

岸基远程高频表面波雷达小型宽带天线系统的设计¹

高火涛 杨子杰 李杰 魏忠伟

(武汉大学电子信息学院 武汉 430079)

摘要: 从高频表面波雷达天线工程的角度出发, 基于对数周期天线的设计理论, 优化设计了一副小型宽带发射天线; 基于端射阵理论, 优化设计了一副小型宽带、具有大前后比的双鞭天线, 并以此作为阵列天线的基本单元组成六元均匀线阵。文中分析了收发天线的工作原理, 并给出了计算机模拟结果。

关键词: 小天线系统, 对数周期天线, 双鞭天线, 相控阵

中图分类号: TN822 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)01-0112-06

Design of a Small Broadband Array System for High-Frequency Surface Wave Radar

Gao Huo-tao Yang Zi-jie Li Jie Wei Zhong-wei

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

Abstract According to the requirements of engineering design for High-Frequency Surface Wave Radar (HF-SWR), at first, a small broadband transmitting antenna is optimized based on the theory of log periodic antennas. Then, based on the end-fire array theory, a small broadband twin-whip antenna with big forward to backward ratio is designed. And six twin-whip antennas are used as the fundamental element to form 12 side plane array system. The working principle of 12 side array and the log periodic antennas are analyzed, and calculating result is given in this paper. A practical broadband antenna system for HF-SWR is designed.

Key words Small antenna system, Log periodic antennas, Twin-whip antenna, Phased array

1 引言

岸基中远程高频表面波雷达工作在短波波段的低端, 该频带内的主要干扰是各种密集的中短波电台和天波, 特别是晚上, 由于电离层 D 层消失, 这些干扰信号的存在严重影响雷达的正常工作^[1]。目前的抗干扰措施主要采用频率捷变技术被动躲开干扰^[2]。为了使雷达系统能在比较宽的频率范围内根据当时的干扰和噪声情况变频工作, 要求雷达天线具有宽频带。同时因海边地理环境的限制, 雷达天线又不能太大。基于此, 本文首先基于对数周期天线的设计理论^[3,4], 优化设计一副小型宽带发射天线; 然后基于端射阵理论, 优化设计一副小型宽带、具有大前后比的双鞭天线, 并以此作为接收天线阵的基本单元组成六元边射阵。国外高频表面波雷达天线一般有几百乃至数千米之长^[5], 加拿大 Raytheon 公司最近研制的 SWR-503, 其工作频率 3~10MHz, 其接收阵长也有 600m。本文提出的一种宽带远程高频表面波雷达小天线设计方案, 其设计打破了一般短波宽带天线的老程式, 为短波天线阵的简单易建及可移动性提供了思路。

2 雷达天线设计的主要指标

根据项目要求, 某高频表面波雷达主要用于中远程 (200n mile 内) 海洋表面状态探测。根据高频表面波在海洋表面传播与散射特性^[6], 要实现 200n mile 的海面超视距探测, 应使雷达工作在高频段的低频端, 如 5MHz 左右。如果雷达工作频率过低, 其对应的电磁波波长太长,

¹ 2002-07-25 收到, 2003-01-09 改回

国家 863 计划 (2001AA631050) 资助项目

产生 Bragg 散射的对应波长的海浪能量过小, 从而导致高频表面波雷达探测海洋动力学要素的基本物理条件不是总能满足^[5]。而且随着频率的降低, 外界环境噪声和电磁干扰随之增加。基于此, 为了能实时监视 200n mile 内沿海岸域的舰船、低空飞机、海洋表面流和风浪场, 并根据当时当地的环境噪声和电磁干扰优选合适的探测频率, 本雷达工作频率选在 4~8MHz 之间。同时考虑到实际的海岸条件, 在计算机仿真的基础上, 提出小型远程表面波超视距雷达天线的主要参数如下: 发射天线增益不低于 6dB, 半功率宽 90~120°, 驻波比小于 2; 接收天线阵长不大于 80m, 天线阵 H 面方向图的半功率宽(角分辨率)不大于 35°。

3 发射天线的分析与设计

对数周期天线是一种宽带定向天线, 其结构特征能在很宽的频带内获得几乎不变的阻抗、方向图和增益, 具有十分优良的宽带特性^[3,4]。然而, 传统的设计思想(如查表法等)将导致这种天线的横向尺寸非常大, 并且在实际的天线工程设计中, 技术要求往往多样甚至是苛刻的, 要求使天线在增益、驻波比和几何尺寸等均达到最优或接近最优, 而仅靠查表或计算某参数的最佳值的设计方法是远远不够的。本文将基于“路-阵”理论^[3,4], 把对数周期天线分成天线阵网络和集合线网络, 分别采用矩量法和网络理论分析天线阵网络和集合线网络, 同时借助集合线网络、天线阵网络上电压电流的联系把两个网络有机结合起来, 根据发射天线规定的电参数, 优选合适的周期率 τ 、间隔因子 σ 和结构角 2α , 最终优化出一种具有小横向尺寸的宽带发射天线。

优化结果是: 在 4~8MHz 的频带范围内, 天线单元数为 8 根, 天线总的横向尺寸约 24m, E 面和 H 面的方向图如图 1~图 3 所示(其中, 内外两曲线分别表示 E 面和 H 面的方向图)。图 4 表示天线的电压驻波比(SWR), 其平均驻波比约为 1.45。该结果表明, 在满足发射天线规定电指标的前提下, 该天线的横向尺寸大约为传统对数周期天线设计的 1/3。

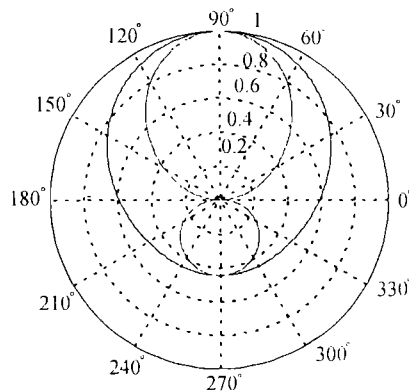


图 1 $f=4\text{MHz}$ 发射天线的方向图

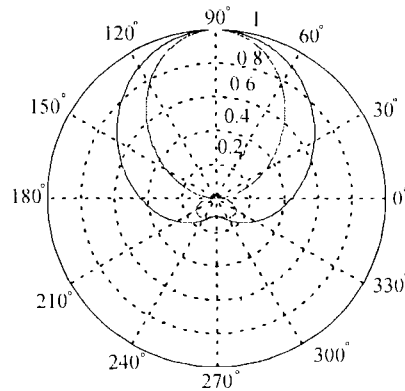


图 2 $f=6\text{MHz}$ 发射天线的方向图

4 接收天线阵单元形式的分析与设计

4.1 阵列基本单元天线的确定

宽带天线阵列单元选取何种形式, 主要基于如下几方面的考虑:

- (1) 天线要有一定的接收效率;
- (2) 天线阻抗频带尽可能宽, 易于与位于其后的宽带匹配网络相匹配;
- (3) 考虑到海边的环境特点, 天线结构形式要简单、可靠、耐用, 且呈低轮廓。

常用的鞭状天线其结构简单、轮廓低, 制作成本也低廉, 但在短波段, 当天线尺度较小时, 其带宽窄、效率低、难于直接匹配。

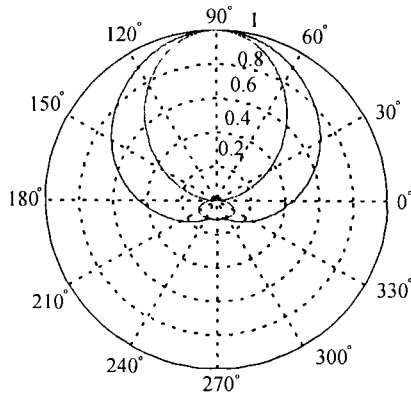


图 3 $f=8\text{MHz}$ 发射天线的方向图

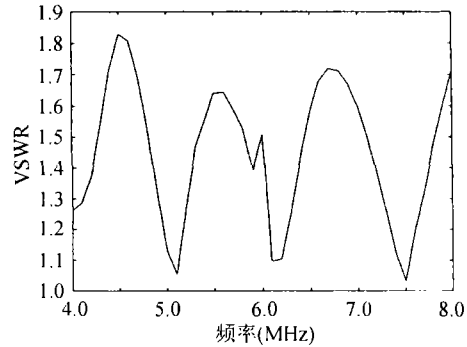


图 4 $f=4\sim 8\text{MHz}$ 发射天线的驻波比

笼形天线和锥形天线由于其结构特殊，能降低天线的特性阻抗，平滑天线输入阻抗的变化范围，具有较宽的频带。对这两种天线经仔细分析比较可知，锥形天线的电气性能(如效率和阻抗特性等)与笼形天线基本相当，不足之处是，这两种天线的轮廓较大。

套筒天线本身具有一定的宽带特性，其电气性能与锥形天线和笼形天线相差不大，但其轮廓较低，比较适于海边环境，可以作为接收阵列的基本单元。当然，在考虑到低成本和加载宽带匹配网络的情况下，也可选用简单鞭状天线，甚至使用锥形天线。

研究表明，无论是笼形天线、锥形天线、套筒天线或是简单鞭状天线，当天线高度为 6~7m 时，在 4~8MHz 的频带内，按一般工程要求，欲使天线的 SWR 均小于 3 是不可能的，即使是给天线加上无耗元件的匹配网络也很难实现。这是因为，当天线高度为 6~7m、且频率在 8MHz 以下时，天线阻抗实部很小，容抗很大(如图 5 表示利用矩量法计算的某鞭天线的输入阻抗)。为了利于天线的匹配，必须采取一些新的措施，如对天线进行适当的加载。但完全通过加载来满足 SWR 小于 3 的要求，天线的效率一般会受到影响，故这里可将加载和匹配网络相结合，对天线进行匹配。其中匹配网络部分可采用直接法或实频法优化得到^[7]。由于 RCL 并联网络的阻抗随频率变化具有阻尼特性，通过它可对天线阻抗进行一定的修正，使其易于匹配，因此，这里选用 RCL 并联网络作为加载网络，如图 6 表示的天线匹配网络的等效电路。至于 R、C、L 元件值的选取，可通过优化并结合具体的技术要求而定，目的是使天线阻抗值低的地方能够升高、而又对阻抗数值高的地方影响不大，同时兼顾天线的效率。

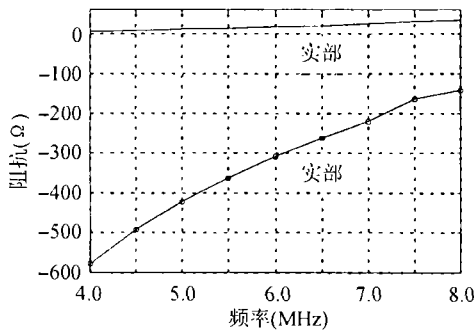


图 5 天线输入阻抗

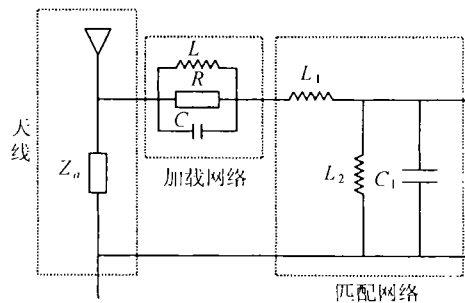


图 6 天线加载与匹配网络

图 7, 图 8 分别表示天线加载和匹配前后的 SWR。图中 $L = 8.5\mu\text{H}$, $R = 150\Omega$, $C = 85.5\text{pF}$, $L_1 = 9.3\mu\text{H}$, $L_2 = 12.5\mu\text{H}$, $C_1 = 60.7\text{pF}$, 阻抗变换比 9:1。从图 7 可见，当天线不加载和不加匹配网络时，其电压驻波比 (VSWR) 均大于 10，但通过对天线适当加载并配以匹配网络后，

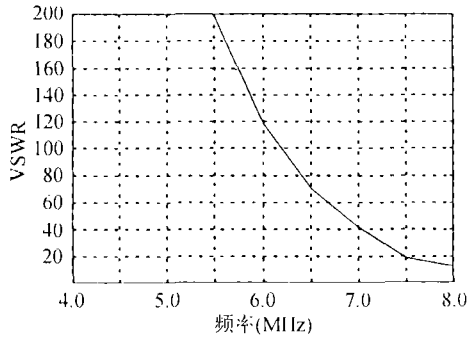


图 7 加载和匹配前的 VSWR

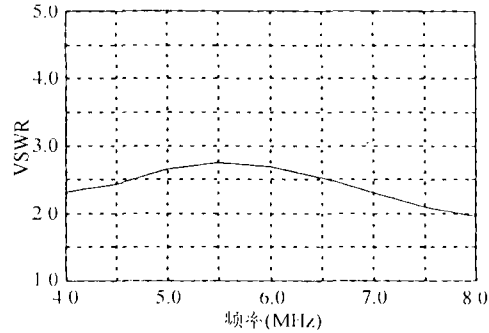


图 8 加载和匹配后的 VSWR

其 VSWR 均小于 3(平均值小于 2.5)。由此例可见, 对短天线进行加载并配以匹配网络可有效地改善短天线的性能。

4.2 阵列天线子阵的确定

全向鞭状天线增益小, 其空间抗干扰能力很差。将双鞭天线按一定的方式组合, 可使其辐射场实行后向反相相消, 使之形成具有一定前后比和波瓣宽度的定向接收天线(如平面阵类)。由于单极子位置固定, 空间程差随频率的改变而变化, 因此必须采取特殊的措施才能在宽带实现大的前后比, 以保证双鞭天线的方向性。在实施过程中可采用电缆配相和魔 T 倒相相加, 原理图如图 9 所示。可以证明^[5], 采用电缆适当配相, 为了获得大前后比, 必须取

$$L_2 - L_1 = d_{12} / \sqrt{\epsilon_r} \tag{1}$$

其中 L_1, L_2 为单极子的配相电缆长度, d_{12} 为两单元天线之间的间距, ϵ_r 为电缆的相对介电常数。

式 (1) 的意义是, 根据该式选取两单极子天线连接电缆的长度, 可使前后两单极子接收到的信号在到达魔 T 时相位相等, 再经过魔 T 倒相相加后, 可在宽频带内实现前向近似相加、后向抵消, 从而在宽频带内, 使双鞭单极子天线在水平面形成高前后比的心脏形方向图。设单元天线高度为 7m, 考虑到天线的匹配效率等因素, 在 4~8MHz 的工作频带范围内, 可通过优化获得双鞭单极子天线的间距。图 10 是利用矩量法^[8] 计算的双鞭天线在 4MHz, 6MHz, 8MHz 三频点上 H 面的方向图。从该图可见, 在要求的频带内, 双鞭天线的半功率宽在 120° ~ 160° 之间, 前后比在 20~36dB 左右。

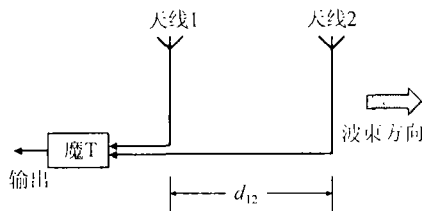


图 9 双鞭天线结构示意图

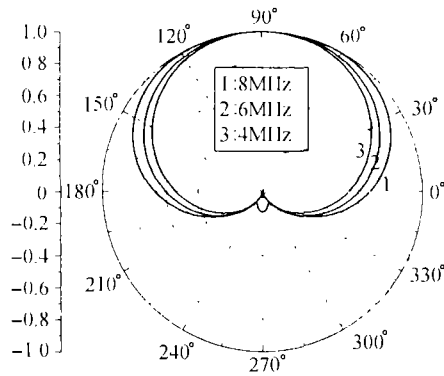


图 10 双鞭天线 4~8MHz H 面的方向图

5 接收天线阵列的工作原理及结果分析

为了获得高角度分辨率的海流及海面目标信息,一般采用超分辨率空间谱估计的方法(如 MUSIC 等算法)。作为海面风、浪探测,为了获得一定的角分辨率,一般要采用波束形成的方法。根据系统设计的目标,接收天线阵系统设由 6 个双鞭天线组成均匀线阵,其工作原理如下式所示:

$$\varphi_d = \arcsin[-\beta_r \lambda / (2\pi d_x)] \quad (2)$$

式(2)中, φ_d 为波束偏离阵列中心法线方向的扫描角; β_r 为每个相邻双鞭天线模块之间的相位差, d_x 为相邻双鞭天线模块之间的间距。

由式(2)可知,当两相邻双鞭天线之间相位差不同时,波束的扫描角就位于不同的位置;当 β_r 一定时,不同的频率, φ_d 也不同,因此,在预置不同的相位差时,还要考虑到此时的工作频率,使两者共同作用后,满足对扫描位置的确定。如图 11~ 图 13 是利用矩量法计算的阵列在 4MHz, 6MHz, 8MHz 三频点上 H 面的方向图。

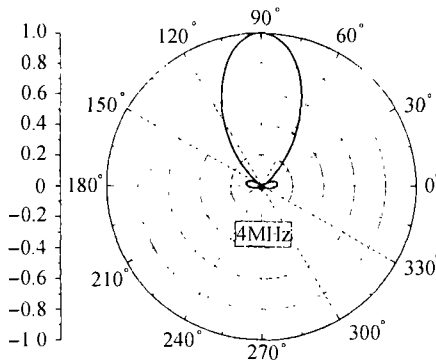


图 11 $f=4\text{MHz}$ 接收阵的方向图

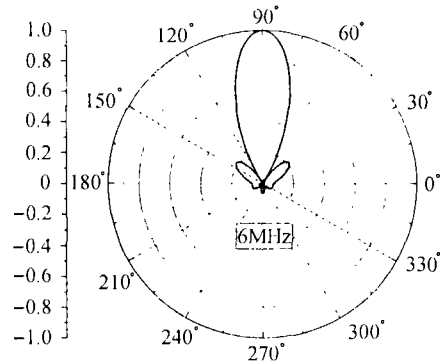


图 12 $f=6\text{MHz}$ 接收阵的方向图

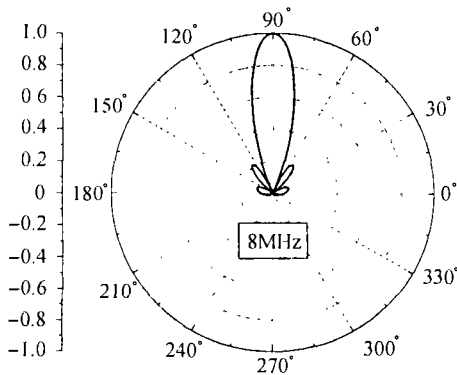


图 13 $f=8\text{MHz}$ 接收阵的方向图

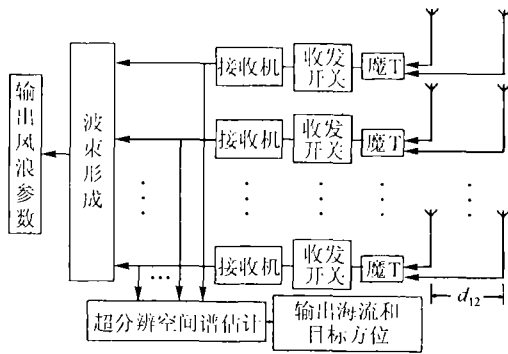


图 14 接收阵组成示意图

从计算结果表明,在整个频带范围内,天线阵列在 H 面方向图的半功率宽在 $20^\circ \sim 35^\circ$ 之间,前后比在 16~36dB 之间,方向系数在 10~15dB 之间。图 14 为设计的高频表面波雷达系统的结构框图。

实际上,当雷达工作频率低于 10MHz 时,二阶散射一般很小。随着频率增加,二阶散射的贡献才会有所增加,而海面风浪信息包含在二阶散射回波谱中。因此,要获得海面风浪信息,应使雷达工作在较高频率上。从这个意义上讲,利用低频即使能获得窄波束,也难以获得远程海

面的风浪信息。因此, 雷达实际应用过程中, 若要求反演海面风浪的分辨率在 25° 以下, 可采用如下两种方案设计雷达系统: (1) 将雷达的工作频率分成高低频两个波段并采用“时分分频”的工作模式, 使雷达前半场工作于低频段以获得海面近、中、远程距离的海流和目标信息, 后半场使雷达工作于高频段以获得海面近、中程距离的风浪、海流和目标信息。(2) 利用两个频率合成器分别产生高低频两个线性调频信号, 然后利用“移频键控”技术通过天线发射出去, 并从回波采样数据中分别抽取雷达在高频点和低频点工作的回波数据, 由高频点工作的回波数据经过处理以提取近、中程距离高分辨率的海面风、浪、流及目标信息, 由低频点工作的回波数据进一步处理以获得近、中、远程距离的海面流场和目标信息, 这样在雷达工作过程中可同时得到宽窄两种不同的波束, 既能实时跟踪近、中、远程距离的海面目标, 又能随时提供近、中程距离的风浪信息和远程海流信息, 还能对高低两种频率雷达同时探测的结果进行对比, 甚至实现雷达接收通道的相互校准。

6 结论

本文设计了一套完整高频地波雷达小型收发天线系统, 其设计方法打破了短波宽带天线设计的传统程式, 为短波天线阵的简单易建和可移动性提供了一个较好的途径。从以上计算结果可以看出, 本设计达到了系统要求指标, 配以适当的天线地网系统, 即可进行工程实施。

参 考 文 献

- [1] 杨子杰, 田建生, 高火涛. 高频地波雷达接收机的设计. 武汉大学学报(自然科学版), 2001, 57(5): 532-535.
- [2] 张国毅, 刘永坦. 高频地波雷达多干扰的极化抑制. 电子学报, 2001, 29(9): 1026-1029.
- [3] Ma M T. Theory and Application of Antenna Arrays. New York: John Wiley & Sons Inc., 1974: 316-372.
- [4] 谢处方, 邱文杰. 天线原理与设计. 成都: 电子科技大学出版社, 1987.
- [5] 高火涛. 高频表面波超视距雷达天线问题的研究. [博士论文], 武汉: 武汉大学, 2001.
- [6] Shearman E D R, et al.. Propagation and scattering in MF/HF ground wave radar. *IEE Proc-F*, 1983, 130(7): 579-590.
- [7] Ranahi O M. The design of matching network for an HF antenna using real frequency method. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1989, 37(4): 506-509.
- [8] Harrington R F. Field Computation by Moment Method. New York: Macmillan Comp., 1968.

高火涛: 副教授, 博士, 发表论文数多篇. 研究方向: 天线理论与工程设计、复杂目标的电磁散射和自适应阵列信号处理等.

杨子杰: 教授, 博士生导师, 发表论文数 10 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.

李 杰: 硕士生, 研究方向: 天线理论与设计、随机信号分析.

魏忠伟: 博士生, 研究方向: 天线理论与设计.