

利用局域子空间投影提高子空间类 DOA 估计算法的谱分辨力

王布宏,王永良,陈 辉

(空军雷达学院雷达兵器运用工程军队重点实验室,湖北武汉 430010)

摘要: 本文提出一种新的用于子空间类 DOA 估计算法的阵列协方差矩阵噪声子空间投影矢量的选取方法——局域子空间投影(LSP). 该投影矢量选取方法有利于压低真实信源方位附近,非信源方位对应的谱曲线高度,从而提高子空间类高分辨 DOA 估计算法的分辨力. LSP 算法的估计偏差和信噪比分辨门限明显低于 MUSIC 算法,而估计方差几乎与 MUSIC 相同. 计算机仿真结果证明了文中对 LSP 算法性能理论分析的正确性和 LSP 算法的有效性.

关键词: DOA 估计; 局域子空间投影; 高分辨

中图分类号: TN911. 7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 03-0459-05

Improving Spectral Resolution of Subspace-Based DOA Estimation Algorithms by Localized Subspace Projection

WANG Bu-hong, WANG Yong-liang, CHEN Hui

(Key Research Lab, Wuhan Radar Academy, Wuhan, Hubei 430010, China)

Abstract: A novel method for selecting projection vectors in the noise subspace of array covariance matrix is proposed with a view to improving the spectrum resolution of subspace-based DOA estimation algorithms, which is called LSP (Localized Subspace Projection). The new projection vector(s) obtained by LSP can depress the spectrum amplitude at the spatial location in close vicinity to sources' actual spatial positions while remaining the specular peaks on the source positions. The LSP algorithm has lower peaks location bias and SNR resolution threshold than MUSIC, while remains almost the same peaks location variance with MUSIC. Computer simulation results verify the theoretical performance analysis of the given LSP algorithm and demonstrate the effectiveness of LSP algorithm.

Key words: direction of arrival estimation; localized subspace projection; high resolution

1 引言

DOA (Direction Of Arrival) 估计^[1,2]是阵列信号处理领域的重要研究内容之一,已经被广泛应用于雷达、声纳、通信、地震勘探和医学成像等领域. 由于具有良好的超分辨能力和相对较小的计算量,子空间类算法^[1~5]已经成为 DOA 估计中最常用和最经典的方法. 子空间类算法通过对阵列协方差矩阵的特征分解,利用其信号子空间与噪声子空间的正交性,通过搜索阵列流形与阵列协方差矩阵信号子空间的交点来完成对空间信源波达方向的估计. 空间谱估计算法的分辨力是指对空间方位相邻很近的信源的分辨能力. 良好的分辨能力反映在空间谱曲线中应在两个空间方位相邻很近的信源方位处形成尖锐的谱峰,而在非信源方位处(特别是两信源方位的中间)谱曲线的幅度应尽可能的低. 通常,在子空间类算法中,阵列可见区域(FOV: field of view)内各方位在空间谱曲线中的尖锐程

度由其对应的导向矢量到阵列协方差矩阵噪声子空间中投影矢量的投影大小决定. 不同的噪声子空间投影矢量的选取将对算法的谱分辨率产生不同的影响. 不同的子空间类算法的实质区别在于对噪声子空间中投影矢量的选取的不同.

本文提出一种新的阵列协方差矩阵噪声子空间投影矢量的选取方法:局域子空间投影(LSP: localized subspace projection). 新算法在信源大致方位内构造导向矢量的相关矩阵,利用空域局域子空间投影,将导向矢量相关矩阵的信号(主)子空间与阵列协方差矩阵的噪声子空间的交空间作为子空间类高分辨 DOA 估计算法中导向矢量的投影空间,该方法有利于压低真实信源方位附近,非信源方位对应的谱曲线的高度,从而提高了子空间类高分辨 DOA 估计算法的分辨力.

论文第二部分对子空间类算法的机理给出了几何解释,并从噪声子空间内投影矢量选取的角度分析了常用的子空间类算法的原理. 第三部分对本文提出的利用局域子空间投影

方法选取阵列协方差矩阵噪声子空间投影矢量的方法进行了理论阐述,并给出了算法的具体步骤、与 WMUSIC 的关系和相应的算法估计方差的理论分析.第四部分给出了计算机仿真结果,证明了文中对 LSP 算法性能理论分析的正确性和 LSP 算法的有效性.最后给出结论.

2 子空间类算法的几何解释

2.1 窄带均匀线阵数学模型^[1,2]

对于 N 元均匀线阵,阵元间距为 d ,且假设均为各向同性阵元.阵列远场中以线阵轴线法线为参考的 $\theta_k, k=1,2,\dots,M$ 处有 M 个窄带点源以平面波入射(波长为 λ).阵列接收的快拍数据可由式(1)表示为:

$$X(t) = A(\theta)S(t) + N(t) \quad (1)$$

式中 $N(t)$ 为 $N \times 1$ 快拍数据矢量.为 $N \times 1$ 阵列噪声矢量.阵列噪声假定为空域和时域均独立的高斯白噪声,均值为 0,方差为 σ^2 . $S(t)$ 为入射信号复幅度矢量. θ 为信源方位矢量. $A(\theta)$ 为阵列的流形矩阵, $A(\theta) = [a(\theta_1), a(\theta_2) \dots a(\theta_M)]$, 其中 $a(\theta_k) = [1, e^{j\theta_k}, \dots, e^{j(N-1)\theta_k}]^T, k=1 \dots M$ 为第 k 个信源的导向矢量, θ_k 为信源波数由式(2)表示为:

$$\theta_k = \frac{2\pi d \sin(\theta_k)}{\lambda} \quad (2)$$

阵列的协方差矩阵 R 定义为:

$$R = E[X(t)X^H(t)] = AR_S A^H + \sigma^2 I \quad (3)$$

其中 $R_S = E[S(t)S^H(t)]$ 为信源的协方差矩阵. I 为单位阵.

2.2 子空间类算法的几何解释

从上面的阵列窄带数据模型可以看出,阵列接收的快拍数据矢量可以看作 N 维观测空间中的矢量,当不存在阵列模糊且 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M$ 时阵列流形矩阵 $A(\theta)$ 列满秩,且其值域构成了 N 维观测空间中的 M 维子空间,而 $A(\theta)$ 的列构成了该子空间的一组非正交基.当忽略噪声影响时,阵列接收的快拍数据矢量正是这组基下以信号矢量为坐标的 M 维子空间中的矢量.

将阵列接收数据的协方差矩阵进行特性分解:

$$R = \sum_{i=1}^M \lambda_i e_i e_i^H + \sum_{i=M+1}^N \lambda_i e_i e_i^H = E_S S E_S^H + E_N N E_N^H \quad (4)$$

可以发现数据协方差矩阵的特征根具有如下分布:

$$\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_M > \lambda_{M+1} \approx \lambda_{M+2} \approx \dots \approx \lambda_N \quad (5)$$

由矩阵 $E_S = [e_1 e_2 e_3 \dots e_M]$ 张成的线性子空间称为信号子空间,而由矩阵 $E_N = [e_{M+1} e_{M+2} e_{M+3} \dots e_N]$ 张成的线性子空间称为噪声子空间.并且满足下式(6)所示的正交关系:

$$\text{span}(E_S) \perp \text{span}(E_N) \quad (6)$$

经分析可知,当估计的信源数准确时,对阵列接收数据的协方差矩阵进行特性分解所得的信号子空间与 $A(\theta)$ 的值域相同.即:

$$\text{span}(E_S) = \text{span}(A(\theta)) \quad (7)$$

所以有:

$$\text{span}(A(\theta)) \perp \text{span}(E_N) \quad (8)$$

定义整个 FOV 中的阵列流形:

$$A = \{ a(\theta) : - \} \quad (9)$$

通常的子空间类高分辨 DOA 估计算法正是利用上式(8)的正交关系,通过衡量 FOV 空间方位对应的阵列导向矢量到阵列协方差矩阵噪声子空间中投影矢量的投影大小来寻找信号子空间与整个 FOV 中的阵列流形 A 交点 $A(\theta)$ 的过程.下面从阵列协方差矩阵噪声子空间投影矢量的选取的角度对几种常用的子空间类 DOA 估计算法进行讨论.

(1) Pisarenko 算法^[5],

$$P_{\text{Pisarenko}}(\theta) = \frac{1}{|a^H(\theta) e_{M+1}|^2} \quad (10)$$

算法选取噪声子空间中最小特性值对应的一个特征矢量,作为阵列导向矢量的投影矢量,但形成的空间谱曲线容易产生伪峰

(2) MUSIC 算法^[3]:

$$P_{\text{MUSIC}}(\theta) = \frac{1}{a^H(\theta) E_N E_N^H a(\theta)} \quad (11)$$

算法选取整个噪声子空间的正交基矢量作为阵列导向矢量的投影矢量组.它消除了空间谱曲线中的伪峰.但运算量相对较大.

(3) MNM(最小模)算法^[4]:

$$P_{\text{MNM}}(\theta) = \frac{1}{|a^H(\theta) d|} \quad (12)$$

其中:

$$d = \begin{bmatrix} 1 \\ -E_N g^* / (1 - g^H g) \end{bmatrix} \quad \text{或} \quad d = \begin{bmatrix} 1 \\ E_N c^* / c^H c \end{bmatrix}$$

$$E_S = \begin{bmatrix} g^T \\ E_S \end{bmatrix} \quad E_N = \begin{bmatrix} c^T \\ E_N \end{bmatrix} \quad (13)$$

算法选取噪声子空间中一个矢量作为导向矢量的投影矢量.其第一个元素为 1,且具有最小的内积,它消除了空间谱曲线中的伪峰,而且同时具有 Pisarenko 算法的运算量小的优点. MNM 算法实质上是一种 WMUSIC 算法.它充分利用了整个噪声子空间中所有正交基矢量的信息,但在 DOA 搜索时只利用了一个投影矢量.

(4) WMUSIC(加权 MUSIC)^[8,9]:

$$P_{\text{WMUSIC}}(\theta) = \frac{1}{a^H(\theta) E_N W E_N^H a(\theta)} \quad (14)$$

算法利用了整个噪声子空间的正交基矢量作为导向矢量的投影矢量,但对不同的基矢量赋予不同的权值.

可见不同的子空间类算法,其根本的区别在于选取的阵列协方差矩阵噪声子空间的投影矢量(空间)不同.不同的噪声子空间的投影矢量的选取将导致不同的子空间 DOA 估计算法,导致不同的估计性能.

3 利用局域子空间投影选取阵列协方差矩阵噪声子空间中投影矢量的 LSP 算法

3.1 算法的基本原理

DOA 估计算法的良好分辨能力反映在空间谱曲线中应在两个空间方位相邻很近的信源处形成尖锐的谱峰,而在非信源方位(特别是两信源方位的中间)谱曲线的幅度应尽可能的低.由上节可知,通常,子空间类算法中可见区域(FOV:field of

view) 内各方位在空间谱曲线中的尖锐程度由空间方位对应的阵列导向矢量到阵列协方差矩阵噪声子空间中投影矢量的投影大小决定。

基于以上思想,本文提出一种新的阵列协方差矩阵噪声子空间投影矢量的选取方法.算法在信源大致方位内构造导向矢量的相关矩阵 R_A ,利用空间局域子空间投影,将导向矢量相关矩阵的信号(主)子空间与阵列接收数据协方差矩阵的噪声子空间 $span(E_N)$ 的交空间作为子空间类高分辨 DOA 估计算法中导向矢量的投影空间,由于 R_A 与 $span(E_N)$ 交空间中的基矢量既保持了与信源真实空间方位对应导向矢量的正交性,同时又保留了与信源真实空间方位附近非信源方位对应导向矢量的相关性.因此该方法有利于压低真实信源方位附近,非信源方位对应的谱曲线的高度,同时保持了空间谱曲线中信源真实空间方位处的尖锐谱峰,有利于提高子空间类高分辨 DOA 估计算法的分辨力。

3.2 算法步骤

(1) 构造信源空间大致方位内导向矢量的相关矩阵:

$$R_A = a(\cdot) a^H(\cdot) d \quad (15)$$

(2) 将导向矢量的相关矩阵 R_A 进行特征分解,用大特征值对应的特性矢量为基矢量构成 R_A 的信号(主)子空间。

(3) 对阵列接收数据进行特征分解,获得阵列接收数据的噪声子空间 E_N 。

(4) 将空间的基矢量投影到噪声子空间当中,计算空间与 E_N 空间的交空间的基矢量,形成 LSP 算法的阵列接收数据噪声子空间内的投影矢量矩阵。

$$= E_N E_N^H$$

(5) 构造空间谱估计器:

$$P_{LSP}(\cdot) = \frac{1}{a^H(\cdot) a(\cdot)} \quad (16)$$

3.3 本文算法与加权 MUSIC 的关系

从投影矢量空间的构成 $= E_N E_N^H$ 及式(16)可以看出 LSP 算法可以看做加权 MUSIC 算法的特例,其对应的加权矩阵为:

$$W_{LSP} = E_N^H \quad (17)$$

由于加权矩阵 W_{LSP} 可以看作阵列协方差矩阵噪声子空间中正交基矢量 $E_N = [e_{M+1} e_{M+2} e_{M+3} \dots e_N]$ 与阵列流形相关矩阵信号子空间中基矢量的相关矩阵.因此 LSP 算法其权重的选择以 E_N 中正交基矢量与 E_N 中正交基矢量的相关程度决定,相关程度越大, E_N 中正交基矢量的对应的权重越大,反之,相关程度越小, E_N 中正交基矢量的权重越小.所以在信源空间方位附近,非信源处,阵列数据协方差矩阵噪声子空间中正交基矢量对应的内积 $a^H(\cdot) e_i, i = M + 1, M + 2, \dots, N$ 的值越大其对应的权重越大,反之亦然.反映在空间谱曲线中,在信源空间方位附近,非信源处的谱幅度被压低,而在信源方位处,由于理想情况下,阵列协方差矩阵噪声子空间中正交基矢量与 $a^H(\cdot)$ 的正交性,加权对 $a^H(\cdot) e_i, i = M + 1, M + 2, \dots, N$ 值的影响很小,在信源方位处仍会形成尖锐的谱峰.因此文中提出的投影矢量的选择方法有利于在信源方位处产生尖锐的

针状谱峰,提高子空间类 DOA 估计算法的分辨力。

3.4 LSP 算法的估计方差理论性能分析

文献[6,7]中指出,通常加权 MUSIC 的算法(如最小模算法)的估计方差较 MUSIC 大,而分辨门限、估计偏差较 MUSIC 低.本文提出的 LSP 算法,克服了最小模算法估计方差大的缺点.下面我们就 LSP 算法的估计方差与 MUSIC、MNM 估计差进行理论比较:

我们知道最小模算法^[1,4]对应的加权 MUSIC 算法的加权为:

$$W_{MNM} = E_N^H e_1 \quad (18)$$

其中 e_1 为 N 阶单位阵的第一列.而通常的 MUSIC 算法对应的加权为单位阵 I .我们可以定义 LSP 算法的性能比函数如下式(19)所示^[6,7]:

$$eff_{LSP} = \frac{I C_{CRB} I_{ii}}{I C_{LSP} I_{ii}} \quad (19)$$

其中 C_{LSP} 为 LSP 算法理论估计方差矩阵(它的计算可将加权 WMUSIC 的理论估计方差矩阵^[6,7]中权 W 用 E_N^H 代替), C_{CRB} 为 DOA 估计算法的估计方差的 Cramer-Rao 下界.经推导, C_{LSP} 的表达式如下式(20)所示:

$$C_{LSP} = \frac{2}{L} (\bar{H} \cdot I)^{-1} \text{Re} \left\{ \tilde{H} \cdot (A^H T A) \right\} (\bar{H} \cdot I)^{-1} \quad (20)$$

$$\bar{H} = D^H E_N E_N^H \quad H E_N E_N^H D \quad (21)$$

$$\tilde{H} = D^H E_N E_N^H (\quad)^2 E_N E_N^H D \quad (22)$$

$$T = E_S W_S E_S^H \quad W_S = (\quad - 2 I)^{-2} \quad s \quad (23)$$

其中 A 为阵列流形矩阵、 D 为阵列流形矩阵对空间方位的一阶导数矩阵, I 为单位阵, 2 为噪声功率, L 为快拍数.同理可以定义 MUSIC 算法和 MNM 算法的性能比函数: eff_{MUSIC} 、 eff_{MNM} .在信号(主)子空间维数取 3 时,下图 1 给出了 8 阵元均匀线阵,对应空间区间取 $[-10, 10]$,信源方位 $[-5, 5]$ 时, LSP、MUSIC 与 MNM 算法性能比函数比较曲线.下图 2 给出了 8 阵元均匀线阵,对应空间区间取 $[0, 10]$,信源方位 $[4, 5]$ 时, LSP、MUSIC 与 MNM 算法性能比函数比较曲线.图 3、4 分别为给出了信噪比 0dB、20dB 时,对于 8 阵元均匀线阵,对应空间区间取 $[0, 10]$,信源 1 方位固定(0 度),信源 2 方位从 1 度变化到 10 度的 LSP、MUSIC 与 MNM 算法性能比函数比较曲线.可见 LSP 算法的估计方差与几乎与 MUSIC 相等,克服了通常加权 MUSIC 算法估计方差大的缺点.下面第四节中的仿真实验也证实了我们的理论分析。

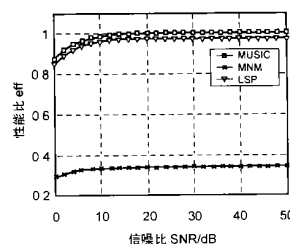


图 1 对应空间区间取 $[-10, 10]$,信源方位 $[-5, 5]$ 时的性能函数比较

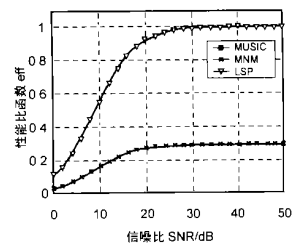


图 2 对应空间区间取 $[0, 10]$,信源方位 $[4, 5]$ 时的性能函数比较

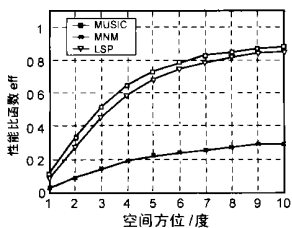


图3 信噪比为 0dB、对应空间区间取 $[0, 10]$ 、信源 1 方位固定(0 度)、信源 2 方位从 1 度变化到 10 度的性能比较

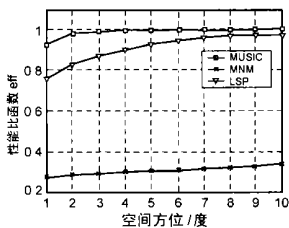


图4 信噪比为 20dB、对应空间区间取 $[0, 10]$ 、信源 1 方位固定(0 度)、信源 2 方位从 1 度变化到 10 度的性能比较

3.4 对空间维数选择的讨论

空间的维数的选取与所取的空间方位的区间大小有关,由于区间越大,对应的阵列流形相关矩阵的特征值分布越平坦,而区间越小,对应的阵列流形的相关矩阵的特征值分布越陡峭.图 5 给出 8 阵元阵列时不同区间大小对应的特征值的分布曲线.所以选取空间的维数时,可以设定一个阈值来舍去小特征值对应的特征矢量来构成空间.计算机实验证明,只要将与最大特征值一个数量级的特征值对应的特征矢量保留来构成空间.其它数量级较小的特征值对应的特征矢量的加入对性能的影响不大,如果保留反而会增加算法的运算量.通常在高分辨处理时,由于区间选取在覆盖信源方向的前提下应尽量小,特征值的分布陡峭,通常只需选取最大特征值对应的特征矢量.

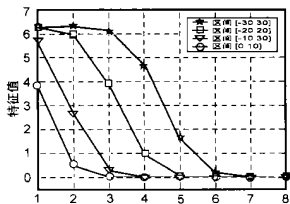


图5 不同区间下阵列流形相关矩阵特征值分布

实际应用中可以预先将不同区间的空间计算好,进行存贮,以便实时运算.

4 计算机仿真结果

我们使用 8 阵元的均匀线阵,阵元间距为 0.5 倍的波长,在空间中以阵列的法线方向为参考的 4 度、5 度的方位上有 2 个等功率的非相干的信源,信噪比为 30dB、快拍数 200.利用区间 $[0, 10]$ 构造阵列导向矢量的相关矩阵.其特性值分布见图 5,分别使用本文算法和 MUSIC、MNM 算法进行计算机仿真.下图 6~8 给出了 5 次计算机仿真的空间谱结果(维数取 1).图 9~11 为 100 次蒙特卡罗实验的统计结果,分别给出了本文算法在空间维数取 1、2、3 时与 MUSIC、MNM 算法估计成功概率、估计偏差、估计方差的比较曲线.

从计算机仿真的空间谱曲线可以看出,LSP 算法的空间谱曲线在信源真实方位处形成了尖锐的谱峰,在两信源空间方位中间的谱曲线的幅度压得低至 -20dB 左右.而常规的音乐算法的两信源空间方位中间的谱曲线的幅度为 -5dB 左右,同时可以看出,MNM 算法其分辨力高于 MUSIC 但其估

计方差明显大于 MUSIC.从蒙特卡罗实验的统计结果可以看到,本文 LSP 算法的估计偏差和信噪比分辨门限明显低于 MUSIC 算法,而估计方差几乎与 MUSIC 相同.空间的维数选取 1 和 3 时的性能几乎相同,而维数取 2 时,性能稍差.由于对于空间方位区间 $[0, 10]$ 构造阵列导向矢量的相关矩阵 R_A 的特性值分布为: $[3.8574, 0.4956, 0.0111, 0, 0, 0, 0, 0]$,可见,在选取次小特征值对应的特征矢量后,计算量增加的同时,性能并没有太大改进.所以,通常在小空间区间内只需选取最大特征值对应的特征矢量作为空间的基.

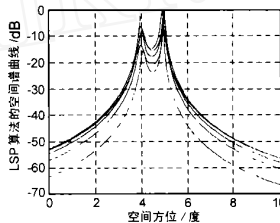


图6 LSP 算法的空间谱曲线

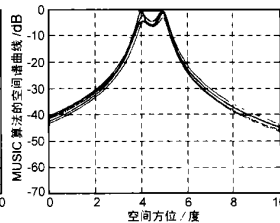


图7 MUSIC 算法的空间谱曲线

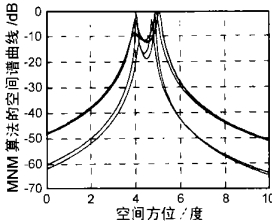


图8 MNM 算法的空间谱曲线

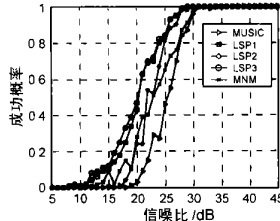


图9 估计成功概率比较曲线

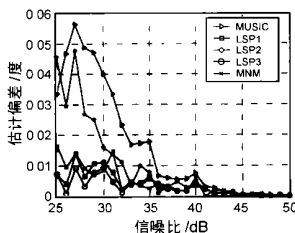


图10 估计偏差的比较曲线

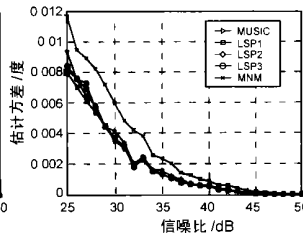


图11 估计方差的比较曲线

5 结论

本文提出一种新的用于子空间类 DOA 估计算法的阵列协方差矩阵噪声子空间投影矢量的选取方法.算法在信源大致方位内构造导向矢量的相关矩阵,利用局域子空间投影,将导向矢量相关矩阵的信号子空间与阵列接收协方差矩阵的噪声子空间的交空间作为子空间类高分辨 DOA 估计算法中导向矢量的投影空间,该投影空间既保持了与信源真实空间方位对应导向矢量的正交性,同时又保留了与信源真实空间方位附近非信源方位对应导向矢量的相关性,因此该方法有利于压低真实信源方位附近,非信源方位对应的谱曲线的高度,从而提高子空间类高分辨 DOA 估计算法的分辨力.算法性能理论分析和计算机蒙特卡罗实验的统计结果表明,LSP 算法的估计偏差、信噪比分辨门限明显低于 MUSIC 算法,而估计方差几乎与 MUSIC 相同.

参考文献:

- [1] H Krim, M Viberg. Two decades of array signal processing research [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1996:67 - 94.
- [2] S Haykin. Advances in Spectrum Analysis and Array Processing [M]. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, Inc, 1991.
- [3] R O Schmidt. Multiple emitter location and signal parameter estimations [J]. IEEE Trans AP, 1986, 34(3): 276 - 280.
- [4] R Kumaresan, D W Tufts. Estimating the angle of arrival of multiple plane waves [J]. IEEE Trans AES, 1983, 19(1): 134 - 139.
- [5] V F Pisarenko. The retrieval of harmonics form a covariance function [J]. Geophys J Roy Astronom Soc, 1973, 133: 347 - 366.
- [6] P Stoica, A Nehorai. MUSIC, maximum likelihood, and Cramer-Rao bound [J]. IEEE Trans ASSP, 1989, 37(5): 720 - 741.
- [7] P Stoica, A Nehorai. MUSIC, maximum likelihood, and Cramer-Rao bound: further results and comparisons [J]. IEEE Trans ASSP, 1990, 38(12): 2140 ~ 2150.
- [8] D Johnson. The application of spectral estimation methods to bearing estimation problems [J]. IEEE Proc, 1982, 70: 1018 - 1028.
- [9] K Sharman, T S Durrani. A comparative study of modern eigenstructure methods for bearing estimation: A new high performance approach [C]. Proc of 25 IEEE Conf Dec Contr, 1986. 1737 - 1742.
- [10] 张贤达. 信号处理中的线性代数 [M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [11] 程云鹏. 矩阵论 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1999.

作者简介:



王布宏 男, 1975 年生于山西太原, 博士生, 2000 年获空军工程大学信号与信息处理专业硕士学位, 发表论文数篇, 主要从事雷达和通信信号处理研究。



王永良 男, 1965 年生于浙江嘉兴, 教授, 博导, 1994 年获西安电子科技大学博士学位, 1994 年 6 月 ~ 1996 年 12 月在清华大学做博士后, 现为武汉空军雷达学院兵器运用工程重点实验室主任, 空军中青年高科技拔尖人才, 中国电子学会无线电分会委员, 已发表论文 100 余篇, 曾获省部级科技进步一等奖、二等奖、三等奖各一项, 主要研究领域为: 雷达技术、阵列信号处理、自适应信号处理等。

陈辉 男, 1974 年生于江苏启东, 讲师, 1999 年获武汉空军雷达学院信息处理专业硕士学位, 现为武汉空军雷达学院兵器运用工程重点实验室讲师, 已发表论文 10 余篇, 主要研究方向: 超分辨谱估计、阵列信号处理。