

蒸发波导中的时间反演抛物方程定位法*

冯菊^{1)†} 廖成¹⁾ 张青洪¹⁾ 盛楠¹⁾ 周海京²⁾

1) (西南交通大学电磁场与微波技术研究所, 成都 610031)

2) (北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

(2013年12月26日收到; 2014年3月29日收到修改稿)

蒸发波导是一种在海面上频繁出现的多径传播环境, 会引起信号畸变, 导致常规算法分辨率下降, 使得雷达测向测距误差加大甚至无法工作. 本文提出了一种基于方向图加载的时间反演抛物方程定位算法, 能够有效地处理蒸发波导效应, 自适应地补偿信号畸变, 形成与传播环境相匹配的、经过时间反演的电波, 从而稳健地实现对目标的聚焦定位. 该算法能够巧妙地利用多径效应, 增大天线阵列的有效口径, 得到超分辨率的效果. 另外, 它还对阵元间距有着较高的宽容性, 这样就可以采用稀布形式, 从而提高算法的实用性, 增加其适用范围. 仿真结果表明, 对于相同口径的阵列天线, 该算法使方位分辨率较自由空间提高了2倍以上; 在 30λ 的大阵元间距下, 旁瓣电平在8.96 dB以下, 有效地抑制了鬼像的产生. 该算法具有较强的稳健性和较高的精度, 在海面通信、搜救、预警等领域有着广阔的应用前景.

关键词: 抛物方程法, 时间反演, 定位, 自适应聚焦

PACS: 41.20.Jb, 92.60.Ta

DOI: 10.7498/aps.63.134101

1 引言

蒸发波导是一种在海面上频繁出现的大气异常结构, 其大气折射率随高度的增加而减小, 导致部分电波陷获在一定厚度的大气层内, 如同在波导中传播一般. 这种导行作用使得电波可超视距传播, 在提高雷达作用距离的同时, 也改变了电波的正常传播路径. 另外, 海面 and 大气层间存在的多径效应也会引起信号的衰落和畸变. 这为蒸发波导环境下的定位研究带来了极大的困难. 传统的探测和定位方法多基于经典的自由空间模型, 并未充分考虑电波受蒸发波导的影响. 若沿用常规的估计算法, 目标分辨率将明显下降, 甚至导致算法无法工作. 如何补偿蒸发波导带来的信号误差, 使定位算法在应用中具有较强的稳健性和较高的精度, 是海面目标探测技术实用化的一个关键环节, 该问题的解决将有助于海面通信、搜救、预警等应用领域的

发展.

抛物方程法 (parabolic equation, PE) 是由 Leontovich 和 Fock 于 1945 年提出的, 最初用于分析对流层中的电波传播问题, 随后在等离子体物理、地震波传播、光学以及水声学等领域得到了进一步的发展和应用^[1]. PE 能够精确地描述复杂的大气结构和地表电磁特性, 在视距以内、附近以及超视距的范围内都具有良好的计算精度和稳定性^[2-4], 成为了目前预测对流层电波传播特性最为准确的模型之一.

Spencer 等基于抛物方程法设计了逆绕射抛物方程定位系统 (inverse diffraction parabolic wave equation localization system, IDPELS) 用于对 GPS 干扰源的定位, 并在实测中取得了良好的收敛效果^[5], 但其对复杂环境的处理能力有限. 郭建炎等人在此基础上引入了大气波导环境的处理方法, 提高了传统 IDPELS 的定位精度, 扩展了其应用范

* 国家自然科学基金—中物院联合基金资助项目 (批准号: 11076022)、国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (批准号: 2013CB328904) 和高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20120184110013) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: fengju_fj@163.com

围. 这种方法往往需要观测大量的数据才能保证较高的估值精度^[6,7], 然而在海面上架设大规模的数据采集阵列显然是很困难的.

近年来迅猛发展的时间反演技术 (time reversal, TR) 是一种自适应的空时聚焦技术. 它可以正面利用复杂环境中的多径效应, 扩大阵列的有效口径, 进一步提高目标分辨率, 甚至可以突破瑞利极限实现超分辨率的效果^[8]. 该技术独特的优势使其在声学领域得到了广泛的应用, 与抛物方程法结合在水波导环境下的声源定位方面也取得了良好的效果^[9-13]. 时间反演技术同样适用于电磁波领域, 并形成了许多新的理论和技术^[14-16], 但其与抛物方程法结合实现蒸发波导环境下的电波辐射源定位研究据作者所知还未有报道. 本文利用时间反演电波在复杂环境下的自适应空时聚焦特性, 将其与抛物方程法相结合, 形成了时间反演抛物方程法, 用以处理海面蒸发波导这种复杂多径环境中的辐射源定位问题. 为了进一步减少阵列规模, 引入了方向图加载时间反演信息的方法, 在保证定位精度的同时, 极大地减少了天线阵元的数目. 这为海面目标探测技术实用化提供了依据.

2 抛物方程法

抛物方程法是从 Maxwell 方程组出发, 在引入了前向传播近似之后, 将椭圆型波动方程简化为抛物型方程的. 实际应用中常采用直角坐标, 假设 x 为水平距离, z 为垂直高度, 则电波的传播满足 Helmholtz 波动方程

$$\frac{\partial^2 \psi(x, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi(x, z)}{\partial z^2} + k_0^2 n^2 \psi(x, z) = 0, \quad (1)$$

式中, ψ 为水平极化电场或垂直极化磁场; n 为大气折射率; k_0 为真空中的传播常数. (1) 式所示的偏微分方程的解通常是 $e^{-ik_0 x}$ 的线性组合, 不妨假设沿 x 轴正向传播的波函数为 $U(x, z) = e^{-ik_0 x} \psi(x, z)$, 将其代入 Helmholtz 方程并对其因式分解, 忽略后向传播便可得前向抛物方程

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -ik_0(1 - Q)U, \quad (2)$$

其中, Q 为伪微分算子, 且 $Q = \sqrt{\frac{1}{k_0^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + n^2}$. 退化为抛物方程后, 其计算速度较直接求解波动方程大幅提高.

为了便于数值计算, 本文采用 Feit-Fleck 方法对 Q 算子近似, 得到 Feit-Fleck 型宽角 PE^[4]

$$\frac{\partial U(x, z)}{\partial x} = ik_0 \left[\sqrt{1 + \frac{1}{k_0^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2}} - 1 \right] u(x, z) + ik_0(n - 1)U(x, z). \quad (3)$$

再通过分步傅里叶解法 (split-step Fourier transform, SSFT), 求得

$$U(x_0 + \Delta x, z) = e^{ik_0 \Delta x(n-1)} F^{-1} \times \left\{ e^{i\Delta x(\sqrt{k_0^2 - p^2} - k_0)} F[U(x_0, z)] \right\}, \quad (4)$$

式中, $U(x_0, z)$ 为初始场; Δx 为水平网格步长; F 和 F^{-1} 分别代表傅里叶正变换和逆变换; $p = k_0 \sin \alpha$ 为傅里叶变换的频域变量, α 为掠射角. (4) 式表明, SSFT 是一种步进算法, 若已知初始场和边界条件便可通过 (4) 式迭代求解传播空间任意点的场.

3 时间反演自适应聚焦原理

时间反演操作一般分为两个步骤. 1) 辐射源发射脉冲, 被放置于传播空间的时间反演镜 (time reversal mirror, TRM) 阵列记录下来. 2) TRM 阵列将记录的信号进行归一化和时间反演处理, 再将信号由对应的 TRM 单元发射回传播空间. 在此过程中, 时间反演电磁波将会回溯原信道, 在初始源的位置上实现聚焦. 其示意图如图 1 所示.

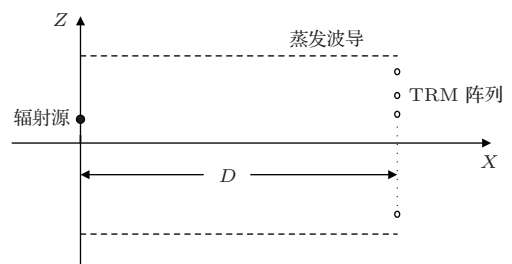


图 1 时间反演操作过程示意图

设目标源发射信号 $u(t)$, 则 TRM 接收阵列 (阵元序号为 $m = 1, 2, \dots, M$) 中第 m 号阵元所接收到的信号为

$$u_m(t) = u(t) * h_{sm}(t), \quad (5)$$

式中 “*” 表示卷积. 目标源和第 m 号 TRM 阵元之间的信道冲激响应为 $h_{sm}(t)$. TRM 采集的信号经

过时间反演处理之后为 $u_m(-t)$, 其频谱可通过傅里叶变换得到

$$F\{u_m(-t)\} = U_m^*(\omega) = U^*(\omega) \cdot H_{sm}^*(\omega), \quad (6)$$

上标“*”表示取复共轭. 时域的时间反演转换到频率后即相位共轭操作.

以上过程基于实时物理系统实现, 反演定位则通过仿真计算完成. 在估值空间中设置 N 个观测点, 第 n 号观察点处的接收信号 $U_{\Sigma_n}(\omega)$ 是 M 个 TRM 阵元发射的信号沿不同的传播信道到达接收点的, 因此总的接收信号为

$$\begin{aligned} U_{\Sigma_n}(\omega) &= \sum_{m=1}^M U_m^*(\omega) \cdot H_{mn}(\omega) \\ &= U^*(\omega) \cdot \sum_{m=1}^M H_{sm}^*(\omega) \cdot H_{mn}(\omega), \quad (7) \end{aligned}$$

$\sum_{m=1}^M H_{sm}^*(\omega) \cdot H_{mn}(\omega)$ 称作 TRM 信道频率响应, 包含各阵元对应的接收信道频率响应 $H_{sm}^*(\omega)$ 和发射信道频率响应 $H_{mn}(\omega)$. 当观察点位置与初始源的位置相重合, 即 $n = s$ 时, 结合电波传播互易定理 $H_{mn}(\omega) = H_{nm}(\omega)$, (7) 式可写为

$$U_{\Sigma_s}(\omega) = U^*(\omega) \sum_{m=1}^M |H_{ms}(\omega)|^2. \quad (8)$$

此时 TRM 信道频率响应函数是实数, 不存在相位失配的问题, 因此到达辐射源位置的时间反演电磁波可实现同相叠加, 从而在此处出现能量的峰值. 在 $n \neq s$ 的位置, TRM 的接收和发射信道处于失配状态, 由 (7) 式计算所得的信号幅度较小, 能量发散. 由以上分析可知, 时间反演电磁波会与传播空间自适应匹配, 在初始源的位置处实现聚焦.

4 基于时间反演的抛物方程法

由 (4) 式可以看出, 如果给出初始场 $u(x_0, z)$, 就可以求解全空间的电波分布. 在求解逆问题时, 常将接收端的场分布作为初始值来反演电波的传播, 从而估计辐射源的位置. 文献 [6, 7] 正是通过使用在接收端采集的大量数据, 使用逆绕射抛物方程来反演定位辐射源的. 本文则是首先对接收数据进行时间反演预处理, 使之携带对传播空间的补偿信息, 然后再将其作为抛物方程的初始场引入, 采用传统抛物方程的进行迭代, 最终利用时间反演波的自适应聚焦特性来实现定位的. 由于该方法未改变抛物方程的迭代算法以及大步长条件, 因此具

有较好的稳定性和实时性. 对于时间反演处理后的初始场引入, 可以采用直接赋值的方法, 也可采用方向图加载法.

1) 直接赋值法

对接收信号 $u(L, z)$ 进行相位共轭, 得到时间反演信号

$$U^{\text{TR}}(L, z) = U^*(L, z). \quad (9)$$

将其作为初始值, 代入 (4) 式中进行迭代求解, 即可仿真时间反演电波在蒸发波导中的回传. 直接赋值法往往需要大量的数据, 这限制了其在实际应用中的使用范围, 因此本文提出了加大阵元间距的方向图加载法.

2) 方向图加载法

将一维 N 元垂直天线阵列放置于接收空间 $x = L$ 处对信号进行接收, 阵元间距为 d , 则 $L = nd$. 各阵元记录的信号为

$$U_i = U(x_i, z), \quad (i = 1, 2, \dots, N). \quad (10)$$

将接收信号进行归一化和时间反演处理后得到

$$S_i = \frac{U^*(x_i, z)}{\max[U(x_i, z)]}, \quad (i = 1, 2, \dots, N). \quad (11)$$

S_i 为一个绝对值小于或等于 1 的复数, 其大小表征了目标源与 i 阵元之间的距离长短, 其相位包含了目标和环境的相关信息. 将 S_i 加载在第 i 阵元的方向图 $A[\theta(p)]$ 上 (本文采用的是全向辐射的同构天线阵列), 通过傅里叶变换求得 $x = L$ 处的场分布, 并求和得到整个天线阵列的近场分布, 如下式所示:

$$\begin{aligned} U_{\text{array}}^{\text{TR}}(L, z) &= \sum_{i=1}^N e^{i\pi/4} \sqrt{k/2\pi} \\ &\times \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{A[\theta(p)] S_i}{(k^2 - p^2)^{1/4}} e^{ipx} dp. \quad (12) \end{aligned}$$

将其代入抛物方程步进 (4) 式中, 可得估值空间中的场分布. 由 (7) 式、(8) 式可知, 时间反演电波在估值空间形成的合成场 $U_{\Sigma}(x, z)$ 将在目标源位置 (x_s, z_s) 聚焦. 由于在远场辐射场的幅度随距离一次方衰减, 为了表征能量在空间聚集情况, 定义传播因子 (propagation factor, PF) 为

$$\text{PF} = r(x, z)U_{\Sigma}(x, z)/rU_0, \quad (13)$$

其中 rU_{Σ} 为空间某点的实际场值与距离的乘积, rU_0 为由空间传播条件下点源辐射的远场与距离乘积 rU_0 (通常为一常数).

5 时间反演抛物方程法定位的仿真分析

为了便于和逆绕射抛物方程法做比较, 本文采用与文献[6]相同的海面蒸发波导参数设置. 在0—50 m时, 修正折射率 M 的梯度为 -0.40 m^{-1} , 高度大于50 m时为 0.118 m^{-1} ; 目标发射天线距离海面高度30 m, 采用水平极化方式, 发射频率为1800 MHz, 其半功率波瓣宽度为 15° . 通过抛物方程法可求得前向传播因子如图2所示.

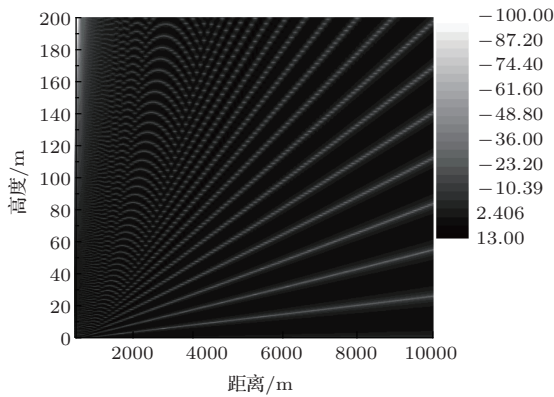


图2 蒸发波导环境下的前向传播因子分布

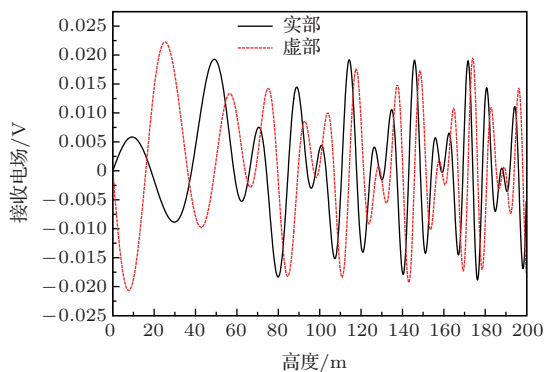


图3 接收信号的实部和虚部

观测数据由一维垂直天线阵列采集, 阵元放置于距离目标源10 km处的空间垂直采样点上(1600个), 其接收电场的实部和虚部为高度的函数, 如图3所示. 在自由空间模型中, 垂直线阵接收的远区点源来波可视为平面波入射, 其幅度与到达各阵元的距离成反比, 相应地 $\text{PF} = 0 \text{ dB}$; 相位与入射角关系满足 $\phi_i = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_i (i = 1, 2, \dots, 1600)$ (d 为阵元间距, θ_i 为入射角). 蒸发波导的存在使接收信号变得十分复杂, 不仅包含了目标的信息还反

映了传播空间(蒸发波导)的特征, 使接收信号的幅相特性与在自由空间中的完全不同. 提取接收信号的幅度构造传播因子PF随高度的变化如图4(a)所示. 蒸发波导的大气折射使电波向下折射传播, 波瓣变窄, 在海面附近的电波能量增加; 另外由于海面 and 大气层反射引起的多径效应, 使电波在某些高度相干叠加, 在有些高度上则出现了明显的衰落. 图4(b)表明, 蒸发波导中异常的折射率和多径效应造成了接收信号的相位畸变, 传统的定位方法需引入补偿校正手段, 增加了算法的复杂度和计算量, 会导致实时性变差.

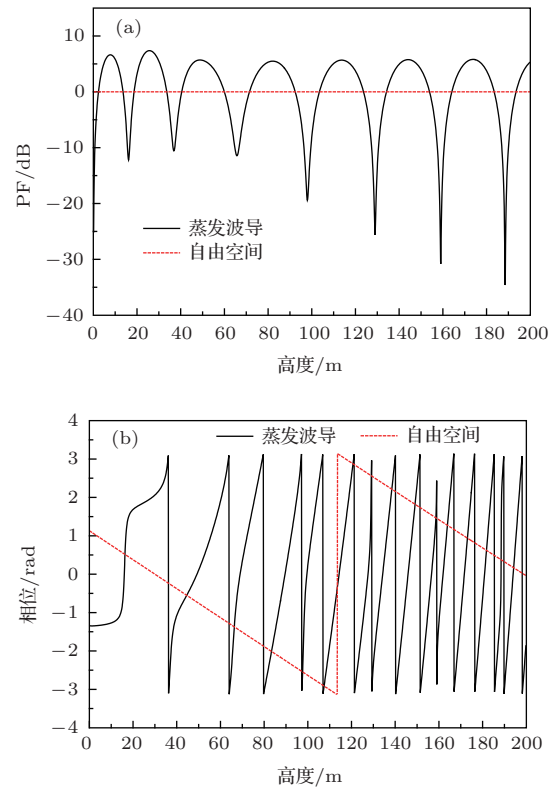


图4 接收场的幅度和相位分布 (a) 垂直向传播因子分布; (b) 垂直向相位分布

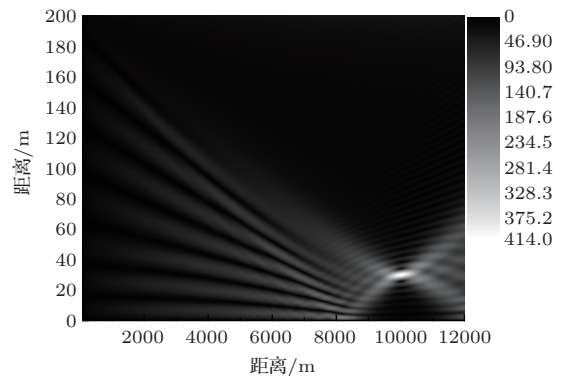


图5 直接赋值法PF的空间分布

采集数据之后, 在估值空间进行时间反演操作. 归一化接收的信号, 然后进行时间反演处理, 即频域内的相位共轭, 可得时间反演信号 $S^*(\omega) \cdot H_{sm}^*(\omega)$. 该信号不仅包含了目标信息 $S^*(\omega)$ 而且自适应地对传播信道进行了预补偿 $H_{sm}^*(\omega)$. 将其直接赋值给抛物方程作为初始场, 重新发射回原传播空间. 时间反演波会在估值空间中回溯原信道使目标处的能量分布加强, 如(8)式所示, 在无关信道中因信号与环境失配造成能量被衰减, 两种情况综合的结果是最后在估值空间中实现明显的焦点分布, 见图5. 最大的传播因子出现在垂直方向距离海面30.48 m处(实际值30 m), 相对误差为0.4%, 3 dB分辨率约为3.5 m, 旁瓣电平在-14 dB以下, 如图6所示. 而根据天线阵列理论可知, 自由空间中的方位分辨率 $R_{\beta 0} = R/(\lambda D) = 8.33$ m, 可见蒸发波导中的多径效应, 增大了天线阵列的有效口径, 进一步提高了定位精度, 在本例中达2倍以上. 其定位结果与文献[6]完全符合, 说明时间反演抛物方程法定位海面蒸发波导辐射源的可靠性与正确性.

上述的直接赋值法往往需要大规模的数据采集阵列, 这在实际的海面应用中往往难以实现, 为了进一步提高该算法的实用性, 本文引入时间反演

方向图加载法. 在接收空间进行抽样, 大量减少接收阵列单元的数目, 形成稀布阵天线. 保持200 m的口径, 将一维均匀垂直接收阵列由1600阵元分别减小为160, 80, 40, 20个阵元后, 估值空间的PF分布如图7, 相应的估计参数如表1所示.

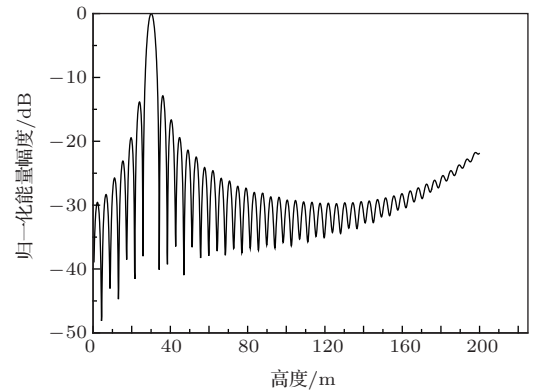


图6 方位分辨率

表1 目标估计参数

阵列单元数目	直接赋值法		时间反演方向图加载法		
	1600	160	80	40	20
估计高度/m	30.48	30.62	29.93	29.93	30.56
估计距离/km	10.02	10.05	10.04	10.08	10.05
SSLmax/dB	-14.10	-9.70	-9.64	-8.96	-1.76

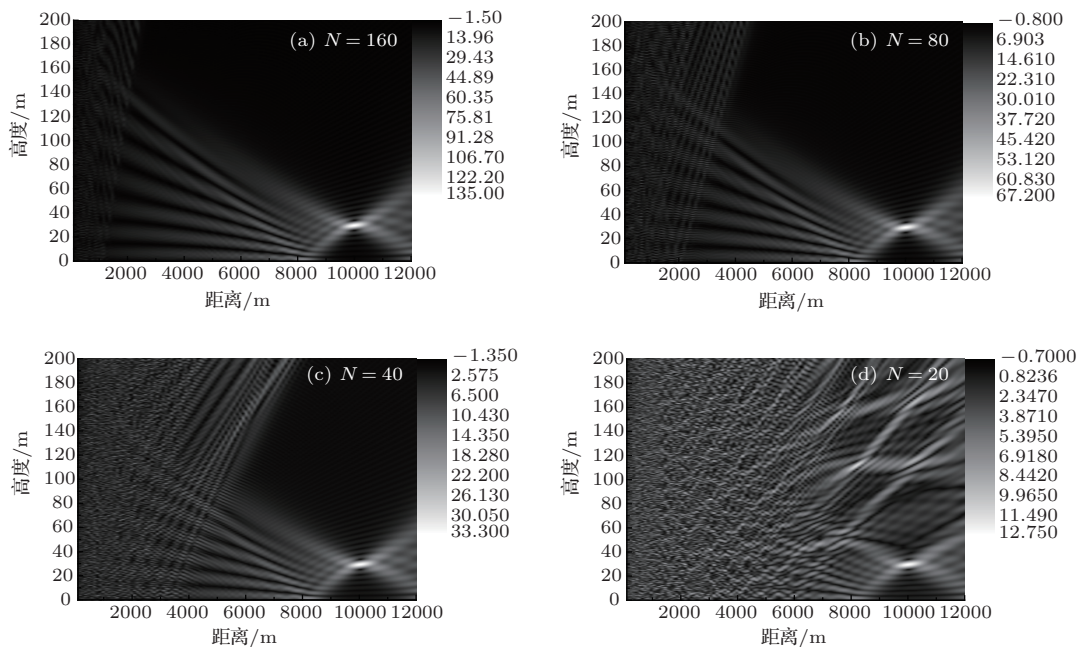


图7 方向图加载法PF的空间分布

由于阵列口径保持为200 m, 目标聚焦区域的估计值与水平和距离向的分辨率基本保持不变, 与图5一致. 但是由于阵元间距的增大, 反演电波的

旁瓣电平升高, 在靠近阵列的区域出现了明显的干涉图样. 由天线阵列理论可知, 在自由空间中, 阵元间距大于 λ 便可在可见区产生栅瓣, 在估值

空间则呈现为鬼像 (ghost image). 而在图 7(c) 中, $N = 40$, 虽然阵元间距已达 30λ , 但时间反演波在估值空间只有一个明显的聚焦区域, 与目标位置相符合, 而且旁瓣电平在 -8.96 dB 以下, 未出现鬼像. 可见, 时间反演抛物方程定位法在较大阵元间距的情况下亦有较高的精度, 这是自由空间中的稀布阵所不具备的优势. 当然阵元间距的取值也有一定的极限, 当 $N = 20$ 时, 阵元间距 $d = 60\lambda$, 估值空间出现了鬼像 (8.5 km, 140 m), 最大旁瓣电平 SSLmax 为 -1.76 dB.

综上所述, 本文采用两种加载时间反演信息的方法: 直接赋值法和方向图加载法, 均可得到的较高的定位精度. 时间反演方向图加载法形成的初始电波传播方向更多, 更加充分地利用了蒸发波导中的多径环境, 有效地抑制了旁瓣电平, 减少了鬼像的产生, 保持了较高的定位精度. 同时, 由于对阵元间距的限制较为宽容, 可用较少的阵元数目来定位. 后者仅采用 40 个阵元, 约为前者的 $1/40$ 就可实现相同的定位精度, 充分说明了时间反演方向图加载法的优越性和实用性.

6 结 论

本文利用时间反演技术可以正面利用蒸发波导中多径效应的特点, 将携带目标信息的时间反演波作为初始场直接引入抛物方程, 形成了一种对蒸发波导具有良好适应性的稳健定位方法, 并通过数值仿真验证了该方法的正确性与可靠性. 为进一步提高时间反演抛物方程法的实用性, 又提出了方向图加载法. 与常规的直接赋值法相比, 方向图加载法极大地减少了阵元数量, 虽然引入了较大的阵元间距, 但利用多径效应有效地抑制了鬼像的产生, 保证了定位精度. 可见, 本文提出的基于方向图加载的时间反演抛物方程定位算法在海面蒸发波导环境下具有较高的稳定性和精度, 且不需要大规模

的数据采集阵列, 这将为海上目标定位系统的实用化提供一定的参考.

参考文献

- [1] Tappert F D 1997 *Wave propagation and underwater acoustics* (Berlin Heidelberg: Springer) pp224-287
- [2] Dockey G D 1988 *IEEE T Antenn. Propag.* **36** 1464
- [3] Zhang J P, Wu Z S, Zhao Z W, Zhang Y S, Wang B 2012 *Chin. Phys. B* **21** 109202
- [4] Zhang Q H, Liao C, Sheng N, Cheng L L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 204101 (in Chinese) [张青洪, 廖成, 盛楠, 陈伶璐 2013 物理学报 **62** 204101]
- [5] Spencer T A, Walker R A, Hawkes R M 2005 *JGPS.* **4** 245
- [6] Guo J Y, Cao L, Long Y L, Gong Z Q 2009 *Acta Scientiarum Naturalium UN.* **48** 47 (in Chinese) [郭建炎, 曹林, 龙云亮, 龚主前 2009 中山大学学报 **48** 47]
- [7] Li D X, Yang R J, Wang H J, Jiang Z Z 2011 *Chin J Radio.* **4** 683 (in Chinese) [李德鑫, 杨日杰, 王鸿吉, 蒋志忠 2011 电波科学学报 **4** 683]
- [8] Lerosey G, Rosny J D, Tourin A, Fink M 2007 *Science* **315** 1120
- [9] Kim S, Edelmann G F, Kuperman W A, Hodgkiss W S, Song H C, Akal T 2001 *J. Acoust. Soc. Am.* **110** 820
- [10] Zhang T W, Yang K D, Ma Y L 2010 *Chin. Phys. B* **19** 124301
- [11] Blomgren P, Papanicolaou G, Zhao H K 2002 *J. Acoust. Soc. Am.* **111** 230
- [12] Papanicolaou G, Ryzhik L, Solna K 2002 *Matematica Contemporanea* **23** 139
- [13] Sheng X L, Hui J Y, Liang G L 2005 *Acta Acoust.* **30** 271 (in Chinese) [生雪莉, 惠俊英, 梁国龙 2005 声学学报 **30** 271]
- [14] Zhang Z M, Wang B Z, Ge G D, Liang M S, Ding S 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 098401 (in Chinese) [章志敏, 王秉中, 葛广顶, 梁木生, 丁帅 2012 物理学报 **61** 098401]
- [15] Liang M S, Wang B Z, Zhang Z M, Ding S, Zang R 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 058401 (in Chinese) [梁木生, 王秉中, 章志敏, 丁帅, 臧锐 2013 物理学报 **62** 058401]
- [16] Zhou H D, Wang B Z, Ding S, Ou H Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 114101 (in Chinese) [周洪澄, 王秉中, 丁帅, 欧海燕 2013 物理学报 **62** 114101]

A time reversal parabolic equation based localization method in evaporation duct*

Feng Ju^{1)†} Liao Cheng¹⁾ Zhang Qing-Hong¹⁾ Sheng Nan¹⁾ Zhou Hai-Jing²⁾

1) (Institute of Electromagnetics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

2) (Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

(Received 26 December 2013; revised manuscript received 29 March 2014)

Abstract

Evaporation duct is a multipath environment on the sea, which tends to distort the signals, causes lower localization accuracy or even affects the normal work of radar when using the traditional localization algorithms. This paper presents a localization method in time reversal parabolic equation based on the radiation pattern loading. It could effectively handle the effects of evaporation duct and adaptively compensate the signal distortion, form time reversed waves matched with the propagation environment, and lead to a robust focusing and localization of the target. This method uses multipath effects flexibly to increase the effective aperture of antenna array for super resolution. In addition, it has a good tolerance in element spacing leading to a sparse array configuration which is more practical on the sea and widens its application fields. Simulation results show that the azimuth resolution in evaporation duct with the same aperture array has been improved 2 times more than in the free space by using this method; when 30λ is adopted as the element spacing, the sidelobe levels can be kept below -8.96 dB, so ghost images are effectively suppressed. The proposed method has strong robustness and high accuracy, thus may be useful in many practical applications, such as communication, search and rescue, pre-warning system on the sea, etc.

Keywords: parabolic equation method, time reversal, localization, self-adaptive focusing

PACS: 41.20.Jb, 92.60.Ta

DOI: [10.7498/aps.63.134101](https://doi.org/10.7498/aps.63.134101)

* Project supported by the NSAF of China (Grant No. 11076022), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2013CB328904), and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20120184110013).

† Corresponding author. E-mail: fengju_fj@163.com