

空间射频信息获取新技术丛书
“十二五”国家重点图书出版规划项目

雷达成像算法进展

邢孟道 保 铮 李真芳 王 彤 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

空间射频信息获取新技术丛书
“十二五”国家重点图书出版规划项目

雷达成像算法进展

邢孟道 保 铮 李真芳 王 彤 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书主要介绍了雷达成像算法方面的研究进展。首先针对多模式 SAR (包括斜视模式、聚束模式、滑动聚束及 TOPS 模式和多通道体制等), 介绍近几年新提出的一些成像方法。接着介绍 SAR 装载于机载小型平台时存在的运动误差问题及相应的补偿方法, 并举例说明运动补偿在机载 SAR 成像中的必要性。其次介绍各类非合作机动目标 (包括飞机、舰船及自旋目标等) 的 ISAR 成像方法, 并介绍了压缩感知理论在 ISAR 成像中的应用。然后介绍 SAR-GMTI 的处理方法, 包括杂波抑制方法、图像对的去相干因素及补偿方法和多孔径 SAR-GMTI 及空时自适应处理技术。最后介绍 InSAR 的基本原理并指出传统 InSAR 的局限性和 InSAR 技术的发展趋势, 在此基础上, 介绍了先验 DEM 辅助 InSAR 处理新技术和新体制多基线 InSAR 系统。

本书适用于从事雷达研究、制造的工程技术人员, 从事雷达系统与技术教学的高等学校师生, 广大从事雷达装备使用与维护雷达的部队官兵和各行各业雷达操作人员。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有, 侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

雷达成像算法进展 / 邢孟道等编著. —北京: 电子工业出版社, 2014.11
(空间射频信息获取新技术丛书)
“十二五”国家重点图书出版规划项目
ISBN 978-7-121-20350-3

I. ①雷… II. ①邢… III. ①雷达成像 IV. ①TN957.52

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 251506 号

策划编辑: 刘宪兰

责任编辑: 刘真平

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 17.25 字数: 441.6 千字

版 次: 2014 年 11 月第 1 版

印 次: 2014 年 11 月第 1 次印刷

印 数: 3000 册 定价: 52.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zits@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。



总序

我国的雷达事业，经过数十年几代人的努力，从无到有，从小到大，从弱到强，在许多领域已经进入了国际先进行列。为了总结这些经验，给今后的雷达发展打好基础，前些年，我们在众多雷达专家、学者的支持和参与下，在总结长期雷达科研、生产、教学、使用经验的基础上，聚集体智慧，组织了“雷达技术丛书”的编写工作。该套丛书一经电子工业出版社隆重推出，便受到业内同行的热烈欢迎，也成为我国雷达界的一项重要科研成果。

转眼，距“雷达技术丛书”的出版已近十年，在我国国防建设与经济建设需求的推动下，在电子信息技术高速发展的基础上，雷达及雷达相关技术又有了新的进步。近年来，我国在相控阵天线及其发射接收组件技术方面取得了很大进步，并推广应用于各种对空目标监视雷达及各类机载雷达；开展了高分辨率多维雷达信息获取前沿技术研究，实现了机载与星载高分辨率合成孔径雷达（SAR）成像和超宽带雷达成像，这些都在国防建设和各个民用领域发挥着重要作用。在天线、微波、信号处理、数据处理等雷达基础技术快速发展的同时，与通信、网络技术的快速发展相同步，我国在雷达组网、雷达数据整合等雷达系统技术方面也取得了骄人的进步，使得雷达成为空间射频信息获取的重要工具。特别值得一提的是，为适应航空、航天和空间应用的需要，我国在用于空间目标探测、跟踪和精密测量的大型单脉冲雷达与相控阵雷达技术方面获得了新的进展，其中相当部分拥有发明专利与自主知识产权。与此同时，在推动我国雷达技术进步的队伍中也涌现出不少优秀的年轻专家。在总结近几年雷达及雷达系统技术快速发展的基础上，为满足雷达信息获取的新要求，包括地基雷达对高速、高机动飞行目标及机载与星载雷达对地面、海面乃至地下目标获取信息的要求，我们再次组织编写了“空间射频信息获取新技术丛书”（以下简称丛书）。该套丛书的正式出版和推广，将有利于正确把握雷达技术发展方向，促进我国雷达事业的创新发展。

为使丛书较系统地总结和反映我国在空间射频信息获取与应用方面所取得的创新技术与理论成果，同时吸纳国外在该领域的相关前沿基础科研成果，为该领域技术发展提供借鉴作用，本套丛书除包括本版内容之外，还充实了国外引进版内容。全套丛书的内容定位主要突出空间射频信息获取技术的工程设计性，反映空间射频信息获取的新技

术。在本版内容中,强调总结我国科技人员近年来在空间射频信息获取技术领域取得的重大科技成果和突破性进展,框架设想上体现新技术和创新发展;在国外引进版内容上,重点吸纳国外空间射频信息获取技术领域的前沿基础科学研究和对该领域技术发展具有借鉴作用的新技术。全套丛书尽可能提供有关研究图表、数据、曲线和计算公式,使设计举例更具有实用性。

丛书的编写创作主要由领域内几位院士和众多中青年专家担纲,他们既要完成繁重的科研和管理任务,又要抓紧时间撰写书稿,工作十分辛苦,在此,我们谨代表丛书编委会,向各册作者和审稿专家表示深深的敬意!我们希望本套丛书所展示的新技术、新成果和新理论等能对从事该技术领域科研、设计、教学、管理工作的人员,部队干部、战士,以及高等学校相关专业的学生、研究生有所帮助,从而促进我国空间射频信息获取技术的发展,为国家信息化建设和国民经济建设作出贡献。

本套丛书的出版,得到了中国电子科技集团公司、中国电子科学研究院、南京电子技术研究所、西安电子科技大学等各参与单位的大力支持,得到了电子工业出版社领导和刘宪兰首席策划编辑的积极推动,得到了参与丛书工作全体同志的热情帮助,在此一并表示衷心的感谢!

丛书主编、中国工程院院士
王小谟 张光义
2013年5月



前言

2005年我们编著出版了《雷达成像技术》一书，这时距合成孔径雷达（SAR）概念的提出已有半个世纪，国际上合成孔径雷达已应用很多年，各种成像算法也趋于成熟。我国对合成孔径雷达的研究起步并不晚，20世纪70年代后期，中国科学院电子所就研制出机载合成孔径雷达样机，并得到约10m分辨率的清晰图像。但国内合成孔径雷达开始广泛应用还是21世纪初的事，虽然较国际上落后了许多年，但发展很快，在短短几年里，不少单位开展了研究，并在许多方面取得了实际成果，通过较广泛的实践，加深了对合成孔径雷达的认识。我们有幸参加了部分工作，这是难得的学习机会，使我们对合成孔径雷达有了进一步的理解。当时，王小谟、张光义两位院士倡议编著雷达技术丛书，要我们编著《雷达成像技术》分册，我们愉快地接受了该项任务，期望能在我国合成孔径雷达蓬勃发展之际，结合我们几年来的研究和实际体会以书面形式发表，供后来参加这一领域的科技工作者参考，为合成孔径雷达在我国更好、更广、更快发展的事业中，贡献一点绵薄之力。

《雷达成像技术》出版至今虽只有短短几年，但国内的应用发展极其迅速，而且应用的范围越来越广泛。几年的广泛实践也使国内合成孔径雷达的研究水平得到明显提高，其水平基本上与国际水平相当。同时，在这几年里国际合成孔径雷达又有了不少新的发展。在这种新的形势下，我们觉得原来编著的那本书已难以满足新发展的要求。为此，我们编著了这本《雷达成像算法进展》，供有关读者参考。合成孔径雷达的新进展主要分物理和应用两个层面，本书介绍的新技术是应用层面的。

近年来，合成孔径雷达的应用领域有不少新的扩展，虽然成像的基本原理仍然适用，但具体算法常常需根据具体情况作相应改变。本书重点讨论合成孔径雷达在各种新的应用场合的成像算法，但为了便于读者阅读，以及与既往的成果相联系，我们用不长的篇幅在第1章里对合成孔径雷达的基本原理和各种成像算法进行了扼要介绍。但介绍这些内容时，不再采用一般按历史发展由近似到精确、由简到繁的叙述方法，而是根据成像原理导出相应的精确算法，然后按实际中对不同的分辨率和精度要求，介绍历史发展中先后提出的，而当前仍在应用的各种算法。

第2章介绍常用正侧视条带式和小区域聚束式之外的几种工作模式的合成孔径雷达

成像技术, 首先介绍大斜视条件下, 常规基于倾斜谱的波数域算法和非线性 CS 算法都不适用, 给出了在斜视角方向基于正交谱的斜视 SAR 成像。其次介绍了较大区域的聚束模式成像算法, 随着分辨率提高和测绘带的增大, 常规的极坐标格式算法不够严格, 而常规波数域算法要求重复频率大于总方位带宽, 为此介绍了在重复频率略大于瞬时带宽条件下的成像算法。然后介绍了在滑动聚束模式下, 子孔径成像算法和全孔径成像算法。最后, 针对星载条带 SAR, 测绘带和分辨率是一对矛盾, 介绍了采用多通道体制, 采用低重复频率而有多普勒模糊, 通过多通道真实空间采样, 弥补合成孔径空间采样不足, 解决高分辨率宽测绘带问题, 给出了相应的成像算法。

第 3 章介绍在机载情况下存在运动误差时的补偿技术。首先讨论了机载 SAR 运动概况, 分析了天线相位中心位置误差及不同模式下的“平地窄波束”假设和运动补偿方法。并针对宽波束模式中运动误差存在对目标方位和高程的依赖性, 给出残余误差的补偿方法。其次介绍基于惯导数据的运动补偿技术, 并以不同机载平台实测数据为例, 说明运动补偿对机载数据处理的必要性及有效性。接着介绍基于数据的运动参数估计方法, 包括多普勒中心和多普勒调频率及多孔径图像偏移等, 这些内容是进行基于回波数据运动补偿的基础。然后介绍相位梯度自聚焦 (PGA) 和扩展 PGA (E-PGA) 的补偿方法。PGA 的独特之处在于它并不基于误差多项式模型, 而是根据图像中某些特显点的散焦状况进行自聚焦处理的方法。最后介绍基于回波数据的运动补偿算法并给出结合运动补偿的 SAR 成像实例。

第 4 章介绍各类目标的逆合成孔径雷达 (ISAR) 成像, 首先从常用的空、海目标, 即飞机和舰船成像出发, 介绍基本的平动补偿 (包络对齐和自聚焦) 方法、基于时频分析的方位瞬时成像方法, 针对具有游动部件的目标, 采用微多普勒分析和分离的成像算法。自旋部件是空间目标中常见的, 为此采用窄带和宽带雷达, 对它进行了二维和三维成像的讨论。接着介绍了对方位缺失部分数据情况下稀疏孔径成像和多个稀疏子频带相干合成的稀疏频带成像。最后介绍了采用压缩感知 (CS) 技术提高 ISAR 分辨率的成像方法。

第 5 章介绍雷达对地面运动目标探测的新技术。首先简单介绍了单孔径地面运动目标检测 (SAR-GMTI) 常见的几种处理方法。接着介绍多孔径 SAR 利用“图像对”进行 SAR-GMTI 的基本原理和基本信号处理方法, 包括偏置相位中心天线 (DPCA) 方法和沿迹干涉 (ATI) 方法。然后对引起 SAR 图像对的相干性下降的各种因素进行分析, 并给出提高 SAR “图像对”相干性的补偿方法。最后介绍利用多基线提高 GMTI 性能的信号处理方法和采用空时自适应处理 (STAP) 的杂波抑制方法。

第 6 章介绍干涉合成孔径雷达 (InSAR) 多维测绘新技术及其应用。首先从合成孔径雷达干涉技术的基本原理入手, 简要介绍 InSAR 的几何模型和数据处理流程, 并讨论了传统单基线 InSAR 对复杂地形测绘应用的局限性; 以当前最新的 InSAR 系统为例, 介绍新体制 InSAR 系统的原理和新体制下 InSAR 技术应用于复杂地形测绘的新发展。然后介绍先验 DEM 辅助 InSAR 处理的新技术。最后介绍了合成孔径雷达多基线干涉技术和下视三维成像技术的优势及其相关信号处理方法。

本书是由西安电子科技大学国防科技雷达信号处理重点实验室雷达成像分室集体

编著的。雷达成像分室成立于 21 世纪初，主要骨干为邢孟道、李真芳、王彤。邢孟道为分室主任，保铮作为实验室学术委员会主任，更多地参加了该分室的工作。由于国内雷达成像迅速发展，分室规模迅速扩大，至今已建立了一支具有较高水平的年轻队伍。一批年轻人，虽然从事工作时间不长，但经受多次任务的锻炼，已成为比较成熟的骨干，本书动员分室全体成员合作完成。我们先对内容提纲进行了集体讨论，然后分工编著，其中第 1 章由保铮编写，第 2 章由孙光才编写，第 3 章由张磊编写，第 4 章由白雪茹编写，第 5 章由王彤编写，第 6 章由李真芳编写。然后再通过集体讨论，最后由邢孟道整理定稿。同时，在本书的编著过程中得到了研究生吴玉峰、杨军、张双喜、徐刚、李浩林、李学仕、段佳、杨泽民等的帮助。

虽然我们在编著本书时尽了最大努力，但由于水平的限制和经验的不足，缺点一定不少，甚至还有错误，希望读者批评指正。

编 著 者

“空间射频信息获取新技术丛书”编委会

主 任：左群声

副 主 任：周万幸 敖 然

委 员：（以下按姓氏音序排列）

保 铮 贲 德 陈 涛 范义晨 郭 庆 韩宗杰
胡明春 黄培康 金 林 李 斌 李大圣 刘炳奇
刘宏伟 刘华军 刘明罡 罗 敏 马 林 潘宇虎
孙 俊 汪文英 王建民 王小谟 吴鸣亚 夏琛海
余振坤 张光义 张金平 张荣涛 赵玉洁 周志鹏

编委会秘书长：刘宪兰 陈 玲

主 编：王小谟 张光义



目 录

第 1 章 合成孔径雷达成像的基本原理和算法	1
1.1 宽带信号的脉冲压缩	2
1.1.1 宽带信号的逆滤波、匹配滤波和脉冲压缩 ^[1]	2
1.1.2 线性调频信号和解线频调处理 ^[3,4]	4
1.2 运动平台的合成孔径雷达的横向分辨	9
1.2.1 运动平台合成孔径雷达的横向分辨原理和简单分析	9
1.2.2 运动平台合成孔径雷达回波的多普勒特性	11
1.2.3 运动平台合成孔径雷达回波的匹配滤波	15
1.3 距离-多普勒 (R-D) 算法	16
1.3.1 回波信号的多普勒谱	17
1.3.2 匹配滤波	20
1.4 线频调变标算法 ^[5]	21
1.5 用波数域分析合成孔径雷达的横向分辨率 ^[6]	27
1.5.1 波数域的基本概念	27
1.5.2 用波数域方法重建目标横向位置 ^[6,7]	31
1.5.3 用波数域方法重建二维目标的位置	33
1.6 距离徙动算法 (RMA) ^[6-8]	37
参考文献	40
第 2 章 多模式 SAR 成像方法	41
2.1 条带式 SAR 和广域 ScanSAR 成像 ^[1-3]	44
2.2 聚束式 SAR 成像 ^[4-13]	45
2.2.1 聚束式 SAR 回波信号分析	46
2.2.2 基于子孔径划分的聚束式 SAR 算法	47
2.2.3 基于 SPECAN 的宽场景聚束式 SAR 算法	51

2.3	大观测域 TOPS-SAR 和滑动聚束式 SAR 成像 ^[14-17]	56
2.3.1	滑动聚束式 SAR 信号模型.....	57
2.3.2	滑动聚束子孔径成像算法.....	58
2.3.3	滑动聚束全孔径成像方法.....	60
2.3.4	大观测域 TOPS-SAR 全孔径成像方法.....	64
2.4	斜视多模式 SAR 成像方法 ^[1,18-22]	68
2.4.1	斜视模式的信号模型与等效正侧视处理.....	69
2.4.2	走动校正引入的问题.....	71
2.4.3	大斜视 SAR 成像算法.....	72
2.4.4	基于方位重采样的斜视多模式处理.....	76
2.5	高分辨率宽测绘带 SAR 成像 ^[25-40]	79
2.5.1	相位中心配置原理.....	80
2.5.2	方位解模糊方法.....	82
2.5.3	多通道解模糊性能影响因素及改善措施.....	86
2.5.4	宽测绘带与各种模式的结合.....	92
	参考文献.....	92
第 3 章	合成孔径雷达成像的运动补偿.....	95
3.1	SAR 平台的运动情况.....	97
3.1.1	惯导系统测量的运动参数情况简介.....	97
3.1.2	基于单个特显点回波数据的机载 SAR 运动误差分析.....	98
3.1.3	机载 SAR 运动补偿概述.....	104
3.1.4	天线相位中心 (APC) 位置误差分析.....	104
3.1.5	斜视 SAR 模式下的窄波束假设和运动补偿.....	108
3.1.6	宽波束运动补偿.....	110
3.2	基于惯导数据的运动补偿实验结果举例.....	116
3.2.1	基于惯导数据的运动补偿.....	116
3.2.2	多普勒中心估计 ^[7-9]	119
3.2.3	多普勒调频率估计 ^[10]	120
3.3	基于相位梯度估计的自聚焦补偿方法.....	126
3.3.1	相位梯度自聚焦 (PGA) ^[13]	126
3.3.2	扩展相位梯度自聚焦 (EPGA) ^[15]	128
3.4	基于回波数据的结合运动补偿算法及实验结果举例.....	132
3.4.1	采用基于回波数据的运动补偿方法时的 SAR 成像算法流程.....	132
3.4.2	实测数据的分析和处理.....	133
3.4.3	几种基于回波数据的运动补偿的性能比较.....	138
	参考文献.....	141

第 4 章 各类目标的逆合成孔径雷达成像	143
4.1 飞机和舰船目标的 ISAR 成像	145
4.1.1 基于时频分析的飞机目标瞬时成像	145
4.1.2 舰船目标 ISAR 成像	147
4.1.3 具有旋转部件的飞机目标 ISAR 成像	150
4.2 高速自旋目标的高分辨成像	155
4.2.1 窄带雷达高速自旋目标二维成像	155
4.2.2 宽带雷达高速自旋目标的三维成像	159
4.3 稀疏频带和稀疏孔径 ISAR 成像	165
4.3.1 稀疏频带成像	165
4.3.2 稀疏孔径成像	170
4.4 基于稀疏重建的 ISAR 超分辨成像	174
4.4.1 信号模型	175
4.4.2 贝叶斯超分辨 (BSR) 成像方法	175
4.4.3 改进贝叶斯超分辨 (IBSR) 成像方法	176
4.4.4 实测数据实验	177
参考文献	178
第 5 章 合成孔径雷达运动目标检测	181
5.1 SAR-GMTI 的基本原理	183
5.1.1 单孔径 SAR-GMTI 处理方法	183
5.1.2 多孔径 SAR-GMTI 处理方法	184
5.2 图像误差补偿方法	199
5.2.1 SAR 图像去相干因素分析	200
5.2.2 M. Soumekh 的子空间投影补偿方法	204
5.3 多孔径 SAR-GMTI 技术	207
5.3.1 MSAR 概念	207
5.3.2 VSAR 处理技术	209
5.3.3 空时处理和空时频处理技术	212
参考文献	217
第 6 章 多维干涉合成孔径雷达测绘新技术	219
6.1 传统 InSAR 的基本原理	220
6.1.1 InSAR 几何模型	220
6.1.2 InSAR 处理基本流程	222
6.1.3 传统 InSAR 的局限性	223
6.2 InSAR 技术的发展趋势	225
6.3 先验 DEM 辅助 InSAR 处理新技术	228

6.3.1	先验 DEM 辅助 SAR 图像配准	228
6.3.2	先验 DEM 辅助 InSAR 相位滤波	231
6.3.3	先验 DEM 辅助 InSAR 相位解缠绕	232
6.4	新体制：多基线 InSAR 技术与应用	236
6.4.1	多基线 InSAR 技术的优势	237
6.4.2	多基线 InSAR 相位解缠绕	238
6.4.3	多基线 InSAR 解高程层叠	250
	参考文献	260

第 1 章

合成孔径雷达成像的 基本原理和算法

- ◆ 宽带信号的脉冲压缩
- ◆ 运动平台的合成孔径雷达的横向分辨
- ◆ 距离-多普勒 (R-D) 算法
- ◆ 线频调变标算法
- ◆ 用波数域分析合成孔径雷达的横向分辨率
- ◆ 距离徙动算法 (RMA)

雷达是对目标进行检测和定位的信息系统，雷达的对象一般是“点”目标。它以点目标作为输入，而以接收目标回波时延和天线波束指向作为输出。雷达系统根据输出来确定输入（目标位置），属于逆滤波处理。由于输入为“点”目标，系统的冲激响应即为其输出。通过不断发射和接收电波及天线扫描，可以观测到周围地区目标（包括动目标和地域）的分布和运动状况。

合成孔径雷达系统置于运动平台之上，其输入是所需观测的景物，而其输出是雷达平台运动过程中接收到的回波序列，它的逆滤波过程是从平台运动过程接收到的回波序列得到场景的图像。

根据 BONN 一次近似，场景可看成由一系列散射点所组成，雷达回波为天线波束覆盖范围内众多散射点回波的线性叠加。逆滤波的任务是利用雷达对点目标的冲激响应来处理输出的二维（距离和方位）回波序列，从而得到众多散射点按原来分布的场景平面图像。

按雷达平台运动和发、收脉冲波的规律，计算场景中某一点目标的冲激响应是不困难的。但如果场景足够大，而且距离不太远，那么对合成孔径来说，相当于工作在近场，远近不同的点目标的冲激响应会有所差别，点目标冲激响应的空变性为逆滤波处理带来许多困难。因而针对不同情况提出了各种成像算法。

点目标回波相对发射脉冲时延确定了点目标的径向距离，即点目标在快时间域的信息。在雷达平台直线运动过程中，回波的相位不断变化，亦即回波沿合成孔径的相位分布，这是点目标在慢时间域的信息。于是可得点目标的二维冲激响应。显然点目标在快、慢二维时间平面里为曲线，而且点目标的位置不同会有变化，即二维冲激响应具有空变性。雷达的工作模式不同，如雷达波束指向为正侧视或斜视，扫描方式为条带式或聚束式等，其点目标冲激响应也会有所差别。雷达成像的任务就是根据不同工作模式以及不同技术指标（如分辨率和幅宽等），研究相应的算法。本书的任务是介绍合成孔径雷达成像算法的新发展，而这些新发展都是以原有算法为基础的。为便于读者阅读，我们在第 1 章里将各种基本模式用系统分析的观点作一些介绍。

成像的重要指标之一是分辨率，快时间域的分辨率取决于脉冲宽度，通常都是采用宽频带信号（一般为线性调频）通过脉冲压缩得到窄脉冲；而慢时间域的高分辨率要求有长的合成孔径，即对所观测的点目标移动的雷达波束应有足够的覆盖长度，然后作波束聚焦处理，得到横向高分辨率。

本章在讨论二维成像算法之前，先介绍有关的快、慢时域信号处理。

1.1 宽带信号的脉冲压缩

合成孔径雷达依靠发射宽带信号，利用脉冲压缩来得到高的距离分辨率。对此，本节将从散射点模型出发，对脉冲压缩进行讨论。具体包括：宽带信号的逆匹配滤波、脉冲压缩、线性调频信号和解线性调频处理。

1.1.1 宽带信号的逆滤波、匹配滤波和脉冲压缩^[1]

根据散射点模型，设散射点为理想的几何点^[2]，若发射信号为 $p(t)e^{j2\pi f_c t}$ ，将接收到

的回波作相干检波（即乘以 $e^{-j2\pi f_c t}$ ），对不同距离多个散射点目标，其基频回波可写成

$$s_r(t) = \sum_i A_i p\left(t - \frac{2R_i}{c}\right) \exp\left(-j\frac{4\pi f_c}{c} R_i\right) \quad (1.1)$$

式中， A_i 和 R_i 分别为第 i 个散射点回波的幅度和该时刻的距离； $p(\cdot)$ 为归一化的回波包络； f_c 为载波频率； c 为光速。

若以单频脉冲发射，脉冲越窄，信号频带越宽。雷达作用距离和发射信号能量有关，发射很窄的脉冲，要有很高的峰值功率，实际困难较大，通常都采用大时宽的宽频带信号，接收后通过脉冲压缩处理得到窄脉冲。为此，我们将式 (1.1) 的回波信号转换到频域来讨论如何处理，这时有

$$S_r(f) = \sum_i A_i P(f) \exp\left[-j\frac{4\pi(f_c + f)}{c} R_i\right] \quad (1.2)$$

对回波信号作匹配滤波的脉冲压缩，其输出为

$$\begin{aligned} s_{rM}(t) &= F_{(f)}^{-1} \left[S_r(f) P^*(f) \right] \\ &= F_{(f)}^{-1} \left[\sum_i A_i P(f) P^*(f) \exp\left(-j\frac{2\pi(f_c + f)}{c} R_i\right) \right] \\ &= \sum_i A_i \exp\left(-j\frac{4\pi f_c}{c} R_i\right) \text{psf}\left(t - \frac{2R_i}{c}\right) \end{aligned} \quad (1.3)$$

式中， $P^*(\cdot)$ 为 $P(\cdot)$ 的复共轭，而

$$\text{psf}(t) = F_{(f)}^{-1} \left[|P(f)|^2 \right] \quad (1.4)$$

$\text{psf}(\cdot)$ 称为点散布函数 (point spread function)，它可确定分辨率。在时域上看，滤波相当于信号与滤波器冲激响应的卷积，对一已知波形的信号作匹配滤波，其冲激响应为该波形的共轭倒置。当波形的时间长度为 T_p 时，卷积输出信号的时间长度为 $2T_p$ 。实际上，匹配滤波可实现脉冲压缩，输出主瓣的宽度为 $1/B$ (B 为信号的频带宽度，为降低副瓣而作加权，主瓣要展宽一些)，即距离分辨率为 $c/(2B)$ ，脉压信号的 B 通常较大 ($BT_p \gg 1$)，输出主瓣是很窄的，时宽为 $2T_p$ 的输出中，其余部分区域为幅度很低的副瓣。

当反射体是静止的离散点时，回波为一系列不同时延和复振幅的已知波形之和，对这样的信号用发射波形作匹配滤波时，由于滤波是线性过程，相当于分别处理后叠加。如果目标长度相应的回波距离段为 Δr ，其相当的时间段为 ΔT ($=2\Delta r/c$)，考虑到发射信号时宽为 T_p ，则目标所对应的回波时间长度为 $\Delta T + T_p$ ，而匹配滤波后的输出信号长度为 $\Delta T + 2T_p$ 。虽然如此，具有离散点主瓣的时间段仍只有 ΔT ，两端的部分只是振幅很小的副瓣区，没有应用价值。

应当指出，通过卷积直接作匹配滤波脉压的运算量相对较大，通常在频域处理，在频域通过共轭相乘再作 IFFT 求得。需要注意的是，两离散信号频域相乘相当于它们在时域作圆卷积，为使圆卷积与线性卷积等价，待处理的时域信号须加零延伸，避免圆卷积时发生混叠。

匹配滤波可获得最大的脉冲信噪比，实际处理中，为了压低信号副瓣，通常是匹配函数加窗，然后加零延伸为 $\Delta T + T_p$ 的时间长度，作傅里叶变换后并作共轭，与接收信号的傅里叶变换相乘后，作傅里叶逆变换，取前 ΔT 时间段的有效数据段。为了便于采用快速傅里叶变换，可能对匹配函数要补更多的零，对接收信号也要补零。脉压处理过程如图 1.1 所示，其中虚框部分可事先计算好，以减少运算量。

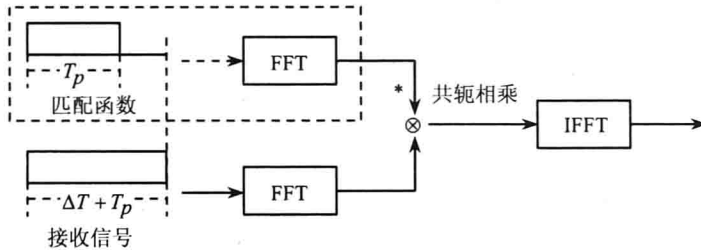


图 1.1 匹配滤波脉压示意图

距离匹配滤波压缩后，不管是否补零，其距离分辨率都为 $c/(2B)$ ，距离采样率为 $c/(2F_s)$ ，其中 F_s 为采样频率， $T_s = 1/F_s$ 为采样周期，距离采样周期要求小于等于距离分辨单元长度。

1.1.2 线性调频信号和解线频调处理^[3,4]

大时宽宽频带信号可以有多种形式，如各种脉冲编码等，但在雷达里用得最多的是线性调频 (LFM) 脉冲信号。由于线性调频信号的特殊性质，对它的处理不仅可用一般的匹配滤波方式，还可用特殊的解线频调 (Dechirping) 方式来处理。

解线频调脉压方式是针对线性调频信号提出的，对不同延迟时间信号进行脉冲压缩。在一些特殊场合，它不仅运算简单，而且可以简化设备，已广泛应用于 SAR 和 ISAR 中作脉冲压缩。应当指出，解线频调处理和匹配滤波虽然基本原理相同，但两者还是有些差别的，为了能正确利用解线频调方式作脉冲压缩，我们对它作一些说明。由于单个脉冲脉压后通常还要对脉冲序列作相干处理，这里讨论相干序列信号。

为使信号具有好的相干性，发射信号序列的载频必须十分稳定。设载频信号为 $e^{j2\pi f_c t}$ ，脉冲信号以重复周期 T 依次发射，即发射时刻 $t_m = mT$ ($m=0, 1, 2, \dots$)，称为慢时间。以发射时刻为起点的时间用 \hat{t} 表示，称为快时间。快时间用来计量电波传播的时间，而慢时间是计量发射脉冲的时刻，雷达平台运动以慢时间计。这两个时间与全时间的关系为： $\hat{t} = t - mT$ ， t 称为全时间。因而发射的 LFM 信号可写成

$$s(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right) \exp\left[j2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2}\gamma \hat{t}^2\right)\right] \quad (1.5)$$

其中 $\text{rect}(u) = \begin{cases} 1 & |u| \leq \frac{1}{2} \\ 0 & |u| > \frac{1}{2} \end{cases}$ ， f_c 为中心频率， T_p 为脉冲宽度， γ 为调频率。

解线频调是用一时间固定，频率、调频率与回波相同而宽度更长的 LFM 信号作为参考信号，用它和回波作差频处理。设参考距离为 R_{ref} ，则参考信号为