

文章编号:1001-9081(2007)06-1510-03

一种基于 FastICA 的波达方向估计新方法

孙正鼐,肖芳,张虹

(哈尔滨工业大学(威海)信息科学与工程学院,山东威海 264209)

(xiaofang_betty@yahoo.com.cn)

摘要:独立分量分析是一种新颖的盲源分离技术,该方法作为目前信号处理领域的一项新技术,具有重要的理论意义和实用价值,已广泛应用于通讯、雷达信号处理、生物医学图像处理、模式识别等众多领域。简要介绍了独立分量分析的基本原理和算法,并提出将快速独立分量分析(FastICA)方法应用于波达方向估计(DOA),通过仿真实验和分析,可以得到 DOA 的一种简单估计,实验结果亦表明该算法在波达方向估计应用中的可行性和有效性。

关键词:独立分量分析;波达方向估计;快速独立分量分析

中图分类号: TP39;TN311.23 **文献标识码:** A

New method for estimation of DOA based on fast independent component analysis

SUN Zheng-nai, XIAO Fang, ZHANG Hong

(School of Information Science and Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai Shandong 264209, China)

Abstract: Independent Component Analysis (ICA) is a novel blind source separation method. As a new technique of signal processing, ICA has become more and more important and has been widely used in communication, processing of radar signals, image processing of biological medicine, pattern recognition and so on. In this paper, the fundamental theory and algorithm of ICA were presented. And a new method—fastICA was used for DOA estimation. A simple estimation method of DOA can be obtained. Experimental results have verified its feasibility and effectiveness.

Key words: Independent Component Analysis (ICA); estimation of DOA; fast independent component analysis

0 引言

目前,在波达方向估计方面,国内外已经做了不少工作,这些工作基本上可以分成两大类:一类是将其与常规波束形成法相结合,依靠预成多波束来实现^[1]。但是由于常规波束受到角度分辨瑞利准则的约束,而且其分辨能力不能适应当前应用领域的要求,因此有一定的局限性;另一类是将其与高分辨率方位估计法相结合。其中以基于电磁矢量传感器和水声质点振速水听器的自初始化 MUSIC 算法^[2]应用较广,与常规波束形成法相比,此方法具有较高的分辨率和良好的估计性能。但是,在阵列信号处理中,传感器阵接收来自多个源目标的信号,源目标信号可能是完全未知的,在矢量水听器中,传输通道也是未知的和时变的,传输通道的不确定性是限制高分辨方位估计使用的主要因素之一。波达方向盲估计不需要阵列校验、信号的波达方向(或导向矢量)和训练序列等先验知识^[3]。利用独立分量分析这一盲源分离技术估计出混和矩阵和源信号,在未知通道特性和阵列流型等情况下就能估计波达方向,具有潜在的工程实用价值和广阔的应用前景。

本文将独立分量分析算法与矢量水听器阵列波达方向估计结合研究,从理论和仿真实验两方面说明独立分量分析在应用中的优越性。

1 独立分量分析的基本原理

独立分量分析(Independent Component Analysis, ICA)^[4,5]是近年来发展起来的一种新的盲源分离(Blind Source Separation, BSS)技术。盲源分离是指在源信号和信号混合模型未知的情况下,从混合信号即观测信号中分离源信号的过程。独立分量分析的基本含义是将多道观测信号按照统计独立的原则通过优化算法分解为若干独立分量,而这些独立分量是源信号的一种近似估计。独立分量分析的前提条件为源信号是相互独立的,且不是高斯信号。以声呐系统为背景,考虑到矢量水听器接收的不同舰船辐射噪声相互独立,并与环境噪声独立,源信号满足 ICA 模型的前提条件,因此 ICA 方法完全可以用于处理声呐信号。

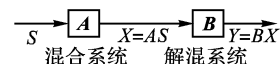


图 1 ICA 的简单框图

ICA 框图如图 1 所示。 $s(t) = [s_1(t), \dots, s_N(t)]^T$ 是原始信源组成的 N 维矢量。 $s_i(t), i = 1, \dots, N$ 是其组成部分。它们经混和系统 A 线性组合成 M 维观察矢量:

$$x(t) = [x_1(t), \dots, x_M(t)]^T$$
$$\text{即: } x(t) = As(t) \quad (1)$$

收稿日期:2006-12-11;修订日期:2007-03-16

作者简介:孙正鼐(1965-),男,山东高密人,副教授,博士,主要研究方向:传感技术;肖芳(1982-),女,湖南岳阳人,硕士研究生,主要研究方向:声呐信号处理;张虹(1965-),女,内蒙古呼和浩特人,副教授,主要研究方向:自动测量与智能控制。

现在的任务是要求只依据 $x(t)$ 通过另一矩阵(称为解混矩阵 \mathbf{B}) 把各 $s_j(t)$ 估计出来。即:令 $y(t) = [y_1(t), \dots, y_N(t)]^T$ 是解混后的输出 $y(t) = \mathbf{B}x(t)$, 要求 $y(t)$ 的各个分量尽可能相互独立,且逼近源信号 $s(t)$,但容许两者中各分量排序不一定相同,比例尺也不一定相同。

独立分量分析理论的实质是一个优化问题,其目的是通过调整解混矩阵 \mathbf{B} ,使源信号间的独立性最强。通常可以分为以下3个步骤来实现:1) 预处理,又称白化处理;2) 确立优化判据,即选择独立性判据;3) 根据判据确立学习算法。

2 FastICA 算法

ICA 常用的算法很多,当前算法简单地可分为两类:1) 最大和最小化一些相关准则函数,这类算法的优点是对任何分布的独立成分都适合,但它们要求非常复杂的矩阵运算或张量运算,计算量非常大;2) 基于随机梯度方法的自适应算法,该类算法优点是能保证收敛到一个相应的解,但其主要问题是收敛速度慢,且其收敛与否很大程度上依靠学习速率参数的正确选择。

近两年来又出现了一种快速 ICA 算法(FastICA),该算法是基于定点递推算法得到的。对已经存在的 ICA 算法来说, FastICA 有许多优良的特性:

1) 在 ICA 数据模型的假设下, FastICA 收敛速度是3次的(或至少是2次的)。而普通的 ICA 算法收敛速度仅仅是线性的。FastICA 算法的收敛速度之快,已经通过仿真试验得到了证实^[6]。

2) 与基于梯度的算法相比,它不需要选择步长。这表明该算法易于适用。

3) FastICA 算法直接找到了任何非高斯分布的独立成分,相对其他许多算法来说,它们首先必须进行概率密分布函数的估计,然后才相应地进行非线性的选择。

4) 独立成分能一个一个的估计,这在探索性数据分析里非常有用,如果仅需估计一些独立成分时,它可有效地减少计算量。

5) FastICA 算法具有很多神经网络算法的优点:并行的,分布的,计算简单,要求内存小。而随机梯度法却只有在环境改变很快时才显出其优越性。它对任何类型的数据都适用,同时它的存在对运用 ICA 分析高维的数据成为可能。

本文采用了基于负熵最大判据的快速 FastICA 算法^[7],该算法无需选择迭代步长,收敛迅速,是到目前为止效率较高,并且应用较广的一种算法。

其思路是通过随机梯度法调节分离矩阵 \mathbf{B} 来达到优化目的。基于负熵最大判据的迭代公式为:

$$u_i(k+1) = E[z f(u_i^T(k)z)] - E[f'(u_i^T(k)z)] u_i(k) \quad (2)$$

算法步骤如下:

1) 将 x 去均值,然后加以球化得 z 。

2) 任意选择 u_i 的初值 $u_i(0)$,要求 $\|u_i(0)\|_2 = 1$ 。

3) 令:

$$u_i(k+1) = E[z f(u_i^T(k)z)] - E[f'(u_i^T(k)z)] u_i(k)$$

f, f' 可查表,总集均值用时间均值代替。

4) 归一化: $\frac{u_i(k+1)}{\|u_i(k+1)\|_2} \rightarrow u_i(k+1)$

5) 如未收敛,回到步骤3)。

对于提取多个信源时,为了保证每次提取出来的都是尚未提取过的信源,必须在重复前述算法前添加一步正交化步骤,把已提取过的分量去掉,再把上述算法重复,运行若干次,每次取不同 $u_i(0)$ 的就可以把多个信源提取出来。

使用快速独立分量分析(FastICA)算法得到源信号 S 的估计后,可以用最小二乘的方法估计出混合矩阵 \mathbf{A} 。在阵列信号处理中混合矩阵 \mathbf{A} (如图1中的混合系统 \mathbf{A}) 即是阵列流型矩阵,它包含目标的方位信息,通过信号处理过程,就可估计出波达方向。

3 波达方向估计研究

波束形成是声呐信号处理的主要组成部分,主要目的是为了在波束扫描空间获得足够大的信噪比和高精度的目标分辨率。它是基阵在空间上对接收到的信号进行处理,以抑制噪声,提取有用信息的过程。若各个阵元输出端的信号都是同相的,相应的可以产生一个增强的信号输出;若信号到达基阵时的各个阵元上是不同相的,则相应的信号输出被减弱。但是,在这两种情况下,阵元上的附加噪声均由于其宽带性而产生不相干的叠加。波束形成的主要目的就是寻找一个适当的权向量以补偿各个阵元的传播延时,从而使我们期望的方向上的信号到达基阵时是同相的,进而在该方向上产生一个最大的输出^[8]。

以均匀线阵为例,设有 M 个阵元,阵元间距为 d ,有 n 个源从远场入射,波达方向分别为 $\theta_1, \dots, \theta_n$,如图2所示,以阵列的第一个阵元为基准,则得到阵列流型矩阵为:

$$\mathbf{A} = [a(\theta_1), \dots, a(\theta_n)] \quad (3)$$

式中 $a(\theta_i)$ 为导引矢量,定义为:

$$a(\theta_i) = [1, e^{j\frac{2\pi}{\lambda} d \sin(\theta_i)}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\lambda} (M-1) d \sin(\theta_i)}]^T \quad (4)$$

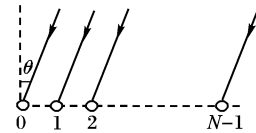


图2 线阵几何形状

波达方向盲估计表述为,在源信号未知和通道特性部分未知的情况下,从阵列输出信号估计源信号 $x(t)$ 和混合矩阵 \mathbf{A} ,从而进一步估计波达方向。混合矩阵 \mathbf{A} 的在线估计式是:

$$\mathbf{A}(k+1) = \mathbf{A}(k) + \eta [x(k) - \mathbf{A}(k)y(k)] y^T(k) \quad (5)$$

其中 η 为学习率,一旦得到稳定的 \mathbf{A} ,就可以得到导引矢量的 $a(\theta_i)$ 估计如下:

$$a(\theta_i) = [1, a_{2i}/a_{1i}, \dots, a_{ni}/a_{1i}]^T \quad (6)$$

其中 a_{ij} 为 \mathbf{A} 的第 (i, j) 号元素,因此得到波达方向的一个简单估计为:

$$\theta_i = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2\pi d} \cdot \arctan\left[\frac{\text{Im}(a_{2i}/a_{1i})}{\text{Re}(a_{2i}/a_{1i})}\right]\right) \quad (7)$$

式中 $\text{Im}()$ 和 $\text{Re}()$ 分别取复数的实部和虚部。

4 仿真结果

考虑一各向同性的均匀线阵(ULA),阵元数为12,阵元间距 d 为0.45倍波长 λ ,现应用 FastICA 对信源进行波达方向(DOA)估计,假设有一正弦波独立源,DOA 为 32° ,信噪比均为20dB,采样快拍数为24次。图3为利用 FastICA 获得的

DOA, 仿真结果表明, 利用该方法获得的波达方向与实际值非常接近。

图 4 为用 3 种方法获得的 DOA: 常规波束形成法 (Conventional), MUSIC 波束形成法和利用 FastICA 的波束形成法。利用 FastICA 估计的结果为 32.1° , 与利用 MUSIC 估计的结果非常近似, 与实际波达方向角相符, 但是 MUSIC 估计的结果取决于阵列的有关参数, 而且在 ICA 数据模型下, FastICA 收敛速度非常之快, 是 3 次 (或至少是 2 次的)^[9]。

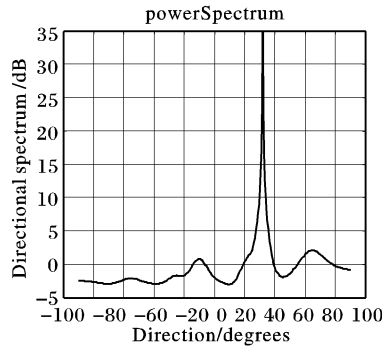


图 3 FastICA 单目标 DOA 估计

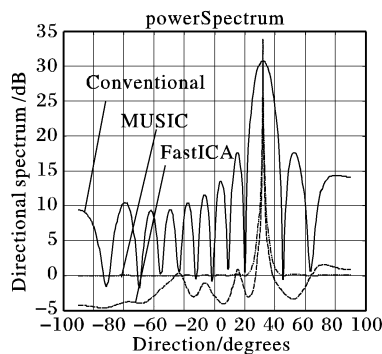


图 4 3 种方法 DOA 估计

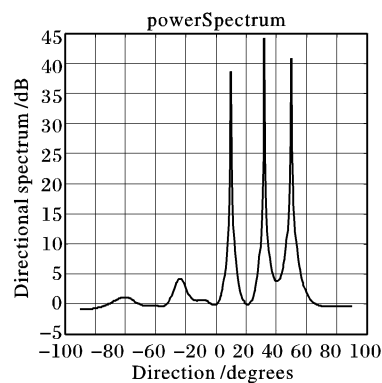


图 5 三个目标 DOA 估计

利用 ICA 对多信号处理, 依然可以获得较好的结果。假设有 3 个独立源, 它们分别是正弦波, 方波和一随机波形, DOA 依次为 10° , 32° 和 50° , 信噪比均为 20dB, 采样快拍数为 100 次。图 5 为仿真结果: 9.8° , 32.1° 和 49.8° , 与实际方向吻合。

通过分析比较, 得知利用 FastICA 可以获得信号的波达方向, 并且有较高的稳定性和精确度 (本实验方位角分辨率为 2°)。

5 结语

本文通过实验和分析, 使用独立分量分析算法估计出阵列流型矩阵, 可以得到 DOA 的一种简单估计, 仿真结果也表明了 FastICA 算法能够有效地实现波达方向的盲估计, 性能稳定。当然, 独立分量分析的方法还不够成熟, 而且, 这一方法在声呐系统的研究才刚刚开始, 相信随着这一理论的进一步完善, 可以取得更好的估计效果。

参考文献:

- [1] NIELSON RO. Sonar Signal Processing (Acoustic and Signal Processing Library) [M]. London: Artech House, 1991.
- [2] WONG KT, ZOLTOWOSKI MD. Extended-Aperture Underwater Acoustic Multisource Azimuth/Elevation Direction-Finding Using Uniformly but Sparsely Spaced Vector Hydrophones [J]. IEEE J. of Oceanic Engineering, 1997, 22(4): 659 - 672.
- [3] 李小军, 张贤达, 保铮. 基于独立矢量基的波达方向估计 [J]. 电子与信息学报, 2002, 24(10): 1297 - 1302.
- [4] COMON P. Independent Component Analysis, A New Concept [J]. Signal Processing, Special Issue on Higher Order Statistics (S0165 - 1684). 1994, 36(3): 287 - 314.
- [5] HYVARINEN A, OJA E. Independent Component Analysis: Algorithms and Applications [J]. Neural Networks (S0893 - 6080) 2000, 13(4 - 5): 411 - 430.
- [6] GIANNAKOPOULOS X, KARHNNEN J, OJA E. Experimental Comparison of Neural ICA Algorithms [A]. In: Proc. Int. Conf. on Artificial Neural Networks (ICANN'98) [C]. Sk vde, Sweden, 1998. 651 - 656.
- [7] HYVARINEN A. Fast and Robust Fixed-Point Algorithms for Independent Component Analysis [J]. IEEE Trans. on Neural Networks (S1045 - 9227), 1999, 10(3): 626 - 634.
- [8] 李贵斌. 声呐基阵设计原理 [M]. 北京: 海洋出版社, 1995.
- [9] BLANCO Y, ZAZO S. New Gaussianity Measures Based on Order Statistics: Application to ICA [J]. Neurocomputing (S0925 - 2312). 2003, 51: 303 - 320.

(上接第 1509 页)

仿真结果表明, 控制器可以很好地跟踪设定值的变化, 并对过程参数的变化具有良好的自适应能力和鲁棒性。

3 结语

本文针对工业过程中常见的参数时变和大时滞问题, 研究了广义预测控制理论在其中的应用问题。采用隐式广义预测控制算法通过直接辨识控制器参数求解最优控制增量, 无需递推求解 Diophantine 方程及进行矩阵求逆运算, 因而计算量小、实时性高。仿真结果表明, 在不需要关于被控对象的先验知识的情况下, 隐式广义预测自校正控制器仍具有很强的

适应能力和良好的控制性能, 当参数摄动时, 有较强的鲁棒性, 在时变大时滞系统的自适应控制中有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] 蔡自兴. 智能控制 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [2] 诸静. 智能预测控制及其应用 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002.
- [3] CLARKE DW, MOHTADI C, TUFFS PS. Generalized Predictive Control [J]. Automation, 1989, 25(6): 859 - 875.
- [4] 李国勇. 智能控制及其 Matlab 实现 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.