

雷达手册

第十分册

[美] M.I. 斯科尔尼克 主编

内 容 简 介

本《手册》系根据〔美〕M. I. 斯科尔尼克主编的《雷达手册》一书译出。

全《手册》共有三十九章。为了读者使用方便，译文不是按原书章次编排，而是大致按细分的专业将其分成十个分册。

《雷达手册》第十分册共有四章，即第三十六、三十七、三十八、三十九章。第三十六章 双基地与多基地雷达；第三十七章 激光雷达；第三十八章 信标；第三十九章 无源探测。

本《手册》可供所有从事雷达工程的工人、科技人员和大专院校师生参考。

Radar Handbook
M. I. Skolnik
McGraw-Hill, Inc. 1970

雷 达 手 册 (第十分册)

〔美〕M. I. 斯科尔尼克 主编
谢 卓 译 张直中等 校

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
国防工业出版社印刷厂印装

787×1092 $1/16$ 印张 $8\frac{1}{2}$ 194 千字

1974年4月第一版 1974年4月第一次印刷 印数：0,001—9,300 册

统一书号：15034·1354 定价：0.92元

出版者的话

为了适应我国电子工业迅速发展的形势，我们组织翻译了由〔美〕M. I. 斯科尔尼克主编的《雷达手册》一书，以帮助读者了解雷达方面的情况。

在原书中，编者试图包含雷达技术领域的各种主要问题。看来，本书的内容比较广泛，但不很深。它省略了一般雷达方面的书籍中通常有的数学推导和详细说明。其实，讨论的许多题目本身都可以写成单独的书籍。为了帮助读者深入研究，原书的每章都提供了许多参考文献。

本《手册》共有三十九章。为了读者使用方便，译文不是按原书章次编排，而是大致按细分的专业将其分成十个分册。第一分册包括雷达简介、雷达检测能力、波形设计；第二分册包括目标特性、气候影响、电磁兼容性；第三分册包括接收机、显示器、自动检测理论、数字信号处理；第四分册专论发射机；第五分册包括馈线、移相器；第六分册包括天线、天线罩；第七分册包括连续波、调频、脉冲压缩和动目标显示雷达；第八分册包括脉冲多卜勒、跟踪、测高和合成孔径雷达；第九分册包括固态、民用航海、卫星监视、天文和航天雷达；第十分册包括多基地、激光雷达，以及雷达信标和无源检测。这十个分册先后出版以后，另外再出版一部分合订本。

原书主编者在前言中对全书未能采用单一标准符号作了说明。他认为，由于当前没有一致通用的符号，如果本书采用某种单一的标准符号，就意味着武断地确定某一种符号是优先选用的，因此，原书允许各章的作者采用自己惯用的符号，只要对它作出确切的定义就行。例如，雷达方程这样一种被认为是标准的和常见的公式，在本《手册》的几个不同部分就写成稍有不同但又是等效的形式，用不同的符号来表示距离、功率、最小可检测信号等等。我们认为上述处理办法是可行的，因此，我们对译文全书的符号也没有统一。

虽然本书偏重于雷达系统方面，但除了对从事雷达系统方面的工程技术人员有用外，还可供其他所有从事雷达工程的有关人员参考。

虽然本《手册》篇幅较大，但在有关厂、所、院校的大力协同下，译校工作开展得比较顺利。在此，谨向为《雷达手册》一书的出版作了不少工作的单位和个人表示衷心感谢。

由于水平有限，书中的缺点和错误在所难免，希望读者批评指正。

目 录

第三十六章 双基地与多基地雷达(36)●	10-3
36.1 序言	10-3
36.2 双基地雷达定位技术	10-4
36.3 双基地雷达灵敏度、多卜勒和作用范围	10-4
36.4 多基地雷达定位技术	10-9
36.5 多基地雷达灵敏度、多卜勒和作用范围	10-12
36.6 双基地雷达目标截面积	10-12
36.7 特殊问题	10-13
36.8 应用	10-14
参考文献	10-16
第三十七章 激光雷达(37)	10-18
37.1 工作原理	10-18
37.1.1 辐射	10-18
37.1.2 性能	10-21
37.1.3 测量原理	10-23
37.2 激光发射器和调制器	10-23
37.2.1 激光原理	10-23
37.2.2 光泵浦的固体激光器	10-25
37.2.3 气体激光器	10-30
37.2.4 半导体激光器	10-34
37.2.5 半导体激光器阵列	10-37
37.2.6 液体激光器	10-38
37.2.7 瑞曼激光器	10-39
37.2.8 谐波产生	10-39
37.2.9 激光放大器	10-39
37.2.10 调制	10-40
37.3 光接收器	10-44
37.3.1 直接探测	10-45
37.3.2 相干探测	10-49
37.3.3 背景噪声	10-51
37.3.4 光电发射探测器	10-53
37.3.5 光电二极管探测器	10-55
37.3.6 光电导探测器	10-56
37.4 光学系统	10-57
37.4.1 准直	10-57
37.4.2 聚光	10-58
37.4.3 滤光	10-58
37.5 光束的偏转和扫描	10-59
37.5.1 非机械的偏转和扫描	10-61

● 为了便于读者查对原书,在译文各章标题后的圆括号内用阿拉伯数字注的3相应的原书章次。——译注

37.5.2 混合型偏转和扫描	10-63
37.6 目标特性	10-63
37.7 大气效应	10-65
37.8 应用	10-68
参考文献	10-74
第三十八章 信标(38)	10-78
38.1 序言	10-78
38.2 基本概念	10-78
38.3 自动高度报告	10-81
38.3.1 高度计和传感器	10-81
38.3.2 数字编码器	10-81
38.3.3 位置模糊	10-82
38.3.4 国际码结构	10-82
38.3.5 误差	10-83
38.4 天线系统	10-83
38.5 应答器设计	10-85
38.6 询问器接收机组合	10-87
38.7 信标抗干扰装置	10-89
38.8 解码与数字转换	10-91
38.9 显示系统	10-96
38.10 军事用途和特殊应用	10-100
参考文献	10-102
第三十九章 无源探测 (39)	10-104
39.1 辐射测量的原理	10-104
39.2 辐射测量的信号	10-106
39.2.1 点源和扩展源	10-106
39.2.2 发射率和反射	10-106
39.2.3 大气的发射和吸收	10-107
39.2.4 粗糙的和光滑的发射体	10-109
39.3 辐射计的天线	10-112
39.3.1 天线的品质因数	10-112
39.3.2 波束开关	10-112
39.3.3 校准	10-113
39.4 辐射计的接收机	10-114
39.4.1 接收机的噪声温度	10-114
39.4.2 全功率灵敏度	10-115
39.4.3 辐射计的稳定	10-116
39.4.4 校准	10-118
39.5 辐射计的类型	10-119
39.5.1 射电天文学	10-119
39.5.2 测绘	10-122
39.5.3 跟踪	10-124
39.5.4 大气探测	10-126
39.6 辐射测量的总体考虑	10-128
参考文献	10-130

第三十六章 双基地与多基地雷达

JAMES W. CASPERS

36.1 序 言

美国和英国早期试验的雷达主要是双基地形式。这种系统通常是在可以与目标距离相比拟的距离上把发射机和接收机分开^(1,2)。1936年美国海军研究实验室创制了天线收发开关,为发射机和接收机使用公共天线提供了方法,使单基地雷达得到了实际应用,而双基地雷达则不再被使用。直到五十年代初,人们才重新对双基地雷达感到兴趣⁽¹⁾。

双基地雷达利用两个分离的基地。常用形式如图36-1^a。发射机被安置在某一个基地,相应的接收设备则安置在另一个基地;接收基地与发射基地分开。根据接收基地接收到的目标反射进行检测。在接收机基地测得的总的传播时间以及俯仰和方位角度提供目标位置信息。由于发射和接收基地是分隔开的,使得除常用的脉冲雷达型式以外,使用各种连续波的传输也很容易。

也可以在两个基地都使用发射机和接收机。每个基地可以接收本基地发射机辐射引起的目标反射,又可接收另一基地发射机辐射引起的目标反射。

无源双基地雷达系统使用两个接收基地。它们只探测能够辐射电磁能量的目标。通常是根据两个基地都接收到辐射能量进行检测。由信号到达的时差以及在一个或两个基地完成的角测量,得出目标位置信息。无源系统用在不必要有雷达发射机工作的情况。本章将包括无源系统,因为它们类似于双基地和多基地雷达。

有许多连续波雷达是在同一基地上把发射和接收天线分开,这种雷达具有单基地雷达的特性,故不使用“双基地”这个术语来描述那样的系统。

多基地雷达使用两个以上的分离的基地。某些多基地的组成可以看作是几个双基地雷达或几个单基地雷达的组合,或者看作是双基地雷达与多基地雷达的组合。我们的重点将放在多基地系统,但不局限于这种系统,这种多基地系统将为我们提供在双基地或单基地雷达中所得不到的特点。在36.4节中将讨论这些特点。所有多基地雷达可应用的定位技术要比双基地雷达的定位技术更为有效。

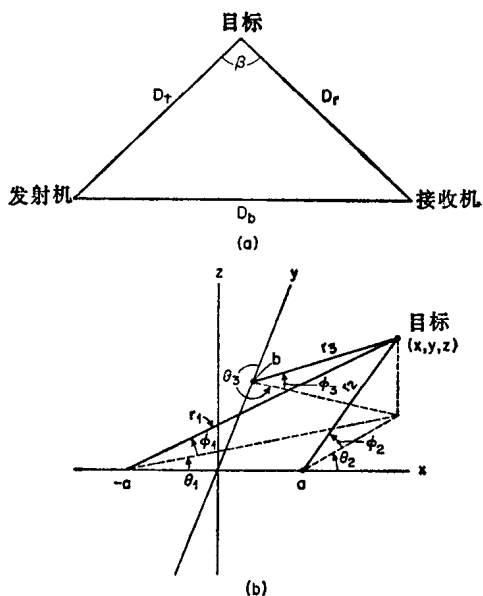


图36-1 双基地和三基地雷达的几何关系

(a) 由发射机,目标和接收机确定的平面;

(b) 座标系统(用于双基地时删去基地b)。

多基地雷达的一种形式是,使用一个发射基地和两个或更多的接收基地。它能够在不使用角度信息的情况下根据回波到达的时间数据对目标定位。

多基地雷达也可以在每个基地都使用发射机。一个例子就是三个仅是测距的单基地雷达的组合,有时把这叫做三角测量雷达。

无源多基地雷达系统可以使用三个或更多的接收基地。最简单的方案是按照无线电定向仪的方式完成三角测量。

假目标,或称幻象,是指没有真实目标处的目标显现。我们将简单讨论它们可能在各种雷达组成中出现的方式。假目标的消除有赖于更多数据的收集和数据处理技术。对于特殊的系统,会存在着无法消除的假目标;有时把它叫做无法消除的幻象。由于消除幻象技术对数据处理提出的要求,即使是能够消除的幻象仍然需要作为重要问题来考虑。

36.2 双基地雷达定位技术

使用单基地雷达时,因为它本来就是极坐标系统,故目标位置信息的提取和数据收集是相当简单的。如果需要的话,单基地数据可以很容易地转换成直角坐标。但是对于双基地和多基地雷达数据就不那么容易处理了。因为从几个基地收集的数据必须放到一起去处理。对于特定目标,这些数据和该目标的 x 、 y 、 z 坐标之间的关系可能很复杂。

对于双基地雷达的目标定位,可以使用下述测量(即观测)参数(见图 36-1 b):方位角 θ_1 和 θ_2 、俯仰角 ϕ_1 和 ϕ_2 、目标至雷达基地的距离 r_1 和 r_2 、距离差 $r_1 - r_2$ (不是从 r_1 和 r_2 的分别测量得到的),距离和 $r_1 + r_2$,以及多卜勒频移。至少必须使用到三个测量参数。不是所有的组合都有用,例如只使用 r_1 、 r_2 和 ϕ_1 ,则会产生模糊和幻象。

双基地测距和单基地测距间的计算差别应予以注意。单基地测距是根据往返时间计算的,而双基地雷达的距离和与距离差是指单程的时间。因此,当采用传播速度为 3×10^8 米/秒并用表示回波到达的时间差 $\Delta = t_1 - t_2$ (单位:秒)时,则我们在两个基地上可以得到 $r_1 - r_2 = (t_1 - t_2) \times 3 \times 10^8$ (单位:米)。距离之和为 $r_1 + r_2 = t \times 3 \times 10^8$,这里, t 是从发射机到目标,再到接收机的总的传播时间。表 36-1 列出了用于双基地雷达以及多基地雷达的一些定位方程。

36.3 双基地雷达灵敏度、多卜勒和作用范围

Skolnik⁽¹⁾所给出的双基地雷达方程是

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma_b}{(4\pi)^3 D_t^2 D_r^2 L_p(t) L_p(r) L_s}$$

式中 P_r = 接收的信号功率(瓦);

P_t = 发射机功率(瓦);

G_t = 目标方向上的发射天线增益;

G_r = 目标方向上的接收天线增益;

σ_b = 双基地目标截面积(米²)(后面讨论);

D_t = 发射机到目标的距离(米);

D_r = 接收机到目标的距离(米);

$L_p(t)$ = 发射机到目标路径上的传播损耗;

$L_p(r)$ = 接收机到目标路径上的传播损耗;

L_s = 系统损耗;

λ = 波长(米)。

令 $G^2 = G_t G_r$, $\sigma_m = \sigma_b$, $R^4 = D_t^2 D_r^2$, 以及 $L_p^2 = L_p(t) L_p(r)$, 则上述方程可用来表示相应的单基地雷达方程。如果除 D_t 和 D_r 外, 令双基地雷达方程右边各项为常数, 则 $P_r = k / D_t^2 D_r^2$, 这里

$$k = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma_b}{(4\pi)^3 L_p(t) L_p(r) L_s}$$

于是, 我们使 $D_t D_r = c^2 = (k/P_r)^{1/2}$, 此式表示一个 Cassini⁽⁶⁾ 卵形线。使用极坐标 (r, θ) , 并用 $r = a\rho$ 以及 $C = c/a$ 加以换算, 我们得到

$$(\rho^2 + 1)^2 - 4\rho^2 \cos^2 \theta = C^4$$

这个方程的曲线见图 36-2, 该曲线是通过发射机和接收机之间基线的任一平面上的灵敏度等值线。这些曲线表明, 发射和接收基地之间的区域是高灵敏度区域之一。

由于垂直于距离和椭球曲面的目标运动分量引起了双基地多卜勒频移 d_b 。此椭球面是

$$\frac{x^2}{s^2/4} + \frac{y^2}{(s^2/4) - a^2} + \frac{z^2}{(s^2/4) - a^2} = 1$$

这里, 雷达站是在 x 轴上的 $-a$ 和 $+a$, 常数 $s = r_1 + r_2$ 。此频移由两个分量组成: $d_b = v_r/\lambda + v_r/\lambda$, 式中 v_r 和 v_r 分别是指向发射机和接收机的目标速度分量, λ 是雷达波长。由下式给出与椭球面相正交的曲面

$$\frac{x^2}{\Delta^2/4} + \frac{y^2}{(\Delta^2/4) - a^2} + \frac{z^2}{(\Delta^2/4) - a^2} = 1$$

式中 $2a \geq \Delta = r_1 - r_2 \geq -2a$ 。图 36-3 表示这些曲面与 xy 平面的交线。

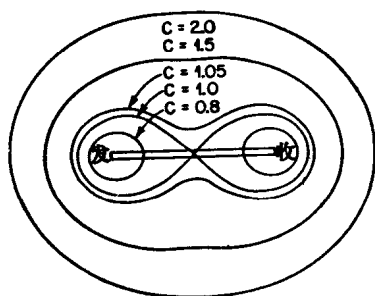


图36-2 接收功率等值曲线
(Cassini 卵形线)

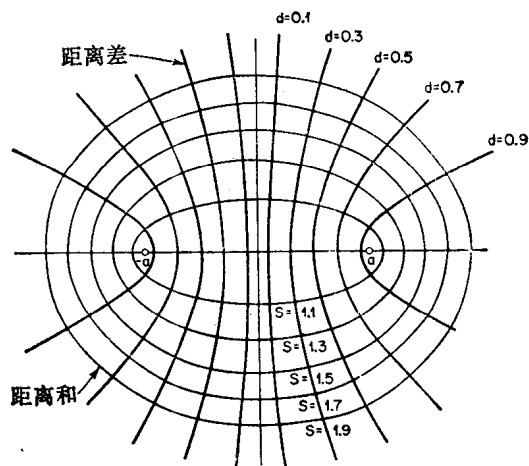


图36-3 距离和与距离差等值线
注意: $S = s/2a = 1/e$, $d = \Delta/2a = 1/e$, e 是偏心率。

表36-1 定位方程

(除非特别说明, 均使用图 36-1 的坐标系)

使用的测量参数	定位方程
$\theta_1, \theta_2, \phi_1$	$(1) x = \frac{a \sin(\theta_1 + \theta_2)}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \quad (2) y = \frac{2a \sin \theta_1 \sin \theta_2}{\sin(\theta_2 - \theta_1)}$ $(3) z = \frac{2a \sin \theta_2}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \tan \phi_1 \quad \phi_1 = 90^\circ \Rightarrow \text{无解}$
$\theta_1, \theta_2, \phi_1, \phi_2$	方程 (1) 至 (3); $(4) z = \frac{2a \sin \theta_1}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \tan \phi_2$
$\theta_1, \theta_2, r_1 + r_2 = s$	方程 (1) 和 (2); $(5) z = \pm \frac{1}{2s} \sqrt{(4a^2 - s^2)(4x^2 - s^2) - y^2}$
$\theta_1, \theta_2, \phi_1, r_1 + r_2 = s$	方程 (1) 至 (3) 以及方程 (5)
$\theta_1, \phi_1, r_1 + r_2 = s$	$(6) x = \frac{(s/2)(2a/s - \cos \phi_1 \cos \theta_1)}{(2a/s) \cos \phi_1 \cos \theta_1 - 1}$ $(7) y = \frac{(s/2)(4a^2/s^2 - 1) \cos \phi_1 \sin \theta_1}{(2a/s) \cos \phi_1 \cos \theta_1 - 1}$ $(8) z = \frac{(s/2)(4a^2/s^2 - 1) \sin \phi_1}{(2a/s) \cos \phi_1 \cos \theta_1 - 1}$
$\theta_1, \theta_2, r_1 - r_2 = \Delta$	方程 (1)、(2), 以及 (5) 中以 Δ 代替 s $\Delta = 0 \Rightarrow \text{无解}$
$\theta_1, \theta_3, \phi_3$	$(9) x = \frac{b - a \tan \theta_1}{\tan \theta_1 + \cot \theta_3} \quad (10) y = b - x \cot \theta_3$ $(11) z = \sqrt{x^2 + (y - b)^2} \tan \phi_3 \quad \phi_3 = 90^\circ \Rightarrow \text{无解}$
$\theta_1, \theta_2, \theta_3, \phi_1, \phi_2, \phi_3$	方程 (1) 至 (4), 以及 (9) 至 (11) $(12) x = \frac{b + a \tan \theta_2}{\tan \theta_2 + \cot \theta_3}$
$\theta_1, \theta_2, r_1, r_2$	方程 (1) 和 (2) $(13) z = \pm \sqrt{\frac{1}{a^2} l(l - 2a)(l - r_1)(l - r_2) - y^2}$ 式中 $l = \frac{r_1 + r_2 + 2a}{2}$
$\theta_1, \theta_2, \phi_1, \phi_2, r_1, r_2$	方程 (1) 至 (8) 和 (13) $(14) z = r_1 \sin \phi_1 \quad (15) z = r_2 \sin \phi_2$
r_1, r_2, r_3	$(16) x = \frac{r_1^2 - r_2^2}{4a} \quad (17) y = \frac{r_1^2 + r_2^2 - 2r_3^2 + 2(b^2 - a^2)}{4b}$ $(18) z = \pm \sqrt{r_1^2 - (x - a)^2 - y^2}$
$\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$	$(x_j, y_j, 0) = \text{第 } j \text{ 个基地位置, } j = 0, 1, 2, 3$ $(x_0, y_0, 0) = (0, 0, 0)$ $d_j^2 = x_j^2 + y_j^2 \quad r_j = +\sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + z^2}$ $\Delta_j = \rho - r_j, \text{ 这里 } \rho = +\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ $(19) x = \frac{(d_1^2 - \Delta_1^2)(y_3 \Delta_2 - y_2 \Delta_3) + (d_2^2 - \Delta_2^2)(y_1 \Delta_3 - y_3 \Delta_1) + (d_3^2 - \Delta_3^2)(y_2 \Delta_1 - y_1 \Delta_2)}{2[x_1(y_3 \Delta_2 - y_2 \Delta_3) + x_2(y_1 \Delta_3 - y_3 \Delta_1) + x_3(y_2 \Delta_1 - y_1 \Delta_2)]}$ $(20) y = \frac{(d_1^2 - \Delta_1^2)(x_2 \Delta_3 - x_3 \Delta_2) + (d_2^2 - \Delta_2^2)(x_3 \Delta_1 - x_1 \Delta_3) + (d_3^2 - \Delta_3^2)(x_1 \Delta_2 - x_2 \Delta_1)}{2[y_1(x_2 \Delta_3 - x_3 \Delta_2) + y_2(x_3 \Delta_1 - x_1 \Delta_3) + y_3(x_1 \Delta_2 - x_2 \Delta_1)]}$

(续)

使用的测量参数	定位方程
$\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$	$(21) \rho = \frac{(d_1^2 - \Delta_1^2)(x_2 y_3 - x_3 y_2) + (d_2^2 - \Delta_2^2)(x_3 y_1 - x_1 y_3) + (d_3^2 - \Delta_3^2)(x_1 y_2 - x_2 y_1)}{-2[\Delta_1(x_2 y_3 - x_3 y_2) + \Delta_2(x_3 y_1 - x_1 y_3) + \Delta_3(x_1 y_2 - x_2 y_1)]}$ $(22) z = \pm \sqrt{\rho^2 - x^2 - y^2}$
s_1, s_2, s_3	与上述情况相同的坐标系 $S_j = \rho + r_j$; 方程 (19) 到 (22) 中以 S_j 代替 Δ_j ;
多卜勒	$(23) \begin{vmatrix} \rho_{12}^2 - d_{12}^2 & \rho_{12} & x_2 & y_2 & z_2 \\ \rho_{13}^2 - d_{13}^2 & \rho_{13} & x_3 & y_3 & z_3 \\ \rho_{14}^2 - d_{14}^2 & \rho_{14} & x_4 & y_4 & z_4 \\ \rho_{15}^2 - d_{15}^2 & \rho_{15} & x_5 & y_5 & z_5 \\ \rho_{16}^2 - d_{16}^2 & \rho_{16} & x_6 & y_6 & z_6 \end{vmatrix} = 0$ $(24) \begin{vmatrix} (\rho_{12} + \Delta_{12}^i)^2 - d_{12}^2 & \rho_{12} + \Delta_{12}^i & x_2 & y_2 & z_2 \\ (\rho_{13} + \Delta_{13}^i)^2 - d_{13}^2 & \rho_{13} + \Delta_{13}^i & x_3 & y_3 & z_3 \\ (\rho_{14} + \Delta_{14}^i)^2 - d_{14}^2 & \rho_{14} + \Delta_{14}^i & x_4 & y_4 & z_4 \\ (\rho_{15} + \Delta_{15}^i)^2 - d_{15}^2 & \rho_{15} + \Delta_{15}^i & x_5 & y_5 & z_5 \\ (\rho_{16} + \Delta_{16}^i)^2 - d_{16}^2 & \rho_{16} + \Delta_{16}^i & x_6 & y_6 & z_6 \end{vmatrix} = 0$ 注, 此处的坐标系是按右面所述重新定义的 式中, $i=1, 2, \dots, 20$。方程 (24) 减去 (23) 得到有二十个变量的二十个方程。$I_1 + I_2 = I$, I_1 是发射基地数, I_2 是接收基地数 (这些数可以互换, 但 $I_1 \geq I_2$)。(x_j, y_j, z_j) = 第 j 个基地位置。r_{ij} = 第 i 次观测的距第 j 个基地的距离。$r_j^0 = r_j$。$\rho_{jk}^i = r_j^i + r_k^i$。$\rho_{jk}^0 = \rho_{jk}$。$\Delta_{jk}^i = \rho_{jk}^i - \rho_{jk}$。$I$ = 时间间隔数。$m = 3(I+1)$ = 不同的位置数。$P = I I_1 I_2$ = 观测的距离增量数。$q = P - m$ = 多余度测量。对于上述方程, $I = 6, I_1 = 5, I_2 = 1, I = 20, m = 63, P = 100, q = 37$ [方程 (23) 和 (24) 由 Dawson⁽³⁾ 得到]

① 原文误为 $\Delta_1 y_2$, 已更正。——译注

应该注意, 某一目标运动时具有在双曲面上的目标轨迹, 对于总的目标速度的多卜勒测量并不是充分条件, 只能观测到指向基线的分量。当目标仅局限在距离和椭球面上运动时不会引起多卜勒频移。位于发射机基地和接收机基地之间的基线上的目标, 由于 v_r 和 v_t 幅度相等但符号相反, 故也没有多卜勒频移。沿基线运动之目标的实际位置不能确定。在这一高灵敏度区域里没有或很少有定位信息和多卜勒信息这点是很可惜的。

如果目标辐射能量, 则由两个接收基地组成的无源系统就可探测和定位该目标。目标定位需要两个站都能探测到目标。这样, 有效灵敏度等值线可以表示为

$$P_r^* = \min_{i=1,2} \frac{P_t G_i(t) G_i(r) \lambda^2}{(4\pi)^2 D_i^2 L_p(i) L_r(i)}$$

式中 P_r^* = 接收的最小功率(瓦);

P_t = 目标发射机功率(瓦);

$G_i(t)$ = 在接收机 i 的方向上, 目标天线的增益;

$G_i(r)$ = 在目标方向上, 接收机 i 的天线增益;

D_i = 目标至接收机 i 的距离(米);

$L_p(i)$ = 目标至接收机 i 的路线上的传播损耗;

$L_r(i)$ = 目标与接收机 i 的系统损耗;

λ = 波长(米)。

图 36-4 是使用全向辐射天线时的典型等值线族。如果基地位于 x 轴上的 $-a$ 和 $+a$ ，则有较高功率的等值线是在 $-a$ 和 $+a$ 附近的那些圆缺。这些圆缺形的等值线将与下式所给出的圆相交：

$$\left(x + a \frac{1 + C^2}{1 - C^2}\right)^2 + y^2 = a^2 \left(\frac{2C}{1 - C^2}\right)^2$$

式中 C 是两个接收机接收相等功率的距离之比。

双基地雷达作用范围除取决于上述灵敏度等值线这个因素外，还取决于别的因素。其中最重要的是传播路线问题。在目标与每一基地之间必须有合适的传播路径。

对于给定的目标高度和天线高度，目标必须在距各基地某一确定的距离之内。这些距离描绘出分别以两个基地为中心的圆；公共区内的目标到两个基地都能有传播路径。若假设最大传播距离是 $\sqrt{2}h_t + \sqrt{2}h_a$ 哩，则双基地雷达的作用范围 A_b 与单基地雷达作用范围 A_m 之间的关系如图 36-5 所示。 h_t 是目标高度（呎）， h_a 是天线高度（呎）。当使用垂直扇形波束天线时，还要考虑垂直干涉波瓣。目标在任一天线的零值区时可能影响检测或目标定位。在非扫描系统中，目标必须在两个固定的天线方向图的公共区内，结果将产生不可忽视的作用范围损失。扫描系统可以不遭受这种作用范围的损失，但是正如后面要讨论的，它却有别的损失。由于上述理由，双基地雷达的作用范围一般不如单基地雷达（除某些雷达扇形警戒网作用范围外）。

双基地雷达对目标定位的分辨力和精度一般不如单基地雷达好。且仍需要角度测量；因而难于分辨远距离目标。使用距离和，并且在同一基地测量方位与仰角，这样便可以得到最好的分辨力。在目标距离很远时，这种系统可以优于单基地雷达。在无源情况下，距离信息仅为距离差，故至少必须测量两个方位角。例如由同一基地的方位和仰角所确定的射线可以穿过两个双曲面，从而产生了模糊。使用两个方位角的系统的定位方程，其分母中有一项为 $\sin(\theta_2 - \theta_1)$ 。因此，当 $\theta_1 \approx \theta_2$ 时， θ_1 或 θ_2 的微小误差都将引起计算目标座标的很大变化。在这种情况下，误差的统计分析则是复杂的，即使 θ_1 和 θ_2 的误差是高斯型也是如此，这里就不作介绍了。三角形系统的误差分析是可以得到的⁽⁶⁾。

在有些特殊应用中，提高分辨力和精度使其超过单基地雷达是可能的。对位于发射机-接收机基线中心位置上部的目标，在扇形警戒网应用中可以得到提高的测高能力⁽³³⁾。在此情况下，发射机天线方向图和接收机天线方向图的公共区域被距离和椭球面所切割（厚度由时间分辨力决定）。对于直接位于基线之上的目标，当发射机到目标的距离 D_t 与接收机到目标的距离 D_r 大致相等时，高度分辨力 $\Delta H \approx (c\tau/2H)\sqrt{H^2 + D_b^2/4}$ ，式中 τ 是脉冲宽度； c 是光速； D_b 是基线长度； H 是目标高度。注意， $\lim_{H \rightarrow \infty} \Delta H = c\tau/2$ 是单基地雷达

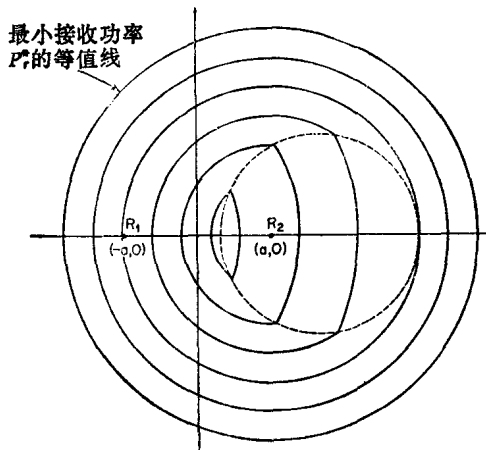


图 36-4 用于无源双基地系统的有效等值线。

注意：在此图中 R_1 站的灵敏度是 R_2 的 4 倍 ($C = 2$)。

● 参考文献[33]中方程式明显的排印错误已更正。

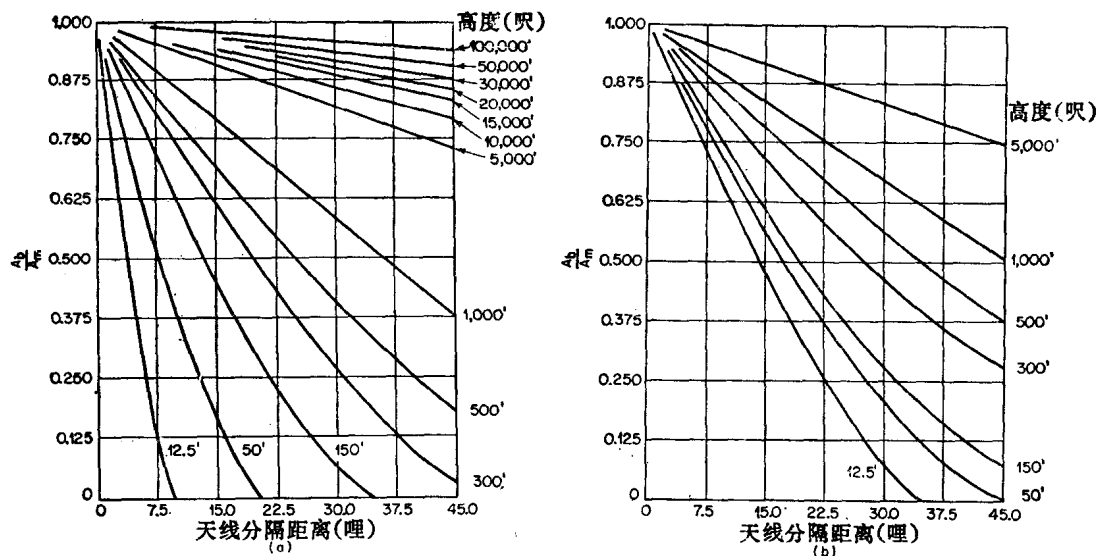


图36-5 在不同的高度和天线分隔距离上双基地和单基地雷达作用范围的比

(a) 不包括天线高度; (b) 包括80呎的天线高度。

距离分辨力的值。

多卜勒分辨和动目标显示技术可以用于双基地雷达, 这些技术实质上与用于单基地雷达时一样, 被观测的运动与距离和等值面垂直。多卜勒频移对消除固定回波和以速度为根据的目标分辨是有用的。无源系统也能提供多卜勒识别。当目标辐射的有关特性完全知道, 并且目标位置被双基地雷达测定时, 则目标速度矢量在两个基地与目标所确定的平面上的投影能够确定。当可用两度空间模式时, 此方法能提供水平速度矢量的估算。如果仅仅只能确定两个接收信号之间的多卜勒差, 则可探测到目标的运动, 但不能确定其速度。

在许多无源系统中要求对模糊进行分辨。当目标辐射短周期的周期信号时, 得到大量距离差响应。它们各自对应一双曲面。而且距离差的符号不能确定; 因此每一距离差之绝对值所对应的一对曲面都是可能的解。通常是使用足够输出的角度分辨的方法把真实响应与假响应(即假目标)分开, 以完成分辨。

因为分辨单元联系于发射和接收波束的交叉部分, 故双基地雷达就能以高脉冲重复频率工作, 而在单基地雷达中这种方式通常将产生模糊的位置^[83]。高脉冲重复频率时的模糊对应于波束交叉部分体积之外的目标位置。

36.4 多基地雷达定位技术

多基地雷达定位技术能使用单基地或双基地雷达所能得到的任何测量参数, 包括角度、距离、距离和与距离差。与单基地和双基地雷达不同, 多基地雷达能仅用距离测量确定目标位置。如后面所讨论的, 它也能仅用多卜勒频移的测量确定目标位置^[8, 42]。

多基地雷达可以使用有源基地和无源基地。因而有大量可能的组成形式(见图36-6)。图36-6 a 的配置表示一种用一个发射机的三基地系统。可以改变基地位置来改变作用范围。当基地形成等边三角形时, 可以得到更均匀的定位精度。在雷达的扇形警戒网应用中

(如 34.5 节中叙述的 Spasur 系统), 发射机安置在接收机基线上。这种共线排列可推广成接收发射站交替放置在一条线的形式。在图 36-6 b 的配置中增加一个接收机, 可以得到另外的定位数据。在要求对目标的三座标进行定位时, 这两种配置都需要某些角度信息。当使用单个发射基地时, 为了在不使用角度信息的情况下进行三度定位, 则至少需要四个接收基地。在大多数应用中, 为了在多目标情况下消除假目标而需要有多余信息。如图 36-6 c 和 36-6 d 那样, 当增加发射机或接收机后, 就可以做到这点。

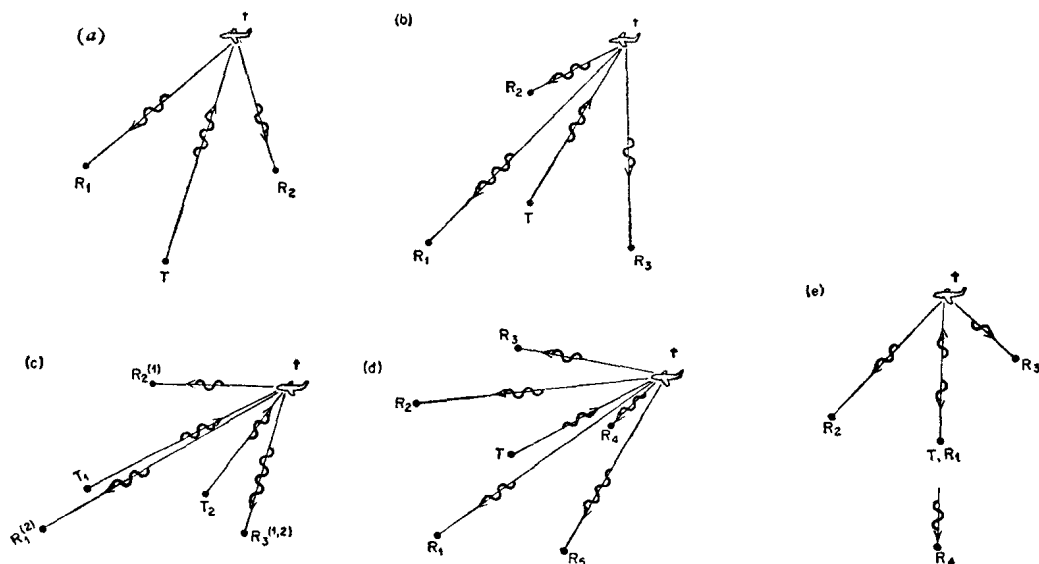


图 36-6 多基地雷达的一些组成形式

在图 36-6 c 中, 由于多加了一个发射基地, 从而减小了因发射机到目标的传播引起的作用范围限制。在图 36-6 e 中, 增加几个辅助的接收基地可以改进单基地雷达定位精度。表 36-1 中列出了若干定位方程。

也可以只用多卜勒雷达数据进行目标检测和定位。Dawson⁽⁸⁾ 指出, 三座标定位需要五个或更多的基地。这种系统工作如下: 使用一个已知的频率稳定的发射机照射目标。各基地的接收机在共同的一个时间间隔或几个时间间隔中计算反射信号的周数。如果只用一个共同的时间间隔, 则需要七个基地。表 36-1 中包括了典型的系统方程。指出下面这点是重要的, 即此技术没有限制目标的飞行路线, 例如并不要求目标沿轨道或弹道轨迹飞行, 并且不需要目标位置的先验知识 (当几个基地是共面时, 基地平面附近出现模糊)。那样的系统可以用来跟踪飞机。对双基地雷达来说, 如果目标速度矢量和高度在测量时间内不变, 则除了通过基线中点的垂直平面附近产生模糊以外, 也能够仅用多卜勒测量对目标定位⁽¹⁾。

多基地雷达仅仅使用距离数据就能提供目标定位信息⁽⁷⁾。对于在一个平面上布站的雷达, 三个距离测量就够了。角度、距离和、距离差的测量以及雷达网中增设更多的基地所提供的多余信息用来消除多目标情况时的假目标。表 36-1 中给出了测距系统的方程。当几个单基地的两座标或三座标雷达作为多基地雷达工作时, 这种组合有时叫做雷达系统网。

无源系统的一种形式是由定向站组成测量网。最简单的是二座标测量网, 它以两个或更

多的基地测量电磁源的方向。为了减少可能的假方位交叉点，常常使用更多的基地，这时定位基本上由三个或更多的线的交叉点确定。三角测量系统可以使用俯仰和方位两种测量。它们的定位方程和别的无源系统的定位方程，可在表 36-1 中找到。

当有几个目标时（这是常有的事），则需要消除假目标。最简单的方法是区分出属于特定目标的数据。例如，使用互相关处理技术能用于确定从两个基地来的脉冲是否是在同一目标上得到的。在某些情况中，比较接收信号的频率及其它特性可足以消除假目标。假目标表现出来的跟踪性能也可能与真实目标不同；例如，假目标的速度可能比真实目标的速度大得多，并且其加速度特性可能是不真实的。

无源三角系统可以使用距离差消除假目标；这时，不落在距离差所确定的双曲线上的交叉位置就是假的。距离差与角度的测量可以由为增加多余信息而希望用的那些基地来完成。相反，目标定位也可以根据距离差，而三角法则用于消除假目标指示；使用这种方法，可以得到较好的目标定位精度和分辨力。

无源系统可以只用多卜勒信息对有源目标定位。已经指出⁽⁴⁾，这时需要四个或更多的接收基地。

如前面讨论假目标指示时所述，数据组合问题的产生是有如下两种基本来源：第一种情况，用于某一目标定位的数据，可能实际是由两个或更多的目标得来的数据组成。第二种情况，看来好像是来自两个或更多目标的数据，实际上只与一个目标有关。第二个问题，在无源系统中更易产生，这将在下面讨论。然后叙述实际用于这两种情况的数据处理技术。

由于和双基地雷达同样的原因，多基地雷达也要求分辨模糊的能力。在多基地雷达中用几个时间差或时间和来得到目标位置时，模糊问题将更严重。虽然问题不限于无源系统，但无源情况能清楚地说明问题。例如，当目标发射短周期的周期信号时，得到大量的距离差。每一距离差对应一个双曲面。就如双基地的情况那样，必须考虑双曲面的每个面。这时，在仅有一个真实目标存在时就出现严重的消除幻象的问题。

角度测量将为全部或者至少部分消除幻象提供一种方法。消除的程度取决于信号周期和系统的角分辨力。

按照 Atkin 和 Marple⁽⁸⁾ 的描述，数据询问技术可以用来简化多基地雷达数据处理。用足够的多余信息，则能将假目标消除到任何希望的程度。但是在实际环境中，完成此功能所需的数据处理时间可能变得不允许。在数据组合问题中（第一种情况），每个目标供给雷达数据处理设备几条信息，如 k 条。通常没有把数据附上标记用以标明是哪一目标的数据。每个目标有 k 条信息， N 个目标导出 N^k 组数据点。这些数据点中只有 N 组数据表示目标；剩下 $N^k - N$ 组是假指示。对于 $k = 4$ ， $N = 20$ 个目标时，则有

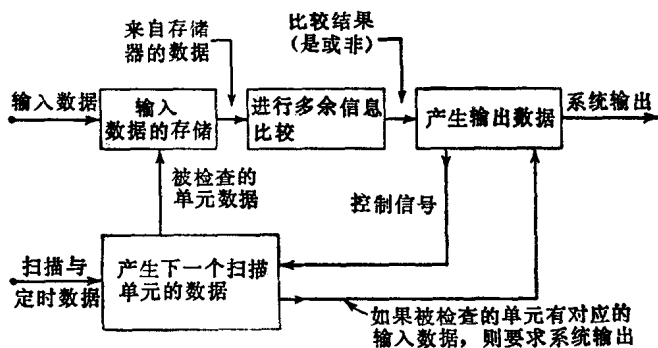


图36-7 数据询问处理器功能方块图

$N^4 - N = 159980$ 个假数据组, 这数目很快地变大。

为了分离出真实目标的数据组而设计出了数据询问技术。数据询问工作简单介绍如下: 把我们关心的区域分成若干个单元, 每一单元存储一组量化数据。然后用这些存储的数据组去询问各测量参数。当测量参数和存储的数据在公差允许范围内相互匹配时, 则该组测量参数可看作出现一个目标。有时首先把空间分成粗略的少数单元, 从而可以大大节省时间。和测量参数比较后所肯定的那些单元还要进一步划细。在输入数据群集的情况下, 这样就能尽量节约时间。图 36-7 是数据询问处理器的功能方框图。Atkin 和 Marple^[8]指出:

被处理的数据写入并存储。一旦收到存储工作完成的信号指示后, 就开始询问。产生出需要观察空间的若干单元的对应数据组, 并与存储的输入数据进行比较, 以肯定哪些单元确是存在目标的, 也就是说, 把来自存储器的输入数据进行比较, 以肯定被观察的某一单元是否具有对应的输入数据。若比较结果为“是”, 则将询问存储器的单元数据作为系统输出。当输出完毕后, 一个控制信号产生下一个扫描单元的询问数据。这个处理一直继续到所有的单元都进行了比较并获得了所有需要的输出, 而后再处理下一个输入数据组合。

这种技术也可用于前面讨论的模糊分辨中第二种情况的数据组合问题。

36.5 多基地雷达灵敏度、多卜勒和作用范围

多基地雷达方程不存在与单基地和双基地雷达方程那样相同的形式。可以导出与 36.3 节无源系统类似的方程, 这里对于系统中使用的各种接收机的接收功率都是取最小的。

与单基地和双基地雷达一样, 也出现多基地多卜勒频移。这些频移可能与单基地距离、距离差及距离和有关。几个多卜勒频移可以同时与一个目标有关。

多基地雷达作用范围可以用分系统作用范围表示。例如, 三基地径向测距系统的作用范围是所有三个单基地雷达共同的作用范围。为了消除幻象, 要求对每个目标的定位使用四个径向距离, 第四个基地的增加将进一步减少作用范围。另一方面, 如果增加基地的结果能在目标定位数据中任选一组的话, 则增加基地可以增大监视区。例如, 双基地雷达增加一个接收基地, 这样就能够由发射机和两个接收机中的任何一个 (但不是两个) 联合工作来确定目标位置。对于多基地系统, 增加基地是扩大还是减少作用范围, 取决于系统组成及增加的基地所用的工作方式。

36.6 双基地雷达目标截面积

和单基地目标截面积一样, 双基地雷达目标截面积 σ_0 是从相分离的发射机和接收机方向观察时目标反射特性的测量。双基地雷达目标截面积比单基地的更复杂。 σ_0 不仅是外形的函数, 而且还是双基地角 β (图 36-1a) 的函数。

当 $\beta \neq 180^\circ$ 时, Crispin 等人^[9]提出的双基地定理是: “在波长比目标尺寸小得多的情况下, 对于十分光滑的物体发射机方向 $\hat{k}$ 和接收机方向 $\hat{n}_0$ 的双基地雷达目标截面积, 在 $\hat{k} \approx \hat{n}_0$ 时, 等于单基地雷达发射机-接收机方向为 $\hat{k} + \hat{n}_0$ 时的单基地雷达目标截面积。”如果目标对雷达的方向角具有均等的概率, 则单基地雷达和双基地雷达的平均截面积相同。但由于目标对雷达的方向角未必具有均等的概率, 故对于同样情况双基地雷达和单基地雷达的截面积可能不同。

还应该注意,此定理是有限制的定理,它不包括雷达波长可与目标尺寸相比拟的情况。Kell^[10]指出,对于小的双基地角 β ,双基地雷达目标截面积非常近似于在双基地角的平分角线上使用按系数 $\cos\frac{\beta}{2}$ 减少的频率观测到的单基地雷达目标截面积。Bickel^[11]断定,单基地等效定理对于那些可以由物理光学描述其散射的无交叉散射中心的物体来说较为适合,但此定理不能推广到去极化物体。关于双基地雷达目标截面积的其他结果可以在文献[12~22]中得到。

当 $\beta=180^\circ$ 或接近 180° 时,前向散射增强。Siegel^[22]指出,根据克希霍夫理论,前向散射截面积 $\sigma_f=4\pi A^2/\lambda^2$,式中 A 是物体的照射区和阴影区交界曲线所包围的面积; λ 是雷达波长。只要雷达的应用允许设计者采用把目标置于发射机和接收机之间那样的系统时,此式是有用的。例如,球体前向散射时的截面积比单基地雷达目标截面积要大。 $\sigma_f/\sigma_m=(2\pi a/\lambda)^2$, a 是球的半径。对于 $a/\lambda=10$,可看到要增大30分贝。这个增大与发射机和接收机之间的高灵敏度(见图36-2)结合起来,使得在某些应用中双基地雷达是很可取的。遗憾的是当目标接近基线时,除了它位于两个基地的基线上某处之外,其多卜勒趋近于零,并且目标位置变得不能确定。

36.7 特殊问题

双基地和多基地雷达容易遇到一些单基地雷达所碰不到的或很难碰到的问题。我们将简要地讨论这样一些问题。

由于通过发射天线旁瓣和接收天线主瓣产生了一些不希望的回波,故双基地和多基地雷达的天线旁瓣可能会出现严重的问题。根据互易性,收发天线互换是成立的。因此,旁瓣问题随单程方向图出现,而它在单基地雷达的双程方向图中是可以避免的。

在使用扫描天线的双基地和多基地系统中,将出现不能有效使用雷达能量的情况。图36-8a表示照射两个目标的发射机波束。其中一个目标反射的能量损失了。这种结构需要天线协调地扫描;否则将失去部分观察区。在典型的协调扫描过程中,当把发射机和天线扫描速率调整得使发射天线移动到下一波束位置时,接收天线对全部观察区进行扫描。这样安排的结果使雷达变成缓慢而无能的了。多接收波束图36-8b可以消除此问题。

为了数据处理在有些多基地和双基地系统中需要基地间数据链。通过这种链或者装在

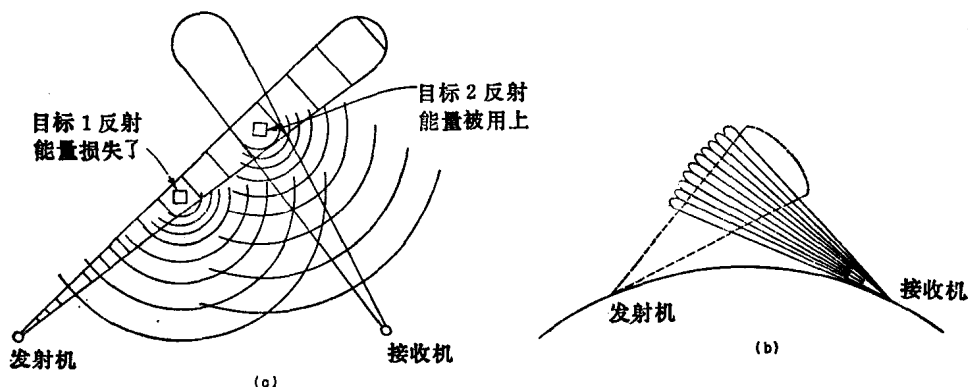


图 36-8 (a) 双基地雷达的能量损失(平视图); (b) 多接收波束的双基地雷达。

每一基地的同步的稳定时钟,可以实现系统协同工作。从一个系统到另一个系统时,这个要求急剧变化。仅使用方位信息的双基地系统困难最小,而在不同基地上获得互相关宽带信号的系统可能要求最高。

由于基地的座标在目标定位方程中出现,故雷达基地的座标精度影响到雷达系统精度。影响的程度决定于所需的雷达精度和该地的地形。对方程加以分析,可确定基地本身位置误差对目标定位精度的影响。目标分辨力受影响很小。对于可移动的系统,还存在一个附加的问题,这就是基地座标和目标定位的计算程序必须不断地修正。

如上所述,幻象,或者假目标,是双基地雷达和多基地雷达存在的问题。图 36-9 表示仅使用方位角的双基地雷达对五个目标的指向。 R_1 和 R_2 的指向的每一个交点表示一个目标。如果指示是虚假的,则产生幻象。没有更多的信息时,这些幻象是无法消除的。如图 36-9 b 那样,再加一个基地,则大部分幻象消除掉了,但仍剩下三个幻象。

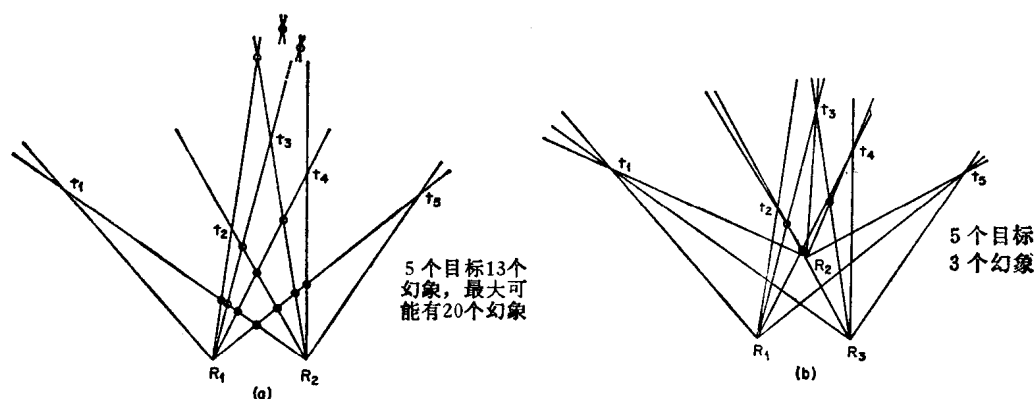


图 36-9 幻象: 双基地和三基地

(a) 双基地三角测量雷达中的幻象; (b) 三基地三角测量雷达中的幻象。

这个过分简单的例子忽略了这样一个因素,即任何实际角测量技术存在着分辨力的限制,并且这种观测会产生随机误差。使用统计模型可以解决这个问题,但很复杂。通常,幻象不可消除的概率随分辨力和精度的提高而减少。推广来说,同样的道理也适用于多基地系统有关的幻象问题。增加另外的参数(如对目标跟踪、速度等)是消除幻象的有效办法。虽然如此,消除幻象所需的多余信息代价是很高的,并且对于任何能实现的组成形式在多目标环境下大概总是存在幻象的。

36.8 应用

下面介绍几种设想的和实际的双基地和多基地雷达的例子。

三边基地雷达是从测量三角形边长而不是测量角度的测量技术引伸得到的。雷达很适合此种技术。在较远距离时单基地雷达精度和分辨力受到角测量精度限制,而三边基地雷达能在目标定位精度方面提供重大改进。作为一个系统工作的三个单基地测距雷达通常被认为是三边基地雷达,但是此定义还可以推广到那样的多基地雷达,这种雷达是通过距离测量定位的,而不是由像距离和、距离差以及整个时间间隔的多卜勒计数那样的一些测量来定位的。这种系统也可使用角度的分辨作为辅助手段来解决模糊问题(幻象消除),并