

# 机载多卜勒雷达测速精度分析

宋军杰

(陆军航空兵学院 基础部, 北京 101114)

**摘要:**多卜勒导航是一种自主式的导航系统,但其实时测速精度较低。本文由现役多卜勒雷达的构成原理和电路结构出发,分析了造成多卜勒雷达实时测速精度低的原因,提出了提高多卜勒雷达实时测速精度的一些措施,供设计和飞行管理部门参考。

**关键词:**多卜勒导航;测速精度;机载雷达

**中图分类号:**V243.2   **文献标识码:**A   **文章编号:**1009-3516(2000)05-0012-04

为满足飞行安全的需求,新型飞机的机载导航系统大都采用了综合式,即采用多种类型的导航设备,以互补的方式保障飞机全天候安全飞行,多卜勒雷达就是所选设备中的一种。

多卜勒雷达导航优于卫星导航是它的自主式工作方式,所以它不必有卫星导航受控于发射国的顾虑;多卜勒导航优于惯性系统导航是设备价格便宜。但多卜勒雷达导航存在着它的不足,其中之一就是系统的精度。其系统精度取决于很多因素,有机械因素、飞行环境因素、系统设计因素等,每个因素都影响着系统的整体精度,使多卜勒雷达的实时测速精度不高。

## 1 反射信号特性的影响

机械多卜勒雷达为提高测速精度希望天线产生窄波束,但天线的波束总是具有一定的宽度,如D91多卜勒雷达的波束宽度为 $6^\circ \times 12^\circ$ 。因此,探测信号在地面上形成一个反射区,由于这个区域内各点和发射天线间的连线与飞机纵轴的夹角 $\gamma_i$ 各不相同,故由各反射元测得的多卜勒频率 $f_{di} = 2W \cos \gamma_i / \lambda^{[1]}$ 不同,所以,由于发射波束的宽度效应使多卜勒信号不是单一频率谱,而是呈钟型频谱。

多卜勒雷达选定接收的钟型频谱的中心频率 $f_{d0}$ 为测速依据,因此检测 $f_{d0}$ 就是多卜勒雷达系统设计的任务之一。以D91为例,该雷达采用频率跟踪电路完成 $f_{d0}$ 的选取,其频率跟踪电路的原理构成见图1<sup>[2]</sup>。

由载波变换电路输出的 $100 \text{ kHz} \pm f_d$ 信号和压控振荡器VCO输出( $\div 4$ )的两路正交信号经混频、滤波、移相,使两路输出的相位差再增加 $90^\circ$ ,然后经鉴相器,获取误差控制信号,经A/D转换,送D91微

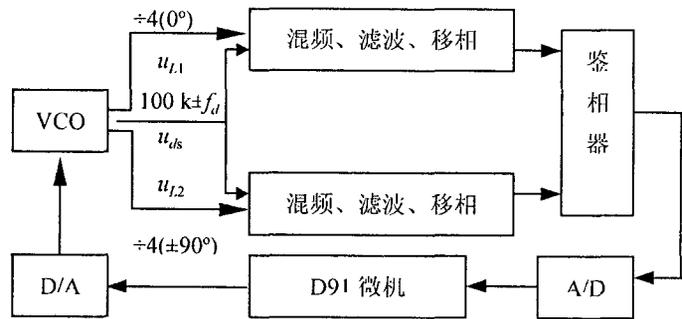


图1 D91频率跟踪电路方框图

机判别VCO频率调整方向和大小,产生相应的数字控制信号,再经D/A转换,去控制VCO的振荡频率,而VCO的输出频率就作为 $100 \text{ kHz} \pm f_{d0}$ 送入D91微机,用于三个轴向速度的计算。

设反射面的反射特性一致,那么多卜勒回波信号的频谱应呈对称分布。由于照射区域的中心点和理想发射波束的最大功率点只有一个,因此中心频率为单一的,设其为 $\omega_0$ 。为分析简便,设各频率分量的初相为0,

收稿日期:2000-01-15

作者简介:宋军杰(1950-),女,河北保定人,副教授,主要从事机载雷达研究。

则多卜勒回波信号可以写为  $u_{ds} = U_0 \cos \omega_0 t + \sum_{i=1}^{\infty} U_i \cos(\omega_0 \pm \Delta \omega_i) t$ , 设 VCO 的两路四分频正交输出振幅相同为  $U_L$ , 相位相差  $90^\circ$ , 则  $u_{L1} = U_L \cos \omega_L t$ ,  $u_{L2} = U_L \sin \omega_L t$

为简化分析, 取  $u_{ds}$  中的前三项。

(1) 若  $\omega_L < \omega_0$

$$u_{L1} \text{ 与 } u_{ds} \text{ 混频取差频, } u_{1s} = \frac{U_L U_0}{2} \cos \Delta \omega_0 t + \frac{U_1 U_L}{2} \cos(\Delta \omega_0 + \Delta \omega_1) t + \frac{U_1 U_L}{2} \cos(\Delta \omega_0 - \Delta \omega_1) t$$

$$u_{L2} \text{ 与 } u_{ds} \text{ 混频取差频, } u_{2s} = \frac{U_L U_0}{2} \cos(\Delta \omega_0 t - 90^\circ) + \frac{U_1 U_L}{2} \cos[(\Delta \omega_0 + \Delta \omega_1) t - 90^\circ] + \frac{U_1 U_L}{2} \cos[(\Delta \omega_0 - \Delta \omega_1) t - 90^\circ]$$

经移相, 使两路信号再增加  $90^\circ$  相差。设上通道使信号增加  $-90^\circ$  的相移, 则两路输出同相。

(2) 若  $\omega_L > \omega_0$

分析方法相似、条件相同, 可得两路输出反相的结论。

(3) 若  $\omega_L = \omega_0$ , 则有  $u_{1s} = U_L U_0 / 2 + U_1 U_L \cos \Delta \omega_1 t$ ,  $u_{2s} = 0$

再利用鉴相器, 把 VCO 频率相对于多卜勒信号中心频率的关系检测出来, 即可获得对压控振荡器进行频率调整的控制信号。

由上述分析可见, 多卜勒雷达的测速是一个动态调整环路, 由于任何调整环路都存在时间上的滞后和固有误差, 因此, 频率跟踪器不可能实时跟踪多卜勒的中心频率, 这是影响测速精度的原因之一。其二, 上述分析是理想条件下的结论, 当飞行环境发生变化时, 多卜勒回波信号的频谱也会发生变化而影响测速精度。其三是天线方向图的特性影响, 因此, 在多卜勒雷达的日常维护中, 应防止天线变形, 避免天线辐射中心角  $\gamma_0$  和发射方向图的变化。

## 2 收发天线间直接耦合的影响

机载多卜勒导航雷达收发天线间虽然有一隔离金属板, 但由于其面积有限, 使得收发天线间的电磁场并不能做到完全隔离, 造成收发天线间的直接耦合。如果雷达的发射频率和本振频率是标准的固定频率, 即使收发天线间存在直接耦合, 对多卜勒雷达的测速也不会产生影响。但实际上, 雷达发射频率会因为负载、供电或工作环境的变化而改变, 收发天线间的直接耦合就会影响多卜勒雷达的测速精度。

众所周知, 在雷达系统中, 为保证中频的准确性, 接收机中的本振常采用自频调环路。由于自频调环路只有在获取误差信号后才能产生调整电压, 即本振调整需要以误差频率为动力, 所以发射频率变化的瞬间本振频率不可能调整到所需值。由于本振频率的调整存在时间滞后, 因此, 在发射频率变化、本振频率又未调整时, 直接耦合就会造成虚假多卜勒频率, 引起测量误差。

收发天线间存在直接耦合时, 在任一时间  $t_1$  进入接收机天线的信号有两路, 一路是地面反射信号, 另一路由发射天线直接耦合进入的信号。设  $t_1$  时刻前的雷达发射频率为  $f_0$ ,  $t_1$  时刻接收天线接收的地面反射信号为  $f_0 \pm f_d$ , 其中  $\pm f_d$  代表飞机运动所产生的多卜勒频移。若  $t_1$  时刻发射频率有一个  $\pm \Delta f$  的变化, 则直接耦合进入接收天线的信号频率为  $f_0 \pm \Delta f$ 。由于本振频率调节的滞后, 信号混频器的输出有: (1) 包含真正多卜勒信息的中频信号:  $f_i \pm f_d$ ; (2) 直接耦合所产生的中频信号:  $f_i \pm \Delta f$ 。式中  $f_i$  为中频频率。如果多卜勒雷达接收机的频率跟踪电路误跟踪了  $f_i \pm \Delta f$ , 就会造成多卜勒雷达的测速失误, 即  $\pm \Delta f$  成了虚假的多卜勒频率。因此, 在多卜勒雷达中都采用了消除直接耦合的电路。

D91 是柯林斯公司的产品, 其消除收发天线间直接耦合影响的方法见图 2<sup>[2]</sup>。

其整体思想是利用自频调混频器的输出, 即相位正交的中频信号  $f_i(0^\circ)$  和  $f_i(\pm 90^\circ)$  与信号混频器的输出进行二次混频, 因为自频调的输出在  $t_1$  时刻包含有发射频率的变化量  $\pm \Delta f$ , 所以这种方法就可以消除虚假多卜勒分量 ( $f_i \pm \Delta f$ )。但值得注意的是, 在消除 ( $f_i \pm \Delta f$ ) 的同时, 真正的多卜勒中频信号增加了  $\pm \Delta f$  的频率误差, 因此载波变换电路输出信号的频率实际为:  $100 \text{ kHz} \pm f_d \pm \Delta f$ 。

ДИСС-32-90 是俄罗斯米-171 直升机配置的导航设备, 该雷达消除直接耦合影响的方法如图 3<sup>[3]</sup>。

该雷达没有设计独立的本振, 而是设计了一个独立的 60 MHz 中频振荡器, 其本振信号是利用发射信号和中频信号取和频而得到的。假如, 60 MHz 中频振荡器的频率绝对稳定, 则当发射频率变化  $\pm \Delta f$  时, 本振信号也随之变化  $\pm \Delta f$ 。因为本振生成混频器输出取和频, 而信号混频器取差频, 因此在信号混频器中就可以

消除收发天线直接耦合所产生的虚假多卜勒频率,但对真正的多卜勒信号仍存在 $\pm\Delta f$ 的误差影响。

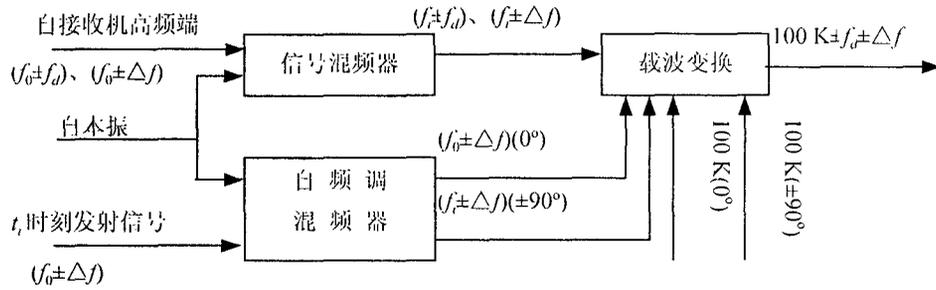


图2 D91 消除收发天线直接耦合原理框图

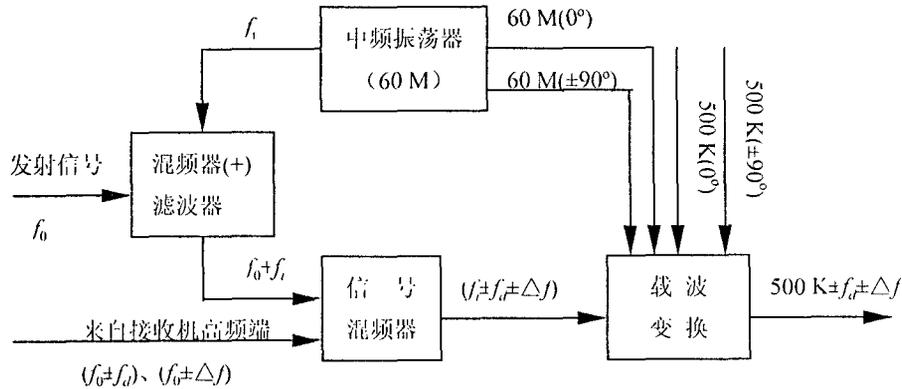


图3 ДИСС-32-90 消除收发天线直接耦合原理框图

虽然这种方案在信号混频器的输出端已消除了直接耦合造成的虚假多卜勒频率,但该雷达仍采用了载波变换电路,两路正交的60 MHz中频的二次混频,可以消除中频振荡器频率不稳定因素对真正多卜勒信号的影响。因此,32-90多卜勒雷达载波变换电路的输出为 $500\text{ kHz} \pm f_d \pm \Delta f$ 。

不论D91多卜勒雷达和ДИСС-32-90多卜勒雷达的构成方案有何不同,虽然都可以消除收发天线间直接耦合所造成的虚假多卜勒信号,但同时使多卜勒频率测量附加了 $\pm\Delta f$ 的误差。

### 3 飞行环境的影响

实际上,多卜勒信号的对称钟型频谱特性是一种理想地面的频谱特性,但实际飞行中并非如此。多卜勒雷达的接收信号是依靠地表的散射、漫反射而形成的,因而必然受地表物理特性的影响。

根据实际测量,绝大多数地面的导磁率 $\mu$ 都近似等于真空的导磁率 $\mu_0$ ,且几乎所有的地面都可以看成是半导体,但不同种类的地面其电参量之间又有很大的差别,如表1所示<sup>[1]</sup>。事实上,地球不是理想的

导体,其反射特性与金属有很大的差异,因此,依靠地面散射和漫反射信号测速,飞行环境影响就是不可忽视的因素。

(1)在飞行过程中,地面的状况是变化的,因此造成多卜勒信号的起伏,如沿海岸边、山体边飞行时,可能造成左右波束反射地表的特性不同,因而引起左右波束频率跟踪值的附加误差,造成测速误差。

(2)海洋效应的影响。由于多卜勒雷达是依靠地表的散射和漫反射工作的,因此,海平面的镜面作用会使多卜勒信号的频谱发生偏移。由分析所得到的结论是:多卜勒信号频谱中功率最强的位置向低频端偏移,且

表1 飞行环境对多卜勒信号的影响  $\mu = \mu_0$

地面类型	变化范围		平均值	
	$\epsilon'$	$\sigma/\Omega \cdot \text{m}$	$\epsilon'$	$\sigma/\Omega \cdot \text{m}$
海水	80	1~4.3	80	4
淡水	80	$10^{-3} \sim 2.4 \times 10^{-2}$	80	$10^{-3}$
湿土	10~30	$3 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^{-2}$	10	$10^{-2}$
干土	3~4	$1.1 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^3$	4	$10^{-3}$
森林				$7.5 \times 10^{-4}$
大城市				$7.5 \times 10^{-4}$

水面越平静,偏移量越大<sup>[1]</sup>。一般多卜勒雷达都设置有“海洋—陆地”转换开关(D91雷达是通过RNS252导航计算机控制),用以修正在海面上飞行时所产生的附加误差。但这个修正开关大都以二级风海面、按2.5%的偏差设计,因此不能有效地修正不同海面状况对多卜勒信号的影响。另外,当海浪较小时,雷达经常处于记忆状态,故无法测出海上飞行的准确速度。

## 4 结束语

影响多卜勒雷达实时测速精度的还有其它一些因素,如机械因素、飞机俯仰因素等,因篇幅有限,本文不再讨论这些因素的影响和特点。针对本文所讨论问题,下述有关提高多卜勒雷达实时测速精度的建议仅供设计和飞行管理部门参考。

- (1)采用提高环路增益的方法,提高频率跟踪速度。
- (2)采用高稳定度的发射源,减少直接耦合造成的影响。
- (3)由反射信号的能量判测实时调整海面飞行时的修正量,减少附加误差。
- (4)在综合导航系统中,定时引入其它导航设备的信号,如GPS、惯导等,修正多卜勒雷达误差。
- (5)恰当选择飞行航线,避免沿地表特性差异较大的边界线飞行。

### 参考文献:

- [1] 蔡成仁. 航空无线电[M]. 北京:科学出版社. 1992.
- [2] DOPPLER 91/92 TYPE 81077 SERIES. SENSOR UNITS 4-BEAM VARIANT INSTALLATION AND MAINTENANCE MANUAL.
- [3] 申献芳. 米-171直升机无线电雷达设备(下册)[M]. 北京:总参陆航局装备技术部. 1998.

## Analysis of Speed Measuring Precision on Airborne Doppler Navigational Radar

SONG Jun-jie

(Dept. of Basic Courses, Army-air Force College, Beijing 101114, China)

**Abstract.** Doppler navigation is a kind of independent navigational system, but its real-time speed measuring precision is comparatively low. On the basis of the principle and circuit of the active Doppler radar, this article analyzes the causes of the real-time low speed measuring precision and puts forward some measures of improving the real-time speed measuring precision of Doppler radar.

**Key words:** doppler navigational; speed-measuring precision; airborne radar