

舰载无源综合脉冲/孔径雷达及其若干关键问题

陈伯孝, 许 辉, 张守宏

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西西安 710071)

摘 要: 本文根据综合脉冲/孔径雷达采用多个天线同时向全空域辐射多个载频信号,而在接收端通过信号处理获得发射方向图的特点,提出一种新的雷达体制——舰载无源综合脉冲/孔径雷达.该雷达既利用在岸上发射、在舰船上接收而构成岸-舰双/多基地“广播式”雷达,又由于在接收站不发射信号而相当于无源定位.本文介绍该雷达的基本组成、工作原理及其特点;分析其性能;讨论该雷达需解决的关键问题.

关键词: 综合脉冲/孔径雷达;高频;地波超视距雷达;多基地雷达;无源定位

中图分类号: TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 12-1776-04

Ship-Based Passive Synthetic Impulse and Aperture Radar and Some Key Questions

CHEN Bai-xiao, XU Hui, ZHANG Shou-hong

(National Key Lab for Radar Signal Processing, Xidian Univ, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: A new type of radar system of ship-based passive Synthetic Impulse and Aperture Radar (SIAR) is presented on the basis of multiple frequency-carrying signals transmitted with multiple antennas to the whole directions, while its transmitting beams are formed by digital signal processing in receivers. The system shall not only make up a radar system of bi-station or multi-station through transmitting signals from the bank, and receiving signals on ships, but also be equivalent to a passive position locator at the sink. The basic constitutions and operational principles are presented. There are many distinguished features in the new radar system in comparison with conventional radars. Its performance is analyzed and simulative results are given. Finally, some key problems to be solved are discussed in the radar.

Key words: synthetic impulse and aperture radar; HF; ground-wave OTHR; multi-static radar; passive position

1 引言

地波超视距雷达一般工作在 4~12MHz,发射用宽波束覆盖 120°扇区,接收为窄波束,收发天线布置在海边.例如,加拿大的高频地波雷达(HF-GWR)的发射天线为一个架设在高 40m 铁塔上的对数周期天线,接收天线为 40 个单元铺设在 1.5km 长的海岸上^[1,2].地波超视距雷达的优点是不受视距的限制,但其体积庞大且造价昂贵.

本文研究一种适合安装在舰船上的地波雷达,为了减少舰船上的设备,借鉴稀布阵综合脉冲/孔径雷达(简称 SIAR)的原理^[3,4],发射系统安装在海岸上,在舰船上只需安装接收设备,这样既构成了岸-舰双/多基地雷达;而在接收站由于不发射信号又相当于无源定位,因此我们称之为舰载无源综合脉冲/孔径雷达.本文介绍该雷达的基本组成和工作原理;并与常规雷达相比的区别及其主要特点;分析其性能;指出尚需解决的关键问题.

2 问题的提出

稀布阵综合脉冲/孔径雷达(SIAR)的最主要技术特点是采用多个天线同时向全空域辐射多个载频信号,在接收端通过综合处理而形成发射方向图,这是其它体制雷达不能具备的!利用该雷达无方向性发射的特点,我们提出将其发射阵安装在地面,发射信号采用空时编码技术,向全空间或某一扇区照射,相当于一个“广播站”.接收站可以安装在静止的阵地也可以在运动的载体(如汽车、飞机、舰船),每个接收站相当于一个“收音机”,可以有任意多个接收站,相当于“广播”雷达.这里只讨论接收天线安装在舰船上的情况.

我们提出舰载无源雷达的出发点主要有:(1)雷达发射天线放在海岸,接收天线置于舰船一类的运动作战平台上,便于机动,构成多基地雷达;(2)在舰船上不发射电磁波(相当于“无源”定位),所有舰船均可以利用岸上发射站发射的信号,既可以避免敌方利用我方发射的信号侦察到自己和反辐射导

弹的攻击,抗干扰能力强,又可以减少舰船上的雷达设备;(3)由于在海岸上天线难以架设太高,视距受到限制,故采用高频(HF)波段,地波(表面波)传播方式能够看到视距以外,并且雷达波长与散射目标尺寸相当时因谐振效应而获得较大的散射截面积.因此,也称之为岸-舰多基地地波超视距雷达.

3 舰载无源综合脉冲/孔径雷达的组成和工作原理

舰载无源综合脉冲/孔径雷达组成如图 1 所示,几何位置如图 2 所示.发射系统包括频率源、发射机、发射天线阵等.假设有 N_e 个发射天线架设在海滩地网上,发射信号采用空时频率编码技术,发射波形拟采用调频中断连续波(FMICW)信号,第 l 路发射可表示为

$$s_l(t) = g(t) \exp \left\{ j2 \left(f_0 t + f_l t - \frac{\mu}{2} t^2 \right) \right\} \quad (1)$$

式中: $g(t)$ 为脉冲调制信号, f_0 为载频, f_l 为第 l 路发射信号的频率偏差, μ 为调频斜率.

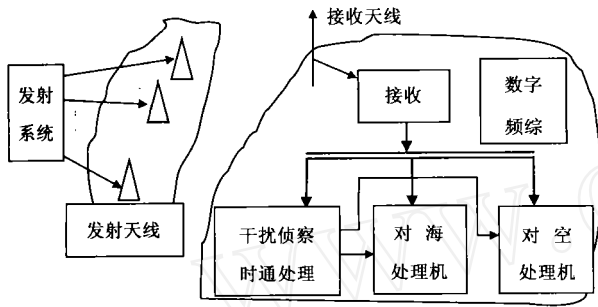


图 1 舰载无源综合脉冲/孔径雷达系统基本组成

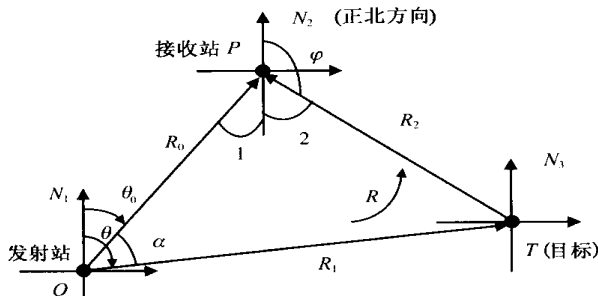


图 2 舰载无源综合脉冲/孔径雷达的几何位置示意图

接收系统包括接收天线、数字频综、接收机、环境干扰侦察与时通处理机、对海信号处理机、对空信号处理机等,并安装在舰船上.时通处理机的主要功能是获取时域和频域的同步信号.对海处理机、对空处理机分别完成对海面目标和低空目标的检测和跟踪.信号处理流程如图 3 所示,对接收信号进行混频、A/DC 与正交采样、数字解调频、发射信号分离与滤波、FFT、发射脉冲综合、相干积累等处理.其中 FFT 完成脉冲压缩得到距离信息;脉冲综合处理即发射数字波束形成^[3-5],得到目标的方位信息.

假定发射站 O 、接收站 P (可以有多个)和目标 T 投影到一个平面上.对于接收站位置,距离 R_0 和 θ_0 已知,可对接收信号进行脉冲综合处理和目标检测而得到距离 $R(=R_1+R_2)$ 和目标相对发射站的方位 $(=N_1OT, 它与接收站位置无关)$.

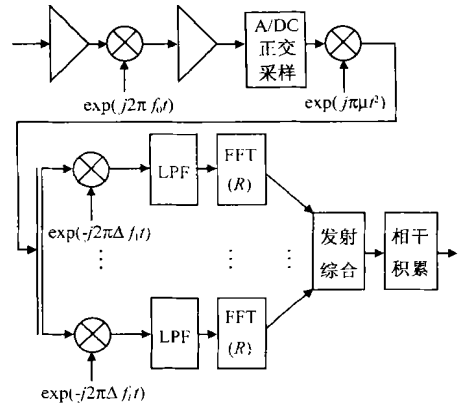


图 3 接收站信号处理流程

在 POT 中, $\angle OPT = 180^\circ - \theta_0$, 利用几何关系可以计算出目标相对接收站的距离 R_2 和方位 $\theta = N_2 PT = 180^\circ - 2\theta_0$, 有

$$R_2 = \frac{R^2 + R_0^2 - 2R \cdot R_0 \cos \theta_0}{2(R - R_0 \cos \theta_0)} \quad (2)$$

$$\theta = 180^\circ - \arccos \left[\frac{R_0^2 + 2R_0 \cdot R_2 - R^2}{2R_0 \cdot R_2} \right] + \theta_0 \quad (3)$$

这里需要说明的是:不管接收站在哪个位置,回波信号经处理后得到的目标相对于发射站的方位角 θ 是一样的,即与接收站的位置无关.如果接收站的位置已知,目标相对于接收站的位置信息 (R_2, θ) 就取决于当前的测量值 $R(=R_1+R_2)$ 和 θ_0 .所以,在雷达工作时先要获取舰船所在位置信息 (R_0, θ_0) , 然后换算到目标相对于接收站的位置.

舰载无源综合脉冲/孔径雷达同样具有常规双/多基地雷达在反隐身、抗有源定向干扰和抗反辐射导弹(ARM)等方面独特的优点,但常规双/多基地雷达的发射天线和接收天线都具有方向性,需要波束追赶.而舰载地波超视距雷达的发射和接收都没有方向性,不需要波束追赶.该雷达主要具有以下特点:

- (1) 使用 HF 波段.由于 HF 波段对目标的谐振效应使得 RCS 大大增强,从而具有反隐身能力.另外,反辐射导弹上的天线尺寸受到限制,难以捕获和跟踪发射站发射的 HF 信号;
- (2) 发射波束形成.即在任意接收站位置都可以通过脉冲综合处理而形成发射方向图.接收天线不管是一个还是多个,利用发射阵既可以形成搜索波束,还可以形成单脉冲“和”、“差”波束而进行高精度测角;
- (3) 可以同时形成多个波束监视全空域或限定的某一扇区,也可以同时形成多个跟踪波束而跟踪多个目标,特别适合对多目标环境的检测和跟踪,并集监视和跟踪于一体;
- (4) 长时间相干积累.常规雷达需要波束扫描,回波脉冲数较少,积累时间有限,一般可供积累的脉冲只有几个或十几个.而舰载地波超视距雷达不采用物理聚焦和扫描的概念,工作时可以同时多波束对全空间进行监视,故相干积累时间理论上只受系统相干性能和目标运动的限制,所获得的积累脉冲数较多,多普勒分辨率高.
- (5) 接收站不发射信号,相当于“无源”定位,具有一切无

源定位的优势. 所有舰船均可以利用岸上发射站发射的信号, 不仅可以避免敌方反辐射导弹 (ARM) 的攻击, 而且抗有源定向干扰能力也强, 又可以减少舰船上的雷达设备, 从而使接收站可置于小型舰艇上, 并可以有任意多个. 由于接收站灵活机动, 因此具有机动作战能力;

(6) 有可能构成舰艇的“近海自定位”的潜力. 因接收站能收到来自发射站的信号而测量接收站相对于发射站的角位置, 故如果有两个或多个发射站, 每个发射站的工作频率不同, 就可以完成接收站的自身定位功能. 当然, 若在舰船上增加询问 (向发射站) 而测量其相对于发射站的距离, 并结合方向信息从而完成自身的定位功能.

它与常规地波超视距雷达的主要区别有: (1) 常规地波超视距雷达一般发射用宽波束覆盖 120° 扇区, 接收为窄波束, 即“宽发窄收”体制; 而舰载无源地波超视距雷达采用阵列发射, 但在功率意义上讲也不形成发射方向图, 而是在接收端通过发射 DBF 处理而形成方向图; (2) 在任意接收站都可以通过信号处理形成发射方向图, 而常规地波超视距雷达做不到; (3) 接收天线单元可只用一个, 设备相对简单, 便于安装在舰船一类的运动平台上.

4 系统性能分析

假设有 N_e 个发射天线单元, 每个天线发射的峰值功率 P_t , 发射和接收天线增益分别为 G_t, G_r , 目标有效散射面积为 σ , 平均波长为 λ , 则单个脉冲回波的信噪比为:

$$SNR_1 = \frac{N_e P_t G_t G_r \lambda^2 \cdot A_{R1}^2 A_{R2}^2 \cdot}{(4\pi)^3 k T_0 B \cdot F \cdot F_c R_1^2 R_2^2 L_{st} L_{sr}} \quad (4)$$

式中: A_{R1}, A_{R2} 分别是发射站到目标传播路径、目标到舰船传播路径上的地波衰减因子; k 为波尔兹曼常数; T_0 为标准噪声温度; B 为接收机带宽; F 为接收机噪声系数; F_c 为环境干扰的噪声系数; L_{st}, L_{sr} 分别为发射系统损耗和接收系统损耗; R_1, R_2 分别为发射站到目标、目标到舰船的距离; η 为考虑发射遮挡的效率.

如果在调制周期内的发射脉冲数为 M , 即对调频脉冲作 FFT 处理时的得益; 相干积累周期 (以调制周期为单位) 数为 N_p ; 脉冲综合时信噪比的改善 N_e , 则信号处理总的信噪比的改善为 $I_p = M \cdot N_p \cdot N_e$. 因此检测前的信噪比为

$$SNR = \frac{N_e^2 P_t G_t G_r \lambda^2 \cdot A_{R1}^2 A_{R2}^2 \cdot}{(4\pi)^3 k T_0 B \cdot F \cdot F_c R_1^2 R_2^2 L_{st} L_{sr}} \cdot I_p \quad (5)$$

假设: $N_e = 9, \lambda = 60m, \sigma = 500m^2, G_t = 4dB, G_r = 2dB, M = 800, N_p = 128, B = 30kHz, F = 5dB, L_{st} = 15dB, L_{sr} = 3dB, F_c = -5dB$, 根据有关资料^[6], 在作用距离不是太远 ($< 200km$) 的情况下, 地波的衰减 (单程) 平均可按 $0.05dB/km$ 计算; 环境干扰 $F_c = (30 \sim 50) dB$. 当作用距离 $R = 70km$ 时, 相当于 $(R_1 + R_2) = 140km$.

为了保证检测和测量精度, 需有较高的信噪比, 若取 $SNR = 15dB$, 由式 (5) 计算得 $P_t = (2.8 \sim 284) W$, 总的发射功率为 $P_{t, all} = N_e \cdot P_t = (25.2 \sim 2556) W$. 故各阵元平均发射功率大于 $200W$, 就可以满足要求.

5 计算机模拟

假设有 9 个发射天线布置在 200m 长的海岸上, 接收站到发射阵中心的距离 $R_0 = 75km$, 发射阵中心—目标—接收站的距离 $R = 81km$, 目标相对于发射站的方位角 $\theta = 0^\circ$. 图 4 是回波经脉冲综合等处理后的结果. 其中图 4 (a) 是距离-方位三维分布图, 图 4 (b) 是目标所在方位的距离主截面图, 图 4 (c) 是目标所在方位的方位主截面图. 图 5 是假设有两个目标的距离相差 6km, 方位相差 15° 的处理结果, 其中图 5 (a) 是距离-方位等高线图, 图 5 (b) 实线和虚线分别是两目标所在方位的处理结果. 从图中可看出, 经综合处理后可以得到目标的位置信息, 并有较好的分辨能力.

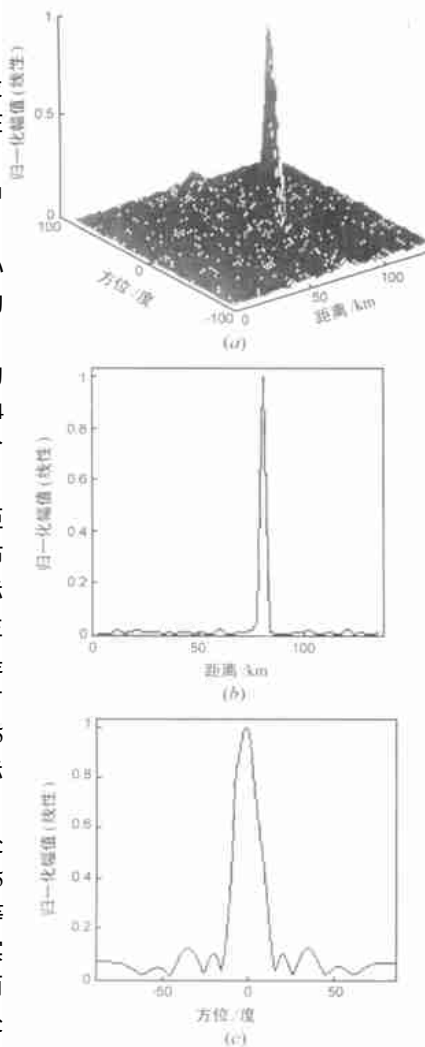


图 4 某一目标回波信号综合处理的结果 (a) 距离-方位三维分布图; (b) 方位主截面图; (c) 距离主截面图

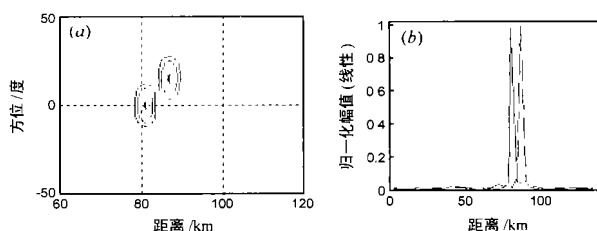


图 5 两个目标距离相差 6km, 方位相差 15° 的处理结果 (a) 距离-方位等高线图; (b) 两目标所在方位的处理结果

6 若干关键问题的讨论

舰载无源综合脉冲/孔径雷达采用调频中断连续波 (FMICW) 信号, 对任一接收站, 均需要进行时间同步和频率同步 (或称双时间同步). 另外, 还要获取接收站相对于发射站的位置, 才能计算出目标相对于舰船 (接收站) 的位置. 其关键问

题主要有:

(1) 对接收站定位. 利用全球定位系统 (GPS) 或其它导航信息系统获取舰船的位置信息, 精度相当高;

(2) 同步信号的提取. 由于接收站在运动平台上, 不能通过电缆传输同步信号. 当接收站与发射站之间的距离 R_0 不是特别远时 (近海作战), 通过对接收到的直达波信号进行综合处理和直达波跟踪, 则可以获得时间和频率同步. 或者利用直达波信号和发射询问信号构成“自定位”系统;

(3) 杂波抑制与目标信号检测. 由于海杂波强, 需采用有效措施抑制海杂波并提取目标回波信号.

另外, 关于优化天线布阵及其设计、空时频率编码捷变的优化及其实现技术、接收站定位精度的影响、电波传播特性及其抗干扰技术等问题尚需深入的研究.

7 结束语

本文介绍了舰载地波超视距雷达的基本思想和工作原理, 给出了计算机模拟结果. 该雷达综合利用地波超视距雷达、多基地雷达、无源定位、空时频率编码及其捷变、多载频信号同时全向照射且在接收端综合形成发射方向图等先进雷达体制或技术的优点, 并克服了这些雷达的缺点或不足之处. 它可以为近海防卫与近海目标探测提供一种新的技术途径. AA

参考文献:

- [1] Shearnam E D R. Propagation and scattering in MF/ HF ground wave radar[J]. IEE Proceeding, 1983, 130(7): 579 - 590.
- [2] 杨子杰, 吴世才, 等. 高频地波雷达总体方案及工程实施中的几个主要问题[J]. 武汉大学学报, 2001, 47(5): 513 - 518.
- [3] 陈伯孝. SIAR 四维跟踪及其长相干积累等技术研究[D]. 西安: 电子科技大学, 1997.

- [4] 陈伯孝, 张守宏. 稀布阵综合脉冲孔径雷达时域与频域脉冲综合方法[J]. 现代雷达, 1998, 20(1): 12 - 17.
- [5] 陈伯孝, 张守宏. 降低稀布阵综合脉冲孔径雷达距离旁瓣的方法研究[J]. 西安: 电子科技大学学报 (雷达信号处理专辑), 1997, 24: 103 - 108.
- [6] 高火涛, 等. 高频地波雷达探测距离的预估及分析[J]. 现代雷达, 1999, 21(5): 31 - 38.

作者简介:



陈伯孝 男, 1966 年生于安徽宿松县, 1997 年获西安电子科技大学博士学位, 现任西安电子科技大学教授, 研究方向包括雷达系统设计、雷达信号处理、阵列信号处理、精确制导与目标跟踪等, 发表论文 30 余篇. Email: bxchen@xidian.edu.cn



许辉 女, 1972 年生于西安, 硕士, 现任西安电子科技大学工程师, 研究方向为电子系统设计、电子设计自动化等.

张守宏 男, 1938 年生于安徽六安, 1964 年毕业于西安军事电讯工程学院, 现为西安电子科技大学教授, 博士生导师, 长期从事雷达系统和雷达信号处理等领域的科研工作.