

高分辨力雷达

High — Resolution Radar

Donald R. Wehner

电子工业部第十四研究所

一九九七年五月

高分辨力雷达

High-Resolution Radar

Donald R. Wehner

主译: 刘谦雷、安凌凌、郑竹华、才永杰、章 宏、鲍恩宁、陆中行、洪 梅、

刘福恩、侯其坤、朱建良、程 雷、徐 钧、陈 军、王荫槐、金 林、

蔡体秋、苗 萌、肖建华、于文震、杨 波、葛莉玮

主校: 邵智民、陈树铮、倪晋麟、杨乃恒、林幼权、戴成松、顾卫军、杨念震、

王金达、刘显庭、张亚朋



一九九七年五月

98/00/2

主审：邵智明、陈树铮

2014/22

High Resolution Radar -- 2Rev.ed

Wehner, Donald R.

Artech House Boston. London, 1995 ISBN 0-89006-727-9

高分辨力雷达

(南京市定淮门1号)

开本 787×1092

1/16

1997.5

序 言

本书第二版的写作目的正如第一版一样,是要陈述依靠空间分辨力实现目标成像、表面测绘和常规监视等功能的雷达系统的设计与分析的基本理论。面向的读者是具备大学文化程度的数学、信号处理和电磁学理论知识的学生、工程师和科学家。本书提供了研制、设计或分析高分辨力雷达系统、分系统、部件和处理方法所必需的基本理论和设计工具,这些理论和设计工具除了适用于军用雷达外,也适用于正在兴起的商业和民用雷达。

正如书名所表明的那样,本书与大多数雷达书籍的不同之处在于,本书的重点是应用于目标识别和地面测绘方面的雷达分辨力,而不是应用于监视和武器控制方面的目标检测与跟踪。不过,第二版仍然与前版一样,前面的几个章节讨论雷达的基本原理,包括雷达距离方程、信号检测、雷达横截面积、匹配滤波器概念和雷达波形,第10章讨论高分辨雷达的监视应用。我想,把叙述的重点放在雷达的分辨力方面与本书确定的主体思路更为一致。信号处理和RF硬件正变得越来越容易获得,不久将导致高分辨力雷达廉价的商业和民用应用。高分辨力雷达在诸如防撞和导航中的应用涉及到有限的监视覆盖,整个监视空域被精细地划分成若干个分辨单元。检测、跟踪和成像这三者之间传统的区别已变得模糊,而雷达分辨力的各种特性则变得更加重要。

第二版虽然经过相当广泛的改写,却仍然象第一版一样由十个章节组成,并保留了原来的标题。书中的符号和定义也与第一版一致。只有一些例外,即新的符号都只是在需要增加材料时才加进去(第一版的使用者可能会注意到,本版的一个变化是损耗符号 L 被重新定义为是一个等于或大于单位元素的量,这比定义为等于或小于单位元素更符合通常的用法)。本书开始的章节推导基本原理,随后阐述这些原理在目标成像、表面测绘和监视中的应用,为写作这样一部内容统一的书,我们作了相当大的努力。象以前一样,后面的那些章节包含了对现有的和假想的高分辨力雷达系统的设计举例,其中的一些例子其理论尚有待证明或尚处于实验阶段。

自本书的第一版于1987年出版以来,它就一直被我和其他人在大学高年级的雷达课程中作为教科书使用。另外,我还将这本书作为美国和国外的大学、承包机构以及政府的研究和发展中心的短期培训教程。在授课期间,我自身的教学内容也得到了丰富和发展以便反映新技术、处理方法上所取得的进展和我自己对涉及高分辨力雷达的一些基本原理的更好的理解。解释某些材料的方式也根据来自其他人的对第一版教学的反馈和直接地来自于我自己课程的参与者的反馈而加以了修改。另外,还阐述了一些新观点和新技术,以此作为我对雷达领域的延续工作的一部分。

利用上述经历写作了此第二版,我希望由此提供给使用者一个更全面、更新型、并且也是更具启发性和更易于使用的版本。第一版中应用的例子和问题是通过教师和课程参与者共同地得出确定的结论的。第二版仍旧依靠大量的例子来举例说明。对每章末尾的问题作了改动,新的问题也根据需要加了进来,以便与内容的改变和增加相一致。

第一章仍然是对高分辨力雷达的技术介绍,但对高分辨力雷达的信号和波形的表示作了一点略微扩展的解释。第二章经过改写,用以更加全面地解释雷达方程在高分辨率雷达中的应用。第三章和第四章内容包括高分辨力雷达设计、波形和处理,这两章经过相当大程度的改写,扩充进了正交检波误差、累积相位噪声和直接数字合成器在高分辨系统中的应用等内容和其它一些新的课题。论及合成高分辨力雷达的第五章,内容扩充包括对频率跳变的脉冲序列的描述和对距离扩展的目标区域的处理,这些在一些商用和民用中可能会遇到,因为在相对较近的距离上需要高分辨力监视。和第一版一样,第六章也是关于合成孔径雷达(SAR),该章试图在一个章节内提供关于SAR设计与分析的基本方法。这

一章也经过改写，以便更好地描述分辨力极限、多视处理、频率步进 SAR 和斑点噪声等内容。多普勒波束锐化 SAR 是一个在现有文献中难以查找到的课题，它也包含在这一章节中。论述逆合成孔径雷达（ISAR）的第七章很可能是关键的一章。这一章经过相当广泛的改写，扩充进了对自 1987 年以来在这种相对较新的雷达形式中所进行的一些研究工作的讨论。第八章和第九章的内容分别为三维单脉冲成像和相干接收成像，它们均处于实验阶段，因此只作了略微的改写，第九章还缩短了长度。最后，第十章论及高分辨力雷达的监视应用，在一些内容上进行了改写以使其表达得更清晰。

由于我长期与美国海军 R & D 中心合作，读者将会注意到，象以前一样，作者使用了来自这些中心的一些公开发表的实验和理论素材来描述真实结果和提供设计及分析素材。遗憾的是，这些中心的名称和组织形式经常变更。因而，熟悉这些中心的读者将会注意到在海军材料中被引用的来源指的是在进行这项工作期间所用的组织名称。这同样适用于从私人公司获得的材料。

唐纳德·威纳

唐纳德·威纳找我为他的《高分辨力雷达》一书的第二版开发一套指导性软件，他要求他的读者能够在他们自己的计算机上观察波形和观察应用于高分辨力雷达中的图像处理方法。他也要求指导软件与他的读者相互配合，并且允许他们用自己的参数替换例子中的数据来进行实验。

该指导性软件用清楚和易于理解的例子说明了书中所描述的波形和处理方法。指导软件并没有代替书，而只是通过提供例子和允许使用者用新的参数来进行实验增进了书的价值。本指导软件在 Microsoft Windows 下运行，并且不需要任何计算机编程方面的知识来使用它。但是，指导软件中的论题却要求读者熟悉书中所陈述的概念和观点。所以，使用本指导性软件的最佳方法就是先读书中的章节，然后再在指导软件上看相应章节的内容。本指导性软件可以从 Artech House 公司购得。

布鲁斯·巴纳斯

目 录

序言	XIII
第一章 引言	1
1.1 增加雷达带宽的优点	2
1.2 数据采集口	2
1.3 距离分辨率	2
1.4 窄带表达式	4
1.5 高分辨力雷达带宽	7
问题	7
参考文献	8
第二章 雷达距离方程在高分辨力雷达中的应用	9
2.1 雷达方程的推导	9
2.2 发射机功率	12
2.3 天线增益	13
2.4 波长	13
2.5 雷达横截面	14
2.5.1 定义	14
2.5.2 后向散射源	16
2.5.3 低分辨力雷达的 RCS	18
2.5.4 高分辨力雷达的 RCS	21
2.6 系统损耗	25
2.7 距离衰减	26
2.8 接收系统灵敏度	29
2.8.1 前置放大器噪声指标	30
2.9 匹配滤波器信噪比	31
2.9.1 时间带宽乘积	33
2.10 雷达分辨率	34
2.10.1 距离分辨率	34
2.10.2 多普勒分辨率	36
2.10.3 距离—速度分辨率	37
2.10.4 角分辨率	38
2.11 高分辨力雷达的探测距离	38
问题	40
参考文献	42
第三章 高分辨力雷达设计	43
3.1 引言	43
3.2 瞬时频率和延迟	43
3.2.1 瞬时频率	43
3.2.2 相位延迟和群延迟	44
3.3 宽带系统和元件的失真	46

3.4	长线效应	51
3.5	匹配滤波器和模糊函数	54
3.5.1	匹配滤波器	54
3.5.2	模糊函数	56
3.5.3	匹配滤波器响应函数	57
3.6	宽带混频和检波	58
3.6.1	混频器	59
3.6.2	正交检波	60
3.6.3	正交检波器误差	61
3.6.4	平方律和线性检波	65
3.7	本振频率选择	65
3.8	数据采样	67
3.8.1	时域采样	67
3.8.2	频域采样	68
3.9	发射频率稳定度要求	71
3.9.1	频率波动对雷达性能的影响	72
3.9.2	用相位噪声功率谱密度表示的频率稳定度	76
3.9.3	相位和频率噪声调制	76
3.9.4	累积相位噪声	79
3.9.5	相位噪声功率谱密度详述	80
3.9.6	用阿仑方差表示的频率稳定度	82
3.9.7	用阿仑方差表示的累积相位噪声	84
3.10	频率合成器	85
3.10.1	直接和间接合成器	85
3.10.2	加/除设计 (Stone)	86
3.10.3	二十进制编码设计 (Papaieck)	87
3.10.4	直接数字合成器	88
3.10.5	小结	89
3.11	宽带雷达传输线	89
3.12	宽带微波功率管	90
3.13	宽带固态微波发射机	91
3.14	宽带天线	92
	问题	95
	参考文献	97
第四章	高距离分辨力波形及其处理	98
4.1	引言	98
4.2	窄脉冲波形	99
4.3	二进制相位编码	100
4.4	连续波的离散频率编码	103
4.5	展宽波形	109
4.6	线性调频(Chirp)脉冲压缩	109
4.6.1	基于相位均衡的分析	112

4.6.2	矩形脉冲的影响	115
4.6.3	加权	117
4.6.4	硬件实现	120
4.6.5	时间跳跃	124
4.6.6	D D S 线性调频信号的产生	125
4.6.7	二次相位失真	126
4.7	数字脉冲压缩	129
4.8	目标径向运动造成的失真	133
4.9	H R R 目标响应的显示、记录和预处理	135
问题		139
参考文献		143
第五章	合成高距离分辨力雷达	144
5.1	频域目标特征	144
5.2	合成距离分布产生的原理	145
5.3	目标速度的影响	152
5.4	捷变频序列	156
5.5	距离延展目标	160
5.5.1	孤立目标	160
5.5.2	监视应用	161
5.5.3	监视举例	163
5.6	随机频率误差引起的距离分布失真	164
5.7	动目标距离跟踪	166
5.8	随机频率误差引起的性能下降	168
问题		171
参考文献		172
第六章	合成孔径雷达	173
6.1	引言	173
6.2	实孔径雷达测绘	176
6.3	S A R 理论 (非聚焦孔径)	182
6.3.1	小积分长度 S A R	183
6.3.2	最佳非聚焦 S A R 积分长度	185
6.4	S A R 理论 (聚焦孔径)	187
6.4.1	用匹配滤波器表示的聚焦	188
6.4.2	非均匀照射时的 S A R 分辨力	189
6.4.3	等效矩形波束宽度	191
6.5	根据多普勒观点的 S A R 理论	194
6.5.1	均匀照射	194
6.5.2	非均匀照射	195
6.6	线性调频脉冲 S A R	196
6.6.1	分辨力	196
6.6.2	数据采集	196

6.6.3	斜距采样准则	199
6.6.4	横向距离(方位)采样准则	200
6.6.5	根据多普勒观点的PRF要求	201
6.6.6	根据栅瓣观点的PRF要求	202
6.6.7	平方分辨率	204
6.6.8	设计图表和框图	204
6.7	频率步进 SAR	207
6.7.1	分辨率	207
6.7.2	斜距采样准则	207
6.7.3	横向距离(方位)采样准则和PRF	208
6.7.4	点光源缩放	208
6.7.5	设计图表、波形和框图	209
6.8	距离曲率和距离游动	213
6.8.1	侧视 SAR	213
6.8.2	点光源 SAR 的距离曲率	218
6.9	斑点噪声	218
6.10	设计举例	222
6.10.1	SEASAT	223
6.10.2	机载 SAR	227
6.11	SAR 处理	230
6.11.1	线性调频脉冲 SAR 的输入数据	231
6.11.2	光学处理	233
6.11.3	数据处理	238
6.11.4	非独立参照	239
6.11.5	快速相关	242
6.11.6	SEASAT 处理实例	247
6.12	多普勒波束锐化	251
6.12.1	DBS 雷达分辨率	251
6.12.2	DBS 比率	253
6.12.3	用于民用导航的 DBS 雷达	253
6.12.4	短距离 DBS	254
问题		254
参考文献		257
第七章	逆合成孔径雷达	258
7.1	SAR 和 ISAR 的比较	258
7.2	孔径观点的 ISAR 理论	259
7.2.1	最大非聚焦积分角	261
7.2.2	最佳非聚焦 ISAR 积分角	262
7.2.3	ISAR 理论(聚焦孔径)	263
7.3	距离多普勒成像	264
7.3.1	关于小积分角的 ISAR 基本理论	265
7.3.2	横向距离分辨率	266

7.3.3	斜距分辨力	267
7.3.4	斜距采样	267
7.3.5	横向距离采样	270
7.3.6	平方分辨力	271
7.4	目标姿态旋转的来源	271
7.5	目标成像投影平面	272
7.5.1	SAR和ISAR的成像平面	273
7.5.2	ISAR的矢量关系	273
7.6	线性调频脉冲雷达的ISAR数据采集和处理	277
7.7	频率步进雷达的ISAR数据采集和处理	279
7.8	距离偏移和距离游动	281
7.8.1	线性调频脉冲波形的距离游动和距离补	282
7.8.2	频率步进波形的距离游动和距离补偿	283
7.9	综合ISAR的平移运动校正	286
7.10	目标旋转产生的失真	289
7.10.1	正交相位失真	291
7.10.2	目标旋转产生的单元移动	292
7.10.3	模糊半径	294
7.11	用极化改进的旋转运动校正	295
7.11.1	频率空间孔径	295
7.11.2	极化改进处理	296
7.12	ISAR的自动聚焦方式	301
7.12.1	ISAR几何	301
7.12.2	ISAR目标的采样数据	301
7.12.3	最小熵TMC	303
7.12.4	最小熵RMC	306
7.13	多视ISAR处理	306
7.14	交替ISAR处理方法	308
7.14.1	演绎方法	309
7.14.2	层析摄影法	309
7.14.3	系统识别成像	310
7.14.4	超级分辨力	310
7.14.5	测定极化的ISAR	311
7.14.6	最大熵	311
7.15	船目标的预期横向距离分辨力	312
7.16	ISAR的采样设计计算	314
7.16.1	空中目标	314
7.16.2	船目标	315
7.17	线性调频脉冲ISAR与频率步进ISAR的比较	316
7.17.1	线性调频脉冲ISAR	316
7.17.2	频率步进ISAR	317
7.17.3	小结	318
7.18	雷达目标成像距离	318

7.18.1	图像处理增益	319
7.18.2	可见目标单元局部	321
7.18.3	图像清晰度的计算	323
7.18.4	成像的雷达距离方程	323
7.19	空间频率带宽和分辨力极限	324
问题		326
参考文献		329
第八章	单脉冲雷达的三维成像	330
8.1	I S A R 的缺点	330
8.2	单脉冲三维成像概念	330
8.3	距离特性	338
8.3.1	短脉冲和线性调频脉冲的距离特性	342
8.3.2	频率步进波形的距离特性	342
8.3.3	对平板散射体的距离特性	344
8.3.4	距离特性计算实例	345
8.4	频率步进处理的概念细节	346
8.5	小结	351
8.5.1	优点	354
8.5.2	论点	354
8.5.3	潜在的应用	354
问题		354
参考文献		355
第九章	非相干雷达系统的目标成像	356
9.1	目标特征处理的相干要求	356
9.2	频率捷变和相干接受的雷达	357
9.3	频率步进磁控管成像雷达	360
9.4	对单个定点目标的响应	361
9.5	对距离扩展目标的响应	364
9.6	合成距离分布失真	366
9.6.1	理想系统分析	366
9.6.2	点目标的随机相位误差	367
9.6.3	扩展目标的随机相位误差	367
9.6.4	随机相位误差的三种类型 (提要)	368
9.6.5	分布的尖峰和空缺效应	368
9.6.6	频率误差的公差	369
9.7	磁控管频率控制	370
9.8	脉内 F M	371
9.9	横向距离失真的频率误差效应	371
问题		371
参考文献		372
第十章	监视的应用	373

10.1	电子反干扰	373
10.2	低空飞行器检测	380
10.2.1	窄带雷达的杂波识别	382
10.2.2	应用HRR技术的杂波识别	384
10.2.3	用于杂波识别的宽带和窄带雷达比较	388
10.3	低概率截获雷达	393
10.3.1	LPIR基本表达式	395
10.3.2	举例	397
10.3.3	关于LPIR的若干最后的附注	403
10.4	警戒雷达的目标起伏损耗的减少	405
10.4.1	起伏损耗的来源	405
10.4.2	频率捷变方法	406
10.4.3	高分辨力方法	410
10.5	在杂波中对小而慢速移动的目标的检测	413
	问题	414
	参考文献	416
	附录	417

第一章 引言

对于对雷达的检测与跟踪感兴趣的学生和工程师来说,有许多很好的书籍适合于他们。相比而言,专门论述高分辨力雷达、合成孔径雷达和雷达目标成像[1-8]的书籍虽然现在正日益增多,但仍显较少。后面的这些专题包含了雷达领域的一些新发展,在这些新发展中,研究的重点已经从检测与跟踪转移到了用空间分辨力进行目标识别、测绘和成像等功能。主要集中在人们已日益关注由宽带微波照射所产生的回波信号的处理方法上。

在二十世纪五十年代早期首次得到验证的合成孔径雷达(SAR)或许是脱离雷达的检测和跟踪功能等常规用途最有名的例子。用机载或空载雷达进行合成孔径测绘是通过反射数据的相干处理而获得的,这些反射数据是在相对较宽的带宽上通过表面照射期间所产生的变换的视角从地球表面采集到的。对与SAR相联系的冗长的反射数据记录进行处理,只能得到它的检测与跟踪的相干和非相干处理的一个距离关系。虽然具有较低分辨力的脉冲和窄的带宽被用于某些早期的SAR验证,但是后来为了提高SAR分辨力所作的工作大部分却是发射、接收和处理带宽上相当于一英尺的空间分辨力的信号这一庞大技术的基础。

逆合成孔径雷达(ISAR)是一个较新的SAR的变种,它是对诸如轮船、飞机或宇宙飞船等物体进行成像的一种手段,这种成像是通过当物体转动而向雷达呈现一个变化的视角时所产生的宽带回波信号来实现的。最近在高分辨力ISAR成像技术上的进步显示了它与传统信号处理方法的明显差别。

有趣的是,雷达技术在朝向测绘和成像发展上的种种变化现在看来也适用于长期存在的检测和跟踪上的一些难题。展望雷达监视的前景,有一点是清楚的,那就是其趋势是朝向开发高分辨力技术,这不仅适用于测绘和目标成像,而且也适用于在难度不断增加的雷达监视环境中进行目标检测。高分辨力反射数据是从受到空中平台照射的地球和海洋表面采集到的,它提供了关于地球资源的丰富的信息。这些数据典型的使用者是地质学、农业和海洋学领域的科学家。在商业和民用领域,高分辨力技术正在对小范围应用进行研究,如在低能宽度的条件下对飞机和地面交通工具进行导航。

本书的重点放在了高分辨力雷达的作战应用上,而不是它在距离测量中的应用。用于在户外或户内对真实目标或成比例缩小的模型进行成像的高分辨力测量雷达,所涉及到的与工作雷达相同的基本运作原理,但提出了一个不同的问题。对一部测量雷达来说,目标的位置和视角是处于距离操作者的控制之下的。相比之下,对作战雷达来说,目标的瞬时距离和视角是较少地直接受控的,甚至可能无法精确地知道。正因为这个原因,测量雷达对图像失真、图像平面测定、目标移动校正和采样准则的处理是不同于作战雷达的。

或许更重要的是带宽的作用。从原理上讲,在一个单频点上,通过对一个视角受控的宽阔的测量范围内的反射数据的采集来对目标进行空间分辨,这一点是可能的。但是,对一套特定的雷达和一定的目标运动状态来说,由作战雷达所看到的目标视角的范围是受到可利用的目标停留时间的限制的。因此,空间分辨力极大地依赖于雷达的带宽,它是一个与目标的状态及雷达与目标之间的几何关系完全无关的雷达参数。较大的作战雷达的带宽要通过昂贵的代价来实现。因而,选择能够减少费用和允许用同样的雷达实现检测和识别两种功能的波形²成了一个重要的论题。但是,正在兴起的低功率民用雷达的带宽着

¹ 全书使用的术语“雷达目标”或简称“目标”,指的是雷达操作员感兴趣的任何物体。在有些情况下,“目标”一词本身将用于指雷达目标的响应。

² 在本书中,术语“波形”将通常用于指由雷达产生的辐射到空间中的信号。术语“信号”将用于指目

来并不牵涉到高昂的造价。

增加带宽虽然最初并不是雷达发展的主要动力，但为了提供雷达的某些优良性能，一开始想到的就是增加带宽。对能量分布于宽带上的短脉冲信号的使用，使得对作用距离内的目标进行分离成为可能。雷达在电子干扰环境中运行的能力可以通过在很宽的带宽内迅速改变雷达发射机和接收机的频率来得到改善。由于雷达技术已经成熟，因而雷达带宽已经成为了一个主要的设计参数。

在本书中，术语“雷达带宽”指的是采集目标反射数据³的频带范围，而不考虑雷达波形。短脉冲波形和相位或频率调制脉冲波形典型地应用于采集宽带目标反射数据与距离延迟之间的特性关系（时域采样）。我们也将讨论运用窄带跳频脉冲串来采集目标反射数据与发射脉冲频率之间的特性关系（频域采样）。

1.1 增加雷达带宽的优点

由宽的雷达带宽所带来的主要优点是增加了关于诸如轮船、飞机和地球表面特性等目标的出现、定位和识别的信息。这类增加的信息是通过能采集到的附加的独立的目标反射数据产生出来的。举一个例子来说，设想存在一个设计用于飞机和轮船警戒的窄带脉冲雷达，它工作于单一的发射波形极化上。假定飞机或轮船只占据了雷达天线波束宽度的一小部分并且在测距内不能被分解，使得每一个回波脉冲都只是在同一瞬时视角上对整个飞机或轮船的反射特性进行测量。如果目标的视角由于雷达平台或目标移动而改变了，我们就可以说雷达能够在一维空间上采集到目标反射数据：反射特性随视角而变化。通过例如脉冲到脉冲改变发射机频率，工作于一个较宽频带上的同一部雷达则在二维空间上采集目标反射数据：反射特性随频率和视角而变化。宽带短脉冲雷达随距离延迟和视角的变化采集反射数据。结果，增加的维数在以上任何一种情况下都提供了目标反射数据附加的独立的采样，从而增加了关于目标出现、定位和物理特性的信息。至于回波样本的独立性，众所周知，诸如轮船、飞机或地球表面特性等目标的微波反射特性随着视角和频率的变化都会发生快速的起伏。因此，在一个宽阔的视角范围或频率范围内采集到的数据可以被认为包含了大量的目标反射特性的独立采样。

轮船、飞机和空中物体的目标识别可能是高分辨力雷达数据所提供的最为人知的信息类型。在一个宽阔的频率和视角范围内所观察到的这些目标的类型，提供了与其物理特性相关的它们的反射特性的独立样本。随着频率和视角变化，从这样一个目标采集到的目标的幅度和相位数据能够被转换成目标空间的一维或多维反射特性统计数据。这样的数据被称为雷达目标图像，它们提供了关于目标本身和其它我们感兴趣的特性的信息。

可用的独立目标回波数据和目标信息之间的量的关系很可能无法在任何通常的意义上加以定义。然而，如果将有用的独立反射数据的内容与雷达带宽和数据采集时间联系起来而不考虑这些数据对于目标信息的分布情况，就可以得到关于雷达带宽所带来的好处的量的估计。设想存在这样一个回波信号，它由短的单频发射脉冲所产生，并由雷达天线波束在一个固定的视角上连续照射的目标反射回来。该回波信号可以被认为是对目标反射特性与距离延迟之间函数关系的一种测量。通过适当的接收机设计，回波信号的瞬时分辨力可以接近发射脉冲期间的瞬时分辨力。若用 β 表示发射脉冲带宽，则瞬时分辨力约为 $1/\beta$ 。根据奈奎斯特准则，对于从距离延迟范围为 δt 采样到的回波信号的总共 $2\beta\delta t$ 个采

标对这种辐射进行响应而产生的波形。在有些情况下，对这两个术语进行区别是困难的。

³ 术语“数据采集”使用于全书，用以区别数据处理，并且不排除实时处理。

样值，由一部雷达所接收到的这样的一个回波脉冲的无载体形式的非模糊采样所要求的采样速率至少为每秒 $2\beta\delta t$ 个采样值。假定在采样空间内目标反射特性是独立变化的，那么，在奈奎斯特速率下进行采样就会产生出目标反射特性的 $2\beta\delta t$ 个独立的采样值。当被采样的回波信号在幅度上被量化成可解析的 m 位二进制数时，其所有的数据容量是 $2m\beta\delta t$ 比特。决定目标信号数据容量的三个量是发射信号带宽、被采样的距离延迟大小和幅度量化。可以看到，对于一个给定的幅度量化电平和一个给定的被采样的距离延迟大小，单个回波脉冲的数据容量看来与发射带宽成正比。

1.2 数据采集口

在本书中频繁出现了“孔径”一词。它被用于第二章讨论真实的实体雷达天线的时候，在那里，该术语指的是用收集到的入射信号功率来表示的天线的有效尺寸。在第六章，“合成孔径”一词将用于指采集地球表面反射数据、然后进行处理以获得精细的沿轨迹分辨率的地面轨迹长度。最后，在第七章，“频率空间孔径”一词将用于指来自频率和视角上用于雷达目标成像的数据采集。在这一点上，雷达成像与用于医学诊断和其它功能上的 X 射线、声波和其它类型的层析摄影是紧密相联的，在那里，物体的内部结构得以成像。

从信号处理的观点来看，SAR 和 ISAR 都能够被解释成是一个反射数据系统，这种数据系统被称为“数据采集口”。假如发射一个短脉冲波形，随频率改变所产生的部分的数据采集口就能在几毫秒内或在目标的距离延迟期间所产生。部分的孔径通过改变雷达视角产生出来，但无论如何它需要雷达或目标的物体移动。对于一部简单的雷达，在典型的情况下，需要几分之一秒到数秒的几分之一来产生所需的用于测绘和目标成像的视角区域。如在普通的照相机里所见到的那样，一个光学孔径是通过设置一个固定的圆形采光区域产生出来的。与此形成对照的是，雷达的频率空间孔径是通过调节带宽和采集反射数据的视角区域产生出来的。沿着“视线”（LOS）到目标的分辨率（斜距分辨率）决定于雷达的带宽。垂直于视线方向的分辨力（横向距离分辨率）决定于波长和采集反射数据的视角区域。

1.3 距离分辨率

高分辨力雷达最为人知的特性也许就是它能够在斜距方向上分离反射源。固有的距离分辨率与雷达带宽 β 的基本关系由下式给出：

$$\Delta rs \approx c/2\beta \quad (1.1)$$

该表达式和它的变式将在本书论及高分辨力雷达各种应用的内容中频繁出现。在任何时刻，目标反射特性等效的时域测量和频域测量通过傅立叶变换联系起来。这样，从原理上讲，对于一个给定的带宽，随频率而变化对目标反射特性的测量等价于在相同的带宽内随距离延迟变化对目标反射特性进行的测量。无论是频域的和时域的测量，还是它们关联的处理，都将在本书中进行讨论。

1.4 窄带表达式

“高距离分辨力 (HRR) 雷达”一词暗含了对宽带信号的使用。为了获得高的距离分辨力，信号带宽无论如何只需要在用赫兹表示的绝对带宽的意义上是宽的。相对带宽定义为信号带宽除以其中心频率，对于高分辨力系统它实际上可能非常窄。正因为这个原因，用窄带近似来表示高分辨力雷达波形和信号常常是可能的。

如果一个实信号 $s_r(t)$ 的傅立叶变换 $S_r(f)$ 的各个分量主要地被限制于带宽 β 以内，而与信号的中心频率（也叫做载波频率） $\bar{f}$ 相比，信号的带宽 β 是小的，它就能够被定义为一个窄带信号。经常会遇到的一种标准的典型的高分辨力波形是线性调频脉冲。这是一种由正弦波形组成的时限 RF 脉冲，该正弦波形以一定的方式进行相位调制使得其在脉冲宽度内能够产生出线性频率调制。这种波形和它的双边的傅立叶变换的幅度分别绘示于图 1.1(a,b)。在图 1.1(a)中我们可以看到，载波在幅度和相位上被以一个与其正弦变化相比为缓慢的速率所调制，而波形的频谱 $S_r(f)$ 相对于其中心频率 $\bar{f}$ 来说是窄的（图 1.1(b)中频谱 $\Psi(f)$ 将要在下文进行讨论）。

任何窄带信号都可以用下式表示出来：

$$s_r(t) = a(t) \cos[2\pi \bar{f} t + \theta(t)] \quad (1.2)$$

式中， $a(t)$ 是描述幅度调制的一个实数量， $\theta(t)$ 描述了频率为 $\bar{f}$ 的载波的相位调制。随着带宽的增加，式(1.2) 仍然是有效的，只是 $a(t)$ 和 $\theta(t)$ 分别失去了它们用于描述载波的幅度调制和相位调制的意义。

一个窄带信号或波形可以被表达成一个复指数函数的实部，如下式所示：

$$s_r(t) = \text{Re}[a(t) e^{j[2\pi \bar{f} t + \theta(t)]}] \quad (1.3)$$

在本书中，信号或波形的“复指数函数”一词将用于指指数函数本身。由式 (1.2) 和 (1.3) 给出的复指数函数于是可以表达为：

$$s(t) = a(t) e^{j[2\pi \bar{f} t + \theta(t)]} \quad (1.4)$$

或者用复数的矩形表达式来表示为：

$$s(t) = x(t) + jy(t) \quad (1.5)$$

式(1.4)和(1.5)由下面的表达式联系起来：

$$a(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} \quad (1.6)$$

和

$$2\pi \bar{f} t + \theta(t) = \tan^{-1}(y(t)/x(t)) \quad (1.7)$$

方程(1.4) 也可以写成：

$$s(t) = a(t) e^{j\theta(t)} e^{j2\pi \bar{f} t} \quad (1.8)$$

式中, $a(t)e^{j\theta(t)}$ 被认为是复数包络, 因为它包含了 $s_r(t)$ 幅度和相位调制。信号或波形的实数和复数表达式在图 1.2 中被描绘出来。

术语“预包络”和“解析”信号用于指一个更一般的复数表达式, 并由下式给出:

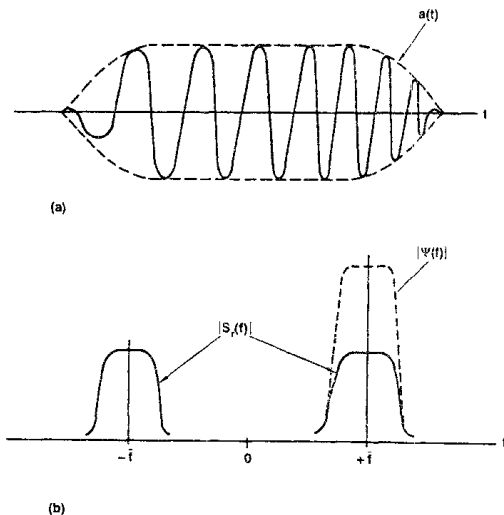


图 1.1 (a)线性调频脉冲波形和(b)它的傅立叶变换

$$\Psi(t) = s_r(t) + j\hat{s}_r(t) \quad (1.9)$$

式中, $\hat{s}_r(t)$ 是实波形 $s_r(t)$ 的希尔伯特变换。解析信号并不限制于窄带信号的表达式。从图 1.3 和式(1.9)可以看出, 实波形可以用 $\Psi(t)$ 表示为:

$$s_r(t) = \operatorname{Re} \{ |\Psi(t)| e^{j\arg \Psi(t)} \} \quad (1.10)$$

式中,

$$\arg \Psi(t) = \tan^{-1} [\hat{s}_r(t)/s_r(t)] \quad (1.11)$$