



压缩感知雷达成像

Compressed Sensing Radar Imaging

杨俊刚 黄晓涛 金 添 著



科学出版社

压缩感知雷达成像

杨俊刚 黄晓涛 金 添 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

压缩感知理论是近年来信号处理领域的一项重大革新和突破,而雷达成像正是压缩感知理论的重要应用方向之一。本书介绍了压缩感知雷达成像的基本概念,建立了雷达成像的统一数学框架。在该框架下分析了压缩感知雷达成像方法与传统雷达成像方法,并解释了它们之间的内在联系,目的是为读者提供一个关于雷达成像理论与方法的系统而清晰的概念。本书还介绍了压缩感知雷达成像方法在实际应用中所面临的挑战以及初步的解决方法,包括信号形式、重建运算量和杂波的影响,模型误差补偿以及分布式场景的稀疏表示。

本书适合应用数学和信号处理领域相关研究方向的高校教师、科研人员使用,也可作为相关专业的高年级本科生和研究生的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

压缩感知雷达成像/杨俊刚,黄晓涛,金添著. —北京:科学出版社, 2014

ISBN 978-7-03-041833-3

I. ①压… II. ①杨… ②黄… ③金… III. ①雷达成像—研究
IV. ①TN957.52

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第205982号

责任编辑:余 丁 王 苏 / 责任校对:邹慧卿
责任印制:肖 兴 / 封面设计:蓝 正

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

http://www.sciencep.com

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年9月第一版 开本:720×1000 1/16

2014年9月第一次印刷 印张:10 1/2 彩插:4

字数:202 000

定价:55.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

雷达成像技术自提出以来发展至今，其主要的理论基础仍然是匹配滤波。匹配滤波方法是一个线性过程，并且不依赖任何目标先验信息，具有实现简单和对任何场景都能得到稳定结果的优点。但是匹配滤波方法的局限性也同样明显，由于没有利用任何先验信息，其性能难以取得突破。匹配滤波方法最主要的局限是必须根据 Shannon-Nyquist 采样定理对信号进行采样并且成像分辨率受限于系统带宽。也就是说，匹配滤波方法对数据的要求很高，但是得出的结果却性能有限。随着雷达成像技术的发展，人们对成像性能指标的要求越来越高，而匹配滤波方法难以满足这些要求。

本书第 2 章从更一般的数学模型来理解雷达成像。雷达成像可以看成是一个逆问题，即通过测量场景的电磁散射信号来反推出场景信息。由于物理限制，测量数据的信息量是有限的，如有限的带宽和有限的观测角。但是人们对场景信息详细程度的追求是无止境的，因此希望得到的场景信息量可能会大于测量数据的信息量。所以雷达成像通常是一个病态的逆问题。本书论证了经典的最小二乘估计方法无法求解病态的逆问题，而匹配滤波方法则是对最小二乘估计中的不可逆或者不稳定部分作了近似处理，结果就是匹配滤波得到的结果具有一定的主瓣宽度并且具有旁瓣效应，因此匹配滤波得到的是模糊了细节信息的场景图像。

最小二乘估计方法无法求解的原因依然是没有利用先验信息。而正则化方法正是在最小二乘估计的基础上增加了约束项，使原本病态的逆问题得到稳定的解。为使增加约束后得到的解更靠近真实值，增加的约束必须符合场景的先验信息。本书进一步用 Bayesian 最大后验概率估计理论解释了正则化方法的合理性，论证了利用先验信息的正则化方法和 Bayesian 估计理论本质上的一致性。

在雷达成像中，稀疏性是最常见的先验信息。因此，本书研究的重点是稀疏信息的正则化雷达成像方法，而压缩感知方法则是利用稀疏信息的正则化方法的一个特例。由于利用了稀疏性这个先验信息，正则化（包括压缩感知）雷达成像方法可以提高成像结果的质量并且在少量数据的情况下依然稳定。本书就将稀疏信息的正则化（包括压缩感知）方法应用于雷达成像中的若干问题展开了深入研究，包括适合实现稀疏采样的信号形式、重建过程运算量问题、杂波问题、模型误差问题和分布式场景的稀疏表示问题。

在信号形式方面，以步进频率信号为基础，本书第 3 章介绍基于压缩感知的随机频率 SAR 成像方法。在目标稀疏的情况下，可以利用压缩感知理论显著减少所需要的频点数，即可以通过发射少量随机频点准确重建目标图像，从而克服了

传统 Shannon-Nyquist 采样定理导致的参数限制。与常用的 LFM 波形相比,该方法具有适合硬件实现的优点。基于压缩感知的随机频率 SAR 成像方法能够显著地增大成像距离宽度,同时保持高分辨率。

在重建方法方面,针对一般压缩感知重建过程运算量过大的问题,本书第 4 章介绍分段快速重建方法。该方法的基本思路是把一个大场景的重建分割成若干小场景的重建,从而达到降低运算量的目的。由于雷达信号为场景内所有回波的叠加,所以在原始数据域是无法分段的。本书采用的分段重建步骤为:由雷达数据重建距离像;对距离像分段;根据子段距离像重建子段场景;子段场景拼接成整幅场景。分段重建方法的运算量和所需内存空间大大低于一般重建方法,而重建精度几乎相同。

在杂波问题方面,针对稀疏 MIMO 阵列前视 GPR 成像中的杂波特性,本书第 5 章介绍杂波抑制预处理方法和杂波环境下的正则化参数确定方法。在前视 GPR 成像中,地雷等感兴趣的稀疏目标往往被地表杂波包围。本书介绍的方法首先在目标重建之前抑制方位杂波和近距杂波,减轻重建区域外杂波的影响。在重建过程中,通过控制未重建杂波能量的比例来控制重建目标的比例,该方法能够在杂波环境下准确重建出稀疏目标。

在模型误差方面,本书第 6 章介绍结合观测位置误差估计和补偿的压缩感知雷达成像方法。该方法采用迭代结构,首先根据观测模型重建出目标,然后利用重建得到的目标估计观测位置误差,再用估计得到的观测位置误差更新观测模型并进入下一个迭代。其中,目标重建步骤采用的是一般稀疏重建方法,而观测位置误差估计步骤则转换成一组无约束优化问题并通过基于梯度的优化方法求解。该方法能够同时精确重建目标和估计观测位置误差。

在场景稀疏表示方面,针对分布式场景的相位可能具有随机特性从而导致无法对复场景进行稀疏表示的问题,本书第 7 章介绍改进的基于幅度稀疏表示的正则化雷达成像方法。在已有方法的基础上,增加利用场景幅度的实值先验信息和稀疏表示中的系数分布先验信息。由于利用更充分的先验信息,该改进方法具有更好的重建效果,同时所需的计算复杂度也更低。

本书的研究工作受到国家自然科学基金项目(61401474, 61271441)和国防科学技术大学校预研项目(CJ12-04-02)的资助。需要特别感谢英国爱丁堡大学的 John Thompson 教授,书中的许多内容都是作者在爱丁堡大学留学期间,在 John Thompson 教授的指导和帮助下完成的。还需要特别感谢教研室的周智敏教授,周教授对作者的研究工作给予了极大的关心和支持。

杨俊刚

2014 年 3 月

于国防科学技术大学

目 录

前言

第 1 章 压缩感知雷达成像的研究背景	1
1.1 研究背景和意义	2
1.1.1 雷达成像理论与方法的发展历程	2
1.1.2 压缩感知雷达成像方法的意义	9
1.2 压缩感知雷达成像的研究现状	10
1.3 压缩感知雷达成像的难点与挑战	13
1.4 本书内容安排	15
第 2 章 雷达成像的统一数学模型	19
2.1 雷达成像的观测模型	19
2.2 雷达成像方法的统一推导	22
2.2.1 匹配滤波类方法	23
2.2.2 正则化方法	23
2.2.3 压缩感知方法	24
2.3 利用稀疏信息的正则化方法	26
2.3.1 目标稀疏特性	27
2.3.2 准确重建的条件	27
2.3.3 重建算法	28
2.3.4 模型误差的影响	29
2.4 本章小结	29
第 3 章 基于压缩感知的随机频率 SAR 成像	31
3.1 步进频率 SAR 成像	33
3.1.1 步进频率波形	33
3.1.2 成像几何与脉冲串内距离差	35
3.1.3 脉冲串内距离差补偿	37
3.1.4 步进频率信号 Stolt 插值	38
3.1.5 步进频率 SAR 成像处理流程	39
3.2 步进频率 SAR 系统参数制约	40
3.3 压缩感知随机频率 SAR 成像	41

3.3.1	离散频率信号 SAR 观测模型	42
3.3.2	压缩感知成像方案	44
3.3.3	目标重建算法	45
3.4	仿真和实测数据结果	45
3.4.1	步进频率 SAR 仿真结果	45
3.4.2	步进频率 SAR 实测数据结果	47
3.4.3	压缩感知随机频率 SAR 仿真结果	49
3.4.4	压缩感知随机频率 SAR 实测数据结果	55
3.5	本章小结	56
第 4 章	压缩感知 SAR 分段快速重建方法	58
4.1	压缩感知 SAR 成像模型	59
4.1.1	SAR 成像模型	59
4.1.2	压缩感知成像模型	61
4.2	分段重建方法	61
4.2.1	距离像重建	63
4.2.2	距离像分割	64
4.2.3	子段场景重建	65
4.2.4	子段场景拼接	66
4.3	参数分析	66
4.3.1	准确重建的条件	66
4.3.2	重建运算量	68
4.3.3	所需存储空间	69
4.4	仿真和实测数据结果	69
4.4.1	点目标仿真	69
4.4.2	SAR 图像仿真	73
4.4.3	实测数据结果	75
4.5	本章小结	77
第 5 章	杂波环境下稀疏 MIMO 阵列前视 GPR 成像	79
5.1	MIMO 阵列步进频率 GPR	81
5.1.1	MIMO 阵列	81
5.1.2	步进频率波形	82
5.1.3	MIMO 阵列步进频率 GPR 成像模型	83
5.2	稀疏 MIMO 阵列和稀疏频率 GPR 成像	84
5.2.1	基于压缩感知的 GPR 成像方法	84

5.2.2	准确重建的条件	85
5.2.3	场景网格密度选择	85
5.3	重建区域外的杂波抑制	86
5.3.1	方位杂波抑制	87
5.3.2	近距杂波抑制	88
5.4	杂波环境下的正则化参数选择	89
5.5	仿真和实测数据结果	91
5.5.1	仿真结果	91
5.5.2	角反射器实测数据结果	95
5.5.3	浅埋地雷实测数据结果	97
5.6	本章小结	101
第 6 章	压缩感知雷达成像观测位置误差补偿	102
6.1	包含观测位置误差的雷达成像模型	103
6.1.1	雷达成像几何模型	103
6.1.2	信号模型	104
6.2	结合观测位置误差估计的压缩感知成像方法	106
6.2.1	目标重建	107
6.2.2	观测位置误差估计	108
6.2.3	计算复杂度和收敛性分析	110
6.3	仿真和实测数据结果	110
6.3.1	仿真结果	110
6.3.2	步进频率雷达轨道实验结果	116
6.3.3	机载 SAR 实验结果	118
6.4	本章小结	121
第 7 章	基于幅度稀疏表示的正则化雷达成像方法	122
7.1	SAR 成像模型	124
7.2	已有的幅度稀疏表示重建方法	125
7.3	改进的幅度稀疏表示重建方法	126
7.3.1	幅度的实值约束	127
7.3.2	利用部分基的稀疏表示方法	127
7.3.3	改进方法的框架和具体求解方法	128
7.3.4	二维稀疏表示结构	130
7.3.5	计算复杂度和参数分析	131
7.4	仿真和实测数据结果	132

7.4.1 一维成像仿真	132
7.4.2 二维成像仿真	135
7.4.3 实测数据结果	138
7.5 本章小结	140
参考文献	141
附录 A 由二维匹配滤波推导后向投影算法	153
附录 B 由二维匹配滤波推导 ω K 算法	154
附录 C 步进频率波形距离差补偿项推导	156
附录 D 数据误差关于距离的导数	158
彩图	

第 1 章 压缩感知雷达成像的研究背景

雷达是由第二次世界大战中的军事需求发展起来的，早期雷达的分辨率很低，其分辨单元通常远大于目标，因而雷达是将观测对象视为点目标来测定其位置和运动参数的，目标在雷达屏幕上显示为一个亮点。随着器件水平和信号处理技术的不断发展，雷达的分辨率越来越高，人们希望在雷达屏幕上能看到目标的真实图像，而不仅是一个亮点。当雷达的分辨率远小于目标尺寸时，就有可能对目标成像。雷达成像技术是以微波频段电磁波为探测信号，利用高分辨率雷达获得观测对象图像的信息获取技术。借助合成孔径或者阵列技术，高分辨率雷达可以对观测对象进行高精度的二维成像，极大地提高了雷达的信息感知和获取能力。雷达成像技术的出现，使雷达具有了对目标进行成像和识别的能力，并在微波遥感方面表现出越来越大的潜力。与传统光学成像或红外成像技术相比，雷达成像技术不受天气和光照条件等的限制，可以穿透云层、薄雾和硝烟等，对感兴趣的区域和目标进行全天时、全天候的侦察监视。工作在较低频段的成像雷达还具有一定的穿透能力，能够对隐蔽物体进行成像和探测。

雷达成像技术自提出以来发展至今，其主要的理论基础仍然是匹配滤波。匹配滤波方法是一个线性过程，并且不依赖任何目标先验信息，具有实现简单和对任何场景都能得到稳定结果的优点。但是匹配滤波方法的局限性也同样明显，由于没有利用任何先验信息，其性能难以取得突破。匹配滤波方法最主要的局限是必须根据 Shannon-Nyquist 采样定理对信号进行采样并且成像分辨率受限于系统带宽。也就是说，匹配滤波方法对数据的要求很高，但是得出的结果却性能有限。随着雷达成像技术的发展，人们对成像性能指标的要求越来越高，而匹配滤波方法难以满足这些要求。

如果从更一般的数学模型来理解雷达成像，雷达成像可以看成是一个逆问题，即通过测量场景的电磁散射信号来反推出场景信息。由于物理限制，测量数据的信息量是有限的，如有限的带宽和有限的观测角。但是人们对场景信息详细程度的追求是无止境的，因此，希望得到的场景信息量可能会大于测量数据能够提供的信息量。所以雷达成像通常是一个病态的逆问题。经典的最小二乘估计方法无法求解病态的逆问题，而匹配滤波方法对最小二乘估计中的不可逆或者不稳定部分作了近似处理，近似处理的结果就是匹配滤波得到的结果具有一定的主瓣宽度并且具有旁瓣效应，因此，匹配滤波得到的是模糊了细节信息的场景图像。

最小二乘估计方法无法求解的原因依然是没有利用先验信息，而正则化方法

正是在最小二乘估计的基础上增加了约束项,使原本病态的逆问题得到稳定的解。为使增加约束后得到的解更靠近真实值,增加的约束必须符合场景的先验信息。正则化方法的合理性可以用 Bayesian 最大后验概率估计理论来解释,利用先验信息的正则化方法和 Bayesian 估计理论本质上是一致的。

在雷达成像中,稀疏性是最常见的先验信息,因此,本书研究的重点是利用稀疏信息的正则化雷达成像方法。而近年来提出的压缩感知方法则是利用稀疏信息的正则化方法的一个特例。由于利用了稀疏性这个先验信息,正则化(包括压缩感知)雷达成像方法可以提高成像的质量并且在少量数据的情况下依然稳定。本书就将稀疏信息的正则化(包括压缩感知)方法应用于雷达成像中的若干问题展开了深入研究,包括适合实现稀疏采样的信号形式、重建过程运算量问题、杂波问题、模型误差问题和分布式场景的稀疏表示问题。本书的研究对象主要是二维成像雷达,包括合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)和地表穿透雷达(ground penetrating radar, GPR)。本书的部分内容对其他雷达成像系统甚至非雷达成像系统也有借鉴意义。

1.1 研究背景和意义

1.1.1 雷达成像理论与方法的发展历程

1. 雷达成像概念和理论的提出

合成孔径雷达^[1-7]是最早提出并得到实用的成像雷达。合成孔径雷达的思想可追溯到 1951 年 6 月,美国 Goodyear 宇航公司的 Wiley 提出了“多普勒波束锐化”的思想,将多普勒频率分析应用于相干移动雷达,通过频率分析可以改善雷达的角分辨率。根据这一原理,就可以利用雷达得到二维地表图像。同年,美国 Illinois 大学控制系统实验室的一个研究小组在 Sherwin 的领导下开始了相关的研究。最初采用非相干雷达进行实验,证实了“多普勒波束锐化”的概念。之后又用 X 波段相干雷达系统,采用非聚焦合成孔径方式,于 1953 年 7 月得到了第一批非聚焦 SAR 图像。

1953 年夏,在美国 Michigan 大学举办的研讨会上,许多学者提出了利用载机运动可将雷达的真实天线合成为大尺寸的线性天线阵列的概念,即没有必要像真实天线阵列那样在各个位置都放置天线阵元,只需要用一个天线,通过在运动中收发信号即可等效为天线阵列。这次研讨会上明确了聚焦和非聚焦工作模式,“合成孔径”的概念也是在这次会上提出的。

2. 光学处理方法

合成孔径雷达的理论和概念提出后,研究人员开始研究系统实现的问题。当

时还认识到,信号的存储和处理是实现合成孔径雷达成像的关键。许多科学家为此做出了努力。Michigan 大学雷达和光学实验室的 Cutrona 等发现,利用光学透镜组能够完成合成孔径成像的信号处理任务。他们与德州仪器公司合作,于 1957 年 8 月成功研制出第一个聚焦式合成孔径雷达系统,获得了第一幅全聚焦 SAR 图像。当时高相干的宽带信号产生、发射和接收,信号的存储和处理都还是难题,数字处理技术也很落后,是用光学设备实现复杂的二维成像处理^[1]。从此, SAR 技术进入实用性阶段,而光学处理方法也成为第一个应用的雷达成像处理方法。

光学成像处理方法的本质是通过一系列光学器件,在模拟域实现二维匹配滤波。利用傅里叶光学原理^[1],聚焦可以通过激光波束和透镜组来完成。将雷达回波数据记录在黑白胶片上,用一个激光束瞄准并照射胶片,利用透镜组将这些数据进行一次实时二维傅里叶变换,然后通过衍射光栅来聚焦数据,再经过另一组透镜进行傅里叶变换,就可以在胶片上获得最终的图像。

通过光学成像处理方法可以得到聚焦良好的图像,但其主要的缺点是不灵活。虽然可以改变透镜参数或重新安排光路,实现不同的运算,但是实际操作非常困难和复杂。虽然除去胶片冲洗时间,数据处理是实时的,但是仍然需要一个熟练的操作员来控制图像的质量,并且很难做到自动化处理。另外,最终图像的动态范围也受限于输出胶片。

3. 数字处理方法

20 世纪 70 年代,随着数字技术的迅速发展,光学成像处理方法很快被数字处理所代替。1978 年,美国成功发射了 SEASAT 卫星,开创了星载合成孔径雷达应用的历史。SEASAT 之后,人们开始集中力量开发 SAR 数字处理器。70 年代后期,256KB 内存对于计算机来说已经相当大了,并且当时的磁盘容量和速度在今天看来非常低。尽管如此,1978 年还是建立了一台 SAR 数字处理器来处理 SEASAT 数据,该处理器处理一幅 $40\text{km}\times 40\text{km}$ 大小、25m 分辨率的图像需要 40h。同样的数据用今天的普通计算机处理也只需要几十秒。同年,MDA 和喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)同时研究出了精确的成像处理算法:距离多普勒(range Doppler, RD)算法^[3]。RD 算法是第一个成熟应用的成像处理算法,至今仍在广泛使用。数字处理方法的理论框架依然是匹配滤波,只不过是数字器件实现。

4. 匹配滤波类成像算法的改进和完善

随着雷达成像技术的发展,为了满足实际应用的需求,各种成像算法不断改进和完善。1978 年以后, RD 算法经过了多次改进。1984 年, JPL 对 RD 算法提出了二次距离压缩(secondary range compression, SRC)改进^[8],用以处理中等斜

视下的数据。

其他的处理算法也不断涌现。为了改善 RD 算法的精度,出现了 Chirp Scaling 算法^[9]。该算法通过对 Chirp 信号进行频率调制,实现对信号的尺度变换(变标),校正不同距离门上的信号距离徙动(range cell migration, RCM)差量,使所有信号具有一致的 RCM,然后在二维频域通过相位相乘很方便地对其进行校正。为进一步提高处理精度,Chirp Scaling 算法也有很多改进和变形,如扩展 Chirp Scaling (extended chirp scaling, ECS)算法^[10]、非线性 Chirp Scaling (nonlinear chirp scaling, NCS)算法^[11]和频率变标(frequency scaling, FS)算法^[12]。这些都是针对不同系统参数,为减小近似误差而进行的改进。

为进一步减小近似误差,出现了 ωK 算法^[13-15]。 ωK 算法在二维频域通过一种特殊的操作来校正距离方位耦合与距离时间和方位频率的依赖关系,该操作就是 Stolt 映射(或者称为 Stolt 插值)。如果不考虑插值误差和采用驻定相位点原理(principle of stationary phase, POSP)^[3]推导二维频谱引入的近似, ωK 算法能够完全匹配 SAR 二维信号,因此其具有很高的聚焦精度,从而具有对宽孔径或大斜视数据的处理能力。原始 ωK 算法的缺点是不易结合精确的运动补偿,为克服这个缺点, ωK 算法也出现了改进版本,即扩展 ωK (extended Omega-K, EOK)算法^[16-17]。EOK 算法通过采用修正 Stolt 插值将 SAR 成像处理中的距离聚焦和方位聚焦分离,从而使其能够灵活地结合运动补偿方法,这大大提高了算法的实用性。

以上几类算法都可以归为频域成像算法,其主要思路是在频域实现 SAR 回波信号的匹配。而近年来针对特定的系统参数,为了提高成像聚焦的精度或者便于工程实现,频域算法仍然在持续改进^[18-21]。

成像算法的另一个分支是时域成像算法,典型的时域成像算法是后向投影(back-projection)算法。理论上,后向投影算法能够对 SAR 二维信号精确匹配,不存在任何近似,是匹配滤波框架下最精确的成像算法,也是匹配滤波最直接的实现方式。但是,后向投影算法需要巨大的运算量,在实际应用中很少采用,通常只能用于小数据量情况。为了降低原始后向投影算法的运算量并且在实际应用中易于实现,才发展出了频域成像算法,即前面提到的 RD 系列算法、Chirp Scaling 系列算法和 ωK 系列算法等。这些频域成像算法都是通过一定的变换和近似,在频域实现匹配滤波。但是也有人沿用时域积累处理的思路,提出了各种快速投影算法^[22-28],用以降低运算量。最典型的如快速因式分解后向投影算法^[25]。

以上这些算法就是目前仍在广泛采用的成像算法。而这些算法其实都是基于同一个理论框架,即先根据 Shannon-Nyquist 采样定律,把模拟信号数字化,然后在数字域实现匹配滤波,得到场景图像。至于匹配滤波的具体实现方式,需要综合考虑运算量,成像精度,是否适合工程实现等因素,于是出现了上述的各种算法。

匹配滤波是一个线性过程,其优点是实现简单,并且能得到稳定的结果,但

是其缺点也很明显，主要有以下两个。

(1) 分辨率受限于系统带宽，并且有旁瓣效应。受系统波形自相关函数的影响，一个理想点目标回波经匹配滤波后，将扩展为一个具有一定宽度和一定旁瓣的波形响应。也就是说，无法区分很近的两个点，只能得到模糊了细节信息的场景图像，并且由于主瓣宽度和旁瓣的相互影响，图像中通常会有大量的相干斑噪声。

(2) 需要以 Shannon-Nyquist 准则对模拟信号进行采样。为避免原始波形失真，采样频率要大于信号带宽。现代成像雷达的分辨率越来越高，系统带宽也越来越大，所需要的采样率也随之提高，这将对系统的硬件性能提出挑战。

5. 正则化雷达成像理论与方法

尽管匹配滤波仍然是目前大部分雷达成像方法的理论基础，但是其并不是理解雷达成像的唯一理论。实际上，跳出匹配滤波的框架，理解雷达成像更一般化的数学模型是逆问题求解。雷达成像是通过对场景的电磁散射进行有限的测量，希望反推出场景的电磁散射信息，即场景的图像。由于物理限制，在实际情况中只能得到有限的测量，如有限的带宽和有限的观测角。而对场景信息详细程度的追求是无止境的，所以场景信息的维度可能会远大于测量的维度。例如，通过雷达系统获得了某场景 512×512 点的回波数据，对于该场景，可以用一个离散网格来表示，并且希望得到该场景足够细腻的图像。因此，即使该场景尺寸很小，也希望网格的点数至少是 2048×2048 。雷达的观测过程可以用一个线性模型表示，而这个线性模型其实是一个线性方程组，测量的点数是方程的个数，而场景网格的点数是未知数的个数。很明显，此处线性方程组的个数小于未知数的个数，在没有其他信息的情况下，无法准确求解这些未知数。所以，雷达成像通常是一个病态的逆问题。

考虑到噪声的影响，解上述逆问题通常需要用到估计理论。雷达成像的观测过程是一个线性模型，可以得到目标的最佳估计（即最小方差无偏估计）的解析表达式。但是对于病态逆问题，这些表达式中往往含有不可逆或者不稳定的部分。匹配滤波其实是对这些表达式中的不可逆或者不稳定部分进行近似处理，使其能得到稳定的解。而这些近似处理导致的后果就是其分辨率受限于系统带宽并且具有旁瓣效应。关于这方面的详细数学论证将在本书第2章中介绍。

由于匹配滤波理论是从常规雷达中延续过来的，并且早期的成像雷达对分辨率的要求不高，所以很长一段时间内，雷达成像都是以匹配滤波为理论基础的。前面提到，对病态逆问题采取一定的近似处理可以推导出匹配滤波方法。实际上，对于病态逆问题还有另一种方法可以求解，那就是引入先验信息，将病态逆问题变为良态，这种方法称为正则化。正则化方法根据先验信息，对问题增加更多的

约束,从而使原本无法求解的逆问题变得可以求解。为使增加了约束条件得到的解靠近真实值,引入的先验信息必须符合实际情况。正则化方法的合理性可以用 Bayesian 最大后验概率估计理论来解释,利用先验信息的正则化方法和 Bayesian 估计理论本质上是一致的,本书将在第 2 章进行详细说明。

最简单也是最常见的正则化方法是引入未知量的二次函数约束,也就是 Tikhonov 正则化^[29-30]。这类正则化方法非常容易求解,但是二次约束会使得到的解更平滑,用在成像中会抑制图像中的边缘信息。也就是说,在成像中,二次约束与大多数实际情况并不是很吻合。因此,后来人们又提出了更符合实际情况的非二次约束^[31]。

早在 20 世纪 90 年代,正则化理论就被引入医学成像领域^[32-33],用以在数据不足的情况下改善图像质量。正则化理论还被用于图像恢复^[34-35]。到了 2000 年,Çetin 和 Logan 等提出将正则化理论应用于雷达成像。Çetin 在 SAR 成像中引入点增强和区域增强约束^[36],构造出正则化模型。该方法的优点是可以提高图像质量并且可工作于少量数据的情况下。Logan 将正则化理论用于 SAR 运动目标成像^[37],用以得到更精确的运动目标参数估计。此后,Çetin 等又在正则化雷达成像的理论和方法上展开了大量研究。正则化雷达成像理论与方法的研究现状将在 1.1.2 节详细介绍。

与匹配滤波方法相比,正则化雷达成像方法具有以下优势。

(1) 提高图像质量。正则化方法可以提高图像分辨率,并且可以减少旁瓣,由此也可以减少相干斑噪声。如果已知场景特定的先验信息,还可以增强目标的形状和边缘等特征。

(2) 可以减少测量数据量。正则化方法并不需要对模拟波形完全采样,只需要达到一定的测量数据量即可准确重建出目标图像。而所需的数据量通常可少于传统的 Shannon-Nyquist 采样数据量。因此,正则化成像方法可以简化硬件系统。

与传统的匹配滤波方法相比,正则化方法可以用更少的数据得到更好的结果,其原因是利用了先验信息。而在雷达成像中,最常见的先验信息就是稀疏性。根据目标的稀疏性、利用少量的测量数据、用正则化方法准确重建出目标图像这几个因素结合到一起,产生了目前广泛关注的压缩感知理论。

6. 压缩感知雷达成像方法

压缩感知^[38-54]是指利用信号的稀疏性,通过比传统 Shannon-Nyquist 采样更少的测量数据,准确恢复出原始信号。从信号处理的角度而言,压缩感知可以看成正则化方法的一个特例,在这个正则化方法中,利用的先验信息是稀疏性,要达到的目的是减少测量数据量。稍有不同的是两个理论提出的动机,正则化方法通常强调结果质量的提高,而压缩感知主要是为了减少测量数据量。

传统的信号采样过程必须满足 Shannon-Nyquist 采样定理,即采样频率不能低

于模拟信号频谱中最高频率的两倍。在信号压缩中,先对信号进行某种变换,如离散余弦变换或小波变换,然后对少数绝对值较大的系数进行压缩编码,舍弃零或接近于零的系数。通过对数据进行压缩,舍弃了采样获得的大部分数据,但不影响“感知效果”。这就说明传统的采样方法通常存在较大的冗余。传统的信息获取与处理流程如图 1.1 所示。

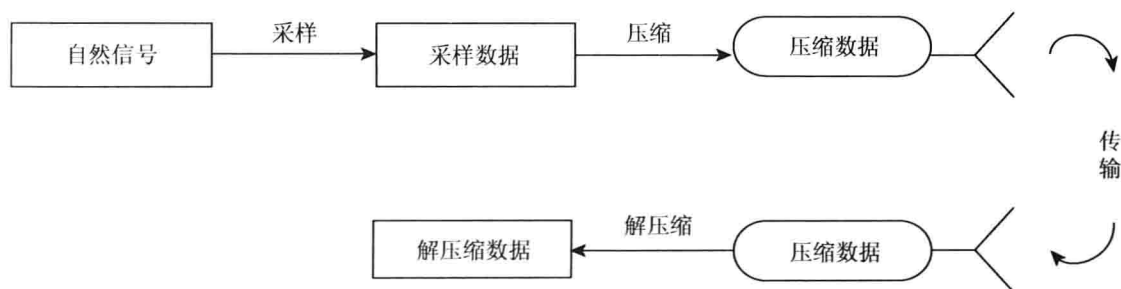


图 1.1 传统的信息获取与处理流程

如果信号本身是可压缩的,那么是否可以直接获取其压缩表示(即压缩数据),从而略去对大量冗余信息的采样呢? Candès 在 2006 年从数学上证明可以从部分傅里叶变换系数精确重构原始信号,为压缩感知奠定了理论基础。Candès、Tao 和 Donoho 在相关研究基础上,于 2006 年正式提出了压缩感知的概念^[38-41]。其核心思想是将压缩与采样合并进行,首先采集信号的非自适应线性投影(测量值),然后根据相应重构算法由测量值重构原始信号。压缩感知的优点在于信号的测量数据量可远小于传统采样方法的数据量,突破了 Shannon-Nyquist 采样定理的瓶颈。压缩感知正是利用了信号的稀疏性或可压缩性的先验信息,从而达到减少采集数据量的目的。压缩感知信息获取与处理流程如图 1.2 所示。

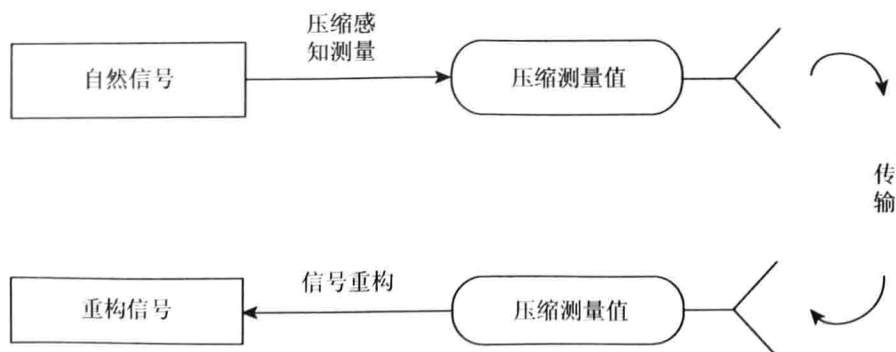


图 1.2 压缩感知信息获取与处理流程

压缩感知所利用的测量数据量通常远小于传统 Shannon-Nyquist 采样的数据量,若没有其他附加信息,是无法准确还原原始信号的。因此,从逆问题角度看,

利用压缩采样数据恢复原始信号通常也是一个病态的逆问题。而压缩感知的关键是利用了稀疏性这个先验信息，使原本病态的逆问题变为良态。这其实是正则化的过程，因此，从这个角度也说明了压缩感知是正则化方法的一个特例。本书将在第 2 章中详细论证两者之间的等价关系。

在雷达成像领域，随着成像分辨率的提高，传统的采样方法会给系统设计带来诸多困难。例如，随着距离向分辨率的提高，需要采用超大带宽信号，这就要求数据采集系统必须有很高的采样速率，这对硬件的性能提出了挑战。而在方位向则要求较密的采样间隔，这又会制约测绘带的宽度。较高的信号采样率和较密的方位采样间隔，都会造成数据量的增大，给存储和传输带来困难。根据压缩感知理论，若雷达场景稀疏或可压缩，则可应用远低于传统采样方法的数据量准确重构场景。由于利用压缩降采样代替了传统 Shannon-Nyquist 采样，所以压缩感知雷达成像技术具有降低系统的采样速率、降低采样数据量、增大测绘场景宽度等诸多优点。

在雷达成像中，很多场景是稀疏的或者可通过某种变换得到其稀疏表示。例如，场景中感兴趣的目标可能由少数主要散射点组成，场景中的运动目标等，这些都可以直接看成稀疏场景。在某些复杂场景情况下，也可能通过某种变换，如时频变换、小波变换等，得到其稀疏表示。近年来，研究人员开始注意到复杂场景相位的随机特性，即针对复杂分布式场景难以找到其稀疏变换基。即使在这种情况下，压缩感知仍然能在一定程度上应用。分布式场景尽管相位具有随机特性，但是其幅度仍然可稀疏表示或可压缩，Çetin 等提出了一种基于幅度稀疏表示的重建方法^[55]，能够重建场景的幅度，并能估计出场景相位。因此，压缩感知理论在雷达成像中具有广泛的应用前景。自 2006 年压缩感知理论正式提出后，已有大量学者正在研究将压缩感知理论用于雷达成像，具体研究现状将在 1.1.2 节详细介绍。

7. 雷达成像发展历程以及各类方法特性总结

综合上述内容，图 1.3 总结了雷达成像理论与方法的发展历程，表 1.1 归纳了各种雷达成像理论与方法的特性。

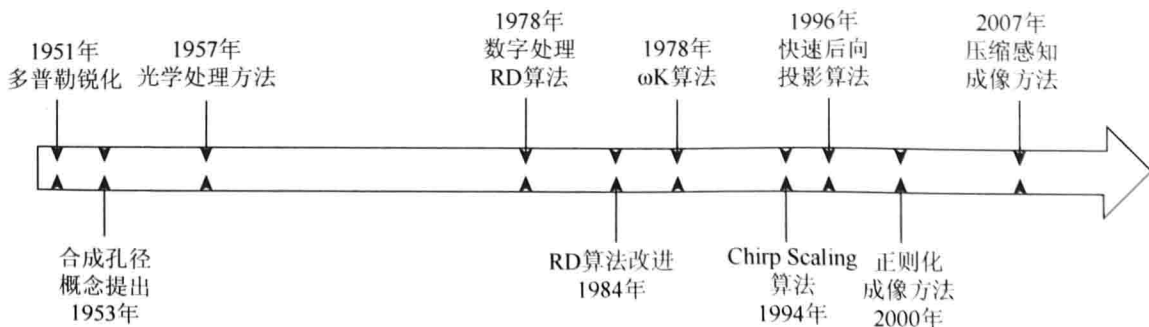


图 1.3 雷达成像理论与方法的发展历程