

空间谱估计中非同步采样误差补偿方法研究

王利平 吴长奇

(燕山大学信息科学与工程学院, 秦皇岛 066004)

摘 要: 高分辨空间谱估计算法要求对多路信号进行同步采样, 非同步采样会导致空间谱估计的偏差。本文提出了一种对非同步采样进行补偿的方法——前后向对称采样法。该方法设置阵元采集顺序为非顺序采样, 利用前、后向对称采样数据之和计算空间谱。当交替采样延时精确的时候, 由于对称性, 相加后信号的阵列误差矩阵是一个实数矩阵, 对方向向量的相位没有影响, 因此可以得到方位角的无偏估计。理论分析与仿真结果表明: 当交替采样延时精确时, 该方法可以消除非同步采样对空间谱的影响, 与重新建模法补偿性能相近; 当交替采样延时不精确时, 该方法比重新建模法的补偿效果好, 而且前后向对称采样法算法简单, 且无需已知交替采样延迟时间。因此, 前后向对称采样法是对空间谱估计中非同步采样误差的一种有效补偿方法。

关键词: 空间谱; 非同步采样; 前后向对称采样; 补偿

中图分类号: TN912.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2012)09-1321-06

A forward and back symmetrical sampling method to compensate asynchronous sampling error

WANG Li-ping WU Chang-qi

(Institute of information science and technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: High-resolution spatial spectrum estimation algorithm required that multi-channel signals were sampled synchronously. If multi-channel signals were sampled asynchronously, non-synchronous sampling error would introduce deviation of spatial spectrum estimation. In order to compensate the non-synchronous sampling error, this paper proposed a new compensation method——forward and back symmetrical sampling method. This method used the reconstructed array signals which were added data of forward and back sampled data to compute the spatial spectrum. When the alternate sampling delay was accurate, because of symmetry, the added array error matrix was a real matrix which had no influence on the phase of the direction vector. In consequence, unbiased estimation of spatial spectrum can be realized. Theoretical analyses and simulation results showed that this method can eliminate the influence of non-synchronous sampling error when the alternate sampling delay was accurate, and its performance was similar to the remodeling method; When the alternate sampling delay was not accurate, its performance was better than the remodeling method. The new method has the advantages of lower complexity and it is not necessary to know sampling delay time. Therefore, the forward and back symmetrical sampling method is an effective compensation method for non-synchronous sampling error of spatial spectrum estimation.

Key words: spatial spectrum; asynchronous sampling; forward and back symmetrical sampling; compensation

1 引言

空间谱估计是阵列信号处理的一个重要研究方

向,其本质是通过传感器阵列接收空间信号,然后运用数字信号处理技术从干扰和噪声中检测出感兴趣的信号,即确定信号源的位置——波达角、信号源与阵列的

距离等。空间谱估计的高分辨算法要求对多路阵列信号进行同步采样,这需要在软件和硬件上精心设计才能实现,并且这一要求往往会增加系统的成本。现在许多高级的 DSP 芯片已经能够满足多路信号采样精确同步的要求。而实际工程应用中往往希望在同样的估计精度要求下,硬件成本越低越好。空间谱估计技术广泛应用于声源定位系统中。例如,现有的许多玩具娃娃都涉及到语音识别和定位。如果应用高级的 DSP 芯片作为该类系统的硬件,势必会增加成本,而其实一些低速芯片如单片机是可以完成空间谱估计的基本运算的,只是不能满足信号同步采集的要求。尽管使用采样保持电路等方法,单片机也可以实现同步采样,但是这样就增加了电路实现的复杂度,意味着增加了系统成本。在不增加电路复杂度的情况下,单片机只能采用时间交替顺序采样技术。而时间交替采样会引入非同步采样延迟误差,使得空间谱估计算法性能急剧下降。如果能够对非同步采样进行恰当的补偿,从而使采集信号满足高分辨空间谱估计算法的要求,同时又可以用低成本的单片机实现硬件系统,达到了降低成本的目的。因此,研究非同步采样的补偿方法是一个有着实际意义的课题。而且许多空间谱估计的研究实际上是忽略了非同步采样的误差。

多通道信号非同步采样时,虽然可以根据实际的采样延迟对阵列接收信号重新建模^[1]从而得到空间谱的正确估计,但是该方法需要测量通道间的交替采样延迟,而交替采样延迟时间的准确性会影响算法的估计性能。因此,为了降低空间谱估计技术工程应用的硬件成本,消除非同步采样对空间谱估计的影响,本文提出了一种简单而有效的非同步采样补偿方法——前后向对称采样法。本文方法不需要已知交替采样延迟,而是通过改变阵元采集顺序对非同步采样进行补偿,达到了较好的补偿效果。

2 前后向对称采样法

通道间延时^[2],是指数据采集系统两个不同通道的第一个采集数据采集时刻之间的时间差。本文所指的非同步采样是指时间交替顺序采样技术^[3]。这类系统的实现依赖于各通道间均匀延迟的精确实现。设传感器阵列是阵元数为 M 的均匀线阵,信源发射的信号为 $s(t)$ 。阵元 i 的接收信号相对参考阵元的时延由两

部分组成,一部分是由信号方向引起的时延 τ_i ,另一部分为相邻通道之间的精确采样延迟 Δt 。设每路信号的采样周期为 T_s 。通常若线阵阵元 $1, 2, \dots, M$ 等间距排列,则阵元采集顺序为: $1, 2, \dots, M$, 即阵元采集顺序与阵元排列顺序相同。若以阵元 1 为参考阵元,则各个阵元相对参考阵元的采样延迟分别为:

$$N = [0, \Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots, (M-1)\Delta t] \quad (1)$$

称这种方式为非同步采样条件下的顺序采样。

均匀线阵的方向向量具有范德蒙结构,方向向量的这种结构使得均匀线阵具有许多优点,可以在均匀线阵上方便地实现各种方法,这是其他阵列结构所不能做到的^[4]。但非同步采样条件下的顺序采样会引入延时向量,且该延时向量也具有范德蒙结构,如式(1),从而使信号方向向量的偏差也具有范德蒙结构,因此,估计的方位角会有很大的偏差。

新的补偿方法的基本思想就是改变均匀线阵的阵元采集顺序,消除或者降低非同步采样引入的相位误差矩阵对理想方向向量的相位影响。

改变阵元的采集顺序为非顺序采样,可以使相位误差矩阵不再具有范德蒙结构,一定程度上可以减小角度估计误差,但不能消除误差。若联合采用两种阵元采集顺序得到的数据,通过某种组合,使得最终的等效相位误差矩阵对理想方向向量的相位没有影响,就可以消除非同步采样误差对方位角估计的影响。称第一种采样顺序为前向采样,与其对应的另一种顺序为后向采样。

下面将主要介绍本文提出的前后向对称采样法。

以 $M=6$ 为例,前后向采样的阵元采集顺序分别为 S_f 和 S_b 。设

$$S_f = [3, 4, 2, 5, 1, 6] \quad (2)$$

$$S_b = [6, 1, 5, 2, 4, 3] \quad (3)$$

以第一个阵元为参考阵元, F, B 分别为前后向采样时各个阵元的接收信号相对阵元 1 的延迟时间向量 (Δt 的系数):

$$F = [0, -2, \dots, -(M-2), \dots, 1] \quad (4)$$

$$B = [0, 2, \dots, M-2, \dots, -1] \quad (5)$$

设 D_f, D_b 为前向和后向采样引起的相位误差矩阵

$$D_f = \text{diag}(\exp(jF_1 w \Delta t), \dots, \exp(jF_M w \Delta t)) \quad (6)$$

$$D_b = \text{diag}(\exp(jB_1 w \Delta t), \dots, \exp(jB_M w \Delta t)) \quad (7)$$

式中 w ——表示信号的角频率, $w=2\pi f_0$ 。

非同步采样时,相当于阵列方向向量的改变。设 \mathbf{A} 为信号的理想方向向量,则非同步采样时的实际方向向量为:

$$\mathbf{A}_{f/b} = \mathbf{D}_{f/b} \mathbf{A} \quad (8)$$

可以得到阵列采集数据的表达式

$$\mathbf{X}_{f/b} = \mathbf{D}_{f/b} \mathbf{A} \mathbf{S} \quad (9)$$

利用前后向采样得到的两组数据之和构造最终的数据为

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_f + \mathbf{X}_b = \mathbf{D}_f \mathbf{A} \mathbf{S} + \mathbf{D}_b \mathbf{A} \mathbf{S} = (\mathbf{D}_f + \mathbf{D}_b) \mathbf{A} \mathbf{S} = \mathbf{D} \mathbf{A} \mathbf{S} \quad (10)$$

由式(4)和(5),可以得到前后向采样时各个阵列信号的延时满足

$$\mathbf{F} = -\mathbf{B} \quad (11)$$

$$\mathbf{D} = (\mathbf{D}_f + \mathbf{D}_b) = \text{diag}(2\cos(F_1 w \Delta t), \dots, 2\cos(F_M w \Delta t)) \quad (12)$$

由公式(12),等效误差矩阵 \mathbf{D} 是一个元素均为实数的三角矩阵,即它是一个阵元增益矩阵。文献[5][6]表明阵元增益的误差并不会引起空间谱的谱峰位置发生偏移,而仅仅是降低了谱峰幅度。因此,采用前后向采样数据之和计算空间谱可以得到实际的方位角。

前后向对称采样法的具体步骤为:

(1) 分别进行前、后向采样,得到前向阵列接收数据 \mathbf{X}_f 和后向阵列接收数据 \mathbf{X}_b 。

(2) 将 \mathbf{X}_f 和 \mathbf{X}_b 相加得到构造数据 $\mathbf{X} = \mathbf{X}_f + \mathbf{X}_b$, 用 \mathbf{X} 构造协方差矩阵 \mathbf{R}_x 。

(3) 将 \mathbf{R}_x 作为理想空间谱估计算法的协方差矩阵,进行特征分解,构造空间谱。

设一阵元数为 M 的等距线阵,根据排列的原理,阵元采样顺序的种类有 A_M^M 种。每一种采样顺序都有另一种采样顺序与其对应(包括顺序采样方式),使得前后向采样得到的阵列信号的延时满足式(11)。称这种对应关系为对称关系。因此,使用任意两种有对称关系的采样顺序得到的前后向采样数据之和作为等效的阵列接收信号,可以消除非同步采样误差对空间谱的影响,称这种方法为前后向对称采样法。

3 性能仿真

只用一种非顺序采样方式得到的数据可以较大程

度上降低非同步采样时空间谱的估计偏差,而由前后向对称采样法补偿后得到的空间谱估计偏差则趋于零。为了检验以上算法的有效性,本小节给出了大量仿真实验。比较了分别用前向采样,后向采样和前后向对称采样三种方法补偿非同步采样误差后的空间谱估计性能。这里的前向或后向采样顺序可以是任意一种非顺序采样方式。但为了与前后向对称采样法作对比,实验中,使用的前向和后向采样顺序分别是前后向对称采样法中有对称关系的两种采样顺序。

定义 β 为通道间交替采样的精确时延相对于采样周期的偏差率, M 是通道数, T_s 为采样周期,则 $\beta = \Delta t / T_s, 0 \leq \beta \leq 1/M$ 。仿真条件为:噪声是相互独立的复高斯白噪声,阵元间距采用信号半波长,即 $d = \lambda/2$,信号均采用频率为 $f_0 = 1000\text{Hz}$ 的正弦信号,采样频率为 $f_s = 10000\text{Hz}$,阵元数 $M=4$,交替采样延迟率 $\beta=0.25$,则交替采样精确延迟时间为 $\Delta t = 25\mu\text{s}$ 。

仿真 1 前后向对称采样法的估计精度

图 1,图 2 是交替采样延时精确时, $\Delta t = 25\mu\text{s}$ 的仿真图,信噪比为 10dB,快拍数为 400。图 1 是信源方位角为 0 度,分别用三种方法补偿非同步采样误差后的空间谱图。仿真结果表明,只用前向采样、只用后向采样以及前后向对称采样都可以一定程度上补偿非同步采样延迟误差。顺序采样得到的估计角度为 -3 度,偏离真实值较大;仅用前向采样得到的空间谱谱峰位置(即估计方位角)为 -1 度,小于真实值;仅用后向采样得到的空间谱谱峰位置为 1 度,大于真实值;而前后向对称采样得到空间谱谱峰位置等于真实值,且谱峰比较尖锐,比前向采样和后向采样的角度分辨率更高。

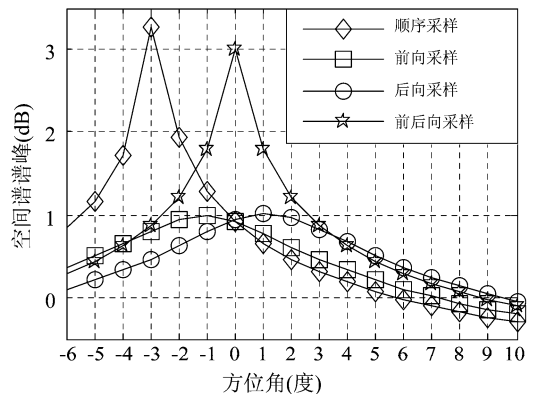


图 1 三种方法补偿后的空间谱

Fig. 1 spatial spectrum with three methods

图2是三种方法补偿非同步采样误差后的角度估计偏差随信源的真实方位角的变化曲线,并与补偿前即顺序采样进行了比较。真实方位角变化范围为 $-70^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 。结果表明仅用前向或仅用后向采样以及前后向对称采样与顺序采样相比,都可以减小角度估计偏差,但仅用前向采样或仅用后向采样都是一定程度上降低了估计偏差,且后向采样的估计值仍偏大于真实角度,前向则偏小。而前后向对称采样得到的估计结果偏差最小,几乎为零。

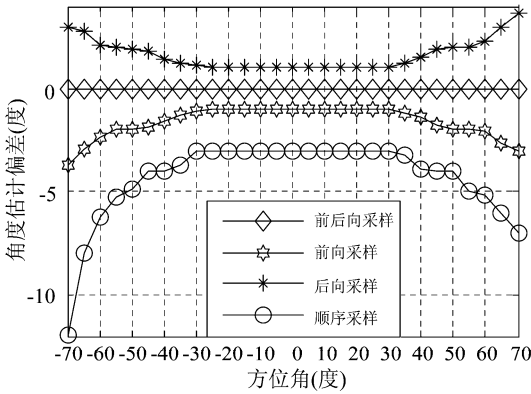


图2 三种方法补偿后角度估计偏差

Fig.2 bias of esmated doa with three methods

仿真 2 与重新建模法的比较

顺序采样的时候,若已知准确的交替采样延迟,也可以对阵列接收数据重新建模,利用新的方向向量计算空间谱,称这种补偿方法为重新建模法。根据空时等效性^[7],也可以把非同步采样误差对空间谱估计的影响等效于阵元位置误差对空间谱估计的影响,从而可以利用类似的校正方法对空间谱进行校正^{[8][9]},这与重新建模法是等效的。

由第2节的分析得知,当交替采样延时精确时,前后向对称采样法可以等效为增益幅度不一致条件下的空间谱估计方法,而重新建模法是根据实际的方向向量得到的,等效于新建模后的理想空间谱估计。因此,两种方法的补偿性能相近。如图6,两种方法对不同的角度的补偿效果基本相同。但是由于增益误差矩阵会使前后向对称采样法估计的方位角对应的谱峰幅度降低,所以其角度估计分辨率低于重新建模法。但是,当交替采样延时不精确时,即存在随机时延,由图3,4,5的仿真可以得到,此时,由于不能精确估计每个通

道的采样延时,重新建模法的方向向量不再是理想方向向量。此时,前后向对称采样法的补偿性能就比重新建模法好。

(1) 快拍数对前后向对称采样法估计精度的影响

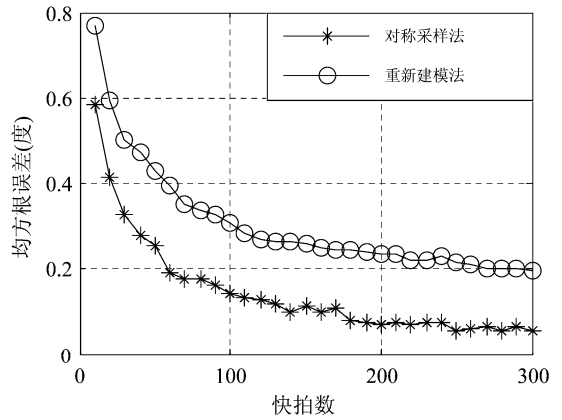


图3 不同快拍数时的估计均方根误差

Fig.3 Rmse for varying Snapshots

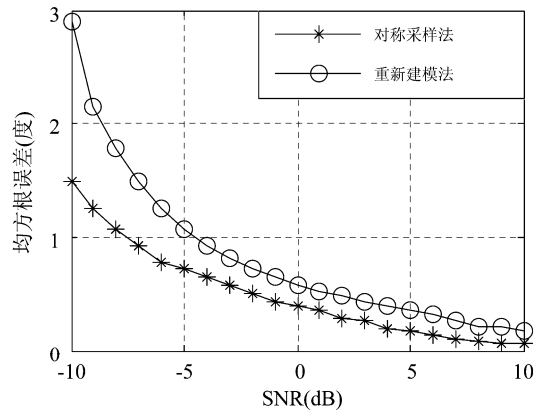


图4 不同信噪比时的估计均方根误差

Fig.4 Rmse for varying SNR

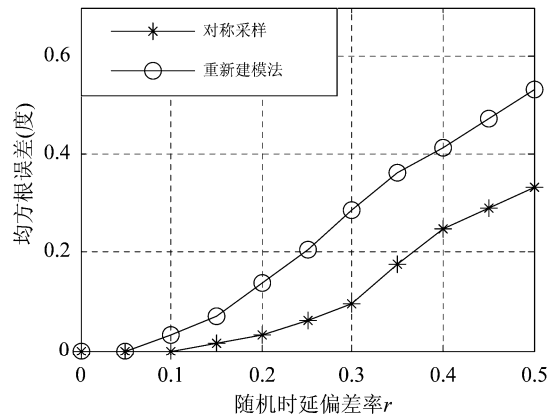


图5 估计均方根误差与随机时延偏差率的关系

Fig.5 Rmse for varying bias proportion of random time delay

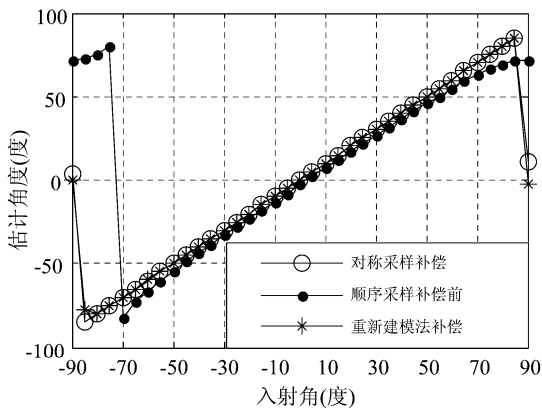


图 6 平均估计角度随实际角度的变化

Fig. 6 average estimation doa for varying true doa

假设通道间交替采样延时不精确,以 r_0, r_1, \dots, r_{M-1} 表示各个通道的随机时延与精确时延 Δt 的比值,即随机时延偏差率。设 $0 \leq |r_m| \leq 0.25$, r_m 由一服从正态分布的随机函数产生。图 3 是不同快拍数时,前后向对称采样法和重新建模法补偿后的估计角度的均方根误差随快拍数变化的曲线。每个快拍数均运行 1000 次独立实验,方位角为 30 度,信噪比为 10dB。从图 3 可以得到,两种方法得到的均方根误差均随快拍数增大而减小,但前后向对称采样法补偿后的估计角度的均方根误差小于重新建模法。

(2) 信噪比对前后向对称采样法估计精度的影响

为了验证噪声对前后向对称采样法的影响,仿真比较了不同信噪比时,分别用前后向对称采样法和重新建模法对非同步采样误差进行补偿后的角度估计均方根误差随着信噪比的变化。仿真条件是快拍数为 256, $0 \leq |r_m| \leq 0.25$, 信噪比变化范围为 -10dB ~ 10dB。每个信噪比均运行 1000 次独立实验,如图 4 所示。由仿真结果可以看到,随着信噪比的增高,两种方法得到的估计角度均方根误差均逐渐减小,但前后向对称采样法补偿后的估计角度的均方根值比重新建模法更小。

(3) 随机延时的影响

图 5 是方位角为 30 度,信噪比 10dB,快拍数 256 的时候,两种方法的估计角度均方根误差随随机时延偏差率的变化曲线(2000 次独立实验),由图 5 得到,前后向对称采样法的均方根误差比重新建模法小。

(4) 不同角度的估计性能。

设交替采样延迟精确,信噪比为 10dB,快拍数为

256。图 6 是两种补偿方法分别作 100 次仿真得到的平均估计角度随真实方位角的变化曲线,并与顺序采样进行了比较。由图 6 可以看到,顺序采样时的平均估计角度偏离实际角度,且在 -90 度到 -78 度之间发生符号翻转,前后向对称采样法补偿后和重新建模法补偿后的平均估计角度都与实际角度相同,仅在正负 90 度附近发生估计错误,远远小于补偿前即顺序采样时的估计偏差,极大提高了非同步采样时角度估计的精度。

4 结论

本文提出了一种对阵列多通道非同步采样误差的补偿方法即前后向对称采样法,分析了影响空间谱估计精度的各个因素对前后向对称采样法的影响,并与重新建模法做比较。仿真结果表明,前后向对称采样降低了非同步采样误差对空间谱估计的影响,提高了非同步采样时的空间谱估计精度。与重新建模法相比,前后向对称采样法的优点在于:一、它无需已知交替采样延迟时间,而且交替采样延迟时间的准确性会影响重新建模法的性能;二、前后向对称采样法没有增加任何计算量,只是改变阵元采集顺序;三、当交替采样延时不精确时,前后向对称采样法比重新建模法更有效。因此,前后向对称采样法是对空间谱估计中非同步采样误差的一种有效补偿方法。

参考文献

- [1] 李安,王殊,程卓,胡富平. 基于非均匀采样的空间谱估计[J]. 微电子学与计算机,2009,26(02):76-79.
Li A, Wang S, Cheng Z, Hu F P. Spatial Spectrum Estimation Using Nonuniform Sampling [J]. Microelectronics & Computer, 2009, 26(02): 76-79. (in Chinese)
- [2] 毛林燕. 基于 PCI 总线的多通道数据采集系统同步性能研究[D]. 西安:西安电子科技大学工学硕士学位论文,2007.
Mao L Y, Research on the Performance of PCI bus based Multi-channels Data Acquisition System Synchronization [D]. Xidian University; Xian; Shanxi, Ph. D thesis, 2007. (in Chinese)
- [3] Elbornsson J, Gustafsson F, Eklund J E. Blind Equalization of Time Errors in a Time Interleaved ADC System [J]. IEEE Transactions on signal processing, 2005, 53

- (4):1413-1424.
- [4] 潘水君. 典型空间谱估计算法性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学工学硕士学位论文, 2010.
Pan S J. Performance Analysis of Typical Spatial Spectrum Algorithms [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, Ph. D thesis, 2010. (in Chinese)
- [5] 韩芳明, 张守宏, 潘复平. 阵列误差对 music 算法性能的影响与校正[J]. 西安: 西安电子科技大学学报, 2003, 30(05): 585-589.
Han F M, Zhang S H, Pan F P. Effect of Array Uncertainty on The Performance of MUSIC and Its Calibration [J]. Xi An: Journal of XiDian University, 2003, 30 (05): 585-589. (in Chinese)
- [6] 俄广西, 龚耀寰. 一种新的阵列天线校正方法[J]. 信号处理, 2003, 19(5): 404-406.
E G X, Gong Y H. A New Calibration Method of Array Antenna [J]. Signal Processing, 2003, 19 (5): 404-406. (in Chinese)
- [7] 陈明建, 罗景青. 基于非均匀采样的信号频率和到达角联合估计[J]. 电子信息对抗技术, 2011, 26(02): 4-8.
Cheng J M, Luo J Q. Joint Estimation of Frequency and DOA of Signal Based on Nonuniform Sampling [J]. Electronic Information Warfare Technology, 2011, 26(2): 4-8. (in Chinese)
- [8] Ng B P, Lie J P, Er M H, Feng A. A Practical Simple Geometry and Gain/Phase Calibration Technique for Antenna Array Processing [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(7): 1963-1972.
- [9] Li Y M, Er M H. Theoretical Analyses of Gain and Phase Error Calibration with Optimal Implementation for Linear Equispaced Array [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(2): 712-723.

作者简介



王利平(1984-), 女, 山西大同人, 燕山大学信息科学与工程学院硕士研究生, 获得工学硕士学位。研究方向: 阵列信号处理, 基于麦克风阵列的声源定位。
E-mail: wangliping050505@126.com



吴长奇(1955-), 男, 黑龙江人, 燕山大学信息科学与工程学院教授, 硕士生导师。主要研究方向: 无线通信技术、阵列信号处理等。E-mail: cqwu@ysu.edu.cn