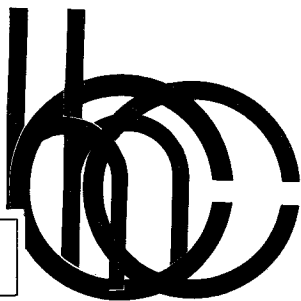


[美] S·A·霍凡厄斯恩 著

倪叔昌 译 方再根 校

958



字版出版社

Introduction to Synthetic Array and
Imaging Radars
S.A.Hovanessian
ARTECH HOUSE 1980

合成阵与成像雷达导论

〔美〕S. A. 霍凡尼斯恩 著

倪汉昌 译 方再根 校

责任编辑：张树瑞

宇航出版社出版
新华书店北京发行所发行
各地新华书店经售
天津市大邱庄印刷厂印刷

开本：787×1092 1/32印张：4.875 字数：102千字

1983年8月第一版 第一次印刷

印数：1—1,700册 统一书号：15214·0055 定价：1.00元

译 者 序

合成阵成象雷达是最近发展起来的一种现代雷达，其特点是分辨力高、能实时处理和传输图象、全天候工作等。它不仅在飞机和人造卫星上用作微波传感器，进行地形测绘和地球资源考察，而且在图象匹配制导和航天技术领域中亦有着十分广阔的应用前途。

本书作者从基本物理概念出发，论述了合成阵与成象雷达的工作原理、数据处理和设计方法，并进行了数学公式的推导。而在公式推导过程中尽量采用简单的代数运算，以便于理解。

在简短地介绍测绘雷达的绪论之后，第一章讨论了真实阵成象雷达，第二章介绍合成阵雷达（SAR）的基本概念以及有关数学公式，第三章叙述获取合成阵地图的光学和电子信号处理方法，该章也包括回波功率和脉冲重复频率选择等问题，第四章给出星载和机载合成阵雷达图象的例子并讨论了合成阵雷达的发展方向。

第五章讨论了合成阵雷达中常用的脉冲压缩法，包括数字脉冲压缩法和有关编码，以及傅里叶变换和频谱分析法，该章详细讨论了数字信号处理要求。第六章讨论获取二维雷达地图的二维相关处理器，在这一章中还列举了合成阵雷达设计的两个例子，其一为机载SAR系统设计，其二为星载SAR系统设计。书末列出了本书所导出的全部重要的SAR计算公式。由于合成阵雷达的计算公式所用到的符号较多，

同一符号在不同公式中往往代表不同的物理量，在阅读本书时必须加以注意。

由于SAR系统涉及的技术领域较广，限于译者水平，译文中难免有错误及欠妥之处，望读者批评指正。

绪 言

第一批地球航空图象是在十九世纪中叶从气球上拍摄较粗糙的照片。随着摄影机、照相胶卷和处理技术以及飞机和宇宙飞行的发展，地球航空图象被用来研究和记录地球的表面状况。今天，几乎所有的地质图和地形图都以飞机或人造卫星所摄取的图象为基础^①。

在二十世纪五十年代发明了一种成象设备，其感光范围超出波长为0.4~0.8微米 ($4 \times 10^{-5} \sim 8 \times 10^{-5}$ 厘米) 的可见光，进入到0.8~15微米的红外区。因此，这种设备能探测到从地面或从人造建筑物反射的太阳光能量，也能探测到由辐射体温度决定的辐射能量。

然而，在可见光和红外波段，很大一部分辐射能被大气所吸收，甚至在晴朗天气也是如此。在阴天或雨天，可见光探测器和红外探测器的性能被严重削弱，因为大量的辐射能被大气吸收掉。为克服天气和大气环境的影响，成象设备必须有自身的照射源。而且，这种照射源所辐射的能量通过大气层时不应受到很大损失。

工作波长为1~30厘米的雷达系统能满足上述两项要求。首先，雷达系统本身有辐射电磁能作照射源，其次，当波长大于1厘米时，发射能和反射能的大气吸收非常小。因

① 参考资料〔8〕

此，雷达成象系统实质上能全天候工作。

应当指出，与波长为 10^{-8} 厘米数量级的可见光区相比，工作在厘米波段的雷达系统不可能提供与可见光区所能得到的同样高的图象分辨力。然而，在地理和地质识别应用中，为获得接近实际地形的图象显示，雷达波长已经够短了。

合成阵与成象雷达

合成阵与成象雷达是通过发射和接收电磁能、获取地面“相片”的机载和星载雷达。大家知道，二维相片的清晰度取决于在每维上，即x方向和y方向，所得到的分辨力。我们取x方向垂直于飞行路线，y方向则沿着飞行器的飞行路线。

成象雷达可分为真实阵和合成阵两大类。真实阵和合成阵成象雷达都靠控制发射脉冲宽度获得x方向分辨力。真实阵雷达靠天线波束宽度得到y方向分辨力。由于在各个方向上天线波束宽度反比于在该方向上天线的长度，所以真实阵成象雷达的y方向分辨力用长天线（窄的波束宽度）得到，该长天线通常安装在飞行器腹部。真实阵成象雷达也称为常规真实阵雷达或常规测绘雷达。

人们为了用普通尺寸的机载天线测绘地图而发明了合成阵雷达（SAR）^①。与真实阵成象雷达一样，合成阵雷达利用发射脉冲宽度获得x方向分辨力。但在y方向上，合成阵雷达利用地面相邻点的增量多普勒频移获得分辨力，而不是象真实阵成象雷达那样靠天线波束宽度获得分辨力。这

① 又称合成孔径雷达。在天线理论中，阵这一术语通常应用于各辐射元分开而不是连续辐射器一部分的天线，孔径这一术语用来指在整个给定表面（孔径）上连续的辐射器。

样，从真实阵雷达发展到合成阵雷达，天线的尺寸减小了，但是为了达到 y 方向所需的分辨力，增加了多普勒（频率）信号处理的工作量。

合成阵雷达是由卡尔·威利（Carl Wiley）于1951年首先开始研究的，他主张利用多普勒信息即频率信息来获取 y 方向分辨力。基于这一想法和随后进行的一系列研究，1958年密执安大学的研究人员应用光学处理法得到第一张 SAR 图象。

到二十世纪六十年代中期，精密光学处理机和全息图雷达研制成功，从而得到高分辨力的条带地图。数字计算机与数字信号处理法的发展成果在合成阵雷达中得到了应用，成为取代光学信号处理的另一种信号处理法。七十年代初，应用数字信号处理法得到脱机或非实时SAR图象。现在的发展趋势表明，人们要用数字信号处理获取实时SAR图象。

应当指出，可以制成地形测绘的专用雷达，或者，地形测绘可以是某一雷达几种工作方式中的一种。在多种工作方式的雷达中，雷达可能还具有目标搜索和监视，目标截获和跟踪，以及地形跟踪和回避等功能。

目 录

译者序

绪言

第一章 真实阵成象雷达	(1)
1.1 分辨力问题.....	(2)
1.1.1 Y方向分辨力.....	(6)
1.2 成象雷达讨论.....	(10)
第二章 合成阵雷达	(12)
2.1 相位和频率的关系.....	(12)
2.2 滤波器设计原理.....	(15)
2.3 Y方向分辨力.....	(16)
2.3.1 举例.....	(20)
2.4 最高分辨力.....	(21)
2.5 聚焦和非聚焦阵.....	(21)
2.6 方程式的归纳和推广.....	(25)
第三章 信号处理方法	(29)
3.1 全息照相和照相波带片.....	(29)
3.2 光学信号处理.....	(33)
3.3 电子信号处理.....	(35)
3.4 电子信号处理中考虑的问题.....	(39)
3.4.1 脉冲重复频率选择.....	(43)
3.5 回波功率问题.....	(45)
3.5.1 大气吸收.....	(49)

3.5.2	平均功率要求	(55)
3.5.3	脉冲压缩的回波功率	(59)
第四章	合成阵雷达的实现和应用	(61)
4.1	运动补偿	(62)
4.2	存储媒体	(63)
4.3	复杂滤波	(63)
4.4	发射机—接收机稳定性	(64)
4.5	合成阵雷达图象举例	(64)
4.5.1	机载合成阵雷达的图象	(67)
4.6	合成阵雷达的讨论和应用	(70)
4.6.1	合成阵雷达应用的现状	(71)
4.6.2	合成阵雷达技术	(72)
4.6.3	合成阵雷达的未来	(74)
第五章	脉冲压缩技术和合成阵雷达机理	(76)
5.1	数学推导	(79)
5.1.1	卷积积分	(80)
5.1.2	匹配滤波器分析	(81)
5.2	距离和速度模糊	(84)
5.3	数字脉冲压缩	(87)
5.4	机理方块图	(92)
5.4.1	数字机理	(93)
5.5	傅里叶分析	(94)
5.6	正交分量	(98)
5.7	傅里叶变换的数字机理	(100)
5.8	数字信号处理方块图	(101)
5.9	存储和速度要求	(102)

第六章 二维相关——设计举例	(106)
6.1 时间变换雷达.....	(110)
6.2 设计举例.....	(112)
6.3 实时合成阵雷达图象处理举例.....	(118)
6.3.1 雷达系统设计参数.....	(119)
6.3.2 信号处理参数.....	(121)
6.3.3 功率要求.....	(125)
6.3.4 信号处理机理.....	(126)
6.4 合成阵雷达的公式和参数.....	(135)
参考资料	(145)

第一章 真实阵成像雷达

机载真实阵成像雷达的主要组成部分示于图1—1，其中包括雷达和导航设备，记录和数据处理设备，电视和地形摄像机构。电视和地形摄像机用来覆盖飞机下方的地面。真实阵成像雷达在 y 方向的分辨力取决于由天线结构尺寸决定的真实天线波束在地面的覆盖范围。要想获得较高的分辨力，就需要较长的天线。由于尺寸长的天线只能沿飞机纵向安装，所以天线波束指向飞机侧方。因此，真实阵成像雷达亦称为侧视机载雷达。有时，这个术语也用于合成阵雷达。正如下文将会提到，在 y 方向上

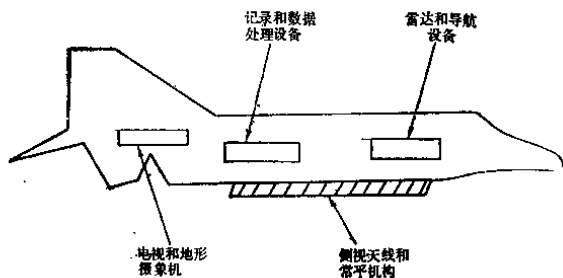


图1—1 机载地形测绘设备

相邻分辨单元的增量多普勒频移只有在天线指向侧方而不是指向前方时才能区分。

图1—2为一真实阵成像雷达的几何关系和信号处理简

图。飞机以速度 V 沿 y 方向航线飞行，雷达的长天线产生扇形波束，照射飞机下方的地面。必须指出，天线波束沿 y 方向的宽度窄，沿 x 方向的宽度宽。如前所述， y 方向的分辨力取决于波束宽度，而垂直于航迹的 x 方向的分辨力取决于脉冲宽度，即与波束宽度无关。收发开关的功能在于转换雷达发射和接收信号的工作状态。所收到的地面反射信号在阴极射线管上显示出来，并记录在照相胶片上。

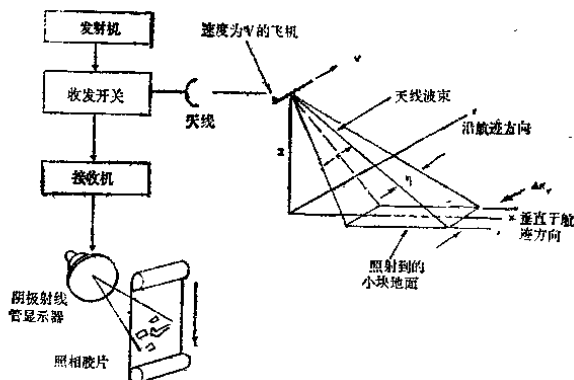


图1—2 真实阵成象雷达的几何关系和信号处理简图

1.1 分辨力问题^①

在开始讨论雷达地形测绘所能达到的分辨力之前，首先研究一下为识别各种被测物体的轮廓、边界和细微的差异

^① 关于雷达的一般讨论，见参考资料〔5〕。

需要多高的分辨力。表 1—1 给出为分辨各种物体所需的方形分辨单元尺寸。表 1—1 表明大面积的宽阔轮廓用 150 米分辨单元可以识别；而小型物体，如车辆等，需要几米的分辨单元才能识别。

表 1—1 各种物体的分辨单元

项 目	方形单元尺寸(米)
海岸线，城市，山	150
公路干线，大型机场	30
城市街道，大型建筑物	15
车辆，房屋，建筑物	3

脉冲雷达测量距离（雷达与目标间的距离）的方法是发射一个脉冲，再测定目标反射脉冲的到达时间，如图 1—3 所示。图中发射脉冲宽度为 τ ，脉冲重复周期为 T 。在垂直面内飞机和地面的几何关系也示于图 1—3。假设距离波门取脉冲宽度 τ ，则如图所示，地面上间隔为 ΔR_x 的相邻两点 A 和 B 可由相邻距离波门中出现的回波信号分辨。由于电磁能以光速 c 传播，我们可以写作

$$t = \frac{2R}{c}, \quad t + \tau = \frac{2(R + \Delta R)}{c} \quad (1.1)$$

式中因子 2 表示电磁能到目标往返一次。将 (1.1) 式中两个式子相减得：

$$\tau = \frac{2\Delta R}{c} \quad (1.2)$$

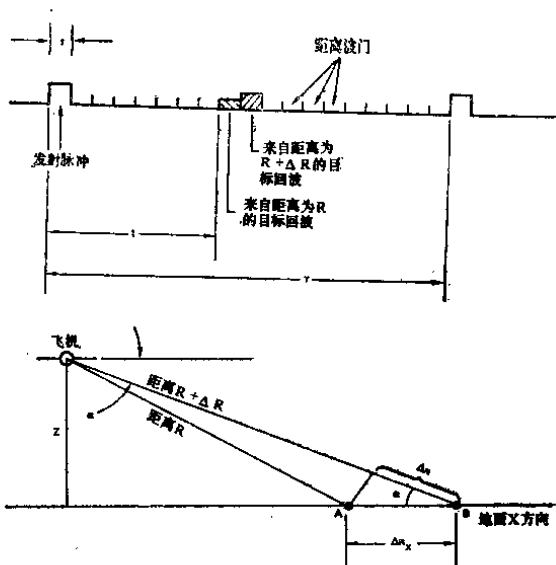


图 1—3 x方向分辨力

再从图 1—3 得到

$$\Delta R_x = \frac{\Delta R}{\cos \alpha} \quad (1.3)$$

最后得

$$\Delta R_x = \frac{c\tau}{2 \cos \alpha} \quad (1.4)$$

式中 ΔR_x 为 x 方向即垂直于航迹方向的分辨力。由 (1.4) 式可见, x 方向的分辨力正比于脉冲宽度 τ , 即短脉冲可获得较

好的分辨力^①。

通常在发射和接收匹配的雷达中，脉冲宽度 τ 和接收机带宽 W 的乘积为1，即

$$\tau W = 1, \quad W = \frac{1}{\tau} \quad (1.5)$$

代入(1.4)式，可得到

$$\Delta R_x = \frac{c}{2W \cos \alpha} \quad (1.6)$$

在图1—3的脉冲雷达中，最大可测距离 $R_{m \cdot x}$ 为脉冲重复周期 T 的函数，并由下式给出：

$$R_{m \cdot x} = \frac{cT}{2} \quad (1.7)$$

对于超出这个距离以外的目标，发射脉冲与目标回波脉冲间的时间间隔将包含重复周期 T 的倍数，这样就引起测距模糊。

下面举一个沿 x 方向分辨力的例子。假如某雷达的脉冲宽度 $\tau = 10^{-7}$ 秒，波束有一个小俯视角($\cos \alpha \approx 1.0$)，将这些数据代入(1.4)式可得到

$$\begin{aligned} \Delta R_x &= \frac{3 \times 10^{10} \times 10^{-7}}{2} \\ &= 1500 \text{ 厘米} \\ &= 15 \text{ 米} \end{aligned}$$

式中 3×10^{10} 为光速(厘米/秒)。

① 在本书大部分公式推导中假设天线波束垂直于飞行路线，其目的在于简化数学推导。如不是这种情况，不难用包含飞行路线与天线波束之间夹角的量加以修正。

1.1.1 Y 方向分辨力

如前所述，真实阵成像雷达在y方向的分辨力正比于天线波束宽度。图1—4所示为两个典型的天线——一个为圆形天线，具有笔形波束；另一个为矩形天线，具有扇形波束。具有均匀电流分布的矩形天线产生 $\sin x/x$ 天线方向图。该天线半功率点波束宽度的近似表达式为

$$\eta = \frac{51\lambda}{l_1}; \quad \varepsilon = \frac{51\lambda}{l_2}, \quad (1.8)$$

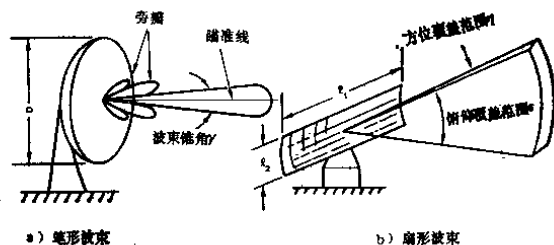


图1—4 圆形和矩形天线及其增益图

式中 η 和 ε 为半功率点波束宽度 (单位: 度), λ 为波长, l_1 和 l_2 为天线边长, 如图1—4所示。具有均匀电流分布的圆形天线产生含一阶贝塞尔函数的辐射场强。在这种情况下, 半功率点波束宽度是

$$\gamma = \frac{58.5\lambda}{D} \text{ (度)}$$

$$\approx \frac{\lambda}{D} \text{ (弧度)} \quad (1.9)$$

式中 γ 为天线半功率点波束宽度， D 为天线直径，如图1—4所示。在以后讨论中， γ 的值将用 $\gamma = \lambda/D$ 近似计算，式中 γ 以弧度为单位。天线口径为50英寸、发射波长为 $\lambda = 10$ 厘米的典型 $\sin x/x$ 方向图示于图1—5。该天线半功率点波束宽度可由(1.8)式得到

$$\gamma = \frac{51 \times 10}{50 \times 2.54} = 4.0 \text{ 度}$$

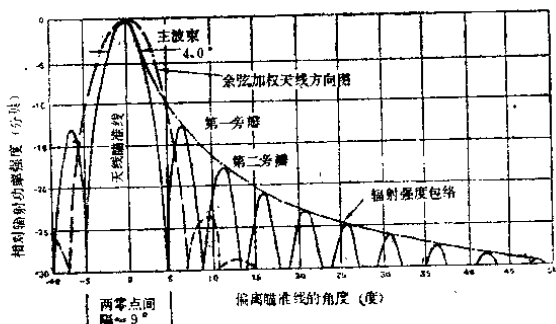


图1—5 典型的 $\sin x/x$ 天线方向图 (实线) 和余弦加权天线方向图 (虚线)

此结果也示于图1—5。图中表明，天线第一旁瓣电平低于主瓣13.2分贝。

在瞄准线方向 (偏离角为 0°) 的天线最大增益可按下列