺感应出的方位角变化率β'和俯仰角变化率ε',即可由(5)式计算出目标距离,实现目标相对定位。

1.2　角度及其变化率的测量方法

针对现代直升机机载稳瞄系统自身的优势资源实现目标在惯性空间内相对于转塔的方位角、俯仰角度和角度变化率的测量,改进文献[2]中采用CCD光学成像进行角度及其变化率的测量方法,在惯性空间内有效隔离外界振动等干扰因素,使参数测量精度更高,而且所得的3个参数测量量互相独立,精度高,更有利于后续数据滤波处理,增强了实时性。

直升机机载光电稳瞄系统是两轴四框架高精度惯性稳定平台,在锁定目标的状态下,稳瞄转塔实时报告系统瞄准线锁定目标的方位、俯仰角度,速率陀螺实时测量传送敏感到的角度变化率。方位角、俯仰角的角度值测量是由安装在2个相互垂直轴上的旋转变压器测得。系统相对于目标的瞄准线角度解算基本原理如图2所示。

旋转变压器的正弦、余弦和激磁信号,使之分别接到集成电路AD2S80AUD的7脚、4脚和1脚,当转塔转动时,正、余弦信号产生对应变化,经过上

述电路解算后得到对应于0～360°变化的16位转化数据,分辨力为$360°/2^{16}\approx 0.1$ mrad。据此可把稳瞄转塔的瞄准线角精度做到1 mrad左右,比文献[2]中34.9 mrad的测量结果提高了一个数量级,目标定位精度大大提高。角度变化率的测量由安装在内环组件上的方位和俯仰(垂直)速率陀螺测得,其精度在0.1 mrad/s左右。直接测得的信号是差分电压模拟信号,通过对实时电压值的解算就可以得出稳瞄系统视轴瞄准线相对于载机的角度变化率,计算出$\beta'(\epsilon')$值。

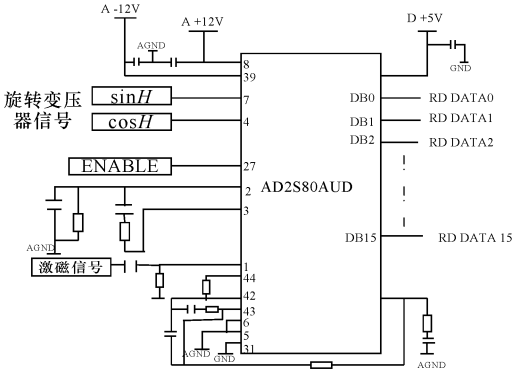

图2　目标角度解算电路原理图

Fig. 2　Target angle measurement circuit diagram

如图3所示,速率陀螺敏感出来的角度变化率是差分模拟信号,经过差分放大器处理之后转换成±10 V的单边信号,再经过16位模数转换器得到对应于−10V～+10V范围内变化的16位数据,实时进行数据处理得到相应角度变化率的值。

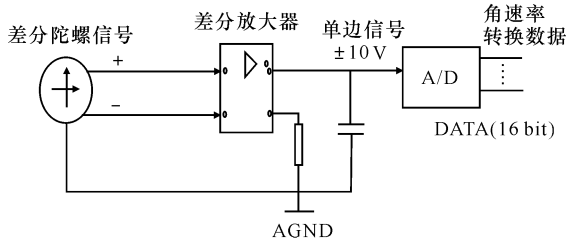

图3　系统角速率数据采集处理原理示意图

Fig. 3　Illustration of the system angle variation rate sampling and processing

1.3　测量数据的EKF滤波处理方法

为了满足测距精度的要求,需要通过多次测量对数据进行综合滤波处理。参考文献[3]中的误差分析仿真结果表明:目标角度以及角度变化率的测量精度对定位结果的影响最大,本文只考虑角度和角度变化率测量误差对测量结果的影响。结合试验测得数据对单机无源定位算法进行了理论仿真和实测验证。在探测器运行的轨迹上依次获取辐射源的一组角度及其变化率测量值,把这些测量数据代入文献[4]提供的扩展卡尔曼滤波(EKF)模型,对测量结果进行实时滤波处理,估测目标的位置。

2　理论仿真和实验验证

2.1　理论仿真

在空间直角坐标系中,设固定目标位置为(10 km,10 km,−5 km),稳瞄转塔起始点坐标为$O(0,0,0)$,以速度$V=(0\ \text{m/s},50\ \text{m/s},0\ \text{m/s})$飞行。测量周期$T=2$ s,假定角度测量精度为3 mrad,角度变化率测量精度为0.087 mrad/s,每次测量所得的方位角和俯仰角的角度、角度变化率都含有零均值高斯噪声方差,在MATLAB环境下仿真计算得到如图4所示单帧测量值与理论值的对比关系。

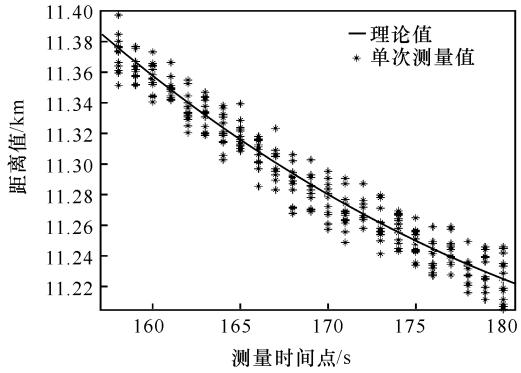

图4　目标距离单帧测量结果

Fig. 4　Target ranging results of single frame measurement

根据含噪声的角度和角度变化率测量值,利用(5)式估算目标距离。由仿真结果可以看出单次测量值总是有一定的偏差,且得不到校正。为了提高距离测量精度,利用EKF给出目标距离估计值,仿真结果如图5所示。

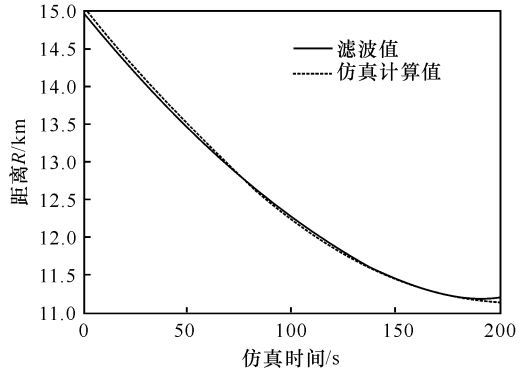

图5　采用EKF滤波的目标距离估计值仿真结果

Fig. 5　The simulation results of range simulation based on EKF

由仿真结果可以看出,与单次测量值相比,扩

展卡尔曼滤波算法的引入,有效地滤除了系统参数测量的随机噪声误差,提高了目标距离的估计精度,保证测量结果稳定性,说明该方法可以用于实现载机平台上的目标快速实时定位。

2.2　原理验证实验

为了进一步验证机载稳瞄系统实时被动测距方法的可行性,笔者参考某型无人直升机机载光电稳瞄系统2009年9月的固定目标定位验证实验数据。经度、纬度、高度分别为(10.998 861°, 34.586 972°, 336.0 m),飞机在平稳状态时基本保持速度$V=120$ km/h左右近似水平飞行。在成功跟踪预定地标状态下,根据载机提供的飞机姿态参数和稳瞄系统角度指向参数实时折算出参考地标相对于载机的方位、俯仰角度和方位角速率变化值,根据(5)式计算出地标点到载机的距离。从实验数据中筛选出3 s内的60组测量数据,处理结果见图6和图7所示。

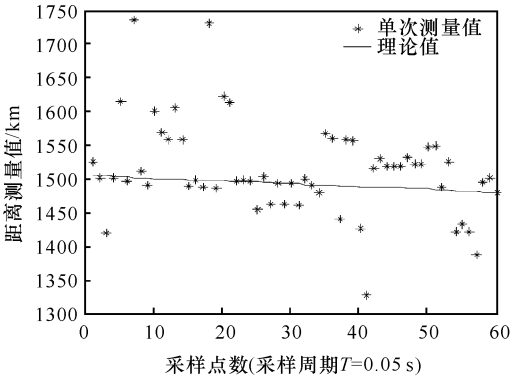

图6　目标距离实验处理结果

Fig. 6　Target ranging results of experiment processing

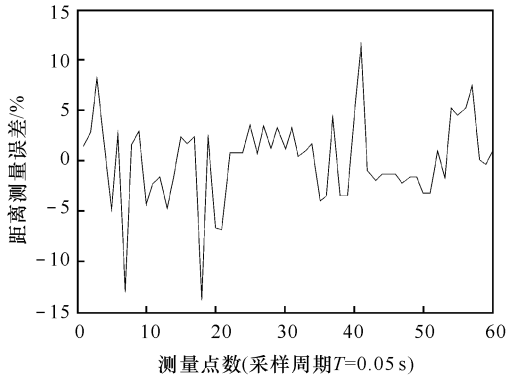

图7　相对误差

Fig. 7　Relative error

由图6和图7计算结果可以看出:测量计算结果基本符合理论值变化趋势,相对误差在5%以内,验证了稳瞄系统被动测距方法原理的正确性和可行性。对测量结果进行滤波平滑处理可以提高数据的稳定性,增强可信度,测距结果如图8所示。

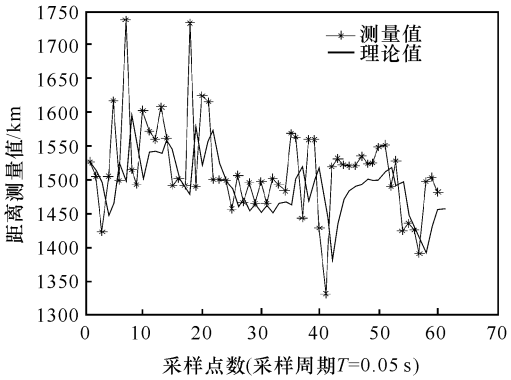

图8　滤波处理后的测距结果

Fig. 8　Target ranging results after filter

由以上实验验证数据的处理结果可以看出:目标距离估算值与仿真结果相比误差较大,为60 m左右。其主要原因是理论仿真中没有考虑飞机位置惯导数据和载机姿态数据引入的误差,因此稳瞄系统实时被动测距定位方法在工程实践中还应做很多的后续误差处理工作。

3　结束语

文中分析了机载光电稳瞄系统单机被动测距的基本原理,提出了适合于直升机机载稳瞄系统的快速实时定位方法。在满足客观条件的基础上,研究了算法的可行性,从理论仿真和实验验证两个方面验证了数学模型的正确性。仿真结果表明:采用扩展卡尔曼滤波算法提高了目标定位精度和测量稳定性,但在实际的工程应用时会引入更多的误差因素,需要做相应的处理和修正。另外借助多目标跟踪成熟技术可同时实现多目标快速无源定位。总之,在利用机载稳瞄系统现有资源的情况下实时提供目标距离这一重要的战场信息参数,实现对固定目标的快速实时定位,对提高直升机整体性能具有积极意义。

参考文献:

[1]　王小鹏,纪明.光电系统工程概念、设计与思考[J].应用光学,2007,28(专刊):1-6.
WANG Xiao-peng, JI Ming. Concept design and prospect of optoelectronic system engineering[J]. Journal of Applied Optics, 2007,28(sup.):1-6. (in Chinese with an English abstract)

[2]　王万平,李强,廖胜.固定目标的单站被动测距[J].红外与激光工程,2008,37(1):185-188.

WANG Wan-ping, LI Qiang, LIAO Sheng. Single maneuver station passive ranging method for emitted target[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(1): 185-188. (in Chinese with an English abstract)

[3] 沈文亮,郝志安.无源定位技术中滤波算法的应用研究[J].电子对抗,2008(3):1-5.
SHEN Wen-liang, HAO Zhi-an. The study of a filtering algorithm in the technique of single station passive location[J]. Electronic Warfare. 2008(3): 1-5. (in Chinese with an English abstract)

[4] 何青益,胡东,李艳斌.一种单机对固定目标的无源定位方法[J].无线电工程,2006,36(10):33-35.
HE Qing-yi, HU Dong, LI Yan-bin. A passive location method of single airplane for a fixed emitter [J]. Radio Engineering, 2006, 36(10): 33-35. (in Chinese with an English abstract)