

四川大學

# 硕士学位论文

题 目 四川大学学位论文 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 模版 Ver. 0.1

作 者 Legendary L. 完成日期 2016 年 5 月 31 日

培 养 单 位 四 川 大 学

指 导 教 师 何培宇 教授

专 业 信号与信息处理

研 究 方 向 阵列信号处理及 DSP

授予学位日期 2016 年 6 月 1 日



# 四川大学学位论文 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 模版 Ver. 0.1

专业：信号与信息处理

研究生：Legendary L.    指导教师：何培宇 教授

基于阵列的信号处理技术广泛地应用于声呐、无线通信、雷达等领域，但在传统的阵列信号处理中，所涉及到的阵元往往较多，而稀/微阵列是由较少的阵元构成或具有较小尺寸的阵列，其规模小，同时又具备阵列所特有的技术优点，因此可以灵活应用于手持移动终端、家庭信息设备、传感器网络及空间装备等功耗、成本或体积受限的领域。此外，宽带信号是诸多领域的重要处理对象，因此基于稀/微阵列的宽带信号处理有着重要的理论研究和应用推广价值。

本论文以稀/微阵列条件下的宽带信号处理作为主要研究对象，重点针对“一般矩阵的正交子空间构造”、“虚拟阵列波达方向估计”、“分布式传感器网络测向定位”、“宽带信号增强”等关键技术开展了较为深入的研究，主要工作和主要贡献总结如下：

（1）研究了常规子空间类空间谱估计算法的原理，从理论推导和仿真两方面分析了协方差矩阵的非共轭对称性对空间谱估计的影响，利用子空间主角理论，提出了适用于一般矩阵的正交子空间及准正交子空间分解方法，也为稀/微阵列的空间谱估计奠定了理论基础。

（2）研究了典型的虚拟阵列DOA（Direction Of Arrival）估计方法，提出了两种基于虚拟扩展阵列的宽带DOA估计算法。与传统方法相比，所提算法均仅要求双阵元的稀/微阵列，且具备其他技术优点。其中，多重虚拟扩展阵列算法结合了外扩空间重采样与四阶累积量的思想，在实现对多个宽带源DOA估计的同时，也可有效地抑制高斯噪声；PAF-MUSIC（Principal Angles Free MUSIC）算法则利用构建的Toeplitz协方差矩阵进行解相干，并采用新的正交子空间，可实现多个宽带相干信号的DOA估计，且相比传统子空间有更高的分辨力。

(3) 在分析了基于传感器网络的典型测向定位方法的基础上, 提出了两类利用源间信号特征的测向定位方法, 与传统定位方法要求较多的传感器节点相比, 所提方法均仅需一个双节点传感器网络, 且每个节点是仅由两个传感器组成的稀/微阵列, 就可实现对多个目标源的定位。第一类方法利用了源间的先验几何信息, 它又包括了两种具体算法, 第一种算法为模式匹配交叉定位算法, 利用了模式匹配的思想, 可实现多个宽带源的二维定位。更进一步, 考虑目标源的高度估计, 又提出了一种旋转投影算法, 可实现多个宽带源的三维定位。第二类方法利用了源间的相关性特征, 结合目标源的DOA和TDOA (Time Difference Of Arrival) 估计, 提出了一种相关交叉点关联及定位算法, 可实现对多个相干宽带源的定位。

(4) 针对宽带信号的增强, 考虑传统的阵列信号增强方法无法应用于较少阵元或较小孔径的稀/微阵列, 提出了两种双阵元条件下基于DOA引导的宽带信号增强方法。第一种方法为SS-DG (Spectral Subtraction-DOA Guiding) 方法, 该方法利用双麦克风组成的稀/微阵列, 将双通道的DOA估计与谱减法相结合, 可抑制空间噪声及干扰, 实现对期望语音信号的增强。第二种方法为一种适用于 MISO (Multiple-Input Single-Output) 系统的基于DOA的空间信息聚焦方法, 该方法利用双天线组成的稀/微阵列, 可对多个用户的上行OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 信号进行DOA估计, 再结合下行发射的UWB (Ultra Wide Band) 信号实现对移动用户的信息聚焦。

综上所述, 本论文立足于国内外在子空间类空间谱估计、虚拟阵列扩展、传感器网络定位、宽带信号增强等方面的现状, 以宽带稀/微阵列所涉及到的理论、方法及推广应用作为主要研究内容, 相应地开展了从理论、方法再到应用的较为系统的研究, 可为稀/微阵列相关理论的推进及工程应用提供一定参考。

# The SCU Dissertation L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X Class Ver. 0.1

**Major:** Signal and Information Processing

**Postgraduate:** Legendary Leo    **Supervisor:** Prof. He Peiyu

Array signal processing technologies have been widely applied in many fields such as sonar, wireless communication, radar, etc. Conventionally, array with many elements is required to perform array signal processing. Sparse-mini array is with small number of elements or is small size. However, the sparse-mini array still holds the merits and advantages of array, so the sparse-mini array can be flexibly applied in the fields such as mobile phone, home network devices, sensor networks, space equipments, etc, where the power consumption, cost or size are sensitive. In addition, wideband signals have become the important processed objects in many fields, therefore the research on theories, methods and applications of signal processing based on sparse-mini array is very significative.

This thesis is focused on the wideband signal processing based on sparse-mini array, and deeply researches into ‘the orthogonal subspaces construction of general matrix’, ‘DOA estimation of virtual array’, ‘bearing localization of distributed sensor network’, and ‘wideband signal enhancement’. The main works and contributions are as follows.

(1) Studied on the principles of typical subspace-based spatial spectrum estimation methods, and analyzed the affection of non-Hermitian matrix on spatial spectrum estimation. An orthogonal subspace decomposition method and a quasi-orthogonal subspace decomposition method which can be applied to general matrix are proposed in this thesis, and they are also the theoretical basis for spatial spectrum estimation based on sparse-mini array.

(2) Studied on the typical DOA estimation methods based on virtual array, two wideband DOA estimation algorithms utilizing virtual expansion array are proposed. Constrasting to conventional methods, a sparse-mini array with only two elements is required in the two algorithms proposed, and other advantages can also be obtained. The first one is multiple virtual expansion array (MVEA) algorithm, and the algorithm combines external expansion spatial resampling and forth-order cumulant. Utilizing the MVEA, not only DOAs of multiple wideband sources can be estimated, but also better performance of noise suppression can be obtained. The second one is Principal Angles Free MUSIC (PAF-MUSIC) algorithm. A Toeplitz matrix is constructed by employing the output of a tow-sensor sparse-mini array to achieve de-correlation, and the DOAs of multiple wideband coherent signals can be estimated. Since a new subspace decomposition is applied, a better resolution performance than that of conventional subspace can be obtained.

(3) Based on the analysis of typical bearing localization methods using sensor network, two types of localization methods utilizing the relationship between sources are proposed. Generally, many sensor-nodes are required in conventional methods, but only a two-node sensor network is used in the new types of methods proposed, and each node of the network is a two-sensor sparse-mini array, then localization of multiple sources can be achieved. The first type method utilizes the prior geometrical information between sources, and there are two algorithms are included in this type method. The first one is named Intersections pattern matching algorithm (IPMA), and pattern matching idea is employed in the new algorithm, and the localization of multiple 2D wideband coherent sources can be achieved. Based on the same sensor network and considering the estimation of height, the second algorithm is proposed and named rotational projection algorithm (RPA), by which multiple 3D wideband coherent sources can be localized. Other type method utilizes the coherence between sources. Jointly applying DOA and time difference of arrival (TDOA), a intersection association and local-

ization algorithm is proposed, and localization of multiple coherent sources can be achieved.

(4) Considering the conventional wideband enhancement methods can not be applied on sparse-mini array with small number elements or small aperture, two DOA-based wideband enhancement methods are proposed using sparse-mini array with two elements. The first method is spectral subtraction-DOA guiding (SS-DG). A sparse-mini array with two microphones is used in the method, and by combining DOA and spectral subtraction idea, the spatial noise and interference can be suppressed, and voice enhancement can be achieved. The second enhancement method is a DOA-based information focusing scheme, which can be applied in MISO system. Using a two-antenna sparse-mini array, the DOA of OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) signals of multiple users can be estimated at uplinks. Combining the DOA and ultra wide band (UWB) signals at downlinks, the information focusing to mobile users can be achieved.

In summary, this thesis is based on the related research at home and abroad in subspace-based spatial spectrum estimation, virtual expansion of array, localization based on sensor network, wideband signal enhancement, etc. The theories, algorithm and application become the main research contents and are studied systematically, which can provide some reference for the promotion of related theories and engineering applications of sparse-mini array.





## 常用缩略词表

BF	Beamforming
DOA	Direction of Arrival



## 常用符号表

小写字母  $a$     变量  $a$

小写加粗 **a**    向量或矢量 **a**



## 目录

常用缩略词表	IX
常用符号表	XI
第一章 绪论	1
1.1 研究背景 . . . . .	1
1.2 研究意义 . . . . .	1
1.3 研究现状 . . . . .	1
1.3.1 子空间波达方向估计技术的研究现状 . . . . .	1
第二章 空间分析与构造	5
2.1 建模 . . . . .	5



# 第一章 绪论

## 1.1 研究背景

在现实的物理世界中，涉及到的传播信号（如语音、超声波、无线电信号等）扮演着重要的角色。因此对于这些信号的处理及利用一直以来都是人类科学研究的重要领域。在相当长的一段时间内，对于这些信号的处理都是基于单个传感器，以语音信号为例，典型应用就是采用单一的麦克风实现对语音信号的拾取。随着阵列信号处理技术的出现，其显现出了相比单传感器技术的极大优势，其中几个主要方面包括：

## 1.2 研究意义

稀/微阵列的典型应用主要考虑了手持移动终端应用、家庭信息设备应用、传感器网络应用以及空间装备应用。下面将围绕这四个典型应用领域详细地介绍本论文研究的意义。

## 1.3 研究现状

本论文研究的基于稀/微阵列的信号处理，从大的技术方向来讲还是属于阵列信号处理的范畴，因此很多阵列信号处理的理论和方法在稀/微阵列中也是适用的。本论文将从子空间波达方向估计、虚拟阵列、传感器网络定位及宽带信号增强这四个阵列信号处理所涉及到的典型领域进行文献回顾，这几个方向也与本论文的研究内容相一致。同时，在这些领域所涉及到的与稀/微阵列相关的内容也将进行描述。

### 1.3.1 子空间波达方向估计技术的研究现状

波达方向估计即对信号的来波方向进行估计，可简称为DOA（Direction Of Arrival）估计，属于空间谱估计的范畴，本论文如没有特别说明，空间谱估计即指波达方向估计。最早的基于阵列的空间谱估计算法可以追溯到常规波束形成（BMF，BeaM Forming）算法[1]，也叫做Bartlett波束形成算法。该算法是

时域傅里叶谱估计在空域的一种简单扩展，即用空域各阵列数据代替传统时域处理的时域数据。与时域傅里叶变换一样，空域分辨力受到空域傅里叶限即瑞利限的限制，故不能分辨一个波束宽度内的多个信号源。接着突破瑞利限的空间谱估计方法如Capon波束形成技术得到了研究[2]。二十世纪七十年代起利用子空间分解的算法开始兴起，最具代表性的经典算法有多重信号分类算法[3]、旋转不变信号子空间算法[4]以及它们的各类变种算法。二十世纪八十年代后期又出现了一批子空间拟合类算法，比较典型的有最大似然算法[5]、子空间拟合算法[6]等。

由于基于子空间理论的空间谱估计方法可以突破瑞利限，具备超分辨能力，因此有很好的估计性能，且相比最大似然等算法计算复杂度更低。此外，基于子空间理论的空间谱估计方法还可以运用包括阵列扩展在内的多种技术拓展其应用。因此，自该类方法出现伊始，就一直是空间谱估计领域的重要研究方向。已有文献对基于子空间理论的波达方向估计方法进行回顾[7]，但鉴于近些年来在该领域的一些最新进展，且子空间方法将作为本论文的重点研究内容，因此将对基于子空间理论的波达方向估计研究进行独立的文献回顾。

在本节的子空间波达方向估计研究文献回顾中，主要对多重信号分类算法、旋转不变子空间算法以及它们的各变种算法进行描述。除此之外，基于子空间理论，还涌现出了许多其他波达方向估计算法，也将一并提及。在本节的最后对子空间获取方法的相关文献进行了回顾。

#### 1.3.1.1 多重信号分类（MUSIC）类空间谱估计方法研究

多重信号分类算法，或称为MUSIC（MUltiple SIgnal Classification）算法，是子空间类空间谱估计方法的典型代表之一，它采用对接收信号所构造的协方差矩阵进行特征分解的方法求得信号子空间和噪声子空间，并基于噪声子空间进行搜索以获得空间谱。Schmidt最早于1982年在其博士学位论文中提出该方法，并命名为MUSIC（MUltiple SIgnal Characterization）[3]，于1986年又将其更名为MUltiple SIgnal Classification并发表[8]。在二十世纪八十年代末至九十年代初，对多重信号分类方法的理论研究及分析主要还是集中在传统MUSIC算法本身。进入二十一世纪，对该类方法的理论分析已是针对一些改进算法而进



行，如针对MUSIC-like算法的深入分析[9]。在多重信号分类方法的应用推广研究中，降低运算复杂度是重要方面，但算法在降低运算度的同时，估计性能往往也会降低。而E. A. Santiago 等人提出用一种迭代的子空间方法进行多个源的DOA估计，在低样点数和低SNR的情况下，相比已有的root-MUSIC算法，在具有更低计算量的同时，还能保持更好的性能[10]。实数操作相比复数操作有更低的运算要求，因此变复数运算为实数运算也是降低运算复杂度的一条有效途径[11]。除了降低运算复杂度外，具备更稳健特性的改进算法[12]也有益于该类算法的应用推广。



## 第二章 空间分析与构造

### 2.1 建模

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!