

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局



(43) 国际公布日
2006年9月28日 (28.09.2006)

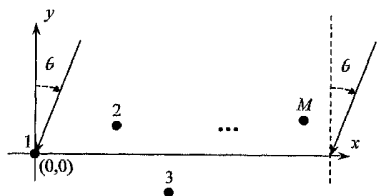
PCT

(10) 国际公布号
WO 2006/099800 A1

- (51) 国际专利分类号: G01S 7/40 (2006.01) G01S 13/06 (2006.01) [CN/CN]; 中国湖北省武汉市珞珈山武汉大学电子信息学院, Hubei 430072 (CN)。
- (21) 国际申请号: PCT/CN2006/000453
- (22) 国际申请日: 2006年3月21日 (21.03.2006)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权: 200510018438.3
2005年3月24日 (24.03.2005) CN
- (71) 申请人 (对除美国外的所有指定国): 武汉大学 (WUHAN UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国湖北省武汉市珞珈山, Hubei 430072 (CN)。
- (72) 发明人; 及
- (75) 发明人/申请人 (仅对美国): 程丰(CHENG, Feng) [CN/CN]; 中国湖北省武汉市珞珈山武汉大学电子信息学院, Hubei 430072 (CN)。 吴雄斌(WU, Xiongbin)
- (74) 代理人: 武汉开元专利代理有限公司(WUHAN KAIYUAN PATENT AGENT LTD); 中国湖北省武汉市解放大道1757号附1号, Hubei 430016 (CN)。
- (81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW。
- (84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, [续页])

(54) Title: A PASSIVE CHANNEL ADJUSTMENT METHOD BASED ON A NON-LINEAR ANTENNA ARRAY

(54) 发明名称: 一种基于非直线天线阵列的无源通道校正方法



(57) Abstract: A passive channel adjustment method that based on a non-linear antenna array comprises setting the antenna array to non-linear formation that contains dual matrix element with displacement invariance, estimating channel magnitude mismatch parameters by sea echo of single direction to amend magnitude, estimating channel phase mismatch parameters by sea echo of single direction amended and known array position information to amend phase. The method totally doesn't need any auxiliary signal source and is a genuine passive channel adjustment method.

(57) 摘要:

一种基于非直线天线阵列的无源通道校正方法, 将天线阵列设置为含有平移不变阵元偶组的非直线形式; 通过平移不变阵元偶组检测出单方位海洋回波; 利用单方位海洋回波估计通道幅度失配系数, 实现幅度校正; 利用已经过幅度校正的单方位海洋回波和已知的阵列位置信息估计通道相位失配系数, 实现相位校正。本发明完全不需要任何辅助信号源, 是一种真正的无源通道校正方法, 其优势在于: 不存在有源通道校正方法面临的船只回波干扰、多径效应等棘手问题; 利用了大量高强度单方位海洋回波, 具有良好的精度和稳健性; 运算量较小; 能长期不间断稳定工作; 大大改善了雷达的应用灵活性; 在提高探测性能的同时, 大幅降低了雷达的研制成本和维护费用。

WO 2006/099800 A1



SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), 欧洲 (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

- 包括国际检索报告。
- 包括经修改的权利要求及声明。

所引用双字母代码及其它缩写符号, 请参考刊登在每期PCT公报期刊起始的“代码及缩写符号简要说明”。

一种基于非直线天线阵列的无源通道校正方法

技术领域

本发明涉及一种基于非直线天线阵列对高频地波雷达进行无源通道校正的方法。

背景技术

高频地波雷达利用高频电磁波在导电海洋表面绕射传播衰减小的特点，采用垂直极化天线辐射电波，能超视距探测海平面视线以下出现的舰船、飞机和导弹等运动目标。另外，高频地波雷达利用海洋表面对高频电磁波的一阶散射和二阶散射机制，从雷达回波中提取风场、浪场、流场等海态信息，可实现对海洋环境大范围、高精度和全天候的实时监测。

由于硬件本身的差异、接收通道的非理想特性、周边环境影响等多种因素的作用，实际中天线阵列各个通道的幅相特性是有差异的，导致回波信号经过不同通道后的幅度和相位变化（复增益）不一致，一般称之为通道失配。通道失配引起波束扫描和方位估计的误差增大，甚至完全失效，是影响高频地波雷达探测性能的关键问题之一。为了保证雷达能有效工作，必须采取措施使通道失配限制在一定的范围内：一方面，通过适当的措施（如元器件筛选）使各通道在制作时尽量保证其一致性；另一方面，可以对通道失配系数进行测量或估计，然后通过校正进一步缩小通道特性的差异。

现有的通道校正方法可分为有源和无源两类。在有源校正方法中，将辅助信号源置于天线阵前方足够远的开阔场地发射校正信号，再测量各接收通道的输出，根据已知信号源方位扣除阵列空间位置引起的相位差，即可得到通道失配信息。在无源校正方法中，无需方位准确已知的辅助信号源，直接利用接收的实测数据和一些先验知识（如阵列形式）估计通道失配系数，然后进行补偿校正。有些无源校正方法还可以实现信号方位和通道失配的联合估计。在刘德树、罗景青等编著的《空间谱估计及其应用》（中国科技大学出版社 1997 年）一书中对一般无源校正方法有详细阐述。

受地形条件、工作波长、电波传播、雷达体制、天线阵列、（硬）目标回波、海洋杂波、噪声干扰等多种因素的影响，高频地波雷达的通道校正实现起来比较困难，现有方法都只能解决部分问题，且费时费力，成本高昂，代价很大。雷达天线阵前方是海面，如采用有源校正方法则辅助信号源只能放在舰船或岛屿上，其维护十分麻烦而昂贵，难以长期稳定工作。现有的无源校正方法一般需要多次复杂的迭代运算，计算量很大，不一定能满足实时性要求，且有可能收敛于局部最优，而不是全局最优，以致出现完全错误的估计值。实际雷达系统与理想模型的差异，也使得一般无源校正方法的适用条件不能得到满足，难以实用。通道校正已成为制约高频地波雷达探测性能并阻碍其实际应用的重大技术难题，必须加以妥善解决。

武汉大学电波传播实验室曾考虑过将海上已知天然或人工物体对雷达电波的反射信号作为校正信号。只要反射源的距离、速度已知，就可以从回波中检测出校正信号，然后根据已知反射源方位估计出各通道的失配系数。其具体实施细节可参考 03128238.5 号中国发明专利申请“一种利用海洋回波进行阵列通道校正的方法”。该发明可利用探测海域内已知的岛屿、灯塔和钻井平台等固定反射物，不存在辅助信号源的放置和维护问题，也无需额

外的硬件开销，实现了在线实时自动校正，具有一定的实用价值。但该发明实际上是一种特殊的有源校正方法，应用范围和实际效果有限，不适用于没有已知固定反射物的海域，且仍然受到噪声干扰、舰船回波、多径效应等不利因素的影响。由于该发明提出了一种对频谱不重叠的单方位海洋回波的分离与检测技术，满足了本发明提出的无源通道校正方法的基本要求，因此下面将对其进行重点介绍。

高频地波雷达一般采用调频中断连续波（frequency modulated interrupted continuous wave, 缩写 FMICW）体制。Rafaat Khan 等人发表的题为“高频地波雷达目标探测与跟踪”（Target Detection and Tracking With a High Frequency Ground Wave Radar, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1994, 19(4): 540~548）的论文中对此有详细描述。在该波形体制下，海洋回波（包括海杂波和硬目标回波）进入接收机后，经混频、低通滤波、A/D 转换和二维 FFT（如图 1 所示）可得距离—多普勒（速度）二维回波谱（如图 2 所示）。在二维回波谱中，雷达接收的大量海洋回波按距离和速度进行了分离，分散在很多谱点上。当第二次 FFT（多普勒变换）相干积累时间较长（10 分钟左右）时，雷达可获得很高的速度分辨力，二维回波谱中与海洋回波对应的谱点可达 1000 个以上，很适合用统计方法将其中频谱不重叠的单方位回波检测出来。

单方位回波的检测是通过对特定形式阵列（如图 3 所示）二维回波谱输出的统计分析实现的。特定形式阵列由阵元 1~4 构成，其位置坐标为 (x_i, y_i) ，对应的某个二维回波谱点输出为 Y_i ， $i=1,2,3,4$ 。阵元 1 和 2 组成阵元偶 A_1 ，3 和 4 组成阵元偶 A_2 ， A_1 与 A_2 之间具有平移不变性，则有

$$\begin{cases} (x_2, y_2) = (x_1 + d, y_1) \\ (x_4, y_4) = (x_3 + d, y_3) \end{cases}$$

令 $\eta_1 = \frac{Y_2 Y_3}{Y_1 Y_4}$ ，容易证明，在没有噪声的理想情况下，二维回波谱中单方位谱点对应的 η_1

是一个只与通道失配有关的不变量，不妨记为 η'_1 。实际系统中噪声是不可避免的，单方位谱点对应的 η_1 集中分布在 η'_1 附近。另一方面，通过简单分析和数值模拟可知，多方位谱点对应的 η_1 是一个与目标距离、（径向）速度、方位和回波信号振幅均有关的变量，由于这些目标参数的随机性， η_1 将呈随机分散状态。综合以上分析，将二维回波谱中所有超过一定信噪比门限的谱点对应的 η_1 标在复平面上，则有且仅有一个区域（ η'_1 附近）出现高度聚集

现象，其中大多数 η_1 值对应于单方位谱点。令 $\eta_2 = \frac{Y_2 Y_1^*}{Y_4 Y_3^*}$ ，由与前面类似的分析可知， η_2 在

复平面上也会出现聚集区，其中大多数 η_2 值对应于单方位谱点。令 $\eta_3 = \frac{Y_2 Y_4^*}{Y_1 Y_3^*}$ ， η_3 在复平面

上同样会出现聚集区，其中大多数 η_3 值对应于单方位谱点。

经过理论分析和数值模拟发现，多方位谱点对应的 η_1 、 η_2 和 η_3 同时落入各自聚集区概率极小，因此可以用 η_1 、 η_2 和 η_3 能否同时落入各自聚集区作为检测单方位谱点的判据。A₁ 和 A₂ 作为一个平移不变阵元偶组，构成了检测单方位回波（谱点）的特定形式阵列。若阵列中平移不变阵元偶组超过一个，则将是否同时被多个阵元偶组检测到作为判据，可进一步筛选出单方位谱点。含有平移不变阵元偶组的阵列形式是很常见的，如均匀线阵（或均匀平面阵）。

发明内容

针对现有方法的局限性，本发明的目的是利用高频地波雷达接收的单方位海洋回波，提供一种基于非直线天线阵列的无源通道校正方法，以减少通道幅相失配，提高雷达系统性能。这里的非直线天线阵列是指并非所有天线阵元都位于同一直线上的阵列。

为了实现上述目的，本发明提供的技术方案是：一种基于非直线天线阵列的无源通道校正方法，将天线阵列设置为含有平移不变阵元偶组的非直线形式；通过平移不变阵元偶组检测出单方位海洋回波；利用单方位海洋回波估计通道幅度失配系数，实现幅度校正；利用已经过幅度校正的单方位海洋回波和已知的阵列位置信息估计通道相位失配系数，实现相位校正。

在上述方法中，可利用单方位海洋回波通过 $\hat{g}_i = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^L |Y_i(l)|^2}{\sum_{l=1}^L |Y_1(l)|^2}}$ 或 $\hat{g}_i = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \frac{|Y_i(l)|^2}{|Y_1(l)|^2}}$ 或 $\hat{g}_i = \sum_{l=1}^L |Y_i(l)| / \sum_{l=1}^L |Y_1(l)|$ 或 $\hat{g}_i = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \frac{|Y_i(l)|}{|Y_1(l)|}$ 估计通道幅度失配系数，其中 \hat{g}_i 为阵元 i 的通道幅度失配系数估计值， $i=1,2,\Lambda,M$ ， M 为阵元个数， $Y_i(l)$ 为阵元 i 接收的第 l 个单方位回波输出， $l=1,2,\Lambda,L$ ， L 为单方位回波个数。

本发明还可以利用已经过幅度校正的单方位海洋回波和已知的阵列位置信息通过 $\hat{\Psi} = \arg \min_{\Psi} \|\mathbf{Y} - \mathbf{f}'(\Psi)\|^2$ 或 $\hat{\Psi} = \arg \min_{\Psi} \|\mathbf{Y} - \tilde{\mathbf{f}}(\Psi)\|^2$ 估计通道相位失配系数，其中

$$\Psi = [\theta_1, \theta_2, \Lambda, \theta_L, \phi_2, \phi_3, \Lambda, \phi_M]^T$$

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_2 \\ \mathbf{Y}_3 \\ \mathbf{M} \\ \mathbf{Y}_M \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Y}_i = [Y_i(1), Y_i(2), \Lambda, Y_i(L)]^T$$

$$\mathbf{f}'(\Psi) = \begin{bmatrix} \mathbf{f}'_2(\Psi) \\ \mathbf{f}'_3(\Psi) \\ \mathbf{M} \\ \mathbf{f}'_M(\Psi) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{f}'_i(\Psi) = \left[Y_1(1)e^{j\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x_i \sin \theta_1 + y_i \cos \theta_1) + \phi_i\right]}, Y_1(2)e^{j\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x_i \sin \theta_2 + y_i \cos \theta_2) + \phi_i\right]}, \Lambda, Y_1(L)e^{j\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x_i \sin \theta_L + y_i \cos \theta_L) + \phi_i\right]} \right]^T$$

$$\tilde{\mathbf{f}}(\Psi) = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{f}}_2(\Psi) \\ \tilde{\mathbf{f}}_3(\Psi) \\ \mathbf{M} \\ \tilde{\mathbf{f}}_M(\Psi) \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\mathbf{f}}_i(\Psi) = \left[\hat{A}(1)e^{j\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x_i \sin \theta_1 + y_i \cos \theta_1) + \phi_i\right]}, \hat{A}(2)e^{j\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x_i \sin \theta_2 + y_i \cos \theta_2) + \phi_i\right]}, \Lambda, \hat{A}(L)e^{j\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x_i \sin \theta_L + y_i \cos \theta_L) + \phi_i\right]} \right]^T$$

$$\hat{A}(l) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Y_i(l) e^{-j\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x_i \sin \theta_l + y_i \cos \theta_l) + \phi_i\right]} = \frac{1}{M} \left\{ \sum_{i=2}^M Y_i(l) e^{-j\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x_i \sin \theta_l + y_i \cos \theta_l) + \phi_i\right]} + Y_1(l) \right\}$$

θ_l 为第 l 个单方位回波的到达角, ϕ_i 为阵元 i 的通道相位失配系数, (x_i, y_i) 为阵元位置坐标,

阵元 1 为坐标原点, 即 $(x_1, y_1) = (0, 0)$, λ 为回波信号波长, $\hat{\Psi}$ 为 Ψ 的估计值。

本发明从所有阵元中选出 3 个阵元构成一个三角阵, 对该三角阵进行降低全局最优化维数的处理, 并通过初值预估和局部最优化方法估计通道相位失配系数, 以降低多维参数估计的运算量。

1) 先从所有阵元中选出 3 个阵元构成一个三角阵, 再选出 3 个单方位回波用于参数估计; 2) 以该三角阵中的任一阵元为基准通道, 采用全局最优化方法估计另两个通道的相位失配系数和 3 个单方位回波的到达角; 3) 增加一个单方位回波用于三角阵的参数估计, 得出该单方位回波的到达角; 4) 按步骤 3) 得出其它单方位回波的到达角; 5) 将三角阵与另一个阵元组合成 4 元阵, 再把所有单方位回波用于该 4 元阵的参数估计, 得到新加入阵元的通道相位失配系数; 6) 按步骤 5) 得出其它阵元的通道相位失配系数。

本发明也可在经过步骤 4) 后, 将所有单方位回波用于三角阵的参数估计, 以已求得单方位回波到达角和通道相位失配系数的估计值为初值, 采用局部最优化方法求得这些参数更精确的估计值, 然后进行后面的步骤 5) 和 6)。

在经过步骤 6) 后, 将所有单方位回波用于整个阵列的参数估计, 以已求得单方位回波到达角和通道相位失配系数的估计值为初值, 采用局部最优化方法求得这些参数更精确的估计值。

对于 M 元 L 形阵, 将阵元 1、2、 M 作为步骤 1) 中所选的三角阵用于参数估计, 实现通道相位校正。

对于 4 元 T 形阵, 将阵元 1、2、4 或阵元 2、3、4 作为步骤 1) 中所选的三角阵用于参数估计, 实现通道相位校正。

对于 4 元矩形阵, 将其中任意 3 个阵元作为步骤 1) 中所选的三角阵用于参数估计, 实现通道相位校正。

本发明的优势在于其出色的实用性能: 完全不需要任何辅助信号源, 是一种真正的无源通道校正方法。本发明只利用了单方位回波, 不存在有源通道校正方法面临的船只回波干扰、多径效应等棘手问题; 利用了大量 (可达 100 个以上) 高强度单方位海洋回波, 信息利用率较高, 具有良好的精度和稳健性; 采用一些特殊处理时运算量较小, 能满足实时性要求; 由于海洋回波总是大量存在, 该方法能长期不间断稳定工作; 大大改善了雷达的应用灵活性, 天线系统可随意更换、增减、移动, 这在以前是难以想象的; 在提高探测性能的同时, 大幅降低了雷达的研制成本和维护费用。

附图说明

- 图 1 为高频地波雷达工作原理图;
- 图 2 为高频地波雷达距离—多普勒 (速度) 二维回波谱图;
- 图 3 为用于检测单方位回波的特定形式阵列示意图;
- 图 4 为本发明 M 元任意非直线阵列示意图;
- 图 5 为三角阵示意图;
- 图 6 为 M 元 L 形阵示意图;
- 图 7 为 4 元矩形阵示意图;
- 图 8 为 4 元 T 形阵示意图;

具体实施方式

本发明的关键在于通过建立非直线天线阵列接收的单方位回波信号模型, 将通道校正问题转化成了参数估计问题, 并由此得到了较为精确的通道失配估计。

首先考虑图 4 所示的 M ($M \geq 3$) 元任意非直线天线阵列的情况, 以下分步骤对本发明在该情况下的具体实施方式进行描述。

(一) 信号模型

设图 4 所示的非直线天线阵列的阵元位置坐标分别为 (x_i, y_i) ($i=1, 2, \dots, M$), 其中阵元 1 为坐标原点, 即 $(x_1, y_1) = (0, 0)$ 。海洋回波可看作平面波, 假设从距离—多普勒 (速度) 二维回波谱中检测出的单方位回波有 L ($L \geq 3$) 个, 则阵元 i 接收的第 l ($l=1, 2, \dots, L$) 个单方位回波输出为

$$Y_i(l) = g_i e^{j\phi_i} \left[A(l) e^{j \frac{2\pi}{\lambda} (x_i \sin \theta_l + y_i \cos \theta_l)} + W_i(l) \right] \quad (1)$$

其中, θ_l 和 $A(l)$ 分别为第 l 个单方位回波的到达角和复振幅, g_i 和 ϕ_i 分别为阵元 i 的通道幅度失配系数和相位失配系数, λ 为回波信号波长, $W_i(l)$ 为加性噪声。以阵元1为基准通道, 即 $g_1 e^{j\phi_1} = 1$, 则由 (1) 式有

$$Y_i(l) = A(l) + W_i(l) \tag{2}$$

对加性噪声 $W_i(l)$ 采用以下假设:

- 1) 对应于不同 i 或 l 的 $W_i(l)$ 相互独立;
- 2) $W_i(l)$ 为具有相同方差 σ^2 的高斯白噪声。

则 (1) 和 (2) 式构成了通道失配估计的信号模型。

(二) 通道幅度校正

阵元 i 的通道幅度失配估计可直接通过

$$\hat{g}_i = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^L |Y_i(l)|^2}{\sum_{l=1}^L |Y_1(l)|^2}} \tag{3}$$

计算求得, 根据 \hat{g}_i 即可对通道幅度失配进行校正。(3) 式还可以有其它形式, 如

$$\hat{g}_i = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \frac{|Y_i(l)|^2}{|Y_1(l)|^2}}, \quad \hat{g}_i = \frac{\sum_{l=1}^L |Y_i(l)|}{\sum_{l=1}^L |Y_1(l)|}, \quad \hat{g}_i = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \frac{|Y_i(l)|}{|Y_1(l)|}, \quad \text{等等。}$$

(三) 通道相位校正

阵列接收通道经过幅度校正后, 阵元 i 接收的第 l 个单方位回波输出为

$$Y_i(l) = e^{j\phi_i} \left[A(l) e^{j \frac{2\pi}{\lambda} (x_i \sin \theta_l + y_i \cos \theta_l)} + W_i(l) \right] \tag{4}$$

定义

$$\mathbf{Y}_i = [Y_i(1), Y_i(2), \dots, Y_i(L)]^T \quad i = 2, 3, \dots, M$$

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_2 \\ \mathbf{Y}_3 \\ \mathbf{M} \\ \mathbf{Y}_M \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\Psi} = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_L, \phi_2, \phi_3, \dots, \phi_M]^T$$

$$\mathbf{f}_i(\Psi) = \left[A(1)e^{j\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x_i \sin \theta_1 + y_i \cos \theta_1) + \phi_1\right]}, A(2)e^{j\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x_i \sin \theta_2 + y_i \cos \theta_2) + \phi_1\right]}, \Lambda, A(L)e^{j\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x_i \sin \theta_L + y_i \cos \theta_L) + \phi_1\right]} \right]^T$$

$$\mathbf{f}(\Psi) = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_2(\Psi) \\ \mathbf{f}_3(\Psi) \\ \mathbf{M} \\ \mathbf{f}_M(\Psi) \end{bmatrix}$$

以 Ψ 为待估参数矢量，根据 (4) 式和噪声模型假设，采用最大似然法（请参考张贤达所著《现代信号处理》，清华大学出版社，1994 年）可得 Ψ 的估计值为

$$\hat{\Psi} = \arg \min_{\Psi} \{[\mathbf{Y} - \mathbf{f}(\Psi)]^H [\mathbf{Y} - \mathbf{f}(\Psi)]\} = \arg \min_{\Psi} \|\mathbf{Y} - \mathbf{f}(\Psi)\|^2 \quad (5)$$

其中， $\arg \min_{\Psi}$ 表示后面表达式极小化时 Ψ 的取值， $\|\mathbf{X}\|^2$ 表示矢量 \mathbf{X} 的 2-范数。显然，通道相位失配系数和单方位回波到达角实现了联合估计。

$A(l)$ 包含在有噪声的 $Y_i(l)$ 中，是不可能直接得到的， $\mathbf{f}_i(\Psi)$ 也是不可能直接构造的，实际中用于通道相位失配估计的不可能是 (5) 式，需要进行改进。在一般信噪比条件 ($\geq 20\text{dB}$) 下，由 (2) 式可得 $Y_i(l) \approx A(l)$ ，用 $Y_i(l)$ 替换 (5) 式中的 $A(l)$ ，得到 Ψ 的估计值实际表达式为

$$\hat{\Psi} = \arg \min_{\Psi} \|\mathbf{Y} - \mathbf{f}'(\Psi)\|^2 \quad (6)$$

其中

$$\mathbf{f}'(\Psi) = \begin{bmatrix} \mathbf{f}'_2(\Psi) \\ \mathbf{f}'_3(\Psi) \\ \mathbf{M} \\ \mathbf{f}'_M(\Psi) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{f}'_i(\Psi) = \left[Y_i(1)e^{j\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x_i \sin \theta_1 + y_i \cos \theta_1) + \phi_1\right]}, Y_i(2)e^{j\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x_i \sin \theta_2 + y_i \cos \theta_2) + \phi_1\right]}, \Lambda, Y_i(L)e^{j\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x_i \sin \theta_L + y_i \cos \theta_L) + \phi_1\right]} \right]^T$$

根据 $\hat{\Psi}$ 即可对通道相位失配进行校正。如用其它量替换 (5) 式中的 $A(l)$ ，(6) 式还可以有其它形式，如 $\hat{\Psi} = \arg \min_{\Psi} \|\mathbf{Y} - \tilde{\mathbf{f}}(\Psi)\|^2$ ，其中 \mathbf{Y} 和 Ψ 定义与前面相同， $\tilde{\mathbf{f}}(\Psi)$ 定义为

$$\tilde{\mathbf{f}}(\Psi) = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{f}}_2(\Psi) \\ \tilde{\mathbf{f}}_3(\Psi) \\ \mathbf{M} \\ \tilde{\mathbf{f}}_M(\Psi) \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\mathbf{f}}_i(\Psi) = \left[\hat{A}(1)e^{j\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x_i \sin \theta_1 + y_i \cos \theta_1) + \phi_1\right]}, \hat{A}(2)e^{j\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x_i \sin \theta_2 + y_i \cos \theta_2) + \phi_2\right]}, \dots, \hat{A}(L)e^{j\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x_i \sin \theta_L + y_i \cos \theta_L) + \phi_L\right]} \right]^T$$

$$\hat{A}(L) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Y_i(L) e^{-j\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x_i \sin \theta_L + y_i \cos \theta_L) + \phi_L\right]} = \frac{1}{M} \left\{ \sum_{i=2}^M Y_i(L) e^{-j\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x_i \sin \theta_L + y_i \cos \theta_L) + \phi_L\right]} + Y_1(L) \right\}$$

理论分析和仿真实验表明,上述通道相位校正方法的适用条件是采用非直线阵列且存在至少两个角度相差不为 0° 或 180° 的单方位回波。通道相位失配估计由于涉及所有阵元,实际上是一个多维参数估计问题,要通过多维搜索求得,这就涉及最优化方法的选择。由于存在局部极小,必须采用全局最优化方法(请参考唐芳、王凌发表的论文“从局部极小到全局最优”,计算机工程与应用,2002.6:56~58)对通道相位失配进行估计,在参数较多(可达100个以上)的情况下运算量十分惊人,达不到实时性要求。本发明采用了特殊处理以降低运算量,下面将对此作详细说明。

图5所示为最简单的非直线阵列:由不共直线的3个阵元构成的三角阵。若只利用3个单方位回波联合估计该三角阵的通道相位失配系数和单方位回波到达角,则根据(6)式可判断为5维搜索(有一个阵元作为基准通道)。由于维数较少,即使采用模拟退火、进化计算、混沌搜索、随机抽样等全局最优化方法,该5维搜索的运算量也不大,可满足实时性要求。

对于图4所示的 M 元任意非直线阵列,为了降低多维参数估计的运算量,可利用其中包含的某个三角阵先对待估参数进行初值预估,再采用局部最优化方法(如最速下降法)求得更精确估计,具体步骤如下:

1) 先从所有阵元中选出3个阵元构成一个三角阵,再从大量单方位回波中选出3个用于参数估计。

2) 以该三角阵中的某个阵元为基准通道,采用全局最优化方法估计另两个通道的相位失配系数和3个单方位回波的到达角,这是5维搜索。

3) 增加一个单方位回波用于三角阵的参数估计,则(6)式中待估参数也增加了一个(即新增单方位回波的到达角),由5维搜索变成了6维搜索;将步骤2)求得的5个参数估计值代入含有6个待估参数的(6)式,再采用只剩一个待估参数的(6)式估计新增单方位回波的到达角,这是1维搜索。

4) 除了步骤1)中选出的3个单方位回波,其它 $L-3$ 个单方位回波的到达角估计值都可采用步骤3)中的方法求得。

5) 将所有 L 个单方位回波用于三角阵的参数估计,以已求得的 $L+2$ 个参数(L 个单方

位回波到达角和 2 个通道相位失配系数) 估计值为初值, 采用局部最优化方法求得这些参数更精确的估计值。

6) 将三角阵与另一个阵元组合成 4 元阵, 再把所有 L 个单方位回波用于该 4 元阵的参数估计, 则 (6) 式中待估参数为 $L+3$ 个; 将步骤 5) 已求得的 $L+2$ 个参数估计值代入 (6) 式, 则 (6) 式只剩一个待估参数, 即新加入阵元的通道相位失配系数, 可采用 1 维搜索求得其估计值。

7) 除了步骤 1) 中选出的三角阵, 其它 $M-3$ 个阵元的通道相位失配估计值都可采用步骤 6) 中的方法求得。

8) 将所有 L 个单方位回波用于整个 M 元阵列的参数估计, 以已求得的 $L+M-1$ 个参数 (L 个单方位回波到达角和 $M-1$ 个通道相位失配系数) 估计值为初值, 采用局部最优化方法求得这些参数更精确的估计值。

在参数初值预估误差不大的情况下, 局部最优化所得结果也是全局最优, 而计量量却比全局最优化小得多。以上特殊处理中的初值预估实际上占用了大部分计算时间, 但其中最多只涉及 5 维搜索的全局最优化, 因而能满足实时性要求。以上 8 个步骤是特殊处理的典型方式, 在实际应用中可根据具体情况进行简化、充实、调整或改进, 其基本思想是利用对三角阵的处理降低全局最优化的维数, 并通过初值预估尽可能采用局部最优化方法, 以达到降低多维参数估计运算量的目的。

图 6 所示为 M 元 L 形阵, 是本发明较常见的一个实施例。阵元 1~ $M-1$ 构成一个均匀线阵, 其中可划分出多个用于检测单方位回波的平移不变阵元偶组。通道幅度校正可通过 (3) 式实现, 关键是通道相位校正。将阵元 1、2、 M 构成的三角阵用于参数初值预估, 通过 (6) 式和特殊处理即可实现通道相位校正。

图 7 所示为 4 元矩形阵。在该实施例中, 4 个阵元仅构成了一个可用于检测单方位回波的平移不变阵元偶组, 其中任意 3 个阵元构成的三角阵都可用于参数初值预估。

图 8 所示为 4 元 T 形阵。在该实施例中, 阵元 1~3 构成 3 元均匀线阵, 只能划分出一个用于检测单方位回波的平移不变阵元偶组。阵元 1、2、4 和阵元 2、3、4 构成的两个三角阵都可用于参数初值预估。

虽然本发明描述的通道校正方法首先在高频地波雷达上获得了成功, 但从本质上讲, 该方法也有可能应用于其它接收了大量单方位信号的探测系统或通信系统。

权 利 要 求

1. 一种基于非直线天线阵列的无源通道校正方法，其特征在于：将天线阵列设置为含有平移不变阵元偶组的非直线形式；通过平移不变阵元偶组检测出单方位海洋回波；利用单方位海洋回波估计通道幅度失配系数，实现幅度校正；利用已经过幅度校正的单方位海洋回波和已知的阵列位置信息估计通道相位失配系数，实现相位校正。
2. 根据权利要求 1 所述的一种基于非直线天线阵列的无源通道校正方法，其特征在于：利用单方位海洋回波通过 $\hat{g}_i = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^L |Y_i(l)|^2}{\sum_{l=1}^L |Y_1(l)|^2}}$ 估计通道幅度失配系数，实现幅度校正，其中 \hat{g}_i 为阵元 i 的通道幅度失配系数估计值， $i=1,2,\Lambda,M$ ， M 为阵元个数， $Y_i(l)$ 为阵元 i 接收的第 l 个单方位回波输出， $l=1,2,\Lambda,L$ ， L 为单方位回波个数。
3. 根据权利要求 1 所述的一种基于非直线天线阵列的无源通道校正方法，其特征在于：利用单方位海洋回波通过 $\hat{g}_i = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \frac{|Y_i(l)|^2}{|Y_1(l)|^2}}$ 估计通道幅度失配系数，实现幅度校正，其中 \hat{g}_i 为阵元 i 的通道幅度失配系数估计值， $i=1,2,\Lambda,M$ ， M 为阵元个数， $Y_i(l)$ 为阵元 i 接收的第 l 个单方位回波输出， $l=1,2,\Lambda,L$ ， L 为单方位回波个数。
4. 根据权利要求 1 所述的一种基于非直线天线阵列的无源通道校正方法，其特征在于：利用单方位海洋回波通过 $\hat{g}_i = \frac{\sum_{l=1}^L |Y_i(l)|}{\sum_{l=1}^L |Y_1(l)|}$ 估计通道幅度失配系数，实现幅度校正，其中 \hat{g}_i 为阵元 i 的通道幅度失配系数估计值， $i=1,2,\Lambda,M$ ， M 为阵元个数， $Y_i(l)$ 为阵元 i 接收的第 l 个单方位回波输出， $l=1,2,\Lambda,L$ ， L 为单方位回波个数。
5. 根据权利要求 1 所述的一种基于非直线天线阵列的无源通道校正方法，其特征在于：利用单方位海洋回波通过 $\hat{g}_i = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \frac{|Y_i(l)|}{|Y_1(l)|}$ 估计通道幅度失配系数，实现幅度校正，其中 \hat{g}_i 为阵元 i 的通道幅度失配系数估计值， $i=1,2,\Lambda,M$ ， M 为阵元个数， $Y_i(l)$ 为阵元 i 接收的第 l 个单方位回波输出， $l=1,2,\Lambda,L$ ， L 为单方位回波个数。
6. 根据权利要求 1 至 5 所述任意一种基于非直线天线阵列的无源通道校正方法，其特征在于：利用已经过幅度校正的单方位海洋回波和已知的阵列位置信息通过 $\hat{\Psi} = \arg \min_{\Psi} \|\mathbf{Y} - \mathbf{f}'(\Psi)\|^2$ 估计通道相位失配系数，实现相位校正，其中

$$\Psi = [\theta_1, \theta_2, \Lambda, \theta_L, \phi_2, \phi_3, \Lambda, \phi_M]^T$$

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_2 \\ \mathbf{Y}_3 \\ \mathbf{M} \\ \mathbf{Y}_M \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Y}_i = [Y_i(1), Y_i(2), \Lambda, Y_i(L)]^T$$

$$\mathbf{f}'(\Psi) = \begin{bmatrix} \mathbf{f}'_2(\Psi) \\ \mathbf{f}'_3(\Psi) \\ \mathbf{M} \\ \mathbf{f}'_M(\Psi) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{f}'_i(\Psi) = \left[Y_i(1)e^{j\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x_i \sin \theta_1 + y_i \cos \theta_1) + \phi_i\right]}, Y_i(2)e^{j\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x_i \sin \theta_2 + y_i \cos \theta_2) + \phi_i\right]}, \Lambda, Y_i(L)e^{j\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x_i \sin \theta_L + y_i \cos \theta_L) + \phi_i\right]} \right]^T$$

θ_l 为第 l 个单方位回波的到达角, ϕ_i 为阵元 i 的通道相位失配系数, (x_i, y_i) 为阵元位置坐标, 阵元 1

为坐标原点, 即 $(x_1, y_1) = (0, 0)$, λ 为回波信号波长, $\hat{\Psi}$ 为 Ψ 的估计值。

7. 根据权利要求 1 至 5 所述任意一种基于非直线天线阵列的无源通道校正方法, 其特征在于: 利用已经过幅度校正的单方位海洋回波和已知的阵列位置信息通过 $\hat{\Psi} = \arg \min_{\Psi} \|\mathbf{Y} - \tilde{\mathbf{f}}(\Psi)\|^2$ 估计通道相位失配系数, 实现相位校正, 其中

$$\Psi = [\theta_1, \theta_2, \Lambda, \theta_L, \phi_2, \phi_3, \Lambda, \phi_M]^T$$

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_2 \\ \mathbf{Y}_3 \\ \mathbf{M} \\ \mathbf{Y}_M \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Y}_i = [Y_i(1), Y_i(2), \Lambda, Y_i(L)]^T$$

$$\tilde{\mathbf{f}}(\Psi) = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{f}}_2(\Psi) \\ \tilde{\mathbf{f}}_3(\Psi) \\ \mathbf{M} \\ \tilde{\mathbf{f}}_M(\Psi) \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\mathbf{f}}_i(\Psi) = \left[\hat{A}(1)e^{j\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x_i \sin \theta_1 + y_i \cos \theta_1) + \phi_i\right]}, \hat{A}(2)e^{j\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x_i \sin \theta_2 + y_i \cos \theta_2) + \phi_i\right]}, \Lambda, \hat{A}(L)e^{j\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x_i \sin \theta_L + y_i \cos \theta_L) + \phi_i\right]} \right]^T$$

$$\hat{A}(l) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Y_i(l) e^{-j\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x_i \sin \theta_l + y_i \cos \theta_l) + \phi_i\right]} = \frac{1}{M} \left\{ \sum_{i=2}^M Y_i(l) e^{-j\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x_i \sin \theta_l + y_i \cos \theta_l) + \phi_i\right]} + Y_1(l) \right\}$$

θ_l 为第 l 个单方位回波的到达角, ϕ_i 为阵元 i 的通道相位失配系数, (x_i, y_i) 为阵元位置坐标, 阵元 1 为坐标原点, 即 $(x_1, y_1) = (0, 0)$, λ 为回波信号波长, $\hat{\Psi}$ 为 Ψ 的估计值。

8. 根据权利要求 6 或 7 所述的一种基于非直线天线阵列的无源通道校正方法, 其特征在于: 从所有阵元中选出 3 个阵元构成一个三角阵, 对该三角阵进行降低全局最优化维数的处理, 并通过初值预估和局部最优化方法估计通道相位失配系数。
9. 根据权利要求 8 所述的一种基于非直线天线阵列的无源通道校正方法, 其特征在于: 1) 先从所有阵元中选出 3 个阵元构成一个三角阵, 再选出 3 个单方位回波用于参数估计; 2) 以该三角阵中的任一阵元为基准通道, 采用全局最优化方法估计另两个通道的相位失配系数和 3 个单方位回波的到达角; 3) 增加一个单方位回波用于三角阵的参数估计, 得出该单方位回波的到达角; 4) 按步骤 3) 得出其它单方位回波的到达角; 5) 将三角阵与另一个阵元组合成 4 元阵, 再把所有单方位回波用于该 4 元阵的参数估计, 得到新加入阵元的通道相位失配系数; 6) 按步骤 5) 得出其它阵元的通道相位失配系数。
10. 根据权利要求 9 所述的一种基于非直线天线阵列的无源通道校正方法, 其特征在于: 在经过步骤 4) 后, 将所有单方位回波用于三角阵的参数估计, 以已求得的单方位回波到达角和通道相位失配系数的估计值为初值, 采用局部最优化方法求得这些参数更精确的估计值, 然后进行后面步骤。
11. 根据权利要求 9 所述的一种基于非直线天线阵列的无源通道校正方法, 其特征在于: 在经过步骤 6) 后, 将所有单方位回波用于整个阵列的参数估计, 以已求得的单方位回波到达角和通道相位失配系数的估计值为初值, 采用局部最优化方法求得这些参数更精确的估计值。
12. 根据权利要求 9 所述的一种基于非直线天线阵列的无源通道校正方法, 其特征在于: 对于 M 元 L 形阵, 将阵元 1、2、 M 作为步骤 1) 中所选的三角阵用于参数估计, 实现通道相位校正。
13. 根据权利要求 9 所述的一种基于非直线天线阵列的无源通道校正方法, 其特征在于: 对于 4 元 T 形阵, 将阵元 1、2、4 或阵元 2、3、4 作为步骤 1) 中所选的三角阵用于参数估计, 实现通道相位校正。
14. 根据权利要求 9 所述的一种基于非直线天线阵列的无源通道校正方法, 其特征在于: 对于 4 元矩形阵, 将其中任意 3 个阵元作为步骤 1) 中所选的三角阵用于参数估计, 实现通道相位校正。

经修改的权利要求

国际局收到日：2006年07月20日 (20.07.2006)

+声明

1. 一种基于非直线天线阵列的无源通道校正方法，其特征在于：将天线阵列设置为含有平移不变阵元偶组的非直线形式；通过平移不变阵元偶组检测出单方位海洋回波；利用单方位海洋回波估计通道幅度失配系数，实现幅度校正；利用已经过幅度校正的单方位海洋回波和已知的阵列位置信息估计通道相位失配系数，实现相位校正。
2. 根据权利要求1所述的一种基于非直线天线阵列的无源通道校正方法，其特征在于：利用单方位海洋回波通过 $\hat{g}_i = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^L |Y_i(l)|^2}{\sum_{l=1}^L |Y_1(l)|^2}}$ 估计通道幅度失配系数，实现幅度校正，其中 \hat{g}_i 为阵元 i 的通道幅度失配系数估计值， $i=1,2,\dots,M$ ， M 为阵元个数， $Y_i(l)$ 为阵元 i 接收的第 l 个单方位回波输出， $l=1,2,\dots,L$ ， L 为单方位回波个数。
3. 根据权利要求1所述的一种基于非直线天线阵列的无源通道校正方法，其特征在于：利用单方位海洋回波通过 $\hat{g}_i = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \frac{|Y_i(l)|^2}{|Y_1(l)|^2}}$ 估计通道幅度失配系数，实现幅度校正，其中 \hat{g}_i 为阵元 i 的通道幅度失配系数估计值， $i=1,2,\dots,M$ ， M 为阵元个数， $Y_i(l)$ 为阵元 i 接收的第 l 个单方位回波输出， $l=1,2,\dots,L$ ， L 为单方位回波个数。
4. 根据权利要求1所述的一种基于非直线天线阵列的无源通道校正方法，其特征在于：利用单方位海洋回波通过 $\hat{g}_i = \frac{\sum_{l=1}^L |Y_i(l)|}{\sum_{l=1}^L |Y_1(l)|}$ 估计通道幅度失配系数，实现幅度校正，其中 \hat{g}_i 为阵元 i 的通道幅度失配系数估计值， $i=1,2,\dots,M$ ， M 为阵元个数， $Y_i(l)$ 为阵元 i 接收的第 l 个单方位回波输出， $l=1,2,\dots,L$ ， L 为单方位回波个数。
5. 根据权利要求1所述的一种基于非直线天线阵列的无源通道校正方法，其特征在于：利用单方位海洋回波通过 $\hat{g}_i = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \frac{|Y_i(l)|}{|Y_1(l)|}$ 估计通道幅度失配系数，实现幅度校正，其中 \hat{g}_i 为阵元 i 的通道幅度失配系数估计值， $i=1,2,\dots,M$ ， M 为阵元个数， $Y_i(l)$ 为阵元 i 接收的第 l 个单方位回波输出， $l=1,2,\dots,L$ ， L 为单方位回波个数。
6. 根据权利要求1至5所述任意一种基于非直线天线阵列的无源通道校正方法，其特征在于：利用已经过幅度校正的单方位海洋回波和已知的阵列位置信息通过 $\hat{\Psi} = \arg \min_{\Psi} \|\mathbf{Y} - \mathbf{f}'(\Psi)\|^2$ 估计通道相位失配系数，实现相位校正，其中

$$\Psi = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_L, \phi_2, \phi_3, \dots, \phi_M]^T$$

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_2 \\ \mathbf{Y}_3 \\ \vdots \\ \mathbf{Y}_M \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Y}_i = [Y_i(1), Y_i(2), \dots, Y_i(L)]^T$$

$$\mathbf{f}'(\Psi) = \begin{bmatrix} \mathbf{f}'_2(\Psi) \\ \mathbf{f}'_3(\Psi) \\ \vdots \\ \mathbf{f}'_M(\Psi) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{f}'_i(\Psi) = \left[Y_i(1) e^{j \left[\frac{2\pi}{\lambda} (x_i \sin \theta_1 + y_i \cos \theta_1) + \phi_i \right]}, Y_i(2) e^{j \left[\frac{2\pi}{\lambda} (x_i \sin \theta_2 + y_i \cos \theta_2) + \phi_i \right]}, \dots, Y_i(L) e^{j \left[\frac{2\pi}{\lambda} (x_i \sin \theta_L + y_i \cos \theta_L) + \phi_i \right]} \right]^T$$

θ_l 为第 l 个单方位回波的到达角, ϕ_i 为阵元 i 的通道相位失配系数, (x_i, y_i) 为阵元位置坐标, 阵元 1 为坐标原点, 即 $(x_1, y_1) = (0, 0)$, λ 为回波信号波长, $\hat{\Psi}$ 为 Ψ 的估计值。

7. 根据权利要求 1 至 5 所述任意一种基于非直线天线阵列的无源通道校正方法, 其特征在于: 利用已经过幅度校正的单方位海洋回波和已知的阵列位置信息通过 $\hat{\Psi} = \arg \min_{\Psi} \|\mathbf{Y} - \tilde{\mathbf{f}}(\Psi)\|^2$ 估计通道相位失配系数, 实现相位校正, 其中

$$\Psi = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_L, \phi_2, \phi_3, \dots, \phi_M]^T$$

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_2 \\ \mathbf{Y}_3 \\ \vdots \\ \mathbf{Y}_M \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Y}_i = [Y_i(1), Y_i(2), \dots, Y_i(L)]^T$$

$$\tilde{\mathbf{f}}(\Psi) = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{f}}_2(\Psi) \\ \tilde{\mathbf{f}}_3(\Psi) \\ \vdots \\ \tilde{\mathbf{f}}_M(\Psi) \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\mathbf{f}}_i(\Psi) = \left[\hat{A}(1) e^{j \left[\frac{2\pi}{\lambda} (x_i \sin \theta_1 + y_i \cos \theta_1) + \phi_i \right]}, \hat{A}(2) e^{j \left[\frac{2\pi}{\lambda} (x_i \sin \theta_2 + y_i \cos \theta_2) + \phi_i \right]}, \dots, \hat{A}(L) e^{j \left[\frac{2\pi}{\lambda} (x_i \sin \theta_L + y_i \cos \theta_L) + \phi_i \right]} \right]^T$$

$$\hat{A}(l) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Y_i(l) e^{-j \left[\frac{2\pi}{\lambda} (x_i \sin \theta_l + y_i \cos \theta_l) + \phi_i \right]} = \frac{1}{M} \left\{ \sum_{i=2}^M Y_i(l) e^{-j \left[\frac{2\pi}{\lambda} (x_i \sin \theta_l + y_i \cos \theta_l) + \phi_i \right]} + Y_1(l) \right\}$$

θ_l 为第 l 个单方位回波的到达角, ϕ_i 为阵元 i 的通道相位失配系数, (x_i, y_i) 为阵元位置坐标, 阵元 1 为坐标原点, 即 $(x_1, y_1) = (0, 0)$, λ 为回波信号波长, $\hat{\Psi}$ 为 Ψ 的估计值。

8. 根据权利要求 6 或 7 所述的一种基于非直线天线阵列的无源通道校正方法, 其特征在于: 从所有阵元中选出 3 个阵元构成一个三角阵, 对该三角阵进行降低全局最优化维数的处理, 并通过初值预估和局部最优化方法估计通道相位失配系数。
9. 根据权利要求 8 所述的一种基于非直线天线阵列的无源通道校正方法, 其特征在于: 1) 先从所有阵元中选出 3 个阵元构成一个三角阵, 再选出 3 个单方位回波用于参数估计; 2) 以该三角阵中的任一阵元为基准通道, 采用全局最优化方法估计另两个通道的相位失配系数和 3 个单方位回波的到达角; 3) 增加一个单方位回波用于三角阵的参数估计, 得出该单方位回波的到达角; 4) 按步骤 3) 得出其它单方位回波的到达角; 5) 将三角阵与另一个阵元组合成 4 元阵, 再把所有单方位回波用于该 4 元阵的参数估计, 得到新加入阵元的通道相位失配系数; 6) 按步骤 5) 得出其它阵元的通道相位失配系数。
10. 根据权利要求 9 所述的一种基于非直线天线阵列的无源通道校正方法, 其特征在于: 在经过步骤 4) 后, 将所有单方位回波用于三角阵的参数估计, 以已求得的单方位回波到达角和通道相位失配系数的估计值为初值, 采用局部最优化方法求得这些参数更精确的估计值, 然后进行后面步骤。
11. 根据权利要求 9 所述的一种基于非直线天线阵列的无源通道校正方法, 其特征在于: 在经过步骤 6) 后, 将所有单方位回波用于整个阵列的参数估计, 以已求得的单方位回波到达角和通道相位失配系数的估计值为初值, 采用局部最优化方法求得这些参数更精确的估计值。
12. 根据权利要求 9 所述的一种基于非直线天线阵列的无源通道校正方法, 其特征在于: 对于 M 元 L 形阵, 将阵元 1、2、 M 作为步骤 1) 中所选的三角阵用于参数估计, 实现通道相位校正。
13. 根据权利要求 9 所述的一种基于非直线天线阵列的无源通道校正方法, 其特征在于: 对于 4 元 T 形阵, 将阵元 1、2、4 或阵元 2、3、4 作为步骤 1) 中所选的三角阵用于参数估计, 实现通道相位校正。
14. 根据权利要求 9 所述的一种基于非直线天线阵列的无源通道校正方法, 其特征在于: 对于 4 元矩形阵, 将其中任意 3 个阵元作为步骤 1) 中所选的三角阵用于参数估计, 实现通道相位校正。

本声明是对 PCT/CN2006/000453 专利申请权利要求书修改的说明。

权利要求 1 和权利要求 8 至 14 不变；权利要求 2 至 7 被修改后同样编号的权利要求替换。理由是：由于计算机编辑的错误，在未装公式编辑器的计算机上将 $i=1,2,\dots,M$ 错误地打印为 $i=1,2,\wedge,M$ ；将 $l=1,2,\dots,L$ 错误地打印为 $l=1,2,\wedge,L$ ；将“ \dots ”号错误地打印为“ \wedge ”号；将“ $;$ ”号错误地打印为“ M ”号。

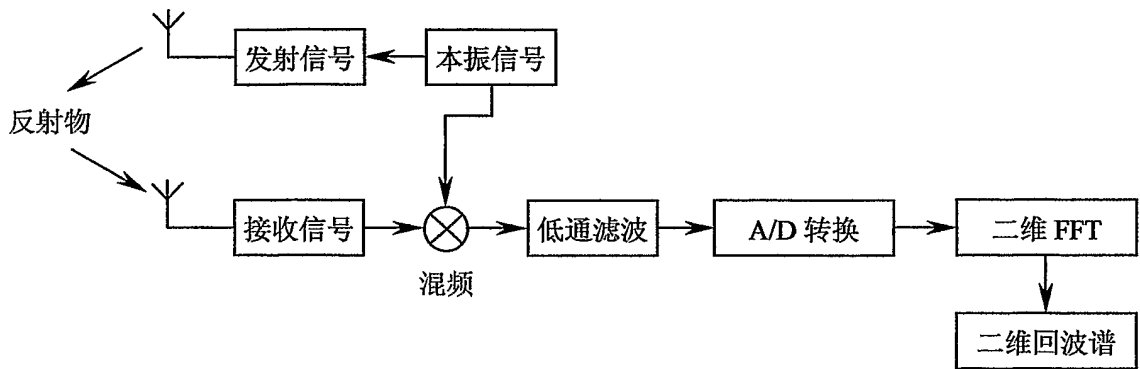


图 1

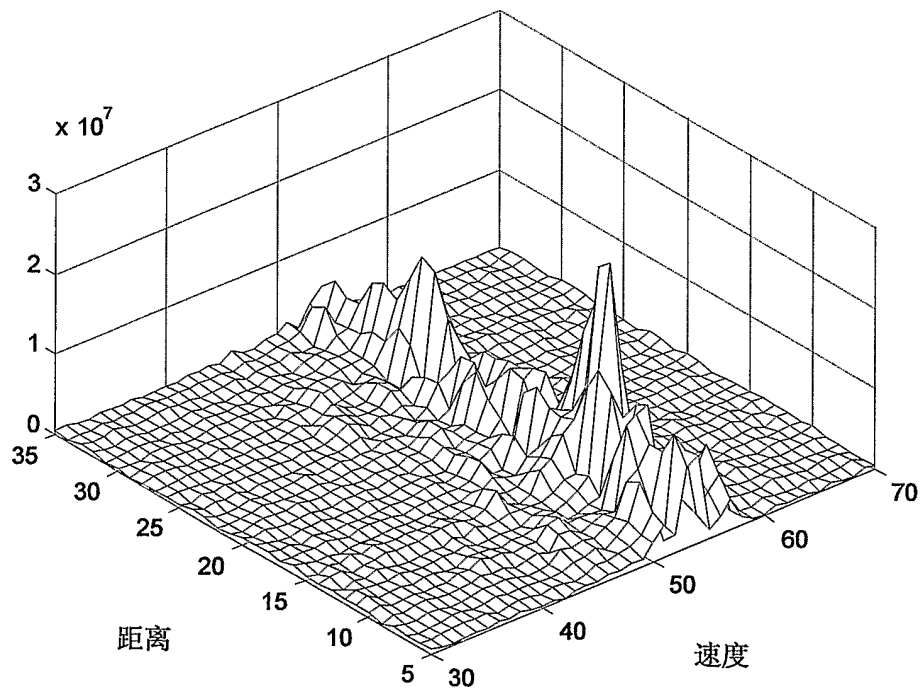


图 2

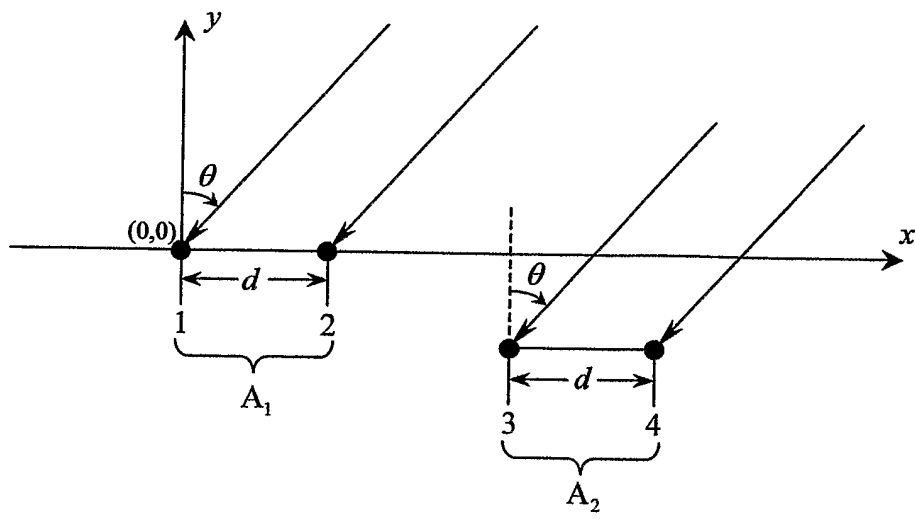


图 3

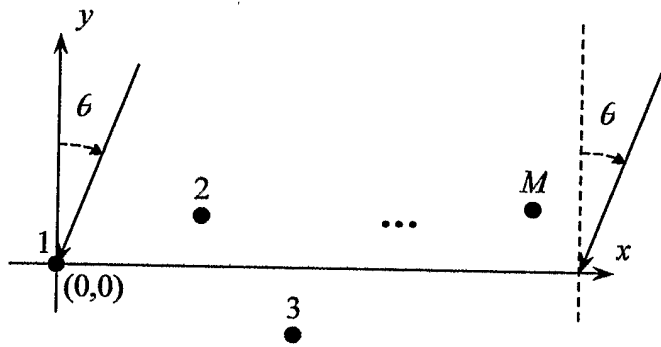


图 4

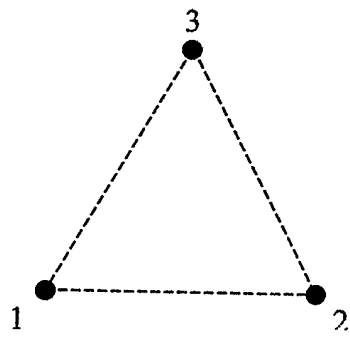


图 5

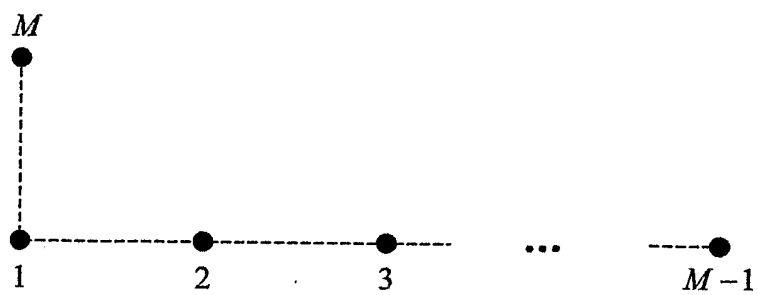


图 6

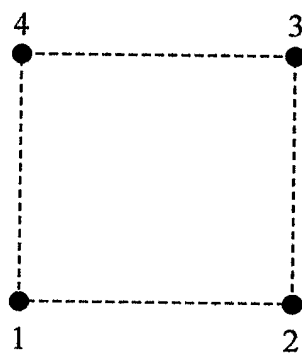


图 7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2006/000453

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

See extra sheet

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC⁸ G01S7+,G01S13+

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

The Chinese patent document (1985-)

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT CNKI WPI EPODOC PAJ SEA OR OCEAN,ECHO,RADAR,GROUND W WAVE

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN,A,1566983(WUHAN UNIVERSITY) 19.JAN.2005 (19.01.2005) see Figs.1— <cited in the application> 4, Page 5,line 12 to Page 8,line 8	1-14
A	YANG,Zhaolin,ET AL,"SELF-CALIBRATION METHOD OF CHANNEL AMPLITUDE OF HF GROUND WAVE RADAR BASED ON SEA ECHO",JOURNAL OF ELECTRONICS AND INFORMATION TECHNOLOGY, Vol.24,No.9, SEP.2002(09.2002), Pages 1-5	1-14
A	CN,A,1580813() 16.FEB.2005 (16.02.2005) see Figs.1—2, Page 1,line 20 to Page 2,line 26	1-14
A	US,A,5945942(THOMSON CSF) 31.AUG.1999(31.08.1999) see Fig.1, Column 2,lines 30-53	1-14

Further documents are listed in the continuation of Box C. See patent family annex.

<p>* Special categories of cited documents:</p> <p>“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>“L” document which may throw doubts on priority claim (S) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p>	<p>“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>“&”document member of the same patent family</p>
--	--

Date of the actual completion of the international search 03.JUN.2006 (03.06.2006)	Date of mailing of the international search report 22 . JUN 2006 (22 . 06 . 2006)
---	--

Name and mailing address of the ISA/CN
The State Intellectual Property Office, the P.R.China
6 Xitucheng Rd., Jimen Bridge, Haidian District, Beijing, China
100088
Facsimile No. 86-10-62019451

Authorized officer
WANG,Xiaoping
Telephone No. (86-10) 62085735



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2006/000453

CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01S 7/40 (2006.01) i

G01S 13/06 (2006.01) i

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2006/000453

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN,A,1566983	19.JAN.2005(19.01.2005)	NONE	
CN,A,1580813	16.FEB.2005(16.02.2005)	NONE	
US,A, 5945942	31.AUG.1999(31.08.1999)	EP,A1,0872740	21.OCT.1998(21.10.1998)
		FR,A1,2762397	23.OCT.1998(23.10.1998)
		JP,A,11023698	29.JAN.1999(29.01.1999)

国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2006/000453

<p>A. 主题的分类</p> <p style="text-align: center;">见附加页</p> <p>按照国际专利分类表(IPC)或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类</p>																	
<p>B. 检索领域</p> <p>检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)</p> <p>IPC^s G01S7+,G01S13+</p> <p>包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献</p> <p>中国专利文献 (1985-)</p> <p>在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))</p> <p>CNPAT CNKI 海洋, 回波, 雷达, 地波, 阵列, 通道</p> <p>WPI EPODOC PAJ SEA OR OCEAN,ECHO,RADAR,GROUND W WAVE</p>																	
<p>C. 相关文件</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>CN,A,1566983(武汉大学) 19.1 月 2005 (19.01.2005) 见附图 1-4, 说明书 <在申请中引证>第 5 页第 12 行至第 8 页第 8 行</td> <td>1-14</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>杨绍麟等, “高频地波雷达基于海洋回波的通道幅度自校准方法”, 《电子与信息学报》, 第 24 卷第 9 期, 9 月 2002 (09.2002), 第 1-5 页</td> <td>1-14</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN,A,1580813(中国人民解放军空军雷达学院) 16.2 月 2005 (16.02.2005) 见附图 1-2, 说明书第 1 页第 20 行至第 2 页第 26 行</td> <td>1-14</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>US,A,5945942(THOMSON CSF) 31.8 月 1999 (31.08.1999) 见附图 1, 说明书第 2 栏第 30-53 行</td> <td>1-14</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	A	CN,A,1566983(武汉大学) 19.1 月 2005 (19.01.2005) 见附图 1-4, 说明书 <在申请中引证>第 5 页第 12 行至第 8 页第 8 行	1-14	A	杨绍麟等, “高频地波雷达基于海洋回波的通道幅度自校准方法”, 《电子与信息学报》, 第 24 卷第 9 期, 9 月 2002 (09.2002), 第 1-5 页	1-14	A	CN,A,1580813(中国人民解放军空军雷达学院) 16.2 月 2005 (16.02.2005) 见附图 1-2, 说明书第 1 页第 20 行至第 2 页第 26 行	1-14	A	US,A,5945942(THOMSON CSF) 31.8 月 1999 (31.08.1999) 见附图 1, 说明书第 2 栏第 30-53 行	1-14
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求															
A	CN,A,1566983(武汉大学) 19.1 月 2005 (19.01.2005) 见附图 1-4, 说明书 <在申请中引证>第 5 页第 12 行至第 8 页第 8 行	1-14															
A	杨绍麟等, “高频地波雷达基于海洋回波的通道幅度自校准方法”, 《电子与信息学报》, 第 24 卷第 9 期, 9 月 2002 (09.2002), 第 1-5 页	1-14															
A	CN,A,1580813(中国人民解放军空军雷达学院) 16.2 月 2005 (16.02.2005) 见附图 1-2, 说明书第 1 页第 20 行至第 2 页第 26 行	1-14															
A	US,A,5945942(THOMSON CSF) 31.8 月 1999 (31.08.1999) 见附图 1, 说明书第 2 栏第 30-53 行	1-14															
<p><input type="checkbox"/> 其余文件在 C 栏的续页中列出。 <input checked="" type="checkbox"/> 见同族专利附件。</p>																	
<p>* 引用文件的具体类型:</p> <p>“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件</p> <p>“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性</p> <p>“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性</p> <p>“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “&” 同族专利的文件</p> <p>“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件</p>																	
<p>国际检索实际完成的日期 03.6 月 2006 (03.06.2006)</p>		<p>国际检索报告邮寄日期 22.6 月 2006 (22.06.2006)</p>															
<p>中华人民共和国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路 6 号 100088 传真号: (86-10)62019451</p>		<p>受权官员 王晓萍 电话号码: (86-10)62085735</p> 															

主题的分类

G01S 7/40 (2006.01) i

G01S 13/06 (2006.01) i

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2006/000453

检索报告中引用的 专利文件	公布日期	同族专利	公布日期
CN,A,1566983	19.1 月 2005 (19.01.2005)	无	
CN,A,1580813	16.2 月 2005 (16.02.2005)	无	
US,A,5945942	31.8 月 1999 (31.08.1999)	EP,A1,0872740	21.10 月 1998(21.10.1998)
		FR,A1,2762397	23.10 月 1998(23.10.1998)
		JP,A,11023698	29.1 月 1999(29.01.1999)