

引用格式:张伟政,杨日杰,韩建辉,等.空中声源辐射噪声信号超指向性接收基阵设计[J].电光与控制,2018,25(1):10-13,27. ZHANG W Z, YANG R J, HAN J H, et al. Design of super-directional receiving array for radiation noise signal of airborne sound source[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(1):10-13, 27.

空中声源辐射噪声信号超指向性接收基阵设计

张伟政, 杨日杰, 韩建辉, 孔晓鹏

(海军航空大学, 山东 烟台 264001)

摘要: 利用圆阵协方差矩阵的循环移位特性,基于对聚集系数的取值最优化问题,对圆阵的超指向性理论展开研究,得到了由初等函数表示的最大聚集系数、最优波束图和最优加权向量。分析了圆阵的各阶波束增益和稳健性参数随半径波长比的变化规律及其对阵列指向性的影响,给出了圆阵超指向性的一个解析且闭合的解,实现了一种特征波束的分解与合成的方法。在此基础上结合空中声源辐射噪声信号的特点,给出了针对空中声源辐射噪声设计超指向性圆阵时应遵循的4个准则,依据实测的直升机辐射噪声特性设计了一个小尺寸的超指向性接收阵列,对其性能进行了分析,通过与常规圆阵和线列阵的对比证明了其优越性。

关键词: 空中声源; 微弱信号探测; 圆阵; 超指向性; 特征波束

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2018.01.003

Design of Super-directional Receiving Array for Radiation Noise Signal of Airborne Sound Source

ZHANG Wei-zheng, YANG Ri-jie, HAN Jian-hui, KONG Xiao-peng

(Naval Aeronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: The cyclic shift characteristic of the circular array co-variance matrix was used to study the super-directivity theory of the circular array based on the optimization of the aggregation coefficient. The maximum aggregation coefficient, the optimal beam pattern and the optimal weighted vector expressed by elementary function were obtained. The beam gain and the robustness parameters of the circular array varying with the radius ratio, and their influence on the array directivity were analyzed. An analytic and closed solution of the super-directivity of the circular array was given, and a method for decomposing and synthesizing characteristic beams was realized. Based on the characteristics of the noise signal of the airborne sound source, four criteria that should be followed when designing the super-directional circular array for the noise of the airborne sound source were given. Based on the measured radiation noise characteristics of a helicopter, a small-scale, super-directional receiver array was designed, and its performance was analyzed. The superiority of it was proved by comparison with the conventional circular and linear arrays.

Key words: airborne source; weak signal detection; circular array; super-directivity; eigen beam

0 引言

放置在海水中的水听器只有通过阵列处理技术获得指向性才能确定目标的方位。近年来,面对对声源级逐年降低的潜艇噪声和空中声源水下辐射噪声等微弱信号的探测需求,被动声纳的指向性受到了越来越

强的挑战,而尽管大型被动声纳基阵空间增益更大,但是在使用、安装中仍受到诸多限制,故而对小型基阵超指向性理论的研究越来越受到学界的关注。超指向性阵列理论指出,一个小型的水听器阵列通过处理可以获得比对应的延迟-相加阵列高得多的指向性,因为显而易见的优势和利用小型水听器阵列在提高角度分辨力和信号增强上的极大潜能,以及相对而言宽带频率不变的波束带宽,此领域在最近几十年里吸引了很多学者的研究。GERSON^[1]和 BUTLER^[2]提出了 n 阶定向换能器的概念,GERSON证明了 n 阶定向声学换能器的最大聚集系数是 $(n+1)^2$;文献[3]对圆环形声

收稿日期:2017-03-14

修回日期:2017-10-26

基金项目:国家自然科学基金(61271444)

作者简介:张伟政(1993—),男,山东莱阳人,硕士,研究方向为水声信号检测、处理与融合技术。

基阵低频超增益性能进行了研究,利用对各水听器噪声的空间预白和匹配处理,最大限度地解除了各路噪声之间的相关性,削弱了各路噪声的功率,净化了信号,实现了优化处理;文献[4]对均匀圆阵的超指向性进行了研究,给出了圆阵超指向性的一个解析闭合解,同时利用该理论对实验数据进行了处理。但这些研究主要聚焦在理论上,鲜有涉及超指向性基阵的应用。本文在对圆阵的超指向性理论研究的基础上,结合空中声源辐射噪声信号的特点,依据实测直升机噪声数据进行超指向性接收基阵设计,并对设计超指向性圆阵应遵循的准则进行了归纳总结。

1 圆阵的超指向性理论研究

假设一个理想的圆阵,半径为 a ,由 M 个水听器 H_0, H_1, \dots, H_{M-1} 组成, M 是偶数,如图1所示,输入信号是一个平面波。

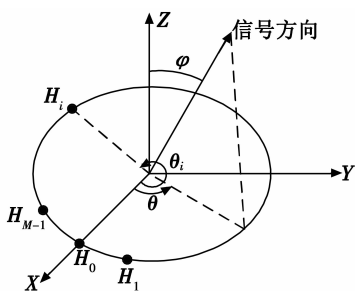


图1 圆阵的坐标

Fig. 1 The coordinates of the circular array

图中, $\theta_i = 0, \beta, 2\beta, \dots, (M-1)\beta$ 表示水听器相对 X 轴的方位角, β 表示相邻阵元之间的夹角。

对于从方位角 θ 和仰角 φ 到达的平面波,因第 i 个水听器相对原点位置导致的信号传播距离差为(正的较原点提前,负的较原点滞后)

$$\Delta d_i = a \sin \varphi \cos(i\beta - \theta) \quad (1)$$

信号方向矢量是

$$\mathbf{s}(\varphi, \theta) = [\exp(jk\Delta d_0) \quad \dots \quad \exp(jk\Delta d_{M-1})]^T \quad (2)$$

用 \mathbf{w} 表示波束形成的加权向量,波束图可表示为

$$B(\varphi, \theta) = \mathbf{w}^T(\varphi_0, \theta_0) \mathbf{s}(\varphi, \theta) \quad (3)$$

式中, (φ_0, θ_0) 代表预置的波束方向。进一步,这一波束图产生的聚集系数 F 为

$$F = \frac{1}{\frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi |B(\varphi, \theta)|^2 \sin \varphi d\varphi d\theta} \quad (4)$$

通过调整 \mathbf{w} 得到一个可产生最大指向性 F_{\max} 的波束图。

对于一个水听器阵列而言,阵列增益是^[5]

$$Q = \frac{R_{S,N,o}}{R_{S,N,i}} = \frac{\mathbf{w}^H \mathbf{s}^*(\varphi_0, \theta_0) \mathbf{w}}{\mathbf{w}^H \mathbf{R}_{nn} \mathbf{w}} \quad (5)$$

式中, \mathbf{R}_{nn} 为接收到的噪声数据矢量的协方差矩阵。

在各向同性噪声场中,阵列增益等同于阵列的 F 。最大阵列增益的最优化权重为

$$\mathbf{w}_{\text{opt}} = \boldsymbol{\rho}_{nn}^{-1} \mathbf{s}^*(\varphi_0, \theta_0) \quad (6)$$

式中, $\boldsymbol{\rho}_{nn}$ 是归一化后的 \mathbf{R}_{nn} 。最大阵列增益为

$$Q_{\max} = \mathbf{s}^T(\varphi_0, \theta_0) \boldsymbol{\rho}_{nn}^{-1} \mathbf{s}^*(\varphi_0, \theta_0) \quad (7)$$

在各向同性噪声场中,圆阵的协方差矩阵为

$$\boldsymbol{\rho}_{nn} = \begin{bmatrix} \rho_0 & \rho_1 & \dots & \rho_{M-1} \\ \rho_{M-1} & \rho_0 & \dots & \rho_{M-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_1 & \rho_2 & \dots & \rho_0 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$\boldsymbol{\rho}_{nn}$ 是一个循环矩阵,其中,第 $i+1$ 行是第 i 行的右移,并且把最后一个元素转移到第一个元素处,这种矩阵拥有所谓的循环特性,因此可以进行特征分解为

$$\boldsymbol{\rho}_{nn} = \sum_{m=0}^{M-1} \lambda_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m^T \quad (9)$$

式中: \mathbf{v}_m 为特征向量,即

$$\mathbf{v}_m = M^{-1/2} [1 \quad \dots \quad \exp\{j(M-1)m\beta\}]^T; \quad (10)$$

λ_m 为特征值,即

$$\lambda_m = \sum_{i=0}^{M-1} \rho_i \exp(jmi\beta) \quad (11)$$

式中, ρ_i 为一个波长内的阵列间距函数。从而可得最优加权向量、 F_{\max} 和最优波束图分别为

$$\mathbf{w}_{\text{opt}} = \left[\sum_{m=0}^{M-1} \left(\frac{1}{\lambda_m} \right) \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m^T \right] \cdot \mathbf{s}^*(\varphi_0, \theta_0) \quad (12)$$

$$F_{\max} = \sum_{m=0}^{M-1} \left\{ \left(\frac{1}{\lambda_m} \right) (\mathbf{s}(\varphi_0, \theta_0)^T \mathbf{v}_m^*) \times (\mathbf{v}_m^T \mathbf{s}^*(\varphi_0, \theta_0)) \right\} \quad (13)$$

$$B(\varphi, \theta) |_{\varphi_0, \theta_0} = \sum_{m=0}^{M-1} \left(\frac{1}{\lambda_m} \right) \mathbf{s}(\varphi_0, \theta_0)^H \cdot \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m^H \cdot \mathbf{s}(\varphi, \theta) \quad (14)$$

上述表达式精确地给出了 F_{\max} 和最优波束图可被分解为一系列的特征波束。

从式(10)可知

$$\mathbf{v}_m = \mathbf{v}_{M-m}^* \quad (15)$$

由于矩阵 $\boldsymbol{\rho}_{nn}$ 是实值并且对称的,它拥有实特征值 λ_m 。由式(15)可知

$$\lambda_m = \lambda_{M-m} \quad (16)$$

式中, $m = 0, 1, \dots, M-1$ 。

式(13)中,依照共轭对称特性,第 i 阶项与等式右边的第 $M-m$ 阶项相等,其中 $m = 1, 2, \dots, M/2 - 1$ 。由此, F_{\max} 被分解为特征波束的增益

$$F_{\max} = Q_0 + Q_1 + \dots + Q_m + \dots + Q_{M/2} \quad (17)$$

式中

$$Q_m = a_m |\mathbf{v}_m^T \mathbf{s}^*(\varphi_0, \theta_0)|^2 / \lambda_m \quad (18)$$

式(14)中,由共轭对称特性,即第 m 阶项与等式

右边的第 $M - m$ 阶项共轭,所以第 m 阶项和第 $M - m$ 阶项的和是实数,那么当 $m = 0, M/2$ 时式右边的项也是实数。因此,最优波束图可以被分解为特征波束,即

$$B(\varphi, \theta) \Big|_{\varphi_0, \theta_0} = \sum_{m=0}^{M/2} b_{\text{eigen}}(m, \varphi, \theta) \quad (19)$$

$$b_{\text{eigen}}(m, \varphi, \theta) = a_m \text{Re} \{ h_m(\varphi_0, \theta_0) \cdot y_m(\varphi, \theta) \} \quad (20)$$

式中:

$$h_m(\varphi_0, \theta_0) = \left(\frac{1}{\lambda_m} \right) M^{-1/2} \sum_{i=0}^{M-1} s_i^*(\varphi_0, \theta_0) \cdot \exp(jmi\beta) \quad (21)$$

$$y_m(\varphi, \theta) = M^{-1/2} \sum_{i=0}^{M-1} s_i(\varphi, \theta) \cdot \exp(-jmi\beta) \quad (22)$$

$$a_m = \begin{cases} 1 & m=0, \frac{M}{2} \\ 2 & m=1, 2, \dots, \frac{M}{2}-1 \end{cases} \quad (23)$$

当 F_{max} 和最优波束图被分解为特征波束以后,对应的式(12)所示的特征波束的最优权重可以通过第 m 阶和第 $M - m$ 阶项的求和来得到。当 $m = 0, M/2$ 时,特征波束的最优权重是等式右边的单项。

由式(17)~式(23)可以看出,每个特征波束的特征值 λ_m 位于特征波束和特征波束增益的表达式的分母上。当 λ_m 越小时, $1/\lambda_m$ 越大,而特征波束 $b_{\text{eigen}}(m, \varphi, \theta)$ 和特征波束的增益 Q_m 将会变得对信号方向向量 $s(\varphi, \theta)$ 、控制方向向量 $s(\varphi_0, \theta_0)$ 以及协方差矩阵 $\boldsymbol{\rho}_{nn}$ 的误差更为敏感。因此, λ_m 可以被看作为每个阵列波束图的一个稳健的参数。从前述的超指向性表达式中可知,圆阵的最优波束图具有阵列的 F_{max} 是特征波束增益的和,以及最优波束图是特征波束的和的特征。

2 空中声源辐射噪声的超指向性接收基阵设计

直升机信号由窄带线谱簇和宽带连续谱共同构成,具有非常明显的线谱和谐波特性的。我国直升机辐射噪声频谱的基频多分布于几十赫兹左右,在低频段几十赫兹到一千赫兹之间,信号都可能存在线谱分量,而且往往在数百赫兹处存在一条最强线谱。随着频率继续增大,线谱信号逐渐淹没在宽带连续谱噪声中,宽带连续谱噪声随着频率增大也逐渐降低。根据直升机噪声谱的特征,所设计的超指向性阵列应该在优先保证对强线谱分量接收性能的同时,兼顾对宽带连续谱分量的接收性能。

针对空中声源辐射噪声设计超指向性基阵时应遵循以下准则:1) 强线谱分量的 a/λ 应大于第 8 阶特征波束的稳定点,小于衰减点;2) 最高频率的 a/λ 应小于衰减点;3) 最低频率的 a/λ 应大于第 4 阶特征波束的稳定点;4) 尽量保证稳健性参数取得较大值。

对阵元数为 16 的圆形水听器阵列计算其第 8 阶特征波束的稳定点为 0.16,衰减点为 0.5,第 4 阶特征波束的稳定点为 0.009。针对某直升机辐射噪声来看,强线谱分量 f_s 位于 675 Hz 左右,将其半径波长比记为 a/λ_s ,由准则 1) 可知 a/λ_s 应满足

$$0.16 < \frac{a}{\lambda_s} < 0.5 \quad (24)$$

某直升机辐射噪声的线谱最高频率为 $f_{\text{max}} = 1000$ Hz,将其半径波长比记为 a/λ_{max} ,由准则 2) 可知 a/λ_{max} 应满足

$$\frac{a}{\lambda_{\text{max}}} < 0.5 \quad (25)$$

某直升机辐射噪声的线谱最低频率为 $f_{\text{min}} = 22$ Hz,将其半径波长比记为 a/λ_{min} ,由准则 3) 可知 a/λ_{min} 应满足

$$0.009 < \frac{a}{\lambda_{\text{min}}} \quad (26)$$

不难推导出 λ_s 和 λ_{max} 以及 λ_s 和 λ_{min} 之间存在如下关系

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{f_s}{f_{\text{max}}} \cdot \lambda_s \quad (27)$$

$$\lambda_{\text{min}} = \frac{f_s}{f_{\text{min}}} \cdot \lambda_s \quad (28)$$

联立式(24)~式(28)可得

$$0.2761 < \frac{a}{\lambda_s} < 0.3375 \quad (29)$$

在此区间内取一个便于计算的值 $a/\lambda_s = 0.3$,则不难推导出 $a/\lambda_{\text{max}} = 0.4444$, $a/\lambda_{\text{min}} = 0.0098$ 。第 8 阶特征波束在这 3 点的稳健性参数分别为 -87 dB, -61 dB 和 -153 dB,尽管在 $f_{\text{min}} = 22$ Hz 附近稳健性较差,但考虑到整个频带的稳定性和指向性,这仍然是一个很好的结果^[6]。

假设水中声速为 $c = 1500$ m/s,则强线谱分量 $f_s = 675$ Hz 的信号波长约为 $\lambda_s = c/f_s = 2.2222$ m,由强线谱的半径波长比 $a/\lambda_s = 0.3$ 可知,所设计的超指向性圆阵参数应为:圆阵半径 $a = 0.6667$ m,阵元数 $M = 16$,阵元弧间距 $\Delta L = 0.2618$ m。

3 空中声源辐射噪声信号超指向性接收基阵性能分析

3.1 基本参数计算

当设计的 16 元超指向性圆阵对强线谱分量 $f_s = 675$ Hz 的信号进行接收时,通过特征波束合成可以得到其最优水平合成波束图和最优垂直合成波束图如图 2 所示,该圆阵的最优波束参数为:水平波束宽度 $\Phi = 16^\circ$,垂直波束宽度 $\Psi = 44^\circ$, $F_{\text{max}} = 36.83$,阵列增益为

$Q_{dB} = 21.33 \text{ dB}$ 。

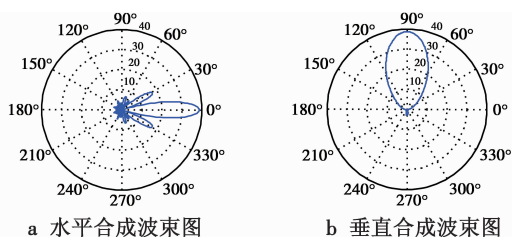


图2 16元圆阵的最优合成波束图
Fig.2 Optimum synthetic beam map of
16-element circular array

3.2 与线列阵性能比较

设存在一个阵元数和阵元间距与前述圆阵相同的线列阵,阵元间距 d 为0.2601 m,阵列长度为3.9018 m,当工作频率 f 为675 Hz时,阵元间距与波长比 d/λ_s 为0.1171。取预置波束指向为水平方位角 $\theta_0 = 0^\circ$,仰角 $\varphi_0 = 90^\circ$,利用上述的理论进行计算,可以画出此线列阵的水平波束如图3a所示。在垂直方向上,对线列阵而言,无论信号以何种仰角入射,只要水平方位角相同,信号传播到各个阵元的距离差都是相同的^[7-8],所以此线列阵垂直方向上的指向性函数恒为1,其垂直波束图如图3b所示^[9]。由图可知,此线列阵的波束参数为:水平波束宽度 $\Phi = 27^\circ$,并且不存在垂直波束宽度。

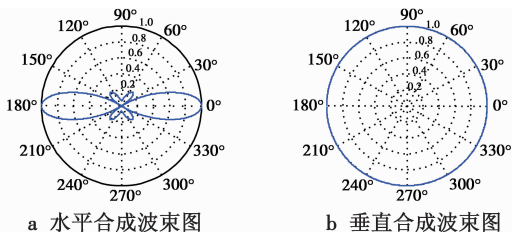


图3 16元线列阵的波束图
Fig.3 Beam map of 16-element linear array

3.3 与常规圆阵性能比较

把前文中设计的超指向性圆阵当作一个常规圆阵看待,在工作频率 f 同为675 Hz的前提下,取预置波束指向为水平方位角 $\theta_0 = 0^\circ$,仰角 $\varphi_0 = 90^\circ$,利用上述的理论对圆阵的性能进行计算,可以画出此圆阵的水平波束图如图4a所示,垂直波束图如图4b所示^[10]。由图可知,此常规圆阵的波束参数为:水平波束宽度 $\Phi = 70^\circ$,垂直波束宽度 $\Psi = 132^\circ$ 。

对以上仿真结果进行分析可以看出,所设计的超指向性圆阵具有以下特点:

1) 超指向性圆阵与线列阵相比,其水平波束宽度比线列阵小,指向性图更尖锐,具有更好的指向性,而且可以在 360° 方位角下形成一致的波束,而线列阵只能在端射方向形成波束,但其旁瓣级比线列阵的高一些,可能会影响系统的空间增益;

2) 超指向性圆阵与常规圆阵相比,其水平方向和垂直方向的波束宽度明显比常规圆阵的小,指向性明显优于常规圆阵,从而可以明显提高系统的定向精度、目标分辨率和空间增益。

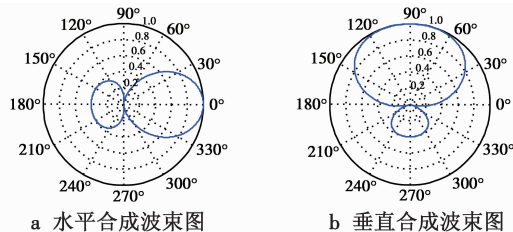


图4 16元圆阵的波束图
Fig.4 Beam map of 16-element circular array

4 结束语

本文利用圆形传感器阵列协方差矩阵的循环移位特性,给出了由初等函数表示的圆形传感器阵列超指向性的一个最优解,将其应用于计算最优波束形成向量、最优波束方向图以及相应的特征波束和指向性因子,得到关于圆阵超指向性的几个重要结论:1) 合成的最优波束图是 $\frac{M}{2} + 1$ 个特征波束的和;2) 整体最优聚集系数是特征波束增益的和;3) 特征波束的稳健性随模式阶数的增加而降低。分析了超指向性圆阵性能随半径波长比 a/λ 的变化规律,给出了为空中声源辐射噪声设计超指向性基阵时应遵循的准则。在此基础上针对某直升机辐射噪声设计了超指向性接收基阵,并对其性能进行了分析,通过与常规圆阵和线列阵的对比证明了其优越性。

参考文献

- [1] GERZON M A. Maximum directivity factor of n th-order transducers[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1976, 60(1):278-280.
- [2] BUTLER J L, EHRLICH S L. Superdirective spherical radiator[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1977, 61(6):1427-1431.
- [3] 鄢社峰,马远良. 圆环形声基阵低频超增益性能研究[J]. 西北工业大学学报,2002,20(1):79-82.
- [4] MA Y L, YANG Y X, HE Z Y, et al. Theoretical and practical solutions for high-order superdirectivity of circular sensor arrays[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(1):203-209.
- [5] 鄢社峰,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.

(下转第27页)

融合方法。此方法在低频子图像采用一种基于区域改进的加权平均法,高频子图像的最高层采用区域标准差选大法进行图像融合,其他层通过计算区域交叉熵和改进的粒子群优化算法进行融合。该方法大大丰富了源图像的目标信息与场景纹理信息,有效改善了红外图像与可见光图像的融合效果。结果表明,本文方法具有一定的有效性和实用性。

参考文献

- [1] 张雄美,李俊山,易昭湘,等.非抽样轮廓波变换域图像融合方法研究[J].电光与控制,2008,15(7):16-19.
- [2] 李美丽,李言俊,王红梅,等.基于 NSCT 和 PCNN 的红外与可见光图像融合方法[J].光电工程,2010,37(6):90-95.
- [3] 陈木生,蔡植善.基于 NSCT 的红外与可见光图像融合方法研究[J].激光与光电子学进展,2015,52(6):114-119.
- [4] ZHANG B, XU T F, HUANG G H, et al. Fusion of infrared and visible images based on wavelet frame[J]. Optical Technique, 2007, 33(3):334-336.
- [5] CAI W, LI M, LI X Y. Infrared and visible image fusion scheme based on Contourlet transform[C]//The 15th International Conference on Image and Graphics, IEEE Computer Society, 2009:516-520.
- [6] DA CUNHA A L, ZHOU J P, DO M N. The nonsubsampling Contourlet transform: theory, design and applications[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(10):3089-3101.
- [7] 时丕丽,郭雷,李晖晖.基于 NSCT 的 SAR 与可见光图像融合方法[J].计算机应用研究,2013,30(5):1568-1570.
- [8] 靳珍怡,王远军.基于非下采样轮廓波变换的多模态医学图像融合[J].中国医学物理学杂志,2016,33(5):445-450.
- [9] 鲍程辉,朱康,贺新光.基于非下采样 Contourlet 系数局部特征的遥感图像融合方法[J].计算机科学,2014,41(3):310-313.
- [10] LIU H X, ZHU T H, ZHAO J J. Infrared and visual image fusion based on region of interest detection and non-subsampling Contourlet transform[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Science, 2013, 18(5):526-534.
- [11] GE W, JI P, ZHAO T. Infrared image and visual image fusion algorithm based on NSCT and improved weight average[C]//The 6th International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications, IEEE, 2016:456-459.
- [12] 王跃华,陶忠祥.基于 NSCT 的红外与可见光图像融合算法[J].四川兵工学报,2012,33(7):117-119.
- [13] 王跃华,陶忠祥.一种基于 NSCT 变换的红外与可见光图像融合算法[J].光学与光电技术,2012,10(4):81-84.
- [14] 王宪,张方生,慕鑫,等.基于多目标粒子群算法的多传感器图像融合[J].光电工程,2012,39(6):102-110.
- [15] 时丕丽,郭雷,李晖晖,等.基于 NSCT 和遗传算法的 SAR 图像和多光谱图像融合[J].西北工业大学学报,2012,30(2):274-278.
- [16] 傅志中,王雪,李晓峰,等.基于视觉显著性和 NSCT 的红外与可见光图像融合[J].电子科技大学学报,2017,46(2):357-362.
- [17] 曾立庆,蒋年德.基于邻域内相关系数与平均梯度的图像融合方法[J].计算机工程与设计,2010,31(7):1533-1535.
- [18] 徐俊俊,黄永红,王琪,等.基于自然选择粒子群算法的含 DG 接入的配电网无功优化[J].电测与仪表,2014,51(10):33-38.
- [19] 温正.精通 MATLAB 智能算法[M].北京:清华大学出版社,2015.
- [20] 欧阳宁,郑雪英,袁华.基于 NSCT 和稀疏表示的多聚焦图像融合[J].计算机工程与设计,2017,38(1):177-182.
- (上接第 13 页)
- [6] 张天伟,陈航,马存宝,等.小尺度阵列稳健的波束形成方法仿真研究[J].计算机仿真,2013,30(10):233-236.
- [7] 赵雅靓,张连堂,刘先省.圆形阵列与线形阵列方向图的比较与分析[J].河南大学学报:自然科学版,2005,35(2):72-75.
- [8] 杨伏洲,王海燕,申晓红,等.基于时间反转的非均匀线列阵超指向性阵元分布模型[J].上海交通大学学报,2013,47(12):1907-1910.
- [9] 张天伟,陈航,马存宝.线列传声器方向性研究[J].传感技术学报,2008,21(12):2026-2030.
- [10] 张天伟,陈航.圆形基阵指向性的仿真研究[J].计算机仿真,2008,25(12):167-170.