

# 毫米波导引头系统设计与工程实现

■ 张江华 梁培康 刘逸平 著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

# 毫米波导引头系统设计 与工程实现

张江华 梁培康 刘逸平 著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书阐述了毫米波雷达导引头的系统设计与实现,包括导引头总体与分系统指标分解与论证、软件开发、系统仿真测试等内容,提出在天线坐标系下实施半捷联制导技术,回避了有限转动不可交换性问题。导引头系统软件开发是整个导引头研制过程中周期最长,也是最容易出现问题的环节,本书从软件开发团队组织、软件任务分解、研发流程管理、软件质量评价等几方面进行了阐述。为降低毫米波半实物仿真系统成本,还介绍了综合视线法射频半实物仿真技术。本书从系统硬件设计、软件开发、仿真测试三个方面论述如何实现雷达导引头的低成本研发。

### 图书在版编目(CIP)数据

毫米波导引头系统设计与工程实现/张江华等著.

—北京:国防工业出版社,2017.1

ISBN 978-7-118-11101-9

I. ①毫… II. ①张… III. ①毫米波导引头—研究  
IV. ①TJ765.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第254786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)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 710×1000 1/16 印张 11 $\frac{1}{4}$  字数 205千字

2017年1月第1版第1次印刷 印数 1—1500册 定价 50.00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

精确制导武器在现代战争中发挥着越来越重要的作用,毫米波导引头技术是实现打了不用管、全天候精确制导的重要技术,受到广泛关注。随着精确制导武器的应用日益广泛,用户对低成本实现要求也越来越高。毫米波导引头在战术导弹中应用广泛,如何在不损失或尽可能小损失性能指标的前提下降低导引头成本,对武器系统研制有重要意义。本书从系统硬件设计、软件开发、仿真测试三个方面入手降低导引头研发成本。

系统硬件设计方面降低导引头成本需要做到:

(1) 指标体系合理,在满足总体性能指标前提下尽可能降低分机指标要求。

(2) 设计理念先进,导引头设计需要站在用户角度、立足现代战争中军事对抗需要,从产品全寿命周期考虑,追求产品的先进性、经济性、可靠性。

总体指标充分而必要、各分机之间指标相互协调,是有效降低导引头成本的重要途径。目前对雷达导引头各分机设计实现(如天线、收发模块、频率综合器等)的论述已经十分丰富,这些论述大多是从分系统实现的角度出发讨论如何满足设计要求。从导引头系统实现角度来看分系统究竟需要什么样的指标,则很少见到相关论述。本书拟从导引头总体设计人员需要出发阐述如何分解系统指标,并尽可能用易于工程技术人员理解的方式叙述,尽量减少数学公式的使用。

半捷联制导技术是降低雷达导引头成本的有效手段,尽管概念提出已有数十年的历史,在工程上应用却只有 10 多年的历史,且主要局限于光学导引头。与光学制导相比,雷达导引头不仅可以获取角误差信息还可以得到弹目相对距离信息,利用距离角度耦合滤波可以进一步优化视线角速度输出。从公开发表的文献上看,国内在半捷联雷达导引头领域基本上处于研究阶段,距离工程化应用仍有相当差距。本书提出在天线坐标系下实现半捷联制导的实现方法,与常规半捷联算法相比,这种实现方法可以回避有限转动不可交换性问题,对开展该技术的工程应用具有一定指导意义。

软件系统在导引头产品中发挥着越来越重要的作用,多年的科研实践显示,导引头软件开发是整个产品开发周期中耗时最长、出问题最多的环节。具备高素质软件开发的优秀人才在任何单位、任何时候都只能是少数人,企业似乎永远面临人手不够的局面。另一方面,软件强国印度从 21 世纪初就开始出现软件蓝领,高素质人才似乎已不再成为软件开发的必需!造成上述差异的原因在于使用了不

同的软件开发规程。先进合理的工作规程可以大大降低对软件开发人员的素质要求,大幅度提高工作效率。国内很多技术人员对于软件开发规程(软件工程化)工作的重要性认识严重不足,软件开发仍然大量沿用“自编、自演、自导”的开发模式,代码重复利用率低,软件可靠性差,产品开发进程一推再推,客观上也必然会抑制创新。除了认识层面的原因,技术因素也是造成软件工程化推进困难的重要方面。传统的软件开发由少数人(一般一两人)完成软件需求分析、设计、代码编写和调试测试全部工作,如何把软件开发工作分解成适合多人协同开发、如何让软件设计有效约束代码实现、如何开展软件测试等,都是软件工程化需要解决的问题。作者结合近年来的工作实践,在导引头系统软件工程化方面进行了探索,并深深地感到为了加快系统开发进度,更好地推进技术创新,技术人员需要在追求技术进步的同时关注工作规程的改进。工作规程落后,创新往往成为无源之水、无本之木——只靠少数几个人单枪匹马地苦干,不去利用团队的优势,不去提高工作效率,无法把辛苦工作变成享受,又谈何创新!近年来,国内在许多技术领域都实现了长足进步,回顾这些年走过的路,其中能有多少是我们原创的?由于科研开发一直疲于完成任务,长期的超负荷工作也在一定程度上压抑了创新的冲动:创新意味着更加辛苦的工作。软件工程化是解决软件开发过程中人与人协作的规程,大概是最复杂的工作规程,发展到今天软件工程化的许多思想已经不局限于软件开发行业,正在深刻地影响着许多行业,成为实现优质高效工作的重要保证。

在完成软硬件系统研制后,还需要对导引头进行必要的仿真测试。雷达导引头作为一次性使用产品对可靠性有着极高的要求,必须在地面进行大量仿真试验,模拟高速飞行条件下,考察导引头是否具备设计的功能指标。国内许多科研院所都花费了大量经费建造射频半实物仿真试验室,动辄需要数千万元甚至上亿元人民币,建设周期一般都要两三年,甚至更长。利用运动支架取代目标阵列可以大幅度降低射频半实物仿真系统的实现成本,但这种仿真手段精度受到一定限制,很少用于闭环仿真试验。近年来,国外一些相关资料上出现综合视线法半实物仿真的概念,其基本思想是利用转台运动来模拟目标运动,省去复杂、昂贵的目标阵列系统,由转台的高精度输出保证仿真精度,从而大大降低射频仿真的成本。迄今为止,国内还很少有公开文献报道对此项技术的应用。综合视线法仿真可以把射频仿真系统“平民化”,降低雷达制导产业的准入门槛,也是降低导引头研制成本的重要环节。

本书在综合国外相关文献的基础上,结合近年来在相关领域所做的工作,对低成本射频仿真技术、中频注入仿真进行介绍。非常感谢西安电子工程研究所强勇研究员,西安电子科技大学博士生导师刘峥教授对本书提出了宝贵意见。

限于作者水平,书中的一些观点难免存在错误,敬请读者批评与指正。

作者

2016年1月

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 毫米波导引头技术发展现状 .....	1
1.1.1 毫米波雷达技术 .....	1
1.1.2 目标分类识别 .....	2
1.2 毫米波导引头设计的主要问题 .....	6
1.2.1 硬件实现——怎样对分机提指标 .....	6
1.2.2 系统软件——如何实现优质高效 .....	7
1.2.3 仿真测试 .....	8
参考文献 .....	9
第 2 章 寻的制导原理 .....	10
2.1 导弹制导原理 .....	10
2.2 制导律简介 .....	11
2.2.1 追踪法导引 .....	12
2.2.2 平行接近法导引 .....	13
2.2.3 比例导引 .....	14
2.3 导引头系统指标分析 .....	15
2.3.1 目标识别 .....	15
2.3.2 目标反射特性 .....	15
2.3.3 适应天气条件 .....	15
2.3.4 目标捕获 .....	15
2.3.5 目标跟踪 .....	16
2.3.6 连续工作时间要求 .....	16
2.3.7 自检功能 .....	17

2.3.8	六性及电磁兼容性要求 .....	17
2.3.9	结构与供电要求 .....	17
2.3.10	软件开发过程控制与测评 .....	17
	参考文献 .....	17
<b>第3章</b>	<b>系统总体设计与实现 .....</b>	<b>18</b>
3.1	需求分析 .....	18
3.1.1	防空导引头 .....	18
3.1.2	反舰导引头 .....	18
3.1.3	空地导引头 .....	19
3.2	工作流程 .....	21
3.3	功能需求 .....	23
3.4	主要系统功能实现 .....	24
3.4.1	自检 .....	24
3.4.2	搜索 .....	26
3.4.3	截获 .....	29
3.4.4	跟踪 .....	29
3.5	主要指标设计 .....	32
3.5.1	作用距离 .....	32
3.5.2	导引头的跟踪精度 .....	39
3.5.3	盲区 .....	40
3.6	系统时序设计 .....	41
3.7	导引头系统可靠性与维修性设计 .....	42
3.8	电磁兼容性设计 .....	44
	参考文献 .....	46
<b>第4章</b>	<b>导引头分系统设计 .....</b>	<b>47</b>
4.1	天线罩设计 .....	47
4.1.1	材料选择 .....	47
4.1.2	主要指标 .....	48

4.2	天线设计	50
4.2.1	体制选择	50
4.2.2	主要指标	52
4.3	射频收发模块	57
4.3.1	体制选择	57
4.3.2	主要指标	59
4.4	中频接收机设计	59
4.4.1	体制选择	59
4.4.2	主要指标	60
4.5	频率综合器指标设计	65
4.5.1	体制选择	65
4.5.2	主要指标	66
4.6	伺服系统设计	68
4.6.1	体制选择	68
4.6.2	主要指标	69
4.7	信号处理设计	75
4.7.1	功能要求	76
4.7.2	主要指标	77
4.7.3	交验验收	85
4.8	数据处理	86
4.8.1	处理平台考虑	86
4.8.2	半捷联导引头制导信号提取	88
	参考文献	100
<b>第5章</b>	<b>系统软件开发</b>	<b>102</b>
5.1	软件开发存在的问题	102
5.2	软件工程化概念	103
5.2.1	软件任务的分解	104
5.2.2	程序设计的掌控性差	106
5.2.3	程序代码可测性差	106



6.3.1	射频仿真系统的基本组成	133
6.3.2	毫米波半实物仿真系统改进	138
6.4	综合视线法	140
6.4.1	雷达导引头建模	140
6.4.2	基于前馈去耦的视线角速度输出系统仿真	142
6.4.3	基于输出补偿的视线角速度输出仿真	148
6.4.4	综合视线法在全弹仿真中的应用	154
6.5	简易射频仿真技术	156
6.5.1	简易射频仿真系统组成	156
6.5.2	雷达信号的相参性分析	157
6.5.3	移动触发脉冲产生技术	158
6.5.4	试验现象分析	159
6.6	高速/高距离分辨雷达信号仿真	168
6.7	仿真航路与中频注入仿真测试	170
6.7.1	跟踪带宽测试	170
6.7.2	最大最小跟踪速度测量	172
	参考文献	174
结束语  制导技术未来发展展望		176
	参考文献	178

# 第1章 绪 论

## 1.1 毫米波导引头技术发展现状

雷达导引头能够全天候、全天时工作,在精确制导领域有重要应用。根据应用平台不同,雷达导引头大致可以划分为三类:

- (1) 针对空中目标,用于地空、空空导弹;
- (2) 针对海面目标,用于反舰导弹;
- (3) 针对地面目标,用于空地、地地导弹。

由于空中目标、海面目标背景相对单一,相关的雷达导引头技术目前已经发展得比较成熟;而针对地面目标的雷达导引头需要克服强地杂波干扰,要求具有一定的分类识别能力,以剔除虚假目标,技术难度远大于前者,目前仍在发展中。

空地导弹是指从固定翼飞机或者直升机发射用于攻击地面目标如坦克、桥梁、机场等目标的导弹。国外从20世纪70年代开始研制空地导弹雷达导引头<sup>[1]</sup>,长弓-海尔法导弹是世界上最早采用雷达制导的空地导弹,1998年正式进入装备。相比之下,雷达制导型的防空、反舰导弹在20世纪60年代都已经进入装备,其中导引头技术是制约雷达制导型空地导弹装备的重要原因。为了研制空地导弹雷达导引头需要突破的技术如下<sup>[2,3]</sup>:

### 1.1.1 毫米波雷达技术

由于地面目标运动速度一般都很低,甚至处于静止状态,动目标处理(Moving Target Indicator, MTI)实现起来相对困难。为了抑制杂波影响,一般需要尽量压窄雷达导引头天线波束宽度。由于导弹的口径相对固定,压窄波束宽度不能仅靠增大天线口径,还需要通过提高雷达导引头的工作频段来实现。因此,空地导弹雷达导引头都是工作在毫米波段。

与厘米波段相比,在毫米波段产生大功率发射信号、单片集成(Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC)技术难度都很大,这些因素制约了毫米波雷达导引头技术的发展。到了20世纪70年代,毫米波技术的日趋成熟给发展空地导弹雷达导引头奠定了技术基础。早期的毫米波导引头主要采用磁控管发射

机,体积、重量相对较大。20世纪70年代开始采用基于雪崩二极管(Impact Avalanche and Transit Time Diode, IMPATT)的注锁放大技术实现固态功放,但是这种功率放大装置一般需要进行调试,不适合批量生产,从20世纪80年代开始至今国际上的主流方向开始转为利用MMIC技术实现。8mm波段MMIC固态功放技术成熟于20世纪90年代,3mm波段MMIC固态功放技术直到近年来才逐渐成熟。根据报道采用MMIC功率合成技术,在3mm波段已经可以实现5W的MMIC固态功放<sup>[4]</sup>。

### 1.1.2 目标分类识别

由于地面背景十分复杂,存在大量影响检测的干扰因素,导致雷达导引头易产生很高的虚警率。为此,需要利用目标分类、识别技术从干扰中提取出需要攻击的目标信息。

1991年9月6日大力神(Hercules)公司在Eglin B-70靶场发射了第一枚毫米波制导小牛(Maverick)导弹,这是毫米波雷达导引头首次在空地导弹上进行打靶飞行试验<sup>[5]</sup>。大力神公司研制的雷达导引头工作在Ka波段,采用极化扭转卡塞格仑天线,口径12英寸,工作体制为调频连续波体制,利用MTI技术提取出运动目标。由于静止目标可以利用更为低廉的激光半主动制导武器进行打击,雷达制导型精确制导武器主要是用来对付运动目标。1998年装备美国陆军的长弓海尔法导弹雷达导引头工作在毫米波段,这是世界上第一款进入装备的毫米波雷达制导型空地导弹,具有发射前锁定和发射后锁定两种工作模式,对于运动目标主要采用发射前锁定模式,即要求导引头在导弹发射前完成目标搜索、截获和跟踪过程;对于地面远距离静止目标主要采用发射后锁定模式,即要求导弹按照惯导装订目标信息飞到目标区域附近以后,再利用导引头完成目标寻的。近距离地面静止目标可以采用发射前锁定模式,不过更多的是利用激光半主动制导型海尔法导弹去攻击。

2005年欧导公司(MBDA)研制的硫黄石导弹装备部队,导弹可以由固定翼飞机或直升机发射,用于攻击地面目标。硫黄石采用马可尼(Marconi)公司研制的3mm雷达导引头,如图1-1所示。

该雷达导引头采用调频连续波体制,采用卡塞格仑天线,单向圆极化发射,双向圆极化接收。硫黄石导弹的

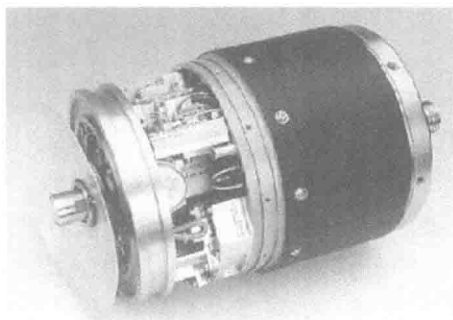


图1-1 硫黄石导弹的3mm雷达导引头

雷达导引头宣称可以对装甲车、地面防空单元、武装运兵车、自行火炮几类目标实现自动分类。

在强地、海杂波背景中可靠检测目标并稳健识别目标是主动雷达导引头必须解决的问题。在目标自动分类识别领域(这里指的是基于图像信息)有一个共识<sup>[6]</sup>:可靠识别目标一般至少需要 200 个像素。为了满足这样的要求,对于地面装甲车辆、坦克或海面小型舰艇等目标进行分类识别时,要求探测器达到 15 ~ 20cm 的分辨力(径向和横向)。而对地面重要设施和建筑、机场跑道、重要道路和桥梁、野战指挥所、防空阵地、地面大型武器和海面大型舰船等目标进行分类识别时,则要求探测器达到 1 ~ 10m 的分辨力。采用脉冲压缩技术的雷达导引头在距离上比较容易实现这样的分辨力,而方位分辨力受到天线波束宽度的限制很难满足上述要求。因此,雷达导引头的目标分类识别能力必将受到很大限制,难以满足地面复杂背景下的目标分类识别要求。

除此之外,对于导引头来说为了实现自寻的制导,还应具备自动识别处理能力。利用电视、红外成像可以实现高分辨两维成像,但是自动识别仍然和人工识别存在明显差距。硫黄石导弹尽管宣称对坦克、装甲运兵车、防空单元等几类典型目标具备自动分类识别能力,但是实际使用效果从未见报道。进入 21 世纪以来,雷达与光学探测复合制导成为对地精确制导领域的重要发展方向。由于光学探测系统和雷达探测系统在实现上存在很大差异,双模复合探测系统需要同时兼容光学探测与雷达探测的不同需求。从实现上来说,双模复合探测有两种可能的实现方案:

- (1) 共平台设计,即光学探测和雷达探测都安装在同一个稳定平台上;
- (2) 分平台设计,即光学探测和雷达探测分别安装在独立的稳定平台上。

由于对地攻击精确制导武器可用口径受到严格限制,采用分平台设计难以满足小口径弹药对安装空间的要求。因此,在对地攻击多模复合制导系统中应该采用共平台设计方案。

共平台设计双模复合制导系统也有两种可能的实现方案:共口径设计和分口径设计。

前者要求口径设计同时兼容两种探测器不同的传输特性要求,技术难点是需要解决毫米波与光学选择透射——反射材料;长期以来,这种材料一直未得到很好的解决,导致雷达和红外探测系统的探测距离都受到很大影响,因此又有人开始尝试分口径设计,即口径的一部分只用于雷达探测,另一部分只用于光学探测。典型的实现方案如泰勒斯(Thales)研制的双模复合导引头采用了如图 1-2 所示的分口径实现方式。

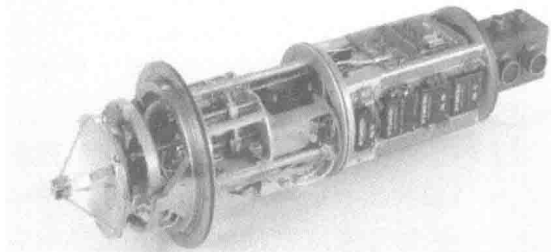


图 1-2 泰勒斯公司研制的双模复合导引头(约 2007 年)

利用分口径实现双模复合导引头最大的缺点是雷达和光学系统的口径利用率降低,最终也会损失导引头的整体探测性能。

2008 年底,欧导公司推出了硫黄石的双模改进方案(Dual Mode Brimstone, DMB),利用激光半主动探测模式提高导引头在复杂背景下的目标选择能力。在双模硫黄石导引头中,雷达与激光半主动系统共用抛物面反射面天线,如图 1-3 所示。



图 1-3 欧导公司研制的双模复合导引头(2008 年)

21 世纪初,美国军方组织了联合对地攻击导弹(Joint Air to Ground Missile, JAGM)的研制,要求采用毫米波雷达/激光半主动/红外成像三模复合制导技术,以进一步提高导引头的制导精度和目标选择能力。洛克希德·马丁(Lock-

heed Martin)和雷声(Raytheon)团队之间展开了竞争,二者的区别在于洛克希德·马丁公司(下文简称洛马公司)采用平板缝阵天线、冷凝红外探测技术,雷声公司采用抛物反射面天线、非制冷红外。根据报道,两个团队最终都成功完成了打靶试验。相比之下,雷声团队采用非制冷红外有利于降低3模复合导引头的实现成本,与平板缝阵天线相比,抛物反射面天线能够兼容红外和激光半主动镜头设计,有利于进一步降低3模复合导引头的实现成本。尽管非制冷红外成本低于制冷红外系统,但非制冷红外则工作在长波红外频段,能够同时兼容激光与长波红外探测系统的已知材料目前只有硫化锌(ZnS),头罩加工工艺加工周期长,成本高。此外,硫化锌材质软,易划伤,也给导弹的使用维护带来困难。因此,三模复合导引头无论是采用冷凝红外,还是非制冷红外成像,成本均会显著高于双模复合导引头。图1-4是雷声公司研制3模复合导引头和可能实现方案。

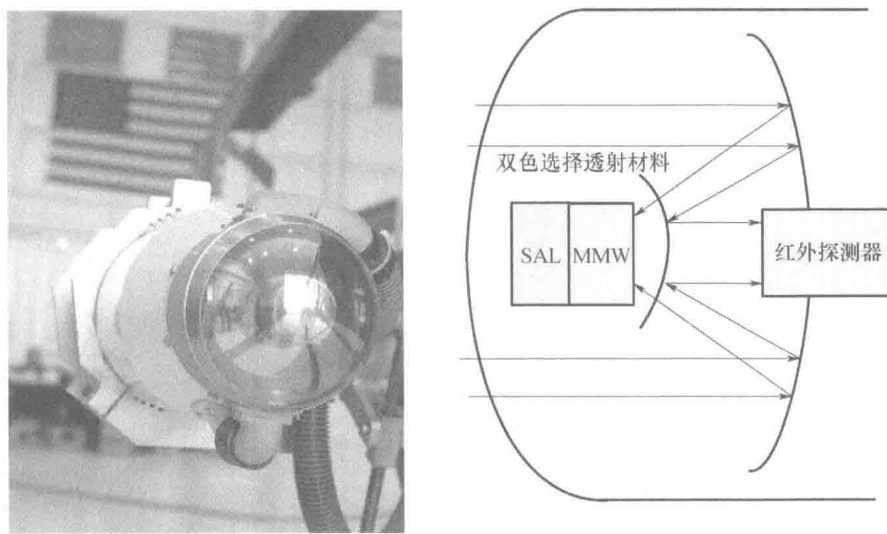


图1-4 雷声公司研制的3模复合导引头及可能实现方案

图1-5为洛马公司研制的3模复合导引头,该导引头采用全极化平板缝阵天线,工作在Ka波段;利用透射毫米波反射光学的材料实现折反光学镜头。与雷声不同,洛马的红外成像系统采用冷凝红外成像,由于红外成像系统避开了长波红外波谱,可以选用氟化镁( $MgF_2$ )材料制作头罩。

2012年8月,洛马公司又宣布开始开发毫米波与激光半主动的双模复合制导,并在2个月后实现成功打靶;同期,雷声公司则表示要接着研发3模复合导引头,并争取进一步降低成本。

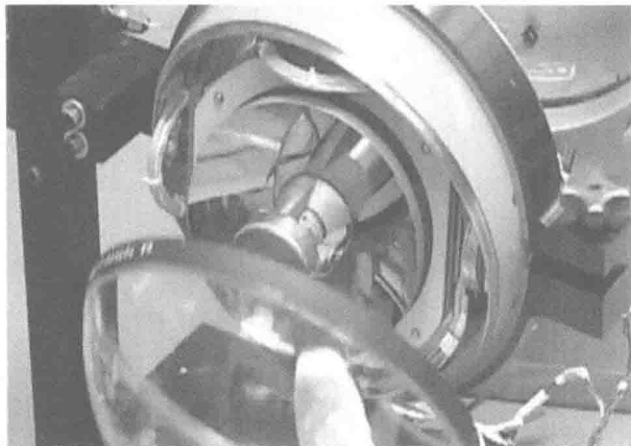


图 1-5 洛马公司研制的 3 模复合导引头

总的来说,无论是 JAGM 还是 DMB,都在成功实现“打了不用管”以后再次转入与“人在回路”(激光半主动制导)相结合的模式。利用人在回路模式回避对地面复杂背景下的自动目标分类识别问题,降低系统实现难度和成本,是当前乃至未来几年内理想的选择。对于单模雷达导引头来说,目标识别当前还主要局限于简单背景(对空、对海),对于地面环境则主要依靠动目标选择来剔除静止的地面背景干扰。

## 1.2 毫米波导引头设计的主要问题

导引头系统设计的目标是满足导弹总体要求的功能和指标,从实现上主要包括以下几部分:

### 1.2.1 硬件实现——怎样对分机提指标

导引头硬件实现上一般包括天线罩、天线、收发模块(高频)、中频接收机、频率综合器、二次电源、信号处理器和伺服等分机;为了保证产品性能指标,必须对各个分机进行指标分解。怎样对导引头分机提指标,既要保证导引头整机系统性能指标,同时又尽可能降低分机实现难度,这是总体设计人员永远的追求。此外,还要考虑如何保证分机指标的完备性。分机指标是指导分机研制的重要依据,如果分机指标不完备可能会导致分机设计人员在设计阶段难以对研制过程中可能存在的问题进行全面考虑,最终往往导致整机系统指标的降低,甚至功能损失。最后,还要考虑指标的可测试性。例如,天线和差通道幅相一致性对测

角性能有明显影响,但是直接要求对和差幅相一致性进行测试,实现上十分困难,最终可能导致指标无法考核。这些都是硬件系统研制过程中需要关注的问题。

对雷达导引头涉及的天线、接收机、频率综合器、信号处理器、伺服等技术都有大量论文、专著进行详细的论述,但是如何对这些分机指标则很少有论述,本书着重从系统功能实现的角度对各分机指标进行论证。举例来说,相位噪声指标是雷达导引头及雷达技术领域的重要指标,频率综合器可以产生相位噪声在 $-100\text{dBc/Hz}$ 的高稳定度频综,而实际上某些特定应用环境中雷达导引头只需要 $-70\text{dBc/Hz}$ ,甚至 $-50\text{dBc/Hz}$ 的相噪就足以满足使用需要了!由于分机指标的好坏决定着系统实现难度、实现成本,从导引头实现角度来说,总体的任务是如何在保证系统指标的前提下尽量降低对分机的指标要求。

### 1.2.2 系统软件——如何实现优质高效

雷达导引头的工程研制经验表明,系统软件实现是整个导引头研制中周期最长的环节,系统软件研制过程中大量时间是用于软件调试、测试,有意创造条件寻找可能存在的软件缺陷。如前所述,如何提高软件可靠性、缩短软件开发周期是导引头研制的难点和重点,本书将从软件设计技术、软件产品开发过程管理两个方面给出解决途径。彻底解决系统软件开发难题,首先从技术层面上要解决软件任务的分割难题,把软件任务分解成多个相对独立的工作单元;其次,从管理层面要建立规范的工作流程,以对软件开发各阶段进行监控,从而保证软件的开发质量、提高开发效率。

传统的系统软件开发模式,大多由一两个人完成所有系统软件开发,项目的成败在很大程度上取决于系统软件开发人员,开发人员素质高、能力强,项目进展就快,否则可能就会问题层出不穷,进展缓慢。20世纪末期以来,洛马、波音等防务公司通过软件开发过程优化,使得软件开发也能像硬件生产加工那样实现规模化——多人协同实现,从而大大加快开发进度,提高软件产品质量。现代先进软件开发企业探索出软件开发的团队工作模式,并逐渐形成团队协作工作的标准工作过程。企业有三个要素:人、规程、设备。先进企业与落后企业在人的要素、设备要素方面大多比较接近,先进与落后则很大程度上取决于规程。技术是掌握在人手中,即使有专利保护也难免发生快速流失、扩散,被竞争对手获取,而规程则牢牢掌握在企业手里,不易被竞争对手短期内掌握,已经成为现代先进企业核心竞争力体现。卡内基梅隆大学软件工程研究所提出的能力成熟度模型集成(Capability Maturity Model Integration, CMMI)最早是用于指导软件开发企业优化规程的质量体系,目前已经超越软件的行业局限,扩展到开发、服务和



采购等领域。传统的软件开发模式几乎完全不能适应 CMMI 体系对软件开发过程的要求,为了适应这种先进开发模式,开发企业在软件开发技术、开发团队组建、开发过程规范等方面都面临新的挑战。

造成软件开发难以实现多人并行协同开发的重要因素是当前很多软件开发中各个模块之间高度耦合,多人协同开发时相互之间必须频繁沟通了解各模块的内部实现,在开发人数增多以后会导致相互之间进行沟通的开销不断加大,造成人越多越麻烦的局面,开发工作只适合由少数人完成(很多时候只有 1~2 人)。由于开发人员有限,又进而导致很多细致工作(如设计文档、软件代码对编程规范的符合性、测试覆盖性等)都难以满足软件工程化要求(有时甚至是完全缺失),进而又会导致代码的维护性差。导引头的硬件部分通过加强过程控制都能保证较高的可靠性,但是软件开发的过程控制则发展相对滞后,由此也导致了导引头研制过程中软件缺陷层出不穷,进度一拖再拖。常规软件开发过程的程序设计很难对代码实现进行有效约束——仅凭程序框图无法约束代码实现,显然这样的设计是难以满足实际需要的。

### 1.2.3 仿真测试

仿真测试是加快导引头研制进程、保证产品质量的重要手段。利用半实物仿真手段不仅可以大幅度减少外场试验,加快研制进程,节约研制费用,也是保证产品质量的重要手段。

平台扰动和高速飞行都会直接影响雷达导引头的回波以及视线角速度信号输出,常规的外场试验(对海、对地、挂飞试验)很难全面考察导引头在导弹飞行条件下的性能指标。此外,外场试验的组织准备一般需要比较长的时间,且费用高。因此,国内外从事导引头研制单位都强调半实物仿真技术在研制中的应用。半实物仿真可以模拟弹载飞行条件下的目标回波和弹载平台扰动条件,进而考核雷达导引头在弹载飞行条件下的性能指标。模拟弹载平台扰动一般通过 3 轴转台来实现,模拟雷达回波则相对复杂:需要考虑距离、多普勒调制、角度变化以及背景杂波影响,特别是为了模拟目标角度维运动一般要求利用三元组阵列选通与幅相控制来实现,建造单元数达到上千个的毫米波三元组目标阵列成本远大于厘米波段仿真系统。研制毫米波导引头还需要考虑半实物仿真系统的低成本实现技术。

目前,国内外已经有一些导引头技术的专著问世。但是大多从雷达系统分析角度讨论,对如何设计导引头,如何进行系统指标分解,怎样对分机提指标,特别是如何组织技术人员对导引头软件进行产品化开发,如何实现导引头的低成本半实物仿真等则很少论述。