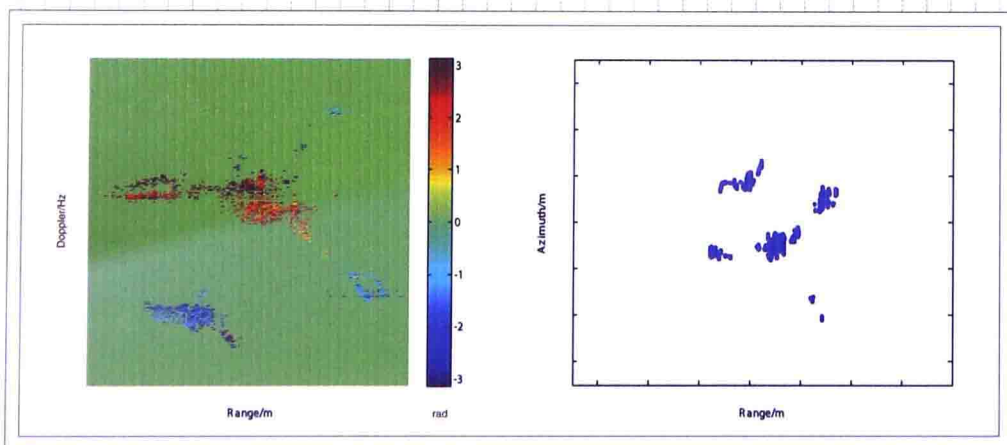


高分辨率雷达 运动目标成像探测技术

High Resolution Radar Moving Target Imaging Detection Technology

李道京 刘波 尹建凤 汤立波 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

高分辨率雷达运动目标 成像探测技术

李道京 刘 波 著
尹建凤 汤立波

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书基于高分辨率 SAR 和 ISAR,介绍了高分辨率雷达运动目标成像探测技术。全书共分 9 章。阐述了雷达成像与目标探测的关系,提出了把雷达成像技术应用于运动目标探测的概念;介绍了地基 ISAR/InSAR、机载和星载 SAR/InSAR 对运动目标探测和成像的研究情况,给出了仿真和实际数据的处理结果;最后对高分辨率星载毫米波空间碎片观测雷达系统进行了分析。

本书适合于从事雷达系统、雷达信号处理、微波成像和目标探测等领域科技人员参考使用,也可作为高等院校相关专业的教学和研究资料。

图书在版编目(CIP)数据

高分辨率雷达运动目标成像探测技术 / 李道京等著.

—北京:国防工业出版社,2014.9

ISBN 978-7-118-09552-4

I. ①高… II. ①李… III. ①高分辨率雷达—雷达成像—探测技术 IV. ①TN957.52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 215050 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经营

开本 710 × 1000 1/16 印张 12 $\frac{3}{4}$ 字数 230 千字

2014 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 68.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

现代雷达空间分辨率的不断提高,使以合成孔径雷达(SAR)和逆合成孔径雷达(ISAR)为代表的雷达成像技术在对地观测和目标识别领域获得了广泛的应用。从传统概念上讲,雷达成像技术和目标探测技术的主要区别不仅在于两者的空间分辨率不同,而且还在于两者的应用方向也不同,但高分辨率雷达的发展使两者的区别在不断减少。使用高分辨率雷达在原理上有助于提高目标的信杂比和探测精度,而目前高分辨率雷达所需的宽带微波信号形成和大规模集成电路技术日趋成熟,使其在工程上具备可实现性,用于运动目标探测的雷达分辨率不断提高。考虑到雷达成像技术和目标探测技术的信号处理都是基于匹配滤波的,两者有着天然的联系,基于高分辨率 SAR 和 ISAR,研究雷达成像技术在运动目标探测中的应用问题,并进一步形成成像探测技术,不仅对满足战场侦察需求具有重要的现实意义,而且对发展现代雷达技术具有重要的理论价值。

本书基于高分辨率 SAR 和 ISAR,介绍了高分辨率雷达运动目标成像探测技术,这是作者近年来在此技术领域研究工作的总结。本书共分 9 章。首先阐述了雷达成像与目标探测的关系,提出了把雷达成像技术应用于运动目标探测的概念;然后介绍了地基 ISAR/InISAR、机载和星载 SAR/InSAR 对运动目标探测和成像的研究情况,给出了仿真和实际数据的处理结果;最后对高分辨率星载毫米波空间碎片观测雷达系统进行了分析。

长期以来,雷达工程师很少将雷达成像和目标探测的概念联系在一起,如目标探测时注重信噪比和信杂比的提高,较少考虑目标的距离徙动问题;而雷达成像尤其是运动目标成像,考虑了目标的距离徙动校正,但通常都是基于大信噪比的。本书考虑将雷达成像技术用于运动目标探测,并将书名确定为《高分辨率雷达运动目标成像探测技术》有助于提醒读者注意两者的关系以及技术融合发展。

本书的特点在于:比较系统地研究了高分辨率 SAR 和 ISAR 中的运动目标成像和探测问题,提出了成像探测的概念;雷达系统的体制从传统的 SAR 和 ISAR 扩展到 InSAR 和 InISAR;运动目标的种类包括地面、空中、海面 and 空间目标;雷达的平台包括地基、机载和星载多种形式;对技术和方法的验证采用了仿真数据和实际数据处理相结合的方式;根据雷达成像技术的发展情况,将近年提

出的压缩感知理论用于空中运动目标的 ISAR 和 InISAR 成像。

本书的主要内容由李道京、刘波、尹建凤、汤立波负责撰写。李道京确定了高分辨率雷达运动目标成像探测技术的研究思路和内容框架,撰写了第 1 章、第 2 章、第 7 章 7.3 节、第 8 章,并负责整理定稿;刘波撰写了第 3 章、第 4 章和第 9 章;尹建凤撰写了第 6 章、第 5 章 5.6 节;汤立波撰写了第 5 章和第 7 章,李烈辰、李道京撰写了第 4 章 4.5 节。研究生潘舟浩协助处理了本书部分实际数据,研究生田鹤协助整理了本书文稿,为本书做出了贡献,在此表示感谢。

在本书的撰写和研究过程中,作者得到了中国科学院电子学研究所的吴一戎院士、丁赤飏研究员、洪文研究员、朱敏慧研究员、王卫延研究员、尤红建研究员、向茂生研究员、种劲松研究员,南京理工大学顾红教授,中国科学院空间科学与应用研究中心郝莹高级工程师等领导 and 同志的指导、帮助和鼓励,在此向他们表示最诚挚的感谢!

本书的撰写和出版,得到中国科学院支撑项目的资助,在此表示感谢。

高分辨率雷达运动目标成像探测技术还在不断完善和发展之中,本书介绍了作者的一些研究结果。限于作者水平,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

作者

2014 年 4 月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 雷达成像与目标探测	1
1.1.1 雷达信号的长时间积累和工作体制	1
1.1.2 运动目标的距离徙动校正	2
1.1.3 示例分析和结论	5
1.2 运动目标成像探测	6
1.3 基本理论和方法	7
1.3.1 SAR 和 ISAR	7
1.3.2 Keystone 变换	7
1.3.3 双频共轭处理	7
1.3.4 时频分析成像	7
1.3.5 InSAR 和 InISAR	7
1.3.6 压缩感知理论	8
1.4 本书的内容安排	8
参考文献	9
第 2 章 地基 ISAR 空中运动目标成像	11
2.1 引言	11
2.2 运动补偿和 ISAR 成像方法	11
2.3 ISAR 成像信号模型	12
2.4 基于 Keystone 变换的 ISAR 目标距离平动校正	15
2.5 基于时频分析的 ISAR 成像处理	15
2.6 实际数据的成像结果	18
2.7 小结	21
参考文献	21

第 3 章 地基 InSAR 空中运动目标成像探测	23
3.1 引言	23
3.2 运动目标 InSAR 成像探测	23
3.2.1 运动目标回波信号模型	23
3.2.2 InSAR 成像处理	25
3.2.3 仿真分析与实际数据处理	32
3.3 时频分析在 InSAR 中的应用	38
3.3.1 多运动目标时频分析与干涉测角	39
3.3.2 信号处理流程	40
3.3.3 仿真分析和实际数据处理结果	41
3.4 双频共轭处理技术在 InSAR 中的应用	50
3.4.1 双频共轭处理技术解多普勒模糊	50
3.4.2 双频共轭处理技术解测角模糊	53
3.4.3 仿真分析	55
3.5 小结	57
参考文献	57
第 4 章 压缩感知理论在 ISAR/InSAR 中的应用	59
4.1 引言	59
4.2 基于压缩感知理论的成像算法	59
4.2.1 压缩感知理论	59
4.2.2 基于压缩感知的 ISAR 成像	61
4.3 基于压缩感知的 InSAR 目标定位	62
4.3.1 图像相位和信噪比的关系	62
4.3.2 基于压缩感知的 InSAR 信号处理流程	64
4.4 InSAR 成像仿真分析和实际数据处理	65
4.4.1 运动目标 InSAR 仿真数据分析	65
4.4.2 运动目标 InSAR 实际数据处理	67
4.5 基于压缩感知的 InSAR 运动目标复图像压缩	69
4.5.1 ISAR 和 InSAR 图像特征	69
4.5.2 InSAR 图像压缩	70
4.5.3 InSAR 实际数据试验	70

4.6	小结	74
	参考文献	74
第5章	机载 SAR 地面运动目标探测	76
5.1	引言	76
5.2	地面运动目标距离徙动校正	76
5.2.1	静止杂波分离与距离徙动	76
5.2.2	基于 Keystone 变换的距离走动校正	77
5.2.3	基于高阶相位处理的距离弯曲校正	80
5.3	运动目标参数估计	83
5.3.1	运动目标径向速度估计	83
5.3.2	运动目标方位速度估计	83
5.3.3	基于双频共轭处理的参数估计	84
5.4	运动目标成像处理和探测	85
5.4.1	在距离 - 多普勒域的成像探测	85
5.4.2	基于双频共轭处理的目标成像	86
5.5	实际数据处理结果	87
5.5.1	单个运动目标成像处理	88
5.5.2	多个运动目标成像处理	90
5.6	基于双频共轭处理的实际数据处理结果	91
5.6.1	单个运动目标处理结果	91
5.6.2	多个运动目标处理结果	93
5.7	小结	94
	参考文献	94
第6章	星载 SAR/InSAR 运动目标探测	97
6.1	引言	97
6.2	双频双孔径 SAR 体制分析	97
6.2.1	SAR 工作模式和信号处理流程	97
6.2.2	仿真结果	101
6.3	三频三孔径星载 InSAR 运动目标探测	103
6.3.1	三频三孔径 SAR 系统模型	104
6.3.2	DPCA 和 ATI 相结合的动目标检测、测速及定位方法	105

6.3.3	工作频率的选择依据	111
6.3.4	仿真结果	113
6.4	小结	121
	参考文献	121
第7章	机载 SAR/InSAR 舰船目标成像	123
7.1	引言	123
7.2	单天线机载 SAR 舰船目标成像	123
7.2.1	海面运动舰船回波信号分析	124
7.2.2	海面运动舰船距离徙动校正方法	127
7.2.3	运动舰船目标成像和图像副瓣抑制方法	129
7.2.4	实际数据处理结果	132
7.3	顺轨双天线机载 InSAR 舰船目标成像	136
7.3.1	散射点三维运动对成像的影响	136
7.3.2	单天线 SAR 实际数据的成像处理结果	138
7.3.3	顺轨 InSAR 对三维运动散射点的滤除处理	140
7.3.4	三维运动散射点的滤除处理仿真	141
7.3.5	三维运动散射点的运动补偿和成像	145
7.3.6	基于三维运动补偿的成像仿真	147
7.4	正交三天线机载 InSAR 舰船目标三维成像	149
7.4.1	三维成像几何模型	149
7.4.2	舰船运动目标距离徙动校正	152
7.4.3	运动目标图像配准	154
7.4.4	运动目标图像干涉处理	158
7.4.5	动目标三维成像处理流程	159
7.4.6	仿真及成像结果	159
7.5	小结	166
	参考文献	166
第8章	机载多孔径天线 InSAR 性能分析	169
8.1	引言	169
8.2	顺轨 InSAR 工作模式和信号处理形式	169
8.2.1	多频多孔径对地成像和运动目标探测	170

8.2.2	同频方位波束拼接高条带分辨率成像	171
8.2.3	同频多孔径对地成像和运动目标探测	172
8.3	InSAR 的天线安装方式	172
8.4	相扫天线通道的幅相一致性	173
8.5	有源相控阵天线辐射中心稳定性	174
8.6	有源相控阵天线的系统定标	175
8.7	机载顺轨 InSAR 的示例分析	176
8.8	小结	178
	参考文献	178
第 9 章	高分辨率星载毫米波空间碎片观测雷达系统分析	179
9.1	引言	179
9.2	面临问题和关键技术	179
9.2.1	空间碎片观测区域的覆盖	179
9.2.2	低信噪比空间碎片的探测和运动参数估计	180
9.2.3	空间碎片的轨道测量	181
9.3	空间站载雷达系统	182
9.3.1	雷达的探测方式	182
9.3.2	天线和发射机的形式	182
9.3.3	雷达体制和信号处理方法	183
9.4	雷达系统参数	184
9.4.1	工作频率选择	185
9.4.2	天线尺寸选择	185
9.4.3	探测距离分析	185
9.4.4	测距和测角精度分析	186
9.4.5	径向和横向速度精度分析	186
9.5	目标轨道测量	187
9.5.1	速度分解和坐标转换方法	187
9.5.2	干涉定位和测速精度分析	189
9.5.3	轨道预测精度分析	190
9.6	小结	191
	参考文献	191
	作者简介	192

第 1 章 概 论

1.1 雷达成像与目标探测

雷达作为一种全天候目标探测手段,自第二次世界大战以来已得到充分的发展。随着宽带雷达技术和高速信号处理技术的发展,近年来雷达的高分辨率成像处理能力有了很大提高。高分辨率成像雷达的两个典型代表就是用于对静止目标成像的合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)和用于对运动目标成像的逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)。

与主要用于目标探测的雷达相比,用于目标成像的雷达具有两个显著的特点:①系统带宽较大,对应 0.3m 斜距分辨率的 500MHz 带宽目前已很常见;②其信号相干处理的时间较长,对高分辨率机载 SAR 来讲,通常可达 10s 量级。

对目标探测而言,雷达系统带宽越大,可获得的信杂比越大;而长时间信号的相干处理,显然有助于提高信噪比。事实上,雷达成像和目标探测的信号处理都是基于匹配滤波的,对目标的成像过程既是一个分辨率提高的过程,也是一个信噪比提高的过程。基于高分辨率 SAR 和 ISAR,研究雷达成像技术在运动目标探测中的应用问题,并进一步形成成像探测技术,不仅对满足战场侦察需求具有重要的现实意义,而且对发展现代雷达技术具有重要的理论价值。

1.1.1 雷达信号的长时间积累和工作体制

雷达信号的积累,尤其是相干积累,可极大地改善雷达对目标的检测信噪比。文献[1-3]都研究了雷达信号的长时间积累问题,这种思路还进一步延伸出了检测前跟踪(Track Before Detection, TBD)的概念^[4],但这些处理都是基于非相干积累的。

与传统的目标探测雷达相比,SAR 成像时对静止目标信号的相干处理时间较长,对目标信噪比的改善也较大,这集中体现在 SAR 雷达方程中的信噪比和目标距离的 3 次方成反比。SAR 成像处理对信噪比产生的这种得益,完全可能转化到目标探测上。

考虑运动 SAR 对静止目标成像的一个相反的过程,即:假定地面雷达的天线波束不扫描,运动目标穿过天线波束。此时地面雷达对运动目标不仅可实现

ISAR 成像,其横向分辨率由天线波束宽度决定,而且雷达通过相干积累可能获得很好的信噪比改善。目标的最大速度一定时,距离越远,目标在天线波束停留的时间越长,信噪比改善的效果可能越好。

实现上述功能的雷达应是一个全空域发射、多个同时接收的窄波束布满相同空域的数字波束形成(Digital Beam Forming, DBF)体制雷达,文献[5, 6]称其为“无时不在、无处不在”雷达。它可对远距离、中距离、近程目标分别以低数据率(相干处理时间的倒数)、中数据率和高数据率进行处理,并自动具有一定的灵敏度时间控制(Sensitivity Time Control, STC)功能。

这种雷达以远距离低数据率、近距离高数据率方式可较好地满足目标探测的实际需求。与此同时,由于其采用宽波束发射体制,这种雷达具有良好的低截获概率特性^[7],有效地提高了自身的战场生存能力。

1.1.2 运动目标的距离徙动校正

上述体制的雷达,为获得长的目标观测时间、实现雷达信号的长时间相干积累提供了可能,但由于目标运动产生的距离徙动(当相干处理时间 $T_s = 4\text{s}$,目标径向速度 $V_r = 750\text{m/s}$ 时,目标的距离走动 $\Delta R = 3000\text{m}$),使现有的基于同一距离门的信号积累方法很难奏效,故只有在解决运动目标的距离徙动问题后,上述体制的雷达才能真正发挥作用。

与传统雷达不同,具有高分辨率成像能力的 SAR 和 ISAR,在对静止和运动目标成像时,对目标的距离徙动都进行了一定的校正处理,并形成了完整的长时间信号相干处理的方法,这些方法完全可用于目标探测。

运动目标的距离徙动可分为距离走动和距离弯曲两部分,前者由目标的径向运动产生,后者由目标的横向运动产生。运动目标距离弯曲的表达式为^[8]

$$\Delta R = \frac{V_a^2 T_s^2}{8R} \quad (1-1)$$

式中: V_a 为目标的横向速度; R 为目标斜距离; T_s 为相干处理时间。假设 θ_a 为天线的方位波束宽度, V_{\max} 为目标的最大速度,可使用的相干处理时间为

$$T_s = \frac{\theta_a R}{V_{\max}} \quad (1-2)$$

将式(1-2)代入式(1-1),有

$$\Delta R = \frac{R\theta_a^2}{8} \quad (1-3)$$

当天线的方位波束宽度 $\theta_a = 1.5^\circ$,目标距离 $R = 150\text{km}$ 时, $\Delta R \approx 13\text{m}$ 。

相对于目标可能的大范围的距离走动而言,目标的距离弯曲要小很多,对距

离分辨率较低的目标探测雷达,距离弯曲对检测信噪比产生的影响可以忽略。

当没有多普勒速度模糊时,目标的距离走动校正可由 Keystone 变换^[9]完成。当目标的运动速度较高,存在多普勒模糊时,Keystone 变换的应用受到限制。

解决上述问题的一种方法就是双频共轭处理^[10]。假定雷达同时发射两个频率差为 Δf 的单频信号,其中 Δf 远小于每个单频信号的频率。将这两个频率对应的回波信号进行共轭相乘处理,处理后信号的等效中心频率即为 Δf ,这相当于雷达的等效工作波长大大增加,目标的多普勒频率大大降低,从而避免了多普勒模糊,并使 Keystone 变换可能应用于目标速度较高的情况。与此同时,双频共轭处理也相当于同时进行了去调频处理,大大缓解了目标横向速度产生的多普勒频率展宽现象。

为消除目标横向速度形成的“散焦”对检测的影响,在运动目标的距离走动校正完后,可利用时频分析方法在距离 - 多普勒域实施多目标恒虚警检测^[10, 11]。

为了在 Keystone 变换时避免多普勒模糊, Δf 的选择受脉冲重复频率 (Pulse Repetition Frequency, PRF) 和目标最大速度的限制,即

$$\Delta f < \frac{1}{4} \frac{\text{PRF} \cdot c}{V_{\max}} \quad (1-4)$$

式中: c 为光速。同时 Keystone 变换的物理意义要求

$$\Delta f > \frac{F_s}{2} \quad (1-5)$$

式中: F_s 为对雷达信号的采样率。

下面给出的仿真结果,表明了相干处理时间较长时,距离徙动校正和时频分析对运动目标检测的作用。仿真参数如表 1-1 所列。

表 1-1 仿真参数

参数	数值	参数	数值
雷达载频 1/GHz	10.05	目标 1 径向速度/(m/s)	459
雷达载频 2/GHz	9.95	目标 1 横向速度/(m/s)	593
等效波长/m	3	目标 2 径向速度/(m/s)	40
脉冲宽度/ μ s	0.5	目标 2 横向速度/(m/s)	45
重复频率/kHz	1	目标起始距离/km	150
相干处理时间/s	4		

图 1-1 所示为载频 1 对应的回波信号,目标的距离走动情况很明显,高速目标 1 在 4s 内跨越 25 个距离分辨单元(图上对应显示的距离单元为 100 个),

由于每个目标均由五个散射点构成,高速目标 1 散射点的相互作用形成的目标起伏也较为明显。直接对该信号在慢时间进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT),两目标的信噪比情况如图 1-2 所示,高速目标 1 的信噪比很低,且具有明显的多普勒频率展宽现象。

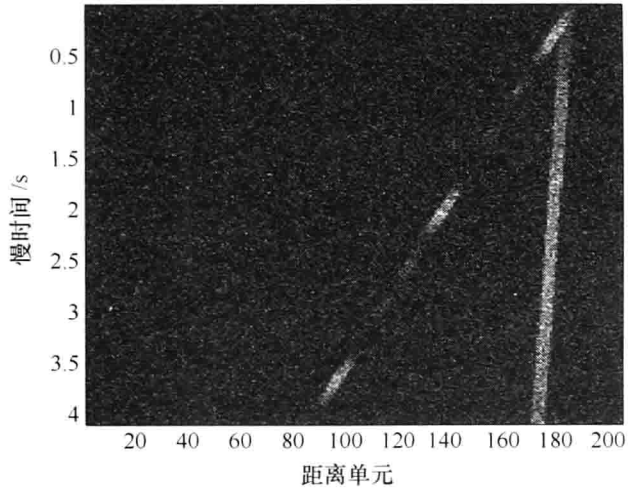


图 1-1 载频 1 对应的目标距离走动情况

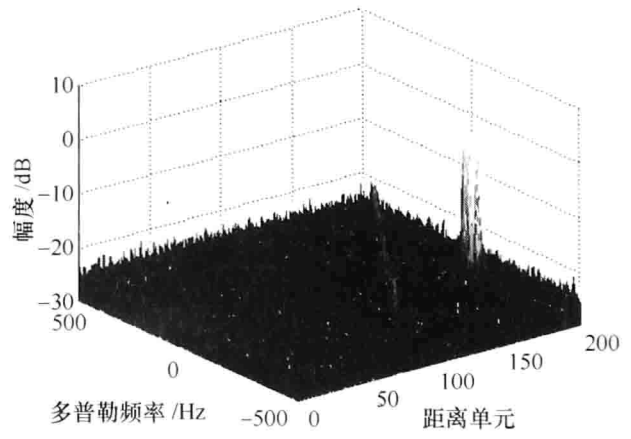


图 1-2 距离走动校正前目标的信噪比情况

图 1-3 所示为对双频共轭处理后信号进行 Keystone 变换后的结果,运动目标的距离走动已得到较好的校正。对距离走动校正后的信号用短时傅里叶变换(Short Time Fourier Transform, STFT)进行时频分析,在 $T_s/2$ 时刻获得的两目标的信噪比情况如图 1-4 所示。

和图 1-2 相比,图 1-4 中高速目标 1 的信噪比有约 13dB 的提升,低速目标 2 的信噪比有约 5dB 的提升,由此可见上述方法的有效性。与此同时,恒虚警检测后,根据等效波长,雷达对目标可完成不模糊测速。

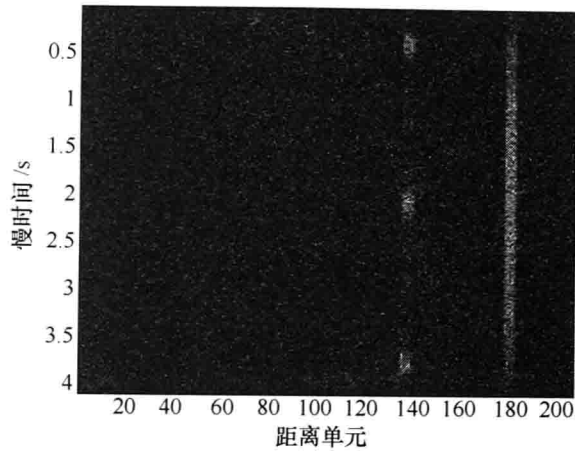


图 1-3 运动目标的距离走动校正结果

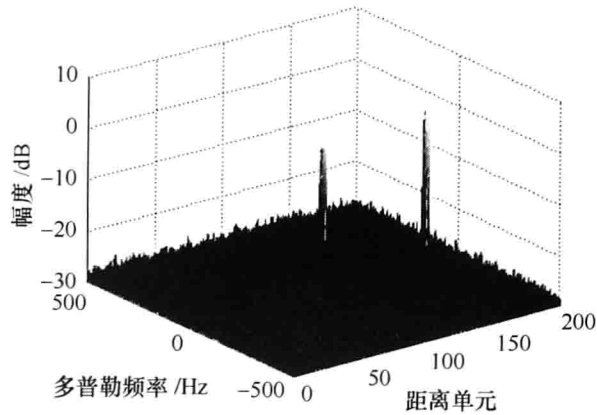


图 1-4 距离走动校正后用 STFT 获得的目标信噪比情况

要特别指出的是,运动目标距离徙动校正的不完整,会产生相干积累损失,目标的速度越高,这种损失越大。仿真表明,上述参数下对高速目标的积累损失约为 4dB,总体上信噪比还是有大幅提升。

1.1.3 示例分析和结论

考虑将上述思想用于防空搜索雷达。以一个 X 波段两坐标防空搜索雷达为例进行分析,其系统参数如表 1-2 所列,方位窄波束顺序扫描(体制 I)和方位宽波束发射 DBF 接收(体制 II)两种体制的天线参数如表 1-3 所列,两种体制下系统性能指标如表 1-4 所列。表 1-4 清楚地表现了体制 II 雷达以远距离低数据率、近距离高数据率方式可较好地满足目标探测的实际需求。

本节探讨了雷达成像和目标探测两者的关系,提出将雷达成像技术应用于目标探测,并进一步形成成像探测技术。

表 1-2 系统参数

参数	数值	参数	数值
雷达中心频率/GHz	10	检测信噪比/dB	12
天线尺寸/m × m	1.2 × 0.15	接收机噪声系数/dB	3
天线俯仰波束宽度/(°)	12	系统损耗/dB	5
方位覆盖范围/(°)	±30	目标 RCS/m ²	2
脉冲重复频率/kHz	1	目标最大速度/(m/s)	750
发射机平均功率/W	150		

注:为进行双频共轭处理,可发射双载频信号

表 1-3 两种体制的天线参数

系统参数	体制 I	体制 II
方位发射波束宽度/(°)	1.5	60
方位接收波束宽度/(°)	1.5	1.5
方位发射波束增益/dB	34	18
方位接收波束增益/dB	34	34
扫描波驻位置数	40	
方位接收波束数		40

表 1-4 两种体制下系统的性能指标

体制 I		体制 II	
探测距离/km	数据率/Hz	探测距离/km	数据率/Hz
120	0.25	100 ~ 120	0.25
100	0.5	85 ~ 100	0.5
85	1	70 ~ 85	1
70	2	60 ~ 70	2
60	4	50 ~ 60	4
50	8	40 ~ 50	8
40	16	35 ~ 40	16

1.2 运动目标成像探测

运动目标成像探测技术是指在高分辨率雷达中利用雷达成像的信号处理流程,通过成像处理提高信噪比和分辨率,实现目标探测的雷达技术。这里的成像处理流程主要包括运动目标的距离徙动校正和雷达信号的长时间积累。成像处

理通过二维匹配滤波,在形成最大信杂噪比的同时,获取最优的分辨率。

运动目标成像探测技术的应用方向不仅包括相干处理时间较长的 SAR 中运动目标探测,而且包括以 ISAR 成像为基础的运动目标探测。

1.3 基本理论和方法

1.3.1 SAR 和 ISAR

根据传统的定义,SAR 一般工作在雷达平台运动、目标场景静止的状态下;ISAR 一般工作在雷达平台静止、目标运动的状态下。ISAR 成像所需的条件,主要在于目标和雷达间存在横向相对运动,该横向运动一方面是指目标和雷达间存在横向平动,另一方面是指目标相对雷达存在自转。由于雷达成像的本质在于雷达和目标间存在相对横向运动,故 SAR 对运动目标成像在原理上和 ISAR 相同。

1.3.2 Keystone 变换

Keystone 变换是由 R. P. Perry 在文献[9]提出的,主要用于运动目标的距离走动校正。和传统 ISAR 距离徙动校正使用的大信噪比条件下的包络对齐方法不同,Keystone 变换由于与目标信号信噪比无关,已成为运动目标距离走动校正的主要处理方法,在低信噪比运动目标成像探测中发挥着重要的作用。

1.3.3 双频共轭处理

当目标运动速度较高,存在多普勒模糊时,Keystone 变换的应用受到限制,为此尹建凤在文献[10]中提出了双频共轭处理方法来扩大信号的等效波长,去除多普勒模糊后再用 Keystone 变换实施距离走动校正提高信噪比,对目标信号检测后进行目标运动参数粗估计,为随后进行的成像处理和目标运动参数精估计奠定基础。双频信号的形成可通过雷达直接发射双频信号实现,也可利用雷达发射的宽带信号构造双频信号。

1.3.4 时频分析成像

基于时频分析的成像处理方法主要用于机动目标和多目标情况下的运动目标成像^[11],目前常用的时频分析方法有短时傅里叶变换(STFT)和 Wigner - Ville 分布(Wigner - Ville Distribution, WVD)。

1.3.5 InSAR 和 InISAR

将 SAR 和 ISAR 的天线增加到两个以上,形成多孔径且引入干涉处理^[12],