

多功能地基相控阵雷达 原理与技术

Principle and Technology of
Multi-functional Foundation Phased Array Radar

俞志强 等编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

多功能地基相控阵 雷达原理与技术

主 编 俞志强
编 委 刘诗华 徐晨曦 项建涛
袁俊泉 胡 冰 程东升
祁 炜 孙智建

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

多功能地基相控阵雷达(简称 GBR)是弹道导弹防御系统(BMD)中重要装备之一。本书较全面地梳理了多功能地基相控阵雷达原理与技术,内容系统性、理论性和应用性较强。全书分为9章:第1章介绍GBR作用、总体概况、主要战术技术性能及发展现状与趋势;第2章~第6章分别对天线阵面、接收、信号处理、数据处理、目标识别等分系统相关的原理与技术进行了阐述;第7章~第9章分别对任务调度与资源管理、伺服、冷却与制冷等技术进行了系统分析,阐述了其工作原理与技术。

本书可作为高等院校雷达专业高年级本科生、硕士生和博士生的教材和参考书,也可供从事雷达设备研制、生产和使用的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

多功能地基相控阵雷达原理与技术/俞志强等编著.

—北京:国防工业出版社,2019.8

ISBN 978-7-118-11861-2

I. ①多… II. ①俞… III. ①相控阵雷达

IV. ①TN958.92

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第152925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)

北京虎彩文化传播有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 880×1230 1/32 印张 11½ 字数 331千字

2019年8月第1版第1次印刷 印数 1—1000册 定价 46.00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

多功能地基相控阵雷达(简称 GBR)是用于弹道导弹防御系统(BMD)中的相控阵地基雷达,完成对弹道导弹的精密跟踪、落点预报、目标识别和打击评估等任务。本书根据 GBR 系统基本组成,重点介绍与一般雷达分系统不相同的各分系统的工作原理与关键技术;为了系统性、更好地掌握 GBR 原理与技术,部分章节拓展介绍了一般相控阵雷达的原理与技术。

本书共分 9 章。第 1 章概论,概述了 GBR 在弹道导弹防御系统中的作用,介绍了 GBR 功能、基本组成及主要战术技术性能等,简述了国外 GBR 发展概况。第 2 章天线阵面分系统,在介绍相控阵天线基本原理基础上,对有源、低副瓣、多极化、宽带等相控阵天线技术以及馈电馈相技术进行了分析。第 3 章接收分系统,主要对数字接收通道技术、直接数字频率合成技术和宽带接收通道技术进行了分析。第 4 章信号处理技术,主要讨论了 GBR 涉及的波束形成技术、空域滤波技术、信号检测技术以及宽带相控阵雷达信号处理技术。第 5 章数据处理分系统,主要对多目标跟踪技术、定轨技术、卫星轨道预报与导弹发落点预报技术进行了分析。第 6 章目标识别分系统,主要分析了弹道导弹目标特征提取技术、基于单一特征的目标分类技术和基于多特征的目标综合识别技术。第 7 章任务调度与资源管理技术,在概要地介绍资源管理在相控阵雷达中的作用地位基础上,分别从搜索方式下的资源管理、跟踪方式下的资源管理所涉及的主要方法和相关技术进行了分析,并简单介绍了相控阵雷达事件调度问题。第 8 章伺服分系统,介绍了伺服分系统齿轮消除、旋转变压器测角、感应同步器测角和转台限位保护等技术。第 9 章制冷与冷却技术,介绍了电子设备的热设计、制冷技术、电子设备冷却技术。

本书第1章和2.1节、2.2节、2.3节由俞志强编写;2.4节、2.5节由祁炜编写;2.6节、2.7节由孙智建编写;第3章由胡冰编写;第4章由袁俊泉编写;第5章、第6章由刘诗华编写;第7章由徐晨曦编写;第8章由程东升编写;第9章由项建涛编写。主编俞志强设计了本书的总体框架和章节内容,并对全书进行了统稿和修改。本书在编写过程中,全面总结了近年来教学经验和科研项目的相关成果,同时也参考和引用了较多现代雷达新技术相关著作以及论文所阐述的原理与技术。

由于作者水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2019年1月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 GBR 作用	1
1.1.1 弹道导弹目标特性	1
1.1.2 反导预警情报需求	2
1.1.3 其他导弹预警装备能力与缺陷	3
1.1.4 GBR 在弹道导弹防御系统中的作用	3
1.2 GBR 总体概况	5
1.2.1 主要任务与功能	5
1.2.2 组成与工作原理	5
1.3 GBR 主要战术技术性能	7
1.3.1 作战使用要求	7
1.3.2 主要战术技术性能指标分析	8
1.4 GBR 发展现状和趋势	9
1.4.1 GBR 发展概况	9
1.4.2 国外 GBR 系列雷达	11
第 2 章 天线阵面分系统	14
2.1 概述	14
2.1.1 功能与特点	14
2.1.2 相控阵雷达天线的分类	15
2.2 相控阵雷达天线基本原理	18
2.2.1 线性相控阵天线	18
2.2.2 矩形排列平面相控阵天线	23
2.2.3 三角形排列平面相控阵天线	30
2.2.4 共形相控阵天线	33

2.3	有源相控阵天线技术	37
2.3.1	有源相控阵雷达天线的特点	38
2.3.2	T/R 组件功能与组成	40
2.3.3	T/R 组件工作原理	45
2.4	低副瓣相控阵天线技术	53
2.4.1	幅度加权法	53
2.4.2	密度加权法	56
2.4.3	相位加权法	58
2.5	多极化相控阵天线技术	59
2.5.1	基本概念	59
2.5.2	多极化相控阵天线原理	61
2.5.3	多极化相控阵雷达的极化工作状态	64
2.5.4	多极化相控阵天线的构成	75
2.6	宽带相控阵天线技术	78
2.6.1	宽带的概念	78
2.6.2	雷达的宽带作用	80
2.6.3	相控阵天线的带宽限制	83
2.6.4	延迟补偿宽带相控阵天线技术	90
2.7	相控阵天线馈电馈相技术	99
2.7.1	馈电技术	100
2.7.2	馈相技术	110
2.7.3	波控技术	117
2.7.4	虚位技术及随机馈相	124
第3章	接收分系统	131
3.1	概述	131
3.1.1	功能与组成	131
3.1.2	主要性能	132
3.2	数字接收通道技术	137
3.2.1	数字接收机	137
3.2.2	数字下变频	139
3.2.3	中频数字接收机举例	140

3.3	直接数字频率合成技术	142
3.3.1	DDS 的基本原理	143
3.3.2	DDS 的组成与工作过程	144
3.3.3	DDS 的主要性能指标	144
3.3.4	DDS 芯片举例	148
3.4	宽带接收通道技术	151
3.4.1	窄带信号和宽带信号	151
3.4.2	大时宽带乘积信号的产生	153
3.4.3	宽带接收处理方法	154
3.4.4	宽带去斜处理技术	155
第 4 章	信号处理技术	159
4.1	波束形成技术	159
4.1.1	波束形成基础	160
4.1.2	多波束形成技术	171
4.1.3	数字波束形成技术	177
4.2	空域滤波技术	183
4.2.1	空域滤波的基本概念	183
4.2.2	自适应天线副瓣置零技术	186
4.3	信号检测技术	189
4.3.1	相控阵雷达信号检测的特点	190
4.3.2	短脉冲序列的信号检测	192
4.3.3	序列检测	199
4.4	ISAR 信号处理技术	203
4.4.1	ISAR 概述	203
4.4.2	ISAR 信号处理流程	205
第 5 章	数据处理分系统	207
5.1	概述	207
5.1.1	雷达数据处理	207
5.1.2	相控阵雷达数据处理	208
5.2	多目标跟踪技术	209
5.2.1	“最近邻”法	210

5.2.2	贝叶斯估计法	212
5.2.3	整体相关法	213
5.3	定轨技术	215
5.3.1	初轨确定	215
5.3.2	轨道改进	222
5.4	卫星轨道预报与导弹发落点预报技术	225
5.4.1	卫星轨道预报	225
5.4.2	导弹发落点预报	229
第6章	目标识别分系统	234
6.1	概述	234
6.1.1	雷达目标识别	234
6.1.2	弹道导弹目标识别	235
6.2	弹道导弹目标特征提取技术	236
6.2.1	窄带 RCS 特征提取	238
6.2.2	微动特征提取	242
6.2.3	极化特征提取	246
6.2.4	一维像特征提取	250
6.2.5	二维像特征提取	252
6.2.6	质阻比特征提取	254
6.3	基于单一特征的目标分类技术	258
6.4	基于多特征的目标综合识别技术	259
6.4.1	目标综合识别技术	259
6.4.2	基于灰色关联度的多特征目标综合识别	262
第7章	任务调度与资源管理技术	265
7.1	相控阵雷达资源管理概述	265
7.1.1	资源管理的重要作用	266
7.1.2	资源管理的主要内容	269
7.2	相控阵雷达搜索方式下的资源管理	273
7.2.1	搜索数据率与时间资源管理	273
7.2.2	搜索状态下的能量资源调节	278
7.2.3	搜索方式与参数控制	284

7.3	相控阵雷达跟踪方式下的资源管理	287
7.3.1	搜索确认与跟踪起始	287
7.3.2	跟踪数据率与目标容量	290
7.3.3	跟踪方式与参数控制	294
7.4	相控阵雷达事件管理与调度	296
7.4.1	事件属性管理	296
7.4.2	事件调度策略	298
7.4.3	自适应调度算法	300
第8章	伺服分系统	304
8.1	概述	304
8.2	齿轮消隙技术	305
8.2.1	齿轮减速箱的齿隙概念及对伺服分系统的影响	305
8.2.2	常用消隙技术	307
8.3	基于旋转变压器的精密测角技术	310
8.3.1	基本工作原理	311
8.3.2	多极旋转变压器测角	313
8.4	基于感应同步器的精密测角技术	316
8.4.1	工作原理	317
8.4.2	工作方式	318
第9章	制冷与冷却技术	322
9.1	电子设备的热设计	323
9.1.1	电子器件热特性分析	323
9.1.2	热设计的目的与要求	324
9.1.3	热设计的基本问题	326
9.1.4	热源、热阻及热的传递	326
9.2	制冷技术	328
9.2.1	制冷的基本概念	328
9.2.2	制冷原理	329
9.2.3	制冷系统	330
9.3	电子设备冷却技术	335
9.3.1	冷却的分类与选择	335

9.3.2	电子设备自然冷却技术	338
9.3.3	电子设备强迫冷却技术	339
9.3.4	强迫液体冷却系统	342
9.3.5	典型电子设备冷却系统	349
参考文献	354

第 1 章 概 论

多功能地基相控阵雷达是用于弹道导弹防御系统(Ballistic Missile Defens, BMD)中的相控阵地基雷达,简称地基雷达或 GBR (Ground Based Radar, GBR),完成对弹道导弹的精密跟踪、落点预报、目标识别和打击评估等任务。GBR 是弹道导弹防御系统的核心装备。本章首先论述 GBR 在弹道导弹防御系统中的作用,然后介绍 GBR 功能、基本组成及主要战术技术性能等,最后简述国外 GBR 发展概况。

1.1 GBR 作用

1.1.1 弹道导弹目标特性

弹道导弹打击距离远、速度快、威力大、精度高、突防能力强等特点,已成为现代作战最具有威胁的进攻性武器之一。目前,世界至少有 8 个发达国家和 15 个发展中国家能研制弹道导弹,有 40 多个国家和地区拥有弹道导弹,现役弹道导弹数量已达 1 万多枚。典型弹道导弹整体弹道示意图如图 1-1 所示,弹道导弹目标特性具有以下 7 个特点:

- (1) 距离远。洲际弹道导弹发射点距攻击点最远可达 13000km。
- (2) 飞行高。洲际弹道导弹弹道高度可达 1600km。
- (3) 速度快。洲际弹道导弹弹头再入速度可达马赫数 21。
- (4) 真假难辨。弹道导弹经常采用多弹头、假目标和诱饵进行攻击和突防,这些真假目标组成一个目标群,群内目标数目多且靠得近。
- (5) 目标特性多变。弹道导弹的组成结构、运动特性、电磁特性和红外辐射特性在整个飞行弹道的不同阶段呈现动态变化。
- (6) 自带干扰进攻。弹道导弹经常采用自卫式干扰弹头进行突

防,很容易地施放主瓣干扰。

(7) 突防措施多。弹道导弹的发射方可以根据敌方导弹防御系统情报预先采取有针对性的突防措施。换句话说,弹道导弹攻击方总处于主动地位,防御方只能是被动应付。

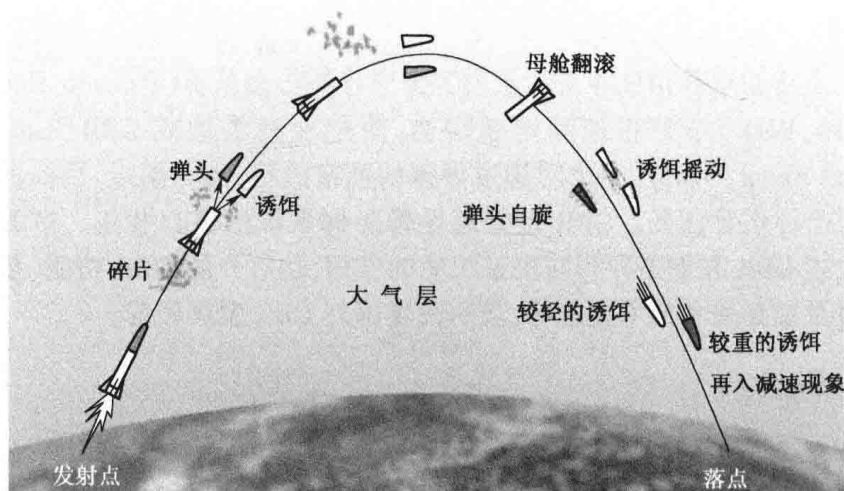


图 1-1 典型弹道导弹整体弹道示意图

1.1.2 反导预警情报需求

对中远程弹道导弹,为了实施碰撞杀伤,对预警情报提出了比破片杀伤方式高得多的要求。结合弹道导弹目标特性,可将反导预警情报需求归纳如下:

(1) 预警距离要远,要求部署天基预警装备,或者前置部署远程预警雷达,对弹道导弹助推段和自由段前期进行远程预警和连续跟踪。

(2) 预警装备威力要大,要在俯仰和方位上具有近似同等的探测能力(如测角精度)。

(3) 数据率要高,要求预警雷达数据率高,必须采用大型相控阵体制,利用单个宽脉冲实现一次目标探测。

(4) 精度要高,要求拦截之前的预警雷达空间(方位、俯仰、距离)分辨率高,跟踪精度高,识别能力强。

(5) 工作模式要多变,要求预警雷达具备多种工作模式,以适应探

测过程中目标状态的变化和功能的多样性。

(6) 抗干扰能力要强,要求预警雷达具有很强的干扰抑制能力,特别是主瓣压制和欺骗干扰抑制能力。

(7) 自适应能力要强,要求预警雷达系统中的信号和数据处理算法针对不同的弹头、诱饵和假目标具有良好的自适应能力。

1.1.3 其他导弹预警装备能力与缺陷

天波超视距雷达仅能观测弹道导弹助推段,数据率低(完成一次观测的时间达到分钟量级),测距误差在十几千米量级,不具备群目标分辨和识别能力,只能在技侦情报引导下对地下发射井发射的弹道导弹助推段进行预警。

预警卫星站得高、看得远,但红外成像探测方式无法测距,而且高轨导弹预警卫星的分辨单元尺寸也在十几千米量级,根本谈不上群目标分辨和识别,只能对飞出大气对流层的弹道导弹在助推火箭关机前进行预警。中低轨导弹预警卫星跟踪精度较高,但也不具备目标识别能力。

远程预警雷达作用距离达到 5000km 以上,但无法解决看得远与看得清之间的矛盾,采用窄带低分辨体制有助于提高探测威力,但也会牺牲群目标分辨和识别能力。

常规地空导弹制导雷达只能为地空导弹制导提供辐射源,不具备群目标分辨和识别能力。随着拦截武器射程的不断增大,现代地空导弹制导雷达作用距离也可达上千千米,工作体制也在向宽带高分辨拓展,但制导雷达必须随着拦截武器一起机动作战,限制了其功率孔径积的增大,从而使威力也受到限制。

1.1.4 GBR 在弹道导弹防御系统中的作用

天基红外卫星探测到来袭导弹,对远程预警雷达进行引导,远程预警雷达再对导弹进行搜索跟踪,并把目标信息引导给 GBR,GBR 在搜索并截获到导弹目标后,对目标进行跟踪识别,并对目标进行分类、确定目标类型、预报落点、估计发射点,形成数据并提交给作战管理系统,同时,作战管理系统执行“威胁评估和武器指派”功能,当目标确定为

威胁并作出拦截“武器指派”决定后,GBR 继续对目标进行跟踪识别,并向发射拦截弹提供初始化目标数据;拦截弹发射后,GBR 同时也对拦截弹进行跟踪捕获,在拦截弹飞行中,为纠正航向偏差,GBR 测量出目标和拦截弹状态数据,对拦截弹进行“飞行中目标修正”,将拦截弹引导到预定的拦截点;完成目标识别后,GBR 继续向拦截弹传输“飞行中目标修正”数据,拦截弹通过其自动寻的/转向系统修正拦截点;在拦截交战的最后阶段,拦截弹红外寻的头开始捕获目标,目标被指定后,拦截弹选择瞄准点,GBR 向拦截弹传输目标实物图(Target Object Map, TOM),该实物图用于指示目标在拦截弹上寻的器视场里的相对位置,帮助寻的器从多个物体的场景中识别出预定的目标,最后通过直接碰撞摧毁目标。GBR 持续跟踪拦截弹与来袭弹头,在两者发生直接碰撞后的几秒内,以碎片云的尺寸大小、相对位置、碎片云扩散程度及 RCS 回波散射特性等评估拦截效果,为实施第二次拦截提供重要依据。

GBR 是弹道导弹防御的核心装备,在远程预警相控阵雷达等预警信息的引导下,完成对弹道导弹的精密跟踪、落点预报、目标识别和打击评估等任务,为指控系统和武器系统提供信息支撑。其重要任务如下:

- (1) 在远程预警信息的引导下截获飞行中的来袭导弹或在没有引导信息下对重点区域自主搜索警戒。
- (2) 对来袭目标进行高精度跟踪,为地基拦截武器提供来袭导弹的高精度弹道预报。
- (3) 对来袭目标或目标群进行鉴别、分类,以确定其中的威胁目标。
- (4) 拦截过程中,不断向飞行中的拦截器提供目标数据的实时更新。
- (5) 形成目标实物(TOM)图数据,为拦截器末端红外寻的导引头提供匹配寻的图像。
- (6) 提供拦截后的杀伤评估。
- (7) 为二次拦截提供制导信息。

1.2 GBR 总体概况

1.2.1 主要任务与功能

GBR 的基本功能:末段高层拦截武器的引导。具体包括以下几方面:

(1) 搜索。在预警卫星或远程预警相控阵雷达的引导下工作,能够在给定的空域内快速搜索目标。

(2) 截获。搜索到目标后,能够很快完成目标确认和航迹起始。

(3) 跟踪。能对群目标进行高精度跟踪和落点预报,同时兼顾其他空域搜索。

(4) 识别。能从群目标中识别出真假弹头,形成目标实物(TOM)图。

(5) 打击效果评估。能够依据真弹头的飞行状态和图像变化评估打击效果。

1.2.2 组成与工作原理

GBR 一般由天线阵面、接收、数字阵列、信号处理、数据处理、目标识别、显示与控制、资源调度、伺服、冷却等分系统组成,其工作原理框图如图 1-2 所示。GBR 主要工作原理如下。

控制与显示分系统根据任务规划确定雷达在某个时段的作战任务,根据作战任务,选择最优工作方式,并按照工作方式规定的时序,在下一个驻留前,向其他分系统发出波束指向、信号形式、工作频率、工作模式等控制命令,系统按时序进行控制命令装订。

发射时,在控制系统触发下,接收机频率综合器根据工作方式指令,产生指定信号形式的激励信号,经发射前级放大后,由发射馈线网络送至各有源子阵,在子阵内经过时间延迟单元(Time Delay Unit, TDU)、子阵功放、子阵馈线网络等送至发射/接收(Transmit-Receive, T/R)组件和天线单元。

接收分为窄带和宽带工作方式。窄带工作时,目标回波信号经天

线单元、T/R 组件、子阵馈线网络、子阵低噪声放大器(Low Noise Amplifier, LNA), 进入窄带接收通道, 全阵面共有几千个接收通道, 每个窄带通道对接收信号进行下变频、滤波、采样, 变成数字信号送往信号处理分系统, 进行数字波束形成(Digital Beam Forming, DBF), 合成多个波束信号。宽带工作时, 目标回波信号经天线单元、T/R 组件、子阵馈线网络、环形器、子阵 LNA, 进入 TDU 和馈电网络, 合成宽带波束后送宽带接收通道。宽带接收通道采用去斜处理, 接收信号经去斜、滤波、采样, 变成数字信号送往信号处理分系统。

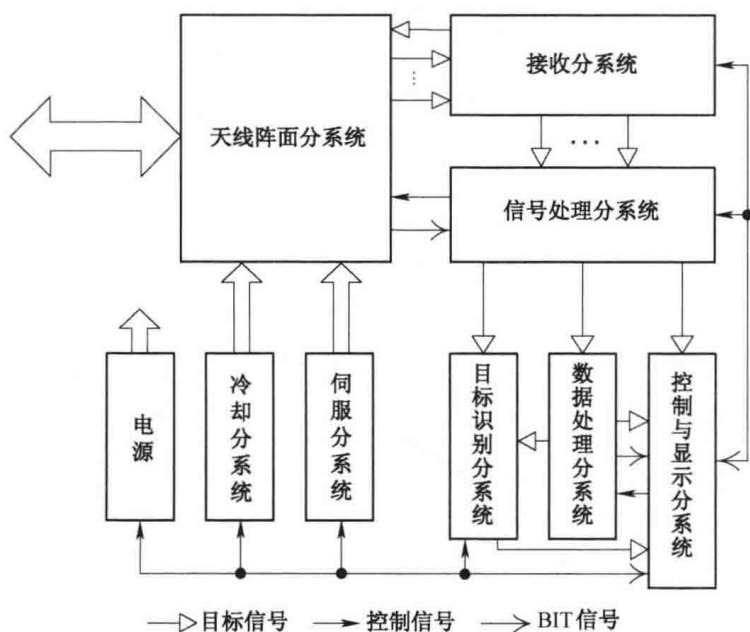


图 1-2 多功能地基雷达工作原理框图

正常搜索和跟踪的情况下, 信号处理分系统对多个波束数字信号或对接收分系统送来的宽带波束数字信号进行脉冲压缩、恒虚警(CFAR)、目标信息提取等功能处理。距离成像时, 信号处理分系统对去斜后的零中频信号进行傅里叶变换(FFT)处理, 或对脉压后的步进频信号进行反傅里叶变换(IFFT)处理, 提取目标高分辨距离信息; 逆合成孔径成像(ISAR)时, 信号处理分系统进行包络对齐、速度补偿等工作。