

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.06.030

引用格式:张翼周.新体制民用航海雷达的应用与发展[J].电讯技术,2014,54(6):857-862.[ZHANG Yi-zhou. Application and Development of New System Civilian Navigation Radar[J]. Telecommunication Engineering,2014,54(6):857-862.]

新体制民用航海雷达的应用与发展*

张翼周**

(成都天奥信息科技有限公司,成都 611731)

摘 要:传统磁控管雷达已占据民用航海雷达领域较长的一段时间,新技术新体制在这一领域的应用给民用航海雷达发展带来了新的机遇。以近年出现的新型民用航海雷达为背景,简述了民用航海雷达的分类、原理组成和发展现状,介绍了航海雷达使用的新技术以及在溢油探测、海浪监测领域的新应用,指出固态发射、数字化、综合导航、低辐射将是民用航海雷达的发展方向,这些新技术的使用将提高航海雷达的可靠性和环境适应性。

关键词:航海雷达;固态功放;脉冲压缩;海杂波抑制

中图分类号:TN95 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)06-0857-06

Application and Development of New System Civilian Navigation Radar

ZHANG Yi-zhou

(Chengdu Spaceon Technology Co.,Ltd., Chengdu 611731, China)

Abstract: Traditional magnetron radar has dominated civilian navigation radar field for a long time and the application of new technology and new system in this field brings new development opportunities for civilian navigation radar. Under the background of the emergence of new civilian navigation radar in recent years, this paper expounds the classification, principle, development status of civilian navigation radar, and then introduces the new technology used in navigation radar and new applications of navigation radar, such as oil spill detection and wave detection. It's pointed out that solid-state emission, digitization, integrated navigation, low radiation will be the development trends of civilian navigation radar and the use of these new technologies will improve the reliability and environmental adaptability of navigation radar.

Key words: navigation radar; solid state power-amplifier; pulse compression; sea clutter suppression

1 引 言

自 20 世纪初以来,雷达伴随着最初的军事方面需求,得到了迅速发展。经过近百年的发展,雷达已经演变出了多种多样的形式,并广泛应用于航空、航天、航海、勘探、气象观测等多个领域。

航海雷达是雷达的主要应用领域之一,民用航海雷达更成为雷达消费市场的主力军。民用航海雷达主要有两种应用形式:船载雷达用于避碰、导航;

港口、海岸陆基雷达用于预警、航运管理。而人们通常说的民用航海雷达指的是前者,其主要用途是通过提供与本船有关的其他海面船只、障碍物、海岸线的位置信息来避免碰撞。

在过去较长的一段时期,雷达新体制新技术的应用主要集中在军用雷达领域,而在民用航海雷达领域,新技术的应用则相对进展缓慢。直到 21 世纪的最初 10 年,磁控管仍被作为民用航海雷达的基本功

* 收稿日期:2014-03-26;修回日期:2014-06-05 Received date:2014-03-26;Revised date:2014-06-05

** 通讯作者:cd_zyz@sina.com Corresponding author:cd_zyz@sina.com

率发射源被大量使用。2004 年起,国际海事组织(IMO)开始鼓励使用相参雷达,以在严重的海杂波条件下提高目标探测能力^[1]。自此,固态功放、脉冲压缩、数字信号处理等技术才逐渐向民用航海雷达领域延伸。本文以目前已面市的几款国外新型雷达为背景,对民用航海雷达新体制应用及关键技术进行论述,并对航海雷达发展方向、延伸应用进行介绍。

2 航海雷达概述

根据国际电信联盟(ITU)的要求,民用航海雷达允许的工作频段是9.3~9.5 GHz(X 频段)和2.9~3.1 GHz(S 频段)。船载航海雷达通常安装在船舶中轴线上,置于桅杆的雷达平台上,通过天线的机械水平旋转扫描的方式来探测目标。

船载雷达的特殊安装部位决定了它通常工作于海上高温、低温、盐雾等恶劣环境中,而探测对象容易淹没于严重的雨雪杂波、海杂波中,船舶移动平台也会对雷达波束造成不利影响。同时,航海雷达对航行安全的重要作用,要求其具备长时间、高可靠工作的能力。

2.1 航海雷达分类

航海雷达以发射机类型分类,可分为磁控管雷达和固态雷达。我们通常称磁控管雷达为传统雷达,它是长期以来绝大部分民用航海雷达采用的形式,具有成本低、结构简单的优势。但磁控管雷达有寿命短、无法实现全相参检测等先天不足,无法适应未来航海雷达发展的需要;而固态雷达采用数字信号产生器及先进的微波功率半导体技术,可克服磁控管雷达的先天不足,代表了未来航海雷达的发展方向。有时,人们也按雷达测距原理将航海雷达分为脉冲雷达与连续波雷达。脉冲雷达以发射信号与回波的时间差为测距依据,连续波雷达则以发射信号与回波间的差频为测距依据。

2.2 航海雷达原理及组成

航海雷达由天线、发射机、接收机、信号处理器和显控单元组成。大多数航海雷达的天线为水平极化,采用波导缝隙阵形式,要求的垂直波束宽度通过一个开口的线性喇叭来获得。某些低功率发射的小型航海雷达还可采用印制天线阵形式。

雷达发射机完成波形产生与功率放大,接收机完成回波信号的接收和下变频。脉冲雷达的发射机与接收机分时工作,通过收发开关分时复用一副天线。连续波雷达的发射机和接收机同时工作,拥有独立的发射和接收天线。信号处理器完成信号处理

和数据处理,并把处理结果送给显控单元显示。

3 航海雷达现状

当前市场上的主流航海雷达产品仍采用点频脉冲信号形式、磁控管发射机、杆式天线。2006 年,英国凯文休斯(KelvinHughes)公司生产出了第一台 S 频段固态发射机的民用航海雷达系统 SharpEyeTM,2008 年,该公司又推出了 X 频段的 SharpEyeTM^[2]。2011 年,日本 JRC 公司也推出了其 S 频段固态脉冲导航雷达产品 JMA-9172-SA^[3]。同年,挪威 NAVICO 公司推出了其新一代的固态发射连续波雷达产品 Broad-band 4GTM^[4]。2013 年,日本古野公司也推出了配备 S 频段固态收发信机的 FAR-3000 雷达^[5]。新体制在这一系列民用航海雷达的出现,不仅归功于相关国际组织的推动,还归功于微波功率半导体、数学信号处理芯片等技术、工艺的成熟和大众化。

航海雷达工作频率仍以 S 频段和 X 频段为主。S 频段射频信号在雨雾中的衰减小,海杂波平均后向散射系数低,因此在恶劣气候与高海况情况下人们更倾向于使用 S 频段雷达;X 频段天线尺寸小,角度分辨率高,更适合船只在彼此靠近的情况下进行机动时使用。通常,中型以上船舶会同时装备 X 频段与 S 频段雷达,满足不同场景的应用。小型船舶由于空间限制,则只安装 X 频段雷达。

4 航海雷达新体制应用及发展方向

新体制在航海雷达上的应用主要体现在固态功放的使用,以及与之伴随的中频数字化、脉冲压缩、动目标检测等技术的使用。新技术的使用提高了航海雷达的远距离探测能力、距离分辨率以及杂波中检测动目标的能力。KelvinHughes 公司给出了传统雷达与其固态雷达 SharpEyeTM在不同海况下对几种典型目标的探测性能对比^[6],如表 1 所示。

表 1 传统雷达与固态雷达 80% 发现概率的距离
Table 1 Range for an 80% detection probability of conventional radar and solid-state radar

船舶类型	海况	X 频段 25 kW 传统雷达 探测距离/n mile	X 频段 200 W 固态雷达 探测距离/n mile
小艇	3 级	3.3	5.9
	5 级	0.0	4.3
直升机	3 级	18.2	18.5
	5 级	0.0	15.5
护卫舰	3 级	13.9	16.3
	5 级	13.7	16.0

由表 1 可见,X 频段 25 kW 传统雷达在平静海况下,只能在 3.3 n mile 内有效发现小型船舶,而在 5 级海况下,根本无法识别这类目标;X 频段 200 W 固态雷达在平静海况下,对小型船舶的有效探测距离提升到 5.9 n mile,而在 5 级海况下,可在 4.3 n mile 内有效发现这类目标。

4.1 固态功放的应用

固态功放能在民用航海雷达上使用得益于微波功率半导体器件的日益成熟。S 频段通常采用硅双极型晶体管或者 LDMOS 管,芯片本身成本较低,而且因为单管输出功率高(可达 100 W),功率合成所需要的芯片数少,因而成本相对较低。在 X 频段,目前的功放芯片多采用 GaAs 材料,单管输出功率低(通常为 20 W)^[7],若需要 200 W 的输出功率,则需要通过多管合成,成本较高。在民用领域,只能通过合理选择相关指标(如环境条件、工作频宽、占空比),并依靠大批量来降低成本。另外,应用最新 GaN 技术,也可以减少芯片数量,降低成本。“宽禁带”半导体材料的 GaN、SiC 功率器件击穿强度高,饱和电子漂移速度快,使得其具有可靠性高、功率密度大、效率高、导热率大的特点^[8],是制造大功率固态功放的理想器件。但目前在国内使用 GaN 材料的 X 频段大功率功放管还不够成熟,制造商较少,主要还是依赖进口。图 1 为国产 X 频段 60 W 固态功放。

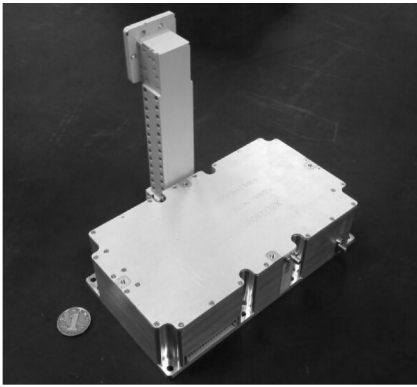


图 1 X 频段 60 W 固态功放

Fig. 1 Domestic X-band 60 W solid-state power amplifier

固态雷达在工作原理上与磁控管雷达的区别,使其较磁控管雷达有明显的性能优势。固态功放使用直流低压供电,降低了人员触电风险,且设备可靠性更高;其射频发射峰值功率比磁控管雷达可降低 100 ~ 150 倍,射频辐射更低,电磁兼容性更好,对人员危害小;固态雷达还可以避免磁控管固有的开机预热时间,实现开机即用^[9]。

数字信号产生器、固态功放和数字控制芯片的应用,使雷达发射脉冲的时间和频率控制变得灵活方便。我们可以在一次工作周期发射一串组合脉冲,来同时满足近、中、远距离的探测需要。

根据不同量程,合理选择脉冲数、脉冲长度、回波采集起止时间等参数,便可以得到令人满意的近距盲区 and 距离分辨率指标。通常,在中远量程,多选择三脉冲的组合,中、长脉冲满足远距离目标探测需要,短脉冲起到补盲作用。

X 频段 SharpEye™ 雷达采用固态功放发射,工作频率 9.2 ~ 9.5 GHz,峰值发射功率典型值达 200 W,最大占空比 13%,功放工作电压 15 V,可靠性时间大于 50 000 h。它采用 3 脉冲框架发射,远量程的近距盲区仅 30 m^[10]。以上指标较传统磁控管雷达有明显优势。

4.2 脉冲压缩技术

脉冲压缩技术与固态发射技术是密不可分的。固态功放的发射功率很难达到千瓦级的水平,但可通过宽脉冲发射来提高平均功率,以保证足够的最大作用距离。但宽的点频脉冲会减低信号带宽,使雷达距离分辨率变差。为解决这一矛盾,脉冲压缩技术应运而生。它通过在接收端加入脉冲压缩网络来获得窄脉冲,以提高距离分辨率。

脉冲压缩技术要求发射脉冲应具备非线性的相位谱,即脉冲时宽与频谱宽度乘积远大于 1。在民用航海雷达上,多采用线性频率调制的长脉冲。在接收端的脉冲压缩网络需具备与发射信号“相位共轭匹配”的相频特性,即相位色散绝对值相同而符号相反,以消除输入回波信号的相位色散^[11]。

X 频段 SharpEye™ 雷达,按照其典型发射功率和占空比工作,再结合接收端 1 000 : 1 的脉冲压缩比,可得到 200 kW 的等效峰值发射功率。

4.3 中频数字化及数字信号处理

中频数字化接收能够大幅度改善 I/Q 信号幅度一致性与相位正交性,提高镜频抑制比,改善目标检测性能。窄带中频数字采样要求采样信号频率与输入中频频率的关系为 $f_{IF} = (2n+1)f_s/4$,且 $f_s \geq 2B_s$,其中 f_{IF} 为中频频率, f_s 为采样频率, B_s 为中频信号带宽。

数字信号处理能够大大提高雷达信号处理的动态范围,减小模拟处理电路的元器件参数离散性影响,通过软件程序灵活实现多种先进信号处理算法,升级方便。数字信号处理技术在现代军用雷达中早已得到广泛应用,由于多方面的因素,在导航雷达中的应用才刚刚起步。

4.4 海杂波抑制

海面回波大小的影响因素包括环境(风向、风速、浪高、持续时间、涨潮、污染)与雷达参数(频率、极化、入射角、波束宽度、脉宽),正是这些复杂的因素,导致海杂波随时随地变化。多年来,为了提高海杂波中检测弱小目标的概率,专家、学者提出了大量的海杂波模型。虽然海杂波形成机制还未有定论,杂波模型也远未达到普适要求,但相对比较认可的海杂波模型有 3 种:对数正态、韦伯尔与 K 分布。理论的杂波模型通常不适合用于优化。针对某个特定地区海情进行的优化可能对其他地区不是最理想的解决方案,因此,要设计一款全球有效的产品,需要使用许多地区的海杂波数据。优化雷达在海杂波下目标检测性能的传统方法是仔细调整探测门限和调整灵敏度时间控制(STC)形状。STC 基本的用途是除去接收信号与距离有关的动态范围。普遍的原则是:在近距离,STC 遵循 R-4 法则,在海杂波很严重的区域,转至 R-3 法则。法则转换的距离由天线安装高度和手动海杂波控制参数共同决定。具体的 STC 曲线形状和手动控制的效果是基于不同制造的实际经验。即使是在手动控制之下,STC 曲线的详细形状内可能有一个复杂的适应元素来在更大的范围内优化门限。

尽管 STC 有助于把门限设置到合适的水平,但是它不能消除海杂波中的尖峰成分,从而影响目标检测效果。然而,在一个航海雷达典型的天线扫描时间(2~3 s)内,尖峰信号通常是不相关的,而目标回波通常是相关的。因此,扫描间积累可以提高目标杂波比,是最简单有效的抑制海杂波方法。

4.5 动目标检测与跟踪

当雷达与目标之间存在相对径向速度时,雷达发射的信号被具有径向速度的目标反射,使目标回波信号的载频相对于雷达发射载频发生了偏移,即产生了多普勒效应。多普勒频移 $f_d = -2V/\lambda$,其中 V 为雷达与目标间相对径向速度, λ 为雷达载波波长。通过对多普勒频移的检测、分析,在感兴趣的多普勒频带外抑制杂波而对感兴趣的多普勒频带内的目标进行分辨和增强,从而达到抑制杂波,区分动静目标,测量动目标的径向速度的目的^[12]。

由于船载雷达处于移动平台的特殊环境,船舶自身的移动会使雷达给出完全错误的速度信息。这时,它需要从外部传感器获得当前船舶航速、航向等信息来动态补偿计算,修正这种错误。

船员往往会对逼近本船的动目标感兴趣。尽早

获得这类目标的航速、航向信息,对航行安全有重要意义,这就需要对目标进行跟踪。IMO 的标准要求:对于小于500 gt的船舶,雷达目标跟踪能力的基本要求是最小 20 个目标;500~10 000 gt 的船舶要求是 30 个目标;10 000 gt 以上的船舶要求是 40 个目标。实际系统大都超过了这些最低的要求。

4.6 数据融合

一部船载雷达可能会接收来自很多导航设备的数据,例如 AIS、GPS、罗盘、计程仪、回声探测器,也可能与电子海图系统或者其他雷达显示器交流跟踪信息,这些数据交换都应该遵循 IEC61162 的规定。2008 年的 IMO 标准,对旧标准一个较大的改动就是所有的新雷达必须能够显示自动识别系统(AIS)目标,雷达显示器应可以存取这些目标的相关信息。IMO 标准中还包含了把电子海图数据集成到雷达图像背景上的要求。配有这个选配设备的雷达被称为海图雷达。目前部分雷达产品已经具备这些功能,如图 2~3 所示。图 2 是日本古野公司 FAR2117 型脉冲雷达在珠江某航段的雷达与 AIS 综合显示图像,图 3 是天奥科技公司 SPCR-20 型连续波雷达在长江江津大桥附近的雷达与电子海图综合显示图像。

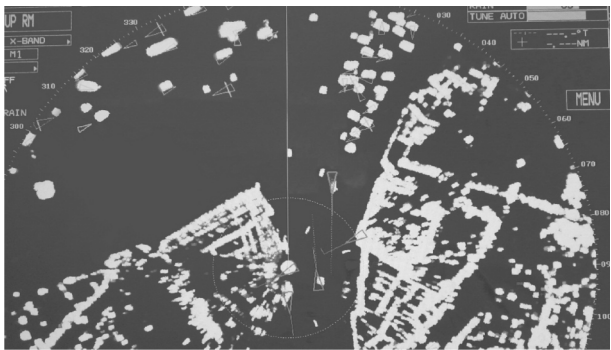


图 2 雷达与 AIS 综合显示
Fig. 2 Comprehensive display of radar and AIS

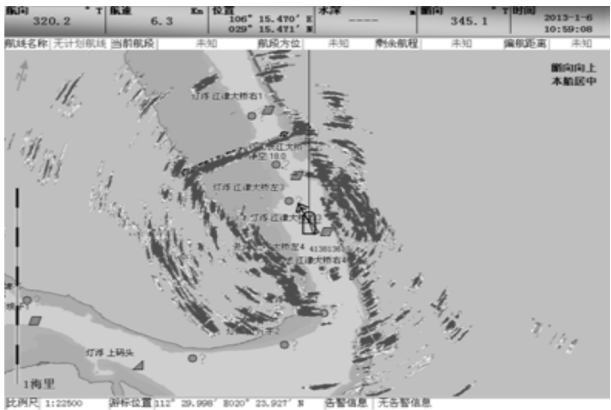


图 3 雷达与电子海图综合显示
Fig. 3 Comprehensive display of radar and ECS

AIS 通过自组织时分多址 (SOTDMA) 通信协议的广播系统交换信息。由于其较低的工作频率, AIS 在非视线状况下有较好的能力, 如果目标船舶上有航行数据变化, AIS 能迅速地报告目标在航向或路线上的变化。AIS 不受海杂波的影响, 如果结合 GNSS 位置数据, 它能准确地报告船舶绝对位置。AIS 提供了避免与合作目标相撞的可能, 但是不能假定所有的船舶都装备了 AIS, 或者目标船只的 AIS 是正常工作的。雷达探测目标, 可以不依赖目标船舶的无线发射信号, 还可以探测船舶以外的目标, 但雷达的工作易受海杂波等海上环境影响, 也不能报告目标船的具体身份信息。由于雷达与 AIS 的这种互补性, 将两个系统数据融合起来对于航海安全来说是非常有益的。

现代视频显示和数据处理系统的能力以及大众化的价格, 使得我们有一定的灵活度向用户呈现尽可能丰富的信息。用矢量化电子图表数据作雷达图像底图已经变得越来越普遍。电子海图能显示港口、岛屿、浅滩或海底障碍物等丰富信息, 但其信息有一定时效性, 若地物环境发生变化, 需要人工更新地图数据。

将雷达、AIS、电子海图三者结合使用, 实现优势互补, 提供全面导航信息, 可大大增强雷达的避碰能力和目标跟踪能力, 为在杂波中探测目标提供额外的支持。三者融合显示, 能大大提高导航信息的精确性。随着 AIS 与电子海图的广泛应用, 雷达显控终端内置电子海图, 并能接入、显示 AIS 信息已经成为必然趋势。

4.7 连续波雷达

连续波雷达是有别于脉冲雷达的另一种体制雷达, 它利用接收信号与发射信号的差频来测距, 锯齿形频率调制是最简单的调频连续波应用。连续波雷达也采用固态功放发射, 但其发射的射频功率较脉冲雷达低得多, 通常仅几毫瓦; 发射时宽较脉冲雷达也长得多, 通常达到 ms 级。超低的发射功率带来安全性、可靠性的提升和环保的特点, 但其探测距离会受到较大限制。目前, 市售的连续波雷达大都配备小型天线, 做成盘式雷达形式。

挪威 Broadband 4G™ 雷达就是采用连续波工作体制, 工作于 9.3 ~ 9.4 GHz, 固态发射峰值功率仅 165 mW, 扫描重复频率 200 ~ 540 Hz, 最大扫描带宽 75 MHz, 整机工作状态功耗典型值仅 20 W, 整机质

量 7.4 kg。显然, 船用连续波雷达较脉冲雷达在重量、体积及产品售价上有明显的优势, 并且可在游艇、渔船等小型船舶上, 发挥其环保性优势。但连续波雷达发射功率、发射时间、天线等指标的特殊性使其不满足 IMO 的国际海上人命安全公约 (SOLAS) 要求。2004 年, IEC62252 的颁布使这类小型雷达有了可以遵循的国际公认标准。虽然, 目前连续波雷达仅能安装在非 SOLAS 船舶上, 但它代表了雷达向绿色环保方向发展的趋势。

5 航海雷达的延伸应用

普通 X 频段脉冲式航海雷达, 通过适当的软硬件改造, 可在溢油探测、海浪监测等特殊应用领域发挥作用。海洋石油资源开采运输过程中发生的输油管破裂、运油船泄漏以及突发性溢油事故, 给海洋生态会造成重大损害。及时准确发现溢油, 有利于迅速回收溢油, 将溢油对海洋生态的影响降到最低。由于溢油油膜对厘米波的反射特性表现为暗信号, 利用 X 频段小信号探测原理, 可将数字化的中频信号经过杂波处理、脉冲滤波等处理, 得出溢油信号输出。为提升探测效果, 还需换用高增益、垂直极化天线。图 4 为 Miros OSD 系统将 X 频段普通航海雷达改造为溢油探测雷达前后的雷达图像对比^[13]。

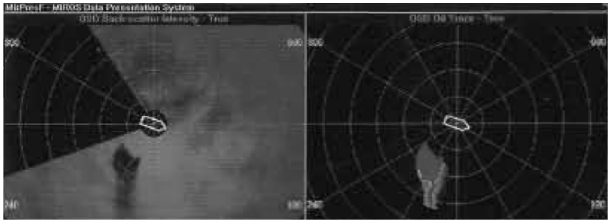


图 4 X 频段普通航海雷达与溢油探测雷达图像对比
Fig.4 Comparison of detection image between X-band ordinary marine radar and oil spill detection radar

海浪监测雷达作为一种特殊的气象雷达, 在航海领域也有其重要作用。海浪作为常见的海洋波动现象, 对海洋研究和开发利用具有重要意义。获得有效的海浪实时数据, 如海浪的波高、方向和周期等, 对海岸保护和离岸海上活动 (如海上石油钻井平台或船只) 都具有重要价值^[14]。目前常用的浮球测浪方式虽然准确, 但操作成本高, 且数据传输环节易出现信息安全问题。雷达测浪方式不仅方便安全, 且覆盖范围广, 是很好的海浪监测手段, 其原理是: 当 X 频段雷达波入射到海面时, 海浪中波长与

其相当的毛细波产生 Bragg 共振散射,同时又被较长的重力波调制,形成雷达回波。回波信息强度也随位置的变化形成强、弱相隔区域,看似波浪。通过分析雷达接收的海面回波随时空的变化,可以得到实时的方向波浪谱和表面海流的信息^[15]。

6 结束语

目前,航海雷达在世界范围已得到广泛应用。IMO 于 2008 年通过的新标准要求排水量 300 gt 以上的船必须配备至少一部 9 GHz 雷达,在世界范围内,大约有 50 000 艘这样的船只。实际上,很多大型船舶配备不止一部雷达,且大多数排水量不足 300 gt 的船舶会主动配备航海雷达。因此,民用航海雷达的市场需求非常大。我国作为海洋大国、航运大国,为航海雷达的应用提供了广阔空间,其市场潜力巨大。而现状是,我国的民用航海雷达市场主要被日本雷达制造商所占据。研制具有自主知识产权的新体制民用航海雷达,不仅是顺应我国航海科技发展的需要,也是经济发展的需要,具有十分重要的意义。

计算机、微波功率半导体、数学信号处理芯片等技术的迅速发展为雷达产品的研制提供了强大的技术支撑。我们在充分借鉴国外雷达发展经验的基础上,应积极探索新体制新技术,为市场提供性能更优、可靠性更高的航海雷达产品。目前,X 频段固态功放管技术成熟度和普及度还不够,这使固态雷达与磁控管雷达相比,在价格上还不具优势。另外,航海雷达在溢油、海浪探测领域的应用算法还需要进一步的研究,以促进其探测效果的提升和相关产品的市场化。

参考文献:

- [1] Skolnik M I. 雷达手册[M]. 3 版. 南京电子技术研究所,译. 北京:电子工业出版社,2010.
Skolnik M I. Radar Handbook[M]. 3rd ed. Translated by Nanjing Institute of Electronic Technology. Beijing: Publishing House of Electronic Industry,2010. (in Chinese)
- [2] Solid State Navigation and Situation Awareness Radar [EB/OL]. [2014-01-10]. <http://www.kelvinhughes.com>.
- [3] JMA-9172-SA Solid State Radar[EB/OL]. [2014-01-10]. <http://www.jrc.co.jp/eng>.
- [4] Broad band 4G radar[EB/OL]. [2014-01-10]. <http://www.simrad-yachting.com>.
- [5] Chartradar models; FAR-3000series [EB/OL]. [2014-01-10]. <http://www.furuno.com>.
- [6] New Threats Demand New Solutions [EB/OL]. [2014-01-10]. <http://www.kelvinhughes.com>
- [7] 郑新,李文辉,潘厚忠. 雷达发射机技术[M]. 北京:电子工业出版社,2006.
ZHENG Xin, LI Wen-hui, PAN Hou-zhong. Technology of Radar Transmitter[M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry,2006. (in Chinese)
- [8] 胡明春,周志鹏,高铁. 雷达微波新技术[M]. 北京:电子工业出版社,2013.
HU Ming-chun, ZHOU Zhi-peng, GAO Tie. New Technology Microwaves to Radar [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,2013. (in Chinese)
- [9] 彭祥龙. 船用导航雷达的技术发展及最新应用[J]. 电讯技术,2013,53(9):1247-1252.
PENG Xiang-long. Technology evolution and new applications of marine navigation radar[J]. Telecommunication Engineering,2013,53(9):1247-1252. (in Chinese)
- [10] Multifunction by Design-Mantadigital Radar [EB/OL]. [2014-01-10]. <http://www.kelvinhughes.com>.
- [11] 张明友,汪学刚. 雷达系统[M]. 3 版. 北京:电子工业出版社,2011.
ZHANG Ming-you, WANG Xue-gang. Radar Systems [M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronic Industry,2011. (in Chinese)
- [12] 杨晓. 新体制固态航海雷达及其应用[J]. 航海技术,2013(2):37-38.
YANG Xiao. New System Solid State Marine Radar and its Application[J]. Navigation Technology,2013(2):37-38. (in Chinese)
- [13] Egset C N. Oil Spill Detection System Based On Marine X-band Radar[J]. Sea Technology,2007(2):41-45.
- [14] Dankert H, Horstmann J, Rosenthal W. Wind- and Wave-Field Measurements Using marine X-Band Radar-Image Sequences[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering,2005,30(3):534-542.
- [15] Emery W J, Thomson R E. Data analysis methods in physical oceanography[M]. New York:[s. n.],2001:21-29.

作者简介:



张翼周(1978—),男,四川什邡人,2004 年于电子科技大学获硕士学位,现为工程师,主要研究方向为船舶自动识别系统。

ZHANG Yi-zhou was born in Shifang, Sichuan Province, in 1978. He received the M. S. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2004. He is now an engineer. His research concerns automatic identification system.

Email:cd_zyz@sina.com