

宽带盲波束形成与卷积混合盲源分离

王颖翠, 陈励军

(东南大学无线电系, 南京 210096)

摘要: 盲波束形成是在不知道阵形、目标方位以及阵元响应等信息的情况下, 只根据阵元输出恢复源信号。现有盲波束形成对窄带信号研究比较多, 而对宽带信号盲波束形成论述较少。本文从信号模型、系统框图、处理目的三方面说明盲波束形成与盲源分离近似。并指出卷积混合模型盲源分离完全可以作为解决宽带信号盲波束形成问题的一种通用方法。

关键词: 窄带盲波束形成; 瞬时混合盲源分离; 宽带盲波束形成; 卷积混合盲源分离

中图分类号: TN911.7 文献标识码: A

Wideband blind beamforming and blind separation of convolved mixtures

WANG Ying-cui, CHEN Li-jun

(Radio Engineering Department of Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Blind beamforming is referred to as reconstructing desired signals given only the outputs of array and without the knowledge of sensor placement, direction of desired signals and sensor response. The currently available blind beamforming algorithms are usually concerned with narrow band signal beamforming, and the wideband situation is seldom discussed. This paper proposes a new viewpoint that blind beamforming is closely related to blind separation, and blind separation of convolved mixtures is a versatile method to resolve wideband blind beamforming problems. The proposed approach is explained in detail with respect to signal model, system configuration, and the objective of processing.

Key words: narrowband blind beamforming; blind separation of instantaneous mixtures; wideband blind beamforming; blind separation of convolved mixtures

1 引言

在阵列信号处理中, 波束形成可用来根据各阵元输出恢复源信号。传统波束形成恢复源信号的方法总体上可分为两种: 一是把期待信号在各阵元同相相加, 如经典的延时加权相加波束形成; 二是抑制掉干扰, 如 LCMV 波束形成和 GSC 波束形成。传统的波束形成一般需要知道阵形、目标方位以及阵元响应等信息, 盲波束形成就是在不知道这些信息的情况下, 而只依据阵元输出恢复源信号。现有盲波束形成算法也并非是在对信号一无所知的情况下进行的完全意义上的盲波束形成, 通常要利用信号的一些特性, 如常模量、循环平稳、概率分布、信号彼此独立等特性。由于移动通信发展的需求, 现有盲波束形成算法对各种通信信号的盲波束形成提出了较多的解决办法^[1], 如 ACMA、SCORE 算法分别利用了通信信号的常模量、循环平稳特性。针对通信信号提出的算法对信号加以较强限制, 所以不具有

通用性。而信号间彼此独立的性质削弱了对信号的限制, 因此语音、声呐的盲波束形成可利用信号的相互独立性。另外, 传统波束形成有窄带信号波束形成和宽带信号波束形成两种, 现有的盲波束形成算法大多要求信号是窄带的, 对宽带信号盲波束形成论述较少^[2]。利用信号的循环平稳特性实现宽带信号的空间滤波^[3]。把 ACMA 扩展到非瞬时混合的情况^[4]。提出的宽带盲波束形成算法只能提取出具有最高谱峰的信号。以上这些宽带方法也都对信号有严格限制, 同样是通用性不强。在研究水声宽带信号盲波束形成的过程中, 我们发现盲波束形成与盲源分离近似^[1]。文中就是把两者看作同一问题^[5], 文中也论述了两者的一致。所谓盲源分离, 是指在不知道信号和传输通道参数的情况下, 针对源信号的瞬时混叠和卷积混叠或它们的组合, 根据输入源信号的统计特性, 仅由观测信号恢复出源信号各个独立成分的过程。本文将把这两个研究方向加以综合论述, 最后得出卷积混合模型盲源分离可以用来解决宽带盲波束形成问题。本文首先从信号模型等方面比较窄带盲波束形成和瞬时混合模型

收稿日期: 2001-09-18; 修回日期: 2002-02-27

作者简介: 王颖翠(1973-), 女, 辽宁人, 硕士研究生, 研究方向为盲波束形成。

盲源分离,接下来重点从信号模型、实现方法、处理目的三方面论述宽带盲波束形成和卷积混合模型盲源分离的一致。

2 窄带盲波束形成和瞬时混合模型盲源分离

2.1 信号模型

2.1.1 窄带信号盲波束形成的信号模型

在不考虑多径传输的情况下,第 i 个基元接收到的信号 $x_i(t)$ 为:

$$x_{ij}(t) = \sum_{j=1}^M a_{ij} s_j(t - \tau_{ij})$$

其中 a_{ij} 为第 i 个阵元对第 j 个信号的响应。 $s_j(t)$ 为第 j 个信号源。 τ_{ij} 为第 j 个源信号到达第 i 个阵元的延时。

如果 $s_j(t)$ ($j = 1, \dots, M$) 是窄带信号,中心频率为 w_j ,第 j 个信号可以表示为:

$$s_j(t) = u_j(t) \exp\{j[w_j t + v_j(t)]\}$$

$u_j(t)$ 、 $v_j(t)$ 分别为第 j 个信号的幅度和相位。对于窄带信号有下列关系式成立:

$$u_j(t - \tau) \approx u_j(t), \quad v_j(t - \tau) \approx v_j(t)$$

则接收信号的延时可以表示为相移,即

$$s_j(t - \tau) = s_j(t) \exp(-jw_j \tau)$$

根据上式,第 i 个基元的接收信号为:

$$\begin{aligned} x_j(t) &= \sum_{j=1}^M a_{ij} s_j(t - \tau_{ij}) \\ &= \sum_{j=1}^M a_{ij} s_j(t) \exp(-jw_j \tau_{ij}) \\ i &= 1 \dots N \end{aligned}$$

用矩阵表示为: $X(t) = AS(t)$, 若考虑加性噪声则为: $X(t) = AS(t) + n(t)$

2.1.2 瞬时混合模型盲源分离的信号模型

假设有 N 个独立的信号,写成向量形式为: $S^T(t) = [s_1(t) \dots s_N(t)]$ 。假设混合过程为 $X(t) = AS(t)$ 。在这里 A 是 $M \times N$ 维未知矩阵,称为混合矩阵。向量 X 则是源信号的线性混合。盲源分离就是要找到分离矩阵 W ,使得 $U(t) = WX(t)$, $W = A^{-1}$, $U(t) = S(t)$ 。

可见窄带盲波束形成和瞬时混合模型盲源分离的信号模型形式上完全相同。从总体上讲,窄带盲波束形成也可分为直接和间接两种方法。间接的方法:如 JADE 算法利用系统盲辨识估计出 A , 虚拟 ESPRIT 算法也是先估计出 A , 然后把 A 的列向量作为估计的方向向量代入传统的 LCMV 或延时相

加波束形成中求出权矢量 W_i 。直接的方法:如 AGMA、SCORE 算法不预先估计 A , 而是依据信号的常模量性质和循环平稳性质直接估计出所有权矢量。如果说间接的方法求权矢量的过程还没完全绕过传统的波束形成,那么直接的方法和瞬时混合盲源分离是完全一致的,都是直接求出权矢量。下面比较宽带盲波束形成和卷积混合模型盲源分离。

3 宽带盲波束形成和卷积混合模型盲源分离

3.1 信号模型

3.1.1 卷积混合模型盲源分离的信号模型

在现实世界中,瞬时混合的信号模型是很难满足的,而卷积混合模型更接近波在空间的实际传播和混合过程,它在每一独立信号和阵元间用一 FIR 滤波器来描述环境的影响,接收阵元间的延时。具体信号模型如下:

$$x_i(t) = \sum_j \sum_p a_{ij}(p) s_j(t - p) \quad (1)$$

3.1.2 盲宽带波束形成的信号模型

根据权值的选择方式,传统波束形成可以分为数据独立波束形成和统计最佳波束形成。经典的延时加权相加就是数据独立波束形成的一种。在统计最佳波束形成中,讨论比较多的有 LCMV 波束形成和 GSC 波束形成。LCMV 波束形成的权值的一般形式为:

$$w = g^* \frac{R_X^{-1} d(\theta, w)}{d^H(\theta, w) R_X^{-1} d(\theta, w)}$$

$d(\theta, w) = [1, e^{jw\tau_2(\theta)}, e^{jw\tau_3(\theta)} \dots e^{jw\tau_N(\theta)}]^H$, 在宽带波束形成中时延 $\tau_i(\theta)$ 既包括传播时延也包括阵元后所加滤波器时延。($N = M * L$, M 为阵元数, L 为每个阵元后所接滤波器的阶数)。信源到达阵元的传播延时取决于阵形和波达方向。GSC 的主通道一般也需要知道 $d(\theta, w)$ 或采用延时相加波束形成器形成所需信号方向上的固定空间增益。通过以上的简单介绍,可以看出传统波束形成以空间方向为参数。

因为在传统波束形成中时延被看作是方向 θ 的函数,所以传统的波束形成一般不把多径传输问题考虑在信号模型内。即

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^M a_{ij} s_j(t - \tau_{ij})$$

如果将多径传输考虑在信号模型内的话,那么同一信号经过反射从不同方向到达的信号将被视为

不同的信号。也就是说如果把波束形成看作人的眼睛,那么它能区分出的是来自不同方向的信号。可以说这样的信号模型就是传统波束形成一直受多径传输问题和智能干扰困扰的根本原因。

对于盲波束形成,信号方向和阵列形状都是不可知的,时延不能再用精确的数学表达式表示成波达方向的函数,因而可以把多径传输包括在宽带盲波束形成的信号模型内。假设有 M 个独立信号经过不同路径到达 N 个阵元,则第 i 个阵元的输出信号为:

$$x_i(t) = \sum_{k=0}^K \sum_{j=1}^M a_{ij}^{(k)} s_j(t - \tau_{ij}^{(k)}) \quad (2)$$

$i = 1 \dots M$

$k=0$ 代表直达信号,其余代表经过多径传输后的信号。 $a_{ij}^{(k)}$ 和 $\tau_{ij}^{(k)}$ 分别代表第 j 个信号从 k 个反射路径到达第 i 个阵元的衰减和时延。在这里

$$|\tau_{ij}^{(k)} - \tau_{ij}^{(k')}| \leq \tau_{\max}$$

$$\forall k, \tau_{\max} = d/c$$

d 为第 i 个阵元和第 j 个阵元之间的直线距离, c 为波的传播速度。

可以看出式(2)的信号模型与卷积混合模型(1)的关系为:

$$a_{ij}(p) = \sum_{k, \tau_{ij}^{(k)}=p} a_{ij}^{(k)} \quad (3)$$

即式(2)中第 j 个信号经过多径传输后的 $K+1$ 个信号中,时延等于 p 的信号的衰减之和等于与第 j 个信号进行卷积的滤波器的第 p 项。当然,由于 p 只能取整数,而实际中的 $\tau_{ij}^{(k)}$ 不可能只取整数,(3)式只能是一种近似表示,不过可以通过提高采样率,使式(3)的等式两边更加近似。

另外,如果卷积混合模型的盲源分离在频域实现就可以采用式(2)的信号模型,即对式(2)进行傅立叶变换得:

$$\begin{cases} x_i(w) = \sum_{j=1}^M H_{ij}(w) s_j(w) \\ H_{ij}(w) = \sum_{k=0}^K a_{ij}^{(k)} e^{-jw\tau_{ij}^{(k)}} \end{cases}$$

变换到频域后就可可在各个频点用瞬时混合盲源分离方法进行分离,并且在频域实现盲源分离,实现效果更好。

综上所述,盲宽带波束形成和卷积混合模型盲源分离可以采用一样的信号模型。宽带盲波束形成采用这样的信号模型还可以解决多径传输的问题。因为盲源分离看到的是信号的独立性而非方向性。

3.2 系统框图

从框图可以看出宽带波束形成和卷积混合盲源分离的唯一区别仅是:宽带波束形成恢复某一方向的信号,而卷积混合盲源分离恢复所有独立信号。也可以说,在时域实现时宽带波束形成采用的是 FIR 向量,向量的元素是阵元后的 FIR 滤波器。而卷积混合模型的盲源分离采用的是 FIR 矩阵,它为恢复每一独立信号提供一不同的 FIR 向量。两者又都有对应的频域实现方法。宽带波束形成的频域实现是把每一阵元输出都作 DFT 变换,分成各个子窄频带,在每一个窄频带内作窄带波束形成。与之相似,卷积混合盲源分离的频域实现把每一阵元都作 STFT 变换,分成各个窄频带,对每一个窄频带作瞬时混合盲源分离。前文的分析已指出瞬时混合盲源分离和窄带盲波束形成是一致的。所以从框图上不难看出宽带盲波束形成与卷积混合盲源分离的实现系统是完全相同的。

宽带波束形成的系统框图和卷积混合模型盲源分离的系统框图见图 1~ 图 4(注:图 2 中的 w_i 代表一向量,图 3 中 h_{ij} 代表 FIR 滤波器,而图 4 中的 W_i 代表一矩阵。)

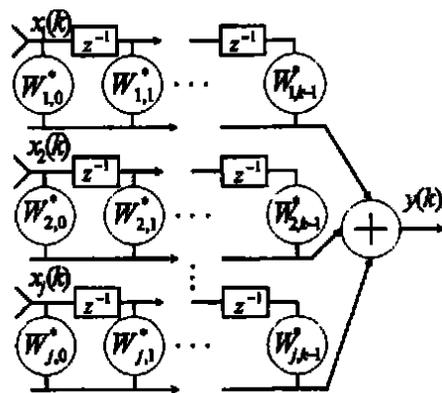


图 1 传统宽带波束形成的时域实现

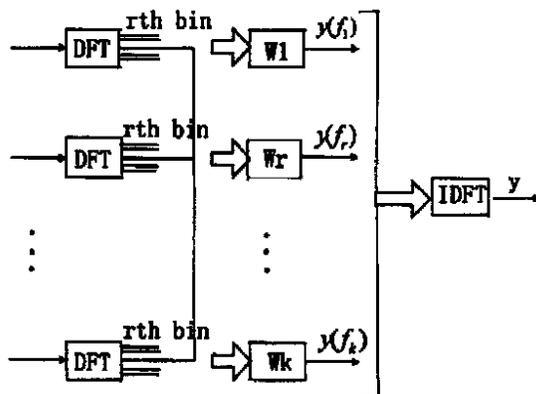


图 2 传统宽带波束形成的频域实现

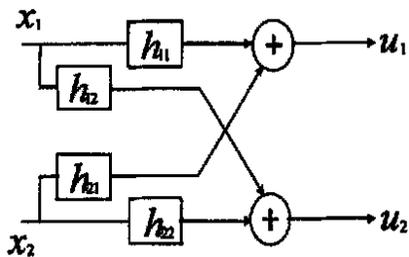


图 3 卷积混合盲源分离的时域实现

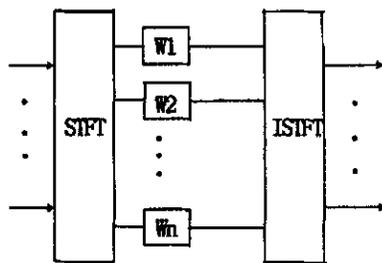


图 4 卷积混合盲源分离的频域实现

3.3 目的

盲波束形成的目的和盲源分离的目的也是一致的: 都要提取信号抑制干扰。在传统波束形成中, 因为分离出的信号是不同方向的信号, 所以波束形成的作用除了提高 SINR 外, 还有定向、分辨率的要求。盲源分离的最终目的也是要求对任意方向都能分离出来。也就是满足了定向和分辨率的要求。

4 结 语

通过以上讨论可以看出: 宽带盲波束形成和卷积混合模型盲源分离无论从信号模型、系统框图还是从处理目的来说都是一致的。卷积混合模型盲源分离算法可以用来解决宽带盲波束形成问题。在后续的工作中我们将研究具体的, 更具通用性的卷积混合盲源分离算法, 以应用到宽带盲波束形成中。

参考文献:

- [1] Alle-Jan Vander Veen. Algebraic method for deterministic blind beamforming[J]. Proceeding of the IEEE, 1998, 86(10): 1987-2008.
- [2] Stephan V. Shell, William A. Gardner. Blind adaptive spatiotemporal filtering for wide-band cyclostationary signals [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1993, 41(5): 1961-1964.
- [3] C. B. Papadias, A. J. Paulraj. A constant modulus algorithm for multiuser signal separation in presence of delay spread using antenna arrays[J]. IEEE Signal Processing Letter, 1997, 4(6): 178-181.
- [4] Kung Yao. Blind beamforming on a randomly distributed sensor array system[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998, 16(8): 1555-1567.
- [5] Lambert R. H. Multichannel blind deconvolution: FIR Matrix Algebra and Separation of Multipath Mixture[D]. Ph. D. dissertation, University of Southern California, 1996. 8-9.
- [6] Barry D. Van Veen, Kevin M. Buckley. Beamforming: A versatile approach to spatial filtering [J]. IEEE ASSP Magazine, 1988: 4-24.

(上接第 36 页)

$L_r = \lambda$ 时, 这种改善最大, 采样间距增大值等于 $\lambda/2$; 随着 L_r 的增大, 改善越来越小。

6 结 论

本文提出了不管 λ 与 L_r 的关系如何, 在合成孔径声呐成像的相关合成算法中, 以 $L_r/2$ 为采样间距不会产生伪目标。并且进一步给出了不出现伪目标时 L_r 与 D_{pulse} 应满足的关系, 放宽了采样要求, 使得成像率或者方位分辨率有所提高。并且对于以相关合成算法为基础的其它合成孔径声呐成像算法, 上述结论都应成立。

参考文献:

- [1] L. J. Cutrona. Comparison of sonar system performance achievable using synthetic aperture techniques with the performance achievable by more conventional means[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1975, 58(2): 336-348.

- [2] N. C. Yen and W. Carey. Application of synthetic aperture processing to towed array data[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1989, 86(2): 754-765.
- [3] M. P. Hayes P. T. O. Gough. Test results using a prototype synthetic aperture sonar[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1989, 86(6): 2328-2333.
- [4] K. D. Rolt H. Schmidt. Azimuthal ambiguities in synthetic aperture sonar and synthetic aperture radar imagery[J]. IEEE J. of Oceanic Engineering, 1992, 17(1): 73-79.
- [5] V. S. Riyait, M. A. Lawlor, A. E. Adams, O. R. Hinton, B. S. Sharif. Comparison of the mapping resolution of the ACID synthetic aperture sonar with existing sidescan systems[A]. BreSt: Proceedings of IEEE Oceans'94 Conf. [C], 1994. III: 559-564.
- [6] M. A. Lawlor, A. E. Adams, O. R. Hinton, V. S. Riyait, B. Sharif. Methods for increasing the azimuth resolution and mapping rate of a synthetic aperture sonar[A]. BreSt: Proceedings of IEEE Oceans'94 Conf [C], 1994. III: 565-570.
- [7] Zaiqing Meng. A study on a synthetic aperture sonar[D]. Loughborough University of Technology: Ph. D thesis, 1995. 70-75.