



中航证券金融研究所  
首席分析师：李欣  
证券执业证书号：S0640515070001  
研究助理：王宏涛  
证券执业证书号：S0640118100010  
电话：010-59262519  
邮箱：wanght@avicsec.com  
研究助理：宋博  
证券执业证书号：S0640118080024  
电话：010-59562534  
邮箱：songbo@avicsec.com

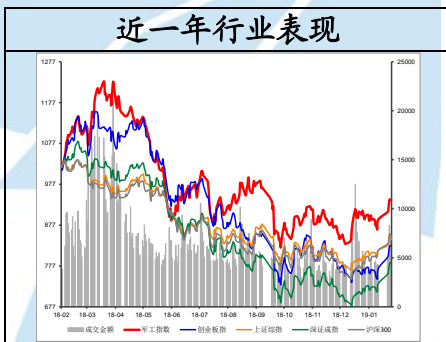
## 军工行业深度报告： 电子探测系统——信息时代的“火眼金睛”

行业分类：国防军工

2019年02月14日

行业投资评级	增持
中航军工指数	940.15
年初至今涨跌幅	13.07%
基础数据	
上证指数	9.05%
深证成指	13.54%
沪深300	13.00%
创业板指	8.91%
PE	56.39
PB	2.27

数据截止 2019年2月14日



### ➤ 投资要点

- **世界已经步入了信息化时代，以雷达为代表的电子探测系统在军用或民用领域应用广泛。**电子探测系统是以雷达为代表的探测设备以及伴随雷达应用产生的电子对抗技术的统称。在信息化时代，作战需求、民用需求一直驱动着电子探测系统的发展，因此电子探测系统在军民领域都有着巨大的发展前景以及广阔的市场空间。
- **未来战争环境的多样化、恶劣化和电子信息化，军事强国对下一代雷达的整体工作性能和可靠性提出更高要求。**全球电子探测系统技术先进国家的产业政策、报告以及研究动向表明各国雷达技术的关注重点涉及了功能多样化、低成本、高性能和高可靠性的雷达；下一代的数字雷达；软件化雷达和智能化雷达；雷达芯片的材料、性能以及芯片在电子对抗的应用；在电子对抗技术方面，关注集中在雷达对抗领域，主要涉及到雷达与电子对抗装备综合一体化集成技术。
- **聚焦电子探测系统产业链核心部件技术发展趋势，细分领域有望成为投资重点。**通过聚焦于对电子探测系统产业链上核心部件技术发展趋势，可以预计在信息化时代，数字/一体化设计；全数字化及多功能宽带 T/R 组件；小型化、高性能、低成本及可靠性强的 DSP 芯片；FPGA 芯片及氮化镓等先进芯片材料技术；多功能一体化天线阵面；高强度、低重量以及具有隐身性的特种材料；大功率、高可靠性、小体积质量的特种电源；高效率的后数据处理系统以及雷达软件化相关技术等领域将成为电子探测系统产业的发展重心，在产业投资中值得重点关注。
- **风险提示：**电子探测系统核心组件技术发展不及预期；市场规模增长不及预期。

股市有风险 入市须谨慎

中航证券金融研究所发布

证券研究报告

请务必阅读正文后的免责条款部分

联系地址：深圳市深南大道3024号航空大厦29楼  
公司网址：www.avicsec.com  
联系电话：0755-83692635  
传真：0755-83688539

## 目 录

(一) 电子探测系统的发展历程 .....	4
1.1、电子探测系统定义及作用 .....	4
1.2、电子探测系统的历史回顾 .....	8
(二) 电子探测系统的需求特点、技术原理及发展方向 .....	12
2.1、技术体制分类 .....	12
2.2、工作频段分类 .....	17
2.3、总体发展方向 .....	22
(三) 海外电子探测系统发展趋势 .....	23
(四) 电子探测系统产业链 .....	25
(五) 电子探测系统行业投资热点 .....	31
(六) 风险提示 .....	36



AVIC



## 图表目录

图表 1: 雷达基本工作原理示意图 .....	4
图表 2: 常见雷达分类方式 .....	5
图表 3: 无线电通信对抗分类及工作原理 .....	6
图表 4: 光电对抗的分类及工作原理 .....	7
图表 5: 雷达侦察分类及主要设备 .....	7
图表 6: 雷达有源干扰原理示意图 .....	8
图表 7: 电子对抗的作用 .....	8
图表 8: 电子探测系统发展历程图 .....	9
图表 9: E-8 型战场联合监视机 .....	11
图表 10: E-8 传输的侦察图像 .....	11
图表 11: 合成孔径雷达成像卫星“长曲棍球” .....	11
图表 12: 脉冲多普勒雷达 .....	13
图表 13: 合成孔径雷达 .....	14
图表 14: 相控阵雷达 .....	15
图表 15: 相控阵雷达工作原理 .....	15
图表 16: 相控阵电子探测系统抗干扰措施及主要作用 .....	16
图表 17: 超视距雷达 .....	17
图表 18: F-22 猛禽战斗机 .....	18
图表 19: F-35 闪电 II 战斗机 .....	18
图表 20: 米波雷达 .....	19
图表 21: 毫米波雷达 .....	20
图表 22: 激光雷达 .....	21
图表 23: 美国雷达及电子对抗项目的主要内容及承包商 .....	23
图表 24: 电子战使命 .....	24
图表 25: 电子探测系统核心产业链 .....	25
图表 26: T/R 组件结构原理图 .....	27
图表 27: DSP 芯片 .....	28
图表 28: FPGA 芯片 .....	29
图表 29: 雷达软件化技术内涵 .....	31
图表 30: 雷达数字化设计发展方向及意义 .....	32
图表 31: T/R 组件技术状况与未来发展方向 .....	33
图表 32: 半导体材料的发展 .....	34

## （一）电子探测系统的发展历程

当今世界已经步入了信息化时代，无论是在军用或民用领域，电子探测系统已经走进了人们的生活。在军用上，多种形式的军用电子探测系统已经成为了当代信息化战争中主要的战场信息获取以及制电磁权争夺的技术手段。在民用上，电子探测系统也广泛应用于汽车防撞系统、船只导航、气象探测、通信抗噪等领域。作为信息时代中不可或缺的“火眼金睛”，电子探测系统技术的高低直接可以用于衡量一个国家的电子信息技术水平，对国防以及民生都有着重要的意义。

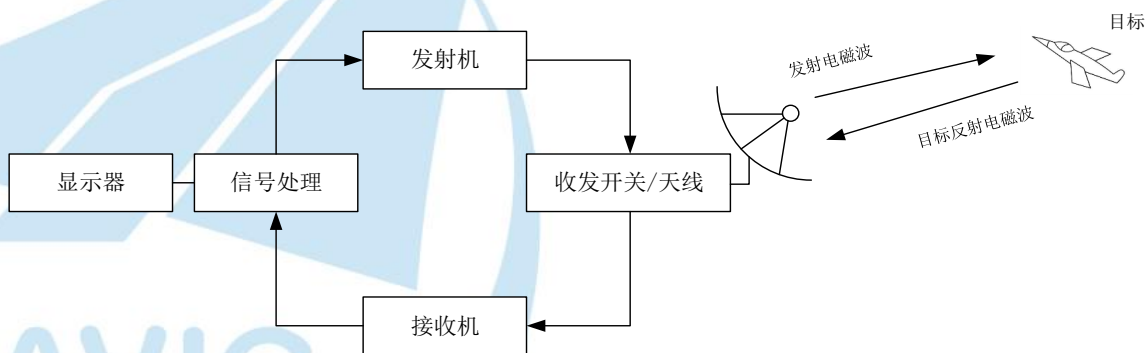
### 1.1、电子探测系统定义及作用

电子探测系统是包含以雷达为代表的探测设备以及伴随雷达应用产生的电子对抗技术的统称。

#### 雷达

雷达，是通过发射电磁波信号，接收来自其威力覆盖范围内目标的回波，并从回波信号中提取位置和其他信息，以用来探测、定位和有时进行目标识别的电子装备，是电子探测系统的主要构成。

图表 1: 雷达基本工作原理示意图



资料来源：华强电子网，中航证券金融研究所

如上图所示，尽管各种雷达的具体用途和结构不尽相同，但基本形式是一致的，包括：发射机、发射天线、接收机、接收天线，处理部分以及显示器。另外还有电源设备、数据录取设备、抗干扰设备等辅助设备。各部件具体功能及工作原理包括：发射机产生大功率高频振荡脉冲；具有方向性的天线，将这种高频振荡转变成束状的电磁波（简称波束），以光速在空间传播；电磁波在传播过程中遇到目标时，目标将受到激励产生二次辐射，而二次辐射中的小部分电磁波（即回波信号）会返回雷达，为天线所收集并传至接收机；接收机再将回波信号放大和变换后，送到显示器上显示，从而揭示目标的存在。

目标的距离是根据电磁波从雷达传播到目标所需要的时间（即回波信号到达时间的一半）和电磁波传

播速度（即光速）相乘而得的；目标的方位角和仰角是利用天线波束的指向特性测定的；根据目标距离和仰角，可测定目标的高度；当目标与雷达之间存在相对运动时，雷达接收到目标回波的频率就会产生变化。这种频移称为多普勒频移，它的数值与目标运动速度的径向分量成正比，据此可测定目标的径向速度。

雷达的种类繁多，按照雷达的用途分类就可分为预警雷达、搜索警戒雷达、引导指挥雷达、炮瞄雷达、测高雷达、战场监视雷达、机载雷达、无线电测高雷达、雷达引信、气象雷达、航行管制雷达、导航雷达以及防撞和敌我识别雷达等。除去按照用途分类，其他常见的具体分类方式及内容可见下图表。

图表 2：常见雷达分类方式

分类依据	雷达种类
工作体制	脉冲多普勒雷达、合成孔径雷达、相控阵雷达、天/地波超视距雷达、圆锥扫描雷达、单脉冲雷达、动目标显示 (MTI) 雷达、逆合成孔径雷达、MIMO 雷达、噪声雷达、频率/极化分集雷达、双(多)基地雷达、无源雷达等。
工作频段	米波雷达、毫米波雷达、太赫兹雷达、激光雷达、L 波段雷达、S 波段雷达、X 波段雷达、Ku 波段雷达等。
雷达信号形式	脉冲雷达、连续波雷达、线调频雷达、步进频雷达、编码雷达等。
角跟踪方式	单脉冲雷达、圆锥扫描雷达和隐蔽圆锥扫描雷达等。
目标测量的参数	测速雷达、两坐标雷达、三坐标雷达、测高雷达、制导雷达等。
雷达采用的技术和信号处理方式	相参积累和非相参积累、动目标显示、动目标检测、脉冲多普勒雷达、合成孔径雷达、边扫描边跟踪雷达。
天线扫描方式	机械扫描雷达、相控阵雷达（相位控制电子扫描阵列雷达）。
搭载平台	地面雷达、机载雷达、舰载雷达、天基雷达、航天器雷达、弹载雷达、无人机雷达、车载雷达等。

资料来源：王小谟，张光义，《雷达与探测 信息化战争的火眼金睛》，中国产业信息网，中航证券金融研究所

雷达在白天黑夜均能探测远距离目标，且不受雾、云和雨的阻挡，具有全天候、全天时的特点，以及拥有一定的穿透能力，因此其功能在军事和民用上都具有重大的意义。

在军事领域，雷达具有三个重要意义，一是雷达具有检测目标是否存在，确定目标距离等参数的功能，如在现代战争中，军事雷达可以准确高效地探测敌方环境、军事装备等；二是军事雷达可以安装在飞机、军舰、导弹、航天飞船上，作战平台驾驶员依靠雷达增加了有效摧毁敌方目标的几率；三是雷达具备测量先进武器的性能，对先进武器的研发有一定作用。

在民用领域，雷达可以广泛应用于社会经济发展（气象预报、资源探测、环境监测等）和科学研究（天体研究、大气物理、电离层结构研究等）中。

### 电子对抗

在电子探测系统中，电子对抗是伴随雷达等探测目标信息的设备发展而诞生的技术，是敌对双方为削弱、破坏对方电子设备的使用效能、保障己方电子设备发挥效能而采取的各种电子措施和行动。

电子对抗的实质是敌我双方为争夺电磁频谱的控制权（制电磁权）所展开的斗争。制电磁权，如同



制空权、制海权，是指在一定的时空范围内对电磁频谱的控制权。夺取了制电磁权就意味着己方能自由使用电磁频谱，不受对方的电磁威胁，并剥夺了对方自由使用电磁频谱的权利。制电磁权有时空性，在总体上处于相对劣势的一方，并不是一筹莫展，若科学指挥，合理集中力量，就能在某一地域或地域内，夺取局部的制电磁权。

电子对抗的基本手段主要包含“侦察与反侦察、干扰与反干扰、摧毁与反摧毁”，而具体的对抗手段按电子设备的类型主要可分为**无线电通信对抗、光电对抗和雷达对抗**三大类。进入 21 世纪以后，军队的电子化程度迅速提高，电子对抗作为直接用于攻防的作战手段，形成了“陆、海、空、天、电”多维立体战，相比于无线电通信对抗以及光电对抗，**雷达对抗目前在电子对抗中占据当代核心地位。**

### (1) 无线电通信对抗

日俄战争被认为是第一次敌对双方都使用无线电进行通信联络的战争，最早的无线电通信对抗是无线电收、发信机件的单一通信对抗。无线电通信对抗是电子对抗的一部分，指敌对双方利用普通的无线电通信设备及专门的通信对抗设备，在无线电通信领域内进行的电磁斗争。其目的在于截获敌方无线电通信情报，阻碍或削弱敌方无线电通信，保障己方无线电通信设备有效地工作。无线电通信对抗主要可以分为两种：**无线电通信反侦察和无线电通信干扰对抗。**

图表 3: 无线电通信对抗分类及工作原理

无线电通信对抗	无线电通信反侦察	一是使用异常通信手段，或其它通信手段，向更高或更低的频率发展，使敌方无法侦收或改变频段进行通信。二是采用保密通信设备或进行无线电台伪装，实施佯动和欺骗。
	无线电通信干扰对抗	按干扰性质的不同可分为压制性干扰和欺骗性干扰。压制性干扰用专门的干扰发射机发射的杂乱干扰，使受干扰的设备所收到的真实信号模糊不清或完全“淹没”在干扰之中；欺骗性干扰用发射机发出假的电文或模拟敌方的无线电通信信号，以欺骗敌方，使其真假难辨，从而做出错误的判断和行动。

资料来源：百度百科，中航证券金融研究所

### (2) 光电对抗

光电对抗是指利用光电对抗装备，对敌方光电观瞄器材和光电制导武器进行侦察、干扰或摧毁，以削弱或破坏其作战效能，同时保护己方光电器材和武器的有效使用。光电对抗是现代电子战的一个分支，在未来战争中占有重要的地位。光电对抗包括可见光、激光、红外三个对抗领域。具体可以分为**光电侦察和光电干扰**。

光电侦察具体可分为**光电主动侦察、光电被动侦察、激光侦察**。光电干扰具体可分为**有源干扰、无源干扰、红外干扰**。

图表 4: 光电对抗的分类及工作原理

光电对抗	光电侦察	光电主动侦察	利用被侦察的光电设备光学系统的逆反射特性进行侦察。向对方发射辐射能，不同的光学系统对其反射的特性各异，根据逆反射特性便可侦测出对方光电设备的类型和性能。采用滤光探照灯进行搜索、捕获来自对方士兵的铜制品、吉普车的挡风玻璃或被动夜视设备（如双筒望远镜、步枪瞄准镜或照相机）的反射光。
		光电被动侦察	利用探测器接收对方的光波辐射。例如，直接截获对方光电设备发射的主波束或旁瓣波束；利用目标或其他物体对光波的散射效应，截获对方光电设备的辐射；利用大气对光波的散射效应，截获对方光电设备的辐射。
		激光侦察	将接收的激光信号变化变成电信号，并通过不同的信息处理方法来获取不同的信息并实现探测目的。激光探测技术按工作方式可分为直接探测和外差探测，按探测器结构可分为单元探测和多元阵列探测。
	光电干扰	有源干扰	利用光电设备和器材，发射高能脉冲激光束，使对方光电设备的传感器变盲、阻塞、甚至烧毁；发射各种红外、激光诱饵，诱骗对方光电跟踪系统。
		无源干扰	利用本身并不产生光频辐射的干扰物，反射或吸收对方光波的一种干扰方法。无源干扰技术的效果好，方法简单，技术上容易实现。
		红外干扰	通过辐射、散射或吸收红外光，或改变目标的红外辐射特性，扰乱或破坏敌方的红外光电设备使用效能。

资料来源：百度百科，中航证券金融研究所

### (3) 雷达对抗

雷达对抗是指采用专门的电子设备和器材对敌方雷达进行侦察和干扰的电子雷达技术。主要包括**雷达侦察与雷达干扰**，主要目的是获取敌方雷达的战术与技术情报，并采取相应的措施干扰敌方雷达的正常工作，减弱敌方雷达的作战效能。

雷达侦察是雷达对抗的基础与前提，即使用雷达侦察设备接收敌方的雷达发射的信号，通过分析、识别、测向和定位获取战术技术情报并为雷达干扰奠定基础。从作战目的上看，雷达侦察可细分为**雷达情报侦察与雷达对抗支援侦察**。

图表 5: 雷达侦察分类及主要设备

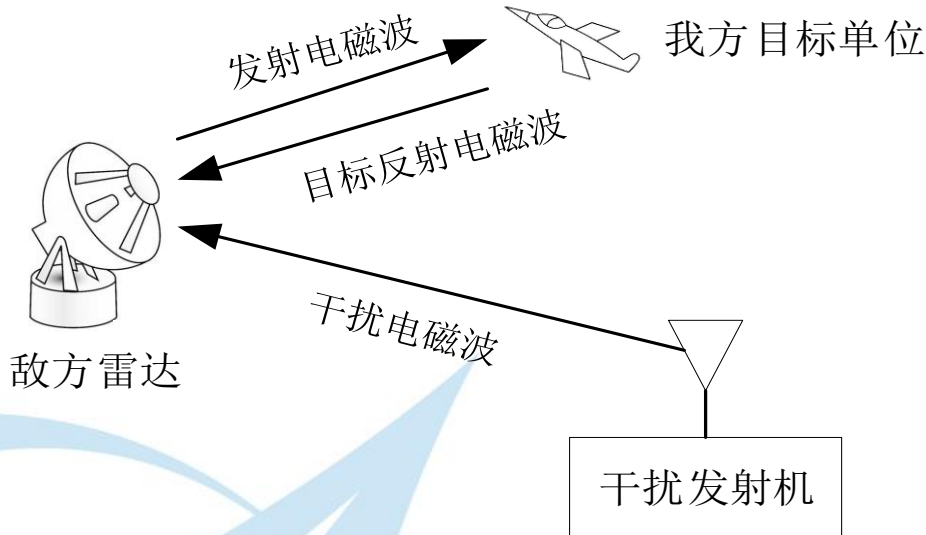
雷达侦察分类	作战目的	主要设备
<b>雷达情报侦察</b>	获取敌方雷达特征参数、性能参数、类型、用途及其对应的武器系统等战术情报，主要用于制定作战计划、研究雷达对抗技术及施行雷达干扰。	天线、伺服控制器、接收机、信号分选、处理器、显示记录设备等。
<b>雷达对抗支援侦察</b>	战时快速识别敌方雷达信号并分析判断敌方雷达威胁性质，为作战指挥实施雷达预警、战术机动、引导干扰及指引杀伤武器等战术行动提供依据。	

资料来源：王小漠，张光义，《雷达与探测 信息化战争的火眼金睛》，中航证券金融研究所

根据干扰信号的产生机理，雷达干扰可分为**无源干扰**和**有源干扰**两类，无源干扰主要是利用干扰器材对雷达电磁波的强散射或吸收衰减特性产生对敌方雷达的电磁波干扰或改变目标回波的效果。主要设备包含箔条（干扰丝）、各种角反射器、假目标和雷达诱饵、反雷达涂层等。

有源干扰的工作原理较为复杂，它通过干扰发射机制造干扰电磁波，使其与我方目标单位反射的电磁波同时进入敌方雷达接收机，以干扰敌方雷达的工作，让其无法对我方目标进行有效的检测与跟踪，主要设备包含天线、侦察接收机、干扰发射机和控制部分。

图表 6: 雷达有源干扰原理示意图



资料来源: 戴幻尧, 刘勇, 黄振宇, 张杨. 《极化雷达导引头对多路径干扰的检测识别新方法》, 中航证券金融研究所

综上，电子对抗在当今信息化战争中具有重要的作用。

图表 7: 电子对抗的作用

作用分类	具体内容
获取军事情报	通过电子侦察，可以获取敌方无线电通信的内容，查明敌方电子设备的有关技术参数以及兵器属性、类别、数量和配置位置等情报，从而可以判断敌军兵力部署和行动企图。
破坏敌方作战指挥	在陆、海、空军协同作战、坦克集群突防、飞机或舰艇编队行动、空降作战、海上登陆作战以及军队被围时无线电通信是唯一的通信手段。有交地干扰、欺骗或摧毁敌人的无线电通信设备，可使其联络中断、指挥瘫痪，严重削弱敌军战斗力。
保卫重要目标	在机场、桥梁、指挥所等重要目标附近部署雷达干扰设备，干扰敌轰炸机轰炸瞄准雷达，可以使其导弹失控。使用伪装器材对重要目标进行伪装，可以减少被敌人打击摧毁的机会。
保护己方电子设备正常工作	对敌方电子设备和系统，采取多种行之有效的反侦察、反干扰、反摧毁等防御措施，对于保障作战任务的顺利完成具有重要意义。

资料来源: 百度百科, 中航证券金融研究所

## 1.2、电子探测系统的历史回顾

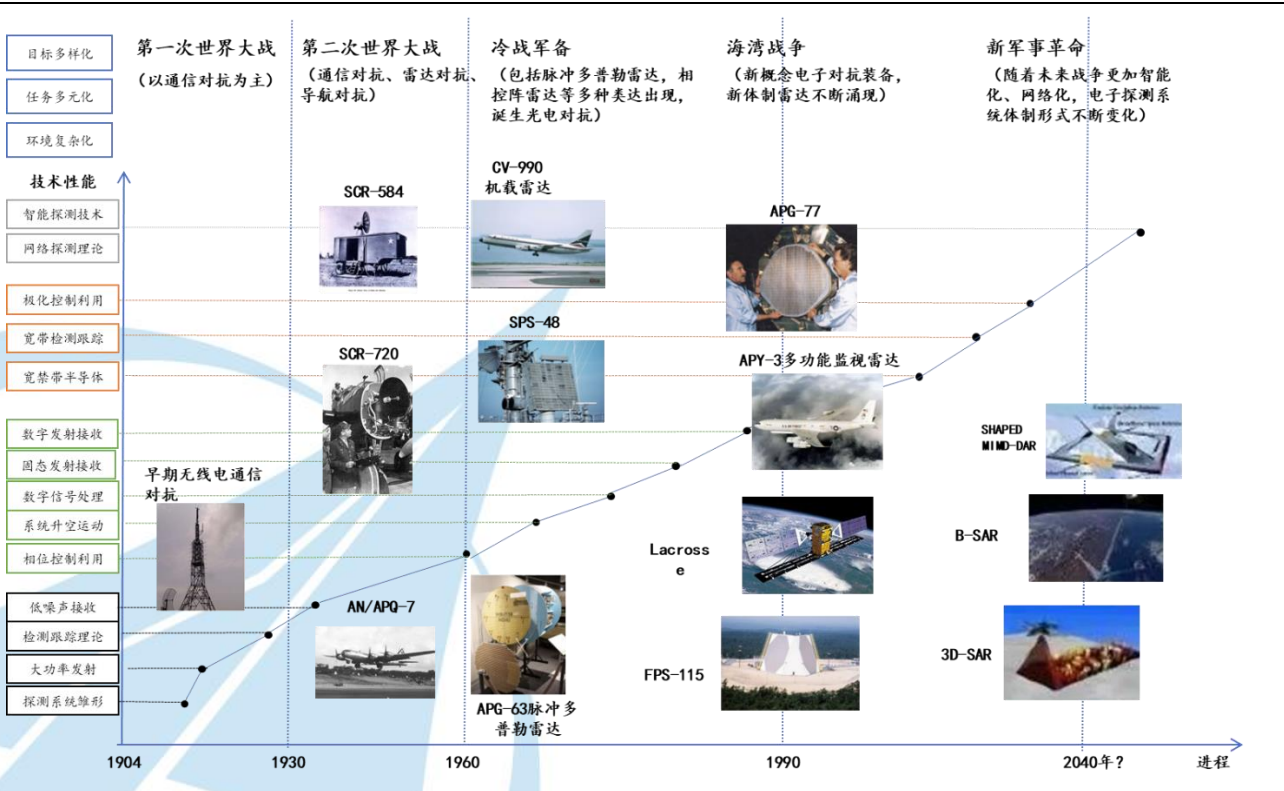
在电子探测系统中，电子对抗技术是伴随雷达等电磁波通信探测设备的应用而产生的。雷达的发展促进了电子对抗技术的进步，而先进的电子对抗技术又敦促了雷达进行创新，因此雷达与电子对抗技术的发



展历程是相辅相成，密不可分的。

电子探测系统起源于1864年，由英国科学家麦克斯韦在总结前人研究电磁现象的基础上，建立了完整的电磁波理论；1887年德国科学家赫兹用实验证明了电磁波的存在；1893年，美籍塞尔维亚裔科学家尼古拉·特斯拉在美国首次公开展示了无线电通信；1904年战争中首次出现了针对无线电通信的无线电通信对抗；综合来看，电子探测系统的发展大致可以归纳为四个重大时段。

图表8：电子探测系统发展历程图



资料来源：王小漠，张光义，《雷达与探测 信息化战争的火眼金睛》，中航证券金融研究所

### 20 世纪初~20 世纪 30 年代：以通信对抗为主

1904 年的日俄战争，被认为是敌对双方都使用了无线电进行通信联络的战争，处于劣势的俄军在战争中通过火花发射机干扰了日军射击校准信号，成功躲避日军袭击，这是电子探测系统首次登上了历史舞台。这一时期所使用的电子探测系统仅局限于针对电话、电报等通信设备的通信干扰、通信欺骗等比较简单的技术，主要是以“通信对抗”的形式出现。

20 世纪 30~50 年代末：脉冲调制雷达，微波雷达，通信对抗（无线电测向干扰设备），雷达对抗（雷达侦察设备，有源雷达干扰设备，无缘箔条干扰器材，电子侦察机），导航对抗等

30 年代初，欧美一些国家开始研制探测飞机的脉冲调制雷达；1936 年，美国研制出作用距离达 40km、分辨力为 457m 的探测空中目标的脉冲雷达；1938 年英国在临近法国的本土海岸线上布设了一条观测敌方

飞机的早期报警雷达链；在第二次世界大战中，由于作战需要，电子探测系统中的雷达技术发展极为迅速，使用频段从几十兆赫提高到 500MHz 以上，大幅提高了雷达搜索和引导飞机的精度，1939 年，英国发明了 3000MHz 的功率磁控管，并将其应用在地面及飞机上装备的微波雷达上；二战后期，美国 MIT 致力于发展微波雷达，把磁控管的频率提高到 10GHz，实现了机载雷达小型化并提高了测量精度，设计制造了包括 SCR-584 炮瞄雷达、SCR-720 飞机截击雷达、AN/APQ-7 轰炸雷达等在内的 150 种雷达系统。由于制空权成为了二战中作战胜负的关键，雷达也就成为了作战飞机、舰艇的重大威胁，英美苏德等国也均投入大量的人力、物力和财力到电子探测系统中的雷达对抗技术，许多国家还组建了电子对抗专业部队。

**20 世纪 60~80 年代末：脉冲多普勒雷达，相控阵雷达，合成孔径雷达，反辐射导弹，预警机，电子战飞机，光电对抗等**

为探测洲际弹道导弹，出现了相控阵列雷达，同时伴随半导体元件、大规模和超大规模集成电路的应用，雷达信号和数据处理的数字化革命完善了雷达自动检测与跟踪技术。美国林肯实验室研制了动目标检测系统，吉尔福兰分公司的 AN/SPS-48 系列 S 波段频扫体制三坐标对空搜索雷达的诞生标志着大型电扫相控阵天线和数字处理技术正式应用在雷达系统上。数字处理则开始应用于合成孔径雷达，实现了实时机载地图成像，高分辨力合成孔径雷达也开始移植到民用，并进入空间飞行器，可以提供大量的地理、海洋和地质状态信息。

与此同时，对电子探测系统中电子对抗技术的忽视使美国空军在越战初期遭受到惨重的损失，美国重新把电子对抗装备的研制和生产放在首要位置。美军首先装备了两种雷达告警接收机，同时在飞机上加装干扰吊舱进行编队飞行，之后又研制出 AGM-54 “百舌鸟”反雷达导弹，并在战争中得到应用。针对萨姆-7 红外导弹的弱点，美军还在战争中首次运用光电对抗手段，研制了红外告警和干扰机、预警机、箔条/红外弹以及烟幕等光电对抗装备。

**20 世纪 90 年代以来：新概念电子对抗装备，新体制雷达等**

在这个时间阶段，由于军事技术领先的国家开始执行以信息为主导地向对手要害地带实施精准打击的战争打法，电子探测系统出现了巨大的战场应用空间。美军在第一次海湾战争中，首次应用了安装在 E-8 型飞机上的空军/陆军联合监视目标供给雷达系统（JSTARS）。该系统所用雷达是 AN/APY-3 型，具有合成孔径成像/地面动目标显示功能，X 频段的相控阵雷达，像素分辨率  $3.7\text{m} \times 3.7\text{m}$ ，载机飞行于 9150m-12200m 高空时，覆盖面积可达  $50000\text{km}^2/\text{min}$ 。

图表 9: E-8 型战场联合监视机



图片来源: 航空博物馆, 中航证券金融研究所

图表 10: E-8 传输的侦察图像



图片来源: 王小谟, 张光义.《雷达与探测 信息化战争的火眼金睛》, 中航证券金融研究所

同时, 电子探测系统中电子对抗技术的快速发展也在海湾战争中得以体现, 以美国为首的多国部队对伊拉克实施了“全空域、全时域、全频域”的电子对抗。此后发生的科索沃战争更是一场完全的信息化战争, 是美国及其北约盟国实验新概念电子攻击武器的战场。北约部队使用了**有源与无源干扰、压制与欺骗干扰、雷达与通信干扰、“软杀伤”与“硬摧毁”**, 相互补充的电子对抗手段。这一时期也出现了隐身飞机、精确制导炸弹和新概念电子攻击武器等电子对抗装备, 电子对抗和火力打击一体化以及计算机网络攻击等手段的运用, 使得电子对抗的作战应用实际上已经进入了系统对抗阶段, 非但是不可或缺的作战力量之一, 而且已经成为一种威慑力量。

图表 11: 合成孔径雷达成像卫星“长曲棍球”



图片来源: 搜狐军事, 中航证券金融研究所



20 世纪末期，高技术常规战争对电子对抗技术的要求不断提高，雷达系统的重要性也开始突显，1988 年到 1991 年美国先后发射了合成孔径雷达成像卫星“长曲棍球 I”和“长曲棍球 II”，该卫星上的合成孔径雷达工作于 L 和 X 两个频段，雷达卫星飞行高度 800km 到 400km 高度时，观测带宽度 2000km 与 1200km，分辨率优于 1m。

## （二）电子探测系统的需求特点、技术原理及发展方向

电子探测系统的应用领域繁多，分类的方法非常复杂。例如可以按功能、技术体制，测量目标坐标参数、工作频段等方式进行分类，各种分类之间技术类型多有交叉融合，如毫米波多普勒探测系统、激光合成孔径探测系统等。单一按照一种分类方法对电子探测系统进行分析难免有所遗漏，无法完整概述当代各种电子探测系统整体先进技术，为避免该情况，本节采用从**技术体制分类**以及**工作频段分类**两个角度对现代各类电子探测系统的需求特点，技术原理及发展趋势进行完整的分析。

### 2.1、技术体制分类

将电子探测系统按照技术体制分类，考虑当今较为典型且得到广泛应用的电子探测系统，可分为**脉冲多普勒探测系统、合成孔径探测系统、相控阵探测系统以及超视距探测系统**。

#### 脉冲多普勒探测系统（脉冲多普勒雷达及其电子对抗技术）

从冷战结束后美军的历次对外军事行动可以看出，地面雷达系统会严重受限于地形的影响，这导致产生了对空中单位具有下视、下射、反低空空防能力的需求。由于机载雷达必须具有抑制严重的地面杂波干扰的性能才可以中低空下视情况下发现运动目标，普通的非相参体制的脉冲雷达因无法在时域中利用时间来区分目标与地杂波干扰而无法满足上述需求。此时机载雷达便需要采用相参体制的脉冲多普勒雷达（PD 雷达）。

脉冲多普勒雷达是在动目标显示技术基础上发展起来的一种新体制雷达，应用多普勒效应在强背景（地、海面）杂波下发现运动目标，并测量其位置和相对速度。脉冲多普勒雷达不仅具有脉冲雷达的距离鉴别力，还具有连续波雷达的速度鉴别力以及较强的杂波抑制能力，可在较强的杂波背景中分辨出运动目标，能较好的解决飞机在中、低空飞行和雷达下视时遇到的陆地、海面杂波对雷达的干扰问题，同时还能够利用多普勒处理技术实现高分辨率合成孔径地图测绘。



图表 12: 脉冲多普勒雷达



图片来源: 搜狐军事, 中航证券金融研究所

当前, 对多普勒雷达实现有效干扰的手段中, 无源干扰主要通过人为投放的铝条干扰, 有源干扰主要基于数字射频放射器, 通过转发式或应答式的干扰机来实施各种欺骗干扰, 在获得多普勒雷达信号的复制后对其噪声进行控制以克服多普勒雷达对非相似干扰的压制, 让多普勒雷达接收机的带宽和干扰信号带宽相近, 以达到干扰目的, 具体有源干扰的方式包括距离波门拖引干扰、速度波门拖引干扰、假多普勒频率干扰、多普勒闪烁干扰以及距离-速度波门同步拖引干扰等方法。另一方面, 多普勒雷达的抗干扰技术主要有频率捷变抗噪声干扰、比较多普勒频率与距离变化率抗距离欺骗干扰以及比较距离变化率与多普勒频率抗速度拖引干扰等方法。

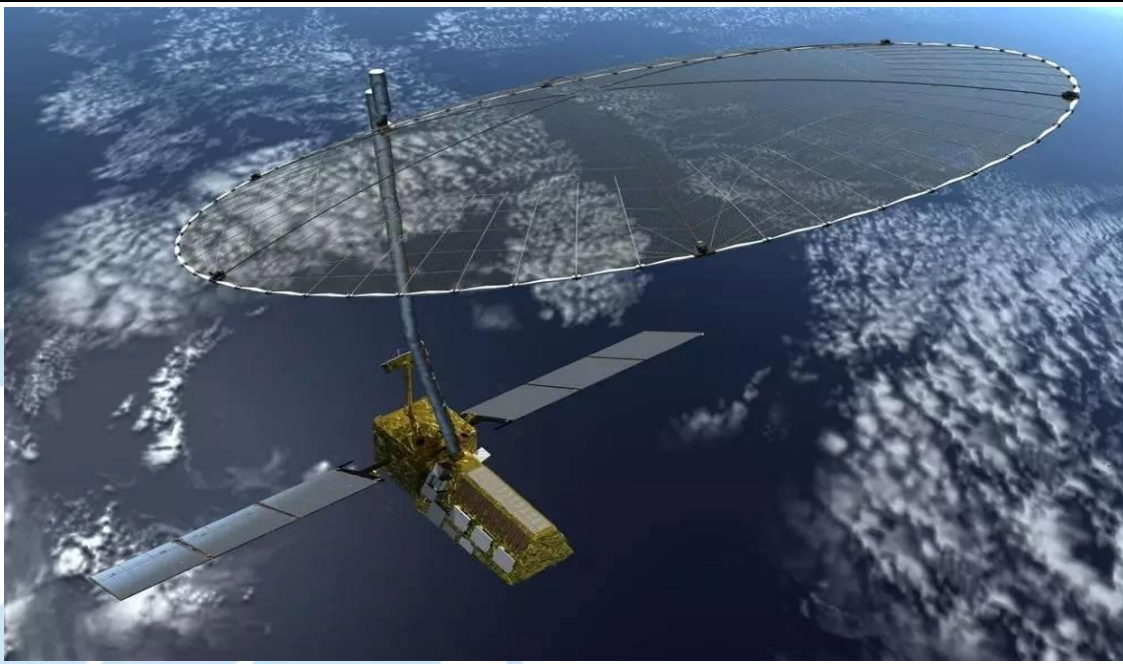
综上, 脉冲多普勒雷达的优点是其具有脉冲雷达的距离分辨力、连续波雷达的速度分辨力、较强的抑制杂波以及抗干扰能力, 可以在较强的杂波背景中分辨出目标回波。缺点在于扫描速度低, 精度较差, 隐身性不强。由于现代较难发生大规模战争, 多为区域性战争, 因此精准打击的价值较大, 不管是军事打击还是民用领域都对雷达提出了苛刻的要求, 军用领域机载雷达要求分辨率达到 10cm 以内, 卫星成像要求米级以下分辨力, 未来脉冲多普勒雷达发展趋势将是高分辨力处理、高稳定信号系统, 精度提升。

#### 合成孔径探测系统 (合成孔径雷达及其电子对抗技术)

现代战争中, 及时获取详细的战争信息可以直接决定战场的走势, 因此全天候全球战略侦察、全天候

海洋军事动态监视、战略导弹终端要点防御的目标识别与拦截、战略导弹多弹头分导自动导引、轨道平台开口的识别与拦截以及对战略地下军事设施的探测都具有重大的意义。以上军事侦察任务的实现重点在于需要雷达的测绘带宽以及分辨率较大，而早期传统的雷达难以实现。针对该需求，20世纪50年代初美国科学家提出了“合成孔径”的概念，并基于此开发出了合成孔径雷达以满足军事侦察雷达对高分辨率的需求。

图表 13: 合成孔径雷达



图片来源: NASA, 中航证券金融研究所

合成孔径雷达主要从背景中依照目标的散射特性提取各种目标，对地面静止和低速运动目标成像。现在针对合成孔径雷达的干扰方式中，无源干扰方式主要包括是通过遮蔽真实目标并安放角反射体等假目标，以降低敌方侦察效果；有源干扰的主要方式是使用大功率噪声干扰信号方式使合成孔径雷达输出信号干信比升高，灵敏度下降，导致成像中出现斑点，识别率下降，该干扰方式设备简单，运用广泛，但所需功率较大。

针对以上电子干扰技术，合成孔径雷达在空域内的抗干扰方式包括低副瓣技术、副瓣调零技术等。该类技术能够对抗从副瓣进入的连续波噪声干扰，使单个或少量干扰机很难通过干扰合成孔径雷达的副瓣来保护较大的区域；在时域以及频域内，由于脉冲干扰信号在时域上难以完全覆盖合成孔径雷达回波信号，所以可以通过时域限波、限幅等方式抑制干扰信号；对于连续波噪声干扰中的宽带干扰，合成孔径雷达具备二维信号处理的先天优势，干扰系统实施有效干扰需要具有足够的信号发射功率，大幅提高了干扰成本；对于窄带干扰，合成孔径雷达可通过滤波技术进行干扰抑制，同时对有效回波信号进行半匹配处理也可以



获取较为清晰的微波图像。

目前，合成孔径雷达**向着高分辨率、多极化、多模式和星座化等趋势发展**。合成孔径雷达电子对抗技术的未来发展则主要体现在两方面，一是提高现代信号处理和数学方法在抗干扰中的应用，利用现代信号处理手段，包括高阶谱分析、时频分析、小波分析等方法分析干扰信号与真实回波信号的差异，还可以结合多种数学工具，如粒子群等智能优化算法、神经网络、模式识别和压缩感知等方法提高抑制效果和处理速度，特点是效费较高。二是对新体制合成孔径雷达系统的抗干扰能力进行挖掘，以发展新体制合成孔径雷达抗干扰技术。

### 相控阵探测系统（相控阵雷达及其电子对抗技术）

20 世纪 60 年代以来，随着战斗机、导弹等目标机动性能及突防能力的不断提高，以及远程高速洲际弹道导弹的诞生，使能针对该类目标进行有效探测跟踪能力雷达的需求大幅提高。80 年代以后，以美国的“爱国者”和“宙斯盾”系统为典型代表的第三代防空导弹系统，90 年代以后众多国家积极发展的新一代防空导弹武器系统都针对该需求采用了相控阵雷达。

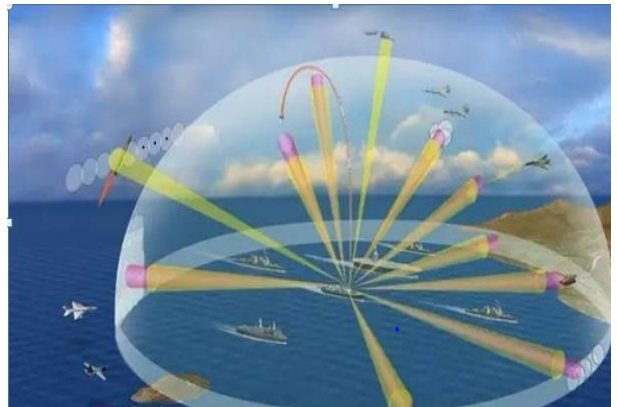
相控阵雷达即相位控制电子扫描阵列雷达，其利用大量个别控制的小型天线单元排列成天线阵面，每个天线单元都由独立的移相开关控制，通过控制各天线单元发射的相位合成不同相位波束。相控阵雷达强大的优势能弥补机械雷达的不足，包括雷达波束指向灵活，能实现无惯性快速扫描，数据率高。一个雷达可同时形成多个独立波束，分别实现搜索、识别、跟踪、制导、无源探测等多种功能；目标容量大，可在空域内同时监视、跟踪数百个目标；对复杂目标环境的适应能力强，抗干扰性能好；全固态相控阵雷达的可靠性高，即使少量组件失效仍能正常工作等优点。

图表 14：相控阵雷达



图片来源：百度百科，中航证券金融研究所

图表 15：相控阵雷达工作原理



图片来源：贤集网，中航证券金融研究所

相控阵雷达按照发展过程可具体分为**无源相控阵雷达（PESA），有源相控阵雷达（AESA）以及数字阵列雷达（数字有源相控阵雷达）**。

相控阵雷达在实际应用中无法忽视的缺点包括性能的提升带来了设备部件复杂度，成本的大幅提高，同时相控阵波束扫描范围有限，最大扫描角为  $90^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 。当需要进行全方位监视时，需配置 3~4 个天线阵面。而随着当代微电子技术和数字集成电路技术的发展，数字阵列雷达的**数字阵列模块将逐渐向数字化、软件化、集成化、多功能方向发展**。

在电子对抗日趋激烈的未来战场环境中，相控阵由于采用二维或三维相扫的阵列天线，使天线具有波束窄、旁瓣低的特点，对抗相控阵雷达较为有效的方式主要是欺骗干扰和综合干扰策略，包括利用多假目标干扰，压制干扰与欺骗干扰相结合，多部干扰机协同工作干扰，距离波门拖引干扰以及角度欺骗干扰等。与此相对，相控阵雷达抗干扰技术也发展迅速。

图表 16：相控阵电子探测系统抗干扰措施及主要作用

分类	抗干扰措施	主要作用
空间域	1、降低雷达天线副瓣 2、窄波束、高增益天线 3、自适应波束调零 4、副瓣对消、副瓣匿隐 5、多波束形成技术 6、单脉冲测角 7、设置辅助发射天线与诱饵	1、降低被侦察的概率 2、减少波束空间覆盖范围，减小受影响的角度范围 3、减小副瓣干扰 4、反副瓣压制和反欺骗干扰 5、减少主瓣干扰受影响范围 6、反角度欺骗干扰 7、降低雷达被精确定位的可能性
频率域	1、频率捷变 2、频率分集 3、宽带和超宽带雷达 4、MTI、MTD、PD 5、扩展雷达频率范围，如采用毫米波甚至更高频段电磁波	1、增大干扰信号带宽，降低干扰信号功率谱密度；增加雷达信号侦察难度，弱化数字储频作用 2、反杂波，增加相参积累时间 3、增加干扰机接收难度，增大目标的雷达反射截面积
时间域	1、波形捷变 2、相干脉冲串信号 3、单发大时宽带宽信号 4、射频辐射管理	1、增加雷达信号侦察难度，弱化数字储频作用 2、PD 信号处理，增加频率分辨 3、减少雷达发射时间，时间上隔离
其它	1、变极化，多极化技术 2、多传感器数据融合 3、无源探测	1、极化鉴别，目标极化匹配 2、综合利用多传感器的信息，降低检测所需的 S/J 3、不易被侦察，反欺骗干扰

资料来源：陈勇, 2017, 《相控阵雷达抗干扰方法应用及实现》，中航证券金融研究所

综上，相控阵雷达的整体发展方向将要向**适应战争环境，扫描角不断扩大，系统复杂性降低、体积减小，提高隐身能力，增强抗损能力，降低成本等方面发展**。

### 超视距探测系统（超视距雷达及其电子对抗技术）

现代战争中，长距地地导弹、部分轨道武器、战略轰炸机和核爆炸的威胁都对雷达提出了长距离探测能力以增加预警反应时间的需求。

超视距雷达是指工作在短波波段，利用电磁波在电离层与地面之间的反射或电磁波沿地球表面的绕射



作用传输高频能量,从而探测到常规雷达无法探测到的地平线以下的超远距离空中和海上运动目标的雷达。其作用距离不受地球曲率限制,是一种利用高新技术发展起来的新型军用雷达。超视距雷达主要用于战略预警及远程战术警戒情报雷达系统。按电磁波传播方式不同,超视距雷达可分为天波超视距雷达(作用距离约为 1000km~4000km)、地波超视距雷达(作用距离较短,监视天波超视距雷达无法覆盖的区域)和微波超视距雷达。

图表 17: 超视距雷达



图片来源: 百度百科, 中航证券金融研究所

超视距雷达目前在使用上仍存在一定问题,一是只能探测电离层以下,即 300~400 公里以下的目标。二是只能获得目标的方位和距离信息,很难获得仰角信息;三是测量精度低、分辨率差;四是电波通道不稳定,干扰因素多,气候变化、极光和太阳黑子将直接影响天波超视距雷达的性能;五是在中波、短波段,频谱挤,带宽窄,互相干扰严重;六是超视距雷达系统庞大,雷达站内还配建诸如电离层监测站和气象站等支援设施。

目前,超视距雷达发展方向是朝着更大的探测距离,更精准的定位能力,增强抗干扰、过滤杂波的能力发展。

## 2.2、工作频段分类

将电子探测系统按照工作频段进行分类,当代得到广泛应用的包含米波探测系统、毫米波探测系统、激光探测系统。

### 米波探测系统（米波雷达及其电子对抗技术）

当今世界各军事大国基本都已经拥有先进隐身战机，以被美国国防部列为第四代隐形飞机——F-22 猛禽战斗机为例，其对雷达探测波的反射截面积（RCS）只有 F-15 的 1/80，约为 0.08 平方米。而 F-35 闪电 II 战斗机作为美国第五代隐身飞机，除了拥有较小的 RCS 之外，体积比 F-22 更小，对于 X 和高 S 频段内防空系统的探测、跟踪和打击都有足够的应对能力，而其它频段比如 L 频段的监视雷达也很难发现 F-35。以上威胁足以证明反隐身雷达在现代战争中的重要性。目前，雷达的反隐身手段主要是低频段雷达和双多基地雷达两大类方式，低频段雷达中最具有代表性的是米波雷达。

图表 18: F-22 猛禽战斗机



图片来源：视觉中国，中航证券金融研究所

图表 19: F-35 闪电 II 战斗机



图片来源：东方网，中航证券金融研究所

米波雷达是指工作波长在 1~10m，工作频段在 30~300MHz 范围内的一种长波雷达。由于米波雷达的工作频段恰好避开了隐身战机的隐身波段（0.3~29GHz），其对先进的隐身武器具有先天优势。

早期传统的米波雷达不仅测量精度差、不能测高，而且由于地面反射造成的波束上翘和波瓣分裂，导致低仰角盲区大，威力覆盖不连续，后来通过采用有源相控阵列体制、现代信号处理方法、高性能计算和天线阵列技术等相关新技术，有效克服了传统米波雷达存在的不能准确测高、威力覆盖不连续、低角盲区大、阵地适应性差等主要缺陷。

图表 20: 米波雷达



图片来源: 中华网军事, 中航证券金融研究所

新式米波雷达抗干扰性极强, 几乎能在任何电子干扰条件下使用, 且低角度跟踪性能好, 跟踪制导精度高, 不易被反辐射导弹跟踪, 发现能力强大。米波雷达未来的发展方向即**提高雷达性能和抗干扰能力, 发展能测量多维信息的米波雷达, 以及朝着智能化、小型化、高机动性的方向发展。**

#### 毫米波探测系统 (毫米波雷达及其电子对抗技术)

海湾战争和科索沃战争的实践已经表明, “远程打击, 精确打击”技术在军事应用中有着极其重要的意义。而精确打击要求军用雷达具有高精度、高分辨率测量、精确制导和精确目标指示、实现自动目标识别(ATR)等性能, 能满足以上要求的雷达即毫米波雷达。

毫米波雷达是工作在毫米波段(1~10mm)探测的雷达, 具有**频率高、波长短、频带宽、体积小、重量轻、隐蔽性和机动性好**等特点, 被广泛应用于搜索和目标拦截雷达、火控与精密跟踪、制导雷达以及飞机防撞系统上, 特别是在受到海面雾、霾的限制, 红外/光电系统无法发挥作用的海用雷达上。毫米波雷达所具有的穿透烟尘、云雾、比厘米波雷达好得多的抗杂波干扰能力和抗多路径效应能力, 可以充分发挥其精密探测和精密跟踪的作用, 因此被各国作为重要军事项目研制开发。



图表 21: 毫米波雷达



图片来源: 百度百科, 中航证券金融研究所

民用毫米波雷达也随着毫米波技术的发展得到了广泛应用, 如毫米波气象雷达, 其利用毫米波波长短的特性, 可以探测出雷达上空高度 15 公里内, 范围约 3000 平方公里内的云和雾的特征, 为大气科学研究、云自动化观测、人工影响天气、机场气象、军事气象等提供保障; 毫米波防撞雷达, 作为汽车自动/辅助驾驶系统中的重要组成部分, 可应用于汽车后方 (24GHz 毫米波雷达, 探测距离 5~30m)、汽车前方和两侧 (77GHz 毫米波雷达, 探测距离 30~70m), 其特点是受自然环境影响小, 探测距离适中, 在车载雷达领域性价比最高, 具有广阔的市场前景, 但缺点是难以识别行人、交通标志等。另外, 毫米波相比微波, 对密林树丛穿透力低; 元器件成本高, 加工精度相对要求高, 单片收发集成电路的开发相对迟缓。

毫米波雷达对抗技术主要是针对敌方的毫米波末制导系统, 应用一定的控制投放装置投放毫米波干扰物, 反射或吸收敌方毫米波雷达辐射的电磁波以及扰乱电磁波的传播, 同时改变其散射特性或形成假目标和干扰屏障以掩护真实目标。毫米波对抗技术的研究方向集中在毫米波箔条、毫米波箔片、气溶胶、毫米波角反射器、毫米波吸收层、毫米波等离子体等, 而毫米波雷达的各种抗干扰技术在于波形选择、空间选择、频率选择、功率对抗以及接收机内抗干扰等方面。

毫米波雷达的技术发展主要有两个方面: **一是理论的发展**, 在毫米波段对系统的构成和元器件的设计制造进行新的理论研究, 给出新的设计方法。**二是材料科学的发展**, 由于研制频带宽、噪声低、功率大、效率高、可靠性强、寿命长、功能多的毫米波器件需要更好的材料支持, 例如半导体器件需要的 MBE 材料, 旋磁器件需要对毫米波段损耗小的旋磁材料, 民用车载毫米波防撞雷达技术上也需要更加**模块化、精确化**



和低成本化，以方便大规模装配到汽车中。

### 激光探测系统（激光雷达及其电子对抗技术）

在毫米波探测系统的分析中，指出了现代战争中精确打击的重要意义带来了对于军用雷达具有高精度、高分辨率测量、精确制导和精确目标指示、实现自动目标识别(ATR)等性能的需求。其中自动目标识别(ATR)的实现需要依靠高精度的图像数据，以实现对重要或危险目标进行智能化辨识。但几次特斯拉自动驾驶出现的安全事故中凸显了毫米波雷达难以识别行人、交通标志等的缺点。为满足该问题对雷达的需求，伴随激光技术的发展，激光技术与传统雷达相结合诞生出了一种工作在红外和可见光波段的以激光为工作光束的雷达——激光雷达。

激光雷达以微波雷达原理为基础，将激光束作为新的探测信号，充分发挥了激光亮度高，具有极高的距离分辨率、速度分辨率、测速范围广、能获得目标的多种图像、抗干扰能力强、比微波雷达的体积和重量小等技术优势。

目前对激光雷达有强烈需求的军用领域包括激光雷达制导，超低空目标探测跟踪、侦查激光雷达、弹道导弹激光防御雷达、化学/生物战剂探测激光雷达、电子对抗激光雷达；民用领域包括林业、水域，大气监测、地质测绘，数字城市建模，水下参测及三维成像，文化古籍数字化、带状工程探测、航天工程、自动驾驶、障碍规避以及医学等方面。

图表 22: 激光雷达



图片来源：百度百科，中航证券金融研究所

激光雷达在军用领域应用目前仍存在一些问题：一是工作时较毫米波雷达受天气和大气影响大，在大雨、浓烟、浓雾等恶劣天气里，衰减急剧加大，传播距离大受影响，大气环流也会使激光光束发生畸变、抖动，直接影响激光雷达的测量精度。二是由于激光雷达的波束极窄，在空间搜索目标较困难，只能在较

小的范围内搜索、捕获目标，影响了对非合作目标的截获概率和探测效率，导致激光雷达很难直接独立应用于战场进行目标探测和搜索。而在民用领域，激光雷达成本较高，不利于大范围推广应用。

激光雷达的应用主要为激光测距机及激光跟踪测量雷达。涉及到的电子对抗方式主要为光电对抗，干扰方式主要包括激光距离欺骗干扰、激光致盲干扰、对测距跟踪系统以及测角跟踪系统干扰。

目前，激光雷达在后续几年中的研究方向仍是不断探究，延长激光雷达的作用距离以及功能一体化设计方向，民用激光雷达技术会朝着获取多源数据、处理多源数据、生产多样数据产品、低成本化、小型化方向发展。在硬件系统方面，激光雷达硬件系统需要向多平台、多型号、多传感器、多波束等方面发展，这需要依赖 ASIC 技术将激光发射器、探测器、放大器等数百个电子元器件封装到一个小型的专用芯片中，用单枚芯片实现激光雷达的整体控制。软件方面，激光雷达发展重点在于雷达搭载的算法需要继续提高数据处理速度、效率以及处理不同类型数据的能力。

## 2.3、总体发展方向

以上通过技术体制分类对脉冲多普勒探测系统、合成孔径探测系统、相控阵探测系统、超视距探测系统；通过工作频段进行分类对米波探测系统，毫米波探测系统及激光探测系统进行了需求特点、技术原理及发展趋势的介绍与分析。

总体来看，当代作战需求、民用需求和技术发展一直驱动着电子探测系统的发展，未来电子探测系统种类将更加细分，更加具有针对性。

对于电子探测系统里的雷达方面，不同种类之间的技术结合也将促进更多“复合”型雷达的诞生，如米波相控阵反隐身雷达，激光合成孔径雷达等，但其始终遵循从低级到高级、从简单到复杂、由量变到质变的发展主线，并建立在雷达产业发展基础上。

对于电子探测系统里的电子对抗方面，由于对不同体制雷达采取不同种类干扰样式所取得的干扰效果不尽相同，同时不同体制雷达在遭受不同种类干扰样式后其工作模式的变化或所采取的抗干扰措施也会存在较大差异，结合国内外发展趋势，电子对抗的发展方向为认知化和综合射频与一体化设计。认知化方向代表了雷达电子对抗将由传统预先编程的固定对抗模式向自适应模式发展，通过环境态势感知，作战效能评估与动态知识库的融合，实现电子战攻防的闭环，结合对抗策略的优化，提升信息对抗的作战效能。综合射频与一体化设计方向则代表了电子对抗装备未来通过共用射频孔径的方式，进行一体化设计，一机就具备通信对抗、导航对抗、敌我识别对抗、雷达对抗、目标探测等多项功能。同时不增加硬件，只通过增加软件就实现具有“发现目标”、“识别目标”、“攻击目标”以及“评估攻击效果”等多项能力，通过对目

标的侦察、探测和识别，引导有限的电子对抗资源在空域、时域、频域、极化域、码域和能量域上准确对准目标，实现精确电子攻击。

### （三）海外电子探测系统发展趋势

当今，美国作为世界上电子探测系统研究进展最先进的国家，始终保持着对电子探测系统技术发展的高度重视，其电子探测系统技术的发展方向对今后各国具有重要的参考价值，同时也可为我国电子探测系统的核心制造产业链分析给出明确方向和指导。

一方面，随着战争环境的多样化、恶劣化和电子信息化，美军对雷达的整体工作性能和可靠性要求有了巨大提高。美国国防部在 2018 年向国会提交的《年度工业能力评估报告》中对电子行业中的雷达与电子战装备（即电子探测系统）进行了详细的评估，重点提出要加强电子探测系统**零部件制造工艺和硬件通用性**，指出投资研发下一代**有源电扫描阵列（即有源相控阵雷达）**是降低战术空载雷达系统竞争和创新风险的唯一途径。此外，美国国防部通过了“国防生产法第三卷”以有效支持雷达与电子工业能力，并正在开展“**氮化镓高级电子战单片微波集成电路**”和“**氮化镓单片微波集成电路生产计划**”等项目。

图表 23：美国雷达及电子对抗项目的主要内容及承包商



PRIME	DIVISION	TYPE OF SYSTEM	PROGRAM
BAE	Electronic Systems	Electronic Warfare	<ul style="list-style-type: none"> <li>F-15 Eagle Passive Active Warning Survivability System (EPAWSS)<sup>78</sup></li> <li>Integrated Defensive Electronic Countermeasures (IDECM)<sup>79</sup></li> </ul>
Harris	Electronic Systems	Electronic Warfare	<ul style="list-style-type: none"> <li>Integrated Defensive Electronic Countermeasures (IDECM)</li> </ul>
Lockheed Martin	Rotary and Mission Systems	Radar	<ul style="list-style-type: none"> <li>Space Fence Ground-Based Radar System</li> <li>Long Range Discrimination Radar (LRDR)</li> </ul>
Northrop Grumman	Aerospace Systems	Electronic Warfare	<ul style="list-style-type: none"> <li>B-2 Defensive Management System-Modernization (B-2 DMS-M)</li> </ul>
	Mission Systems		<ul style="list-style-type: none"> <li>Common Infrared Countermeasure (CIRCM)</li> </ul>
	Mission Systems	Radar	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ground/Air Task Oriented Radar (G/ATOR)</li> </ul>
Raytheon	Space & Airborne Systems	Electronic Warfare	<ul style="list-style-type: none"> <li>Next Generation Jammer (NGJ)</li> </ul>
	Integrated Defense Systems	Radar	<ul style="list-style-type: none"> <li>Three-Dimensional Expeditionary Long-Range Radar (3DELRR)</li> <li>Air and Missile Defense Radar (AMDR)</li> </ul>

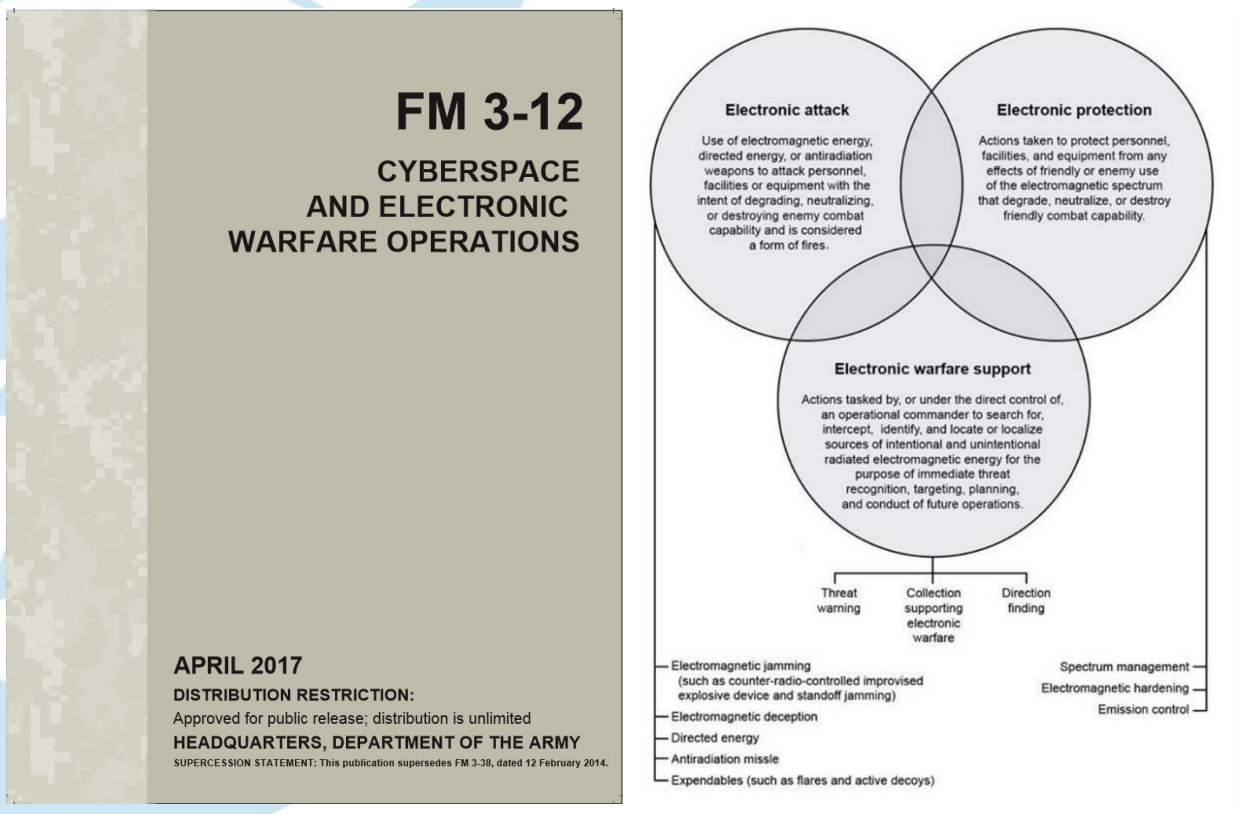
\* Includes current Radar/EW MDAPs.

图片来源：美国国防部，《年度工业能力评估报告》，中航证券金融研究所



另一方面，美国电子对抗的发展方向是**装备种类减少、增加通用装备**，各军兵种和不同平台将尽量使用标准化装备，并大量采用商业现成技术和设备，以便能节省研制投资、缩短研制期、减轻后勤支援压力。2017年，美国国防部、美国陆军和美国战略与预算评估中心陆续发布了《电子战战略》、《赛博空间与电子战》以及《决胜灰色地带——运用电磁战重获局势掌控优势》报告，均涉及到了未来电子探测系统的发展，并从战略高度透露出美国未来对电子对抗发展趋势的预判，揭露了未来电子探测武器装备的发展方向，提出了**多种电磁频谱作战形式**，包括通信、感知、干扰和欺骗。与此同时，美国还在大力发展多功能综合一体系统，如美国国防高级研究计划局（DARPA）发起了“射频任务作业融合协作单元”（CONCERTO，“协奏曲”）项目，以开发能够在电子战、通信、雷达模式之间自适应和灵活切换的射频系统（性能上要求与当前各种独立的系统相当甚至优于它们）；F-35的综合电子战系统集成了AN/APG-81有源电扫相控阵雷达、通信、导航、识别系统（CNI）以及光电分布式孔径系统（EODAS），该电子战系统兼具雷达告警、信号收集和分析、被动式辐射定位和电子对抗能力。

图表 24：电子战使命



图片来源：美国陆军，《赛博空间与电子战》，中航证券金融研究所

综合上述，从海外电子探测系统产业的政策、报告以及研究动向来看，在雷达方面，由于雷达属于典型的系统工程，其设计研发类似于金字塔结构，金字塔顶端即雷达整机，底端为各元器件，部组件及软件等，雷达整体的成本、性能、可靠性由各核心部件共同决定。在战争环境的多样化、恶劣化和电子信息化



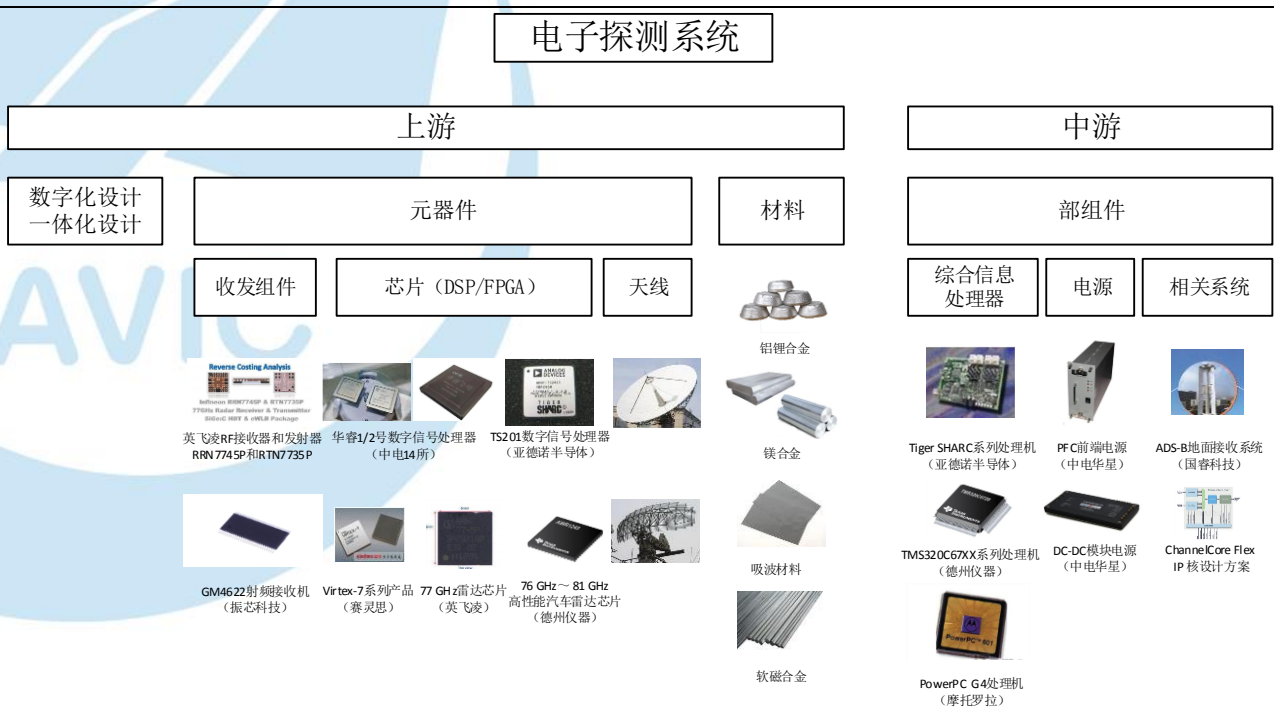
背景下，美军加大在各零部件制造工艺和硬件通用性的研究表明其对功能多样化、低成本、高性能和高可靠性的雷达日益重视；由于下一代电扫描阵列主要以全数字化阵列雷达为代表，对下一代电扫描阵列的投资印证了雷达在沿数字化雷达路径发展，而数字化雷达的未来是软件化雷达，智能化雷达；从美国几种微波集成电路项目可以发现，美国对雷达芯片的材料、性能以及芯片在电子对抗的应用加大了投入；在电子对抗技术方面，美国的研究重点在于雷达对抗领域，涉及到雷达与电子对抗装备综合一体化集成技术。

#### （四）电子探测系统产业链

以上对海外电子探测系统产业的分析可以为电子探测系统产业链中各核心部件指明发展方向，为分析、梳理并归纳电子探测系统产业投资的热点奠定基础，但首先需要对电子探测系统产业链中核心部件的功能特点进行介绍。

在电子探测系统中的电子对抗（主要是有源对抗）方面，涉及到的电子对抗硬件设备（包括天线，干扰发射机，接收机和信号处理器等）与雷达的硬件组成基本一致，仅在具体处理软件及硬件性能参数等方面上有一定差异，因此电子探测系统的组成从产业链上游到下游，整体与雷达产业链有极大的相似之处，且核心组成部分主要在产业链中上游。

图表 25：电子探测系统核心产业链



资料来源：中航证券金融研究所整理

如上图所示，在电子探测系统（雷达）核心产业链中，**数字/一体化设计、接收/发射组件、信号处理机（核心为芯片）、天线、特种材料、电源设备以及其他相关系统（后端数据处理）**是不可或缺的核心部件。除此以外，**雷达软件化**作为现代雷达系统未来发展涉及到的新技术概念，在产业投资热点中也需要关注，因此本节也进行特别介绍。具体来说电子探测系统（雷达）产业链上的各部分功能如下：

### 数字化/一体化设计

数字化设计是随着信息技术和通信技术发展被广泛应用在系统工程设计领域的技术，是通过计算机软硬件、网络及通信技术对描述的对象进行数字定义、建模、存贮、处理、传递、分析以及综合优化，从而达到精确描述和科学决策的过程和方法，具有描述精度高、可编程、传递迅速、便于存贮、转换和集成的特点。数字化设计可以大幅提高电子探测系统总体设计效率，缩短开发周期，节约时间成本。

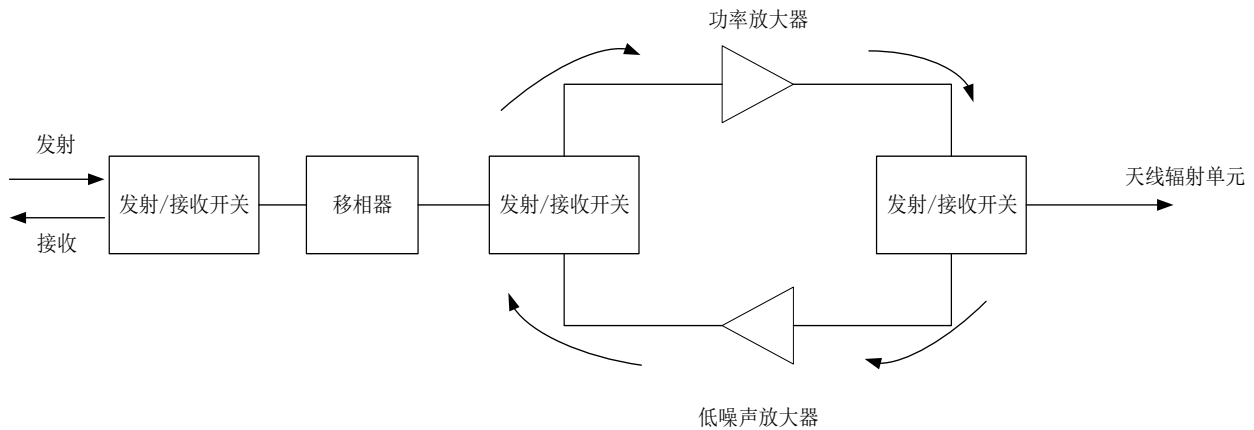
另一方面，现代作战平台（特别是机动平台）往往必须同时装备雷达和电子对抗需用的侦察干扰设备，为减少平台上电子探测系统的体积，重量以及功耗，一般通过优化设计、部件小型化等手段来实现。然而随着微电子技术及大规模集成电路的发展，除天线及发射机外的大部分部件已经基本实现了小型化，电子探测系统轻量化还需要另辟蹊径，总体设计上重视雷达与电子对抗装备的综合一体化设计就是一种方法，一体化设计还可以提高雷达对抗协同作战性能、复杂干扰下探测能力、雷达与对抗天线的隐身能力、雷达设备的电磁兼容能力以及改善干扰的针对性与有效性等。

### 发射和接收组件

不同类型雷达往往对发射机和接收机有不同功能的性能要求，这导致雷达发射和接收组件投资方向呈现多样化，具体可以分成两类，一种是传统雷达（如多普勒雷达，SAR 雷达）中独立的发射机与接收机，另一种则是相控阵雷达使用的接收发射组件，即 T/R 组件。

传统雷达中，发射机作为雷达提供大功率射频信号的无线电装置，通过雷达馈线系统将信号传输到雷达天线并辐射到空间。一般具有高频、高压、大功率的特点，是雷达系统中最大、最重和最昂贵的部分。传统雷达发射机已从早期的单极自激振荡式发展到主振放大式发射机（包含高功率真空管式和高功率全固态式）。接收机则是雷达中对回波信号进行放大、变换和处理的设备，主要完成雷达回波信号的功率放大、频率变换与补偿、动态压缩、解调、检波及数模转换，产生各种调制形式的雷达射频激励信号和波形。当前大多采用超外差式接收机，并附加各种抗干扰电路，其输出信号送给显示器或计算机等终端设备，具有灵敏度高、选择性好、抗干扰能力强等优点。

图表 26: T/R 组件结构原理图



图片来源: eefocus, 中航证券金融研究所

有源相控阵雷达的发射接收组件是 T/R 组件（见上图），其将传统的发射机、接收机、激励器和本振信号发生器集成为一个完整的发射机和接收机分系统，连接了天线阵列以及信号处理器及显示器等部件。由于有源相控阵雷达每个或数个辐射单元后均接有一个 T/R 组件，导致一部有源相控阵雷达少则需几十数百，多则要成千上万个 T/R 组件，T/R 组件设计好坏将直接决定整部雷达的成本（收发组件成本约占整个雷达系统造价的 60%）、可生产性和系统性能，是有源相控阵雷达的核心。

### 信号处理器及芯片

雷达信号处理是雷达系统的主体工作过程，同时现代电子对抗环境中，战争信号具有复杂化、密集化的特点，对战场信息的处理能力也提出了更高的要求。雷达信号处理涉及到的技术主要包括数据重采样、参数估计、自适应滤波、恒虚警处理、脉冲压缩、自适应波束形成和旁瓣对消等。传统的雷达信号处理器采用纯硬件作检测与跟踪等算法，灵活性较低，可编程性不高。当代随着数字信号处理理论的发展，广泛采用了数字信号处理器对雷达信号进行高效处理。现代雷达数字信号处理器的核心是 DSP 芯片及 FPGA 芯片。



图表 27: DSP 芯片



图片来源: 百度百科, 中航证券金融研究所

DSP 芯片是一种适用于密集型数据运算与实时信号处理的芯片, 其可以利用硬件算术单元、片内存储器、哈佛总线结构、专用寻址单元、流水处理技术等特有的硬件结构, 高速完成 FFT、FIR、复数乘加、相关、三角函数以及矩阵运算等数字信号处理, 兼具了高速、灵活、可靠、可编程、低功耗、接口丰富、处理速度快、实时性好等特点。采用 DSP 芯片作检测与跟踪等算法可根据不同应用背景升级算法, 方便地与多种雷达对接, 另外把一部分信号处理放在 DSP 芯片中, 还可以减轻计算机负荷, 使计算机可有更多资源进行后期数据处理。

图表 28: FPGA 芯片



图片来源: 搜狐科技, 中航证券金融研究所

在雷达系统中还广泛的应用了现场可编程门阵列, 即 FPGA 芯片。FPGA 芯片是一种最具代表性的可编程逻辑器件 (PLD), 无论是在速度、体积方面, 还是在设计的灵活性上, 都能适应现代雷达信号处理系统的要求。另外, FPGA 器件采用标准化结构、集成度高、功耗低及可反复编程等优势使其在各种类型雷达发射/接收组件、信号处理系统中得到了大量应用。

近年来, 在雷达信号处理中, 基于 DSP 芯片在处理复杂算法上灵活实现的优势和 FPGA 芯片在处理大数据量上快速实现的优势, 硬件结构为“DSP+FPGA”的信号处理系统能满足雷达信号处理通用性的需求, 并能根据各自的优势较好地处理复杂的信号处理算法, 在雷达与电子对抗信号处理中得到了广泛应用。

与此同时, 由于各种机动平台搭载的雷达装备在工作环境上有一定的特殊性, 雷达芯片还要求适应高温、低温、辐射等恶劣环境, 因此针对芯片制造材料的提升也是未来芯片发展方向之一。

### 天线

天线作为雷达中用以辐射和接收电磁波并决定其探测方向的设备, 具有将电磁波聚成波束, 定向地发射和接收电磁波的功能。天线性能直接影响雷达的重要战术性能, 如探测距离、探测范围、测角(方位、仰角)精度、角度分辨力和反干扰能力等。

### 雷达特种材料

在机动平台上装备的雷达对雷达小型化, 轻量化有较大需求, 而雷达的重量主要取决于各部件及雷达整体结构所使用的材料。同时, 随着大量反辐射武器的诞生与发展, 雷达隐形技术也直接决定了雷达在战场上的生存能力, 而雷达的使用材料同时也决定了雷达的隐身能力。为满足以上雷达系统对轻量化, 隐形的需求, 雷达材料及制造工艺技术发展得到了充分的重视。目前, 日益发展的复合材料技术已经应用于

雷达系统，如军用雷达外壳上使用的铝锂合金、镁合金、轻质复合材料、软磁合金、吸波材料等。

### 电源

由于雷达整机的功率主要体现在发射功率上，雷达发射机重要辅助系统——配套特种电源成为了最为关键的部分。例如有源相控阵雷达中包含了成百上千的T/R组件组成的天线阵，而每个组件对电源的功率、纹波、体积、重量均有严格要求，总功率比较大。激光雷达对电源的功率同样有着更大的要求，因此雷达电源设计必须合理，做到**高可靠性、高功率密度和高效率**。

### 后端数据处理

现代战争中，各国均建立了强大的雷达防护系统，用于防空、拦截制导；民用上，机场空中管制系统和海上导航同样需要雷达系统。但在实际工作中，不管是拦截导弹还是为飞机引航，估计目标的航迹并不是最终目的，目的是对目标轨迹和航迹进行处理，获得各种有用信息，比如距离、速度和目标形状等，从而预测目标未来某个时刻的精确位置，形成可靠的目标航迹，从而实现对目标的实时跟踪。为实现以上目标，雷达后端数据处理必不可少。后端数据处理常被看成继雷达信号处理后对雷达信号的二次处理，工作主要包含点迹与航迹之间的关联处理；目标跟踪滤波、航迹维持以及预测；虚假航迹的删除；航迹和点迹的显示。

雷达系统后端数据处理硬件上包括**数据处理分机**和**监控维护分机**。数据处理分机主要组成：**服务器、视频采集卡、雷达数据处理软件**。监控维护分机主要组成：**主机、显示器、系统监控软件、综合显示软件**。

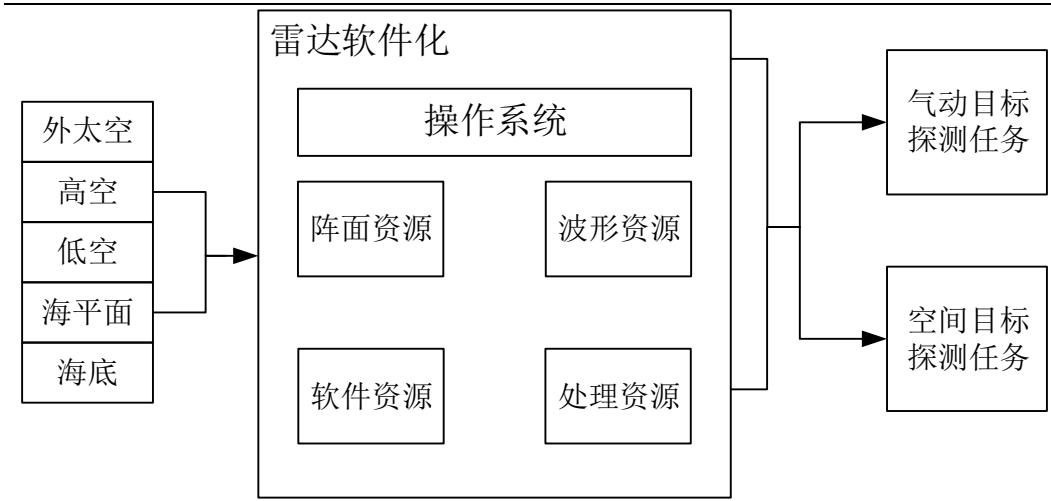
### 雷达软件化技术

雷达装备目前仍存在一些缺陷：一是目前雷达基本是单一功能的设备，而担负的任务却多种多样，致使雷达装备种类繁多，且结构复杂、更新换代慢、成本高，给雷达装备的研制、生产、使用和维修带来极大的不便。二是目前雷达装备功能单一且绝大部分功能都由硬件电路来实现，大大限制了它的应用范围和战场适应性，更不具备可扩展性，难以适应现代战争的需要。为解决上述问题，诞生了雷达软件化技术。

雷达软件化技术是通过实现雷达系统中软件与硬件的解耦，以操作环境为核心构建起来的一套具有开放性特点的结构体系，可以借助软件对雷达的各种功能进行重新定义和构建，从而灵活的实现系统扩展、更新和升级。



图表 29：雷达软件化技术内涵



资料来源：麻进玲，雷达软件化的关键技术研究，《电子技术与软件工程》，中航证券金融研究所

雷达软件化的基本特征体现在三方面：一是可对任务需求进行自定义。开放式的架构使软件化雷达对各种任务需求进行灵活响应，能够满足多功能、多任务的需要，同时还能按照具体的任务对雷达系统的相关功能进行重新构建；二是系统硬件能够进行重组，由于软件化雷达系统中的计算平台和阵面平台采用的都是开放式架构，从而使雷达可以按照实际的功能需要对孔径和资源进行重新组合；三是系统软件可以进行重新构建。软件化的雷达系统在各种功能的设计上采用了构件化的方法，通过雷达本身所处的操作环境，可以实现系统各项功能的即插即用。

## （五）电子探测系统行业投资热点

当前我国电子探测系统市场空间广阔，单从电子探测系统中雷达的军民市场空间来看，据观研天下测算，2018-2023 五年内我国的军民雷达市场规模有望合计达到 600 亿美元（按照人民币换美元汇率 6.9 计算，约合人民币 4158 亿元），全球占比 35.7%。

在庞大的电子探测系统市场空间背景下，结合前文对海外电子探测系统产业链发展的分析与电子探测装备核心产业链的梳理，可以通过聚焦于对电子探测系统产业链上核心部件技术发展趋势，进一步整理并提出电子探测系统产业投资热点。

### （1）数字化设计/一体化设计

为提高当代雷达的设计效率，数字化设计必须发展。

图表 30: 雷达数字化设计发展方向及意义

发展方向	意义
参数化三维计算机辅助设计	采用三维参数化实体模型设计软件, 实现系统设计步骤与组件之间的尺寸关联, 进行系统的运动仿真、模拟装配、电缆布线和动态干涉检查等数字仿真, 方便修改设计方案和进行多方案比较, 避免重复建模, 提升建模设计效率。
协同仿真	由于现代雷达的复杂性大幅提升, 基于计算机仿真技术的实物和半实物仿真具有低成本和高效率的优势, 同时由于存在仿真工具多样化、模型转换等问题, 雷达研制也引入了协同仿真技术。
虚拟装配	在计算机上建立装配人员操作模型和真实装配环境, 可视化地动态模拟系统中可能存在的优化方案, 考察系统的可装配性和维修性, 在雷达系统设计的早期发现潜在问题并找到较完善的设计方案。
虚拟现实	大型雷达系统可以通过虚拟现实技术使设计者和评估者可以身临其境的感知系统的操作性和维护性。
虚拟样机	虚拟样机技术涉及机、电、液、热、微波、控制和信号处理领域, 以及配合多学科设计优化技术等, 对雷达原型或系统建立具有一定真实功能并可以与物理原型相媲美的计算机仿真模型以辅助优化设计。

资料来源: 王小谟, 张光义, 《雷达与探测 信息化战争的火眼金睛》, 中航证券金融研究所

其中, 投资中可以重点关注先进虚拟现实技术以及虚拟样机技术的发展。

目前, 针对雷达与电子对抗综合一体化设计的要点是针对两者的有效辐射功率, 灵敏度、发射机和发射器件、接收机、信号波形和信号处理不尽相同的问题, 采用共用功能模块, 通过软件无线电技术, 实现不同具体要求的功能。但由于雷达和雷达对抗系统在信号形式, 发射接收通道等方面对系统的要求有区别, 在进行一体化设计中需要进行总体与分析共同设计, 不断进行迭代并做出性能的折中。目前, 模块分时复用及可动态重构的系统形式已经有了一定应用, 为雷达与电子对抗一体化设计奠定了一定基础, 投资中应当重点关注雷达发射机固态化、接收机信道化, 信号调制数字化和宽带化, 共用天线设计技术、扩谱调制和码分多址以及低截获概率雷达等技术的发展。

一般来说, 参与雷达整机研发设计的单位涉及到雷达数字化/一体化设计, 其中上市公司主要包括国睿科技, 四创电子, 四川九洲, 雷科防务, 天和防务, 天银机电。

## (2) 发射和接收组件

为提高雷达抗干扰性能、可靠性和自适应控制, 对于传统雷达(如多普勒雷达, SAR 雷达)中独立的发射机与接收机, 在完善机械调谐的频率捷变磁控管的同时, 加强对大功率的无惯性电子调谐脉冲磁控管的研究并采用注入锁相技术成为了重要课题。新体制雷达越来越多地采用主振放大式的发射机, 使行波管-前向波管、固体微波源-行波管和全固态放大链在雷达中将得到更多的应用, 发射机将越来越多地使用微处理器, 以便向自适应方向发展。

为适应新时代电子对抗的需求, 接收机在功能上要求能模拟处理与产生综合雷达信号和能产生电子对抗测频与干扰信号; 性能上要求全面提升工作带宽、相位噪音、杂散电平和动态范围等指标。那么接收机

的发展方向必然向**综合射频和数字化方向发展**。

另一种则是相控阵雷达使用的接收发射组件，即 T/R 组件。有源相控阵雷达的 T/R 组件发展的重要关注点有 6 个，分别是**芯片设计、功率输出、发射机噪声限值、接收机噪声系数、幅度和相位控制、阵列物理结构设计**。

图表 31: T/R 组件技术状况与未来发展方向

主要因素	目前技术状况或缺陷	未来发展方向
<b>芯片设计</b>	大多数 X 波段及以上频段 T/R 组件都采用基于 GaAs 工艺的 MMICs 技术，存在热传导系数极低的问题，导致电路需要进行散热设计。	基于 GaN 和 SiGe 的设计工艺（GaN 较 GaAs 工艺可提高功率放大器输出功率 5 倍以上，SiGe 工艺传输的功率不如 GaAs，但材料成本较低）。
<b>功率输出</b>	天线可实现的最大平均功率与每个 T/R 组件的输出功率、T/R 组件的个数、T/R 组件的效率和散热等条件相关，T/R 组件的效率越高，那么对应的输出功率也就越大。	随着未来功率输出逐步增大，对 T/R 组件个数需求量也越来越大。
<b>发射机噪声限值</b>	雷达系统采用一个中心发射机进行工作，在有源相控阵天线中，主要的噪声源是直流纹波或者输入电压的波动。	需要对输入功率进行适应性的滤波，降低中心发射机发射引入的噪声。
<b>接收机噪声系数</b>	接收噪声系数是有源 ESA 天线关注的一个重要指标，通常需要使得接收噪声系数较低，以提升雷达性能。	接收噪声系数较低，以提升雷达性能。
<b>幅度和相位控制</b>	幅度和相位控制的精度是与雷达系统对整个天线阵列旁瓣的要求有关。	减小相位和幅度控制电路的量化步长，提升幅度和相位控制的范围以控制幅度和相位误差。
<b>阵列物理结构设计</b>	有源相控阵天线常见的布局方式是采用砖块式 (stick) 布局或采用片式 (tile) 结构。	未来有源相控阵天线采用子阵级布局方式后，整个相控阵天线的生产加工成本会大幅降低。

资料来源：王小漠，张光义，《雷达与探测 信息化战争的火眼金睛》，中航证券金融研究所

另外，**数字阵列雷达**（数字有源相控阵雷达）作为有源相控阵雷达发展的重要方向，促进雷达中的核心部件 T/R 组件向**全数字化 T/R 组件以及多功能宽带 T/R 组件**发展。T/R 组件数字化之后可以缓解数量不断增多的 T/R 组件与接收机之间的配线压力，简化控制方式，可对接收信号预处理，降低主处理单元的采样负荷，集中精力进行数据处理，提高制造工艺的一致性，使得雷达整体可靠性得到进一步提升。另一方面，在全数字相控阵雷达中，宽带 T/R 组件可以完成发射功率的放大和回波信号的低噪声放大，保证系统可以向外辐射能量和良好的接收灵敏度，实现与宽带全数字相控阵天线辐射单元的连接，在电子对抗中具有重要的意义。

涉及雷达 T/R 组件及射频模块的上市公司主要包括**国睿科技、四创电子、亚光科技、振芯科技**。

### （3）信号处理器及芯片

随着各种新体制雷达相继问世，DSP 芯片对实时性、高数据处理速度性能上都提出了更高的要求。国内对 DSP 芯片技术自主可控也较为重视，如国家十二五“核高基”重大专项高端芯片中首个通过验收的 DSP 项目“华睿二号”，工作主频为 1GHz，每秒可完成 4000 亿次浮点运算，支持 64 位标准双精度，综合处理性能优于国际主流 DSP 芯片，标志着我国在高端 DSP 芯片研制领域的重大突破。作为信号处理的核心部件，



投资中应重点关注未来 DSP 芯片在小型化、高性能、低成本及可靠性强的发展方向。

另外，FPGA 芯片具有并行结构和高速时钟等性能特点，能够很好地满足雷达信号处理的实时性和大宽带需求，实现雷达处理功能和硬件加速，其发展趋势可以概括为**跨越器件组，甚至公司界限，设计越来越人性化，优化水平越来越高，速度越来越快**。国内多家研制单位虽然做了大量基础性的工作，取得了阶段性的科研成果，在器件架构、算法研究等方面都有一定突破，但与国外相比仍然有很大的发展空间。在投资中，仍应关注关于 FPGA 芯片的**基础研究以及高性能、低功耗、低成本及可靠性**等方面。

在芯片材料方面，由于机载和舰载电子探测系统在工作环境上具有一定的特殊性，电子探测系统的芯片对高温、低温、辐射等恶劣环境需有一定适应能力（提高可靠性），因此芯片制造材料也成为未来电子探测系统芯片发展中值得关注的投资热点。

图表 32：半导体材料的发展

半导体材料		性能	发展趋势	应用
第一代	锗 (Ge)	<b>优势：</b> 含量丰富、绝缘性好、提纯结晶简单； <b>缺陷：</b> 硅传输速度慢、功能单一。	逐步被砷化镓 (GaAs) 取代。	各类分立器件和应用极为普遍的集成电路、电子信息网络工程、电脑、手机、电视。
	硅 (Si)			
第二代	砷化镓 (GaAs)	<b>优势：</b> 高频、高温、低温性能好、噪声小、抗辐射能力强； <b>缺陷：</b> 导热性差，高污染，不适宜制作大功率器件。	制作高速、高频、大功率以及发光电子器件，是制作高性能微波、毫米波器件及发光器件的优良材料。	广泛应用于卫星通讯、移动通讯、光通信和 GPS 导航等领域。
第三代	碳化硅 (SiC)	<b>优势：</b> 禁带宽度大、击穿电场高、热导率高、电子饱和速率高及抗辐射能力强； <b>缺陷：</b> 成本高，相同使用条件的情况下，大约会比第一代产品贵 5~6 倍。	制作固态光源、电力电子、微波射频器件的优良材料，弥补第二代材料的不足。	应用于军用飞机、陆地坦克以及高性能雷达系统等军事装备。
	氮化镓 (GaN)			
	氮化铝 (AlN)			
	金刚石 (C)			
	氧化锌 (ZnO)			

资料来源：elecfans，中航证券金融研究所

从美国发展来看，新一代有源相控阵雷达已经开始用氮化镓器件替代砷化镓器件，可有效提高雷达功率，增强雷达探测距离。如美国海军最新伯克级 F3 驱逐舰用 SPY-6 有源相控阵雷达采用了氮化镓器件，整体探测性能明显提高，防空反导能力更强。一般认为 2020 年之后，氮化镓技术将成为有源相控阵雷达主流。国内在氮化镓器件等先进半导体材料研究上与国外仍具有一定差距，随着国外对国内在半导体器件方面禁运加强，**国产氮化镓器件等先进半导体材料方面将成为值得关注的投资热点**。

涉及雷达 DSP 芯片的上市公司包括**国睿科技，四创电子，盛路通信**；涉及新一代半导体材料的相关上市公司包括**海特高新，三安光电**。

#### (4) 天线

随着雷达技术的提升，天线技术整体的主要发展方向包括**多功能化（以一代多）、智能化（提供信息**

处理能力), **小型化、集成化及高性能化**(宽频带、高增益、低旁瓣、低交叉极化等)。雷达天线技术的进步最具代表性的应用在于相控阵雷达,相控阵雷达对天线的要求包括超宽带、多频带,功能、平台一体化、数字智能化等。针对这些功能需求和技术难题,多功能一体化天线阵面需要从**共形天线、多频天线、低/超低副瓣相控阵雷达天线、低成本二维相扫天线以及超宽带天线**方面开展探索研究,在电子探测系统产业投资中值得关注。

涉及雷达天线研发制造的上市公司包括**菲利华, 华讯方舟**。

### (5) 特种材料

随着当代电子探测系统在机载,弹载及星载等机动平台上得到了大量应用,以及现代信息化战争中各种电子对抗装备技术水平的提升,当前电子探测系统对小型化、轻量化以及隐身性的需求在日益提高。电子探测系统各部件及整体结构所使用的材料强度、重量以及隐身性值得关注。

投资中可以关注包括用于**机载电子探测系统的结构件,机箱、机壳,可减轻重量并提高强度的铝锂合金;用于天线座,低重量的镁合金;用于结构件和结构功能件的轻质复合材料;制造各种电子变压器、电感器、互感器等软磁器材的软磁合金**等材料的低成本,高端制造加工工艺技术等。

另外雷达中使用的吸波材料要求能够吸收红外波段和雷达波波段,被称为**红外隐身材料和雷达波隐身材料**。红外吸波材料主要用于雷达天线、天线座、牵引车、工作方舱等表面涂装,投资中可关注**低发射率薄膜材料,有半导体掺杂膜、金属薄膜、兼光学薄膜、复合膜、碳膜和氮化硼薄膜**。雷达波吸波材料分为复合材料和涂料两大类,投资中可关注具有**宽带吸波性能,可拓展到红外波段的涂料**。

涉及雷达新型材料的上市公司包括**宝钛股份, 博云新材**。

### (6) 电源

对发射/接收组件的分析中提到发射机主要采用真空管雷达发射机技术与固态雷达发射机技术。真空管雷达发射机电源一般采用高压低电流大功率的串联谐振电源,固态雷达发射机一般采用大电流大功率的中低压电源,与之相应的电源投资热点方向是**高压低电流输出的大功率电源以及大电流高效率大功率电源的提高功率,提高可靠性以及降低电源体积重量等技术**。

涉及雷达特种电源的上市公司包括**国睿科技, 金信诺, 华讯方舟**。

### (7) 后端数据处理

未来后端数据处理的**方向必然是更小的航迹误差,更精准的定位,更及时的目标跟踪,有效滤掉噪音污染**,那么硬件上需要配备**核心频率、加速频率更高的 CPU; 加速频率更高、显存容量更大的 GPU; 实现了基于 CPU 与 GPU 协同处理的雷达数据处理系统**。

另外近些年,深度学习算法被用于实现对信号的相应数据处理。与传统方法相比,深度学习算法具有**自动提取深层特征、获取较高准确率等优势**。目前深度学习在电子探测系统数据处理中亟待解决的问题:

一是需要降低阻碍深度学习发展的网络过拟合，二是深度学习由于部分被视为黑盒操作，每层输出特征不具有明确的物理意义，从而出现的阻碍改进网络架构设计的网络解译性较弱问题。在投资中可以关注以上深度学习在电子探测系统数据处理中亟待解决的问题——过拟合和可解译性。

涉及 GPU 芯片的上市公司包括景嘉微。

#### （8）雷达软件化技术

未来雷达的主要特征要具备：低截获、同时多功能、可重构、网络化。为了满足这些特征，雷达的软件化必然要匹配雷达技术发展。雷达软件化涉及到四个具体技术，一是可工作在大频段范围的**智能收发天线**；二是数模转换器可以在宽频段范围内工作的同时具有大采样速率（至少具有几百兆甚至几千兆），以及可以实现高精度数模转换并存储下来的**数据采集与存储技术**；三是需要数字信号处理系统具有可以对数模转换器输出的数字信号进行**高速实时信号处理技术**（如并行处理）；四是为提高软件化雷达的工作性能，需要研究和开发性能先进的数字信号处理方法和丰富的**功能软件模块（系统软件技术）**。以上四方面即在雷达数字化向雷达软件化技术过渡中，行业投资可以重点关注的热点问题。

#### （六）风险提示

1. 电子探测系统核心组件技术发展不及预期。
2. 市场规模增长不及预期。



AVIC



## 投资评级定义

我们设定的上市公司投资评级如下：

- 买入：预计未来六个月总回报超过综合指数增长水平，股价绝对值将会上涨。  
持有：预计未来六个月总回报与综合指数增长相若，股价绝对值通常会上涨。  
卖出：预计未来六个月总回报将低于综合指数增长水平，股价将不会上涨。

我们设定的行业投资评级如下：

- 增持：预计未来六个月行业增长水平高于中国国民经济增长水平。  
中性：预计未来六个月行业增长水平与中国国民经济增长水平相若。  
减持：预计未来六个月行业增长水平低于中国国民经济增长水平。

我们所定义的综合指数，是指该股票所在交易市场的综合指数，如果是在深圳挂牌上市的，则以深圳综合指数的涨跌幅作为参考基准，如果是在上海挂牌上市的，则以上海综合指数的涨跌幅作为参考基准。而我们所指的中国国民经济增长水平是以国家统计局所公布的国民生产总值的增长率作为参考基准。

## 分析师简介

李欣，SAC 执业证书号：S0640515070001，分析师，从事军工行业研究。

## 分析师承诺

负责本研究报告全部或部分内容的每一位证券分析师，在此申明，本报告清晰、准确地反映了分析师本人的研究观点。本人薪酬的任何部分过去不曾与、现在不与、未来也将不会与本报告中的具体推荐或观点直接或间接相关。

风险提示：投资者自主作出投资决策并自行承担投资风险，任何形式的分享证券投资收益或者分担证券投资损失的书面或口头承诺均为无效。

### 免责声明：

本报告并非针对或意图送发或为任何就送发、发布、可得到或使用本报告而使中航证券有限公司及其关联公司违反当地的法律或法规或可致使中航证券受制于法律或法规的任何地区、国家或其它管辖区域的公民或居民。除非另有显示，否则此报告中的材料的版权属于中航证券。未经中航证券事先书面授权，不得更改或以任何方式发送、复印本报告的材料、内容或其复印本给予任何其他人。

本报告所载的资料、工具及材料只提供给阁下作查照只用，并非作为或被视为出售或购买或认购证券或其他金融票据的邀请或向人作出邀请。中航证券未有采取行动以确保于本报告中所指的证券适合个别的投资者。本报告的内容并不构成对任何人的投资建议，而中航证券不会因接受本报告而视他们为其客户。

本报告所载资料的来源及观点的出处皆被中航证券认为可靠，但中航证券并不能担保其准确性或完整性，而中航证券不对因使用此报告的材料而引致的损失而负任何责任，除非该等损失因明确的法律或法规而引致。并不能依靠本报告以取代行使独立判断。中航证券可发出其它与本报告所载资料不一致及有不同结论的报告。本报告及该等报告反映分析员的不同设想、见解及分析方法。为免生疑，本报告所载的观点并不代表中航证券及关联公司的立场。

中航证券在法律许可的情况下可参与或投资本报告所提及的发行人的金融交易，向该等发行人提供服务或向他们要求给予生意，及或持有其证券或进行证券交易。中航证券于法律容许下可于发送材料前使用此报告中所载资料或意见或他们所根据的研究或分析。