

国防军工

雷达电子行业专题报告

领先大市-A(维持)

军队信息化核心系统，数字相控阵已成方向

2022年10月20日

行业研究/行业专题报告

国防军工板块近一年市场表现



首选股票

评级

300593.SZ	新雷能	买入-A
688375.SH	国博电子	增持-A
688439.SH	振华风光	增持-A

相关报告：

【山证国防军工】俄乌开战半年度阶段
总结-俄乌战场态势定期更新 2022.9.23

分析师：

骆志伟

执业登记编码：S0760522050002

邮箱：luozhiwei@sxzq.com

投资要点：

➢ 雷达因军事应用而生，数字技术、计算机以及天线技术等诸多先进技术的应用促进了雷达系统的快速发展。雷达由于二战军事上的迫切需求，获得了实质的应用和发展，后来随着数字技术和计算机的应用，雷达体积不断缩小，性能不断提升，处理能力不断增强，最终实现覆盖海、陆、空、天各种承载平台的广泛应用。发展至今，连续波雷达和脉冲多普勒雷达是雷达发展史中非常典型和重要的雷达体制。

➢ 相控阵雷达是雷达未来发展的主流方向。采用相控阵天线是相控阵雷达的核心特征，相控阵天线通过控制阵元相位而具备了快速扫描和多波束形成的能力，这是相控阵雷达具备诸多技术特点的基础。有源相控阵雷达是未来相控阵雷达发展的重要方向，其中 T/R 组件是有源相控阵雷达天线最关键的部分，也是价值量占比最高的部分。

➢ 雷达导引头是雷达技术在制导方面的应用，有源相控阵雷达导引头是雷达导引头的未来发展方向。导引头是导弹的“眼睛”，决定了导弹的打击精度，雷达导引头可全天时全天候使用，探测距离远，因此得到广泛应用。相控阵雷达导引头具备相控阵雷达系统的特有优点，但导弹弹体过于狭小的空间对雷达半导体材料和集成技术提出了更为苛刻的要求，随着第三代半导体器件的应用和先进集成技术的发展，研发小型化、低功耗的有源相控阵雷达导引头的时机已成熟。

➢ 军用雷达电子产业链是配套产业链。上游主要是通用性较强的原材料和电子元器件，而中下游的大部分组件/模块、子系统和整机行业壁垒较高，配套关系较为固定，主要由军工集团及其下属子公司和研究所进行配套。

➢ 重点公司关注：重点推荐国博电子、新雷能和振华风光。国博电子整合中国电科五十五所资源，是国内面向各军工集团销量最大的有源相控阵 T/R 组件研发生产平台，定型产品多，具备技术和市场优势，标的稀缺性强。新雷能在导弹电源、雷达电源、航天产品电源领域具有核心技术优势，在新型重点型号战术及战略导弹、雷达等电子设备电源产品领域占比较高，随着这些总体类产品进入大批量生产时期，该类产品业绩进入高速成长期。振华风光的放大器系列产品在高可靠放大器领域处于领先地位，公司募资建设晶圆制造线，转型 IDM 经营模式，市场竞争力持续增强，受装备更新换代加速及国产化替代需求的影响，下游需求旺盛，公司业绩有望持续快速增长。

风险提示：相控阵雷达更新换代速度不及预期；客户集中度较高的风险；若有涉及到采购、接装等部门的突发性事件影响，军工企业业绩可能低于预期。



目录

1. 雷达早期发展.....	5
1.1 连续波雷达.....	7
1.2 脉冲多普勒雷达.....	9
2. 相控阵雷达：雷达未来发展的主流方向.....	13
2.1 相控阵天线是相控阵雷达的核心.....	13
2.2 相控阵雷达的发展与应用.....	14
2.3 有源相控阵雷达的组成.....	17
3. 雷达导引头：雷达技术的制导应用.....	19
3.1 导引头是导弹的“眼睛”.....	19
3.2 雷达制导系统分类以及相应的雷达导引头特点.....	21
3.3 相控阵雷达导引头发展.....	26
4. 军用雷达电子产业链及相关标的.....	28
5. 投资建议.....	31
5.1 国博电子：相控阵 T/R 组件龙头.....	31
5.2 新雷能：特种电源领先者.....	31
5.3 振华风光：深耕军用模拟集成电路市场.....	32
6. 风险提示.....	33

图表目录

图 1： 雷达基本组成框图.....	5
图 2： MIM-23 Hawk HPIR（AN/MPQ-46）.....	8
图 3： 半主动雷达制导导弹寻的制导图.....	9
图 4： AN/SPG-62.....	9

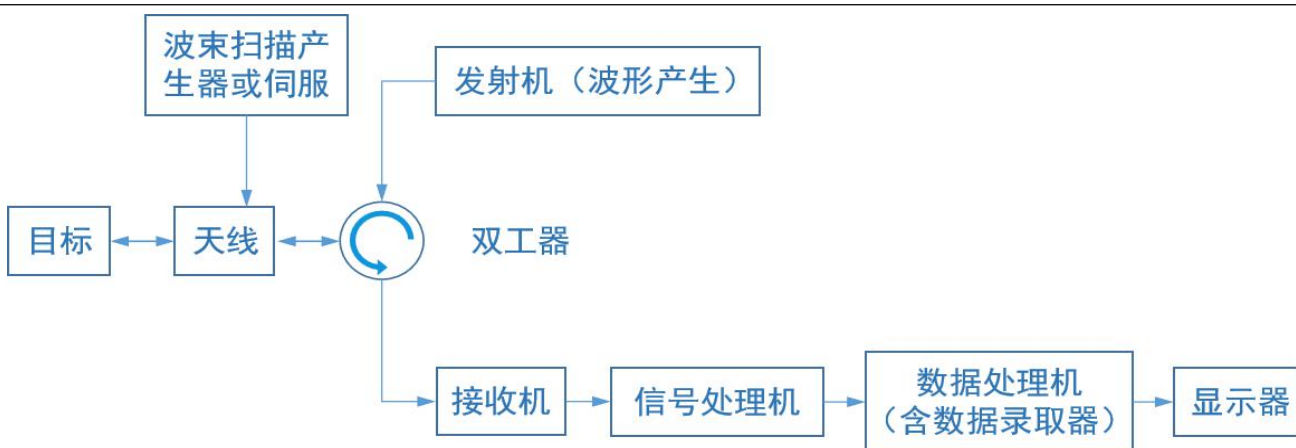
图 5: 苏-27 的 RLPK-27 雷达的卡塞格伦天线.....	12
图 6: AWG-9 平面缝隙阵天线.....	12
图 7: AN/MPQ-53 C 波段多功能相控阵雷达.....	13
图 8: 相控阵天线波束控制原理图.....	13
图 9: 相控阵雷达发展脉络.....	14
图 10: 无源和有源相控阵雷达结构.....	16
图 11: 有源相控阵雷达无线收发系统结构示意.....	17
图 12: 雷达信号处理板卡.....	17
图 13: 典型有源相控阵 T/R 组件工作原理示意图.....	18
图 14: T/R 组件实物图（双面）.....	18
图 15: “战斧”巡航导弹总体组成示意图.....	19
图 16: 制导系统和控制系统关系.....	19
图 17: Kh-35 反舰导弹的雷达导引头.....	20
图 18: R-27R/ER、R-77 及 R-27EA 雷达导引头.....	20
图 19: 导弹电源系统组成框图.....	21
图 20: 无线电指令制导原理图.....	22
图 21: 雷达自动寻的制导原理图.....	22
图 22: Kh-31P 反辐射导弹的导引头.....	23
图 23: 乌克兰米格-29 发射 AGM-88 反辐射导弹.....	23
图 24: 日本 AAM-4B 空空导弹.....	26
图 25: 俄罗斯 K-77M 相控阵导引头.....	26
图 26: 军用雷达产业链.....	28

表 1: 军用雷达按照功能分类.....	5
表 2: 雷达系统分类.....	6
表 3: 雷达频段的应用.....	6
表 4: AN/SPG-62 装备情况.....	9
表 5: 脉冲多普勒雷达的应用和要求.....	10
表 6: 美军主要型号机载脉冲多普勒雷达主要战术及技术指标.....	10
表 7: 采用不同天线形式的脉冲多普勒机载火控雷达的情况列表.....	12
表 8: 相控阵雷达主要技术特点说明.....	13
表 9: 典型地基相控阵雷达系统.....	15
表 10: 典型舰载相控阵雷达系统.....	15
表 11: 主要机载相控阵雷达列表.....	15
表 12: 有源相控阵雷达、无源相控阵雷达和机械扫描雷达主要能力表.....	17
表 13: 导弹构成部分及其功能组成和分类.....	19
表 14: 不同类型导引头主要特点说明.....	23
表 15: 使用不同雷达制导系统的导弹实例.....	23
表 16: 有源相控阵雷达导引头战术特点说明.....	26
表 17: 雷达产业相关上市公司梳理.....	28
表 18: 重点推荐公司盈利预测及估值.....	32

1. 雷达早期发展

雷达是利用目标对电磁波的反射现象来发现目标并测定目标参数的一种电子设备。雷达发射电磁波照射目标，通过接收处理目标反射的回波信号，可得到目标的距离、角度和速度信息，当雷达具有足够高分辨力时还能识别目标的尺寸和形状等特征。通常雷达系统主要由天线、发射机、接收机、信号处理机、数据处理机和显示器等若干分系统构成。发射机的作用是产生雷达信号；天线的主要作用是发射和接收雷达信号；接收机的主要作用是将微弱的回波信号放大到足以进行信号处理的电平；信号处理机的主要作用是消除不需要的信号及干扰，从而通过或加强所关注目标产生的回波信号；数据处理机主要实现数据记录、自动跟踪、目标识别等功能。

图 1：雷达基本组成框图



资料来源：雷电微力招股说明书，山西证券研究所

雷达是防空和作战系统的重要组成部分。雷达在军事和民事领域都有广泛应用，但本文主要关注于军用雷达，军用雷达在探测距离、测量精度、分辨力及抗干扰等方面远高于民用雷达，更能代表雷达的发展水平。雷达在军事方面实现的主要任务包括搜索警戒、跟踪、侦察及校射。搜索警戒是指在尽可能大的空域范围内及早发现远距离的军事目标；跟踪是指对目标进行精密跟踪，为武器系统提供连续、精确的目标坐标参数及运动轨迹，引导武器系统对目标进行拦截和摧毁；侦察是指侦测敌方所处距离、方位及动态；校射是指测定己方炮弹的弹着点坐标，以校准火炮的设计。

表 1：军用雷达按照功能分类

功能分类	主要类型
搜索警戒雷达	二维搜索雷达、机载预警雷达、弹道导弹预警雷达、超视距雷达等
跟踪雷达	炮瞄雷达、制导雷达、截击雷达、精密跟踪测量雷达、轰炸瞄准雷达、雷达引信等
侦察、校射雷达	战场监视雷达、炮位侦察校射雷达、侦察与地形显示雷达

资料来源：《雷达原理（第 6 版）》，山西证券研究所

雷达系统的分类比较复杂，除了按照功能分类外，还可以按照雷达承载平台、雷达信号形式、雷达信号处理方式、雷达天线波束扫描方式、测量的目标参数、工作频段等进行划分。

表 2：雷达系统分类

分类方式	类型
承载平台	地面雷达、机载雷达、舰载雷达、弹载雷达、星载雷达等
雷达信号形式	脉冲雷达、连续波雷达
雷达信号处理方式	各种分集（频率、极化等）雷达、动目标显示雷达、动目标检测雷达、脉冲压缩雷达、脉冲多普勒雷达、合成孔径雷达
天线波束扫描方式	机械扫描雷达、相控阵雷达、频率扫描雷达
测量的目标参数	两坐标雷达、三坐标雷达、测高雷达、测速雷达

资料来源：《雷达技术与系统（第 2 版）》，《雷达原理（第 6 版）》，山西证券研究所

表 3：雷达频段的应用

频段名称	频率	波长	国际电信联盟分配的雷达频段	应用
HF	3-30MHz	100-10m		超远程监视。利用电离层的折射效应，具有超远程作用距离（数千千米）。空间分辨力精度较低。常用于超视距雷达
VHF	30-300MHz	10-1m	138-144MHz 216-225MHz	远程视线监视（200-500km）。具有中等分辨力及精度，无气象效应。适用于机载预警雷达（AEW），探地雷达等
UHF	300-1000MHz	100-30cm	420-450MHz 850-942MHz	
L	1-2GHz	30-15cm	1215-1400MHz	远程监视。具有中等分辨力，适度的气象效应。适用与对空监视雷达，如航路监视雷达等
S	2-4GHz	15-7.5cm	2300-2500MHz 2700-3700MHz	中程监视（约 100-200km）和远程跟踪（50-150km）。具有中等精度，在雪或暴雨情况下有严重的气象效应。适用于机场监视雷达、气象雷达等
C	4-8GHz	7.5-3.75cm	5250MHz-5925MHz	近程监视、远程跟踪与制导。具有高精度，在雪或中雨情况下有更严重的气象效应。目前雷达应用该频段的较少
X	8-12GHz	3.75-2.5cm	8500-10680MHz	晴朗天气或小雨情况下的近程监视。晴朗天气情况下的高精度远程跟踪，在降雨条件下降为中程和近程（25-50km）跟踪。该波段为目前应用最广泛的雷达频段，适用于军用机载雷达、合成孔径雷达、民用航海雷达、机载多普勒导航雷达、RTMS 交通监测雷达等
Ku	12-18GHz	2.5-1.7cm	13.4-14.0GHz 15.7-17.7GHz	近程跟踪和制导（0-25km）。用于天线尺寸受限且不需要全天候工作情况。适用于云雨层以上高度的军用机载雷达。
K	18-27GHz	1.7-1.1cm	24.05-24.25GHz	
Ka	27-40GHz	1.1-0.75cm	33.4-36GHz	
V	40-75GHz	0.75-0.4cm	59-64GHz	当必须避免在较远距离上信号被截获时，用于很近距离跟踪
W	75-110GHz	0.4-0.27cm	76-81GHz 92-100GHz	很近距离跟踪和制导（2-5km）
mm	110-300GHz	27-1mm	126-142GHz	很近距离跟踪和制导（<2km）。用于雷达导引头、低空火控

			144-149GHz 231-235GHz 238-248GHz	雷达
--	--	--	--	----

资料来源：《雷达原理（第6版）》，山西证券研究所

雷达系统的作用和性能是由一系列技术战术指标来描述的，战术指标反映了雷达的用途和能力，往往决定了雷达各分机及系统总的技术指标。雷达的主要战术指标包括威力范围、测量精度、分辨力（距离分辨力、角分辨力、速度分辨力）、数据率、抗干扰能力及工作可靠性等。雷达的主要技术指标包括工作频率（波长）及带宽、发射功率和调制波形、脉冲宽度、重复频率、天线波束形状、天线扫描方式及接收机灵敏度等。

雷达最初主要用于军事目的，20世纪40年代第二次世界大战加速了雷达的应用和发展，20世纪50年代是雷达理论与实践结合发展的重要时期，40年代发展起来的单脉冲原理成功应用于美国AN/FPS-16跟踪雷达，脉冲压缩原理开始应用于雷达发射系统，20世纪60年代机载动目标显示雷达应用于美国海军的E-2A预警机，探测距离在3700km以上的“麦德雷”高频超视距雷达研制成功，20世纪70年代，随着数字技术的快速发展，雷达信号处理掀起一场数字革命，主要体现在动目标检测（MTD）和脉冲多普勒（PD）等雷达信号处理机更为精巧灵活，性能显著提高，高可靠的固态功率源更加成熟，可以组成普通固态发射机，许多场合可用平面阵列天线代替抛物面天线，20世纪80年代，无源相控阵雷达研制成功，超高速集成电路技术的发展，使雷达信号处理能力继续提升的同时显著缩小了处理机体积，20世纪90年代，有源相控阵雷达的应用、毫米波雷达的成熟、合成孔径雷达的实战应用等使雷达具有多功能、综合化、高可靠、抗干扰和多目标等先进性，进入21世纪，雷达的发展以基于相控阵、合成孔径、脉冲多普勒等三种主流体制的演变和完善作为主要标志。

1.1 连续波雷达

连续波雷达是指连续发射电磁波的雷达，连续波雷达在接收回波时仍发射信号，连续波雷达的工作原理是利用多普勒频移检测运动目标。根据发射信号的不同形式，可将连续波雷达分为非调制单频和调频连续波雷达。相比非调制单频连续波雷达，调频连续波雷达具备测距能力，早在20年代就用来测量游离层的高度，在30年代用来做飞机的高度计。

连续波雷达的优点是设备简单，发射频谱窄。后者减少了无线电干扰问题，使得对所接收波形的处理变得容易。同时由于峰值功率一般比平均功率大不了多少，连续波雷达更易于引入固态原件。由于连续波雷达发射其所需的平均功率时，峰值功率很小，而且发射频谱很窄，不容易被敌人侦察设备探测到。但是连续波雷达有一个严重缺陷，就是信号泄露。由于连续波雷达体制上的特点，决定了它不能在发射信号期

间关闭接收机，导致发射机的发射信号及其噪声会直接泄露到接收机，从而掩盖目标的检测，如果发射机功率足够大甚至会烧坏接收机。连续波雷达收发间的隔离难于做得很好，限制了连续波雷达的发射功率，因此制约了连续波雷达在远距离以及空间限制高的机载领域的应用。

20 世纪 50 年代，在脉冲多普勒雷达发展还不够先进时，连续波雷达也被用于杂波中的运动飞机检测，Hawk 防空系统的 AN/MPQ-46 跟踪照射雷达就是典型代表。AN/MPQ-46 采用收发分置天线，为了加强屏蔽，两个天线的周边上都加有隧道式圆环。随着高频 PRF 脉冲多普勒雷达的发展，在杂波中的飞机检测应用方面连续波雷达已经被脉冲多普勒雷达替代。

图 2：MIM-23 Hawk HPIR（AN/MPQ-46）



资料来源：维基百科，山西证券研究所

在短距离或中等距离的情况下，用连续波雷达的设备比脉冲雷达简单，由于连续波雷达能在比较低的高度工作，因而在半主动导弹制导中获得成功应用。半主动雷达制导导弹需要跟踪雷达来捕获目标，并且需要更窄聚焦的照明雷达来“照亮”目标，以便导弹锁定目标反射的雷达回波。在导弹飞行的整个过程中，目标必须保持照明状态，典型应用有 AN/SPG-62。AN/SPG-62 是美国研制的连续波火控雷达，目前部署在配备宙斯盾作战系统的军舰上，在宙斯盾火控中的作用是为半主动雷达制导导弹（SM-2 或 ESSM Block 1）在末段拦截阶段照亮目标。第一批 AN/SPG-62 装备在提康德罗加级巡洋舰上，该巡洋舰于 1983 年投入使用，从那时起，AN/SPG-62 已在许多拥有宙斯盾战斗系统的美国 and 外国海军舰艇上服役。

图 3：半主动雷达制导弹寻的制导图

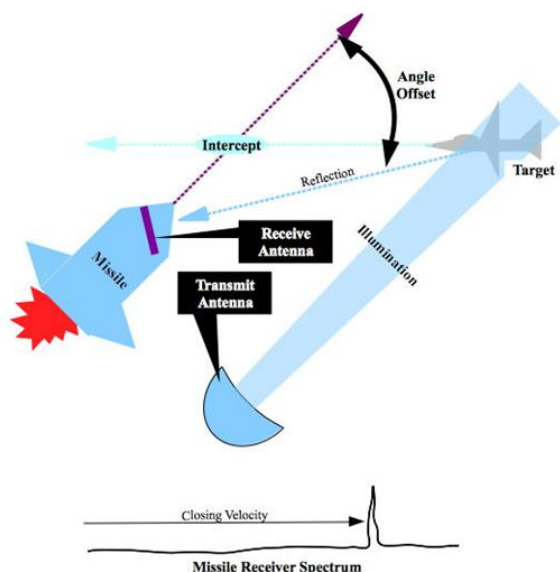


图 4：AN/SPG-62



资料来源：维基百科，山西证券研究所

资料来源：维基百科，山西证券研究所

表 4：AN/SPG-62 装备情况

国家	舰艇类型	每艘舰艇装备 AN/SPG-62 数量
澳大利亚	霍巴特级驱逐舰	2
日本	爱宕级驱逐舰	3
	玛雅级驱逐舰	3
	金刚级驱逐舰	3
韩国	世宗大帝级驱逐舰	3
挪威	弗里乔夫·南森级护卫舰	2
西班牙	Álvaro de Bazán 级护卫舰	2
	博尼法兹级护卫舰	2
美国	阿利伯克级驱逐舰	3
	提康德罗加级巡洋舰	4

资料来源：维基百科，山西证券研究所

1.2 脉冲多普勒雷达

脉冲多普勒雷达是一种利用多普勒效应检测目标信息的脉冲雷达。由于连续波雷达有信号泄露的重大缺陷，同时脉冲工作有简化距离测量的优点，因此脉冲雷达逐步发展成为最常用的雷达工作方式。普通脉冲雷达是在检波后在时域上检测目标的，在强杂波背景下就会丧失检测能力，所以普通脉冲雷达没有下视能力，20 世纪 60 年代，为了解决机载雷达的下视难题，人们研制了脉冲多普勒体制。脉冲多普勒雷达兼具脉冲雷达的距离分辨力和连续波雷达的速度分辨力，能进行频域的滤波与检测，有更强的抑制杂波的能力，

能在较强的杂波背景中分辨出移动目标，尤其适用于机载平台。

表 5：脉冲多普勒雷达的应用和要求

雷达应用	要求	复杂性
机载预警	探测距离远；距离数据精确	能容许有复杂的设备
机载截击	具有中等的探测距离和粗略的距离精度	允许有中等的复杂程度
导弹寻的	可以不需要真是的距离信息	对振动和复杂性有严格限制
地面武器控制	探测距离近，通常无距离模糊	简单
气象	速度和距离分辨力高	中等复杂程度

资料来源：《雷达系统》，山西证券研究所

最早装备战斗机的机载脉冲多普勒雷达，是美国休斯公司 1965 年开始研制，1966 年装备美国海军 F14 战斗机的 AN/AWG-9 火控雷达。美国装备空军和海军的脉冲多普勒机载火控雷达还有：休斯公司 1965 年研制，1974 年装备海军 F15 战斗机的 AN/APG63 雷达；西武公司 1970 年研制，1981 年装备空军 F-16A/B 战斗机的 AN/APG-66 雷达和 1984 年装备空军 F-16C/D 战斗机的 AN/APG-68 雷达；休斯公司 1975 年研制，1982 年装备海军 F-18 战斗机的 AN/APG-65 等。脉冲多普勒机载预警雷达的典型代表是，美国西武公司研制的装备空军预警机 E-3A 的 AN/APY-1 雷达。

表 6：美军主要型号机载脉冲多普勒雷达主要战术及技术指标

雷达型号	频段	装备时间	装备机种	配用武器	天线形式	平均无故障时间	电子对抗措施
AN/AWG-9	X	1966	F-14A/B	AIM-54A、AIM-7、AIM-9 空空导弹。机炮，空地火箭和炸弹	圆形平板缝隙阵	39h（1973 年）	频率分集（19 个）
AN/APG-63/63（V）	I/J	1974	F-15A/B/C/D、P-3Orion	AIM-7M、AIM-9L、AIM-120、M61 机炮	圆形平板缝隙阵	30h-35h	频率分集，能对付连续闪烁的噪声干扰
AN/APG-65/65（V）	I/J	1982	F/A-18A/B/C/D，AV-8B，F-4E，F-4F，EF-18	AIM-7F、AIM-9L、AIM-120、AMRAAM、20mm 机炮	圆形平板缝隙阵	经多次改进后现达到 120h	
AN/APG-66/66（V）	I/J	1978	F-16、F-6A/B/N、F-4E/J、F-5F、HU-25C、A-4、Hawk200	AIM-7、AIM-9L、AIM-120、AMRAAM、机炮	平板缝隙阵	APG-66：97h APG-66(V)1：140h APG-66(V)2：>210h APG-66(V)SASS：750h	频率捷变，快速相移

AN/APG-68/ 68 (V)	I/J	1985	F-16C/D	AIM-9、AIM-7F、 AIM-120、 AMRAAM、机炮	椭圆平板 缝隙阵	APG-68 : 70h APG-68(V) 标准型 : 150h APG-68(V)1 Block30/40 : 160h APG-68(V)2 Block30/40s : 160h APG-68(V)5 Block50 : 264h APG-68(V)6 Block40s : 160h APG-68(V)9 Block50 : 390h	频率捷 变, MTI
AN/APG-70	I/J	1987	F-15C/D/E/I/ S	AIM-7F/M、 AIM-9L、AIM-120、 AMRAAM、20mm 机炮	圆形平板 缝隙阵	80h	
AN/APG-71	I/J	1993	F-14D	AIM-7E、AIM-54、 AIM-120、 20mmM61 机炮	平板缝隙 阵		频率捷变
AN/APG-73/ 73 (V)	I/J	1994	F/A-18C/D/E/ F	AIM-7、AIM-9、 AIM-120、 AGM-88HARM	圆形平板 缝隙阵	100h(期望值)	
AN/APY-1	E/F	1977	E-3A/B/C/D/ F		裂缝波导 平面阵列	500h	极低副瓣 天线, 频 率捷变, 多 PRF, 无源干扰 定位, 杂 波滤波

资料来源:《机载雷达手册》, 山西证券研究所

早期的脉冲多普勒机载火控雷达采用扭转极化卡塞格伦天线。这种天线重量轻、生产加工容易, 但它的效率低、副瓣电平高, 这使雷达的探测性能受到限制, 所以组件被淘汰。现代脉冲多普勒机载火控雷达, 几乎都采用了平板缝隙阵天线。这种天线的效率高, 特别使天线口径照射的幅度和相位易于控制, 能获得比较理想的低副瓣性能, 适合用于脉冲多普勒机载火控雷达。

图 5：苏-27 的 RLPK-27 雷达的卡塞格伦天线



资料来源：维基百科，山西证券研究所

图 6：AWG-9 平面缝隙阵天线



资料来源：维基百科，山西证券研究所

表 7：采用不同天线形式的脉冲多普勒机载火控雷达的情况列表

天线类型	国家	雷达型号	机型	装备时间
卡塞格伦	俄罗斯	TOPAZ	米格-29、米格-29S、米格-29ME（出口型）	80 年代初
		RLPK-27	苏-27	1984
平面缝隙阵	美国	AN/APG-9	F-14A/B	1966
		AN/APG-63/63（V）	F-15A/B/C/D、P-3Orion	1974
		AN/APG-65/65（V）	F/A-18A/B/C/D, AV-8B, F-4E, F-4F, EF-18	1982
		AN/APG-66/66（V）	F-16、f-6A/B/N、F-4E/J、F-5F、HU-25C、A-4、Hawk200	1978
		AN/APG-68/68（V）	F-16C/D	1985
		AN/APG-70	F-15C/D/E/I/S	1987
		AN/APG-71	F-14D	1993
	俄罗斯	Zhuk（Beetle）原型	米格-29M、米格-33	90 年代初
		Kopyo	米格-21、米格-23、苏-25、苏-39	90 年代初

资料来源：《机载雷达手册》，维基百科，山西证券研究所

2. 相控阵雷达：雷达未来发展的主流方向

2.1 相控阵天线是相控阵雷达的核心

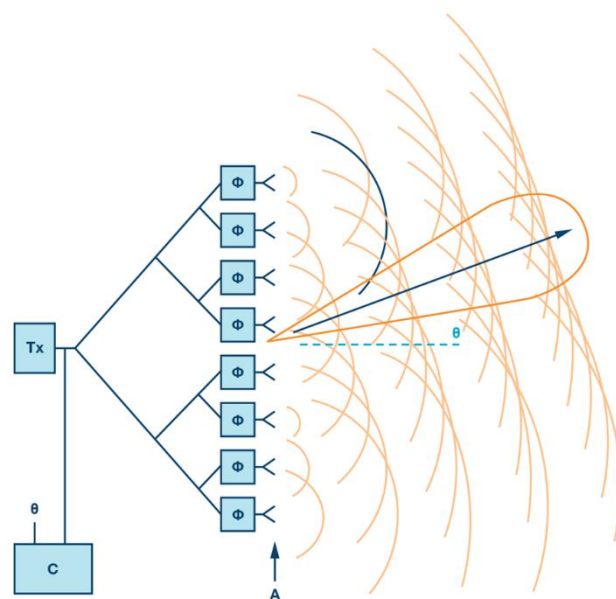
相控阵雷达是采用相控阵天线的雷达。相控阵天线是由初期雷达采用的阵列天线发展而来，是由许多辐射单元（阵元）排列所构成的定向天线，典型的相控阵利用电子控制移相器改变天线阵元相位分布来实现波束指向在空间的转动或扫描。

图 7：AN/MPQ-53 C 波段多功能相控阵雷达



资料来源：维基百科，山西证券研究所

图 8：相控阵天线波束控制原理图



资料来源：《相控阵波束成形 IC 简化天线设计》，山西证券研究所

相控阵天线和相控阵雷达的技术特点与相控阵天线的微波部件及控制部件的技术进步，以及数字技术的进步有关。主要技术特点包括天线波束快速扫描能力、多波束形成能力、空间功率合成能力、天线波束形状的捷变能力、与雷达平台共形能力以及高可靠性。

表 8：相控阵雷达主要技术特点说明

主要技术特点	说明
天线波束快速扫描能力	相控阵天线用电子控制方式实现天线波束指向快速转换，克服了机械扫描的惯性及由此带来的对雷达性能的限制
多波束形成能力	相控阵天线依靠波束控制信号可以很方便地形成多个指向不同的发射波束和接收波束，实现多目标跟踪
空间功率合成能力	采用阵列天线之后，可在每一单元通道或者每一个子天线阵设置发射信号功率放大器，通过发射天线波束的定向控制，将各单元通道或者子阵通道中的发射信号聚焦于某一空间方向，它提供了获得远程雷达及探测低可探测目标要求的大功率雷达发射信号的可能性

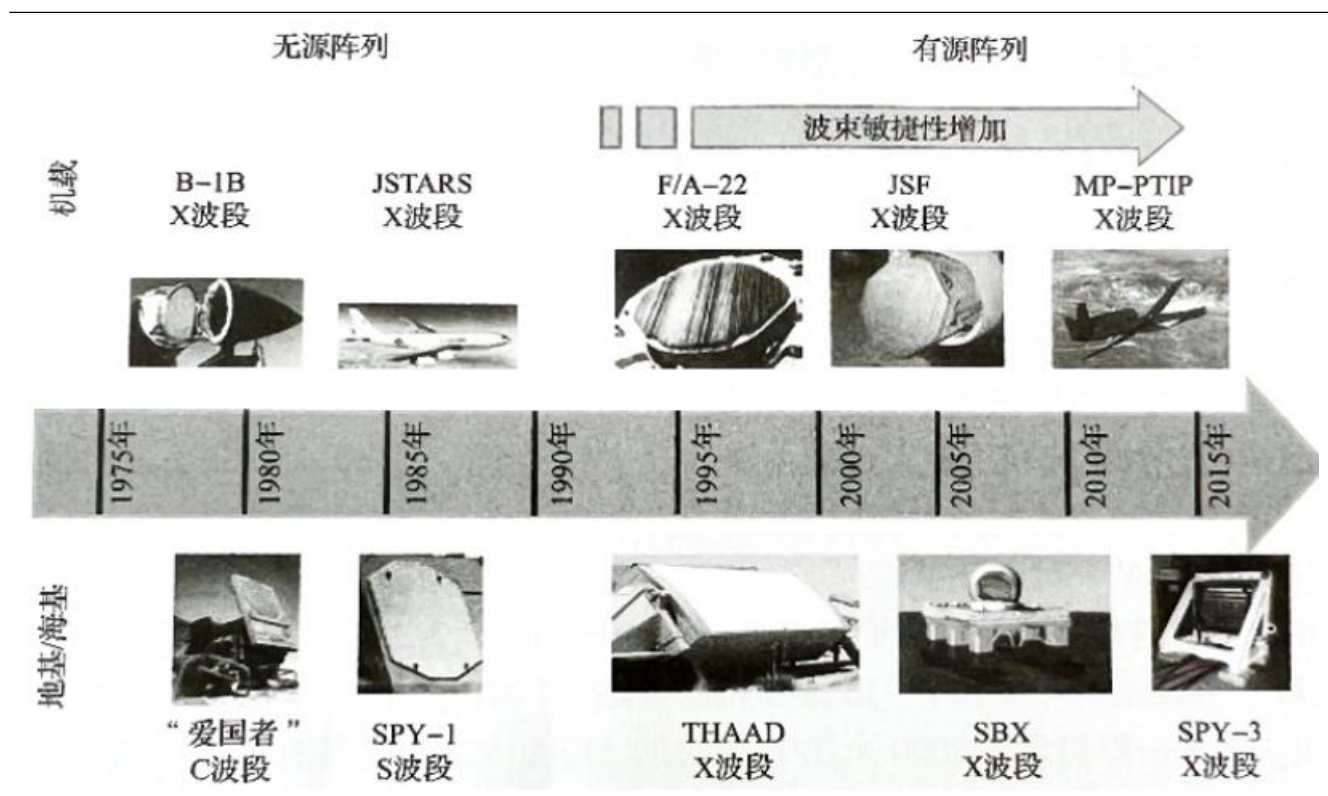
天线波束形状的捷变能力	通过改变阵列中各单元通道内的信号幅度与相位，可改变天线波束形状，从而提高雷达抗干扰能力
与雷达平台共形能力	阵列天线将整个天线分为许多个天线单元，利于分布在雷达安装平台表面，减少或消除雷达天线对雷达平台空气动力学性能的影响，或者有利于增大雷达天线面积
高可靠性	在相控阵雷达，特别是有源相控阵雷达中，有成百上千个辐射单元，每个辐射单元都有一个标准的收发（T/R）组件，即使部分 T/R 组件损坏，对雷达性能影响不大，同时所有 T/R 组件都是标准模块，便于维修更换

资料来源：《相控阵雷达原理》，山西证券研究所

2.2 相控阵雷达的发展与应用

20 世纪 60 年代以来，相控阵雷达获得很大发展，最初它主要是为了解决对人造卫星及洲际导弹的观测问题，为了观测几千千米远的目标，要求雷达天线具有大的孔径尺寸，这就给天线的机械扫描带来极大的困难，采用相控阵天线即可解决上述问题，这是相控阵雷达初期大发展的主要原因。之后随着数字技术的发展，数据处理能力大幅提升，加上相控阵雷达成本的逐步降低，极大促进了相控阵雷达从战略应用向战术应用发展，从大型的、复杂的、具有超远程探测距离的相控阵雷达发展出小型的、相对简单的、距离较近的舰载、机载相控阵雷达。

图 9：相控阵雷达发展脉络



资料来源：《机载有源相控阵火控雷达技术》，山西证券研究所

表 9：典型地基相控阵雷达系统

国家	雷达型号	频段	阵面数量	天线口径（m）	最大最用距离（km）	部署时间
美国	AN/FPS-108	L	1	29	>3200	1977
	AN/FPS-115	UHF	2	22.3	4800	1980
	AN/FPS-120		2	30.6	5500	2001
	AN/FPS-126		3	25.6	5500	1992
	AN/FPS-132		2/3	30.6	5500	2013
俄罗斯	Voronezh-DM	UHF	1		4800-6000	2014

资料来源：《美俄典型地基战略预警相控阵雷达系统比较分析》，维基百科，山西证券研究所

表 10：典型舰载相控阵雷达系统

国家	雷达型号	频段	舰船平台	辐射单元数目	部署时间
美国	AN/SPY-1	S	USS Norton Sound	4,096 个辐射器、 4,352 个接收器	
	AN/SPY-3	X	USS Zumwalt USS Gerald R. Ford		
	AN/SPY-6	S	Arleigh Burke-class		
	AN/SPQ-11	E/F 和 I/J	USNS Observation Island	12288（有源单元）	
俄罗斯	Sky Watch		库兹涅佐夫号航空母舰	20400	
法国	Herakles	E/F	FREMM 多用途护卫舰 Formidable-class		
英国	Sampson	E/F（S）	HMS Daring	每个阵面包括 2500 个发射/接收单元	2007
日本	FCS-3	C/X	JS Hyūga (DDH-181)		2007
意大利	EMPAR	C	San Giorgio class Horizon class Cavour		2006
以色列	EL/M-2248 MF-STAR	S	Sa'ar 5 Sa'ar 6-class corvette ROKS Marado Kolkata class		

资料来源：《国外舰载相控阵雷达的发展及未来趋势》，维基百科，山西证券研究所

表 11：主要机载相控阵雷达列表

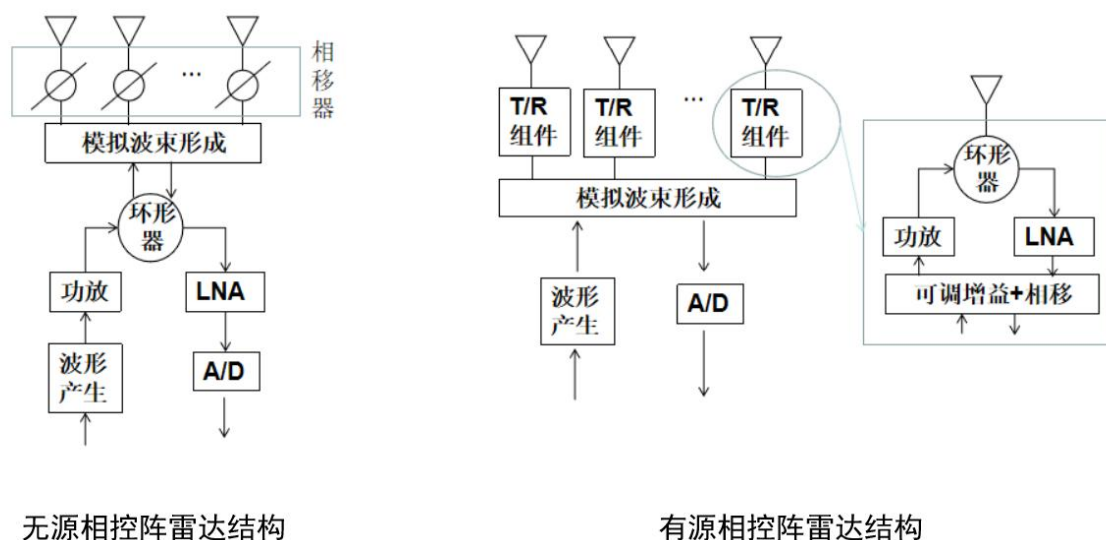
雷达制式	国家	雷达型号	装备机型	装备时间
无源相控阵	俄罗斯	ZASLON	米格-31	80 年代中期
		Zhuk-PH	苏-30、苏-30MK、苏 35	1984
		OCA	米格-21、米格-29WBT	90 年代末
		N011M Bars	苏-30MKI、苏-30MKM	2002
		Irbis-E	苏-30M2	2007（飞行测试）
	美国	AN/APQ-164	B-1	1986

有源相控阵		AN/APQ-181	B-2A	1993
		AN/APY-1/2-	E-3	70 年代
	法国	RBE-2	Rafale	1997
	俄罗斯	N036 Byelka	苏-57、T-50	2012（测试）
	美国	AN/APG-63(V)3	F-15C/D	2006
		AN/APG-77	F-22	2005
		AN/APG-79	F/A-18E/F	2007
		AN/APG-80	F-16C/D(Block60)	2004
		AN/APG-81	F-35	2010（试飞）
		APG-82(V)1	F-15Is	2017
		AN/APG-83	F-16	2010
	法国	RBE2 AA	Rafale	2012
	日本	J/APG-1	F-2	2002
	欧洲	AMSAR	EF2000	2007

资料来源：《机载雷达手册》，《机载有源相控阵火控雷达发展现状及趋势》，维基百科，山西证券研究所

相控阵分有源和无源两类。无源相控阵仅有一个中央发射机和一个接收机，发射机产生的高频能量经计算机自动分配给天线阵的各个辐射器，目标反射信号经接收机统一放大。有源相控阵的每个辐射器都配有一个发射/接收通道（T/R 组件），每一个通道都能自己产生、接收电磁波，在频宽、信号处理和冗余设计上更有优势，且个别组件的损坏对系统功能运转影响较小。

图 10：无源和有源相控阵雷达结构



资料来源：《SAR 学习笔记》，山西证券研究所

表 12：有源相控阵雷达、无源相控阵雷达和机械扫描雷达主要能力表

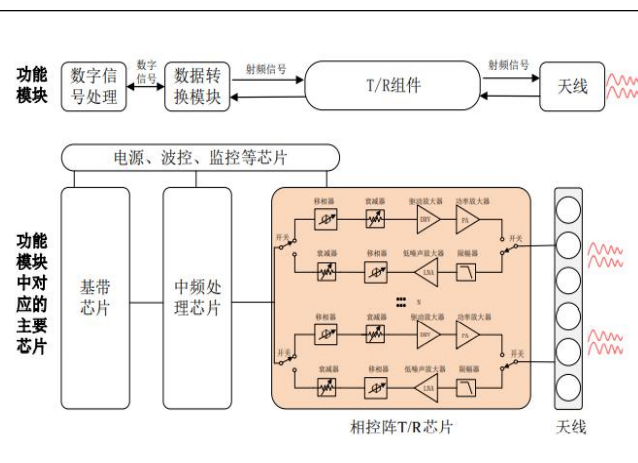
体制	能力	多目标探测能力	多目标制导能力	抗干扰能力	对抗能力	复合多任务能力	同频兼容工作能力	低截获概率 (LPI)	工作带宽	任务可靠性
有源相控阵		强	强	强	X 波段侦收与干扰	有	强（兼容设计）	有	宽带（2-4GHz）	高（500h）
无源相控阵		强	强	一般	无	无	一般（闭锁设计）	有	窄带（300MHz）	一般（200h）
机械扫描		一般（搜索区域受限）	一般	一般	无	无	一般（闭锁设计）	无	窄带（300MHz）	一般（200h）

资料来源：《机载有源相控阵雷达的作战优势、性能对比及军事应用》，山西证券研究所

2.3 有源相控阵雷达的组成

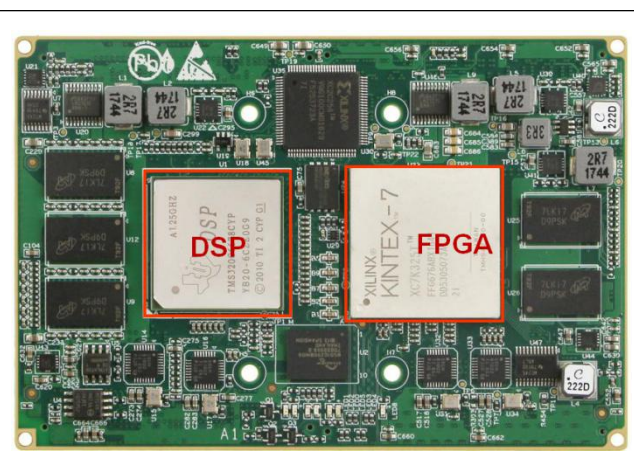
有源相控阵雷达的无线收发系统主要包括四个功能模块：数字信号处理模块、数据转换模块、T/R 组件和天线。有源相控阵 T/R 组件负责接收、发射一定频率的电磁波信号，并在工作带宽内对信号进行幅度相位控制。数据转换模块实现射频信号变频、滤波、增益控制、数模转换等功能，将射频信号转换为基带信号后，传输给数字信号处理模块，主要包括射频收发芯片和 ADC/DAC 芯片。数字信号处理模块通过处理基带信号实现相关的雷达算法，从而完成目标识别、测距和成像等功能，目前大多数雷达信号处理平台都采用 FPGA+DSP 的结构，FPGA 可以完成大规模复杂组合逻辑与时序逻辑，且全部控制逻辑由硬件完成，速度快，效率高，适合大数据量的高速传输，这是 DSP 无法比拟的，采用 FPGA+DSP 的结构可使 DSP 的高速数据处理性能与 FPGA 的高速数据采集及逻辑的控制能力相结合，实现优势互补。与此同时，电源管理芯片为 T/R 组件、数据转换模块和数字信号处理模块提供了良好的供配电和低功耗电源管理。

图 11：有源相控阵雷达无线收发系统结构示意图



资料来源：铖昌科技招股书，山西证券研究所

图 12：雷达信号处理板卡



资料来源：创龙科技官网，山西证券研究所

有源相控阵 T/R 组件主要由射频前端芯片中的放大器类芯片（功率放大器和低噪声放大器）、幅相控制类芯片（数控移相器和数控衰减器）、无源类芯片（限幅器、开关和环形器）以及相应的控制电路、电源调制电路组成。发射信号时，控制器在雷达控制信号作用下，将所有收发开关同步切换到发射通道，射频激励源送来的信号经移相器、衰减器、收发开关和功率放大器进行幅度相位调制，然后送至天线辐射单元。接收信号时，控制器在雷达控制信号作用下，将所有收发开关同步切换到接收通道，天线接收到的微弱信号经限幅器和低噪声放大器放大进行幅度相位调整后送往接收机。此外，有源相控阵 T/R 组件内部还必须设计相应的电源调制、保护和控制电路，以便按照有源相控阵雷达系统的控制要求进行通信和响应。

图 13：典型有源相控阵 T/R 组件工作原理示意图

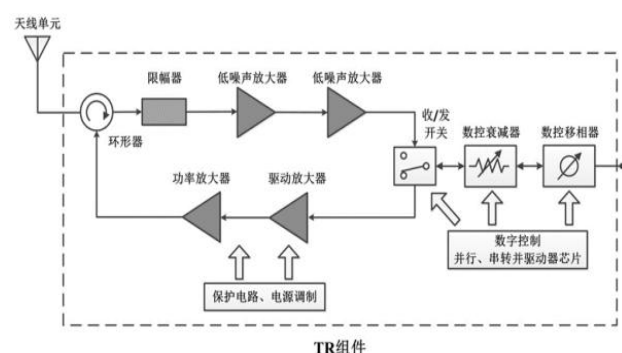
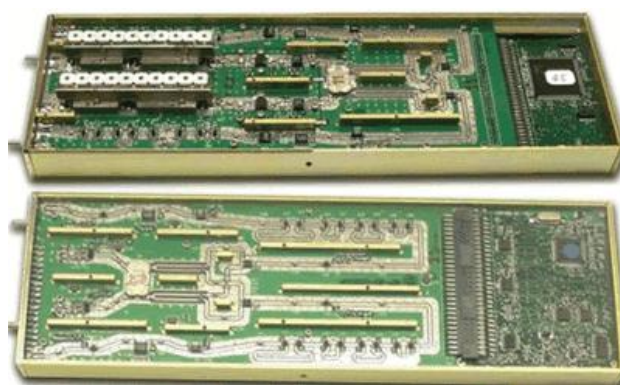


图 14：T/R 组件实物图（双面）



资料来源：铖昌科技招股书，山西证券研究所

资料来源：SAE International，山西证券研究所

有源相控阵雷达天线最关键的部分是 T/R 组件，有源相控阵的一切特点都体现在 T/R 组件上，T/R 组件的性能在很大程度上决定了有源相控阵雷达的性能。一个有源阵列要使用成百上千个 T/R 组件，据统计一部有源相控阵雷达天线系统成本占雷达总成本的 70%-80%，而 T/R 组件又占据了有源相控阵雷达天线成本的绝大部分。

高功率密度、高可靠性的低压大电流电源供电系统是相控阵雷达的关键技术之一。T/R 组件需要稳定的低压直流供电，尤其在发射时需要提供很大的电流用于发射功率输出，峰值功率较大，同时由于受到体积、重量和工作环境（7×24 小时工作，工作温度可达 60 摄氏度甚至更高）的限制，T/R 组件的模块电源必须具备大功率、高功率密度、高效率和高可靠性。

3. 雷达导引头：雷达技术的制导应用

3.1 导引头是导弹的“眼睛”

制导控制系统决定了导弹的打击精度。导弹通常由战斗部、推进系统、制导控制系统、弹体和弹上电源等五大部分组成，其中制导控制系统是导弹的核心和关键分系统，很大程度上决定着导弹的作战性能，尤其是打击精度。导弹制导控制系统包括制导系统和控制系统两大部分，制导系统好比人的“眼睛和大脑”，“眼睛”获取目标的位置和运动信息后，交给“大脑”按照制导规律形成制导指令；控制系统好比人的“小脑和肌肉”，“小脑”将“大脑”的制导指令分解为控制指令，并传送到相应的“肌肉”（执行机构）使其协调工作，从而使导弹飞向目标。

图 15：“战斧”巡航导弹总体组成示意图

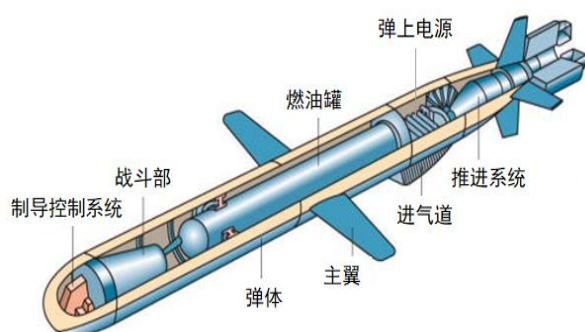
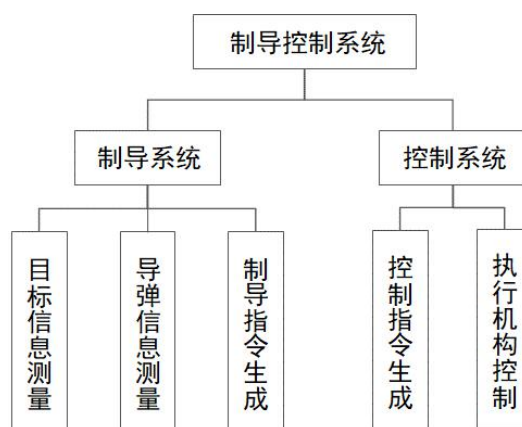


图 16：制导系统和控制系统关系



资料来源：《导弹制导系统原理》，山西证券研究所

资料来源：《导弹制导系统原理》，山西证券研究所

表 13：导弹构成部分及其功能组成和分类

构成部分	功能及组成	分类
战斗部	直接毁伤目标的专用装置。主要由壳体、战斗装药、引信、保险和解保装置组成。	核装药战斗部、常规装药战斗部和特种装药战斗部
推进系统	为导弹飞行提供动力。主要包括发动机、推进剂或燃料储箱和辅助设施（如管道、仪表、安装结构等）。	化学火箭发动机、空气喷气发动机和组合发动机
制导控制系统	制导功能，测量导弹与目标的相对位置和运动信息，并依照一定规律形成改变导弹速度方向的制导指令； 控制功能，根据制导指令，驱动导弹的执行机构改变弹体飞行速度方向，飞向目标	自主制导系统、非自主制导系统和复合制导系统
弹体	连接导弹各部分并承受各种载荷的结构件。表面通常安装有弹翼、尾翼或者安定面。	
弹上电源	给导弹各部分提供工作用电。一般包括原始电源（一次电源）、配电设备和交流装置。	化学电池、小型发电机

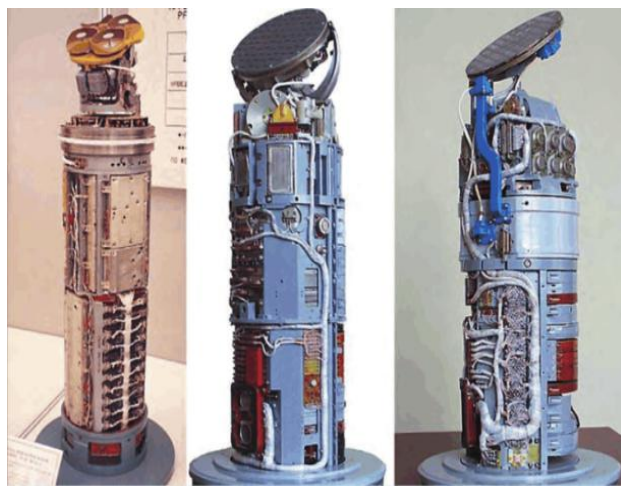
资料来源：《导弹制导系统原理》，山西证券研究所

导引头是导弹制导系统的核心部件，是导弹的“眼睛”。导引头的主要功能是搜索、发现、识别和跟踪目标，测量目标相对于导弹的位置和速度信息。导引头是导弹价值量占比最高的部分，根据《防空导弹成本与防空导弹武器装备建设》中关于导弹按价值量拆分的描述，导引头和动力装置占据 40~60%的成本。按照探测系统的不同，导引头主要可分为光学制导和雷达制导两大类。相比光学波段，无线电波在大气中传播损耗要小的多，也不受昼夜和气象条件的限制，所以雷达导引头探测距离远，可以全天候和全天时使用，但是雷达制导精度不如光学制导高，无线电波段更容易受到电磁干扰。

图 17：Kh-35 反舰导弹的雷达导引头



图 18：R-27R/ER、R-77 及 R-27EA 雷达导引头

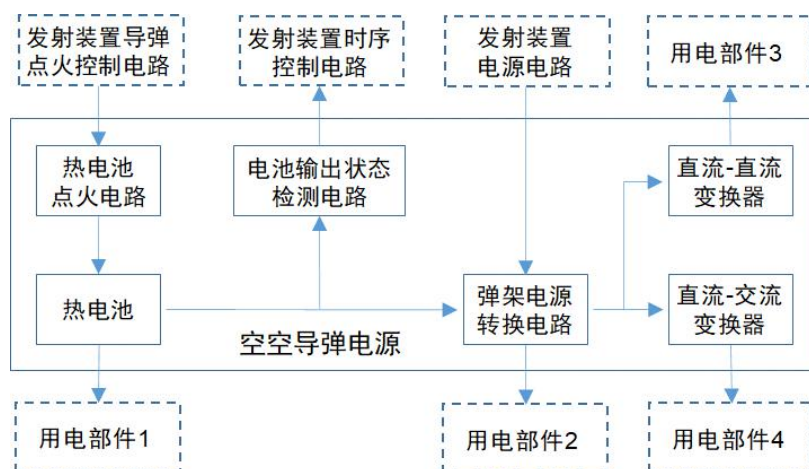


资料来源：《世界现役制导武器全解析》，山西证券研究所

资料来源：《弹载有源相控阵雷达的应用》，山西证券研究所

弹上电源系统是导弹的“心脏”，负责给导引头、任务计算机、惯导、卫星导航接收机、舵系统等弹载电子设备提供工作用电，是导弹运行的核心，其安全性和可靠性直接关系整个导弹的质量水平。弹上电源系统主要由一次电源、二次电源和控制电路等构成，一次电源通常选用热电池或者涡轮发电机，二次电源一般包括直流-直流、直流-交流、交流-直流变换器，电源控制电路通常由点火电路、电源输出状态检测电路、弹架电源转换电路等组成。导弹电源系统为了适应导弹机动性强、工作时间较短和体积质量较小的整体情况，需要具备以下几个特点：体积小，质量轻；瞬间输出功率的能力大；启动速度非常快，缩短导弹发射时间；能够适应高温等及其恶劣的环境；可靠性高和贮存时间长。

图 19：导弹电源系统组成框图



资料来源：《导弹电源系统设计及发展趋势》，山西证券研究所

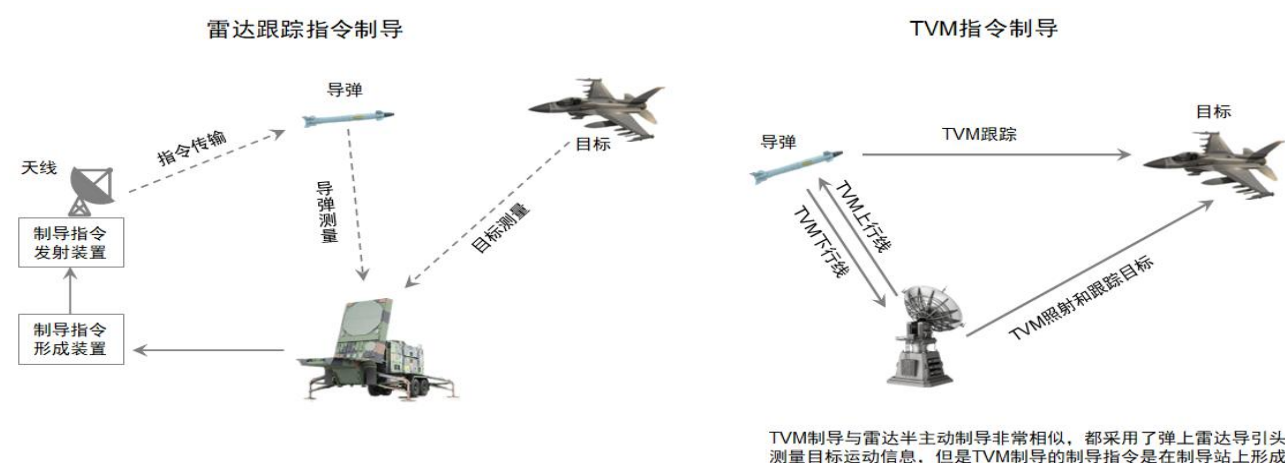
3.2 雷达制导系统分类以及相应的雷达导引头特点

雷达制导系统按照制导指令是否在导弹上产生可以分为无线电遥控制导和雷达自动寻的制导两类。无线电遥控制导是指由制导站（地面站或载机等）发射雷达波束测量目标和导弹信息，并由制导站产生制导指令遥控导弹飞行的方式，这种制导方式又可分为无线电指令制导和无线电波束制导，根据目标测量方法的不同，无线电指令制导又可分为雷达跟踪指令制导系统和 TVM（Track-via-missile）指令制导系统两种形式。雷达自动寻的制导是由弹上雷达导引头接收目标反射或发射的无线电波，测量弹目相对位置并产生制导指令控制导弹飞向目标。目标反射或发射的无线电波可能是由弹上雷达照射后反射的，也可能是由第三方雷达照射后反射的，或者由目标自身主动发射的，于是根据辐射来源的不同，雷达自动寻的制导系统相应可分为主动寻的制导系统、半主动寻的制导系统和被动寻的制导系统。相应于雷达寻的制导体制，雷达导引头可分为主动导引头、半主动导引头、被动导引头和复合导引头。无线电遥控制导作用距离较远，受天气影响小，导弹上设备简单、成本较低，但其制导精度随着导弹与制导站的距离增加而降低，同时系统易受无线电干扰，不如雷达自动寻的制导方式应用广泛。

TVM（Track-via-missile）指令制导是介于雷达跟踪指令制导和雷达半主动寻的制导之间的一种制导方式。导弹发射后需要由功率较大的地面火控雷达持续照射目标，导弹在飞行过程中接收到目标的反射回波后，把测量的目标数据通过下行无线数据链送到制导站，同时制导站向导弹发射跟踪波束测量导弹的位置坐标数据，最后制导站根据导弹和目标的相对位置和运动信息计算得到制导指令，并通过上行无线数据链传送给导弹，从而引导导弹飞向目标。TVM 制导方式与雷达半主动制导都是采用弹上导引头测量目标运动信息，但是 TVM 制导方式的制导指令是在制导站上形成的，而雷达半主动制导方式是在导弹上形成的。由

于导弹雷达导引头的测量精度随着导弹与目标的不断接近而不断提高，因此 TVM 制导解决了雷达跟踪指令制导的探测精度随距离增加而下降的缺点，但是由于需要大功率雷达的连续照射，增加了雷达照射载体的暴露时间，所以 TVM 制导方式很难用于空间狭小且机动性要求高的机载平台。

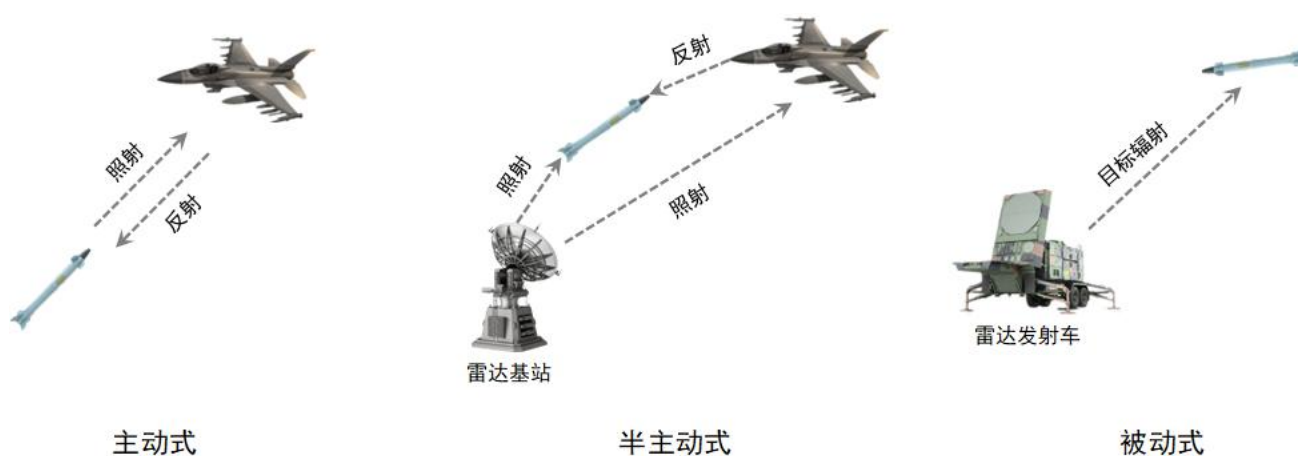
图 20：无线电指令制导原理图



资料来源：《导弹制导系统原理》，山西证券研究所

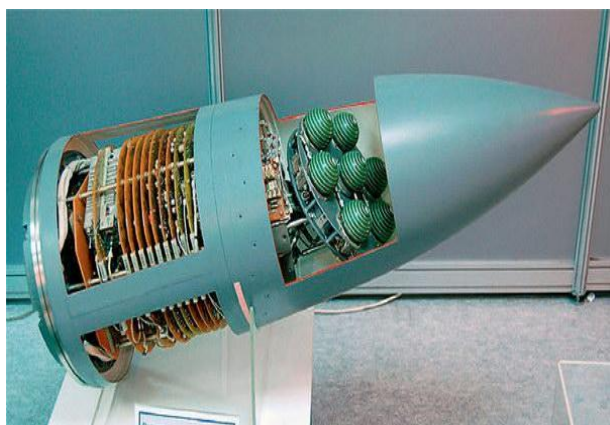
主动式导引头是典型的弹载雷达装置，同时安装有雷达发射和接收设备，因此具备自动发现、识别和跟踪目标的能力，可实现“发射后不管”。半主动式导引头没有发射机，需要依靠装在地面雷达站或其他载体（飞机、军舰或雷达车）上的发射机照射目标，因此不具备自主探测能力。被动式导引头自身不发射雷达波，也不需要照射雷达对目标进行照射，主要是利用目标自身辐射的无线电波确定目标位置，所以多用于打击敌方的雷达、通信设备及主动式电子干扰设备等的反辐射导弹。

图 21：雷达自动寻的制导原理图



资料来源：《导弹制导系统原理》，山西证券研究所

图 22: Kh-31P 反辐射导弹的导引头



资料来源:《兵器知识》, 山西证券研究所

图 23: 乌克兰米格-29 发射 AGM-88 反辐射导弹



资料来源: Ukrainian Air Force, 山西证券研究所

表 14: 不同类型导引头主要特点说明

雷达导引头类型	优点	缺点
主动式导引头	“发射后不管”, 可实现多弹同时攻击一个或多个目标, 制导精度不会随距离增加而变差。	由于弹上设备体积、质量和功率受到限制, 因此弹载雷达发射机功率较小, 作用距离较近, 且易受噪声干扰机的影响。
半主动式导引头	制导精度较高, 能够全天候作战; 与主动式导引头相比, 减少了弹上的雷达发射机, 从而降低弹上设备重量和成本; 在其他载体上安装的照射雷达功率可以很大, 因此作用距离要比主动式导引头大	在整个导弹飞行过程中, 需要照射雷达持续照射目标, 限制了雷达照射载体的机动性, 增加暴露时间, 容易受到反辐射导弹打击或者电磁干扰; 不能适应对多个目标同时攻击
被动式导引头	“发射后不管”, 对敌方的雷达、通信设备及主动式电子干扰设备等具有很强的打击能力	若敌方雷达突然关机, 无法找到辐射源, 导弹命中率会受到较大影响

资料来源:《导弹制导系统原理》, 山西证券研究所

表 15: 使用不同雷达制导系统的导弹实例

制导系统	国家	导弹型号	服役时间	主要指标
雷达跟踪指令制导	俄罗斯	SA-1 (V-300)	1955	射程 30km, 速度 2.5 马赫
		SA-2 (V-750)	1957	射程 45km, 速度 3.5 马赫
		SA-3 (V-600、V-601)	1961	V-600: 射程 15km, 速度 3-3.5 马赫 V-601: 射程 35km
		SA-4 (2K11 Krug)	1965	射程 780km, 速度 35km/h
		SA-15 (9M331)	1986	射程 12km, 速度 2.5 马赫
	美国	Nike Ajax 地对空导弹	1954	射程 48km, 速度 2.25 马赫
		Nike Hercules “大力神” 地对空导弹	1958	射程 140km, 速度大于 4 马赫
		Nike Zeus 反弹道导弹	1961	射程 430km, 速度大于 4 马赫
	印度	Akash 地对空导弹	2009	射程 35km, 速度 2.5 马赫
TVM 指令制导	美国	“爱国者” 防空导弹	1981	PAC-1: 射程 90km PAC-2: 射程 160km
	俄罗斯	S-300 防空导弹 (48N6、48N6P-01、	1978	48N6: 射程 150km, 速度 2km/s

		5V55K、5V55R)		48N6P-01: 射程 195km, 速度 2km/s 5V55K: 射程 47km, 速度 1.9km/s 5V55R: 射程 75km, 速度 1.9km/s
半主动雷达制导	俄罗斯	9k37 Buk “山毛榉” 地对空导弹	1980	9M38: 射程 30km, 速度 3 马赫 9M38M1: 射程 35km, 速度 3 马赫 9M317: 射程 45km, 速度 4 马赫 9M317M(E): 射程 50km, 速度 4.5 马赫
		R-23R 空空导弹	1974	射程 35km, 速度 3 马赫
		R-24R 空空导弹	1975	射程 50km, 速度 3 马赫
		R-27 空空导弹		射程 73km (R-27R)
		SA-6 地对空导弹	1967	3M9: 射程 24km, 速度 2.8 马赫
	美国	RIM-7 “海麻雀” 地对空导弹	1976	射程 19km, 速度 4259km/h
		RIM-66 Standard MR 地对空导弹	1967 (SM-1MR Block I) 1979 (SM-2MR)	射程 74km-167km, 速度 3.5 马赫
		RIM-162 (ESSM) 地对空导弹	2004	射程大于 50km, 速度大于 4 马赫
		MIM-23 “鹰式” (HAWK) 地对空导弹	1959	射程 45km (MIM-23K/J); 速度小于 2.4 马赫
		“标准” SM-2 防空导弹	1979 (RIM-66C SM-2MR)	射程 74-167km; 射高大于 24400km; 速度 3.5 马赫
		AIM-7 “麻雀” 空空导弹	20 世纪 50 年代	射程 AIM-7C: 11km, AIM-7E: 30km; 速度 4 马赫 (AIM-B 之后升级版本)
	法国	“马特拉” Super530 空空导弹	1979 (Super530F)	Super530F: 射程 25km, 速度 4.5 马赫; Super530D: 射程 40km, 速度小于 5 马赫
	意大利	Aspide 空空和地空导弹	1973	SAM: 25 公里 AAM: 40 公里
	中国	PL-11	2002 (测试)	射程 75km, 速度 4680km/h
	英国	“海镖” (Sea Dart) 防空导弹	1973	Mod 0: 40 海里; Mod 2: 80 海里
		“天空闪光” (Sky Flash) 空空导弹	1978	射程 45km, 速度小于 4 马赫
	以色列	“加百列” (Gabriel) 反舰导弹	1970	Mark I: 20 公里 (12 英里) Mark II: 6 - 36 公里 (3.7 - 22.4 英里)
主动雷达制导	美国	AIM-120 AMRAAM 空空和空地导弹	1991	射程 AIM-120C-5: 大于 105km, AIM-120D: 大于 180km; 速度 4 马赫
		AIM-54 (Phoenix) 空空导弹	1974	射程大于 100 海里; 速度 5 马赫 (C 型)、 4.3 马赫 (A 型)
		RIM-174 Standard ERAM 防空导弹 (SM-6)	2013	射程 130 海里; 速度 3.5 马赫
		AGM-114L (Hellfire) 空地导弹	1995	射程 8km
		“鱼叉” (Harpoon) 反舰导弹	1977	射程大于 124km (发射平台不同, 射程有差异); 速度 864km/h
	俄罗斯	R-37M 远程空空导弹	2019	射程 150-398km (R-37M); 速度 5-6 马赫

				赫 (R-37M)
		R-77 中程空空导弹	1994	射程 80km/110km (R-77-PD)
		R-27EA 中程空空导弹		射程大于 130km
		Kh-31 反舰导弹	1988	射程 7.5-70km (Kh-31A); 速度 2,160 - 2,520 公里/小时 (Kh-31A)
		Kh-15、Kh-59 空地导弹	1980 (Kh-15) 1991 (Kh-59)	Kh-15: 射程 300 公里, 速度 5 马赫 Kh-59ME: 射程 200 km
		Kh-35 反舰导弹	2003	射程 130km; 速度 0.8 马赫
		KSR-5、KSR-2、Kh-22 反舰导弹	1962 (Kh-22、 KSR-2)	Kh-22: 射程 600 公里, 速度 4.6 马赫 KSR-5: 射程 300-700 公里, 速度 3.5 马赫 KSR-2: 射程 200 公里
		S-400 防空导弹 (9M96E、9M96E2、40N6)	2007	9M96E: 射程 40km 9M96E2: 射程 120km 40N6: 射程 400km
		P-500 “玄武岩”、P-700 “花岗岩”、P-270 “白蛉”、P-800 “缟玛瑙” 反舰导弹	1975 (P-500) 1983 (P-700) 1984 (P-270) 2002 (P-800)	射程 550 公里 (P-500), 625 公里 (P-700), 800 公里 (P-800 Oniks-M)
	欧盟	“流星” (Meteor) 空空导弹	2014	射程大于 120km; 速度大于 4 马赫
		Aster 地对空导弹	2001	Aster15: 射程大于 30km, 速度 3 马赫 Aster30: 射程大于 120km, 速度 4.5 马赫 Aster30 block1 NT: 射程大于 150km
	法国	“飞鱼” (Exocet) 反舰导弹	1973	射程 70-180km; 速度 0.92 马赫
		“米卡” (MICA) 空空导弹	1996	射程 50km; 射高大于 11km
	德国	“鸬鹚” (Kormoran) 反舰导弹	1973	射程 23km
	印度	“阿斯特拉” (ASTRA) 空空导弹	2019	Astra Mk-1: 110 公里 (68 英里) Astra Mk-2: 160 公里 (99 英里) Astra Mk-3: 340 公里 (210 英里)
	以色列	“德比” (Derby) 空空导弹		射程 50km; 速度 4 马赫
	南非	R-Darter 空空导弹	1995	射程大于 80km
	瑞典	RBS-15 反舰导弹	1985	射程 250km; 速度高亚音速
	中国	PL-12	2005	射程 70-100km, 速度 4 马赫
		PL-15/PL-15E	2016	PL-15: 射程 200-300km, 速度 4.5 马赫 PL-15E: 射程 145km, 速度 4.5 马赫
	法国	Exocet 反舰导弹	1975	射程 40km (MM38) /70km (AM39) /50km (SM39)/200km (MM40 Block 3), 速度 0.93 马赫
	英国	CAMM 地对空导弹	2018 (Sea Ceptor) 2021 (Sky Sabre)	射程 25km (CAMM) /45km (CAMM-ER), 速度 3 马赫

被动雷达制导	美国	AGM-88 “哈姆” 反辐射导弹	1985	射程 150km；速度 2280km/h
	俄罗斯	Kh-31P	1988	射程大于 110km；速度 2160-2520km/h
		Kh-58	1982	Kh-58：射程 120km，速度 3.6 马赫 Kh-58U：射程 250km，速度 3.6 马赫 Kh-58E：46-200km，速度 3.6 马赫
	英国	ALARM	1990	射程 93km，速度 2445km/h

资料来源：《世界现役制导武器全解析》，维基百科，山西证券研究所

3.3 相控阵雷达导引头发展

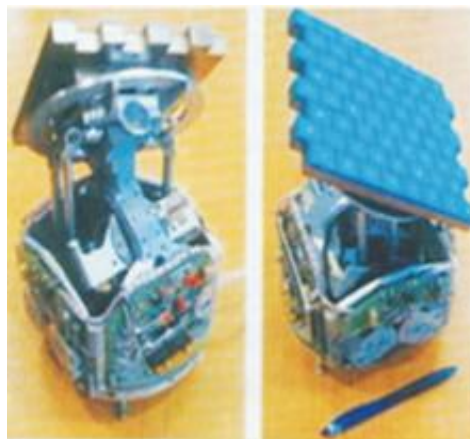
相控阵雷达导引头是雷达导引头的未来发展方向。20 世纪 90 年代以来，飞行器隐身技术的逐步普及及应用，重新定义了战场游戏规则，作为制衡隐身技术的主要技术途径，相控阵雷达技术开始被用于雷达导引头设计，2004 年雷神公司研制出第一个相控阵雷达导引头样机，近年来，相控阵雷达导引头相继在一些导弹型号中得到应用，日本新一代空空导弹 AAM-4B 是公开资料中第一个采用相控阵雷达导引头的导弹型号，2012 年正式装备部队，相比原始版本 AAM-4 机扫头探测威力提升 40%。2015 年俄罗斯披露了其新型 K-77M 空空导弹研发的有源相控阵雷达，是在原有机扫天线驱动平台上用 64 模块单元的有源相控阵天线替代平板缝隙阵天线，之所以选择这种机/电混扫模式，主要是因为俄罗斯的电子移相器的技术水平不高，传统移相器的体积和重量过大难以综合到 R-77 弹体中，这也部分程度上削弱了相控阵天线的性能优势。

图 24：日本 AAM-4B 空空导弹



资料来源：维基百科，山西证券研究所

图 25：俄罗斯 K-77M 相控阵导引头



资料来源：《相控阵雷达导引头技术现状及发展趋势》，山西证券研究所

表 16：有源相控阵雷达导引头战术特点说明

战术特点	说明
探测距离远	有源相控阵采用空间功率合成，可以得到比普通发射机更大的功率，所以有源相控阵导引头的探测距离远大于传统导引头。

抗干扰能力强	有源相控阵雷达导引头的电扫能力和方向图捷变能力决定了它比传统导引头抗干扰能力强。
抗地海杂波能力强	相控阵导引头可以采用工作中调整方向图形状、压低对地方向的副瓣的方法对抗地海杂波。
多种测角体制兼容	有源相控阵导引头具有电扫描和多波束接收的能力，可以根据不同要求灵活应用不同的测角方法进行工作。
体积小、可靠性高	相控阵雷达导引头采用电子扫描天线、数字稳定平台，无机电伺服系统，体积实现了小型化；每个辐射通道的射频部分各自独立，部分单元失效对系统性能的影响很小，因此可靠性较高。

资料来源：《相控阵雷达导引头综述》，山西证券研究所

相控阵雷达导引头具备相控阵雷达系统的特有优点，但是仍存在一些问题限制了相控阵雷达导引头的应用，主要问题在于导弹弹体空间太小，限制了雷达导引头天线的大小，而且在较小空间内集中较多的 T/R 组件，散热也会成为难题，不过随着以氮化镓（GaN）为代表的第三代半导体器件的应用、微波单片集成电路（MMIC，Monolithic Microwave Integrated Circuit）的应用、利用微电子机械系统（MEMS，Micro-Electro-Mechanical System）技术制作的数字移相器的实现以及新的微波多芯片组件技术（MMCM）的应用，研发小型化、低功耗的有源相控阵雷达导引头的时机已成熟。

4. 军用雷达电子产业链及相关标的

军用雷达电子产业链上游主要是通用性较强的原材料和电子元器件，兼容性好可针对不同的应用场景满足多种定制化需求，上游整体竞争比较充分，产品供应较为充裕，而中下游的大部分组件/模块、子系统和整机受制于技术门槛、军工资质及研发周期等影响和制约，行业壁垒较高，配套关系较为固定，主要由军工集团及其下属子公司和研究所进行配套，大型军工集团甚至在从事国防装备整机总成的同时，具备对核心微系统的整体设计与器件、组件设计生产能力，民企参与较少，整体上这类民企一般经营规模较小，市场相对单一，主要在某个细分领域中获得生存空间。

图 26：军用雷达产业链



资料来源：《面空导弹武器系统设备原理》、《相控阵雷达导引头技术现状及发展趋势》、山西证券研究所整理绘制

表 17：雷达产业相关上市公司梳理

产业链位置	领域	公司名称	公司代码	公司简介	主营业务	公司主要产品
整机		雷科防务	002413. SZ	主要业务包括雷达系统、智能控制、卫星及应用、安全存储、智能网联五大业务群	雷达系统、卫星应用	遥感观测雷达系列、区域监视雷达系列、安全监测雷达系列、雷达信号处理机
		国睿科技	600562. SH	主要业务包括雷达装备及相关系统、工业软件及数字化解决方案	雷达整机及子系统	多谱系的地面情报雷达、武器制导雷达、武器定位雷达以及靶场测控雷达、预警机雷达、战斗机雷达、直升机载雷达、空管一/二次雷达产品谱系、气象探测雷达装备产品等
		四创电子	600990. SH	重点聚焦气象雷达、空管雷	雷达及雷达配套	气象雷达、空管雷达、

				达、低空监视雷达、特种车辆改装、印制电路板、电源、微波器件、安防信息系统、应急人防、粮食信息系统等核心业务		低空监视雷达、新体制雷达、印制电路板、微波组件
子系统	相控阵微系统	雷电微力	301050.SZ	从事毫米波有源相控阵微系统研发、制造、测试和销售的高新技术企业，提供专用和通用的毫米波有源相控阵产品	精确制导相关的毫米波有源相控阵微系统和高频段毫米波前端	精确制导相关的毫米波有源相控阵微系统和高频段毫米波前端，星载毫米波有源相控阵微系统，机载数据链相控阵微系统
	发射机	天箭科技	002977.SZ	从事高波段、大功率固态微波前端的研发、生产和销售	弹载固态发射机	弹载固态发射机、新型相控阵天线及其他固态发射机产品
组件/模块	T/R 组件	国博电子	688375.SH	有源相控阵 T/R 组件和射频集成电路相关产品的研发、生产和销售	T/R 组件	有源相控阵 T/R 组件、砷化镓基站射频集成电路
	T/R 组件	盛路通信	002446.SZ	公司军工电子业务专注于精确制导、电子对抗微波混合集成电路领域	通信设备（基站天线、微波通信天线、终端天线）	基站天线、微波通信天线、终端天线、射频器件与设备、T/R 部件、组件及子系统
	微波电路及组件	亚光科技	300123.SZ	子公司亚光电子主要业务集中在军用微波电子元器件领域，从芯片一直到模块、组件、微系统和分系统	TR 组件、变频组件、接收组件等	TR 组件、变频组件、接收前端、频率源、特种艇、商务艇等
	模块电源	新雷能	300593.SZ	主要从事于高效率、高可靠性、高功率密度电源产品的研发、生产和销售	模块电源、定制电源	模块电源、定制电源、大功率电源及系统
	嵌入式计算机组件	智明达	688636.SH	主要从事面向军工领域的嵌入式计算机模块的开发工作	机载嵌入式计算机模块	机载、弹载、舰载嵌入式计算机模块
	嵌入式计算机组件	四川赛狄	872496.NQ	专注于数字化、信息化领域中基于高性能处理、高速数据采集、数字中频、图像处理、大容量存储等技术的开发研究、生产和销售	高速处理平台、图像存储及接口	高速处理平台系列（专注于雷达及通信等信号）、软件无线电系列、图像存储及接口系列、整机设备系列
元器件	射频芯片	铖昌科技	001270.SZ	主要从事微波毫米波模拟相控阵 T/R 芯片的研发、生产、销售和技术服务	主要用于星载领域的射频前端模块	放大器类芯片、幅相控制类芯片和无源类芯片
	射频芯片、电源管理芯	臻镭科技	688270.SH	专注于集成电路芯片和微波系统的研发、生产和销售，并围绕相关产品提供技术	射频收发芯片及高速高精度 ADC/DAC 芯片	终端射频前端芯片、射频收发芯片及高速高精度 ADC/DAC、电源

	片			服务		管理芯片、微系统及模组
	信号链及电源管理器	振华风光	688439.SH	专注于高可靠集成电路设计、封装、测试及销售，主要产品包括信号链及电源管理器等系列产品	信号链产品(其中以放大器为主)	信号链及电源管理器等产品
	微波器件	国光电气	688776.SH	专业从事真空及微波应用产品研发、生产和销售的高新技术企业	微波电真空器件	微波电真空器件、微波固态模块、核工业设备及部件
	FPGA	紫光国微	002049.SZ	专注于集成电路芯片设计开发领域，是目前国内领先的集成电路芯片设计和系统集成解决方案供应商	特种集成电路业务(涵盖微处理器、FPGA、存储器、网络及接口、模拟器件等几大系列产品)	智能安全芯片、高稳定存储器芯片、FPGA、半导体功率器件及超稳晶体频率器件
	FPGA	复旦微电	688385.SH	从事超大规模集成电路的设计、开发、测试，并为客户提供系统解决方案的专业公司	安全与识别芯片、非挥发性存储器	安全与识别芯片、非挥发存储器、智能电表芯片、FPGA 芯片

资料来源：Wind，山西证券研究所

5. 投资建议

全军大规模装备更新已经持续了多年，平台类装备中的新型作战飞机交付数量增速较大，持续性较强，新型导弹类装备受到需求提升和补库存双重利好。作为机载最关键航电设备的雷达，尤其有源相控阵雷达，以及导弹核心部件雷达导引头将直接受益，关于雷达电子产业链，我们重点推荐的标的是国博电子、新雷能和振华风光。

5.1 国博电子：相控阵 T/R 组件龙头

有源相控阵体制是雷达未来发展的主流方向，未来潜在市场空间较大。T/R 组件是有源相控阵天线的最关键部分，很大程度上决定了有源相控阵雷达的性能，在价值量上也占据了有源相控阵雷达成本的绝大部分。

国博电子整合中国电科五十五所资源，主要客户均为国内军工集团，除整机用户内部配套外，是国内面向各军工集团销量最大的有源相控阵 T/R 组件研发生产平台，为各型装备配套研制了数百款有源相控阵 T/R 组件，其中定型或技术水平达到固定状态产品数十项，产品广泛应用于弹载、机载等领域，具备技术和市场优势，标的稀缺性强。

风险提示：新型雷达电子装备和导弹列装需求不及预期；募投项目进展不及预期。

5.2 新雷能：特种电源领先者

电源是一切电子设备的核心，尤其雷达与导弹工作于特种应用环境，对电源产品在极端工作温度、剧烈冲击/加速度、低气压等严酷环境下的性能要求很高，另外各种部件用电需求差异性高，对于安全性和可靠性要求高，定制化水平高。

新雷能在导弹电源、雷达电源、航天产品电源领域具有核心技术优势，在新型重点型号战术、战略导弹及雷达、电子设备电源产品领域占比较高。这些总体类产品已经完成了小批量生产进入大批量生产时期，全军为实现新时期使命任务对此类产品需求增长较大，该类产品业绩进入高速成长期。公司拟增发股票募集资金扩大航空航天类等特种电源产能，建设 SiP 功率微系统产业化项目，以满足持续扩大的客户需求，预计 2024 年建成。这将进一步提升公司研发生产能力，提供高速持续业绩成长。

风险提示：导弹行业增长及全军采购进度可能低于预期，导致公司业绩低于预期。

5.3 振华风光：深耕军用模拟集成电路市场

模拟集成电路居于雷达电子产业链上游，相比数字集成电路具有技术壁垒高、应用领域广、产品使用周期长的特点，我国模拟集成电路主要产品的高端化水平和国产化率普遍不高，产业链自主安全需求迫切，军用装备对芯片自主安全的需求尤为突出，对高性能集成电路芯片进口替代的需求也不断增强。

振华风光拥有 50 年集成电路研制生产史，主要产品包括信号链及电源管理器等高可靠模拟集成电路产品，产品主要应用于航空、航天、兵器、船舶、电子、核工业等相关军用领域。公司是推动高可靠放大器产品国产化的核心承制单位，是国内高可靠放大器产品谱系覆盖最全的厂家之一。受国家战略下的装备数量和性能提升以及国产化替代需求的影响，下游采购量和采购类别快速增长需求旺盛，有望带动公司相关产品的销售规模持续快速增长。公司募集资金建设 6 英寸晶圆制造线，转型 IDM 经营模式，实现设计、制造、封测等环节协同优化，充分释放芯片设计能力，突破生产交付瓶颈，市场竞争力有望持续增强。

风险提示：下游需求增长不及预期；募投项目进展不及预期。

表 18：重点推荐公司盈利预测及估值

证券代码	证券名称	收盘价		EPS				PE			投资评级
		2022/10/19	2021A	2022E	2023E	2024E	2021A	2022E	2023E	2024E	
300593.SZ	新雷能	48.65	0.73	1.03	1.58	2.73	66.64	47.23	30.79	17.82	买入-A
688375.SH	国博电子	104.1	0.92	1.36	1.81	2.41	113.15	76.54	57.51	43.20	增持-A
688439.SH	振华风光	127.88	0.88	1.41	2.11	3.42	145.32	90.70	60.61	37.39	增持-A

资料来源：Wind，山西证券研究所

6. 风险提示

- （1）相控阵雷达更新换代速度不及预期。
- （2）行业客户集中度较高，客户需求变化会造成公司业绩较大波动。
- （3）军工企业业绩成长可能受到来自军方、产业链等多方面影响，虽然涉及军队自身的体制性改革已经完成，但若有涉及到采购、接装等部门的突发性事件影响，则可能导致企业业绩低于预期。
- （4）相关政策的落地进度，可能受到军工集团人事调整、上层改革推进意愿、尤其是事业单位转企可能受到来自财政等多方面影响，这些因素可能导致政策的落地进度不达预期。

分析师承诺：

本人已在中国证券业协会登记为证券分析师，本人承诺，以勤勉的职业态度，独立、客观地出具本报告。本报告清晰准确地反映本人的研究观点。本人不曾因，不因，也将不会因本报告中的具体推荐意见或观点直接或间接受到任何形式的补偿。本人承诺不利用自己的身份、地位或执业过程中所掌握的信息为自己或他人谋取私利。

投资评级的说明：

以报告发布日后的 6--12 个月内公司股价（或行业指数）相对同期基准指数的涨跌幅为基准。其中：A 股以沪深 300 指数为基准；新三板以三板成指或三板做市指数为基准；港股以恒生指数为基准；美股以纳斯达克综合指数或标普 500 指数为基准。

无评级：因无法获取必要的资料，或者公司面临无法预见的结果的重大不确定事件，或者其他原因，致使无法给出明确的投资评级。（新股覆盖、新三板覆盖报告及转债报告默认无评级）

评级体系：**——公司评级**

- 买入： 预计涨幅领先相对基准指数 15%以上；
- 增持： 预计涨幅领先相对基准指数介于 5%-15%之间；
- 中性： 预计涨幅领先相对基准指数介于-5%-5%之间；
- 减持： 预计涨幅落后相对基准指数介于-5%- -15%之间；
- 卖出： 预计涨幅落后相对基准指数-15%以上。

——行业评级

- 领先大市： 预计涨幅超越相对基准指数 10%以上；
- 同步大市： 预计涨幅相对基准指数介于-10%-10%之间；
- 落后大市： 预计涨幅落后相对基准指数-10%以上。

——风险评级

- A： 预计波动率小于等于相对基准指数；
- B： 预计波动率大于相对基准指数。

免责声明：

山西证券股份有限公司(以下简称“公司”)具备证券投资咨询业务资格。本报告是基于公司认为可靠的已公开信息，但公司不保证该等信息的准确性和完整性。入市有风险，投资需谨慎。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议。在任何情况下，公司不对任何人因使用本报告中的任何内容引致的损失负任何责任。本报告所载的资料、意见及推测仅反映发布当日的判断。在不同时期，公司可发出与本报告所载资料、意见及推测不一致的报告。公司或其关联机构在法律许可的情况下可能持有或交易本报告中提到的上市公司发行的证券或投资标的，还可能为或争取为这些公司提供投资银行或财务顾问服务。客户应当考虑到公司可能存在可能影响本报告客观性的利益冲突。公司在知晓范围内履行披露义务。本报告版权归公司所有。公司对本报告保留一切权利。未经公司事先书面授权，本报告的任何部分均不得以任何方式制作任何形式的拷贝、复印件或复制品，或再次分发给任何其他人，或以任何侵犯公司版权的其他方式使用。否则，公司将保留随时追究其法律责任的权利。

依据《发布证券研究报告执业规范》规定特此声明，禁止公司员工将公司证券研究报告私自提供给未经公司授权的任何媒体或机构；禁止任何媒体或机构未经授权私自刊载或转发公司证券研究报告。刊载或转发公司证券研究报告的授权必须通过签署协议约定，且明确由被授权机构承担相关刊载或者转发责任。

依据《发布证券研究报告执业规范》规定特此提示公司证券研究业务客户不得将公司证券研究报告转发给他人，提示公司证券研究业务客户及公众投资者慎重使用公众媒体刊载的证券研究报告。

依据《证券期货经营机构及其工作人员廉洁从业规定》和《证券经营机构及其工作人员廉洁从业实施细则》规定特此告知公司证券研究业务客户遵守廉洁从业规定。

山西证券研究所：**上海**

上海市浦东新区杨高南路 799 号陆家嘴
世纪金融广场 3 号楼 802 室

太原

太原市府西街 69 号国贸中心 A 座 28 层
电话：0351-8686981
<http://www.i618.com.cn>

深圳

广东省深圳市福田区林创路新一代产业
园 5 栋 17 层

北京

北京市西城区平安里西大街 28 号中海
国际中心七层
电话：010-83496336

