

基于空频域稀疏表示的宽频段 DOA 估计

李鹏飞* 张 旻 钟子发 罗 争
(合肥电子工程学院 309 研究室 合肥 230037)
(安徽省电子制约技术重点实验室 合肥 230037)

摘 要: 该文提出一种基于空频域稀疏表示的宽频段波达方向(DOA)估计方法, 解决稀疏表示方法在宽带接收机对窄带信号的频率和角度估计中的难题。用空间频率代替频率和方位角的 2 维组合构建过完备字典, 字典的长度仅相当于窄带信号 DOA 估计的字典长度, 却能覆盖整个无模糊频段, 大大降低了稀疏分解的计算量。该方法首先在频域估计信号的准确频率, 根据频域峰值的位置构建频域峰值协方差矩阵。对频域峰值协方差矩阵进行特征分解, 利用主特征向量建立稀疏模型估计信号的 DOA。算法在低信噪比下具有较高的估计精度, 仿真实验和分析验证了该文方法的正确性和有效性。

关键词: 信号处理; 波达方向; 空间频率; 稀疏表示; 神经网络; 宽频段

中图分类号: TN911.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)02-0404-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00503

Broadband DOA Estimation Based on Sparse Representation in Spatial Frequency Domain

Li Peng-fei Zhang Min Zhong Zi-fa Luo Zheng

(Laboratory 309, Electronic Engineering Institute of Hefei, Hefei 230037, China)

(Key Laboratory of Electronic Restricting Technique, Anhui Province, Hefei 230037, China)

Abstract: A novel wide-band Direction-Of-Arrival (DOA) estimation method based on space-frequency sparse representation is proposed to estimate the frequency and DOA of narrow band signal with a wide band receiver. The over-complete dictionary is constructed by using space-frequency to replace the 2D combination of frequency and azimuth. Although the length of constructed dictionary equates to the length of narrow signal DOA estimation's dictionary, it could cover the whole unambiguous frequency. The precise frequency of signal is estimated through frequency spectral searching, and the frequency covariance matrix is constructed based on the position of frequency spectral peak. Then DOA can be obtained using the sparse representation of the large eigenvectors, which are coming from the frequency peak covariance matrix's Eigenvalue Decomposition (ED). The proposed method has a higher precision in the low Signal to Noise Ratio (SNR), and the number estimated can be much more than the array numbers. The experiment results indicate that the proposed method is correct and effective to estimate the frequency and DOA of narrow signal for wide-band receiver.

Key words: Signal processing; Direction Of Arrival (DOA); Spatial frequency; Sparse representation; Neural network; Broadband

1 引言

在现代电子战信号环境中, 由于信号密度大, 信号形势复杂, 使得电子侦察中的信号处理任务越来越困难。实际的测向装备, 特别是无线电通信测向面临的是一个很宽的频段(如频率范围在 30~3000 MHz)。为了提高测向的搜索速度, 测向接收机的瞬时带宽朝着宽带的趋势发展, 可以达到几十 MHz,

甚至上百 MHz。在如此宽的瞬时带宽内, 必然包含了很多不同频率的多种信号, 如何对这些信号的方向进行实时、高精度的估计是一个巨大的挑战。直接利用传统的高分辨率测向算法如多重信号分类法^[1](Multiple Signal Classification, MUSIC)将会产生严重的估计误差, 且无法获得信号的准确频率^[2]。并且 MUSIC 算法不能直接对相干信号进行处理, 利用空间平滑的方法解相干将损失一定的阵列孔径。利用稀疏分解的方法进行 DOA 估计具有很高的分辨率, 不需要进行任何预处理, 可以直接应用到相干信号上来, 得到了国内外学者的广泛关

2011-05-25 收到, 2011-09-05 改回

国家自然科学基金(60972161)资助课题

*通信作者: 李鹏飞 cee_li@163.com

注^[3-6]。但是在进行宽频度 DOA 估计时字典的构造是一个难题, Malioutov 等^[5]提出了根据频率和方位角的组合构建联合字典的方法。随着频段的展宽, 用于稀疏表示的过完备字典的长度随之增加。一方面, 稀疏分解的计算量将随着字典的长度指数倍的增长^[7]; 另一方面, 在宽频段的范围内很难保证过完备字典没有相同的元素, 当存在相同或者相近的元素时, 字典的相关系数接近于 1, 稀疏分解的精度急剧下降^[8]; 另外, 该方法能分辨的信号数目受到阵元数目的限制。

针对以上问题, 本文引入空间频率的概念, 将频率和方位角的 2 维空间降为空间角的 1 维空间。利用空间角构建稀疏表示的过完备字典, 字典长度大大降低, 减少了稀疏分解的计算量。为了提高算法在低信噪比的性能, 摒弃了常用的在时域或频域的稀疏模型, 对频域峰值协方差矩阵进行特征分解, 利用主特征向量建立稀疏模型进行 DOA 估计。算法从频域对信号的频域分布进行了预估计和分离, 估计的信号数目能远大于阵元数目。

2 数学模型

2.1 阵列信号的数学模型

假设 p 个远场信号入射到阵元间距为 r 的 M 元均匀线阵上。第 i 个信号的方位角为 θ_i , 信号频率为 f_i 。 M 个阵元接收到的信号写成一个矢量, 可表示为

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}(f, \theta)\mathbf{S} + \mathbf{N} \quad (1)$$

其中 $\mathbf{A}(f, \theta)$ 是阵列流型矩阵, $\mathbf{S}(t) = [s(f_1), s(f_2), \dots, s(f_p)]^T$ 为空间信号矢量, 噪声矩阵 $\mathbf{N}(t)$ 是独立于信号的白高斯过程。阵列流型为

$$\mathbf{A}(f, \theta) = [\boldsymbol{\alpha}(f_1, \theta_1), \dots, \boldsymbol{\alpha}(f_p, \theta_p)] \quad (2)$$

其中第 i 个导向矢量为

$$\boldsymbol{\alpha}(f_i, \theta_i) = \left[1, e^{-j\frac{2\pi f_i r \cos \theta_i}{c}}, \dots, e^{-j\frac{2\pi f_i (M-1)r \cos \theta_i}{c}} \right]^T, \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (3)$$

c 为电磁波传播的速度。

对于具有相同频率的多个窄带信号 $f_i = f_2 = \dots = f_p$, 信号的阵列模型与式(1)描述相同。常规的测向方法多建立在测向接收机是窄带接收机的基础上, 接收的信号可以看作是在中心频率附近很窄的频率范围内, 因此这些算法可以直接运用。而宽带测向接收机具有很宽的瞬时测向带宽, 在一帧的采样数据内, 可能包含多个窄带信号或者宽带信号。MUSIC 等算法处理起来难度就大大增加了, 需要将整个宽频段划分为若干个窄带子频段, 然后进行处理。这样在每个子频段需要根据中心频率的不同分

别建立方向矢量, 大大增加了存储的空间和计算量。同时该方法不能直接对相干信号进行处理, 而利用空间平滑的方法解相干又将损失一定的阵列孔径。

2.2 基于稀疏表示的 DOA 估计模型

Malioutov^[5]提出了一种利用信号稀疏表示进行 DOA 估计的方法。其主要思想是将信号的阵列流型矩阵扩展成一个过完备的冗余字典 \mathbf{D} , 它包含了所有可能的源位置信息。令 $\boldsymbol{\theta} = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N\}$ 代表所有可能的源位置的一个采样集合, θ_n 代表信号的到达角度(DOA), 方向矩阵 \mathbf{A} 可扩展成如下的过完备字典:

$$\mathbf{D} = [\boldsymbol{\alpha}(f, \theta_1), \dots, \boldsymbol{\alpha}(f, \theta_N)] \quad (4)$$

定义 $N \times 1$ 的信号向量 $\mathbf{H} = \{h_1, h_2, \dots, h_N\}$, 当且仅当源信号位于角度 θ_n 处, h_n 有非零值, 其他分量均为零, 可以得到 DOA 估计的稀疏模型为

$$\mathbf{X} = \mathbf{D}\mathbf{H} \quad (5)$$

然后利用基追踪(Basic Pursuit, BP)^[9]等稀疏分解算法求得 \mathbf{H} , 根据 \mathbf{H} 中非零元素的位置可以得到信号的 DOA。为了进行宽频段 DOA 估计, Malioutov^[5]根据宽带范围内若干个频率点的导向矢量矩阵分别建立子字典, 然后根据把这些子字典组合成一个新的字典。

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}(f_1, \boldsymbol{\theta}) & & & & \\ & \mathbf{D}(f_2, \boldsymbol{\theta}) & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & \mathbf{D}(f_n, \boldsymbol{\theta}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

从式(6)可以看出, 随着频段的展宽, 字典的长度极剧增长, 稀疏分解的计算量也指数倍的增长。考虑同子字典中的两个元素 $\boldsymbol{\alpha}(f_i, \theta_i)$ 、 $\boldsymbol{\alpha}(f_k, \theta_k)$, 当 $f_i \sin(\theta_i) = f_k \sin(\theta_k)$ 时, $\boldsymbol{\alpha}(f_i, \theta_i) = \boldsymbol{\alpha}(f_k, \theta_k)$ 。此时, 字典的相干度为 1, 稀疏分解的精度将很难保证^[8]。

3 基于空间频率稀疏表示的宽频段 DOA 估计

3.1 基于空间频率的频域稀疏模型的构建

对于宽频段的 DOA 估计, 简单高效的冗余字典构造是一个迫切需要解决的难题。定义空间频率 $\eta = f_i r \cos \theta_i / c$, 则式(3)可表示为

$$\boldsymbol{\alpha}(\eta) = [1, e^{-j2\pi\eta}, \dots, e^{-j2\pi(M-1)\eta}]^T, \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (7)$$

对于均匀线阵为了保证无模糊测向, 要求 $f_i r / c \leq 0.5$ 。因此空间频率的取值范围为 $-0.5 \leq \eta \leq 0.5$ 。根据空间频率的取值范围, 设置 N 个采样点, 就可以构建覆盖整个无模糊频段的过完备字典:

$$\mathbf{D} = [\boldsymbol{\alpha}(\eta_1), \boldsymbol{\alpha}(\eta_2), \dots, \boldsymbol{\alpha}(\eta_N)] \quad (8)$$

为了对宽频段范围内的多个窄带信号进行

DOA 估计,我们从频域构建 DOA 估计的稀疏模型。假设信号与噪声相互独立,中心频率为 f 的阵列协方差为

$$\mathbf{R}(f) = \mathbf{E}\{\mathbf{X}(f)\mathbf{X}^H(f)\} = \mathbf{A}(f)\mathbf{R}_S(f)\mathbf{A}^H(f) + \delta^2\mathbf{I} \quad (9)$$

其中 \mathbf{I} 为单位矩阵, $\mathbf{R}_S(f)$ 是频率为 f 信号的协方差矩阵。常用的稀疏表示 DOA 估计方法大多是在时域或频域建立稀疏模型,容易受到噪声的影响。本文从子空间域建立 DOA 估计的稀疏模型,对 \mathbf{R} 做特征值分解得

$$\mathbf{R}(f) = \sum_{i=1}^M \lambda_i \mathbf{e}_i \mathbf{e}_i^H \quad (10)$$

如果信号协方差矩阵的秩为 $K(K \leq p)$,噪声协方差矩阵 $\mathbf{R}_N = \delta^2\mathbf{I}$ 为满秩矩阵,则有如下线性关系^[10]:

$$\mathbf{R}_N \mathbf{e}_k = \sum_{i=1}^p \mathbf{a}(f, \theta_i) h_k(i) \quad (11)$$

其中 $1 \leq k \leq K$, \mathbf{e}_k 为特征矢量, $h_k(i)$ 为线性组合因子。由式(11)可知,当噪声协方差矩阵为理想白噪声时,式(11)即简化为

$$\mathbf{e}_k = \sum_{i=1}^p \mathbf{a}(\theta_i) h_k(i) \quad (12)$$

式(12)说明无论信号源是否相干,大特征值对应的特征矢量是各信号源方向矢量的一个线性组合。令协方差矩阵的最大特征值为 e_{\max} ,则

$$\mathbf{e}_{\max} = \sum_{i=1}^p \mathbf{a}(f, \theta_i) h(i) = \mathbf{A}(f)\mathbf{H} \quad (13)$$

根据式(8)的过完备字典,构建式(13)的稀疏模型。

$$\mathbf{e}_{\max} = \mathbf{D}\mathbf{H} \quad (14)$$

其中 $\mathbf{H} = \{h_1, h_2, \dots, h_N\}$ 为 $N \times 1$ 的信号向量,当且仅当源信号的空间频率位于 η_n 处, h_n 有非零值,其他分量均为零。对式(14)进行稀疏分解得到 \mathbf{H} , \mathbf{H} 中非零元素的位置就代表了空间目标的空间频率信息。不同于基于快拍数据稀疏分解的 DOA 估计方法,特征值分解减弱了噪声的影响,而选取最大特征值对应的特征向量进一步减弱了噪声的影响,因此本文方法在低信噪比情况下鲁棒性较好。

3.2 基于频域峰值协方差矩阵的频率和角度估计方法

宽带接收机采集的一帧数据中,可能包含多个不同频率点的窄带信号。首先需要对不同频点上的窄带信号进行分离。如果利用等分的方法将宽频段分成若干子频段再针对每个子频段进行处理,将会对没有信号子频段进行运算,白白增加了计算复杂度。因此本文根据信号在频域的分布特点,自适应地进行信号的分离,然后针对有信号的频点建立

模型进行 DOA 估计。具体算法步骤如下:

步骤 1 宽频段内窄带信号频率估计和分离

首先对阵列接收数据进行傅里叶变换,即对各通道的接收数据分别做 N 点 FFT;其次,测频并获取频域样本,对任一通道 FFT 后的结果进行谱峰搜索,并记录谱峰值和相应的频点坐标 f_k ,其它通道根据频点坐标取出相应位置的频域复数值构成相应的数据矢量 $\mathbf{y}(n_k)$,称为频域快拍矢量。

$$\mathbf{y}(n_k) = \mathbf{A}(n_k)\mathbf{S}(n_k) + \mathbf{W}(n_k) \quad (15)$$

其中 $\mathbf{S}(n_k) = [s_1(n_k), s_2(n_k), \dots, s_p(n_k)]$ 为 p 个信号在频域 n_k 的输出矢量。 $\mathbf{W}(n_k) = [w_1(n_k), w_2(n_k), \dots, w_M(n_k)]$ 为噪声在频域 n_k 的输出矢量。

步骤 2 基于频域峰值协方差矩阵特征向量的稀疏 DOA 估计模型

对式(15)中的频域峰值快拍矢量求协方差矩阵:

$$\mathbf{R}(n_k) = \mathbf{E}\{\mathbf{y}(n_k)\mathbf{y}^H(n_k)\} \quad (16)$$

对式(16)进行特征值分解:

$$\mathbf{R}(n_k) = \sum_{i=1}^M \lambda_i \mathbf{e}_i \mathbf{e}_i^H \quad (17)$$

利用其最大的特征向量 \mathbf{e} ,根据 3.1 节的变换构建 DOA 估计的稀疏表示模型:

$$\mathbf{e} = \mathbf{D}\mathbf{H} \quad (18)$$

其中 \mathbf{D} 是利用空间频率构建的过完备字典。

步骤 3 窄带多信号频率和 DOA 的估计

对式(18)进行稀疏分解,得到频域 n_k 处信号对应的空间频率 $\boldsymbol{\eta} = [\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_p]$ 。其中, p 为频域 n_k 处信号的个数。则频率 n_k 处的信号的来波方向可以通过式(19)求得

$$\theta_i = \arccos(\eta_i c / n_k d), \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (19)$$

重复步骤 1 到步骤 3 就可以得到所有宽频段范围内所有信号的频率和来波方向。

3.3 稀疏表示的求解

求解式(18)是一个稀疏分解的过程,找到最好的,也就是最稀疏的信号表示,等同于解决下述问题:

$$\left. \begin{array}{l} \min \|\mathbf{H}\|_0 \\ \text{s.t. } \mathbf{e} = \mathbf{D}\mathbf{H} \end{array} \right\} \quad (20)$$

其中 $\|\mathbf{H}\|_0$ 是序列 \mathbf{H} 中非零项的个数。从一个随机冗余字典中寻找信号的稀疏扩展是一个 NP 难问题,为解决这一难点,Chen 等人^[9]将其转化为解决下述稍有差别的问题:

$$\left. \begin{array}{l} \min \|\mathbf{H}\|_1 \\ \text{s.t. } \mathbf{e} = \mathbf{D}\mathbf{H} \end{array} \right\} \quad (21)$$

当上述模型含有噪声时，式(21)的约束条件不再适用，问题转化为最小化目标函数：

$$\min \|e - \mathbf{D}\mathbf{H}\|_2 + \lambda \|\mathbf{H}\|_1 \quad (22)$$

目标函数中前一项反映失配程度，后一项反映稀疏性要求。由于 \mathbf{H} 是复数，它的 l_1 范数为

$$\|\mathbf{H}\|_1 = \sum_{i=1}^N \sqrt{\text{Re}(\mathbf{H}(i))^2 + \text{Im}(\mathbf{H}(i))^2} \quad (23)$$

可以发现式(23)的两边平方仍不能消除平方根项，直接导致我们不能使用二次规划的方式最小化目标函数。为了解决这个问题，我们采用二阶锥规划的方法，其转化形式为

$$\left. \begin{aligned} \min \quad & s + \lambda \mathbf{1}^T \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{Z} = \mathbf{e} - \mathbf{D}\mathbf{H} \\ & \|\mathbf{Z}\| < s \\ & \|\text{Re}(\mathbf{H}(i)), \text{Im}(\mathbf{H}(i))\|_2 < t_i, \quad i \in \{1, 2, \dots, N\} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

利用内点法可以有效解决上述优化问题，得到式(14)中稀疏分解的系数，进而根据非零元素的位置求得信源的 DOA 估计值。

4 性能分析

本节主要通过理论和仿真实验对算法的性能进行深入分析，以探讨各种的因素对算法性能的影响。实验中，仿真某型号测向设备的参数，天线阵列采

用的是 5 元均匀线阵，阵元间距为 0.6 m，测向接收机的瞬时带宽为 40 MHz，接收机的中频为 70 MHz，采样频率为 92.16 MHz。

4.1 有效性分析

假设 9 个窄带信号入射到天线阵列，9 个信号中有频率重叠的。信噪比为 10 dB，FFT 变换的点数为 8192 点。表 1 为目标的真实值和估计值；图 1 为频率和 DOA 估计结果。

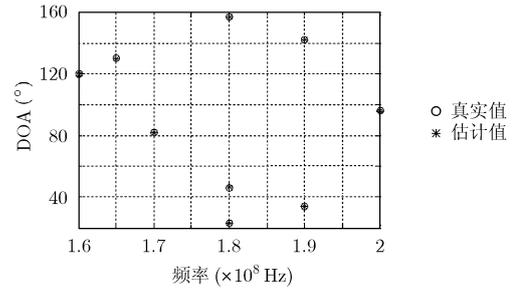


图 1 宽频段的频率和 DOA 估计结果

从表 1 和图 1 可以看出，本文方法对宽频段内的多个信号的频率和 DOA 可以达到很高的估计精度。频率的估计误差小于 50 kHz，角度的估计误差在 1°以内。具有优越的工程应用价值。

表 1 目标的真实值与估计值

	目标 1	目标 2	目标 3	目标 4	目标 5	目标 6	目标 7	目标 8	目标 9
真实值	160 MHz 120°	165 MHz 131°	170 MHz 82°	180 MHz 23°	180 MHz 46°	180 MHz 157°	190 MHz 34°	190 MHz 142°	200 MHz 96°
估计值	160.03 MHz 121°	165.04 MHz 129.8°	170.04 MHz 81.9°	180.05 MHz 22.7°	180.05 MHz 46.4°	180.05 MHz 156.8°	189.95 MHz 33.9°	189.95 MHz 142.1°	199.95 MHz 96.1°

表 2 是本文方法和文献[5]方法的性能比较。仿真环境：Matlab7.5 平台，Pentium 4 处理器，1 G 内存，接收机的瞬时带宽为 40 MHz。文献[5]方法中，每隔 10 MHz 抽取一个频点建立过完备字典，字典长度为 1795；本文方法利用空间频率建立字典，字典长度仅为 201，却能覆盖整个频段。本文方法的角度和频率估计精度远优于文献[5]的方法，而运算时间却是后者的三十分之一。

表 2 算法的性能比较

算法	字典长度	计算时间(s)	角度估计均方根误差(°)	频率估计均方根误差(Hz)
本文方法	201	0.314	0.3	50
文献[5]方法	1795	11.6	2.6	2340

4.2 频率估计误差的影响

为了降低宽带稀疏分解时字典的长度，引入了空间频率的概念。定义为 $\eta = fr \sin \theta / c$ ，可以理解为信号频率和阵元位置引起时延的乘积。因此频率估计的误差会对来波方向的估计精度产生影响。信号的波达方向和频率存在如下的关系：

$$\theta = \arccos(\eta c / fr) \quad (25)$$

$$\frac{d\theta}{df} = \frac{d \arccos(\eta c / fd)}{df} = \frac{\eta c}{rf^2 \sqrt{1 - (\eta c / fr)^2}} \quad (26)$$

从式(26)可以看出，随着频率的升高，测频误差对 DOA 估计的影响越小。假设有同频相干两个信号入射到天线阵列，信号的角度在 0°~90°范围内随机产生，分析频率估计误差对 DOA 估计精度的影响，图 2 为均方根误差随频率估计误差的变化曲

线。每个频率估计误差下进行 1000 次独立实验。

从图 2 可以看出, 随频率估计误差的增加, 角度估计误差也随之增加。但是在频率估计误差小于 1 MHz 时, 角度估计的均方根误差小于 0.5° 。目前基于 FFT 变换的测频技术在采样点数足够的情况下, 可以保证测频误差只有几 Hz^[1]。因此本文提出的方法可以忽略测频误差的影响。

4.3 信噪比的影响

本文提出的方法具有良好的抗噪声干扰能力, 这与算法中采取的两个运算操作有关:

(1)算法在实现的过程中, 利用 N 点 FFT 变换将信号从时域变换到频域。因为对于信号, 该变换使信号相干积累, 而噪声在整个频率均匀分布是非相干叠加, 信噪比提高了 N 倍。

(2)在构建信号的稀疏模型中, 采用的频域峰值协方差矩阵的最大特征向量。特征值分解减弱了噪声的影响, 而选取最大特征值对应的特征向量进一步减弱了噪声的影响。

假设有同频相干两个信号入射到天线阵列, 信号的角度在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内随机产生, 分析信噪比对 DOA 估计精度的影响, 图 3 为均方根误差随信噪比变化关系。每个信噪比下进行 1000 次独立实验。

从图 3 可以看出, 本文方法对噪声具有良好的抑制能力。在信噪比 -10 dB 时, 均方根误差达到 0.6° ; 信噪比大于 0 dB 时, 均方根误差小于 0.2° 。算法的良好抗噪声性能与理论分析一致。

4.4 同频信号功率不一致的影响

本文方法采用的是频域峰值协方差矩阵的最大

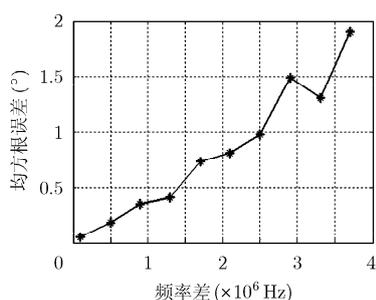


图 2 均方根误差随频率估计误差变化关系

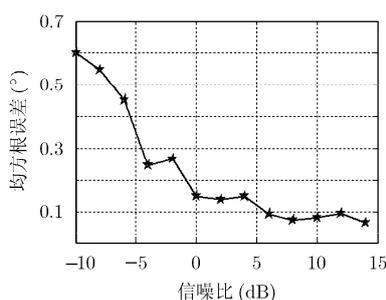


图 3 均方根误差随信噪比变化关系

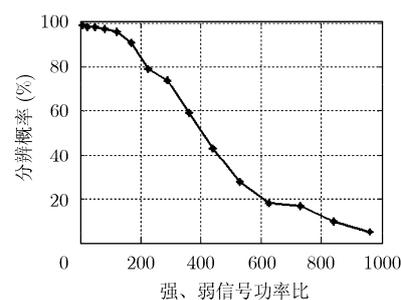


图 4 分辨概率同信号功率比之间关系

特征向量作为稀疏分解的输入矢量, 削弱了噪声的影响。但是对于同频率的两个信号, 信号功率的不同会对其造成一定的影响。假设有两个同频但功率不同的信号入射到天线阵列, 信号的角度在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内随机产生, 分析分辨概率同信号功率比之间关系(如图 4 所示)。每个功率比下进行 1000 次独立实验。

从图 4 可以看出, 强信号会对弱信号的估计产生一定的影响, 但是这种影响对一般的应用场合影响不大。在强弱信号功率比小于 200 时, 分辨概率大于 80%, 适用于大多数应用场合。对特殊应用场合, 例如强干扰下的微弱信号 DOA 估计, 我们采取了归一化信号子空间的处理方法, 将另文讨论。

5 结束语

对宽频段范围内的多个窄带信号进行频率和方位角的估计对于无线电测向特别是通信信号测向具有十分重要的意义。本文提出一种基于空间频率稀疏分解的宽频段估计方法。理论分析和仿真实验验证了本文方法对宽频段内的多个窄带信号可以达到很高的估计精度。该方法利用空间频率代替频率和方位角的 2 维组合构建过完备字典, 字典的长度仅相当于窄带信号 DOA 估计的字典长度, 却可以覆盖整个测向频段; 利用 FFT 变换和频域峰值协方差矩阵的特征向量大大降低了噪声的影响, 估计的信号数目能远大于阵元数目。论文主要讨论对宽频段内的多个窄带信号进行来波方位估计, 下一步将对多个相干或不相干宽带信号进行估计。

参考文献

- [1] Schmidt R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation [J]. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 1986, 34(3): 276-280.
- [2] 刘聪锋, 廖桂生. 宽带接收机的窄带信号频率和 2 维角度估计新方法[J]. *电子学报*, 2009, 37(3): 523-528.
Liu Cong-feng and Liao Gui-sheng. Novel method of narrow band signal frequency and 2D angle estimation for wide band receiver [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(3): 523-528.
- [3] Guo Xian-sheng, Wan Qun, Chang Chun-qi, et al. Source localization using a sparse representation framework to achieve superresolution [J]. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 2010, 21(4): 391-402.
- [4] Md Mashud Hyder and Kaushik Mahata. Direction-of-Arrival estimation using a mixed $L_{2,0}$ norm approximation [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(9): 523-528.

- 4646-4655.
- [5] Malioutov D, Cetin M, and Willsky A S. A sparse signal reconstruction perspective for source localization with sensor arrays [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2005, 53(8): 3010-3022.
- [6] Zhang Shu, Li Yu-mei, and Song Jun-cai. A novel method for DOA estimation based on generalized-prior distribution [C]. 2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, Changsha, China, 2010: 244-247.
- [7] Duarte M F, Wakin M B, and Baraniuk R G. Fast reconstruction of piecewise smooth signals from incoherent projections. Workshop on Signal Processing with Adaptive Sparse. Structured Representations-SPARS'05, Rennes, France, 2005. <http://spars05.isisa.fr/ACTES/TS5-3.pdf>.
- [8] Donoho D and Huo X. Uncertainty principles and ideal atomic decompositions [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2001, 47(7): 2845-2862.
- [9] Chen Hao-bing, Donoho D L, and Saunders M A. Atomic decomposition by basis pursuit[J]. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 2001, 20(1): 33-66.
- [10] Cadzow J A, Kim Y S, and Shiue D C. General direction-of-arrival estimation: a signal subspace approach. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1989, 25(1): 31-47.
- [11] 万灵达, 杨晓光. 一种基于 FFT 的高精度频率估计算法[J]. 电子科技, 2010, 23(10): 79-81.
- Wan Ling-da, Yang Xiao-guang. A high-accuracy frequency estimation algorithm based on FFT [J]. *Electronic Science & Technique*, 2010, 23(10): 79-81.
- 李鹏飞: 男, 1983 年生, 博士生, 研究方向为阵列信号处理和智能信息处理.
- 张 旻: 男, 1966 年生, 教授, 博士, 主要从事通信信号处理、计算智能等方向研究.
- 钟子发: 男, 1957 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事通信信号处理、数据融合等方向研究.