

多普勒雷达

林宝玺 胡志英 编

国防工业出版社

第一章 多普勒雷达与 多普勒导航系统

§ 1-1 多普勒雷达在现代航空中的作用

在第二次世界大战中，空战发挥了巨大的威力。战后，航空工业的蓬勃发展，飞机性能的提高，要求导航设备日趋完善。多普勒雷达是一种新型体制的机载导航设备，它以多普勒效应为基础，可以自动连续地测量雷达载机相对于地面的运动参量：地速和偏流角或速度矢量的各个分量。

多普勒雷达是通过比较接收信号与发射信号中高频频率之间存在的差异而得出所需要信息的。当雷达诸参数确定以后，这种频率上的差异，即多普勒频率，仅仅与雷达载机相对于地面的运动速度有关。

早在四十年代初期，美国首先提出了利用多普勒效应来测量飞机地速的问题，以后便系统地开始了这方面的研究工作。直到五十年代初期，才研制出了第一代多普勒雷达。这种雷达首先安装在远程轰炸机和运输机上，提供领航信息。由于航空技术的迅速发展，飞机速度和性能的不断提高，从而要求机载导航设备能准确地引导飞机到达目的地或目标，完成导航或作战任务。另外，随着电子科学技术的发展，新型元器件的研制成功，也促进了雷达技术的发展和更新。正是由于这些原因，从第一部多普勒雷达问世至今短短的三十

年时间里，不断地更新换代。现在，许多国家已经研制和生产了多种类型的多普勒雷达，广泛地应用在各种飞机、导弹、气垫船和宇宙飞船等飞行器上。

多普勒雷达可以测量雷达载机的地速和偏流角（两者都在水平面内）或速度矢量的各个分量（即沿着航向的纵向速度、与航向垂直的横向速度和垂直速度）。这些信息除了可以提供给导航系统外，还可以提供给射击、轰炸和武器投放系统。随着技术的发展，新型的多普勒雷达还能同时测量飞机的飞行高度和测绘出垂直位置的有关信息。

在现代，对飞行器（包括飞机）的制导和控制过程中，需要自动连续地确定飞行器相对于地面的运动速度、运动方向和瞬时地理位置，使其能准确及时地飞抵目的地。多普勒雷达可以单独使用，也可以与机上的航向系统和导航计算机组合使用，组成自备式多普勒导航系统。该系统能连续地给出各种导航数据，若将一些信息送到自动驾驶仪中，就可以控制飞行器自动而准确地飞往目的地，圆满地完成制导任务。现在，多普勒雷达已成为主要的机载自备式导航设备之一。

多普勒雷达不需要任何地面设备，就能自动连续地测量出飞机的精确地速和偏流角（或速度矢量的各个分量）信息，其工作不受地理和气象条件的限制，而且它是以大地为反射面，回波信号强，仅辐射有限的功率就能保证正常工作。因此，多普勒雷达是一种体积小、重量轻，并可以制成高可靠性的全固态化设备。这些优点，对于飞机等飞行器的导航是极其可贵的。

当前，世界各国仍然非常重视多普勒雷达的研制工作，制造出许多高精度的体积小、重量轻、功耗低，而且价格便

宜的雷达设备。我国在近十多年时间里，已经研制和生产了几种类型的多普勒雷达，装备在各种飞机上。随着我国航空事业的进一步发展，将会研制出更多新型的多普勒雷达。

§ 1-2 飞行器航行的一般知识

飞行器的航行，除了受到发动机推力产生的空速作用之外，还受到风速、风向等因素的影响。因此，我们先介绍一下飞行器航行的有关知识，从而进一步来认识多普勒雷达在现代航空中的作用。

一、飞行器在无侧风情况下的航行

在有、无侧风的情况下，飞行器的航行是不同的。我们知道，在顺风飞行时，风向和航向一致，飞行器的速度增加；在逆风飞行时，风向与航向相反，飞行器的速度降低。所谓侧风，是指风向与航向不一致的风，它不仅影响飞行器的速度，还直接影响着飞行器的航迹。

图 1-1 所示为飞机在无侧风情况下的航行。图中的 N 是正北方向； V 是飞机的空速，它是发动机推动飞机相对于空气的运动速度； HX 是航

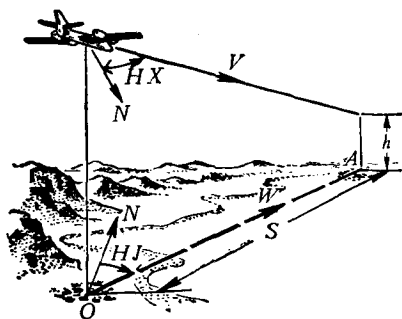


图1-1 飞机在无侧风情况下的航行

向角，它是飞机纵轴线与正北方向之间的夹角； h 是飞行高度； S 是飞机从起飞点 O 到目的地 A 点的距离。图中的实线表示飞机在空中飞行的航线，虚线 OA 是飞机飞行航线在地

面上的投影,叫做航迹线或航迹; HJ 是航迹角,它是航迹与正北方向之间的夹角; W 是地速,它是飞机在地面上投影点的移动速度,即为飞机相对于地面的水平运动速度。 HJ 和 W 两个量表明了飞机相对于地面的运动情况。

由图 1-1 可见,在没有侧风的情况下航行时,飞机的 HJ 和 HX 相等,飞机相对于地面的运动同相对于空气的运动完全一致,即飞机的机头对准哪里,就能飞到哪里。

二、飞行器在有侧风情况下的航行

实际上,空中总是有风的,而侧风则是经常的现象。在领航学中,为了便于计算,风向是指风头的去向,叫做航行风向 FX ,也叫下风方向,风的运动速度称为风速 U 。风速和风向通常随着时间、地区和高度的不同而变化。

空中的气球、云朵会随风飘移,炮弹受风的影响会产生偏差。这些都说明,凡是离开地面处于空中的物体,不管它本身有没有速度,也不论它的重量如何,都会随风飘移。飞行器离开地面在空中飞行,同样也会受到风的影响而随风飘移。

图 1-2 是飞机在有侧风情况下的航行情况。由图可见,假设飞机以无侧风时的航向和空速由 O 点飞向 A 点,但由于侧风的影响,飞机在空中由自身推力向前运动的同时,还会受风力影响而朝下风方向飘移,因此,经过一定时间,飞机将到达与 A 点相距 ΔS 的 B 点上空。很明显,这时飞机是沿着 OB 线的正上方飞行的。

可见,在有侧风的情况下,飞机的航迹角和航行角是不相等的,地速和空速也不相同,所以飞机的地速矢量 $\vec{w}$ 与空速矢量 $\vec{v}$ 是不一致的。因此,飞机不能飞到机头所对准的某

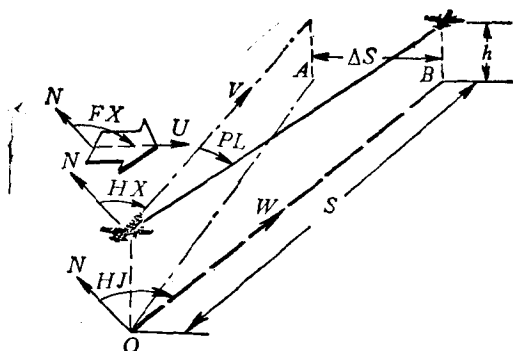


图1-2 飞机在有侧风情况下的航行

地上空，而是偏到下风方向上的另一地点的上空。

三、航行速度三角形

为了说明飞行器在有侧风情况下航行的规律性，研究航迹角、地速与航向角、空速的关系，需要用矢量来进行分析。矢量和数量是完全不同的两种量。我们知道，在物理学中，密度、质量、能量等是只有大小而没有方向的量，统称为数量；而速度、加速度、力等是既有大小又有方向的量，则称为矢量。

飞行器相对于空气的运动，用以航向为方向、空速为大小的空速矢量 $\vec{V}$ 来表示；空气相对于地面的运动，用风向为方向、风速为大小的风速矢量 $\vec{U}$ 来表示；飞行器相对于地面的运动，用以航迹角为方向、地速为大小的地速矢量 $\vec{W}$ 来表示。飞行器相对于地面的运动，是飞行器相对于空气和空气相对于地面这两种运动的合成。因此，地速矢量是空速矢量和风速矢量的合成矢量。在图 1-3 所示的以正北方向 N 为纵

坐标的直角坐标系中，根据矢量合成法则，可以清楚地表明 $\vec{V}$ 、 $\vec{U}$ 和 $\vec{w}$ 这三个矢量之间的关系。

在图 1-3 中，从坐标原点 O 按一定的比例作空速矢量图 $\vec{OA} = \vec{V}$ ，线段 OA 的长度表示空速 V 的大小，而 OA 与 ON 的夹角为航向角 HX 。再按同一比例作风速矢量图 $\vec{AB} = \vec{U}$ ，其线段 AB 的长度表示风速 U 的大小，

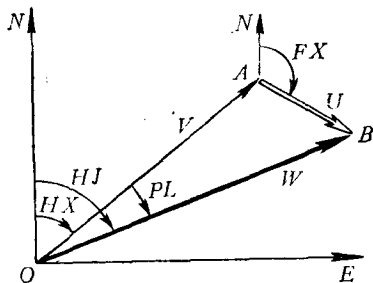


图1-3 航行速度三角形

而 AB 与 ON 之间的夹角为风向 FX 。按照矢量合成法则，从空速矢量的始端 O 向风速矢量的末端 B 连线，则矢量 $\vec{OB}$ 就是地速矢量，即 $\vec{OB} = \vec{w}$ ，线段 OB 的长度就表示了地速 w 的大小，而 OB 与 ON 的夹角是航迹角 HJ 。这个由空速矢量、风速矢量和地速矢量为三个边所构成的三角形 OAB ，就称为航行速度三角形。

由图可见，航迹角与航向角的关系，可以用空速矢量与地速矢量之间的夹角，即航向线与航迹线的夹角来表示，这个夹角称为偏流角 PL 。如图 1-4 所示，在左侧风时，地速矢量偏在空速矢量的右边，这时规定偏流角为正值 ($+PL$)；反之，在右侧风时，规定偏流角为负值 ($-PL$)。从图中可以看出，顺着侧风航行时，地速比空速大；而逆着侧风航行时，地速比空速小。

由航行速度三角形可以看出，地速矢量和空速矢量与风速矢量的关系为：

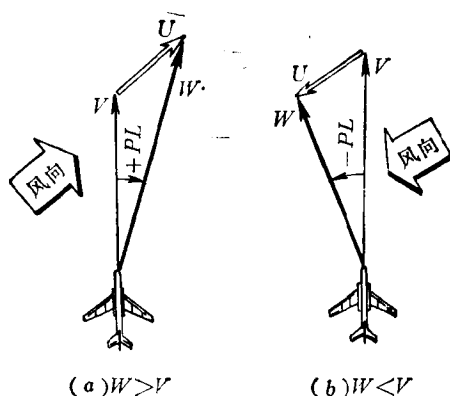


图1-4 侧风不同时，地速与空速的关系

$$\vec{W} = \vec{V} + \vec{U} \quad (1-1)$$

而航迹角与航向角的关系为：

$$HJ = HX + PL \quad (1-2)$$

从以上的分析可见，飞行器在有侧风的情况下航行时，只要测量出飞行器的地速和偏流角，将飞行器的航向修正一个偏流角，使目的地处于航迹角的方位上，就能使飞行器准确地飞抵目的地的上空。而且由地速的大小，就可以精确地计算出到达目的地上空的准确时间。

过去，飞机上只装有指示航向和空速的仪表，对于飞机的领航，只能依靠飞行人员在飞机上用人工测量和计算的方法，求出飞机的地速和偏流角，因此误差很大，使飞机不能准确及时地飞抵目的地。特别是在飞机的速度和性能提高以后，再依靠手工作业的方法来领航，其误差更大。在多普勒雷达出现以后，由于它能自动连续地给出精确的地速和偏流角信息，使这个问题得到了满意地解决。

§ 1-3 多普勒导航系统

多普勒导航系统是一种自备式的位置坐标推算法导航系统，即不必使用地面导航设备与其配合，就可以确定出飞机的瞬时位置。

自备式导航的方法，在飞机上很早就得到应用。例如，利用飞机上空速表和罗盘得出的空速和航向数据，配合领航员测得的风速和风向，借助于导航计算设备，先求出飞机的地速，再与飞行时间相乘，即可以得出飞机沿航线飞过的距离。由于起飞地点的坐标是已知的，因此也就可以计算出飞机当前的位置数据，若再加入目的地的位置数据，则可以计算出到达目的地的剩余距离和应飞航向。由于各个敏感元件所提供的数据精度太低，以及预测的风速和风向很不准确，所以这种导航系统的精度是很低的。由于多普勒雷达能够提供高精度的地速和偏流角信息，所以自备式多普勒导航系统的导航精度是很高的。

自备式多普勒导航系统主要包括多普勒雷达、航向基准和导航计算机三部分。该系统的原理方框图如图1-5所示。

多普勒雷达测量出以天线坐标系

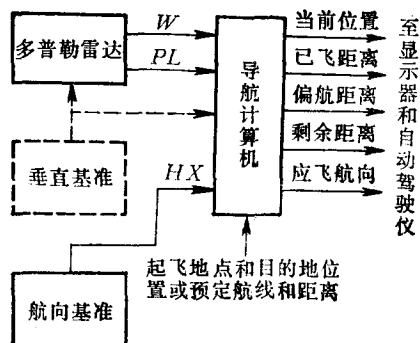


图1-5 自备式多普勒导航系统的方框图

为参考坐标的飞行器的地速 W 和偏流角 PL ，送入导航计算机。由于导航所需要的是飞行器在地面坐标系中的数据，因而在导航计算机中同时引入航向基准和垂直基准的数据，以便进行坐标变换。导航计算机对多普勒雷达提供的信息，按航向基准提供的航向，分解成纵向和横向速度分量，并将这两个正交的地速分量分别对时间进行积分（当地速分量固定不变时，可理解为速度与时间相乘），即可以计算出飞行器的已飞距离和偏航距离或当前位置。导航计算机将飞行器的当前位置坐标与目的地的坐标进行比较，可以连续计算出到达目的地的剩余距离、飞行器应该保持的航迹角或应飞航向等领航信息。如果向导航计算机输入飞行器的空速数据，还可以计算出当时当地的风速和风向。将这些信息送到显示器、自动驾驶仪等设备中去，飞行器即可实现自备式导航和自动飞行等任务。

自备式多普勒导航系统与其它导航设备相比较，具有以下优点：

（1）能自动连续地测量出飞行器相对于地面运动的精确速度及其瞬时位置等导航数据。

（2）它不需要任何地面设备，就能够完成导航任务。

（3）多普勒雷达测得的信息只与相对运动有关，在地球上任何地方都可以得到，因而不受地理条件的限制，适用于全球性导航。

（4）若多普勒雷达设计得当，则工作可不受外界气象条件的限制，因此适用于全天候导航。

（5）飞行前不需要进行调整，使用简单方便。

但是多普勒导航系统也存在如下缺点：

(1) 由于多普勒信号的起伏特性, 得出的瞬时速度没有测得的平均速度那样精确。但是, 这对导航来说是无关紧要的。

(2) 系统所给出的位置精度, 随着航行距离的增加而变差。

(3) 系统要求航向基准具有足够高的精度, 否则会带来较大的位置误差。

如果将该系统与惯性导航系统或天文导航系统组合起来, 互相修正, 可以克服上述缺点, 以进一步提高导航的精确度。

第二章 多普勒雷达的基本工作原理

§ 2-1 多普勒效应和多普勒频率

一、多普勒效应

多普勒雷达的工作原理是以多普勒效应为基础的。那么，什么是多普勒效应呢？我们在日常生活中，有这样的体验：当鸣笛的火车迎面开过来的时候，我们所听到的笛声音调是由低到高；在火车急驰而过向远离我们的方向运动时，我们听到的笛声音调由高到低。火车行驶的速度越快，我们听到笛声音调的高低变化也就越明显。在物理学中，我们知道，音调的高低是由声源振动的频率所决定的。但是，在上述情况下，我们所听到的音调（即频率）变化，完全是由声源与听者之间的相对运动所引起的。这种现象首先被澳大利亚物理学家多普勒（J. Doppler）在1842年发现，所以，将这种自然现象称为多普勒效应。

多普勒效应可以通过简单的数学推导加以证明。设某一声源发出的声波频率为 f ，波长为 λ ，它们与声波传播速度 v 的关系为：

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (2-1)$$

如图2-1(a)所示，设声源位于A点静止不动，它在发出频率为 f 的第一个波以后，经过 $T = \frac{1}{f}$ 的时间，又发出

第二个波。这时假设第一个波的前缘已经以速度 v 传播到 B 点, 则这两个波前缘之间的距离 AB 就等于波长 λ , 即:

$$AB = \lambda = \frac{v}{f} \quad (2-2)$$

又如图2-1(b)所示, 若声源以速度 W 由 A 向 B 点做匀速直线运动, 在 B 点有一个固定的接收装置。在这种情况下, 声源经过 $T = \frac{1}{f}$ 的时间, 发出

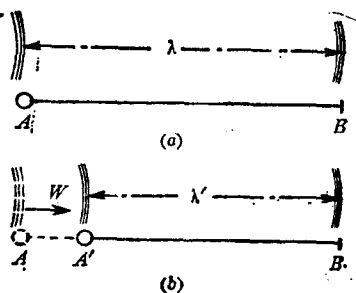


图2-1 频率和运动速度的关系

第二个波时, 它已不在 A 点了, 而是以速度 W 向前行驶到 A' 点, 并且

$$AA' = W \cdot T = \frac{W}{f}$$

这时, 第一个声波前缘仍以速度 v 传播到 B 点, 而两个波前缘之间的距离, 就由原来的 AB 缩短为 $A'B$ 。此时 B 点接收的声波波长 λ' 为:

$$\lambda' = A'B = AB - AA' = \frac{v}{f} - \frac{W}{f} = \frac{v - W}{f} \quad (2-3)$$

由此求得 B 点接收到的声波频率 f' 为:

$$f' = \frac{v}{\lambda'} = \frac{v}{v - W} f \quad (2-4)$$

由于 $\frac{v}{v - W} > 1$, 则 $f' > f$, 即 B 点接收到的声波的频率比声源发出的频率高。

当声源以速度 W 由 A 点背向 B 点做匀速直线运动时, 用同样的方法可以得出, 这时 B 点接收的声波波长 λ'' 将变得

长一些，其频率将相应地降低，即：

$$\left. \begin{aligned} \lambda'' &= \frac{v+W}{f} \\ f'' &= \frac{v}{v+W} f \end{aligned} \right\} \quad (2-5)$$

当声源不动，而 B 点的接收装置以速度 W 向着声源做匀速直线运动时，这时相当于声波的传播速度增加，变为 $v+W$ 。这样，声源发出的频率虽然保持不变，但接收到的声波频率 f' 变为：

$$f' = \frac{v+W}{\lambda} = \frac{v+W}{v} f \quad (2-6)$$

因此，接收装置收到的频率，比声源发出的频率高。

当 B 点的接收装置以速度 W 背向声源运动时，同样可以求得接收到的声波频率 f'' 为：

$$f'' = \frac{v-W}{v} f \quad (2-7)$$

即接收的频率低于声源发出的频率。

由上述的分析可见，只要声源与接收物体之间存在着相对运动，接收的频率就不同于发射的频率。两者之间的距离缩短时（相向运动），接收频率高于发射频率；两者之间的距离增大时（反向运动），接收频率低于发射频率。

自从在音频范围内发现了多普勒效应之后，经过几十年的研究，在 1938 年证明了在电磁波频域内同样有多普勒效应。后来，人们应用电磁波的多普勒效应，研制出一种新型的机载雷达——多普勒雷达。到目前，利用多普勒效应研制出的导航、测距、跟踪和引爆等雷达系统，已得到广泛的应用。

在图 2-2 中, 表示飞机在空中飞行时, 安装在飞机上的多普勒雷达, 以一条很窄的波束向前下方的地面发射频率为 f_0 的电磁波。由于照射区域 B 内, 总是存在一些不规则的地物起伏, 这时飞机虽然以地速 W 做水平运动, 但它与区域 B 之间总存在相对运动, 其相对速度 W' 等于地速矢量 W 在波束方向上的投影, 即 $W' = W \cos \gamma$ 。根据 (2-4) 式可以得出 B 点所接收的电磁波频率 f' 为:

$$f' = \frac{c}{c - W'} f_0 \quad (2-8)$$

式中, c 为电磁波的传播速度。

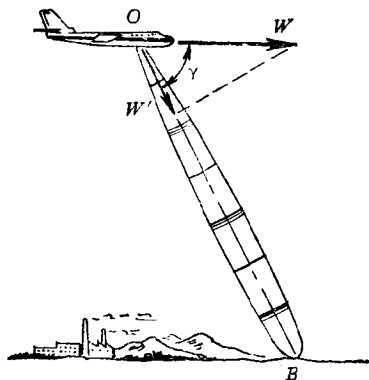


图 2-2 飞机上雷达发射电磁波的情况

由于地面的漫反射作用, 区域 B 所接收的电磁波能量, 以 f' 的频率向周围的空间进行散射, 其中有一部分能量返回到飞机上, 被雷达所接收。由于此刻飞机与区域 B 之间仍然有相对运动, 因此, 雷达接收到的回波频率 f , 又不同于区域 B 散射的频率 f' , 由 (2-6) 式可以得出:

$$f = \frac{c + W'}{c} f' \quad (2-9)$$

将 (2-8) 式代入上式, 就可以得到雷达接收频率 f 与雷达发射频率 f_0 之间的关系, 即:

$$f = \frac{c + W'}{c - W'} f_0 \quad (2-10)$$

由上式可见, 波束指向飞机前下方时, 由于 $\frac{c+W'}{c-W'} > 1$, 则 $f > f_0$, 即接收的频率高于发射的频率。同样可以得出, 当波束指向飞机的后下方时, 接收频率低于发射频率。

二、多普勒频率

通常, 我们将相对运动所引起的接收频率与发射频率之间的差频称为多普勒频率, 并用 f_d 来表示, 即:

$$\begin{aligned} f_d = f - f_0 &= \frac{c+W'}{c-W'} f_0 - f_0 = \frac{2W'}{c-W'} f_0 \\ &= \frac{2W'}{c \left(1 - \frac{W'}{c}\right)} f_0 \end{aligned} \quad (2-11)$$

由于电磁波的传播速度远远大于飞机的地速, 上式中 $\frac{W'}{c} \ll 1$, 可以忽略不计, 所以,

$$f_d = \frac{2W'}{c} f_0 = \frac{2W'}{\lambda} = \frac{2W}{\lambda} \cos \gamma \quad (2-12)$$

式中 λ —— 雷达发射电磁波的波长;

γ —— 波束中心线与地速矢量之间的夹角。

由 (2-12) 式可见, 当 λ 和 γ 确定以后, $\frac{2 \cos \gamma}{\lambda}$ 是一个常数, 多普勒频率与地速成正比关系。在多普勒雷达中, 采用一种专门的设备, 测量出接收频率和发射频率的差值, 即多普勒频率 f_d , 就可以确定飞机的地速 W , 即:

$$W = \frac{\lambda}{2 \cos \gamma} f_d = k \cdot f_d \quad (2-13)$$

式中, k 为比例系数。因此, 多普勒雷达就是依据测量多普勒频率而工作的。

§ 2-2 单波束多普勒雷达

一、基本工作原理

为了便于理解多普勒雷达的基本工作原理，我们来讨论一种最简单的组成形式。图 2-3 所示是单波束多普勒雷达的原理方框图，它主要由发射机、收发开关、天线、接收机、频率测量器和指示器等部分组成。

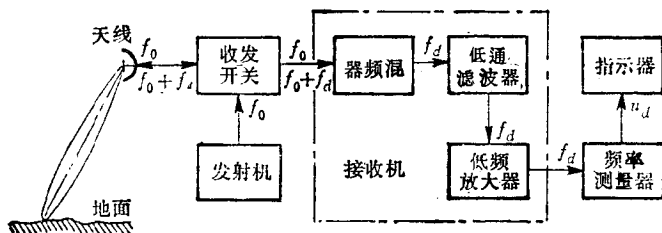


图2-3 单波束多普勒雷达的原理方框图

雷达发射机产生一个频率为 f_0 的连续振荡信号，该信号通过收发开关馈送到天线上，并沿着波束方向向地面辐射。由于大地粗糙表面的散射作用，其中一部分电磁波的能量又沿着波束方向返回到飞机上，被雷达接收。因为飞机与地面的相对运动，使回波信号中包含了多普勒频率信息，其频率为 $f_0 + f_d$ 。回波信号通过收发开关加到接收机的混频器上，与发射机耦合过来的直达基准信号 f_0 进行混频，然后经过低通滤波器取出差频信号，这也就是所需要的多普勒信号 f_d 。它经过低频放大器放大后送到频率测量电路。频率测量器测量出多普勒频率 f_d 的数值，并产生一个与频率 f_d 成比例的模拟电压 u_d ，该电压的大小就代表了飞机的地速。将电压 u_d