

基于最大似然估计的多目标定位

杨宝强¹, 赵东晔², 雷文太²

(1. 空军工程大学 训练部, 陕西 西安 710051; 2. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要:宽带高分辨雷达多目标定位问题一般是先进行精确时延估计,再进行源定位。本文提出了一种在频域运用最大似然估计进行目标位置反演的的方法,归结为全局搜索一目标函数的极值。通过对仿真数据的处理,结果显示该方法可以准确的估计出多目标位置。

关键词:目标定位;最大似然估计;雷达

中图分类号:V243 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2004)06-0027-03

基于阵列处理技术的源定位已经成为雷达、声纳、地球物理应用中的一个中心问题。在过去的十几年内,人们提出了各种针对远场目标窄带信号条件下的波达方向(DOA)估计方法。近年来近场条件下宽带信号的DOA和径向距离的估计问题逐渐成为研究热点^[1-2]。

多数的近场源定位方法是先进行时延估计,再进行源定位^[3]。时延估计是通过阵列系统中各接收信号的互相关系数实现的,目标位置并不是直接得到的。本文提出了一种基于最大似然估计方法的源定位问题,归结为搜索一目标函数的极值问题,从而有效的解决了宽带信号下的多目标位置估计问题。在单个目标情况下,本方法等效于使得各阵元接收信号的互相关系数之和达到最大。

1 目标位置的估计

对一 M 元线阵,设阵元间距相等,均为 d 。阵元均无方向性。则其接收信号的时域形式可表示为

$$x_m(t) = \sum_{p=1}^P a_p^{(m)} s_p(t - \tau_p^{(m)}) + w_{(i)}^{(m)}, \quad m = 1, \dots, M \quad (1)$$

式中: P 表示目标个数($P < M$); $a_p^{(m)}$ 表示第 m 个阵元的增益; $s_p(t)$ 表示第 p 个目标的回波信号; $\tau_p^{(m)}$ 表示波在第 m 个阵元与第 p 个目标之间传播所需的时间; $w_{(i)}^{(m)}$ 表示正态分布的白噪声。对每一阵元的接收信号进行间隔为 Δ 离散抽样并通过 N 点 DFT 将其转换到频域。则频域阵列模型表示为 $X(k) = H(k)S(k) + W(k)$, $k=0, N-1$ 。其中, $X(k) = [X_1(k) \dots X_M(k)]^T$ 表示 M 个阵元的接收信号矢量; $H(k) = [h^{(1)}(k) \dots h^{(M)}(k)]^T$ 表示目标与阵元之间的传递矩阵; $h^{(m)}(k) = [h_1^{(m)}(k) \dots h_p^{(m)}(k)]$ 表示第 m 个阵元与目标之间的传递矢量; $h_p^{(m)}(k) = a_p^{(m)} e^{jmkr_p^{(m)}/N\Delta t}$ 表示第 m 个阵元与第 p 个目标之间的传递函数; $W(k) = [W_1(k) \dots W_M(k)]$ 表示白噪声的频域表示。

假设未知参量为 $\Psi = [\Omega \Pi]$ 。其中 $\Omega = [r_1^T \dots r_p^T]$ 表示目标的位置矢量。 $\Pi = [S_1 \dots S_p]^T$ 表示各目标的散射信号的频域矢量; $S_p = [S_p^{(0)} \dots S_p^{(N-1)}]$ 表示第 P 个目标的散射信号的频域表示。将 N 个频率点的接收信号矢量 $X(k)$ 纵向排列,得到 NM 维的频域矢量 $X = D(\Psi) + \xi$ 。则关于目标位置和目标散射信号的最大似然估计归结为以下最优问题: $\max_{\Psi} L\Psi = \min_{\Psi} \sum_{k=0}^{N-1} \|X(k) - H(k)S(k)\|^2$ 。等价于对所有的频率点 k 寻找使目标函数 $f(k) = \|X(k) - H(k)S(k)\|^2$ 最小的目标位置 Ω 和 Π 目标散射信号。通过求解方程 $\partial f / \partial S^H(k) = 0$ 。可以得出任意源位置处的散射信号的估计值:

收稿日期:2004-05-19

基金项目:国防科技重点实验室基金资助项目(51473040103JB3201)

作者简介:杨宝强(1972-),男,河南潢川人,讲师,硕士,主要从事信号与信息处理研究。

$$\hat{S}(k) = H^\perp(k)X(k) \quad (2)$$

式中 $H^\perp(k) = (H^H(k)H(k))^{-1}H^H(k)$ 表示传递矩阵 $H(k)$ 的伪逆。因此,目标位置的估计问题转化为 $\max_{\Omega} U(v, \Omega) = \min_{\Omega} \sum_{k=0}^{N-1} \|J(k, v, \Omega)X(k)\|^2$ 。其中 $J(k, v, \Omega) = H(k)H^\perp(k)$ 。

一旦目标位置被估计出来,则目标散射信号的最大似然估计可由式(2)得到。对于单目标,可简化为

$$U(\Omega) = \sum_{k=0}^{N-1} |h(k, \Omega)X(k)|^2 \quad (3)$$

式中 $h(k, \Omega) = H^H(k)/\sqrt{\sum_{m=1}^M a_m^2}$ 对目标位置的反演即可归结为最优问题 $\max_{\Omega} U(\Omega)$ 的求解,即在估计区间 $[\Omega_{\min}, \Omega_{\max}]$ 中全局搜索目标函数 $U(\Omega)$ 的极值,可以采用模式搜索法或 Powell 法等优化算法以提高搜索速度^[4],达到实时处理的目的。

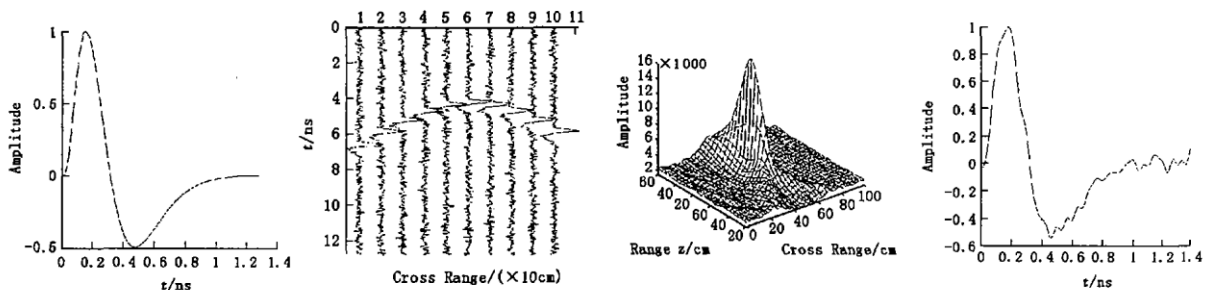
对多目标情况,联合估计问题变得非常复杂。可以将多目标定位问题转化为多个单目标的顺序联合估计问题^[5]。在进行第 n 个目标的估计问题时,将以前所有的 $n-1$ 个目标估计结果作为已知量,如此循环下去,直至不断收敛并达到精度要求为止。

2 实验结果

本节用最大似然估计法对单目标和多目标的仿真数据进行了目标定位。实验如下:

1) 单源横、纵向位置 $x=50$ cm, $z=40$ cm, 辐射信号 $s(t) = 4(t/\tau)^3 - (t/\tau)^4 e^{-t/\tau}$, $\tau = 1/4\pi f_0$, 中心频率 $f_0 = 1$ GHz, 十元均匀线阵水平放置,纵向坐标 $z=0$ cm, 阵元间距 10 cm, 叠加白噪声服从 $N(0, 0.001)$ 分布。源辐射信号的时域形式和阵列天线接收波形分别见图 1(a) 和图 1(b), 目标函数 $U(\Omega)$ 可由式(3)求得,如图 1(c)。当目标位置的估计值得到后,由式(2)即可得到源辐射信号的估计,见图 1(d)。

目标位置估计值为 $x_e = 50.1$ cm; $z_e = 39.7$ cm, 横向和纵向相对误差分别为 0.2%; 0.75%。通过比较图 1(a) 和 1(d) 可见,估计出的发射信号波形与真实的发射信号基本一致。



(a) 源辐射信号的时域表 (b) 阵列天线接收信号表 (c) 目标函数 $U(\Omega)$ (d) 由估计值反演出的源辐射

图 1 单目标定位仿真验证

2) 源 A 横、纵向位置 $x=20$ cm, $z=10$ cm, $s_A(t) = 4(t/\tau_0)^3 - (t/\tau_0)^4 e^{-t/\tau_0}$, $\tau_0 = 1/4\pi f_0$, 中心频率 $f_0 = 1$ GHz, 源 B 横向位置 $x=30$ cm, 纵向位置 $z=40$ cm, 辐射信号 $S_B(t) = (1 - ((t-1/f_1)/\tau_1)^2) e^{-((t-1/f_1)/\tau_1)^2}$, $\tau_1 = \sqrt{2}/2\pi f_0$, 中心频率 $f_1 = 1$ GHz, 十元均匀线阵水平放置,纵向坐标 $z=0$ cm, 阵元间距 10 cm, 叠加白噪声服从 $N(0, 0.01)$ 分布。源 A, B 的辐射信号时域形式和阵列天线接收波形分别见图 2(a) 和图 2(b), 目标函数 $U(\Omega)$ 可由式(3)求得,如图 2(c)。当目标位置的估计值得到后,由式(2)即可得到源 A 辐射信号的估计,见图 2(d)。去除源 A 的影响后的目标函数 $U(\Omega)'$ 和源 B 的辐射信号估计如图 2(e) 和 2(f) 所示。

当得到源 A 的位置估计和发射信号表示后,即可将其产生的阵列信号在原始记录剖面中去除,重复运用式(3)得到目标函数 $U(\Omega)'$,此即为源 B 的目标函数,位置估计即可通过寻找该目标函数的极大值点得到,进而可得到其发射信号形式。不断重复上述步骤,直至达到精度要求为止^[4]。最终结果:源 A 的位置估计 $x_{1e} = 20.1$ cm; $z_{1e} = 10.2$ cm, 估计误差分别为 0.5%, 2%; 源 B 的位置估计 $x_{2e} = 28.5$ cm; $z_{2e} = 55.9$ cm, 估计误差分别为 5%, 39.7%。源发射信号分别如图 2(d) 和 2(f) 所示。

由仿真数据的处理结果可见:基于最大似然估计的源定位可以精确的估计出多目标位置和其发射信号形式,避免了传统的先进行时延估计再进行源定位的方法;横向位置的估计误差要小于纵向的估计误差;定位误差受噪声影响较大。

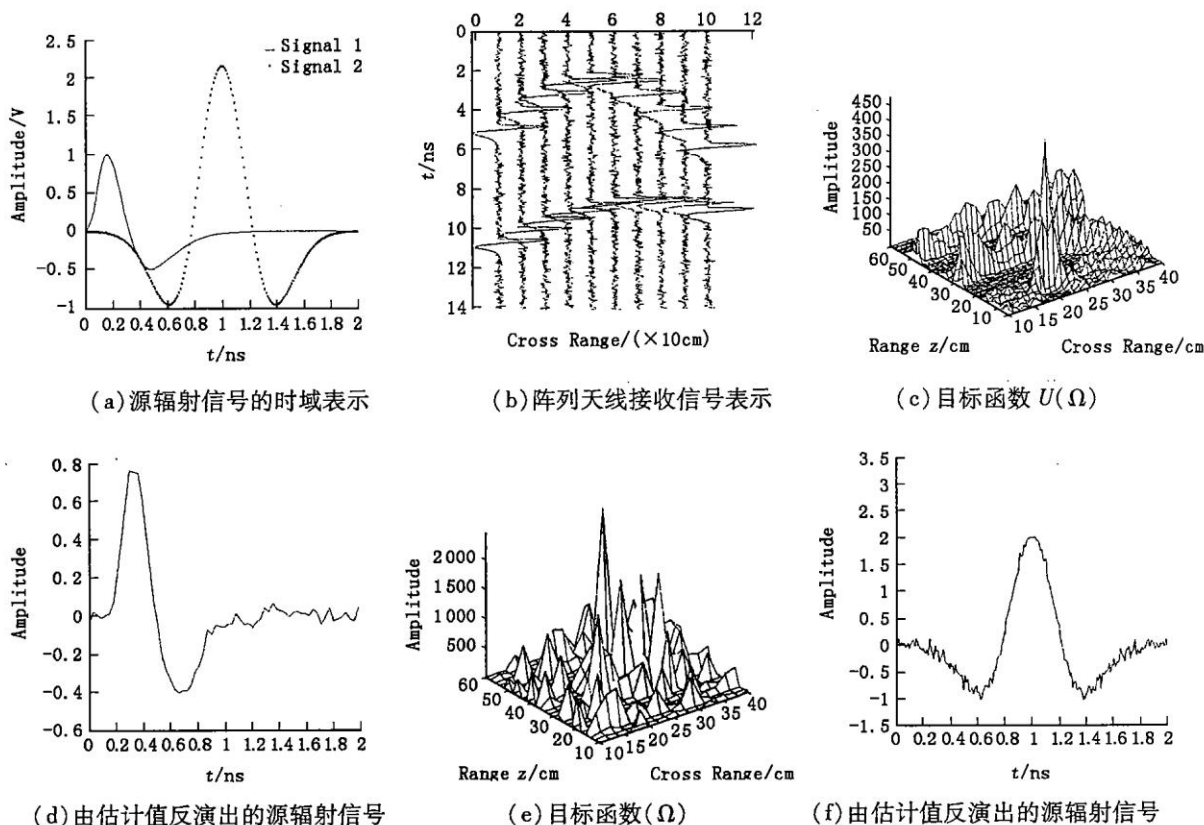


图2 多目标定位仿真验证

3 结束语

从频域出发,通过目标雷达回波信号和雷达目标之间的线性关系,将宽带雷达应用中的近场目标位置反演问题归结为一最优化问题。通过对仿真数据的处理,结果表明:基于最大似然估计的目标位置反演可以精确的反演出未知参量,有助于了解雷达照射区域的目标分布情况;这种方法与传统的参数估计方法相比,无需长合成孔径,估计性能更好,可以满足工程应用的要求,进行多目标检测和定位。

参考文献:

[1] 金 梁,殷勤业. 时空 DOA 矩阵方法[J]. 电子学报,2000,28(6):8-12.
 [2] 金 梁,殷勤业. 适用于任意阵列的多径信道二维方向角与相对时延的联合估计方法[J]. 电子学报,2000,28(12):1-4.
 [3] Tung T L, Yao K, Reed C W, et al. Source Localization and Time Delay Estimation Using Constrained Least Squares and Best Path Smoothing[J]. Proc SPIE Nov,1999,38(7):220-233.
 [4] 薛 毅. 最优化原理与方法[M]. 北京:北京工业大学出版社,2001.
 [5] Schmidt R O. Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation[J]. IEEE Trans On Antenna and Propagation,1986,34(3):276-281.

(编辑:姚树峰)

Maximum - Likelihood Multiple Sources Localization Estimation

YANG Bao - qiang¹, ZHAO Dong - ye², LEI Wen - tai²

(1. Training Department, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710051, China; 2. The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China)

Abstract: In the multi - object localization, most of the existing methods are based on accuracy time - delay estimation. In this paper a maximum - likelihood multiple sources localization estimation method is presented. The ML method can be used in estimating multiple source locations, while such case is rather difficult for the time - delay method. In the single source case, the ML estimator is shown to be equivalent to maximizing the sum of the weighed cross - correlations between time shifted sensor data. Numerical examples using simulating data demonstrate the effectiveness of the new method.

Key words: object localization; maximum - likelihood estimation