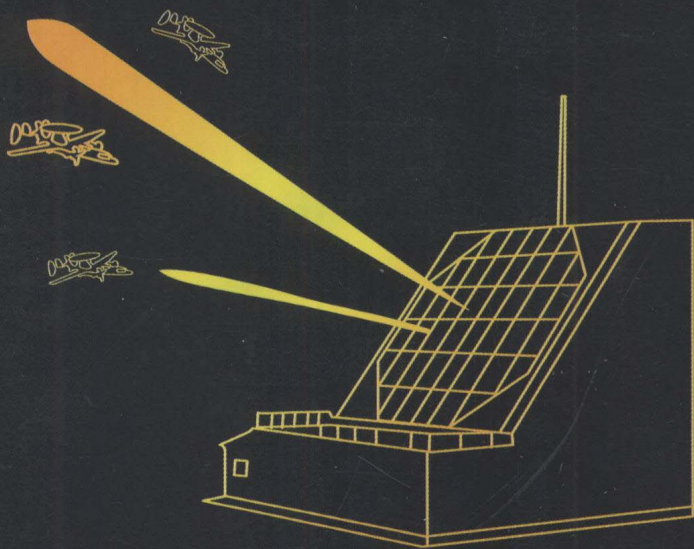


相控阵雷达资源 管理的理论与方法

胡卫东 郁文贤 卢建斌 王 壮 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

相控阵雷达资源 管理的理论与方法

胡卫东 郁文贤 卢建斌 王壮 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

相控阵雷达是一种多功能、高效率的雷达系统,而资源优化管理是相控阵雷达发挥其效能的核心。本书以此为研究对象,归纳和阐述了相控阵雷达系统中资源优化管理的理论与方法。在对相控阵雷达系统工作原理进行介绍的基础上,根据雷达所完成的功能及处理资源的划分,按照搜索资源优化、跟踪资源管理、实时任务调度以及计算负载分配四个方面的内容进行阐述,涉及到工作模式的选择、波束扫描方式、目标分配策略、任务计划的编制和硬件处理资源的分配。最后以多目标优先级的确定为例,简要介绍了当前的研究热点——基于知识的相控阵雷达资源管理技术。

图书在版编目(CIP)数据

相控阵雷达资源管理的理论与方法 / 胡卫东等编著.
—北京:国防工业出版社,2010.5
ISBN 978-7-118-06531-2

I. ①相... II. ①胡... III. ①相控阵雷达 IV. ①TN958.92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 182628 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)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 7 $\frac{1}{2}$ 字数 218 千字
2010 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 30.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

我国从 20 世纪 70 年代开始研制相控阵雷达,经过 30 多年,相控阵雷达技术有了长足的发展,主要体现在系统设计、器件国产化及制造工艺的提高。相控阵雷达相比于常规雷达造价非常昂贵,随着相控阵雷达的装备和使用,如何充分利用其波束灵活扫描的特点,最大限度地发挥其效能逐渐成为相控阵雷达技术研究的热点,也是当前相控阵雷达技术相对薄弱的环节,已经出版的有关相控阵雷达的图书专著在这方面涉及甚少。笔者从 1996 年开始接触相控阵雷达系统的研究和论证工作,从原理仿真、系统方案设计直至工程实践,深切地体会到相控阵雷达系统在提供资源灵活选择性的同时,也使得管理调度策略的设计需要考虑的因素更多而难于把握,系统部分性能无法沿用常规雷达通过静态指标的推广得到。面对信息采集能力超强的相控阵雷达,人们非常希望它能够自主地完成大量的感知任务。然而,毕竟雷达不具备人的智能水平,它所采取的方式如同冯·诺依曼计算机一样,单纯靠速度和计算资源来解决,无论面对何种目标环境,一律按照程序设计好的方式工作,这导致了相当多的实际相控阵雷达系统采取简单的固定调度模式工作,从而妨碍了雷达提供的资源充分发挥其效能。

要发挥相控阵雷达的潜能,必须对其资源进行自适应地动态优化管理。相控阵雷达的资源管理可视为一个多约束的最优化问题,这方面可借鉴的理论方法似乎相当多。但是相控阵雷达资源优化的特点决定了难以简单套用现有的优化理论与方法。第一,相控阵雷达资源调度的影响环节覆盖了从测量数据到形成目标记录再到控制调度指令多个层面,各个层面优化的目标和面对的数

据类型及细粒度各不相同,很难用一种方式统一描述。第二,相控阵雷达的资源调度是一个动态过程,前面的调度结果对后续优化会产生影响。第三,相控阵雷达的资源优化不仅要考虑系统内部可提供的资源,更要考虑所感知的目标环境的变化。因为,资源优化的最终目的是保证雷达系统能够及时感知外界目标环境的变化,维持能够准确反映目标当前状态的记录。正因为如此,对相控阵雷达的资源优化问题的研究相对分散,涉及面广。大量的研究集中在局部处理环节上,如针对目标捕获问题、针对多目标跟踪问题等,采用的优化准则和方法也是五花八门。这些工作虽然对该领域的发展非常有意义,但同时过于专业的阐述也使得大量希望借鉴和掌握这些成果的研究人员望而却步。本书的目的就是试图通过梳理相控阵雷达资源管理方面的研究成果,探讨相控阵雷达资源优化管理的理论和实现方法,按照雷达检测、跟踪、任务调度和计算负载分配的内容进行归纳和整合,并结合最新的研究成果阐述该领域的发展方向,试图向读者展示相控阵雷达资源管理领域当前的技术发展全貌,希望能够对从事该领域研究和实践工作的科技人员提供参考借鉴和理论指导。

在构思本书的过程中,不少内容得益于向中电十四所张光义院士的请教;空间探测相控阵雷达任务规划部分来源于与方艾里先生的交流和实践;基于知识的资源管理一章得益于北京航空航天大学毛士艺教授的指导。同时,共同工作和学习的同事及学生为本书提供了重要的写作素材,谨向他们表示衷心的感谢!

由于水平有限,书中存在不完善之处在所难免,恳请读者批评指正。

胡卫东

目 录

第 1 章 相控阵雷达系统概述	1
1.1 相控阵雷达的由来和特点.....	1
1.2 相控阵雷达系统结构、处理流程及分类	3
1.2.1 相控阵雷达系统结构	3
1.2.2 相控阵雷达处理流程	5
1.2.3 相控阵雷达系统分类	5
1.3 相控阵雷达工作原理.....	7
1.3.1 时间分割工作原理	7
1.3.2 相控阵天线原理.....	11
1.3.3 移相器的工作原理.....	16
1.3.4 相控阵雷达控制器工作原理.....	19
1.4 相控阵雷达资源管理	25
1.4.1 相控阵雷达资源管理概述.....	25
1.4.2 相控阵雷达资源管理内容.....	29
第 2 章 相控阵雷达搜索方式下的资源优化管理	42
2.1 引言	42
2.2 相控阵雷达波位编排	43
2.2.1 正弦空间坐标系.....	43
2.2.2 坐标变换.....	45
2.2.3 阵列最佳倾角.....	48
2.2.4 波束排列方式的选择.....	49

2.2.5	波束编排的仿真实现	49
2.3	相控阵雷达搜索参数优化	51
2.3.1	单次驻留时间内的参数优化	52
2.3.2	多帧搜索检测的参数设计	57
2.4	相控阵雷达搜索策略	66
2.4.1	无先验信息下的优化搜索策略	66
2.4.2	相控阵雷达指示搜索策略	69
2.5	相控阵雷达目标检测的资源优化	78
2.5.1	相控阵雷达脉冲串二进制检测	78
2.5.2	相控阵雷达序列检测中的资源管理	82
第3章	相控阵雷达跟踪方式下资源管理技术	85
3.1	引言	85
3.2	基于风险代价的相控阵雷达资源管理	86
3.2.1	目标状态的马尔可夫链表示	86
3.2.2	基于隐马尔可夫链的优化模型	87
3.2.3	隐马尔可夫问题的信息状态表示	87
3.2.4	问题的求解过程	89
3.2.5	数值仿真分析	91
3.3	基于信息论的相控阵雷达资源管理	93
3.3.1	信息论基础	93
3.3.2	目标检测的信息表示	94
3.3.3	目标跟踪的信息表示	95
3.3.4	资源分配方法	98
3.3.5	仿真分析	99
3.4	基于协方差控制的跟踪资源管理优化模型	102
3.4.1	多目标跟踪资源管理问题描述	102
3.4.2	基于协方差控制的资源管理模型	103
3.4.3	基于协方差控制的跟踪资源管理算法	105

3.4.4	仿真结果与分析	107
3.4.5	期望协方差的选取	115
3.4.6	协方差控制资源管理算法的进一步讨论	117
第 4 章	相控阵雷达系统实时任务调度	119
4.1	引言	119
4.2	修正的 EDF 调度模型	120
4.2.1	相控阵雷达任务调度基础	120
4.2.2	经典的 EDF 调度模型	126
4.2.3	修正的 EDF 调度模型	128
4.2.4	修正 EDF 调度模型的推广	133
4.3	相控阵雷达自适应调度算法	134
4.3.1	相控阵雷达调度算法	134
4.3.2	相控阵雷达任务模型	134
4.3.3	基于修正 EDF 模型的自适应调度	137
4.3.4	调度器负载量分析	139
4.3.5	仿真结果与分析	141
4.4	空间探测相控阵雷达任务规划	145
4.4.1	空间探测相控阵雷达任务规划	145
4.4.2	观测任务模型	146
4.4.3	任务规划算法	148
4.4.4	任务规划仿真分析	151
4.5	可变观测时长的任务规划算法	158
4.5.1	可变观测时长的任务模型	159
4.5.2	可变观测时长的任务规划算法	160
4.5.3	可变观测时长的任务规划仿真	162
第 5 章	相控阵雷达系统中的计算负载分配	167
5.1	引言	167

5.2	实时可分性负载分配模型	169
5.2.1	相控阵雷达负载分配特点	169
5.2.2	可分性负载分配模型	169
5.2.3	实时可分性负载分配优化模型	171
5.3	实时可分性负载最优化分配	172
5.3.1	负载处理的总时间	172
5.3.2	处理节点最优分配次序	173
5.3.3	处理节点的最优数目	175
5.3.4	最优负载分配算法的实现	177
5.3.5	仿真结果与分析	178
5.4	含启动开销的实时可分性负载分配	179
5.4.1	含启动开销的总线网络分配模型	180
5.4.2	处理节点数目上限	182
5.4.3	处理节点最优分配次序	184
5.4.4	处理节点的最优数目	188
5.4.5	仿真结果与分析	189
5.5	网络参数的估计	193
第6章	基于知识的相控阵雷达资源管理	195
6.1	基于知识的雷达系统	195
6.2	基于知识的相控阵雷达资源管理	198
6.2.1	相控阵雷达任务调度	199
6.2.2	基于模糊逻辑的优先级确定	204
6.2.3	模糊逻辑和硬逻辑优先级确定的区别	213
附录	矩阵度量函数的选取	217
	参考文献	218

第 1 章 相控阵雷达系统概述

1.1 相控阵雷达的由来和特点

传统的雷达是利用整个天线系统或其某一部分的机械运动来使天线波束扫过一定的空域、地面或海面,实现对监视区域的目标搜索。由于这种机械扫描雷达的波束随天线一起转动,且直径达十几米、重量上百吨的天线受惯性的影响,转一圈往往要几秒或数十秒的时间。当各种高速飞行器,如导弹、洲际导弹和人造卫星出现时,机械扫描雷达难以适应目标环境变化的需要。为了获得灵活捷变的天线波束指向,缩短控制反应时间,20 世纪 40 年代人们提出使用电扫描技术来替代机械扫描技术。电扫描雷达在搜索和跟踪目标时,天线阵、馈源等不必做机械运动,因而无机械惯性的限制,扫描速度可显著提高,波束控制更加灵活。实现电扫描主要有两种方法,一种是利用电子技术控制阵列天线各辐射单元的馈电相位来改变波束方向,这种雷达称为相控阵雷达;另一种方法是通过工作频率的变化来控制阵列天线的各个单元,得到所需的天线波束指向,采用这种电扫描方法的雷达称为频扫雷达^[1]。

20 世纪 60 年代以来,由于空间监视和洲际弹道导弹预警的迫切需要,使得相控阵雷达技术发展很快。与观察飞机的常规雷达相比,空间监视雷达作用距离由几百千米提高到几千千米,雷达要能够对多批高速运动目标进行精密跟踪。为此,要大大提高雷达的数据率,解决边搜索、边跟踪及合理使用雷达信号能量等问题。相控阵天线理论与实践以及数字计算机技术的进步,催生了当时战略相控阵雷达的问世。

20 世纪 70 年代以后,出现了采用一维相位扫描天线的各种

战术相控阵雷达。随着相扫技术的引入,简化了三坐标雷达的设计、提高了雷达的性能,目前,二维相位扫描的战术三坐标雷达已逐渐增多,可以说相控阵雷达已成为二坐标与三坐标战术雷达发展的主流。除了军事需求的推动外,数字集成电路、微波技术、信号处理技术的进步,给相控阵雷达的发展注入了新的活力。相控阵天线技术已开始大范围地应用于通信、电子战(EW)与导航领域。

与传统雷达相比,相控阵雷达的主要特点和优势表现在以下几个方面:

(1) 高效率搜索、多目标跟踪,兼有多种雷达功能。

相控阵雷达具有高效率搜索、多目标跟踪与多功能用途的工作能力,其实现的基础是任务的可分割性和相控阵天线波束快速扫描技术。利用波束快速扫描能力,合理安排雷达搜索的区域、搜索方式与跟踪方式之间的时间交替及其信号能量的分配与转换,可以合理解决搜索、目标确认、跟踪起始、目标跟踪、跟踪丢失等不同工作状态的要求;可以在跟踪多个目标的前提下,继续维持对一定空域的搜索能力;可以有效地解决对多批、高速、高机动目标的跟踪问题;能按照雷达工作环境的变化,自适应调整工作方式,按目标雷达反射信号能量大小、目标远近及目标重要性或目标威胁程度等改变雷达工作方式并进行雷达信号的能量分配。

(2) 空间定向与空域滤波能力。

相控阵天线技术与多通道信号处理相结合,可以实现在探测感兴趣目标的同时,抑制不期望信号(干扰)的影响。雷达天线的方向性不可能做得非常理想,从特定方向上到来的干扰信号能够进入到雷达接收通道中。可以利用多通道的优势,提取出干扰信号作为参考信号,来对消它对感兴趣信号的影响。这相当于对来自不同方向的信号在空间上进行划分和过滤,从而提高了雷达对信号的空间定向和滤波能力。在机载和星载雷达系统中广泛采用了基于此种设想产生的空-时二维自适应处理技术,可显著提高雷达下视过程中产生的地面杂波对目标反射信号的影响。

(3) 大功率孔径乘积的实现与可变功率孔径乘积的利用。

探测低可观测目标、探测外空目标,均要求雷达具有大的发射功率与接收天线面积的乘积。相控阵天线是实现大功率孔径乘积的基础。天线波束相控扫描的实现,可以去除机械扫描雷达天线的伺服驱动系统,同时也减少了加大雷达天线口径所受到的各种限制,因而,相控阵雷达天线可以做得足够大,固定不动。利用电子扫描代替机械扫描,去除天线转动要求的大功率驱动伺服系统,这对远程、超远程雷达与通信系统均有重要意义。

(4) 天线孔径与雷达平台共形能力的实现。

相控阵天线一般由众多受相位控制的天线单元按一定方式排列构成。天线单元分布在平面上的称为平面相控阵天线;分布在曲面上的称为曲面阵天线,如果该曲面与雷达安装平台的外形一致,则称为共形相控阵天线。采用共形相控阵天线的机载预警雷达在工作方式上更易实现全空域覆盖,更易于将雷达、电子战、通信、导航等电子系统进行综合设计,构成综合电子集成系统。舰载相控阵雷达采用共形相控阵天线有利于降低雷达自身引入的电磁散射特征,获得舰船的隐身效果。采用与地形共形的相控阵天线有利于雷达的伪装,获得更大的天线孔径面积和提高雷达的实孔径分辨率。

当然,相控阵雷达多目标、多功能工作能力并非是不受限制的,它受到雷达时间资源、辐射信号能量资源、计算处理能力等因素的限制。因此,要真正实现相控阵雷达的高效工作,雷达系统控制和操作的复杂程度要明显高于常规雷达。

1.2 相控阵雷达系统结构、 处理流程及分类

1.2.1 相控阵雷达系统结构

相控阵雷达系统大部分结构与传统的机械扫描雷达类似,仍然是由最主要的发射分系统、接收分系统以及数据处理分系统等

组成^[2]。除此之外,相控阵雷达系统中还有其独特的阵列天线、T/R 组件、接收多波束形成网络、雷达控制器以及波束控制器等设备。

典型的相控阵雷达系统结构如图 1-1 所示,其中相控阵天线可以是收发分开的,也可以是收发共用的,目前绝大部分实际的相控阵雷达系统都是采用收发共用天线的形式,图 1-1 所示的即为收发合一天线的情况。接收多波束形成网络可以是相互覆盖的接收多波束,也可以是单脉冲测角所需要的和、差波束。波束控制器是相控阵雷达系统所特有的,它取代了传统机械扫描雷达中的伺服驱动设备。其中波束控制器接收到雷达控制器的指令,解算出每一个天线单元上移相器所需的波控代码,移相器再根据这些波控代码来控制阵列天线的波束指向。

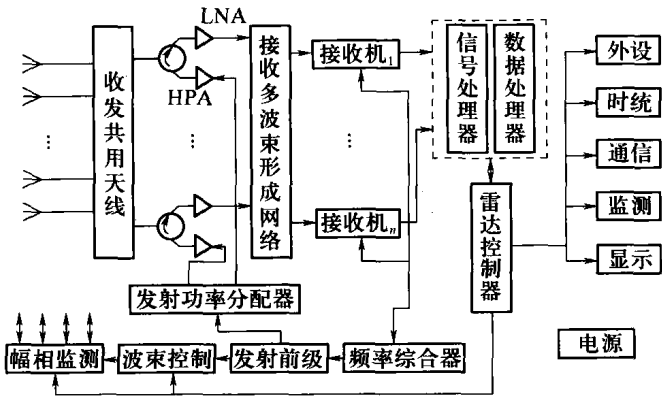


图 1-1 相控阵雷达系统结构框图

雷达控制器,也称为雷达调度器或中心计算机,是相控阵雷达系统的控制中心,直接控制着相控阵雷达其它分系统的运行,负责雷达系统执行任务、工作方式、工作参数等的管理。在雷达控制器中,可以按照预先编制好的程序控制雷达发射波形和接收波束,实现对预定空域搜索。当搜索捕获到目标后,也是在雷达控制器的控制下,建立对新目标的跟踪,同时管理着多个已跟踪目标,实现雷达的搜索与跟踪功能。在目标失跟情况下,雷

达控制器要控制和实现对目标的补照,以继续维持对目标的跟踪。雷达控制器还可以根据目标回波信号的强弱实现自适应的能量管理、改变发射信号波形、信号重复频率以及发射脉冲数目等。

1.2.2 相控阵雷达处理流程

针对上述相控阵雷达系统结构,雷达工作处理的一般流程是,首先相控阵天线接收到目标的回波信号,经过接收网络、接收机处理后,送入信号/数据处理器,在其中完成目标的检测、测量、关联、滤波以及预测等处理;雷达控制器根据上述处理结果,产生雷达波束的驻留指令,包括雷达波束的指向、发射时间、频率、工作波形、驻留时间等参数,并将其送往雷达发射机和波束控制器;发射机根据雷达控制器指令产生相应的工作波形,通过发射网络到达阵列天线辐射出去;同时波束控制器根据波束指向角计算出移相器所需的波控码,通过移相器控制阵列天线的波束指向,完成雷达控制器的任务指令,形成任务处理的一个闭环。其处理流程如图 1-2 所示。

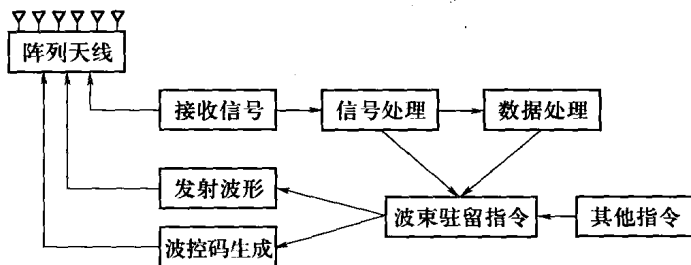


图 1-2 相控阵雷达工作处理的一般流程

1.2.3 相控阵雷达系统分类

随着相控阵雷达技术的发展,其应用也从早期的战略预警雷达扩展到战术雷达、精密跟踪测量雷达等,表 1-1 列出了目前主要的相控阵雷达类型、作用和功能。

表 1-1 主要相控阵雷达的类型、作用和功能

类 型	作用及功能
空间监视与导弹预警雷达	卫星监视； 空间目标编目,空间“垃圾”监视； 远程弹道导弹防御； 为大型光学/激光/红外设备指示目标； 战略武器评估试验； 电离层参数测量； 再入大气物理现象研究
战区弹道导弹防御(TMD)雷达(对底层防御与高层防御系统)	目标指示； 落点预报,发点外推； 反弹道导弹拦截制导； 拦截效果评估； 通信传输； 低轨卫星编目,轨道目标识别
战术防空雷达 (1) 三坐标相控阵雷达(3DPAR)； (2) 二坐标相控阵雷达(2DPAR)	空中监视； 目标指示与引导； 中段制导； 无源定位
机载相控阵雷达 (1) 空中早期预警相控阵雷达； (2) 多功能脉冲多普勒火控相控阵雷达； (3) 机载战场监视/侦察相控阵雷达； (4) 直升机载相控阵雷达； (5) 无人机载相控阵雷达； (6) 气球载与飞艇载相控阵雷达	空中早期预警； 空中指挥引导； 远程多目标跟踪与制导； 地面目标成像与检测； 战场监视与侦察； 无源定位； 低空飞行避碰； 武器投放,对地面攻击
舰载多功能相控阵雷达	海上战区弹道导弹预警； 远程多目标搜索、跟踪和识别； 多目标制导； 无源定位； 舰载综合电子系统

(续)

类 型	作用及功能
相控阵火控雷达	低空防御; 密集阵; 组网,协同作战
多目标精密跟踪相控阵雷达	卫星/导弹发射; 靶场测量,性能评估; 攻防试验; 空间目标编目; 为大型光学/激光/红外设备指示目标; 目标识别研究和试验

1.3 相控阵雷达工作原理

1.3.1 时间分割工作原理

相控阵雷达需要在执行空域搜索的同时,维持重点目标的跟踪,具有多任务、多功能特性。这些任务和功能可以分解成雷达在特定时刻对某一空间位置的照射动作,它们在雷达系统内部的时间轴上通常是串行完成的。由于雷达天线照射波束具有一定的覆盖能力,决定了被探测目标穿越波束需要一定的时间,只要在目标穿越时间内重访搜索区域即可保证不会丢失目标;由于被跟踪目标的运动行为在一定时间内可预测,决定了不必密集地照射此目标也可保持对它的跟踪。由此可知,一个搜索或跟踪任务的采样频度只要不超过限度,在时间安排上具有一定的灵活性和独立性,换句话说,在时间上是可分割的。

在搜索兼跟踪的需求下,相控阵雷达有两种工作模式来解决搜索和跟踪任务在时间上的冲突。一种是边搜索边跟踪模式(Track While Search, TWS),即没有专门的跟踪任务,只是利用搜索状态的数据率来维持目标的跟踪;另外一种搜索加跟踪模式

(Track And Search, TAS),即跟踪任务和搜索任务相独立,也就是将跟踪任务占用的时间安插到搜索时间中。边搜索边跟踪模式与传统的机械扫描雷达相类似,其缺点是可管理和控制的自由度低、自适应能力弱,而且在这种模式下雷达性能还不如机械扫描雷达。因此针对相控阵雷达而言,搜索加跟踪的 TAS 模式才是代表相控阵雷达技术优势的工作方式。相控阵雷达在 TAS 模式下任务执行的示意图如图 1-3 所示。

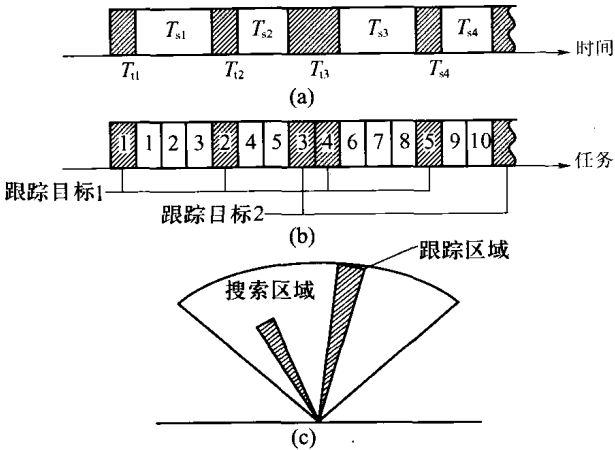


图 1-3 相控阵雷达时间分割执行搜索和跟踪示意图
 (a) 搜索与跟踪时间分配; (b) 搜索与跟踪任务分配;
 (c) 搜索与跟踪区域示意图。

假设雷达监视空域内有两个目标,相控阵雷达对这两个目标的跟踪采样率不同,目标 1 的跟踪采样率高于目标 2,此时相控阵雷达就需要同时完成跟踪目标 1、目标 2 以及空域的搜索任务。由于两个目标的跟踪数据率比搜索数据率要高,所以搜索任务执行一次的时间,可以插入执行多次的跟踪任务,即图 1-3(a)所示的将跟踪时间安插到搜索时间内,在需要执行跟踪任务的时候中断搜索任务,将天线波束用于目标跟踪,跟踪完毕后再继续进行搜索。假设搜索全部空域的时间为 $T_{s1} + T_{s2} + T_{s3} + T_{s4}$,在此过程中共进行了目标 1 的 4 次跟踪以及目标 2 的两次跟踪。总体上看,