

基于 SRV-CLS 的稳健可控频率不变波束形成

陈苏婷^{1,2}, 张伟¹

(1. 南京信息工程大学江苏省气象探测与信息处理重点实验室, 江苏 南京 210044;
2. 大气环境与装备技术协同创新中心, 江苏 南京 210044)

摘要: 频率不变波束形成器在宽带阵列信号处理中有着十分重要的应用。经典的频率不变波束形成器的设计方法没有考虑实际情况中麦克风通道间存在的失配误差, 导致波束形成器在实际应用中的频率不变性能变差。为了解决该问题, 提出一种基于 SRV-CLS 的稳健可控频率不变波束形成器的设计方法。该方法将基于 SRV-CLS 的频率不变波束形成器设计方法与宽带波束形成稳健算法的思想相结合, 将麦克风特性的统计信息作为稳健因子加入代价函数中, 有效克服了因麦克风通道间存在失配误差而引起的波束形成器性能变差, 保证了在波束形成器在工作频带内的频率不变性良好, 并且适用于任意阵列结构和具有任意主瓣形状的宽带波束形成器设计。

关键词: 波束形成; 频率不变; 稳健性; 约束最小二乘

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 08-1898-06
DOI: 10.16182/j.cnki.joss.2016.08.027

Robust Steerable Frequency Invariant Beamformer Design Based on SRV-CLS

Chen Suting^{1,2}, Zhang Wei¹

(1. Jiangsu Province Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing in Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Atmospheric Environment and Equipment Technology Synergy Innovation Center, Nanjing 210044, China)

Abstract: The frequency invariant beamformer (FIB) has important applications in wideband array signal processing. Conventional FIB design approaches are usually proposed without considering the mismatches in microphone array characteristic, which leads to the performance of the FIBs degrading in practical applications. Therefore, a robust steerable frequency invariant beamformer design approach based on spatial response variation constrained least squares (SRV-CLS) was proposed. It combined the SRV-CLS FIB design approach with classical robust beamforming algorithm, and added the microphone characteristics as robust factor in the cost function. The proposed approach could work well in the presence of microphone mismatches, ensured the frequency invariant of the beamformers in the operating band, and is applicable to arbitrary main lobe width and array geometries.

Keywords: beamforming; frequency invariance; robustness; constrained least squares

引言

波束形成是阵列信号处理的重要组成部分, 已

经广泛应用于雷达、声呐、无线通信等领域^[1]。波束形成器是一种空间滤波器, 其主要功能是对特定方向的有用信号形成波束, 同时抑制其他方向的干扰信号和噪声^[2-3]。传统的波束形成器主要是针对窄带信号设计的, 当宽带信号通过该基阵时, 不同频率所形成的空间响应是不一样的, 容易造成信号畸变^[4]。因此, 近年来越来越多的研究投向了基于麦克风阵列的频率不变波束形成器^[5-9](Frequency



收稿日期: 2014-02-25 修回日期: 2015-04-01;
基金项目: 中国博士后科学基金(2011M500940), 中国博士后特别资助基金(2012T50510), 六大人才高峰资助(2013-DZXX-020), 江苏省高校自然科学基金重大基础研究(12KJA510001);
作者简介: 陈苏婷(1980-), 女, 江苏南京, 博士, 副教授, 研究方向为信号处理。

http: www.china-simulation.com

• 1898 •

invariant beamformer, FIB)。FIB 的空间响应具有频率不变性, 可对不同频率的输入信号可形成相同的空间响应, 使信号无失真的通过。目前 FIB 的设计方法主要有基于凸优化的方法^[5-6]、约束最小二乘的方法^[7-8]、基于特殊阵列结构的方法^[9]等。但上述方法均在阵列中各麦克风之间具有良好通道一致性的理想模型下提出, 而实际模型中, 麦克风之间通常存在通道不一致的问题, 即通道间存在失配误差, 包括麦克风幅度、相位响应的误差等^[10]。在理想模型下设计的 FIB 没有考虑到麦克风通道间存在的失配误差, 因而稳健性差, 无法保持空间响应的频率不变性, 不满足设计要求^[10]。现有的稳健麦克风阵列波束形成方法^[10-11], 需要预先设定一个期望响应值, 当该期望响应值设定不合适时, 频率不变性受其影响将变差; 并且现有的稳健设计方法不能保证主瓣形状的可控性, 即主瓣不能设计为任意形状, 因此在实际中的应用价值有所下降。

为了解决上述问题, 本文将麦克风特性的统计信息作为稳健因子加入空间响应偏差约束最小二乘 (spatial response variation constrained least squares, SRV-CLS) 的 FIB 设计方法中, 提出基于 SRV-CLS 稳健可控 FIB 的设计方法, 该方法提高波束形成系统的稳健性, 克服了麦克风通道间存在失配误差时 FIB 频率不变性变差的缺点, 适用于具有任意主瓣形状的宽带波束形成器设计, 并且对阵列的结构没有限制, 适用于任意几何结构的麦克风阵列, 在实际工作环境中性能稳定。

1 阵列的数学模型

考虑由 N 个相同的全向性麦克风组成的均匀线阵 (不失一般性, 本文的方法可适用于任意结构的阵列), 接收位于远场范围的宽带信号, 声源入射方向与线阵之间的夹角为 θ 。采用归一化的角频率 $\Omega = f / f_s$, 其中 f 为信号频率, f_s 为信号采样频率。如图 1 所示, 每个麦克风阵元后接一个 K 阶的 FIR 滤波器, w_n ($n=1, \dots, N$) 为第 n 个麦克风对应 FIR 滤波器的权向量, 波束形成器的权向量为

$$w = [w_0^T, \dots, w_{N-1}^T]^T \quad (1)$$

对 N 个通道求和, 得到波束形成器的空间响应为

$$P(\Omega, \theta) = w^T g(\Omega, \theta) \quad (2)$$

式中: $g(\Omega, \theta)$ 为理想模型下的麦克风阵列导向矢量, 表示为

$$g(\Omega, \theta) = \begin{bmatrix} e(\Omega) \\ e(\Omega)e^{-j\mu\Omega\cos\theta} \\ \vdots \\ e(\Omega)e^{-j(N-1)\mu\Omega\cos\theta} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:

$$e(\Omega) = [1, e^{-j\Omega}, \dots, e^{-j(K-1)\Omega}]^T \quad (4)$$

$$\mu = \frac{d}{c} f_s \quad (5)$$

式中: d 为阵元间距; c 为入射波的传播速度。

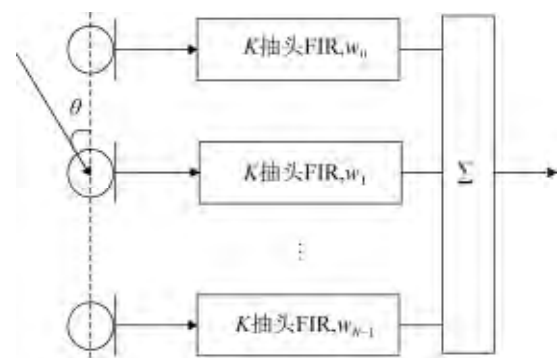


图 1 有 N 个阵元的均匀线性麦克风阵列

以上为理想情况下的阵列模型, 下面介绍实际中麦克风通道间存在失配误差的阵列数学模型。记

$$A_n(\Omega, \theta) = a_n(\Omega, \theta)e^{-j\varphi_n(\Omega, \theta)} \quad (6)$$

式中: $A_n(\Omega, \theta)$ 为第 n 个 ($n=1, 2, \dots, N$) 麦克风的特性, $a_n(\Omega, \theta)$ 和 $\varphi_n(\Omega, \theta)$ 分别表示其幅度和相位特性。麦克风通道间存在失配误差情况下的阵列导向矢量为

$$\bar{g}(\Omega, \theta) = A(\Omega, \theta) \cdot g(\Omega, \theta) \quad (7)$$

式中:

$$A(\Omega, \theta) = I_K \otimes \text{diag}[A_0(\Omega, \theta), \dots, A_{N-1}(\Omega, \theta)] \quad (8)$$

式中: $A(\Omega, \theta)$ 为包含麦克风特性的矩阵; I_K 为 $K \times K$ 阶单位矩阵; $\text{diag}[\cdot]$ 为对角矩阵。

2 基于 SRV-CLS 的 FIB 设计方法

为了与本文所提出的设计方法进行对比,本节首先介绍基于 SRV-CLS 的 FIB 设计方法。定义阵列的空间响应偏差(SRV)为在频率不变的范围内每个采样点上形成的空间响应与参考频率上每个采样点形成的空间响应之差的平方和^[12],即

$$SRV_{CLS} = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{L-1} |w^T g(\Omega_m, \theta_l) - w^T g(\Omega_r, \theta_l)|^2 \quad (9)$$

式中: M 和 L 分别是频率不变范围内的频率和角度的采样点个数; Ω_r 为设定的参考频率。

理想模型下基于 SRV-CLS 的 FIB 设计方法代价函数定义^[12]为

$$J_{CLS} = SRV + \beta \sum_{\theta_l \in \Theta_s} |w^T g(\Omega_r, \theta_l)|^2 \quad (10)$$

式中: β 为旁瓣衰减的参数; Θ_s 为旁瓣区域。

基于 SRV-CLS 的 FIB 设计方法的约束条件为

$$\min_w J_{CLS}(w) \quad \text{s.t. } w^T g(\Omega_r, \theta_r) = 1 \quad (11)$$

该约束是保证参考频率 Ω_r , 参考方向 θ_r 上的波束响应为 1, 为了方便计算, 可将式(11)进一步简化为

$$\min_w J_{CLS} = w^T Q_{CLS} w \quad \text{s.t. } F^T w = h \quad (12)$$

式中 $F = [g_R(\Omega_r, \theta_r), g_I(\Omega_r, \theta_r)]$, $g_R(\Omega_r, \theta_r)$ 和 $g_I(\Omega_r, \theta_r)$ 分别为 $g(\Omega_r, \theta_r)$ 的实部和虚部, $h = [1, 0]^T$, 且

$$Q_{CLS} = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{L-1} \text{Re}\{[g(\Omega_m, \theta_l) - g(\Omega_r, \theta_l)] [g(\Omega_m, \theta_l) - g(\Omega_r, \theta_l)]^H\} + \beta \sum_{\theta_l \in \Theta_s} G_R(\Omega_r, \theta_l) \quad (13)$$

式中: $\text{Re}\{\cdot\}$ 表示取实部; $(\cdot)^H$ 表示取复矩阵的共轭转置, 并且

$$G_R(\Omega_r, \theta_l) = \text{Re}\{g(\Omega_r, \theta_l) g(\Omega_r, \theta_l)^H\} \quad (14)$$

利用拉格朗日乘子法对式(12)进行求解, 即可得 FIB 的最优权向量为

$$w = Q_{CLS}^{-1} F (F^T Q_{CLS}^{-1} F)^{-1} h \quad (15)$$

3 基于 SRV-CLS 稳健可控 FIB 设计方法

在实际模型中, 麦克风阵列的通道之间通常存在失配的情况, 即麦克风的幅度和相位特性由于受到温度、湿度、振动及工作时间、生产工艺等影响会随着时间的变化而发生改变^[10-11]。

因此本文作如下假设: 麦克风的响应特性 $A = ae^{-j\varphi}$ 为随时间变化的随机变量, 且其概率密度函数 $f_A(A)$ 不依赖于工作频率 Ω 和角度 θ ; 麦克风的幅度特性 a 和相位特性 φ 也是随时间变化的随机变量并且相互统计独立, 记 $f_a(a)$ 和 $f_v(\varphi)$ 分别为其概率密度函数; 所有麦克风的统计特性都相同。数学上, 麦克风的特性 A 的概率密度函数可以用其幅度响应 a 和相位响应 φ 的联合概率密度函数来表示, 即

$$f_A(A) = f_{a,v}(a, \varphi) = f_a(a) f_v(\varphi) \quad (16)$$

为了提高基于 SRV-CLS 的 FIB 设计方法的稳健性, 本文在其基础上加入稳健波束形成算法的思想^[11], 得到改进后的空间响应偏差为

$$SRV_{tot} = \int_{A_0} \cdots \int_{A_{N-1}} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{L-1} |w^T \bar{g}(\Omega_m, \theta_l) - w^T \bar{g}(\Omega_r, \theta_l)|^2 \times f_A(A_0) \cdots f_A(A_{N-1}) dA_0 \cdots dA_{N-1} \quad (17)$$

式中, $A_n (n=1, 2, \dots, N)$ 为第 n 个麦克风的响应特性, $f_A(A_n)$ 对其对应的概率密度函数。

基于 SRV-CLS 稳健可控 FIB 设计方法的代价函数表示为

$$J_{tot} = \int_{A_0} \cdots \int_{A_{M-1}} \{SRV_{tot} + \beta \sum_{\theta_l \in \Theta_s} |w^T \bar{g}(\Omega_r, \theta_l)|^2\} \times f_A(A_0) \cdots f_A(A_{N-1}) dA_0 \cdots dA_{N-1} \quad (18)$$

因此, SRV-CLS 稳健可控 FIB 的约束条件为

$$\min_w J_{tot}(w) \quad \text{s.t. } w^T \bar{g}_m(\Omega_r, \theta_r) = 1 \quad (19)$$

式中

$$\bar{g}_m(\Omega_r, \theta_r) = \int_{A_0} \cdots \int_{A_{N-1}} \bar{g}(\Omega_r, \theta_r) f_A(A_0) \cdots f_A(A_{N-1}) dA_0 \cdots dA_{N-1} \quad (20)$$

式(19)可进一步简化为

$$\min_{\mathbf{w}} \mathbf{J}_{tot} = \mathbf{w}^T \mathbf{Q}_{tot} \mathbf{w} \quad \text{s.t. } \mathbf{F}_m^T \mathbf{w} = \mathbf{h} \quad (21)$$

式中:

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_{tot} = & \int_{A_0} \cdots \int_{A_{N-1}} \left\{ \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{L-1} \text{Re} \{ [\bar{\mathbf{g}}(\Omega_m, \theta_l) - \bar{\mathbf{g}}(\Omega_r, \theta_l)] \right. \\ & \left. [\bar{\mathbf{g}}(\Omega_m, \theta_l) - \bar{\mathbf{g}}(\Omega_r, \theta_l)]^H \right\} + \beta \sum_{\theta_l \in \Theta_s} \bar{\mathbf{G}}_R(\Omega_r, \theta_l) \times \\ & f_A(A_0) \cdots f_A(A_{N-1}) dA_0 \cdots dA_{N-1} \end{aligned} \quad (22)$$

式中 $\bar{\mathbf{G}}_R(\Omega_r, \theta_L) = \text{Re} \{ \bar{\mathbf{g}}(\Omega_r, \theta_l) \bar{\mathbf{g}}(\Omega_r, \theta_l)^H \}$, 并且

$$\mathbf{F}_m = \begin{bmatrix} \mu_a \mu_\varphi^c \mathbf{g}_R^T(\Omega_r, \theta_r) + \mu_a \mu_\varphi^s \mathbf{g}_I^T(\Omega_r, \theta_r) \\ \mu_a \mu_\varphi^c \mathbf{g}_I^T(\Omega_r, \theta_r) - \mu_a \mu_\varphi^s \mathbf{g}_R^T(\Omega_r, \theta_r) \end{bmatrix}^T \quad (23)$$

式中,

$$\mu_a = \int_a a f_a(a) da \quad (24)$$

$$\mu_\varphi^c = \int_v \cos \varphi f_v(\varphi) d\varphi \quad (25)$$

$$\mu_\varphi^s = \int_v \sin \varphi f_v(\varphi) d\varphi \quad (26)$$

经计算可得 FIB 的最优权向量为

$$\mathbf{w} = \mathbf{Q}_{tot}^{-1} \mathbf{F}_m (\mathbf{F}_m^T \mathbf{Q}_{tot}^{-1} \mathbf{F}_m)^{-1} \mathbf{h} \quad (27)$$

式(18)与式(10)相比可以看出,将式(10)中的代价函数以每个麦克风特性的统计信息作为权值,进行加权求和,即得到本文所提出设计方法的代价函数。可见,本文的设计方法中,充分考虑了麦克风特性中存在的失配误差,因此提高了基于 SRV-CLS 的 FIB 设计方法的稳健性。

4 仿真实验与分析

本文通过几组仿真实例验证所提出的稳健算法的有效性。若无特殊说明,仿真条件均为:由相同的全向性麦克风组成的均匀线阵,阵元数 $N=16$;每个阵元后接 FIR 滤波器的阶数 $K=18$;信号采样频率 $f_s=8000$ Hz;最大归一化频率为 π ,阵元间距为 4.25 cm,旁瓣衰减系数 $\beta=0.5$,参考频率 $\Omega_r=0.6\pi$,期望信号的频率范围即保持频率不变的频率宽度为 $[0.4\pi, 0.9\pi]$ 。设定参考方向 $\theta_r=90^\circ$ 时,波束形成器的旁瓣区域定义为 $\Theta_s=[0^\circ, 75^\circ] \cup [105^\circ, 180^\circ]$;设定参考方向 $\theta_r=60^\circ$

时,波束形成器的旁瓣区域定义为 $\Theta_s=[0^\circ, 45^\circ] \cup [75^\circ, 180^\circ]$ 。假设麦克风的幅度响应和相位响应分别服从 $[0.9, 1.1]$ 和 $[-10^\circ, 10^\circ]$ 上的均匀分布。下面仿真给出的结果均是 100 次独立随机试验的统计结果。

4.1 基于 SRV-CLS 的 FIB 设计实例

为了与本文的设计方法进行对比,本节首先讨论基于 SRV-CLS 的 FIB 设计方法的性能。这里设置期望信号方向为 90° 。图 2 为实际模型下,即阵列中的麦克风通道之间存在失配误差时基于 SRV-CLS 的 FIB 设计方法得到的空间响应。图 2 表明,该方法得到的空间响应在大部分到达角度上均发生了信号失真,只有在波束对准其参考方向时信号才能无失真的通过。显然,因受到麦克风通道间失配误差的影响,该设计方法的性能严重下降,当信号频率低于 0.5π 时完全失效。这是因为该方法的设计中没有考虑实际麦克风特性的误差,受频率的影响严重,因而在不同频率上形成的波束是不同的。因此该方法在实际模型中不满足宽带波束形成的频率不变性。

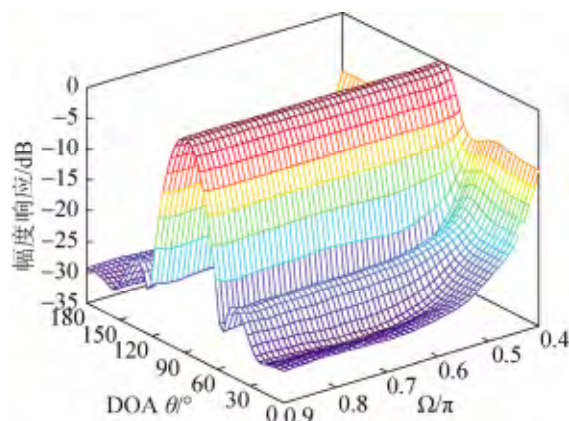


图 2 SRV-CLS 的 FIB 空间响应

4.2 基于 SRV-CLS 稳健可控 FIB 的设计实例

下面验证本文的设计方法在实际模型中的有效性。设置期望信号方向为 90° 。图 3 为实际模型下,即阵列中的麦克风通道之间存在失配误差时基于 SRV-CLS 稳健可控 FIB 的设计方法得到的空间

响应。与图 2 相比,在实际模型中,本文方法在全部到达方向上降低了信号的畸变,并且在不同频率上形成的波束基本相同。可见,本文方法改善了基于 SRV-CLS 的 FIB 设计方法因受频率影响性能变差的情况,提高了空间响应的稳健性能,保证了在整个频率范围内空间响应满足宽带波束形成的频率不变性。

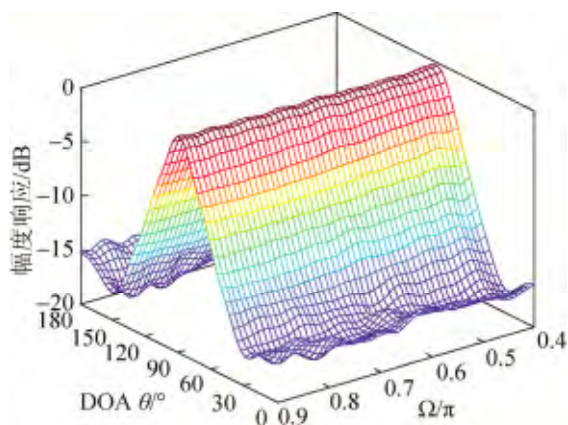


图 3 SRV-CLS 稳健可控 FIB 的空间响应

4.3 频率不变性能验证

本节设置期望信号方向为 90° 。为了更细致描述设计方法的频率不变性,这里引入波动误差的概念。波动误差定义为在设定频率不变的频带范围内,同一到达角度上不同频率所形成空间响应的最大值与最小值之比。显然,波动误差越小,波束形成器的空间响应在同一到达角度上受到频率的影响就越小,因此频率变性能就越好。

图 4 给出了实际模型中,基于 SRV-CLS 的 FIB 设计方法与本文所提出的基于 SRV-CLS 稳健可控 FIB 的设计方法所得空间响应的波动误差曲线。根据图 4 可知,在全部到达方向上,本文方法的波动误差均小于 4 dB,在期望信号方向上波动误差趋近于 0 dB,并且整个曲线的抖动不明显,这表明本文算法的频率不变性能良好;对于基于 SRV-CLS 的 FIB 设计方法,在主瓣范围内波动误差较小且曲线平稳;但随着到达方向与主瓣距离增加,波动误差明显增大,并且整个曲线抖动明显,这表明在实

际模型中,该方法不能保持良好的频率不变性;在全部到达方向上,本文方法的波动误差均小于基于 SRV-CLS 的 FIB 设计方法,即在每一个到达方向上本文方法的频率不变性都更稳定。

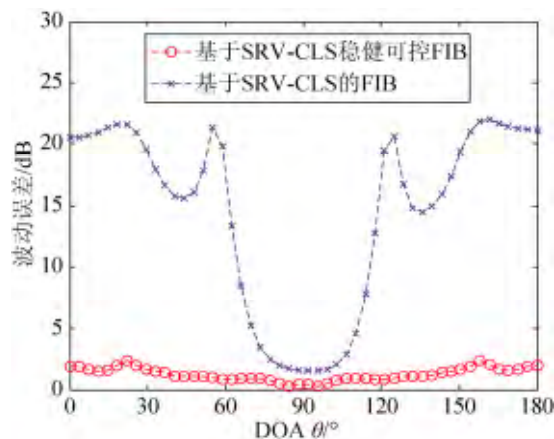


图 4 波动误差曲线

4.4 波束可控性能的验证

本节验证本文方法的波束可控性,即可以满足任意主瓣形状的设计要求。不失一般性,以期望信号方向为 60° 为例在麦克风通道间存在失配误差的实际模型下进行设计实例的验证。图 5 给出了实际模型中,本文方法在期望信号方向为 60° 得到的空间响应。从该验证结果可以看出,当期望信号不是垂直入射阵列,即非 90° 时,本文方法的空间响应在全部到达方向上均可保证频率不变性良好,主瓣宽度稳定不受频率影响。因此,本文方法可适用于任意主瓣形状的宽带波束形成器设计。

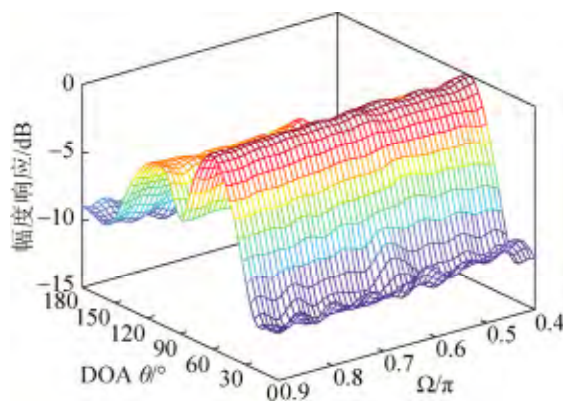


图 5 SRV-CLS 稳健可控 FIB 的空间响应

综上, 与文献中已有的 FIB 设计方法^[5-9]相比, 本文所提出的基于 SRV-CLS 稳健可控 FIB 的设计方法具有以下优点: 当存在麦克风通道失配误差时, 本文所提出方法具有良好的稳健性, 能够保持良好的空间响应的频率不变性; 本文的设计方法可以适用于具有任意主瓣形状的宽带波束形成器设计; 本文为了分析的方便, 以均匀线阵为例进行了讨论。而实际上, 本文所提出的方法对阵列的结构没有限制, 适用于任意几何结构的麦克风阵列; 在代价函数中的期望响应选择上没有采用通常的定常期望响应值, 而是利用参考频率上的空间响应作为其期望响应, 充分利用了设计自由度, 以达到较好的波束形成器响应的频率不变特性。

5 结论

由文中的分析可见, 当麦克风通道存在失配误差时, 现有的 FIB 设计方法的不能使波束响应的频率不变性能得到保证。本文提出了一种基于 SRV-CLS 稳健可控 FIB 的设计方法, 将 SRV-CLS 的 FIB 设计方法与波束形成稳健算法相结合, 能够令 FIB 在实际的工作环境下保持良好的频率不变性能。

参考文献:

- [1] 鄢社锋, 马远良. 传感器阵列波束优化设计及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 163-193.
- [2] Liu W, Weiss S. Wideband Beamforming: Concepts and Techniques [M]. Chichester, UK: Wiley, 2010: 55-58.
- [3] Nordebo S, Claesson I, Nordholm S. Weighted Chebyshev approximation for the design of broadband beamformers using quadratic programming [J]. IEEE Signal Process. Lett (S1070-9908), 1994, 1(7): 103-105.
- [4] 张小飞, 汪飞, 徐大专. 阵列信号处理的理论和应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 2-6.
- [5] Chen P, Liang Y, Hou C, et al. SRV constraint based FIB design for wideband linear array [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics (S1004-4132), 2010, 21(6): 941-947.
- [6] Duan H, Ng B P, See C M, et al. Applications of the SRV constraint in broadband pattern synthesis [J]. Signal Processing (S1751-9675), 2008, 88(4): 1035-1045.
- [7] Zhao Y, Liu W, Langley R J. Application of the least squares approach to fixed beamformer design with frequency invariant constraints [J]. IET Signal Processing (S1751-9675), 2011, 5(3): 281-291.
- [8] Zhao Y, Liu W, Langley R. A least squares approach to the design of frequency invariant beamformers [C]// The 17th European Signal Processing Conference, Glasgow, Scotland, UK: Eusipco, 2009: 844-848.
- [9] Koretz A, B Rafaely. Dolph-Chebyshev beam pattern design for spherical arrays [J]. IEEE Trans. Signal Process (S1053-587X), 2009, 57(6): 2417-2420.
- [10] Wang H, Chen H, Bao Y, et al. Robust Frequency Invariant Beamformer Design Using Variably-Weighted Constrained Least Squares [C]// Proceedings of IEEE 10th Asia Pacific Conference on Circuits and Systems. Kaohsiung, Taiwan, China. USA: IEEE, 2012: 583-586.
- [11] Doclo S, Moonen M. Design of broadband beamformers robust against gain and phase errors in the microphone array characteristics [J]. IEEE Trans. Signal Process (S1053-587X), 2003, 51(10): 2511-2526.
- [12] 陈明建, 罗景青. 基于空间响应偏差约束的最小二乘宽带波束形成 [J]. 电路与系统学报, 2013, 18(1): 84-89.