



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102707270 A

(43) 申请公布日 2012. 10. 03

(21) 申请号 201210200076. X

(22) 申请日 2012. 06. 18

(71) 申请人 武汉大学

地址 430072 湖北省武汉市武昌区珞珈山武汉大学

(72) 发明人 周浩 文必洋

(74) 专利代理机构 武汉科皓知识产权代理事务所(特殊普通合伙) 42222

代理人 张火春

(51) Int. Cl.

G01S 7/40(2006. 01)

权利要求书 1 页 说明书 6 页

(54) 发明名称

高频地波雷达相对天线方向图自动估计方法

(57) 摘要

本发明提供了一种高频地波雷达相对天线方向图自动估计方法,步骤为:在雷达回波信号中选择高于某预设信噪比的单到达角回波信号谱点;利用各所选单到达角回波信号谱点的幅度比和到达角对当前天线方向图进行修正得到修正后的天线方向图;判断修正后的天线方向图相对于当前天线方向图是否收敛,若收敛,则修正后的天线方向图即为所得的天线方向图;否则,以修正后的天线方向图为当前天线方向图,重复修正步骤。本发明方法完全用软计算的方式从雷达回波信号中估计出各天线方向图,摒弃了传统的采用额外应答器或信标设备的测量方式,大大降低了高频地波雷达系统的复杂度和运行成本。

1. 一种高频地波雷达相对天线方向图自动估计方法,其特征在于,包括步骤:

S1、在雷达回波信号中选择高于某预设信噪比的单到达角回波信号谱点;

S2、利用各所选单到达角回波信号谱点的幅度比和到达角对当前天线方向图进行修正得到修正后的天线方向图,所述的幅度比为谱点在各天线上的幅度相对于在参考天线上幅度的比值,所述的当前天线方向图的初始值为理想天线方向图;

S3、判断修正后的天线方向图相对于当前天线方向图是否收敛,若收敛,则修正后的天线方向图即为所得的天线方向图;否则,以修正后的天线方向图为当前天线方向图,重复执行步骤 S2。

2. 根据权利要求 1 所述的高频地波雷达相对天线方向图自动估计方法,其特征在于:

步骤 S1 中,采用特征值最陡下降准则判断雷达回波信号中各谱点的信号源个数,筛选出单到达角谱点。

3. 根据权利要求 1 所述的高频地波雷达相对天线方向图自动估计方法,其特征在于:

步骤 S2 中,利用各单到达角回波信号谱点的幅度比和到达角对当前天线方向图进行修正进一步包括子步骤:

S2-1 计算各所选单到达角回波信号谱点在各天线上相对于参考天线的幅度比,并采用定向算法、根据当前天线方向图计算出各所选单到达角回波信号谱点的到达角;

S2-2 将雷达覆盖区张角均匀划分为以预设角度为间隔的张角网格,对张角网格中的每个角度 θ 搜索到达角落入角度 θ 邻域的所选单到达角回波信号谱点,计算角度 θ 邻域中所有所选单到达角回波信号谱点的幅度比中值 \bar{g} ;

S2-3 根据单到达角谱点的幅度比中值 \bar{g} 、按照公式 $\hat{\mathbf{a}}_r^{(n)}(\theta) = (1 - \beta)\hat{\mathbf{a}}_r^{(n-1)}(\theta) + \beta\bar{g}$ 对当前天线方向图进行修正,其中, β 为学习速率, $0 < \beta < 1$, $\hat{\mathbf{a}}_r^{(n-1)}(\theta)$ 为当前天线方向图, $\hat{\mathbf{a}}_r^{(n)}(\theta)$ 为修正后的天线方向图。

4. 根据权利要求 1 所述的高频地波雷达相对天线方向图自动估计方法,其特征在于:

步骤 S3 中,利用 $\varepsilon^{(n)} = \frac{1}{Q} \sum_{\theta} |\hat{\mathbf{a}}_r^{(n)}(\theta) - \hat{\mathbf{a}}_r^{(n-1)}(\theta)|^2 \leq \gamma$ 判断修正后的天线方向图是否相对于当前天线方向图收敛,若满足上式,则收敛,其中, Q 是雷达覆盖区张角网格的网格点总数, γ 是预设的收敛判决阈值, $\hat{\mathbf{a}}_r^{(n-1)}(\theta)$ 为当前天线方向图, $\hat{\mathbf{a}}_r^{(n)}(\theta)$ 为修正后的天线方向图。

高频地波雷达相对天线方向图自动估计方法

技术领域

[0001] 本发明属于高频雷达技术领域,尤其涉及一种利用递推计算而无需任何外部合作校准源的高频地波雷达相对天线方向图自动估计方法。

背景技术

[0002] 高频地波雷达因其独特的超视距和全天候探测能力,已得到广泛研究并成功应用于海洋表面动力学参数(如流、风、浪)测量中,且可实时探测舰船和飞机等运动目标。现有高频地波雷达的接收天线阵列可以分为两种,一种是相位控制阵列,如鞭天线组成的均匀直线阵;另一种是紧凑式幅度控制阵列,如单极子/交叉环三元天线阵。后者由于其天线易于架设且占地极少而具有更好的灵活性和适应性,目前在国际上已有的高频地波雷达产品中采用单极子/交叉环三元天线阵列的便携式雷达已占据绝大部分份额。单极子/交叉环三元天线阵列设计为共相位中心,利用回波信号在各天线上的幅度响应来求取到达角。单极子/交叉环三元天线阵列为雷达带来了实用性的巨大优势,但在雷达实际运行环境中也给定向引入了问题,即天线方向图几乎总是受到周围非理想电磁环境的影响而产生畸变,进而导致到达角估计误差。比幅定向系统较比相定向系统更易受方向图畸变影响,这也是天线口径缩减的代价。已有文献报道,在使用理想天线方向图而非实际天线方向图进行到达角估计时由天线方向图畸变导致的定向误差可超过 10 度^[1],因此在雷达运行时必须获知实际天线方向图并用于定向算法(如多重信号分类法, MUSIC)中以降低此误差。

[0003] 常规的天线方向图获取方法是对其进行远场测量。美国 CODAR 公司生产的高频地波雷达 SeaSonde 采用船载应答器,在电波远场区距离环上的各个不同方位上驻留并测量雷达各天线通道所接收到应答信号的幅度,结合船只上 GPS(全球定位系统)设备记录下的经纬度坐标,计算出天线方向图^[2]。在这种方法中,接收到的应答信号表现为由用户选择的延时时间对应距离上的虚拟点目标回波。应答器需要接收和延时转发功能,为减少使用应答器而产生的额外成本,中国专利公开号为 CN 100501425C、发明名称为高频线性调频雷达方向图测量方法的专利,公开了在便携式高频地波雷达中使用独立的单频信标发射装置代替应答器来进行远场测量的方法^[3],单频信号通过高频线性调频雷达接收机,在距离-多普勒谱上产生平行于距离轴分布的条带,因此对不存在海洋回波信号或海洋回波能量非常弱的距离段进行积分,可以计算出相应的信标强度。各个天线通道上信标的幅度结合对应时刻的船只方位,即可计算出方向图。上述两种方法均能有效地测得实际天线方向图,且可在雷达正式观测前或者观测时在线进行,然而,实际测量方式都使系统设备的复杂度和成本增加,且测量要受时间、天气和地形等因素的限制,不能及时自动跟踪环境的变化(如在天线附近的新修建筑、新长成树木等)。显然,更加理想的方法是通过软计算直接从海洋回波数据中自动估计出天线方向图。

[0004] 参考文献:

[0005] [1]D. E. Barrick and B. J. Lipa, "Using Antenna Patterns to Improve the Quality of SeaSonde HF Radar Surface Current Maps," Current Measurement, 1999.

Proceedings of the IEEE Sixth Working Conference on, Mar. 1999, 5-8.

[0006] [2]CODAR Ocean Sensors Ltd., User's guide for SeaSonde® Radial Site Antenna Pattern Measurement (APM), 2001.

发明内容

[0007] 本发明的目的是提供一种高频地波雷达相对天线方向图自动估计方法,以去除天线方向图对任何合作信标装置的依赖,降低高频地波雷达的系统复杂度和运行成本。

[0008] 为了达到上述目的,本发明采用如下的技术方案:

[0009] 一种高频地波雷达相对天线方向图自动估计方法,包括步骤:

[0010] S1、在雷达回波信号中选择高于某预设信噪比的单到达角回波信号谱点;

[0011] S2、利用各所选单到达角回波信号谱点的幅度比和到达角对当前天线方向图进行修正得到修正后的天线方向图,所述的幅度比为谱点在各天线上的幅度相对于在参考天线上幅度的比值,所述的当前天线方向图的初始值为理想天线方向图;

[0012] S3、判断修正后的天线方向图相对于当前天线方向图是否收敛,若收敛,则修正后的天线方向图即为所得的相对天线方向图;否则,以修正后的的天线方向图为当前天线方向图,重复执行步骤 S2。

[0013] 上述步骤 S1 中,采用特征值最陡下降准则判断雷达回波信号中各谱点的信号源个数,筛选出单到达角谱点。

[0014] 上述步骤 S2 中,利用各单到达角回波信号谱点的幅度比和到达角对当前天线方向图进行修正具体包括子步骤:

[0015] S2-1 计算各所选单到达角回波信号谱点在各天线上相对于参考天线的幅度比,并采用定向算法、根据当前天线方向图计算出各所选单到达角回波信号谱点的到达角;所述的定向算法为多重信号分类算法;

[0016] S2-2 将雷达覆盖区张角均匀划分为以预设角度为间隔的张角网格,对张角网格中的每个角度 θ 搜索到达角落入角度 θ 邻域的所选单到达角回波信号谱点,计算角度 θ 领域中所有所选单到达角回波信号谱点的幅度比中值 \bar{g} ;

[0017] S2-3 根据单到达角谱点的幅度比中值 \bar{g} 、按照公式 $\hat{\mathbf{a}}_r^{(n)}(\theta) = (1 - \beta)\hat{\mathbf{a}}_r^{(n-1)}(\theta) + \beta\bar{g}$ 对当前天线方向图进行修正,其中, β 为学习速率, $0 < \beta < 1$, $\hat{\mathbf{a}}_r^{(n-1)}(\theta)$ 为当前天线方向图, $\hat{\mathbf{a}}_r^{(n)}(\theta)$ 为修正后的天线方向图。

[0018] 上述步骤 S3 中,利用 $\varepsilon^{(n)} = \frac{1}{Q} \sum_{\theta} |\hat{\mathbf{a}}_r^{(n)}(\theta) - \hat{\mathbf{a}}_r^{(n-1)}(\theta)|^2 \leq \gamma$ 判断修正后的天线方向图是否相对于当前天线方向图收敛,若满足上式,则收敛,其中, Q 是雷达覆盖区张角网格的网格点总数, γ 是预设的收敛判决阈值, $\hat{\mathbf{a}}_r^{(n-1)}(\theta)$ 为当前天线方向图, $\hat{\mathbf{a}}_r^{(n)}(\theta)$ 为修正后的天线方向图, $\varepsilon_i^{(n)}$ 为 $\hat{\mathbf{a}}_r^{(n-1)}(\theta)$ 和 $\hat{\mathbf{a}}_r^{(n)}(\theta)$ 之间的均方误差。

[0019] 在高频地波雷达接收的接收信号中,海洋回波信号主要由海浪散射信号和船只回波组成,其中布拉格(Bragg)散射效应产生的一阶峰能量占主要地位。Bragg 散射频率 $f_B = 0.102\sqrt{f_0}$, 其中, f_B 以 Hz 为单位, f_0 是雷达工作频率,以 MHz 为单位。由于海洋表面存在流场,各散射单元还存在由径向流速 v 导致的多普勒频移 $f_c = \frac{2v}{\lambda}$, 这里 λ 是雷达电波波

长。在同一距离元上,由宽波束天线接收到的一阶峰区多普勒分布由该距离元各方位流速剖面决定,每个谱点可能来自于1个或多个到达角,且角度取值可以是雷达电波覆盖区内的任意方位,这样就使通过海洋回波的幅度和方位来估计方向图成为可能。本发明可行的原因还在于:(1)在依赖天线方向图的定向算法(如多重信号分类算法,MUSIC)中使用更接近实际天线方向图的方向图,能够获得更优的到达角估计性能;(2)强一阶峰区谱点及其他区域强船只回波谱点的到达角可以是雷达照射区域内的任意角度,即所有角度都有机会接收到用作计算方向图的强回波信号;(3)海流自身的特性决定了在大部分情况下同一距离元上径向流速分布形式较为简单,各个一阶区多普勒谱点只对应一个到达角,而船只回波谱点通常也只有一个到达角。因此,利用筛选出的来自单到达角的强回波谱点(即本发明中高于某预设信噪比的回波信号谱点)就能够采用递推的方式来自动估计出天线方向图。

[0020] 与现有技术相比,本发明具有如下优点和有益效果:

[0021] 1、本发明完全采用软计算的方式从雷达接收海洋回波中自动估计出天线方向图,避免了因使用任何额外的信标设备、GPS和船只等导致的系统复杂度和成本的增加;

[0022] 2、本发明的天线方向图自动估计方法收敛速度快,完成计算所需的回波数据时间通常不超过2小时;

[0023] 3、本发明可以有效降低高频地波雷达的系统复杂度和成本,使工作效率大为提高。

具体实施方式

[0024] 本发明的关键在于,在高频地波雷达中使用依赖于天线方向图的定向算法对所选的单到达角回波信号谱点进行定向得到各谱点的到达角估值,利用各谱点的到达角估值及其幅度比来递推估计出各天线相对于参考天线的相对方向图。上述幅度比为谱点在各天线上的幅度相对参考天线幅度的比值。

[0025] 单极子/交叉环三元天线阵列是便携式高频地波雷达常用的天线,其由一个单极子天线和2个环天线构成,下面将以单极子/交叉环三元天线阵列为例对本发明方法作详细说明。

[0026] 首先,以定向算法中的多重信号分类法(MUSIC)为例,来说明对各单到达角回波信号谱点进行定向得到到达角估值过程。

[0027] 对于某一单到达角回波信号谱点a,单极子/交叉环三元天线阵列的输出信号向量 $x(t)$ 为:

$$[0028] \quad x(t) = a(\theta)s(t) + n(t) \quad (1)$$

[0029] 其中,

[0030] $x(t) = [x_1(t), x_2(t), x_3(t)]^T$, $x_i(t)$ 是序号为*i*的天线上的接收信号, $i = 1, 2, 3$, t 为时间变量;

[0031] $s(t)$ 是单到达角回波信号谱点a的入射信号,其到达角为 θ_a ;

[0032] $a(\theta) = [a_1(\theta), a_2(\theta), a_3(\theta)]^T$ 是阵列导引向量, $a_i(\theta)$ 是序号为*i*的天线的方向图, θ 表示高频地波雷达探测区域任意的方位,是天线方向图的自变量, $i = 1, 2, 3$;

[0033] $n(t)$ 是噪声向量, t 为时间变量;

[0034] 上标T表示求转置运算。

[0035] 天线阵列输出信号向量 $x(t)$ 的空间自相关矩阵的最大似然估计 R_{xx} 为：

$$[0036] \quad \mathbf{R}_{xx} = \frac{1}{N} \mathbf{X} \mathbf{X}^H \quad (2)$$

[0037] 其中，

[0038] $\mathbf{X} = [x(1), \dots, x(N)]$ 是天线阵列接收信号矩阵， $x(j) = [x_1(j), x_2(j), x_3(j)]^T$ ， $j = 1, 2, \dots, N$ ， j 为时间变量 t 具体取值的序号，假设 T 为采样间隔，则有 $t = jT$ ； N 是快拍数，上标 H 表示求共轭转置运算。

[0039] 对式(2)的 R_{xx} 进行特征分解得到：

$$[0040] \quad \mathbf{R}_{xx} = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{U}^H \quad (3)$$

[0041] 其中，

[0042] $\mathbf{S} = \text{diag}[S_1, S_2, S_3]$ 为特征值对角阵，将各特征值按降序排列，即 $S_1 > S_2 \geq S_3$ ； $\mathbf{U} = [u_1, u_2, u_3]$ 为与特征值 S_1, S_2, S_3 相应的特征向量组成的矩阵。则，MUSIC 空间谱 $p(\theta)$ 为：

$$[0043] \quad p(\theta) = \left| \sum_{i=2,3} \mathbf{u}_i^H \mathbf{a}(\theta) \right|^{-2} \quad (4)$$

[0044] 由 $p(\theta)$ 的峰值给出单到达角回波信号谱点 a 的到达角估计 $\hat{\theta}_a$ 。

[0045] 实际中的天线方向图总是受到非理想天线电磁环境(如天线附近的建筑、树木和电力线等)的影响而发生一定程度的畸变。已有文献报道^[1]用理想天线方向图代替实际天线方向图进行定向可导致高达 10 度的误差，因此，在定向算法中必须采用实际方向图而非理想方向图。

[0046] 单极子 / 交叉环三元天线阵列的理想方向图 $a_d(\theta)$ 可表示为：

$$[0047] \quad \mathbf{a}_d(\theta) = [1, \cos(\theta + \frac{\pi}{4}), \sin(\theta + \frac{\pi}{4})]^T \quad (5)$$

[0048] 其中， θ 表示高频地波雷达探测区域任意的方位，是天线方向图的自变量。

[0049] 以单极子天线为参考天线，那么实际所需的是两个环天线相对于单极子天线的相对方向图，采用相对方向图可以消除各天线上的某些一致性形变，同时使校正计算更为简单。

[0050] 对式(1)进行变形：

$$[0051] \quad x(t) = \mathbf{a}_r(\theta) \mathbf{a}_1(\theta) s(t) + n(t) = \mathbf{a}_r(\theta) s_1(t) + n(t) \quad (6)$$

[0052] 其中，

[0053] $\mathbf{a}_r(\theta) = [1, a_{r2}(\theta), a_{r3}(\theta)]^T$ 是相对阵列导引向量， $a_{ri}(\theta) = \frac{a_i(\theta)}{a_1(\theta)}$ 是序号为 i 的环天线的相对方向图， θ 表示高频地波雷达探测区域任意的方位，是天线方向图的自变量， $i = 2, 3$ ；

[0054] $s_1(t) = \mathbf{a}_1(\theta) s(t)$ 是与相对天线方向图对应(符合模型式(1))的等价入射信号。

[0055] $n(t)$ 是噪声向量， t 为时间序号；

[0056] 上标 T 表示求转置运算。

[0057] 迄今为止，相对方向图 $a_{ri}(\theta)$ ($i = 2, 3$) 是采用实测的方法得到，显然，更有吸引力的方法是通过软计算由接收数据进行自动估计。

[0058] 本发明提出了一种相对天线方向图自动估计方法，基本思想是：将当前天线方向

图初始化为理想天线方向图,统计单到达角回波信号谱点的幅度比和方位参数(即到达角)对,并利用幅度比和方位参数对当前天线方向图进行修正,并使用修正后的天线方向图进行下一次定向计算。由于使用更接近实际的相对方向图可以导致更小的定向误差,因此递推的结果将使天线方向图最终收敛到实际天线方向图。

[0059] 本具体实施的具体步骤如下:

[0060] 第一步:在雷达回波信号中搜寻高于某预设信噪比(如 20dB)的回波信号谱点作为候选回波信号谱点;

[0061] 第二步:将当前天线方向图初始化为理想天线方向图,即 $\hat{\mathbf{a}}_r^{(0)}(\theta) = \mathbf{a}_d(\theta)$, $\hat{\mathbf{a}}_r^{(0)}(\theta)$ 为当前方向图的初始值, $\mathbf{a}_d(\theta)$ 为理想天线方向图;

[0062] 第三步:按特征值最陡下降准则判断各候选回波信号谱点的信号源个数,筛选出其中的单到达角谱点,假设筛选出 M 个单到达角谱点,对第 k 个单到达角谱点而言,其空间自相关矩阵特征值应满足 $\frac{S_{1,k}}{S_{2,k}} > \frac{S_{2,k}}{S_{3,k}}$, $S_{1,k}$ 、 $S_{2,k}$ 、 $S_{3,k}$ 为序号为 k 的单到达角谱点的空间自相关矩阵的特征值, $k = 1, \dots, M$;

[0063] 第四步:对 M 个单到达角谱点均计算其幅度比和到达角参数对,下面将以第 k 个单到达角谱点为例说明计算过程:

[0064] 计算单到达角谱点 k 在环天线上相对于单极子天线的幅度比 $g_k = [g_{k2}, g_{k3}]$,其中, g_{k2} 、 g_{k3} 分别为单到达角谱点 k 在两个环天线上的幅度相对于其在单极子天线上幅度的比值,并采用上述的多重信号分类法、根据当前天线方向图计算出单到达角谱点 k 的到达角 θ_k ,并给出参数对 $\{g_k, \theta_k\}$;

[0065] 第五步:将雷达覆盖区张角均匀划分为以 1 度为间隔的张角网格,对张角网格中的每个角度 θ 搜索到达角落入其某邻域(如,3 度邻域为 $(\theta - 3^\circ, \theta + 3^\circ]$)的单到达角谱点,计算角度 θ 某邻域中所有单到达角谱点的幅度比中值 $\bar{\mathbf{g}} = [\bar{g}_2, \bar{g}_3]$, \bar{g}_2 、 \bar{g}_3 分别为 θ 某邻域中所有单到达角谱点在两环天线上相对于单极子天线的幅度比中值;

[0066] 第六步:按下式分别对两个环天线的当前天线方向图进行修正:

$$[0067] \quad \hat{\mathbf{a}}_{ri}^{(n)}(\theta) = (1 - \beta)\hat{\mathbf{a}}_{ri}^{(n-1)}(\theta) + \beta\bar{\mathbf{g}}_i \quad (7)$$

[0068] 其中,

[0069] $i = 2, 3$;

[0070] $\hat{\mathbf{a}}_{ri}^{(n-1)}(\theta)$ 为环天线 i 的当前天线方向图;

[0071] $\hat{\mathbf{a}}_{ri}^{(n)}(\theta)$ 为修正后的环天线 i 的天线方向图;

[0072] β 为学习速率, $0 < \beta < 1$,为保证收敛 β 可取较小值,如 $\beta = 0.2$,但收敛速度相应较慢。

[0073] 第七步:按下式判断修正后的方向图 $\hat{\mathbf{a}}_{ri}^{(n-1)}(\theta)$ 是否收敛,如收敛则结束,此时的 $\hat{\mathbf{a}}_{ri}^{(n-1)}(\theta)$ 即为所得的相对天线方向图;否则,以修正后的天线方向图为当前天线方向图,转至第四步。

$$[0074] \quad \varepsilon_i^{(n)} = \frac{1}{Q} \sum_{\theta} |\hat{\mathbf{a}}_{ri}^{(n)}(\theta) - \hat{\mathbf{a}}_{ri}^{(n-1)}(\theta)|^2 \leq \gamma \quad (8)$$

[0075] 其中,

[0076] Q 是雷达覆盖区张角网格的网格点总数;

[0077] γ 是预设的收敛判决阈值, 可以取 10^{-4} ;

[0078] $\epsilon_i^{(m)}$ 为当前天线方向图和修正后的天线方向图之间的均方误差。

[0079] 按上述方法最后得到方向图 $\hat{a}_m(\theta)$, 在后续定向算法中以此替代理想方向图可获得更优的到达角估计性能。上述估计方法中的每一步递推, 是对一场(一个相干积累时间)数据内的某个距离段依次进行, 利用多场数据得到最终的计算结果。

[0080] 本发明并不限于用于上述单极子 / 交叉环三元天线阵列系统, 还能适用于有定向能力的任何多元天线阵列系统, 且在具有一定空间口径(即入射信号在不同阵元上有空间相位差)的阵列(如直线阵或圆阵)中能够获得更优的方向图估计性能。