

# 高效紧凑的高频地波雷达天线阵列设计

高火涛,柯亨玉,杨子杰,吴世才,侯杰昌

(武汉大学电子信息学院,湖北武汉 430079)

**摘要:** 分析了高频地波雷达阵列单元天线和阵列的设计原理,提出并成功设计出了一套高效紧凑、一发八收、收发共用的高频地波海洋环境监测雷达天线阵列。计算机模拟和现场试验结果说明了本文设计方案的合理性。

**关键词:** 高频地波雷达;二元八木天线;阵列天线分析与设计

**中图分类号:** TN822.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 06-0919-03

## Phased Array Design for a High Performance Compact High-Frequency Surface Wave Radar

GAO Huo-tao, YANG Zi-jie, KE Heng-yu, WU Shi-cai, HOU Jie-chang

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China)

**Abstract:** This paper Analyzes the design principle of the single unit and array antennas for the high-frequency surface wave radar (HF-SWR). The HF-SWR for the antenna system featured with "a linear phased array composed of eight two-element Yagi-Uda unit and T/R bi-functional array with one transmitting and eight receiving" has been proposed and successfully designed. The electronic characteristic has been analyzed in detail. Experiments show that the array system meets all the indexes the system demands.

**Key words:** high-frequency surface wave radar; Yagi-Uda antenna; array antennas design and analysis

### 1 引言

高频地波超视距雷达能探测到视距以外的海上移动舰船、低空飞行的目标以及大面积的海面动力学参数,已被广泛应用于海洋环境监测,如美国的 CODAR 的 SeaSonde 系统、英国的 OSCAR 系统和加拿大的 HF-GWR 系统等<sup>[1-3]</sup>。但由于收发天线受隔离度的限制,国际上高频地波雷达多数采用收发分开,收发站之间一般为几百米或更远<sup>[4]</sup>。随着技术的进步,现代短波收发设备的电磁兼容性指标已有了很大的改善和提高,使收发共用成为可能。

武汉大学于 1997 年承担了国家“863”计划海洋领域“高频地波雷达海洋环境监测技术”的研究<sup>[5]</sup>。项目要求,该雷达主要用于探测 200km 内海洋表面动力学参数。考虑到实际的海岸条件及能根据当时的噪声和电磁干扰优选合适的工作频率,在计算机仿真的基础上,提出雷达天线的主要参数为:雷达工作频率 7~8MHz,发射天线增益不低于 6dB,波束半功率宽 90~120°,驻波比小于 2;接收阵长不大于 120 米,天线阵 H 面方向图的半功率宽约 150°。本文根据项目总体要求,设计了一副高效紧凑、收发共用的相控阵天线系统。

### 2 单元天线形式的确定

单元天线的选取主要基于以下几个方面的考虑:第一是要有足够的收发效率。大驻波比不仅影响发射效率,同时会使接收机信噪比下降,测向误差增大;第二是天线阻抗频带尽可能宽,使之易于与接收机匹配,还能根据当时的噪声和电磁干

扰实现变频探测;第三是天线具有一定的空间选择性,使其具有一定的空间抗干扰能力;第四是结构形式要简单,要能抗台风,防腐、防盐雾。基于此,阵列单元天线选以加载中馈天线为主体,另加一无源反射器组成二元八木天线。其中引向器、反射器及两天线的间距分别为 7 米、10.5 米和 8 米。

### 3 阵列天线的工作原理分析

为有效探测 120°扇区、径向距离达 200 公里海面动力学参数,要求雷达有较高的角度分辨率。由于雷达工作在短波段,如果仅依靠硬件来实现高角度分辨率,意味着雷达要配以数百米,乃至数千米庞大的相控阵天线,工程造价巨大,实际应用困难。为解决这一矛盾,在雷达实施过程中,提出以八组二元八木天线组成 119 米长的线阵(两二元八木天线模块之间间距为 17 米),利用超分辨率空间谱估计方法(如 MUSIC 等算法)以获得高角度分辨率的海流及海面目标信息;采用数字波束形成,以八个波束覆盖水平方位 120°扇面来获得一定角分辨率的海面风、浪信息。此即为“一发八收、收发共用、宽窄波束相结合、软硬件技术相配合”的工作模式:

当天线阵列处于发射状态时,阵中 4 号或 5 号天线被激励而发射电磁波。与此同时,为了保护接收机,在收发开关的作用下,阵中其余的七个单元天线均处于短路状态,被激励的天线与其余十五根天线一起构成发射天线阵。发射波束呈宽波束,在雷达工作频带内,波束半功率宽度约 90°~120°。

当阵列处于接收状态时,在收发开关的作用下,阵中八个天线单元同时接收,经数字波束形成约 15 波束.图 1 为雷达收发天线的组成及工作原理示意图(其中,  $T$ 、 $TR_i$  和  $R_i$  分别表示发射机、收发开关和接收机,  $i = 1, 2, \dots, 8$ ).

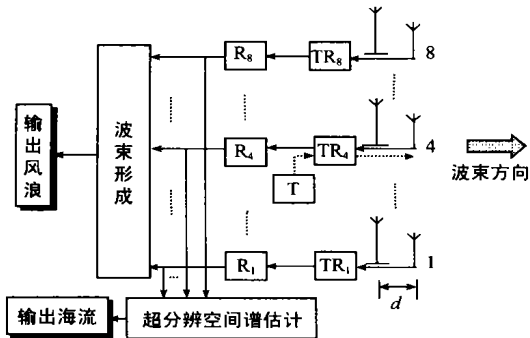


图 1 雷达收发天线的组成及工作原理示意图

### 4 结果及分析

图 2 是计算机模拟和实测的二元八木天线的方向图.图 3 是考虑互耦时 5、8 号接收天线在阵中的方向图(其中 4 号天线的阵中方向图也是阵列作为发射时的发射方向图).

比较图 2 与图 3 可知,单元在阵中的方向图与孤立单元的方向图存在差异.这是因为在本天线阵列中,阵中存在多个天线单元,单元方向图变形就是由于天线单元之间相互耦合引起的.由于这种耦合作用,会给测向用的超分辨率算法(如 MVM 等方法)的精确实施带来一定的难度.本项目利用作者模拟的阵中单元方向图结合 MVM 算法计算的海流与 CODAR 的 SeaSonde 探测的结果相比相当一致,与国家海洋局第一研究所和青岛海洋大学主持的定点海流计海上现场观测的结果对比符合也很好,海流精度保持在 10cm/s 以下,相对误差 10% 左右<sup>[6]</sup>.由此说明,本文模拟的阵中单元方向图基本上反映了天线方向图的真实情况.

图 4 是考虑互耦时阵列的八波束扫描方向图;图 5 是利用“聚焦法”<sup>[7]</sup>获得的阵列扫描方向图.从这两图可以看出,阵列波瓣宽度约 15°,理论和实验吻合较好.其中存在的差异(如波瓣宽度、副瓣电平)主要是测量距离太近引起的<sup>[7]</sup>.

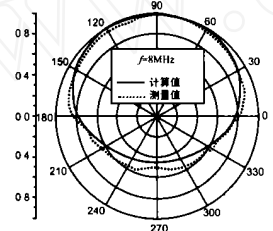


图 2 模拟和实测的单元天线方向图

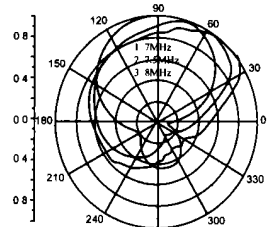


图 3 单元天线在阵中的模拟方向图

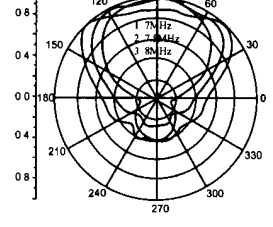


图 3 单元天线在阵中的模拟方向图

图 6 表示 4 号天线发射时测量的近场辐射方向图(其中实线、° 线和 \* 线分别表示 7MHz、7.6MHz、8MHz 的方向图;理论值见图 3 的单元 4 图).从发射方向图可以看出,在雷达工作的频带内,其发射方向图的半功率宽约在 90°~120° 范围内,覆盖了规定的照射扇区.

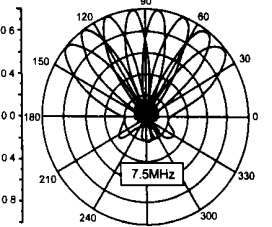


图 4 阵列在 120° 扇区的扫描方向图

图 7 是象山雷达站 1 号、8 号和 2 号、7 号天线在阵中,利用 HP8714E 网络分析仪实测的输入阻抗(频率范围 6~9MHz).从该图可以看出,阵中单元天线的一致性较好,各天线的 SWR 均小于 2,达到了一般天线工程要求的技术指标.

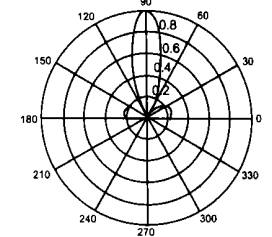


图 5 利用聚焦法实测的波束扫描图

天线互耦矩阵  $C_{ij}$  不仅能反映阵列天线之间相互作用的强弱,而且利用它能补偿由于互耦对测向和波束形成造成的不良影响<sup>[7,8]</sup>.图 8、9 分别表示浙江象山雷达站天线阵列互耦系数矩阵  $C_{ij}$  测量值的幅度和相角(测量频率为 7.7MHz,测量开始和结束时的环境噪声分别为 -92dBm 和 -86dBm).

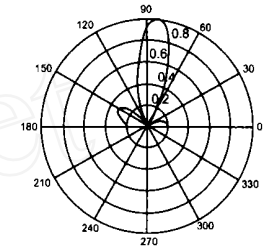


图 6 实测的阵中 4 号天线发射方向图

从这两图看出,天线互耦矩阵  $C_{ij}$  的对称性较好,相邻两至三根天线互耦较强.在数字波束形成实验中,利用互耦矩阵成功地补偿了互耦对波束形成造成的影响,降低了由于互耦而抬高的副瓣电平<sup>[9]</sup>.同时利用它成功地获得了接收通道的幅相特征,为超分辨率算法的有效实施提供了方便.表 1 列出了利用实测互耦系数矩阵获得的浙江省朱家尖雷达站天线阵各天线单元的幅相分布.

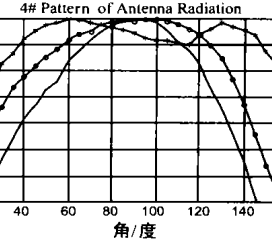


图 7 单元在阵中的阻抗特性

图 10、11 分别表示双排天线和单排天线工作时雷达探测

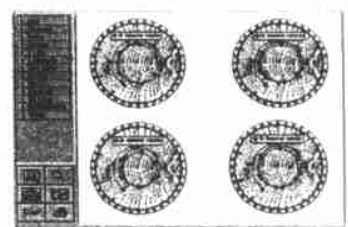


图 7 单元在阵中的阻抗特性

表 1 朱家尖站阵中单元天线的幅相分布

| 天线编号           | 1 | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8      |
|----------------|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| 幅度             | 1 | 0.9653  | 0.9024  | 0.7732  | 0.9039  | 1.0057  | 1.0296  | 0.8025 |
| 相位/ $^{\circ}$ | 0 | -2.2407 | 13.0194 | 25.0565 | 28.0789 | 10.7782 | -2.0969 | 1.2300 |

的海流结果。从该图可以清楚看出,采用双排天线时雷达探测距离比单排天线增加了约 50km。这是因为采用双排收发时,其发射增益和单元天线的接收增益净增加 12dB 以上,而理论和现场实验表明,增益每增加 1dB,在中程作用距离内,雷达探测距离约增加 4km。另外,二元八木天线的空间抗干扰性也是雷达探测距离增加的一个重要原因。此例说明本雷达天线设计不仅增益较高,且有一定的空间滤波特性,同时也说明了本雷达天线设计的合理性和科学性。

另外,由图 10 可见,本雷达探测海流的距离超过了 200km,达到了项目要求的技术指标。

## 5 结论

大量的实验表明,采用一发八收、收发共用、宽窄波束相结合的技术路线,极大地简化了整个雷达系统的配置。从 1999 年底开始,武汉大学高频地波雷达课题组经过一年多的现场试验和海上对比试验表明,该雷达使用线性调频中断连续波(FMICW)及 100

瓦平均发射功率,白天干扰较小时,雷达探测海流的距离大于 200 千米,浪高探测距离可达 100 千米,达到了总体设计的各项技术指标<sup>[10]</sup>。本天线设计方案是成功的。

## 参考文献:

- [1] B J Lipa, D E Barrick. Least-squares methods for the extraction of surface currents from CODAR crossed-loop data: Application at ARSLOE [J]. IEEE J Oceanic Eng, 1983, 8(4): 226 - 253.
- [2] B K Haus, H C Graber, L K Shay. Synoptic measurement of dynamic oceanic features [J]. Oceanography, 1997, 10(2): 45 - 48.
- [3] R Khan, B Gamberg, D Power, J Walsh, B Dawe. Target detection and tracking with a high frequency ground wave radar [J]. IEEE J Oceanic Eng, 1994, 19(4): 540 - 548.
- [4] Hickey K J, Gil E W, Helgig J A, Walsh J. Measurement of ocean surface currents using a long-range, high-frequency ground wave radar [J]. IEEE J Oceanic Eng, 19(4): 549 - 553.
- [5] 国家 863 计划海洋领域 818 主题 818-01-02 课题技术实施方案 [R]. 武汉: 武汉大学电子信息学院, 1998.
- [6] 吴雄斌, 吴世才, 文必洋, 等. 高频地波雷达宽波束海洋回波空间谱估计的 MVM 算法 [J]. 武汉大学学报(理学版) 2001, 47(5): 626 - 629.
- [7] 杨超, 阮颖铮. 空间谱估计测向中通道失配与阵元间互耦的一次性补偿 [J]. 电子科学学刊, 1995, 17(2): 206 - 209.
- [8] 邱文杰, 杨超. DBF 系统的通道校准技术 [J]. 电子科技大学学报, 1992, 21(6): 593 - 600.
- [9] 高火涛, 吴世才, 侯杰昌, 等. 高频地波雷达天线阵方向图的近场聚焦技术 [J]. 武汉大学学报(理学版), 2001, 57(5): 545 - 549.
- [10] WU Shi-cai, YANG Zi-jie, WEN Bi-ying, et al. Test of HF ground wave radar OSMAR2000 at the eastern china sea [J]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 2001, 47(1): 111 - 117.

## 作者简介:



高火涛 男, 1964 年 8 月出生于湖北孝感, 武汉大学电子信息学院副教授、博士, 发表论文多篇, 研究方向: 天线理论与工程设计、复杂目标的电磁散射和阵列信号分析等。

柯亨玉 男, 1957 年出生于湖北省, 武汉大学电子信息学院教授、博导, 发表论文数十篇, 获省部级以上奖多项, 研究方向: 天线理论与设计、电磁场理论与工程应用和高频无线电海洋遥感技术等。

杨子杰 男, 1943 年生于湖北省, 武汉大学电子信息学院教授、博导, 发表论文数十篇, 获省部级以上奖多项, 研究方向: 雷达工程总体设计、电路与系统和高频无线电海洋探测技术等。

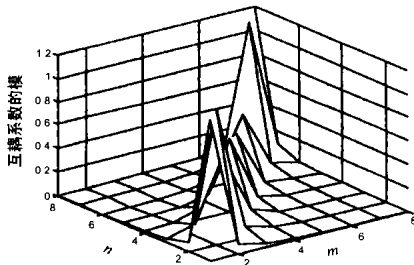


图 8 互耦系数的实部

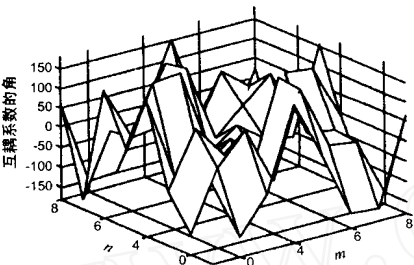


图 9 互耦系数的相角

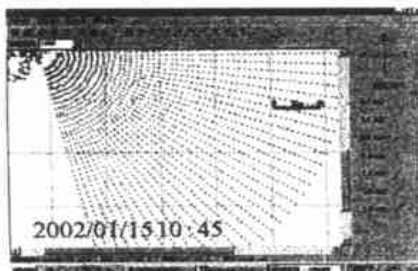


图 10 双排天线探测海流的结果

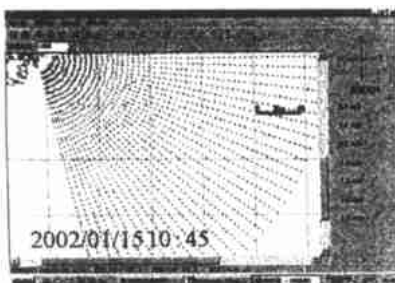


图 11 单排天线探测海流的结果