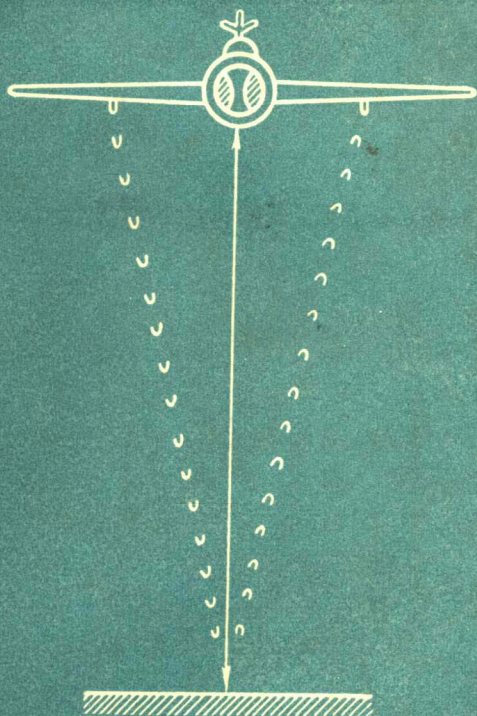


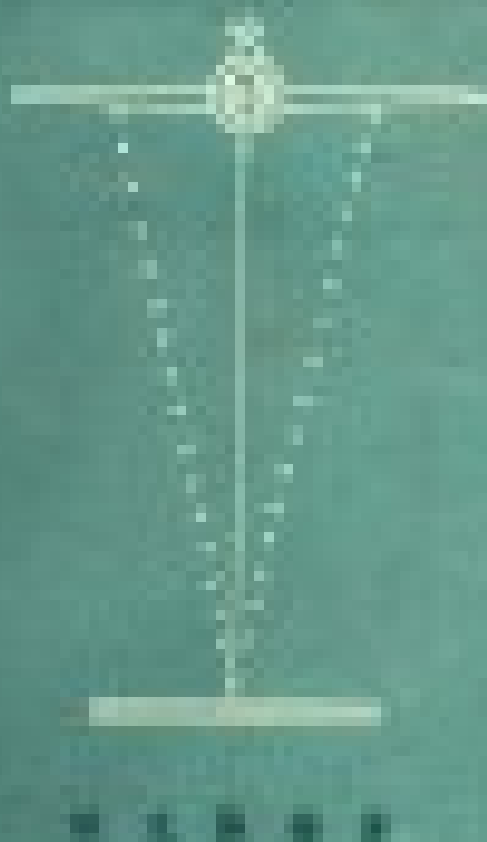
调频式无线电高度表



陆克强 编著



调频式无线电高度表



电高度表



內 容 簡 介

本書以通俗易解的文字介紹飞机导航設備之一——調頻式無線電高度表的作用原理及其結構。

它可供希望了解無線電高度表的無線電愛好者閱讀，也可作為有關工作人員業務學習的參考書。

編著者：陸克強

*

國防工業出版社 出版

北京市書刊出版業營業許可証出字第 074 号
机械工業出版社印刷厂印刷 新华書店發行

*

787×1092 $1/32$ 印張 $1\frac{1}{4}$ 28千字

1959年7月第一版

1959年7月第一次印刷

印數：0,001—2,230 册 定價：(11) 0.22 元

NO. 3037 統一書號：15034·372

目 录

前言	2
I 电波的反射	5
II 調頻	8
一、調幅	8
二、調頻	9
三、調頻波的获得	11
III 測高原理	14
IV 綫路的簡單分析	20
一、發射机	21
二、調制器	25
三、接收机	26
四、計算电路	32
五、指示器	35
V 測高准确度	36

前 言

自从 1895 年天才的俄国学者阿力克山大·斯捷潘諾維奇·波波夫發明了第一架无綫电接收机以来，无綫电技术获得了飞跃的發展，在国民經济的各个部門中，也得到了广泛的应用；如航空、航海、鉄路运输、广播事业、无綫电通訊、科学研究、工业、农业等等，都大量的应用着无綫电技术。在航空事业中，无綫电仪器是飞行中不可缺少的航行仪器，是飞行員的有力助手，它配合其它仪器完成各种复杂的飞行任务。尤其在盲目飞行时，无綫电仪器更显示出了它的优越性。

无綫电仪器在飞机上可分为通訊設備和导航設備两大类。顧名思义，通訊設備为飞机与地面或飞机与飞机之間作通訊联络之用，而导航設備則引导飞机在正确的航綫上航行。

无綫电高度表为导航設備中的一种，它的任务就是随时告訴飞行員飞机飞离地面的真实高度。

无綫电高度表除了在结构上与一般膜盒式气压高度表不同外，它所指示的高度也与膜盒式气压高度表不同。膜盒式气压高度表所指示的是距离海平面的高度，而无綫电高度表所指示的高度則为距离地面的高度，这是无綫电高度表的优点；另外，无綫电高度表也不像膜盒式气压高度表那样有時間上的滯后誤差和受大气条件的影响，这也是无綫电高度表的优点。

因为地面起伏很不規則，在盲目飞行时，飞行員必須随时知道飞机距离地面的真实高度，利用无綫电高度表就可以使这个問題很容易地得到解决。在无綫电高度表的指示器上，飞行員可随

时直接讀出飞机距离地面的真实高度，因而保证了飞机的安全飞行。所以說，无线电高度表是盲目飞行中不可缺少的导航仪器。

无线电高度表的工作形式有脉冲式和調頻式两种。脉冲式沒有調頻式准确，故一般需要精确测量高度的高度表中均采用調頻式，但脉冲式的作用距离（即能测的最大高度）要比調頻式高得多，所以飞机航行在很高的高度上时，常采用脉冲式无线电高度表来测高。

調頻式无线电高度表又可分为若干种，例如，除現今广泛采用的一般調頻式无线电高度表外，还有新近出現的双調頻式无线电高度表，新型超外差式高度表等，本書中主要叙述現今国内广泛使用的一般調頻式无线电高度表的作用原理及其結構。因此本書中所用術語“无线电高度表”均系指一般調頻式无线电高度表而言。

著者沒有經過系統的学习，知識非常貧乏，只是在实际工作中曾經与无线电高度表有过接触，懂得的也不多。著者只是想通过本書对广大无线电爱好者介紹无线电技术中的一个特殊用途，从而激發他們对鑽研无线电技术更大的兴趣，同时也想将本書提供有关的工作人员作业务学习的参考書，当然也希望本書能起到抛磚引玉的作用。

本書初稿承北京航空学院丁子明先生审阅，指出錯誤多处，并提供不少宝贵意見，在此特表示感謝。

著者对本書虽尽了最大的努力，但終因学識淺陋，書中謬誤之处一定很多，希望各位讀者予以指正为感。



I 电波的反射

人們很早就注意到声波在行进中遇到大的物体（即遇到不同的媒介質分界面）时，能够反射回来的特性（即所謂回声），并且曾經利用这种特性来测量距离。如我們在离牆稍远的地方●，对牆發出一短促的声音，

經過一定的時間后，我們就能听到回声。这是因为我們人發出去的声音在行进中遇到了牆壁（即遇到了不同的媒介質分界面），一部分能量被牆壁吸收，一部分

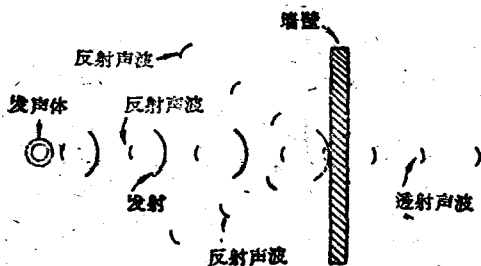


圖1.1 声波的反射。

能量透射过牆壁繼續前进，而另一部分被牆壁反射回来，反射回来的声波中又有一部分回到原来發声的地方，因而我們就听到了回声，如圖1.1所示。

我們知道，声波在空气中行进的速度是每秒 340 公尺（ $v = 340$ 公尺/秒）；假若發出声音后經過 2 秒听到回声，則可根据物理学中的公式 $s = vt$ 求出距离来。但在我們这里，因为声音一去一回所經過的路程为發声体到牆壁（反射体）的两倍，故須折半

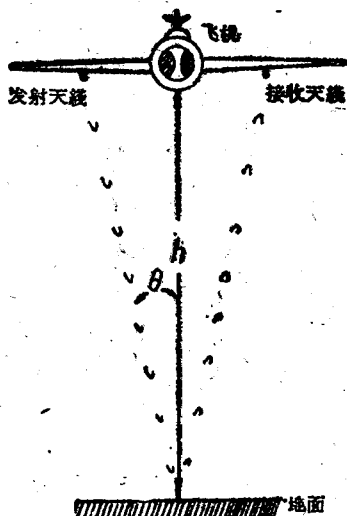
$$s = \frac{1}{2}vt. \quad (1.1)$$

● 如果人离牆过于近，使人發出的声音和反射回来的声音之間的時間間隔太短，混在一起不易分清，只是感觉到声音响一点而已，例如我們在一間四面封閉的屋里說話，就是这样。

用上面例子中的数字代入公式 (1.1) 得

$$s = \frac{1}{2} \times 340 \text{ 公尺/秒} \times 2 \text{ 秒} = 340 \text{ 公尺},$$

即我們离牆的距离为 340 公尺。



—圖 1.2 电波的反射。

电波也具有与声波同样的特性，即在行进中如遇有不同的媒介质分界面时，电波的一部分能量被吸收，一部分能量透射过去繼續前进，而有一部分能量則發生反射。不难理解，如果在飞机上由發射机經發射天綫向地面發射一束电波，則电波碰到地面后除一部分被地面吸收外，有一部分电波将被反射回到飞机另一側的接收天綫上，如圖 1.2 所示。現在只需有一仪器能測出电波从發射出去到反射回来的時間，就可

根据上面所說声波反射的同样道理，計算出飞机的高度，其关系为

$$h = \frac{1}{2} ct \cos \theta,$$

这里 h ——飞机离地面的高度；

c ——光速，无綫电波在空气中的傳播速度与光的速度相同，为 3×10^8 公尺/秒●；

t ——电波从發射出去到地面，再从地面反射回到飞机所需的時間。

● 根据实验測得，无綫电波在真空中的速度为 299,790 公尺/秒。

一般因为 θ 角極小, $\cos \theta \approx 1$, 此时

$$h = -\frac{1}{2}ct^2. \quad (1.2)$$

由此可見, 无綫电高度表的工作原理是基于电波在行进中遇到不同媒介質分界面时将發生反射这一特性上的。众所周知, 雷达也是利用这种特性, 因此, 无綫电高度表也有人称做雷达高度表。

可是无綫电波的速度是極快的, 那末 (1.2) 式中的 t 值就極小。例如飞机的高度为 1500 公尺, 則电波从發射出去到地面, 再从地面反射回到飞机所需的时间为

$$t = \frac{2 \times 1.5 \times 10^3 \text{公尺}}{3 \times 10^8 \text{公尺/秒}} = 10 \times 10^{-6} \text{秒} = 10 \text{ 微秒},$$

即十万分之一秒; 如果 h 值再小, t 值还要小。

显然, 欲直接用以上所述关系式来测高(即先测出時間 t , 再测出高度 h 来)是很麻煩的, 因为要直接测量这样短的时间将是非常困难的, 而且测量工作的准确性要極高(時間誤差十万分之一秒, 高度就要誤差 1500 公尺)●, 因此必需寻求用間接的和更簡便的方法来测量高度。

苏联学者 Л. И. 曼捷列施塔姆和 Н. Д. 巴巴列克西首先在无綫电高度表上应用了調頻的方法; 尤其在需要准确度高的无綫电高度表中, 調頻法得到了广泛的应用。它根据 (1.2) 式的关系, 間接地求出了高度, 并且在指示器上直接指示出来, 这样就解决了以上所說直接测量時間的困难。

它的工作情况将在下面詳細介紹, 在介紹工作原理以前, 必

● 现代科学技术完全有可能测出这样短的时间, 甚至更短, 但测量机构就要复杂; 而这一点在飞机上是要想尽一切方法使机构簡化的。

須先了解一下什么叫調頻。

II 調 頻

現代廣播技術中，一般均採用調幅，它與調頻完全不同。為

要了解調頻的特性，現在先簡單地討論一下調幅的特性，然後從它們之間的不同點來更進一步體會調頻的特點。

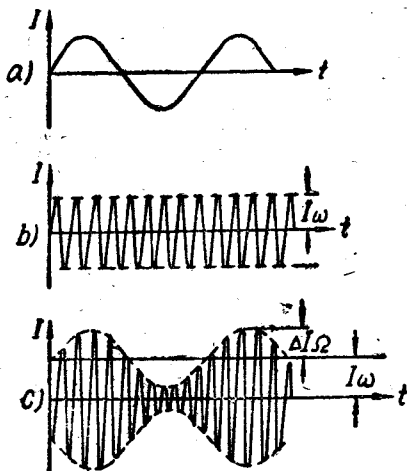


圖2.1 調幅波。

一、調幅——載波的振幅隨着調制訊號的規律而變更的調制方法叫做調幅，如圖2.1所示。圖中（a）為調制波；為解釋簡單起見，假定為正弦波，其角頻率為 Ω ；（b）為載波，其角頻率為 ω ；（c）為已經調制後

的調幅波。一般調幅波用數學表示為

$$i = I_{\omega} \sin \omega t + \frac{1}{2} m I_{\omega} \sin (\omega + \Omega) t + \frac{1}{2} m I_{\omega} \sin (\omega - \Omega) t, \quad (2.1)$$

這裡 i 為調幅波的瞬時電流值； I_{ω} 為載波的電流峰值； $m = \frac{\Delta I_{\omega}}{I_{\omega}}$ 是調幅係數； ΔI_{ω} 為調幅波電流振幅。

根據以上的表示式，我們可以歸納出調幅波的以下幾個特點：

1) 調幅波由三個成份組成：(2.1) 式中的第一項 $I_{\omega} \sin \omega t$

是載波成份，這說明在調幅波中載波仍然存在；第二項 $\frac{1}{2} m I_{\omega} \sin(\omega + \Omega)t$ 叫做上旁波，它的頻率是 $\omega + \Omega$ ，它的振幅是 $\frac{1}{2} m I_{\omega}$ ；第三項 $\frac{1}{2} m I_{\omega} \sin(\omega - \Omega)t$ 叫做下旁波，它的頻率是 $\omega - \Omega$ ，振幅也是 $\frac{1}{2} m I_{\omega}$ ；

2) 相邻两个頻率間的距离等于調制頻率 Ω ，而頻帶寬度为 2Ω ，它与調幅系数的大小无关；

3) 已調幅波的振幅按照調制波的电压曲綫变化。

二、調頻 調

頻与調幅完全不一样。当載波被調頻以后，其振幅不变，而其頻率却随着調制訊号的規律变化。圖 2.2 所示即为調頻波的組成，圖中 (a) 为調制波，設为正弦波，其頻率为 f_m ；(b) 为載波，又叫調頻波的中心頻率，簡称中心頻率，其頻率为 f_0 ；(c) 为載波被調頻后的調頻波。可以看出，

当調制波 f_m 为正半周时，調頻波的頻率增高，当調制波 f_m 为負半周时，調頻波的頻率就降低，而調制波 f_m 为零时，則調頻波的頻率等于中心頻率。載波頻率的偏移幅度，即中心頻率与瞬時頻

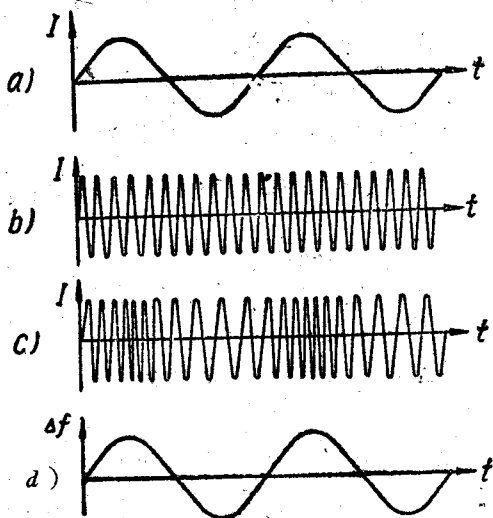


圖2.2 調頻波。

率的最大偏移叫做頻移，用符号 Δf 表示。圖 2.2 中 (d) 为表示頻率偏移的頻移曲綫。可以看出，該頻移曲綫与調制波 f_m 的电流曲綫相像，所以說，調頻波的頻率随着調制波振幅的变化而作相应的变化，其变化周期即为調制波的周期。頻移的瞬时值与調制波的电流瞬时值成正比例；所以在任何時間 t 时，調頻波的瞬时頻率为

$$f = f_0 + \Delta f \sin \Omega t, \quad (2.2)$$

这里 f_0 ——載波頻率；

Δf ——最大頻移；

Ω ——調制波的角頻率。

这时調頻波的瞬时电流值将为

$$i = I_{\omega_0} \sin (\omega_0 t + M_f \sin \Omega t), \quad (2.3)$$

这里 I_{ω_0} ——載波的电流峰值；

ω_0 ——載波頻率 f_0 的角頻率；

$M_f = \frac{\Delta \omega}{\Omega}$ ——調頻指数；

$\Delta \omega$ ——頻移 Δf 的角頻率；

Ω ——調制波 f_m 的角頻率。

从 (2.2) 及 (2.3) 式可以明显地看出調頻波的几点特性：

- 1) 調頻波的頻率随調制波的振幅变化，也就是說，在調制波的一个周期內，調頻波的頻率各不相同，頻移的大小及方向●与調制波的振幅有关；
- 2) 頻移的变化周期等于調制波的周期；
- 3) 調頻波的振幅是不变的。

● 这里所說的方向是指調頻波的瞬时頻率大于或者小于中心頻率的意思。

上面已經簡單地介紹了調頻的意義●，下面我們就來討論一下如何獲得調頻波的問題。

三、調頻波的獲得 欲獲得調頻波，一般可以採用機械調頻法和電抗管調頻法兩種方法。在無線電高度表中採用的是機械調頻法，所以電抗管調頻法就不屬本書範圍，在此遂不加敘述。

機械調頻是最早的一種調頻法，它構造簡單，但是在廣播工程上不適用，所以一般只被

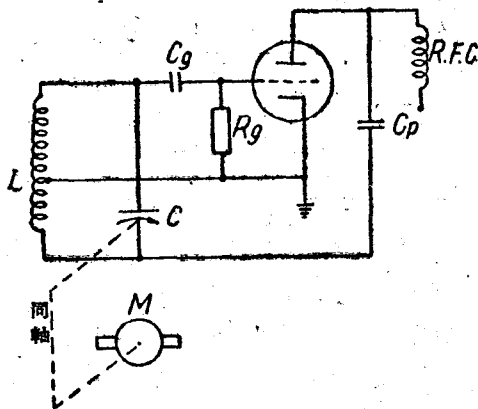


圖2.3 最簡單的調頻振蕩器。

一些特定用途的無線電儀器所採用。圖2.3為一最簡單的調頻線路，LC是振蕩器中的諧振迴路，可變電容器C的動片和電動機M同軸轉動，因而當電動機轉動時，可變電容器的電容量也就跟隨着電動機作周期性的變動，從而達到調頻的目的。

電容器C的動片除用電動機帶動使其作周期性變動外，還可以用其它的方法來帶動，如用電容器C的動片作電磁鐵銜鐵的一部分。當電磁鐵線圈受調制電壓控制時，電容器C的電容量也就會隨着控制電壓變動，因而達到調頻的目的，如圖2.4所示。

圖2.4與2.3基本上相同，唯可變電容器是用電磁鐵E來控

● 讀者如願更深入地了解調頻知識，可參閱C. B. 諾瓦柯夫斯基著“調頻”一書，人民郵電出版社出版，朱慶璋譯。

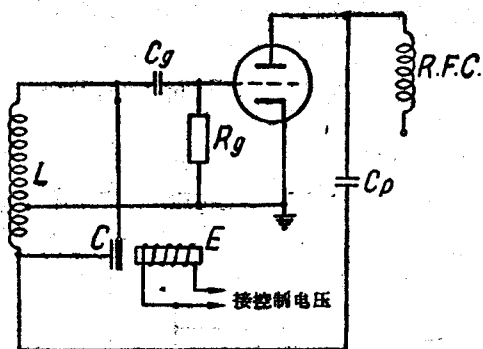


圖2.4 又一种簡單的調頻振蕩器。

制。电磁铁的鉄蕊本身是一固定的磁性鉄蕊，因此当控制电压（为解釋簡單計，設为一正弦波）的某一半周加到电磁铁的綫圈上时所产生的磁力綫方向与磁性鉄蕊的磁力綫方向一致，就吸引电容器的动片，此时电容器动片与定片間的距离增加；当控制电压的另一半周加到电磁铁的綫圈上时，所产生的磁力綫方向与磁性鉄蕊的磁力綫方向相反，就排斥电容器的动片，此时电容器动片与定片間的距离就縮小；我們知道，电容器的电容量与兩極板間的距离有关，电容器的电容量为

$$C \approx \frac{\epsilon S}{4\pi d}, \quad (2.4)$$

这里 C ——电容量；
 ϵ ——介質的介电常数；
 S ——兩極板的面积；
 d ——兩極板間的距离。

由此可見，电容器的电容量与介質的介电常数及兩極板的面积成正比，而与兩極板間的距离成反比。在我們上面所講的情况中，电容器兩極板的面积与介电常数不变，只有兩極板間的距离在变动，因而电容器的电容量也就只跟随着兩極板間距离的变化而变化。我們已經知道兩極板間的距离是被控制电压所控制的，因而这也

就是說电容器的电容量是由控制电压所控制的了。我們所說的这个控制电压就是前面所說过的进行調頻时所必需的調制波电压。

現在我們再来看一看調制波与振荡器振荡頻率間的关系。在討論这个问题以前，必須先討論一下电容器的电容量是怎样随着調制波变化的，也即电容量的变化規律是怎样的。

假設当調制波电压沒有加到电磁鉄綫圈上时，电容器的电容量为 C_0 ，而当調制波电压加到綫圈上后电容器的电容量的最大变化值为 ΔC ，又假設調制电压是正弦波，其角頻率為 Ω ，則在任何時間 t 时的电容量 C 可近似地表示为

$$C = C_0 + \Delta C \sin \Omega t, \quad (2.5)$$

設 $m_c = \frac{\Delta C}{C_0}; \quad \Delta C = m_c C_0,$

代入 (2.5) 得

$$C = C_0 + m_c C_0 \sin \Omega t = C_0 (1 + m_c \sin \Omega t). \quad (2.6)$$

(2.6) 式若用函数圖形表示出来，將更易理解；圖 2.5 即为 (2.6) 式的函数圖形，它非常明显地表示出了电容器电容量的变化規律与調制电压变化規律間的关系。

在电容量是变化的情况下，振荡器的振荡頻率是怎样变化的呢？我們知道，一个振荡器的振荡頻率基本上决定于它的諧振迴路的 LC 值，即

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (2.7)$$

在我們的情况下，电容量 C 等于 (2.6) 式所示，所以把 (2.6) 式

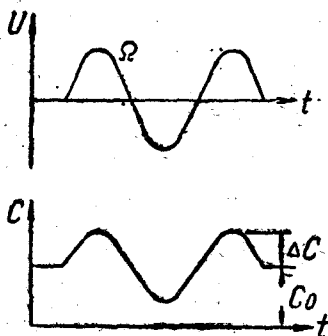


圖 2.5 电容量的变化。

代入 (2.7) 式得

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0(1+m_c\sin\Omega t)}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}}(1+m_c\sin\Omega t)^{-\frac{1}{2}},$$

当 m_c 很小时, 利用二項式定律, 可得其近似式如下

$$f \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}} \left(1 - \frac{1}{2} m_c \sin \Omega t \right). \quad (2.8)$$

上式中 $\frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}}$ 部分可以認為是这个調頻振荡器的中心頻率, 也就是調制电压沒有加到电磁鉄綫圈上时的振荡頻率, 或者是調制电压虽加到电磁鉄綫圈上, 但电压值为零时的振荡頻率; 其中 $\frac{1}{2} m_c \sin \Omega t$ 部分跟随着調制电压的瞬时值变动, 由此可知 (2.8) 式中的瞬时頻率和調制电压成正比, 故得調頻波。同时从上式也还可以看出, 电容器的电容量变化率 ($m_c = \frac{\Delta C}{C_0}$) 越大, 則頻移也就越大, 即頻移 Δf 与电容量的变化率 m_c 成正比。

知道了調頻波的特性和怎样获得調頻波以后, 現在就可以討論調頻式無線电高度表的測高原理了。

III 測高原理

前面一节已經簡略地介紹过了調頻的知識。在無線电高度表中为什么要应用調頻制呢? 無線电高度表的測高原理又怎样呢? 本节就来討論这两个問題。

为了容易理解, 我們先从無線电高度表的构造来着手討論, 然后进而討論無線电高度表的測高原理。

圖 3.1 是無線电高度表的方塊圖, 我們从該圖中可以看出無線电高度表构造的大概情况; 它共包括發射机、接收机、調制器、計算电路、指示器、發射天綫和接收天綫等几个主要部分。