

雷 达

苏联 索洛佳日尼柯夫著

何治坡 朱邦俊 周鎰鑫译

人民邮电出版社

Н. Н. СОЛОДЯЖНИКОВ
РАДИОЛОКАЦИЯ
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ 1956

內 容 提 要

本書比較全面地介紹了雷達的工作原理，分析了雷達發射和接收部
各个机件的工作和結構。包括：超短波的傳播，饋電綫，波導管和空腔
振器，天綫，形成电路，显示器，接收机，發射机的振蕩器，脉冲調制
等等。

雷 达

著 者： 苏联 索洛佳日尼柯夫
譯 者： 何治垓 朱邦俊 周鑒鑫
出版者： 人民 郵 電 出 版 社

北京東四條13號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第〇四八號)

印刷者： 北 京 市 印 刷 一 厂
發行者： 新 華 書 店

尺寸 850×1168 1/4
印張 11 張 頁數 101
印刷字數 320,000 字
開本 1—2, 100 冊

1958年6月北京第一次
1958年6月北京第一次印刷
統一書號：15045·第789—第190
定價：(10)1.80元

緒 言

利用無線电技术設備來測定各種物體（飛機、艦艇等）的位置，稱為雷達。

雷達的工作原理是以無線電波遇到物體時會產生反射的現象為基礎的。雷達站的發射部分發射無線電波，而接收部分則接收從所射到的物體上反射回來的無線電波，並用來測定它的空間坐標。

雷達能在其它任何探測工具都無能為力的距離上和氣象條件下（雨、雪、霧、煙等等）發現物體。另外，雷達最重要的優點是能直接讀出被發現物體的坐標和迅速地顯示它們，因此當物體移動的速度超過音速時，雷達設備仍能適用。

雷達具有巨大的軍事防禦意義。各國軍隊中雷達勤務的組織各不相同。然而可以指出雷達設備在軍事上應用的下列幾個基本方面：

（1）監視周圍的空間，以便向防空軍預報空中敵人的出現，報導它的距離和飛行的方向；

（2）在艦艇上監視天空、海面和海岸綫；

（3）保證探照燈的工作，使它可以不必事先用燈光進行搜索；

（4）控制炮火射擊選定的目標，並對目標進行自動跟蹤；

（5）保障空軍：在完全看不見的情況下將殲擊機引向空中的敵人（導航——譯者註），引導殲擊機追近敵機至戰鬥的距離並向敵機瞄準射擊；從飛機上監視陸地和海洋；向陸上和海上看不見的目標瞄準投彈；向我機報告敵機已從後面追近等等；

（6）識別是否是自己的飛機、艦艇和其它的目標。

雷達的應用並不僅僅局限於軍事上的需要。相反的，雷達設備能頗有成效地用於海上和空中的導航（脈沖信標），用以使飛機盲目著陸，預防海船和飛艇互撞，以及與航道上固定的障礙物（指暗礁、冰山等——譯者註）的碰撞。雷達在氣象服務方面和其它許多

場合中也獲得了應用。

應用雷達的廣闊的可能性，是雷達技術和理論在國外和蘇聯所以迅速發展的原因。

蘇聯科學家的工作對雷達的發展，曾起了杰出的作用。

無線電波由所遇到的物體發生反射的現象（這是雷達的基礎），還是無線電發明者亞歷山大·斯捷潘諾維奇·波波夫在無線電技術誕生的初期，於1897年作艦艇間無線電通信的最初實驗時發現的。

1922年，在由院士М.В. 舒列金(М.В. Шулейкин)、Б.А. 符維堅斯基(Б.А. Введенский)和А.И. 達尼列夫斯基(А.И. Данилевский)領導的軍事無線電實驗室內，進行了超短波無線電報通信的實驗，這時對超短波在從發射機到接收機的傳播途徑上遇到大廈的牆壁和其它障礙物時所引起的與反射現象有關的干擾現象和繞射現象，給予了應有的注意。那時就獲得了可以利用超短波來探測物體的直接啓示。

作為大量生產的樣品的第一批蘇聯雷達設備的出現，是在1936到1937年間。蘇聯的第一批脈衝雷達站是在Ю. Б. 科布扎列夫(Ю.Б. Кобзарев)的領導下制成的。

由於必須過渡到分米波和厘米波波段，就碰到了獲得大功率的困難。在М.С. 聶曼(М.С. Нейман)教授所提出的空腔諧振器理論的基礎上，蘇聯科學院通訊院士М. А. 蓬奇-布魯耶維奇(М.А. Бонч-Бруевич)提出了多腔磁控管的理論，世界上第一個多腔磁控管是在他的領導下，於1936年由列寧格勒的工程師Н.Ф. 阿列克謝耶夫(Н.Ф. Алексеев)和Д.Е. 馬里雅羅夫(Д.Е. Маляров)制成的。他們的論文發表以後，外國也開始採用這種磁控管。Н.Д. 傑維雅特科夫(Н.Д. Девятков)，М.Д. 古列維奇(М.Д. Гуревич)等人在創制特高頻接收管方面的工作，以及В.Ф. 柯瓦連科(В.Ф. Коваленко)和В.И. 加里寧(В.И. Калинин)創制世界上第一個反射式調速管的工作同樣具有重大的意義。

必須指出蘇聯科學在創制觀測反射信號的电子顯示器方面作出

的巨大貢獻。还在 1907 年，Б. Л. 罗津格 (Б. Л. Розинг) 教授第一个提出了远距离电傳圖象的方法，并用电磁式电子射綫管来接收它們。实际上，这是一种最重要的显示方法的發明，現在在雷达技术中广泛地采用这一方法。几乎在同一時間，另一位俄罗斯科学家 Л. И. 曼傑尔什塔姆 (Л. И. Мендельштам) 实现了他的時間扫描的想法，因此便产生了电子示波器。現在用作雷达站显示器的就是这种电子示波器改善后的形式。

苏联科学家对天綫技术的发展也作出了巨大的貢獻。广泛应用在米波波段的雷达中的各种天綫的型式，还是尼日哥罗得無線电实验室的同仁們——М. А. 蓬奇-布魯耶維奇，В. В. 塔塔林諾夫 (В. В. Татаринов) 和 А. А. 皮斯托尔 科尔斯 (А. А. Пистолькорс) 首先在理論上闡明，繼而又在实际上制成用于短波的。稍后，但是还在偉大的衛國战争开始以前，М. С. 聶曼和 М. А. 蓬奇-布魯耶維奇各自独立地提出了一种厘米波波段的新型天綫——裂縫天綫。

最后，應該指出 М. В. 舒列金院士在雷达的理論基础方面的工作的巨大意义。

苏联科学在雷达方面重大的貢獻，还远不止这些。

目 录

前言

第一章 無線电探测法	1
§ 1-1 測定目标空間坐标的原理	1
§ 1-2 調頻法	3
§ 1-3 杜普勒效应法	5
§ 1-4 脉冲法	8
第二章 超短波的傳播及其由所遇到物体的反射	9
§ 2-1 超短波用作無線电探测的优点	9
§ 2-2 超短波傳播的特点	9
§ 2-3 無線电波由所遇到物体的反射	13
§ 2-4 直接發射和二次發射定律	17
§ 2-5 雷达的發射功率	21
第三章 脈冲雷达的方框圖和它的战术技术諸元	24
§ 3-1 脈冲状态的基本关系	24
§ 3-2 脈冲雷达的方框圖	26
§ 3-3 脈冲雷达的战术技术諸元	29
§ 3-4 無線电脈冲的形狀和持續時間	30
§ 3-5 無線电脈冲的持續時間和工作波長	32
§ 3-6 脈冲發送頻率	34
第四章 饋电綫	36
§ 4-1 雷达中高频綫的用途	36
§ 4-2 長綫理論中最重要的原理	36
§ 4-3 饋电綫的种类及其参数	47
§ 4-4 饋电綫中損耗的几种形式	51
§ 4-5 对饋电綫的要求	53
§ 4-6 阻抗变换器	54
§ 4-7 从双导綫饋电綫到同軸饋电綫的接續	60
§ 4-8 沿饋电綫傳送的能量	61
第五章 無線电波导管和空腔 諧振器	63
§ 5-1 电磁波能量的傳送	63

4001165

3331695

§ 5-2	波导管中电磁场的边界条件	64
§ 5-3	波导管中的磁波和电波	66
§ 5-4	在矩形截面的波导管中波的基本型式	
§ 5-5	在圆形截面的波导管中波的基本型式	
§ 5-6	波导管中的波长和波导管的临界波长	17
§ 5-7	相速和群速	76
§ 5-8	波导管的输入阻抗	77
§ 5-9	波导管中的衰减	
§ 5-10	波导管中波的激励	80
§ 5-11	波导管中的滤波器和波的变换	83
§ 5-12	波导管的优点	84
§ 5-13	平行六面体和圆柱形空腔谐振器	84
§ 5-14	空腔谐振器的参数	88
§ 5-15	凹型谐振器	89
§ 5-16	波导系统	90
第 六 章	雷达的天线	94
§ 6-1	天线的方向图	94
§ 6-2	半波振子	98
§ 6-3	米波天线系统中半波振子的协同工作	103
§ 6-4	多振子同相天线	107
§ 6-5	指射天线	111
§ 6-6	带抛物面反射器的天线	112
§ 6-7	裂缝天线	114
§ 6-8	喇叭形天线	115
§ 6-9	介质天线	117
§ 6-10	透镜天线	118
§ 6-11	发射机和接收机用公共的天线工作	119
§ 6-12	发射机和接收机分别用自己的天线工作	126
第 七 章	目标测向和空间扫描的方法	127
§ 7-1	目标测向法	127
§ 7-2	最大信号测向法	128
§ 7-3	等信号区测向法	129

§ 7-4 斜位测向法	130
§ 7-5 电磁波束空间扫描的方法	134
§ 7-6 圆形扫描	135
§ 7-7 螺旋形扫描	136
§ 7-8 锥形扫描	138
§ 7-9 螺旋形扫描	140
§ 7-10 “余割平方”波束扫描	141
§ 7-11 V 形波束扫描	143
§ 7-12 从测向和扫描的观点来看定向天线的优缺点	145
第 八 章 形成电路	146
§ 8-1 电容器通过电阻的充电和放电	147
§ 8-2 RC 电路中不稳定过程的计算方法	152
§ 8-3 在 RL 和 RCL 电路中的不稳定过程	154
§ 8-4 多谐振荡器的基本电路	159
§ 8-5 多谐振荡器的计算	168
§ 8-6 正栅多谐振荡器	171
§ 8-7 多谐振荡器的同步和分频	173
§ 8-8 触发电路	175
§ 8-9 间歇振荡器	179
§ 8-10 微分电路	182
§ 8-11 积分电路	185
§ 8-12 由大功率正弦电压形成脉冲	186
§ 8-13 限幅器	188
§ 8-14 二极管限幅	189
§ 8-15 栅极限幅	191
§ 8-16 板极限幅	192
§ 8-17 寄生参数对限幅器工作的影响	193
§ 8-18 限幅器的应用范围	194
第 九 章 显示器	196
§ 9-1 雷达显示器的分类	196
§ 9-2 显示器的电子射线管和反射信号标志的形式	198
§ 9-3 对显示器的要求	200

§ 9-4 扫描电压的形式	201
§ 9-5 直线扫描	201
§ 9-6 圆形扫描	203
§ 9-7 径向扫描	204
§ 9-8 直线扫描距离显示器	206
§ 9-9 扫描电压发生器	209
§ 9-10 选择信号发生器	214
§ 9-11 距离刻度校准器	21
§ 9-12 直流成分恢复器	218
§ 9-13 按显示器刻度直读的缺点	219
§ 9-14 电位计测距法	219
§ 9-15 电容测距法	222
§ 9-16 圆形扫描显示器 (J 型显示器)	224
§ 9-17 按移相器测距的显示器	226
§ 9-18 移相电路和移相器	227
§ 9-19 带旋转线圈的平面位置显示器	230
§ 9-20 偏向线圈中线性变化电流发生器	232
§ 9-21 偏心式平面位置显示器	234
§ 9-22 径向扫描分解的平面位置显示器	234
§ 9-23 用等信号区法工作的雷达显示器	237
§ 9-24 “距离——高度”型和“距离——仰角”型显示器	239
第 十 章 雷达接收机	240
§ 10-1 作用和要求	240
§ 10-2 接收机的内部噪声	241
§ 10-3 噪声系数和灵敏度	244
§ 10-4 超短波电子管的输入阻抗	245
§ 10-5 用作超短波放大器的电子管	250
§ 10-6 雷达接收机的特点	252
§ 10-7 雷达接收机的方框图	258
§ 10-8 输入电路	259
§ 10-9 高频放大器	262
§ 10-10 雷达接收机中的变频	267

§ 10-11 中頻的選擇	270
§ 10-12 中頻放大器	271
§ 10-13 檢波	275
§ 10-14 視頻放大器	277
§ 10-15 自動頻率控制	283
§ 10-16 反干擾綫路	290
第十一章 雷達發射機的振蕩器	294
§ 11-1 雷達發射機的戰術技術諸元和对它的要求	294
§ 11-2 雷達發射機的方框圖	296
§ 11-3 电子管振蕩器的自激条件	297
§ 11-4 用作超短波振蕩器的电子管	300
§ 11-5 雷達發射機的振蕩器的構造特点	302
§ 11-6 米波电子管振蕩器的实际綫路	304
§ 11-7 米波波段的脈冲振蕩三極管	311
§ 11-8 米波电子管振蕩器的設計	313
§ 11-9 分米波振蕩器	321
§ 11-10 磁控管振蕩器	324
第十二章 脈冲調制器	332
§ 12-1 对脈冲調制器的要求和脈冲調制的方法	332
§ 12-2 柵極調制	333
§ 12-3 板極調制	336
§ 12-4 自調制	337
§ 12-5 板極調制綫路的分类	340
§ 12-6 帶电感儲能器的調制綫路	340
§ 12-7 帶电容儲能器的調制綫路	344
§ 12-8 用長綫形成脈冲	348
§ 12-9 仿真綫	353
§ 12-10 延迟綫	358
§ 12-11 帶仿真綫的調制器綫路	359
§ 12-12 輔助調制器	366
§ 12-13 自調制与强迫調制的結合	368

第一章 無線電探測法

§ 1-1. 測定目標空間坐標的原理

用無線電探測的物體，通常稱為目標。

目標對於雷達的位置，由它的三個空間坐標來決定（圖1-1）：

（a）斜距 R ，即從雷達到目標的直線距離；

（b）方位角 φ ，即南北方向與目標方向間的夾角；

（c）仰角 θ ，即水平線與目標方向間的夾角；

第三個坐標仰角，常常用目標的高度 h 來代替；很顯然，目標的高度 h 可從關係式 $h = R \sin \theta$ 中求出。

雷達的任務就是指出目標的坐標。

任何一個雷達站都必定有一部發射機和一部接收機（圖1-2）。接收和發射通常都合用一付天線。有時候也應用兩付天線，分別用作接收和發射，如圖1-2所示。在這種情況下，兩付天線間的距离 r 應該選擇得很短（ $r \ll R$ ），因此目標到接收天線和目標到發射天線間的距离可以認為是相等的，等於斜距 R 。

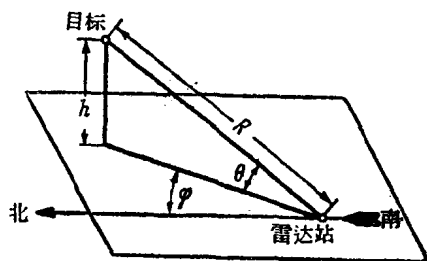


圖 1-1 目標的空間坐標

雷達發射天線所發射的無線電波，通常稱為直接信號。

直接信號的電磁能量一部分被遇到的目標所吸收，一部分被它反射出來，返回雷達，由接收機接收下來。返回接收機的那部分直接信號的能量稱為目標的反射信號或回波信號。換句話說，反射信號就是從目標反射回來的雷達的直接信號。

圖1-2表示在雷達站的接收機上作用着兩個信號：一個是只傳



圖 1-2 雷达站工作圖

过極短的距离 r 的直接信号，另一个是傳过距离 $2R$ 的从目标反射回来的信号。

由于 r 和 $2R$ 相比是小的微不足道，因此可以認為直接信号就在

它發射的瞬間作用在接收机上，而反射信号則滯后一段無綫电波傳过距离 $2R$ 所需的时间才作用在接收机上。

反射信号的滯后時間

$$t_{\text{san}} = \frac{2R}{c} \quad (1-1)$$

式中 c 是無綫电波傳播的速度，等于光速 (3×10^8 米/秒)。

假使在接收机的輸出端將直接信号和反射信号分开，并用某种方法測出滯后時間，那末就可以求出斜距：

$$R = t_{\text{san}} \frac{c}{2} \quad (1-2)$$

由此可見，測量目标的斜距就在于測定反射信号的滯后時間。

为了測量目标的角坐标——方位角 φ 和仰角 θ ，就必须知道決定这两个角度的目标的方向，即所謂目标的方位。方位的測定叫做測位。

雷达中所采用的天綫都以窄狭的射束向空間發射無綫电波，并且只接收天綫極窄的作用立体角範圍內的無綫电波。这种天綫称为定向天綫。只有当定向天綫处于完全一定的位置时（对准目标的位置——譯者註），才能接收到目标的反射信号。記下这个位置，便能知道目标的方向（方位），从而就能測定仰角和方位角。

因此，角坐标的測定便归結为借助于雷达的定向接收天綫來測定目标的方位。

在出現雷达之前，測向法曾用来測定正在工作着的發射机的方

向。這是借無線電測向器來實現的。無線電測向器由能旋轉的定向接收天線和靈敏的接收機組成。旋轉測向器的天線使所收到信號的強度達到最大值，就可以測出發射機的方向。

雷達和無線電測向器的主要區別有兩點。

第一，無線電測向器只是一個接收台，而雷達是一個收發台，不論目標有沒有發射台，不論發射台是不是在工作，它都能測定目標的方位。雷達的工作原理是以雷達本身所發射的直接信號遇到目標產生反射，從而測定目標（直接信號的反射體）的方位為基礎的。測向器則是对被測無線電發射台所發射的信號作定向接收，而這個無線電發射台就是被測定方向的目标。

第二，測向器只能測定方向，雷達站還能測定目標的位置，因為它除了能測定方向外，還能測定到目標的距離。

从目標返回雷達接收機的能量，只有發射天線所發射能量的極小一部分。有時候反射信號往往只有直接信號的幾十萬分之一。為了能在強大的直接信號的襯底上發覺反射信號，反射信號和直接信號就應該有某些區別，例如在頻率上不同，或者作用在接收機上的時間不同（反射信號在直接信號不作用時作用于接收機上）。

應該指出，用無線電來探測目標的基本方法有下列三種：

- (1) 調頻法；
- (2) 杜普勒效應法；
- (3) 脈沖法。

§ 1-2. 調 頻 法

假定雷達站的發射機所產生的是調頻振盪。這種振盪的幅度始終保持不變，而頻率不斷按照已知的、完全一定的規律變化着。時間上的每一個瞬間，各对应于一个完全一定的頻率數值 f 。

設在朝目標的方向發射直接信號的時候，發射機的頻率等於 f_0 。當這些信號照射到目標的時候，反射信號的頻率也將是頻率 f_0 。

但是在滞后時間內，也就是在反射信号到达接收机輸入端的瞬間，發射机的頻率已經變成相应的数值 f ，不再等于来到的反射信号的頻率 f_0 了。

雷达站不停地工作着，它的接收机不断地接收直接信号和反射信号。但是，由于在同一瞬間所接收到的直接信号和反射信号具有不同的頻率 f 和 f_0 ，因此在接收机的电路內就可以把它們相互分開来。

調頻雷达站的簡化方框圖，如圖 1-3 所示。依靠調頻接收机中

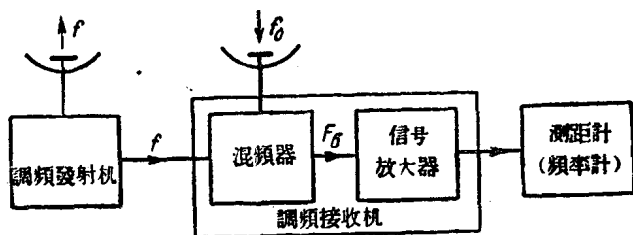


圖 1-3 調頻雷达站的簡化方框圖

混頻器輸出端的濾波器，就能把反射信号和直接信号的差頻

$$F_δ = f - f_0 \quad (1-3)$$

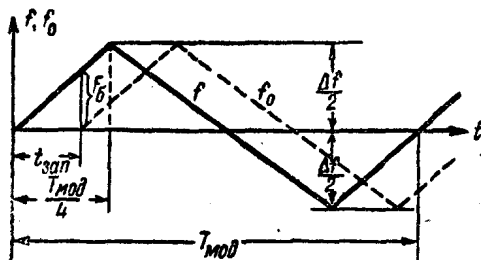


圖 1-4 調頻雷达站的頻率曲綫

选出来。

这个差頻随着滞后時間而变化，因此測定这个頻率就可以測定目标的斜距。

在調頻制中，發射机的頻率和滞后時間的关系，决定于頻率变化的規律。

發射机的頻率和滞后時間成正比，是最合适的規律。正比关系可用發射机的頻率按三角形曲綫（圖 1-4）的規律变化来获得。

從圖 1-4 中可以很清楚地看出：反射信號的頻率曲綫（虛綫）和直接信號的頻率曲綫（實綫），在時間軸上只是差一段平移的滯後時間。

當起算點象圖 1-4 那樣選得恰當時，在接收機輸出端的反射信號和直接信號的差頻，很容易從直接信號的頻率曲綫在 $t = t_{\text{ann}}$ 瞬間的縱坐標上求出。

當到達目標的距離不變時，接收機輸出端的拍數在每一個調制周期中將完全一定，保持不變；差拍數的大小取決於目標的距離，因此斜距的測量便歸結為計算在一個調制周期中的拍數。通常用頻率計作為測量差頻的裝置，頻率計的刻度往往刻成長度單位——譬如公里。

調制頻率通常選擇得使四分之一的調制周期 $\frac{T_{\text{mod}}}{4}$ 大於在規定作用半徑內從最遠的目標上反射回來的信號的滯後時間，一般都在幾十赫到幾百赫的範圍內。頻率的變化範圍 Δf ，通常不大於發射機的載波頻率的 10%。

應用這種調頻制的例子有：無線電測高計——飛機上用來測量離地面的飛行高度的儀器和高射炮彈的無線電信管。

調頻法既適宜於用來搜索運動的目標，也適宜於用來搜索靜止的目標。

§ 1-3. 杜普勒效應法

假定雷達發射機以頻率固定不變的等幅振盪工作着。發射天綫所發射的無線電波以光速從雷達傳到目標。每秒鐘內射至固定目標的無線電波的波峯數，等於發射機的振盪頻率。如果目標迎着發射機的無線電波向雷達移近，那麼射到目標的無線電波的波峯將比發射機發出的波峯多。因此，在目標向着雷達移動的情況下，反射信號的頻率比發射機的頻率要高。反之，如果目標背着雷達移動，那麼射至目標的無線電波的波峯將比發射機所發出的少。因此，在目

标逐渐远离的情况下，反射信号的频率低于发射机的频率。

因此，目标的移动会引起反射信号的频率变化，即对反射信号进行频率调制：在目标逐渐远离的情况下频率降低，而在目标移近的情况下频率升高。和声学中的情形一样，这种频率变化称为杜普勒效应，它可以用来进行无线电探测：反射信号和直接信号不但在大小上有差别，同时在频率上也不相同，因此就能够辨别反射信号。

圖 1-5 所示是利用杜普勒效应的雷达系统的简单原理图。混频器上作用着两个不同频率的振荡 f 和 f_0 。借混频器输出端滤波器之助，可以把差频取出来。这种差频通常称为杜普勒频率。可以证明，杜普勒频率等于：

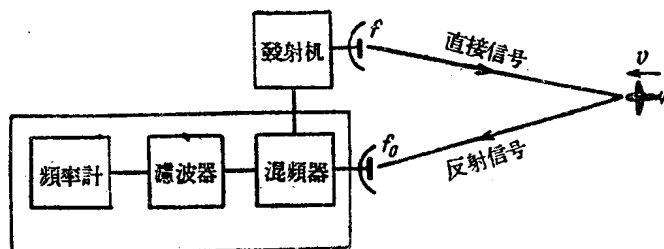


圖 1-5 利用杜普勒效应的系统

$$F_D = \frac{2v}{\lambda}, \quad (1-4)$$

式中 v 是目标朝雷达方向运动的速度。

如果速度 v 的单位以公里/小时表示，而 λ 以厘米表示，那么

$$F_D = 55.6 \frac{v}{\lambda} \text{ (赫)}. \quad (1-5)$$

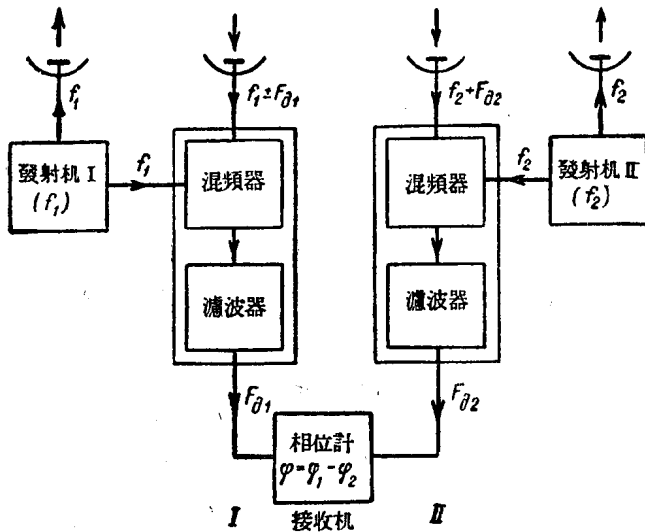
当目标运动的速度一定时，为了提高杜普勒频率，就必须缩短雷达的工作波长 λ 。按照公式(1-5)很容易算出，当 $\lambda = 10$ 厘米，目标的速度为 1 公里/小时，能获得约为 6 赫的差频 F_D 。这个差频对于觉察反射信号来说，已经够了。

从式(1-4)和(1-5)中可以看出：圖 1-5 所示混频器的输出端上

所獲得的杜普勒頻率，當工作波長一定時，只決定於目標朝雷達方向運動的速度 v ，而與距離無關。因此，這種比較簡單的系統僅僅只能判定出現運動目標的事實，確定它的方向，但是不能用來測量距離。

圖 1-6 所示是利用杜普勒效應的最簡單的系統的一種，它也能測定距離。它基本上是由兩個獨立的發射機和兩個獨立的接收機組成的。發射機 I 和 II 分別用彼此相差不大的頻率 f_1 和 f_2 工作。因此，從同一目標反射回來的兩個信號的頻率將分別與其對應的直接信號的頻率相差一個杜普勒頻率 F_{D1} 和 F_{D2} 。如所周知，兩個具有不同頻率的正弦形電壓間的相移，不是恒定不變的，而是隨着時間而變化的，因此，由於杜普勒頻率不同，接收機 I 和 II 的混頻器的兩個輸出電壓之間就有相移。相移角和滯後時間成正比，也就是和目標的斜距成正比。這兩個不同相位的電壓同時送到以距離為刻度單位的相位計上。

杜普勒系統的重大特點和優點是不受固定物體的干擾，因為固



■ 1-6 最簡單的杜普勒測距系統