

综合孔径雷达

原理、系统分析与应用

张理达 著

科学出版社



综合孔径雷达

原理、系统分析与应用

743233

TN951
10

综合孔径雷达

原理、系统分析与应用

张澄波 著



C0165346

科学出版社

1989

内 容 简 介

本书系统地阐述了综合孔径雷达的原理、设计和应用。全书共 10 章。首先，从天线孔径综合、全息成像、频率分析和信号匹配滤波理论等不同角度论述综合孔径原理；接着讨论综合孔径雷达性能的理论极限以及信号处理、运动补偿等关键技术问题；然后分析综合孔径雷达系统设计时遇到的诸如图像质量、几何逼真度、系统非线性对成像的影响、相干斑点及其抑制等技术问题，并给出各种典型运用时的参数范围；最后介绍综合孔径雷达的各种新体制和发展情况以及在国防、国民经济各领域的应用。

本书概念清楚、论述严谨、理论联系实际，可供从事微波遥感、雷达、全息光学、遥感图像处理和信息提取等工作的科技人员阅读参考，也可作为高等院校有关专业的教材和教学参考书。

综 合 孔 径 雷 达 原 理、系 统 分 析 与 应 用

张澄波 著

责任编辑 刘兴民

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1989年11月第一版	开本：850×1168 1/32
1989年11月第一次印刷	印张：19 3/8
印数：1—430	插页：精 2
1—200	字数：512,000

ISBN 7-03-001086-8/TN·61(平)

ISBN 7-03-001087-6/TN·62(精)

平 装 17.50 元
定 价：
布脊精装 19.20 元

序

威利 (C. Wiley) 于 1951 年提出了用频率分析方法改善雷达分辨率的概念, 这是对综合孔径雷达 (SAR) 原理上的突破。经过七、八年的时间, 利思 (E. N. Leith) 等人研制出实用化的综合孔径雷达设备。这是 50 年代雷达发展史上的一件大事, 使雷达从用于“探测”目标提高到用于“成像”, 从而使其应用领域扩大到了资源和经济方面, 显示出强大的生命力。

由于中国科学院电子学研究所学术领导的远见, 该所自 1976 年起也开始了综合孔径雷达的研究工作, 现已取得很大成绩。张澄波同志对综合孔径雷达进行了长期深入的研究, 积累了丰富经验。为了满足广大读者的需要, 他在总结工作的基础上撰写了这部书。本书对综合孔径雷达的基本原理、系统分析及应用, 作了全面而密切联系实际的阐述。书中从各个不同角度阐明综合孔径雷达的原理, 异途同归, 使其形象更加清晰; 对综合孔径雷达系统性能和影响因素的分析以及数据处理技术的论述, 对于具体设备的设计和研制是十分有用的。现在我国已经开展了高分辨率综合孔径雷达的研制工作, 而且正将有关研究成果广泛应用于国民经济建设。因此, 本书的出版无疑是很有价值的。

本书的撰写经历了相当长的时间, 作者表现了顽强的毅力, 更可贵的是, 随着时间的推移, 有关内容不断更新, 作者及时吸收国际上的新进展 (例如综合孔径雷达数据的数字处理技术和以卫星为载体的综合孔径雷达等) 来充实本书, 因而使本书不失其新颖性。

我对本书的撰写成功表示高兴, 并向从事综合孔径雷达的研制、设计和使用的科技工作者推荐本书。由于本书涉及许多雷达和信号处理的基本问题, 因此也可作为雷达方面的教材和教学参

考书。

作为一个涉足过雷达领域的科技人员,不禁要问,在综合孔径雷达提出以后,又已过了 30 多年,雷达面临着许多新的挑战,那么在其发展史中,下一个大的变革将会是什么?

陈芳允

1987 年 5 月 1 日

11K3915

前 言

雷达是用无线电波探测目标的利器。为了更好地发挥雷达的作用，人们一直在努力寻求提高雷达分辨率的新方法。随着信息论在雷达领域的应用、雷达信号分析和设计的发展、全息摄影技术的完善，这一目标终于实现，并导致分辨率很高的新型雷达——综合孔径雷达的诞生。几十年来，综合孔径雷达无论在理论上、技术上都在不断发展，现已成为军事侦察和微波遥感的有力工具，获得了越来越广泛的应用。

我国于70年代中期开始研制综合孔径雷达，十多年来，连续突破了一系列技术关键，不仅研制成单测绘通道、单极化成像综合孔径雷达，而且还研制成功多测绘通道、多极化成像综合孔径雷达。所获得的雷达图像已开始应用于地质勘查、工程地质、海洋研究及其他领域。作者在上述研制过程中，比较系统地研究了综合孔径雷达的理论和关键技术。现将其主要成果加以总结，撰写成了这本书。本书将向读者系统地介绍综合孔径雷达的原理、关键技术、应用及最新发展体制。

本书的写作，得到陈宗鹭研究员的鼓励和帮助；初稿写成后还得到中国科学院学部委员陈芳允教授以及清华大学陆大钧教授的帮助，他们仔细审校了全稿，并提出了许多宝贵意见；本书出版得到中国科学院电子学研究所学术委员会的专家们的热情关怀和帮助。在此一并致以诚挚的谢意。由于写作时间较零散，加之学识水平所限，难免有不当及错误之处，真诚地欢迎读者批评指正。

作 者

1988年5月

目 录

第一章 绪论	1
参考文献	12
第二章 预备知识	14
§1 信号及其复数表示	14
§2 匹配滤波和相关接收的基本原理	18
§3 窄带信号的时间模糊度函数	24
§4 线性调频信号及其时间模糊度函数	30
§5 雷达的角分辨率和天线方向图	33
参考文献	37
第三章 综合孔径雷达基本原理	38
§1 回波信号的多普勒历史及其参数	38
✓§2 多普勒信号的压缩——波束锐化	43
§3 从其他角度分析综合孔径原理	55
§4 综合孔径雷达的理论模型	80
§5 综合孔径雷达分辨、模糊和测绘带	86
§6 综合孔径雷达方位向和距离向耦合	98
§7 综合孔径雷达主要组成和方框图	107
参考文献	111
第四章 综合孔径雷达信号分析	113
§1 调频信号的基本特性	113
§2 矩形包络线性调频信号及其频谱分析	118
§3 线性调频信号与匹配滤波器	125
§4 线性调频信号的产生和压缩	129
§5 线性调频信号的相干性	134
§6 线性调频信号通过系统时畸变的分析	140
§7 线性调频信号的加权处理	153
§8 相位误差对线性调频脉冲压缩的影响	163

§9 随机相位误差对线性调频脉冲压缩的影响	178
参考文献	183
第五章 综合孔径雷达信号处理	185
§1 综合孔径雷达对信号处理器的基本要求	186
§2 傅里叶光学基本知识	192
§3 锥面透镜光学处理器	203
§4 斜平面光学处理器	209
§5 综合孔径雷达数字信号处理的典型步骤	229
§6 数字脉冲压缩的基本方法	247
§7 综合孔径雷达数字信号处理器结构安排	268
§8 电荷耦合器件和声表面波器件信号处理器及其在综合孔径雷 达中的应用	282
§9 各种处理技术的比较	292
参考文献	296
第六章 综合孔径雷达运动补偿	299
§1 运动补偿的一般安排	300
§2 运动补偿要求的定量分析	307
§3 运动补偿系统的具体实现	333
§4 综合孔径雷达对运动目标成像	343
参考文献	350
第七章 综合孔径雷达系统设计中的主要问题	351
§1 综合孔径雷达图像的质量指标	352
§2 系统中影响图像分辨率诸因素分析	361
§3 系统非线性及其对图像质量的影响	381
§4 综合孔径雷达图像特征检测的概率模型	394
§5 噪声、量化和多视平均对图像质量的影响	414
§6 大气层电波传播对综合孔径雷达成像的影响	423
§7 综合孔径雷达图像几何逼真度分析	437
§8 综合孔径雷达作用距离方程和系统参数选择	447
参考文献	458
第八章 空间综合孔径雷达	461
§1 几何关系和回波信号的多普勒历史	461

§2	模糊设计及其最佳化	466
§3	距离单元位移的校正	482
§4	综合孔径雷达的数据传输	495
§5	空间综合孔径雷达现状和发展	499
	参考文献	507
第九章 综合孔径雷达的新体制		509
§1	微波全息雷达	510
§2	全息矩阵雷达	514
§3	小区域成像的综合孔径雷达	520
§4	地形测绘用综合孔径雷达干涉仪	526
§5	旋转目标成像的综合孔径雷达	530
§6	逆综合孔径雷达	533
	参考文献	536
第十章 综合孔径雷达的应用		538
§1	综合孔径雷达成像后处理技术	538
§2	综合孔径雷达图像固有特征及信息提取	551
§3	将综合孔径雷达图像应用于地形测量	571
§4	将综合孔径雷达图像应用于自然植被研究	575
§5	将综合孔径雷达图像应用于地质勘探	579
§6	雷达图像在海洋研究中的应用	584
§7	雷达图像在识别人为目标时的应用	589
§8	我国研制的综合孔径雷达及其应用简介	596
	参考文献	603
汉英名词对照索引		606

第一章 绪 论

第二次世界大战以来，雷达无论在理论上还是在技术上都得到了飞速进展^[1]。新理论、新技术纷纷出现。其中综合孔径原理和综合孔径雷达便是突出的进展之一。

综合孔径雷达是一种高分辨率成像雷达^[2]。利用它，可以在能见度极差的气象条件下得到类似光学照相的高分辨率雷达图像。这里所谓高分辨率包含两方面的含义：即高的角分辨率（即方位方向分辨率）和足够高的距离向分辨率。综合孔径雷达采用综合孔径原理提高雷达的角分辨率；而距离向分辨率的提高则需求助于脉冲压缩技术。

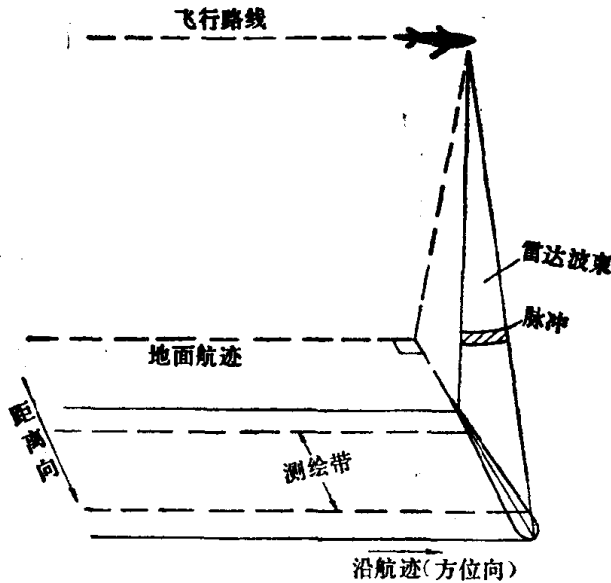


图 1.1 综合孔径雷达的几何关系

综合孔径雷达的几何关系示于图 1.1。装载着雷达的飞行器

沿 x 坐标方向以速度 v_a 匀速直线前进。雷达向正侧方发射并接收波束。波束的水平宽度为 β ，垂直宽度为 φ 。图中阴影线区即为波束与地平面的交界面。随着雷达匀速前进，将在地面形成带状辐照带(即测绘带)，这就是雷达成像的对象。

雷达一面以匀速直线前进，一面以固定的重复频率发射并接收信号。如果把接收信号的幅度和相位信息存储起来并与以前的接收信号叠加，则随着雷达的前进将形成等效的线性阵列天线，如图 1.2 所示。

如果真实天线尺寸为 D ，则其波束宽度 β 为

$$\beta = \frac{\lambda}{D} \quad (1.1)$$

式中 λ 为雷达波长；如果天线口面场分布不均匀，则上式还应乘一因子 k 。

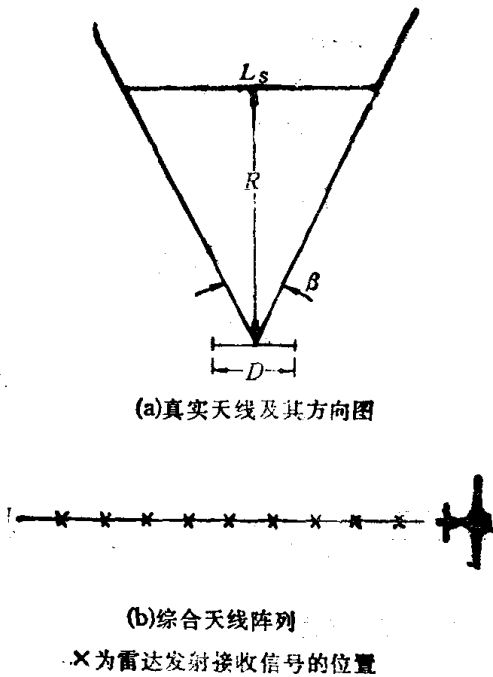


图 1.2 真实天线与综合的天线阵列

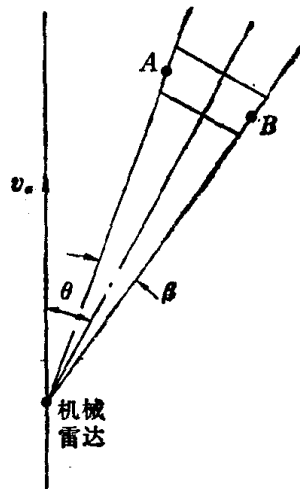


图 1.3 用频率分析法改善雷达角分辨率的示意图

如宽度为 β 的波束在距离 R 处的辐照宽度为 L_s , 则有

$$L_s = \beta R \quad (1.2)$$

此即形成的等效天线阵列的最大长度, 称为综合孔径长度(对每一点目标而言),

长度为 L_s 的综合天线阵的波束宽度 β_s 为

$$\beta_s = \frac{\lambda}{L_s} \quad (1.3)$$

由于 L_s 比 D 大许多倍, 综合天线阵列的波束宽度 β_s 将比真实天线的波束宽度 β 小许多倍。也就是说, 雷达的角分辨率将大为改善。把此角分辨率折算成距离 R 处的方位向分辨率 ρ_r 为

$$\rho_r = \beta_s \cdot R = \frac{D}{2} \quad (1.4)$$

方位分辨率 ρ_r , 只和天线尺寸有关(天线尺寸越小, 方位分辨率越好)而与波长, 与距离 R 无关。

综合孔径概念的产生可以追溯到五十年代初。1951年6月美国古德依尔公司(Goodyear Aerospace Co.)的威利(Carl Wiley)首先提出可以用频率分析的方法改善雷达的角分辨率^[3]。图1.3示出了这种方法的示意图。雷达以速度 v_a 匀速直线前进, 雷达发射宽度为 β 的波束, 波束与航迹的夹角为 θ 。在距离 R 处有目标 A 和 B , 分别处在波束两边。由于 A, B 两目标相对于雷达的径向速度不同, 它们回波的多普勒频移是有差别的。用 Δf_d 表示这两个目标的多普勒频差, 则有

$$\Delta f_d = \left(\frac{2v_a}{c} \right) f_0 \times \sin \theta \times \beta \quad (1.5)$$

式中 c 为光速, f_0 为雷达发射频率。

威利认为, 只要观察时间 $\Delta T > \frac{1}{\Delta f_d}$, 则区分这两个目标的多普勒频差是可能的(至少理论上是如此), 这就能改善雷达的角分辨率。他还指出: 如果波束垂直于航迹(正侧视, $\theta = \frac{\pi}{2}$), 则目标回波的多普勒频移接近于零, 但是多普勒频率变化率最大, 因

此能得到最好的角分辨能力。

与威利进行工作的同时，伊利亚诺大学控制系统实验室独立地用非相干雷达作实验，证实用频率分析方法确能改善雷达的角分辨率。以后又用相干雷达作实验。用X波段雷达，通过回波箱产生相干基准信号，发射波束宽 4.13° 经过孔径综合后波束宽变为 0.4° 。采用非聚焦型综合孔径方法，于1953年7月得到第一张综合孔径雷达图像，如图1.4所示。需要指出的是，这些实验采用的信号存储器是磁带，信号处理器是商用的频率分析器。这是综合孔径原理和综合孔径雷达发展的最初阶段。

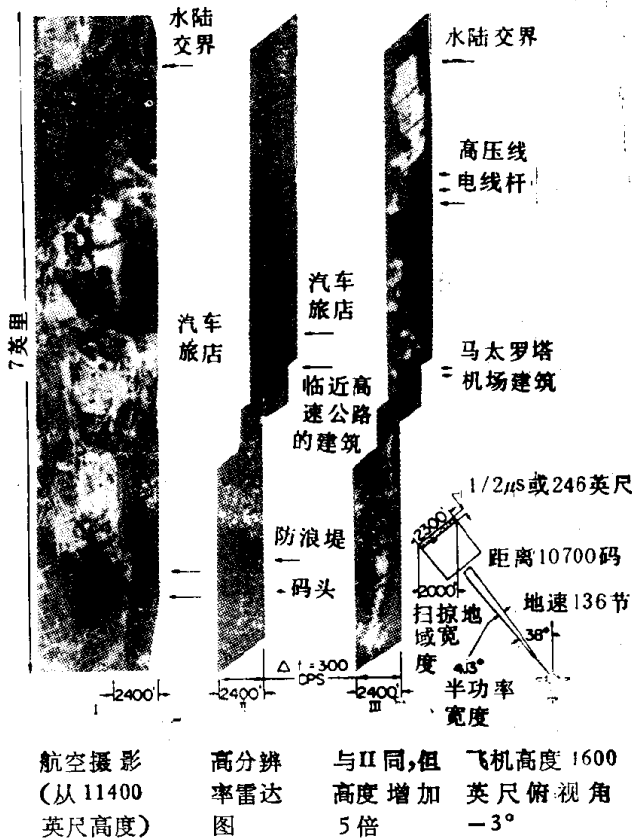


图 1.4 第一张综合孔径雷达图像

1953年夏，在美国密执安大学举办的暑期讨论会上，许多学

者提出了利用载机运动可将雷达的真实天线综合成大尺寸的线性天线阵列的新概念^[4]。用这种观点认识综合孔径原理，除了能解释雷达角分辨率的提高及正侧视工作方式能得到最佳角分辨率外，还易使人们认识到综合孔径方式有经相位校正后求和与不经相位校正直接求和之分，即有聚焦工作方式和非聚焦工作方式之分^[5]，认识到由于雷达脉冲工作将必然带来方位模糊和距离模糊问题以及解决这些问题的技术途径。较之最初阶段，人们的认识又深化了一步。

当时还认识到，信号的存储和处理是实现综合孔径原理的关键。许多科学家为此作出了努力。美国密执安大学雷达和光学实验室的柯特罗纳 (L. J. Cutrona)、利思 (E. N. Leith) 等人发现，利用光学透镜组能够完成综合孔径要求的信号处理任务^[6,7]。他们研制了采用阴极射线管 (CRT) 作显示器的综合孔径雷达。回波信号经同步解调后加到 CRT 的阴极，对亮度进行调制。照相机将此信号记录到胶片上。胶片沿 x 方向匀速传送，信号便一行行地排列在胶片上 (每个发射周期记录一行)。图 1.5 示出其示意图。1957 年 8 月，他们研制的综合孔径雷达进行飞行试验，得到

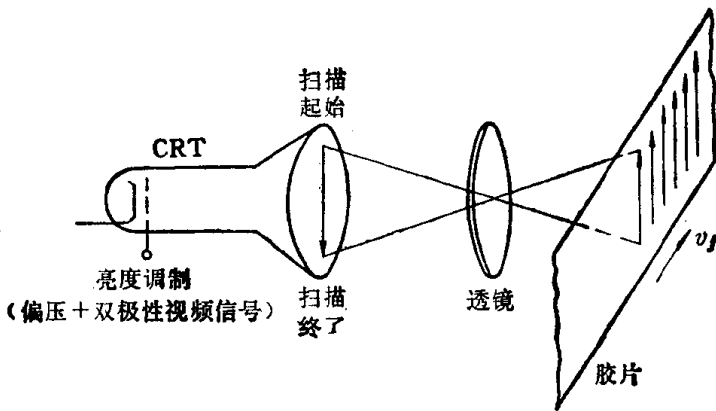


图 1.5 CRT 显示记录系统示意图

数据胶片，经地面光学透镜组处理获得了大面积的聚焦型综合孔



图 1.6 第一张公开发表的大面积聚焦型综合孔径雷达图像

径雷达图像,如图 1.6 所示,比之图 1.4,图像清晰,分辨率较高。

从此,综合孔径原理和综合孔径雷达得到广泛的承认,并引起了普遍的兴趣。

利思等人还进一步指出,综合孔径概念和光学全息照相的概念极其相似。很容易证明,如果用线性调频脉冲序列作为综合孔径雷达的发射信号,则一个理想点目标回波经图 1.5 所示的显示记录过程后,在胶片上将呈现一椭圆形菲涅耳(Fresnel)衍射图^[8]。这和点目标的光学全息图^[8](为圆形菲涅耳衍射图)很相似。按照全息照相成像的步骤,用准直相干光源照射雷达数据胶片,即能呈现出点目标的图像。由于椭圆形菲涅耳图的长短轴不等,当用准直相干光源照射时,沿 x 方向和沿 y 方向聚焦的位置不同。采用适当的透镜系统,即能校正之,呈现出原目标的图像。

用全息的观点解释综合孔径原理,不仅深化了对综合孔径原理的认识并引进了光学处理作为综合孔径雷达的信号处理器,从而使综合孔径原理和技术获得公认;而且也促进了全息术和光信

息处理学科的发展。

人们对综合孔径原理的认识还在不断深化。为了叙述清楚起见,让我们暂时撇开这话题,看看人们为提高雷达距离分辨率所作的努力吧。

在雷达出现的早期,人们从实践中总结出:雷达的距离分辨率由雷达发射脉冲宽度决定。如果雷达发射脉冲宽度用 τ 表示,则雷达距离向的分辨率 ρ_R 为

$$\rho_R = \frac{c\tau}{2} \quad (1.6)$$

式中 c 为光速。

限于当时的水平,不可能建立比较系统的雷达分辨理论,因此上述公式是经验性的,粗糙的。

1948年,美国数学家香农(C. E. Shannon)发表了“通信的数学理论”一文,创立了信息论。1953年,伍德沃德(P. M. Woodward)首先将概率论和信息论引进雷达领域^[10]。

我们知道,雷达回波总是伴有噪声同时出现。诺斯(D. O. North)曾指出^[11],对于在平稳白色高斯噪声中检测单一目标这类简单问题,接收机的最佳化将得到匹配滤波器。伍德沃德及以后许多学者在匹配滤波器概念基础上系统地研究了雷达目标的分辨问题,建立了完整的模糊函数理论。按照这一理论,雷达距离分辨率将由雷达信号带宽 Δf_s 决定,且有^[12]

$$\rho_R = \frac{c}{2\Delta f_s} \quad (1.7)$$

式中 c 为光速。

在这个理论指导下,人们努力寻找这样的波形,它既具有较大的带宽 Δf_s ,以便能得到较好的距离分辨率;又具有较大的持续时间 τ ,以便获得较大的平均功率,从而获得较大的雷达作用距离。

人们很快发现,如果对一个宽带信号(如果此宽带信号各频谱分量同相,则它的持续时间 τ 将是很窄的)各频谱分量附加一随频率

作非线性变化的相位值,则此宽带信号将具有很长的持续时间,以满足前述要求. 这种附加非线性相位的过程称之为信号的展宽过程. 将展宽后的信号通过匹配滤波器,校正非线性相位值使之同相,在匹配滤波器输出端将得到窄脉冲信号. 这个过程称之为脉冲压缩.

最早加以研究并获得使用的脉冲压缩信号就是线性调频信号. 线性调频信号具有平方律的相位频率关系,经过匹配滤波器压缩,可以输出窄脉冲.

总之,采用脉冲压缩波形,相对于原来的宽脉冲而言,由于通过匹配滤波器的压缩,大大改善了雷达距离向的分辨率.

人们不禁要问:雷达的角分辨率(即方位向分辨率)能否通过类似途径得到改善呢?通俗地说,信号脉冲可以压缩,天线波束能否锐化呢?对这一问题的答案是肯定的. 这里所谓“波束锐化”就是前面叙述的综合孔径原理.

为了弄清这一点,先看图 1.7. 雷达以速度 v_a 向前进,在航迹的正侧方向波束扫过点目标 P . 或者说,点目标依次横过波束.

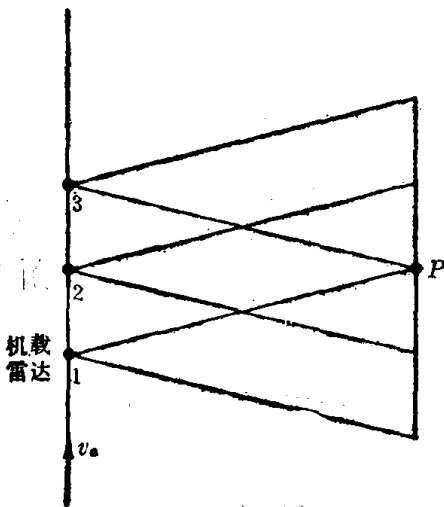


图 1.7 波束扫过点目标

当 P 点横过波束时,由于和雷达的相对距离在变化,接收到的 P 点的回波的相位将随之而变. 可以证明其变化规律为二次曲线,此即为线性调频信号. 将此信号通过匹配滤波器,校正这非线性变化的相位值,然后叠加,将在匹配滤波器的输出端得到“压缩”后的信号. 显然,这一运算过程就是综合孔径原理要求的信号处理过程. 也

就是说,波束锐化就是对回波多普勒信号进行脉冲压缩过程^[13].

进一步研究综合孔径雷达信号收集过程可见,上述方位向线