



# 星载雷达手册

[美] Leopold J. Cantafio 主编

南京电子技术研究所 译 左群声 方能航 总校



SPACE-BASED RADAR  
HANDBOOK



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

# 中国城市竞争力报告

2012-2013  
CHINA CITY COMPETITIVENESS REPORT 2012-2013



中国城市竞争力报告

CHINA CITY COMPETITIVENESS REPORT

电子信息科技专著出版专项资金资助出版

# 星载雷达手册

SPACE-BASED  
RADAR  
HANDBOOK

[美] Leopold J. Cantafio 主编

南京电子技术研究所 译  
左群声 方能航 总校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书是国内翻译出版的专门全面讨论星载雷达的第一本书。其内容涉及星载雷达的一般性描述、星载雷达运行轨道的基础理论和选择上的考虑及电离层对星载雷达运行的影响。书中还讨论了星载雷达的理论、设计、工程实现和应用,对星载双基地雷达进行了介绍,并列举了实例加以说明。为了便于读者查找更详细和更具体的资料,每章后均附有大量的参考文献。

本书内容广泛,讨论详细、全面,适合于研制星载雷达的科技人员及大专院校相关专业的师生参考。

©1989 ARTECH HOUSE, INC.

685 Canton Street,  
Norwood, MA 02062

本书中文翻译版专有出版权由 Artech House Inc. 授予电子工业出版社,未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字:01-2004-5583

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

星载雷达手册/(美)列奥坡德(Cantafio, L. J.)著;南京电子技术研究所译.—北京:电子工业出版社,2005.7

书名原文:Space-based Radar Handbook

ISBN 7-121-01474-2

I. 星... II. ①列...②南... III. 卫星载雷达—技术手册

IV. TN959.74—62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 069285 号

责任编辑:富 军 特约编辑:刘汉斌

印 刷:北京智力达印刷有限公司

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

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:30 字数:768 千字

印 次:2005 年 7 月第 1 次印刷

印 数:5000 册 定价:68.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

# 原 著 序

我们可以说，当上帝赋予了蝙蝠、海豚发射和接收超声信号的能力，使其能远距离检测物体存在的时候，也就同时创造了雷达。很久以后，L. Spallanzani 对蝙蝠进行了研究，并在 1793 年发表了研究结果。此后，1922 年，Guglielmo Marconi 在 IRE 上演讲时，极力主张用短波进行无线电探测，还描述了在几英里外探测到目标的试验内容。在同一年的秋天，Taylor 和 Young 在 NRL 上用波长为 5 m 的连续波探测到了木船。而到了 1925 年，Breit 和 Tuve 用脉冲雷达测量了电离层的高度。接着，许多工程师和科学家研制了复杂的地面、机载和舰载平台雷达。20 世纪 60 年代中期，当双子星座宇宙飞船靠一部雷达完成了与另一颗人造卫星的会合时，最新的雷达平台变成了太空中的人造卫星。从那时候起，太空中的雷达就被用于测高、海洋观测、遥感、测绘及导航。限制雷达在空间应用的惟一因素将是费用和星载雷达系统工程师的创造力。

我希望这本《星载雷达手册》是将技术付之于实践的有用的工具，就像 Leonardo da Vinci 所说的那样：“实践跟随在理论后面，因为没有理论的实践就像没有舵的船，在水中动荡而不知道正驶向哪里”。本书是第一本阐述星载雷达一般问题的书籍，但不是最后一本。编者竭诚要求每章的作者们再出一本星载雷达各特殊领域的书籍。

编者在此感谢以下人员：感谢 TRW 公司的管理人员，特别是系统技术实验室的主管 L. A. Hromas 博士，感谢他提供了必要的环境和条件，使得此书得以编写成功；感谢 Emogene Jackson 女士为本书第 1 章的草稿及其他部分打字；感谢我的妻子 Norma，在我准备手稿的过程中所表现出的耐心、对我的鼓舞和理解；感谢所有为本书做过杰出工作的作者们。

Leopold J. Cantafio

加利福尼亚

1989 年 1 月

# 著者说明

本书最初计划有 16 章，其中包括专门叙述收-发组件一章。但是，由于编者和出版单位不能作主的原因，计划中的第 13 章（T/R 组件）未能在本书中出现。为此，我们在此表示最诚挚的歉意。

# 目 录

<b>第 1 章 星载雷达 (SBR) 系统</b> .....	( 1 )
1.1 导论 .....	( 1 )
1.2 星载雷达 (SBR) 的类型 .....	( 1 )
1.2.1 I 型 SBR .....	( 1 )
1.2.2 II 型 SBR .....	( 2 )
1.2.3 III 型 SBR .....	( 2 )
1.3 系统上的考虑 .....	( 2 )
1.3.1 轨道的选择 .....	( 2 )
1.3.2 基本原理 .....	( 5 )
1.3.3 辐射环境的影响 .....	( 7 )
1.4 星载雷达系统的描述 .....	( 9 )
1.4.1 STS 会合雷达 .....	( 9 )
1.4.2 SEASAT-A 系统 .....	( 11 )
1.4.3 航天飞机成像雷达 (Shuttle Imaging Radar) .....	( 13 )
1.4.4 GEOS-3 (吉奥斯卫星-3) .....	( 13 )
1.4.5 苏联 Cosmos 1500 侧视雷达 .....	( 14 )
1.4.6 苏联合成孔径雷达 Polyus-V .....	( 16 )
1.4.7 Apollo 月球探测雷达 .....	( 18 )
1.5 未来的星载雷达系统 .....	( 20 )
1.5.1 未来会合雷达的任务 .....	( 20 )
1.5.2 未来完成遥感任务的星载雷达 .....	( 21 )
1.5.3 全球空中交通监视的星载雷达概念 .....	( 24 )
1.5.4 军用星载雷达系统 .....	( 26 )
1.5.5 军用星载雷达的应用 .....	( 27 )
1.5.6 按照联合国国际卫星监管局要求设计的星载雷达 .....	( 28 )
1.6 星载雷达议题 .....	( 29 )
1.6.1 星载雷达系统的造价 .....	( 30 )
1.6.2 存活性和易伤害性 .....	( 31 )
1.6.3 核电初级电源 .....	( 32 )
1.6.4 星载雷达系统校准 .....	( 32 )
1.6.5 杂波和干扰 .....	( 32 )
1.6.6 发射运载工具的能力 .....	( 33 )
<b>参考文献</b> .....	( 33 )

<b>第 2 章 星载雷达的轨道研究</b> .....	(36)
2.1 开普勒定律 .....	(36)
2.2 轨道方程 .....	(36)
2.3 飞行时间 .....	(38)
2.4 坐标系 .....	(39)
2.4.1 ECI 参考坐标系 .....	(39)
2.4.2 纬度-经度坐标系 .....	(39)
2.4.3 方位-仰角坐标系 .....	(39)
2.5 轨道要素 .....	(40)
2.5.1 轨道方程归纳 .....	(42)
2.6 万有引力微扰 .....	(43)
2.6.1 地球的扁圆形影响 .....	(43)
2.7 轨道系统 .....	(45)
2.7.1 发射窗口研究 .....	(47)
2.7.2 地面轨迹研究 .....	(49)
2.7.3 高度偏心、临界倾斜的 $Q=2$ 轨道 (Molniya 卫星) .....	(50)
2.8 星载雷达系统 .....	(53)
2.8.1 全球覆盖范围 .....	(53)
2.8.2 连续全球覆盖区域——极地星群 .....	(53)
2.8.3 倾斜 Walker 星群 .....	(56)
参考文献 .....	(59)
<b>第 3 章 电离层环境及其对星载雷达检测的影响</b> .....	(61)
3.1 引言 .....	(61)
3.1.1 电离不规则性的描述 .....	(62)
3.2 接收信号特征 .....	(66)
3.2.1 接收信号的一阶统计特征 .....	(66)
3.2.2 目标的统计特征 .....	(67)
3.2.3 传播信道统计特征 .....	(67)
3.2.4 传播通道相干性 .....	(68)
3.3 雷达系统特性 .....	(69)
3.4 目标检测概率 .....	(70)
3.4.1 接收机模型 .....	(71)
3.4.2 非起伏目标 .....	(71)
3.4.3 单个脉冲组检测 .....	(72)
3.4.4 $M/N$ 检测 .....	(72)
3.4.5 独立脉冲串 .....	(73)
3.4.6 恒定传播信道 .....	(73)
3.4.7 非相干积累 (传播信道保持不变) .....	(73)



3.4.8	数字方法	(73)
3.4.9	脉冲串回波的一般相关特性	(74)
3.5	仿真分析结果	(75)
3.5.1	I 型衰落	(79)
3.5.2	一般脉冲串的相干性	(79)
3.5.3	除 1 以外的 M 值	(80)
3.5.4	非相干积累	(81)
3.6	结论	(84)
	<b>参考文献</b>	(85)
<b>第 4 章</b>	<b>空间中的 SAR——空基 SAR 系统的理论、设计、工程及应用</b>	(87)
4.1	空基 SAR 设计原理	(87)
4.1.1	孔径合成的基本原理	(88)
4.1.2	模糊度关系	(90)
4.1.3	SAR 雷达方程的解读	(95)
4.2	端-端系统描述	(96)
4.2.1	系统设计和技术上的考虑	(97)
4.2.2	包括 ISAR 在内的系统实现	(99)
4.2.3	图像处理	(102)
4.3	决定性技术评估	(106)
4.3.1	非限制性技术	(106)
4.3.2	限制性技术	(108)
	<b>参考文献</b>	(116)
<b>第 5 章</b>	<b>空间双基地雷达</b>	(118)
5.1	双基地和单基地系统的比较	(118)
5.2	双基地系统	(118)
5.2.1	低地球轨道 (LEO) 系统	(118)
5.2.2	具有地球同步轨道 (GEO) 的发射机系统	(121)
5.2.3	寄生雷达系统	(121)
5.3	性能考虑	(123)
5.3.1	双基地几何结构	(123)
5.3.2	空间性能	(126)
5.3.3	辐射测量性能	(130)
5.4	双基地雷达举例	(132)
5.4.1	双基地寄生雷达 (BIPAR)	(132)
5.4.2	双基地合成孔径雷达 (BISAR)	(133)
5.4.3	具有地球同步发射机的 BISAR	(135)
5.5	总结	(136)
	<b>参考文献</b>	(137)

<b>第 6 章 空间会合雷达</b> .....	(138)
6.1 会合雷达的任务 .....	(138)
6.2 航天飞机会合雷达 .....	(139)
6.3 未来会合雷达的任务 .....	(145)
6.4 OMV 系统对接雷达 .....	(147)
6.5 地球杂波的影响 .....	(151)
6.5.1 雷达参数 .....	(151)
6.5.2 雷达与地球间的几何关系 .....	(152)
6.5.3 杂波面积 .....	(153)
6.5.4 杂波与目标的距离比 .....	(155)
6.5.5 杂波频率谱展宽 .....	(157)
6.5.6 地杂波反射系数 .....	(158)
6.5.7 地球杂波影响的总结 .....	(159)
6.6 背景噪声源 .....	(159)
<b>参考文献</b> .....	(160)
<b>第 7 章 宇宙飞船的雷达测高仪</b> .....	(161)
7.1 天基雷达测高仪的原理 .....	(161)
7.1.1 雷达测高仪的波形特征 .....	(161)
7.1.2 雷达测高仪的距离方程式 .....	(163)
7.2 雷达测高仪类型的描述和性能 .....	(166)
7.2.1 短脉冲雷达测高仪 .....	(166)
7.2.2 脉冲压缩和高分辨率雷达测高仪 .....	(169)
7.2.3 线性调频雷达测高仪 .....	(170)
7.2.4 移相键控雷达测高仪 .....	(175)
7.3 太空中使用的雷达测高仪 .....	(179)
7.3.1 土星 I 号运载火箭的雷达测高仪 .....	(179)
7.3.2 “探索者”登月飞船的雷达测高仪 .....	(181)
7.3.3 “阿波罗”登月舱的雷达测高仪 .....	(182)
7.3.4 S-193 天空实验室雷达测高仪 .....	(183)
7.3.5 “海盗”号火星登陆飞船的雷达测高仪 .....	(184)
7.3.6 GEOS-C 太空船的雷达测高仪 .....	(185)
7.3.7 SEASAT-A 海洋活动卫星的雷达测高仪 .....	(187)
7.3.8 “开拓者”号金星卫星的雷达测高仪 .....	(189)
7.3.9 GEOSAT 卫星的雷达测高仪 .....	(189)
7.4 未来的雷达测高仪 .....	(190)
<b>参考文献</b> .....	(192)

<b>第 8 章 散射仪和其他中等分辨力系统</b> .....	(193)
8.1 引言 .....	(193)
8.2 测量的基本原理 .....	(193)
8.2.1 分辨力技术 .....	(194)
8.2.2 幅度测量(散射测量) .....	(199)
8.3 海洋表面风速矢量的测量 .....	(201)
8.4 散射仪系统 .....	(206)
8.4.1 笔形波束系统 .....	(206)
8.4.2 扇形波束系统 .....	(210)
8.5 空间中的实孔径成像雷达 .....	(212)
8.6 从太空测量风 .....	(215)
8.7 总结 .....	(217)
参考文献 .....	(217)
<b>第 9 章 星载雷达热控制</b> .....	(220)
9.1 绪论 .....	(220)
9.2 热设计要求 .....	(220)
9.2.1 雷达设备要求 .....	(220)
9.2.2 任务参数 .....	(224)
9.2.3 电源系统热耗散 .....	(230)
9.3 降低热管理系统重量的折中 .....	(232)
9.4 热控制装置 .....	(233)
9.4.1 热管理系统 .....	(234)
9.4.2 热存储 .....	(238)
参考文献 .....	(238)
<b>第 10 章 卫星及其他空基目标的雷达横截面 (RCS)</b> .....	(239)
10.1 引论 .....	(239)
10.2 空间目标 .....	(242)
10.3 空中目标 .....	(250)
10.4 其他目标 .....	(253)
10.5 RCS 测量 .....	(255)
10.6 总结 .....	(256)
参考文献 .....	(256)
<b>第 11 章 SBR 的杂波和干扰</b> .....	(258)
11.1 绪言 .....	(258)
11.2 SBR 杂波的特征 .....	(260)
11.2.1 杂波幅度 .....	(260)
11.2.2 杂波谱分布 .....	(270)

11.3	SBR 杂波的独特特性 .....	(272)
11.3.1	关于天线方向图的考虑 .....	(272)
11.3.2	距离分辨力与距离模糊 .....	(276)
11.3.3	平台运动的影响 .....	(279)
11.4	杂波抑制技术 .....	(285)
11.4.1	雷达多普勒处理器 .....	(285)
11.4.2	运动补偿技术 .....	(293)
11.4.3	多普勒波束锐化 .....	(303)
11.5	星载雷达在干扰方面的考虑 .....	(305)
11.6	干扰抑制技术 .....	(308)
11.7	主天线和辅助天线的考虑 .....	(313)
11.7.1	主天线 .....	(313)
11.7.2	辅助天线 .....	(314)
11.7.3	带宽-孔径色散 .....	(315)
11.7.4	相位中心匹配 .....	(318)
11.7.5	其他问题 .....	(318)
11.8	副瓣对消器 .....	(319)
11.8.1	副瓣对消的算法 .....	(319)
11.8.2	实现的形式 .....	(320)
11.8.3	局限性 .....	(320)
11.9	杂波和干扰处理之间的相互作用 .....	(323)
	参考文献 .....	(325)

## 第 12 章 空间天线技术 .....

12.1	要求 .....	(329)
12.1.1	对 I 型 SBR 天线的要求 .....	(329)
12.1.2	对 II 型 SBR 天线的要求 .....	(329)
12.1.3	对 III 型 SBR 天线的要求 .....	(331)
12.1.4	透镜天线的要求 .....	(335)
12.1.5	其他 SBR 天线的要求 .....	(339)
12.2	几种星载天线设计和概念 .....	(342)
12.2.1	美国空间可展开的天线 .....	(342)
12.2.2	前苏联的空间可展开的天线 .....	(359)
12.3	测试空间天线 .....	(360)
12.4	未来的空间天线技术 .....	(361)
	参考文献 .....	(362)

## 第 14 章 星上雷达信号处理器 .....

14.1	引言 .....	(365)
14.2	通用信号处理器 (GSP) .....	(366)

14.2.1	计算机结构	(366)
14.2.2	阵列处理器	(368)
14.3	用 VLSI 实现通用信号处理器	(370)
14.3.1	VLSI 部件	(370)
14.3.2	处理器的实现	(372)
14.4	专用信号处理器设计	(377)
14.4.1	处理器的设计方法	(377)
14.4.2	FFT 处理器的实现	(378)
14.4.3	延迟转换器电路	(378)
14.4.4	运算实现	(381)
14.5	数字雷达波束形成器的研究方案	(383)
14.5.1	芯片设计过程	(383)
14.5.2	数字波束的形成	(383)
14.5.3	数据速率	(385)
14.5.4	算法的选择	(386)
14.5.5	VLSI 的实现	(388)
14.5.6	开发成本	(388)
	<b>参考文献</b>	(389)
<b>第 15 章</b>	<b>空间应用中的初级电源系统</b>	(391)
15.1	空间电源系统的分类	(391)
15.1.1	引言	(391)
15.1.2	系统的选用	(391)
15.1.3	空间电源的结构	(391)
15.2	太阳能阵列-电池系统 (S/A-B)	(392)
15.2.1	太阳能阵列性能	(392)
15.2.2	电池系统性能	(394)
15.3	有机兰金循环 (系统 No.1)	(400)
15.4	布雷顿 (BRAYTON) 闭式循环 (系统 No.2)	(403)
15.5	自由活塞式斯特林发动机发电系统 (系统 No.3)	(410)
15.6	超临界循环动力系统 (系统 No.4)	(416)
15.7	钾兰金循环 (系统 No.5)	(418)
15.8	碱金属热电转换 (AMTEC) 系统 (系统 No.6)	(421)
15.9	热电转换循环 (系统 No.7, 8, 9)	(422)
15.10	热离子转换系统 (系统 No.10)	(424)
15.10.1	备选的热离子转换系统	(428)
	<b>参考文献</b>	(439)
<b>第 16 章</b>	<b>星载雷达结构</b>	(440)
16.1	SBR 结构的一般要求	(440)

16.2	面结构方案	(442)
16.2.1	实表面结构	(442)
16.2.2	网格表面结构	(442)
16.2.3	整片实表面反射面结构	(443)
16.2.4	可展开的实表面反射面结构方案	(444)
16.2.5	可展开的网格结构方案	(449)
16.3	线性可展开结构方案	(454)
16.3.1	格点桅杆型臂结构	(456)
16.3.2	可折叠铰接四方形桁架桅杆结构 (FASTMAST)	(456)
16.3.3	金属带臂结构	(458)
16.3.4	可折叠横梁结构	(458)
16.4	可架设结构方案	(459)
16.5	星载雷达天线的结构设计考虑	(459)
16.6	SBR 结构材料的选择	(460)
	<b>参考文献</b>	(464)

# 第 1 章 星载雷达 (SBR) 系统

Leopold J. Cantafio

TRW

## 1.1 导论

自从第一颗载有雷达 (Gemini 雷达) 的人造卫星发射后, 星载雷达系统和技术有了很大的发展。人们为航天飞机开发了一种新型的对接雷达, 并已实际使用。无人轨道机动运载工具 (OMV) 将采用一种新的低成本对接雷达, 预期 20 世纪 90 年代初可实际运转。星载雷达中的合成孔径雷达 (SAR) 被美国和苏联用于地球和行星的探测。测高计应用在许多人造卫星上。星载雷达子系统技术在以下领域得到了发展, 即天线、发射机、接收机、固态收发 (T/R) 组件、信号处理机和初级电源。本章对这本星载雷达手册进行介绍, 并对星载雷达系统进行适当的回顾, 还对系统和技术进行有选择的讨论。本章大量地参照了章后所列的参考文献, 其中的图解和数据表, 对于那些想快速获得星载雷达问题答案的专业人员很有益处。我们将描述几种供完成宇宙飞船对接和地球、行星探索任务用的星载雷达系统。我们还将讨论星载雷达系统上需考虑的若干问题, 如空间环境、轨道选择, 星载雷达的基本原理和一些关键的问题。许多题目必须略掉, 如电子对抗和敏感的军事系统的发展。本章应看成是雷达系统中最新领域的现状报告。

## 1.2 星载雷达 (SBR) 的类型

有 3 种类型雷达已经应用或可以应用于星载方面。典型的 I 型星载雷达是小型短程会合雷达, 如那些应用在航天飞机、阿波罗和双子座计划中的雷达<sup>[1~4]</sup>。II 型星载雷达包括地球和行星资源雷达, 主要用于测绘、散射计、测高计和对地表下的探测<sup>[5~9]</sup>。侧视合成孔径雷达是典型的测绘雷达, 如应用于 SEASAT 人造卫星 (1978 年 6 月) 的雷达和航天飞机 (1981 年 11 月) 上的航天飞机成像雷达-A (SIR-A)。III 型星载雷达包括大型的相控阵监视雷达, 主要应用于多任务防御、空中交通管制和使敌方丧失防御能力<sup>[10~14]</sup>。

### 1.2.1 I 型 SBR

会合雷达是引导系统中的跟踪传感器。双子座计划和阿波罗计划总结了关于宇宙飞船空间转道会合首次机动飞行方面的工作经验。在这些计划中, 会合雷达的成功运行, 为在太空中执行许多可能的任务打开了大门。为航天飞机设计的 Ku 波段集成雷达和通信子系统 (IRACS), 演示了和人造卫星的会合、取回和队形保持等任务。这个雷达的首次飞行是 1983 年 6 月在挑战者号 STS-7 上进行的<sup>[15]</sup>。可以预见, 在不久的将来, 无人驾驶飞行器, 如轨道

机动飞行器 (OMV) 将完成大部分的会合任务。这个美国的飞行器是 TRW 公司为美国国家航空和航天局<sup>[16]</sup>正在研制的。一个新型的用于 OMV 上的会合雷达正在制造中。对会合雷达、IRACS 和 OMV 的全面论述,将在本书第 6 章进行<sup>[1]</sup>。

### 1.2.2 II 型 SBR

太空对地球的遥感,是 1960 年从第一个观察气象用的电视和红外辐射观测卫星 (TIROS) 发射开始的。太空对地球用雷达进行的遥感观测,是 1975 年从美国国家航空和航天局发射的 GEOSC 卫星开始的<sup>[18~20]</sup>,接着,1978 年又发射了 SEASAT,1981 年发射了航天飞机上的 SIR-A,并在 1984 年发射了航天飞机 STS-17 上的 SIR-B<sup>[21]</sup>。对 II 型星载雷达的要求和设计细节,在本书的第 4 章、第 7 章和第 8 章中讨论<sup>[22~24]</sup>,也可参看 Meneghini 和 Kozu 的著作<sup>[25]</sup>。1.4 节有选择地给出了 SEASAT、GEOS 和 Apollo 月球探测器雷达的细节。II 型星载雷达测量许多参数,包括高度、反射率(地表和地表下)、地形特征、海浪高度、海面上的风强度、海洋动态、海冰、降雨量和云高。

### 1.2.3 III 型 SBR

这种类型的星载雷达是对雷达系统工程师的巨大挑战。它的任务是监视一个大的区域和对多个目标进行探测或跟踪。在开始设计一个 III 型星载雷达之前,必须把对监视雷达系统的要求作详细规定。这些要求包括以下几个方面,但并不限于此<sup>[26]</sup>: ① 目标雷达截面积模型; ② 目标的速度和加速度(最大值); ③ 目标的数目; ④ 检测概率; ⑤ 虚警率和虚警时间; ⑥ 跟踪精度; ⑦ 最小目标间距; ⑧ 指示误差; ⑨ 报警时间; ⑩ 检测电子篱笆的长度; ⑪ 重访时间; ⑫ 杂波模型; ⑬ 气候模型。以这些要求作为雷达设计研究的最少输入量,就可以进行轨道的选择和参数折中。太空环境、干扰和杂波的影响必须考虑。航天飞机或太空运输系统(STS)将是未来任何一个星载雷达的发射运载工具,因此对 STS 的性能必须严格考查。太空中大型监视雷达的基本工作原理也应该考虑。

目标的特性、对它的覆盖、跟踪数据率和再访率是重要的参数。雷达的杂波下可见度、天线尺寸、扫描率和掠射角的限制也决定了星载雷达的轨道选择。星载雷达接受的自然界辐射量太大的话,太空的环境也能决定轨道选择。最后,还有一个用最少数量的卫星来降低整个系统造价的问题。

## 1.3 系统上的考虑

### 1.3.1 轨道的选择

对于每一种类型的星载雷达(特别是大型监视星载雷达)的轨道选择,都存在着许多影响因素,轨道的周期、高度和速度这几个参数是首先要考虑的。以圆形轨道绕地球飞行的卫星速度<sup>[27]</sup>为

$$v_c = \sqrt{\frac{\mu}{r}} \quad (1.1)$$

式中,  $r$  为卫星到地球中心的距离;  $\mu$  为引力常数与地球质量的乘积。



地球卫星的周期<sup>[27]</sup>为

$$T = \frac{2\pi\mu}{\sqrt{v_a^3 v_p^3}} \quad (1.2)$$

式中,  $v_a$  为卫星在远点的速度;  $v_p$  为卫星在近点的速度。对于圆形轨道的卫星,  $v_a = v_p$ , 所以圆形轨道上的卫星周期为:

$$T_c = \frac{2\pi\mu}{v_c^3} \quad (1.3)$$

表 1.1 列出了部分圆形轨道速度和周期的计算结果, 地球半径为  $20.903 \times 10^6$  ft ( $6.371 \times 10^6$  m),  $\mu$  为  $1.4069 \times 10^{16}$  ft<sup>3</sup>s<sup>-2</sup> ( $3.9839 \times 10^{14}$  m<sup>3</sup>/s<sup>2</sup>), 1 海里为 6076.1 ft (1852 m)。

表 1.1 部分轨道参数

高 度		速 度		周 期
(nmi)	(km)	(ft/s)	(m/s)	(min)
99	183	25587	7799	88
414	767	24520	7474	100
912	1689	23074	7034	120
2262	4189	20157	6144	180
5612	10393	15999	4876	360
19369	35871	10079	3072	1440

有许多关于获得最佳覆盖范围的卫星群设计的研究报道<sup>[28~33]</sup>。Luders 和 Ginsberg<sup>[28]</sup>描述了获得地球上纬度区域连续覆盖问题的解析解<sup>[28]</sup>。Emara 和 Leondes 用最少的卫星群, 即至少四个卫星, 解决了同时观测的问题<sup>[29]</sup>。Ballard<sup>[30]</sup>扩展了先前 Walker<sup>[31]</sup>的工作, 并且分析了玫瑰花形卫星群, 这个星群可以提供地球表面上任一观测点和最近卫星点之间最大可能的大圆距离。各种各样的星群可以提供一重、二重、三重和四重可见度。Beste<sup>[32]</sup>设计的卫星群用最少的卫星可以提供单重的和三重的连续覆盖区域。所有这些研究决定了卫星的覆盖范围, 卫星上的传感器仅仅围绕着天底点的一个角度进行观测。光电传感器和测绘雷达一般提供这样的覆盖区域。但是, 这些研究对必须在杂波下探测目标的星载雷达监视传感器没有得出什么结果。这些传感器一般都有一个从天底开始  $20^\circ \sim 30^\circ$  范围的“天底洞 (nadir hole)”, 在其中能进行可靠检测的信噪比太小。图 1.1 为一个  $50^\circ$  最大掠射角和一个  $3^\circ$  最小掠射角的情况。最小掠射角是由大气衰减和折射角误差所决定的极限, 大气的衰减分配在星载雷达损耗预算中。为了说明能得到不同结果, 要考虑在 10371 km 轨道高度提供地球上连续覆盖的区域要求。如果每个卫星上的单个传感器没有掠射角的限制, 6 个卫星的卫星群就可以从极点提供所需的连续性覆盖。根据 Harney 的研究结果<sup>[33]</sup>, 卫星需等间距分布在两个轨道面上。但是, 如果星载雷达中传感器的掠射角有  $3^\circ \sim 60^\circ$  的限制, 那么就需 10 个卫星的卫星群来提供所要求的覆盖。这个卫星群由相等间隔、倾角为  $49.4^\circ$  的 10 颗卫星组成, 每个轨道面中各有一颗卫星。它类似于 Walker 10/10/8 卫星群<sup>[31]</sup>。如果掠射角在  $3^\circ \sim 70^\circ$  范围内, 那么 Walker 的 14/14/12 结构的 14 个卫星群可提供连续的全球二重覆盖。每一个轨道面的倾斜角为  $49.4^\circ$ 。图 1.2 示出了卫星群的“快照”。对星载雷达轨道问题的全面讨论将在第 2 章中进行<sup>[34]</sup>。