

# 阵元间距对 MUSIC 算法的影响

郭 跃,王宏远,周 隼

(武汉华中科技大学电信系数字视频技术与通信研究所,湖北武汉 430074)

**摘 要:** 本文概述了 MUSIC 算法,当阵元间距不大于载波半波长时,通过分析得出 MUSIC 算法空间分辨率随阵元间距增大而提高,并推导阵元间距与 MUSIC 算法性能的定量关系;当阵元间距大于载波半波长时,讨论空间谱可能出现虚假谱峰的情况,并提出提取真实谱峰的方案.最后通过计算机模拟仿真验证文中结论.

**关键词:** 天线阵列;波达方向;多信号分类算法;阵元间距;空间谱

**中图分类号:** TN911.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 09-1675-05

## Effect of Array Elements Spacing on MUSIC Algorithm

GUO Yue, WANG Hong-yuan, ZHOU Zou

(Digital Video Technology and Communication Institute, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract:** Based on summarizing MUSIC algorithm, the quantitative relationship, that the performance of MUSIC algorithm gets better while array elements spacing becomes longer, was analyzed under the condition of array elements spacing not larger than half wavelength of carrier; the possible occurrence of false peaks was discussed as array elements spacing was larger than half wavelength of carrier, and one solution to pick up true peaks was provided. At last, the conclusions in this paper are verified by simulation experiments.

**Key words:** antenna array; DOA; MUSIC (multiple signal classification) algorithm; array elements spacing; spatial spectrum

### 1 引言

超分辨率测向技术能够精确估计方位,并克服传统测向体制的缺陷,开辟了现代阵列信号处理的新时代,广泛用于雷达,声纳,天文,地球物理,地震,智能天线等领域,最近还出现了与基于 802.11 系列的无线局域网相结合起来的定位应用<sup>[1]</sup>. MUSIC (Multiple Signal Classification) 算法<sup>[2]</sup>就是其中最为经典的一种,其估计性能能够达到 Cramer-Rao 下界.该算法自从提出以来,已经有很多学者对它的性能进行了各种各样的详细定量和定性分析. B. Porat 提出使用相对有效参数来对 MUSIC 算法进行分析<sup>[3]</sup>, H. Wang 提出使用根值均方误差来对 MUSIC 算法精度进行讨论<sup>[4]</sup>, Y. Guo 则提出了使用置信区间的这样一种更加直观的标准来评价 MUSIC 算法<sup>[5]</sup>.在这些参考文献中,都深入地讨论了快拍数,阵元个数,信噪比,波达方向角等因素对 MUSIC 精度的影响,并且给出了定量的计算公式和相应的仿真实验.事实上,除上述因素外,天线阵列阵元间距也会影响对 MUSIC 算法的精度,甚至导致 MUSIC 算法的空间谱 DOA

(Direction of Arrival) 估计出现虚假谱峰<sup>[6]</sup>,使得算法失效.本文在简述 MUSIC 算法的基础上,详细定量分析阵元间距对 MUSIC 算法性能的影响,并深入讨论阵元间距大小引起空间谱虚假谱峰的各种具体情况,并且提出了使用不同载波频率的方法提取真实谱峰的原理方案.

### 2 MUSIC 算法数学模型

为便于分析且不失讨论一般性,设有  $P$  个窄带不相关信源从远场以不同角度  $\theta_p$  入射到含  $M$  个阵元,阵元间距为  $d$  的均匀线阵 (Uniform Linear Array, ULA). 将天线阵列各阵元接收到的信号写为矢量形式,

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}(\theta) \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

其中  $\mathbf{x}(t) = [x_0(t), x_1(t), \dots, x_{M-1}(t)]^T$  为输出矢量;  $\mathbf{s}(t) = [s_0(t), s_1(t), \dots, s_P(t)]^T$  为信源矢量;  $\mathbf{n}(t) = [n_0(t), n_1(t), \dots, n_{M-1}(t)]^T$  为加性高斯噪声列矢量;  $\mathbf{A}(\theta) = [a_1(\theta), a_2(\theta), \dots, a_P(\theta)]$  为方向矩阵;  $a_p(\theta) = \frac{1}{M} [1, e^{-j\theta d}, e^{-j2\theta d}, \dots, e^{-j(M-1)\theta d}]^T$  为导向矢量,其中  $\theta_p = m d \sin \theta_p / C$ . 输出矢量相关矩阵为,

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{x}(t) \mathbf{x}^H(t)] = \mathbf{A} \mathbf{R}_s \mathbf{A}^H + \sigma^2 \mathbf{I} \quad (2)$$

其中  $\mathbf{R}_s = E[\mathbf{s}(t) \mathbf{s}^H(t)]$  表示信源矢量的自相关矩阵,  $\sigma^2$  为加性高斯噪声的方差.

对  $\mathbf{R}$  进行特征分解,  $\mathbf{A}(\cdot)$  和信号子空间  $U_s$  相同, 与噪声子空间  $U_n$  正交. 定义空间谱为

$$P(\cdot) = 1 / [\mathbf{a}^H(\cdot) \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^H \mathbf{a}(\cdot)] \quad (3)$$

对空间谱进行峰值搜索可以得到波达方向的估计.

### 3 阵元间距与 MUSIC 算法性能的定量关系

从定性的角度来看, 天线阵列的分辨率与其孔径大小是成正比的. 在天线阵列阵元间距不大于半波长的情况下, 随着阵元间距的变大, 空间谱的谱峰也相应变大, MUSIC 算法空间分辨率更高. 这正是由于阵元数目不变时, 阵元间距变大, 相当于是阵列孔径增大的缘故.

对于定量分析, 事实上输出自相关矩阵  $\mathbf{R}$  未知, 但从阵元输出矢量估计得到.  $\mathbf{R}$  的估计量为

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbf{x}(n) \mathbf{x}^H(n) \quad (4)$$

由于采样误差总是不可避免的存在于自相关矩阵  $\mathbf{R}$  的估计中, 比如噪声的干扰, 因此这将导致空间谱函数  $P(\cdot)$  产生误差. 但是可以使用统计方法来评价 MUSIC 算法的性能. 为使分析方便, 假设构成信号子空间  $U_s$  和噪声子空间  $U_n$  的所有特征向量都已经归一化, 定义空间倒谱如下,

$$Z(\cdot) = 1 / P(\cdot) = \mathbf{a}^H(\cdot) \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^H \mathbf{a}(\cdot) \quad (5)$$

当快拍数很大时, 估计误差服从零均值的渐近联合高斯分布<sup>[3]</sup>. 可用空间倒谱的置信区间的大小来评价使用 MUSIC 算法估计性能受阵元间距的影响. 如果置信区间越小, 则表示算法性能越好, 空间分辨率越高. 由于对于  $Z(\rho) \sim N(\mu_p, \sigma_p^2)$  而言, 其均值  $\mu_p$  和方差  $\sigma_p^2$  都是未知的, 则  $Z(\rho)$  的置信区间为  $(E[Z(\rho)] - \frac{\text{var}[Z(\rho)]}{\sqrt{N}} t_{/2}(N-1), E[Z(\rho)] + \frac{\text{var}[Z(\rho)]}{\sqrt{N}} t_{/2}(N-1))$ , 相应的置信区间大小为

$$l = 2 \times \frac{\text{var}[Z(\rho)]}{\sqrt{N}} t_{/2}(N-1) \quad (6)$$

为推导置信区间大小和阵元间距的定量关系, 先通过  $\mathbf{R}$  的特征向量和特征值的渐近统计性质求方差  $\text{var}[Z(\rho)]$ . 设  $\hat{u}_i = u_i + \epsilon_i$ , 其中  $\epsilon_i$  代表特征值  $\lambda_i$  相应归一化特征向量  $u_i$  的误差, 则有渐近统计特性<sup>[3]</sup>,

$$E[\epsilon_i \epsilon_i^H] = \frac{\lambda_i}{N} \sum_{m=1, m \neq i}^M \frac{1}{(\lambda_i - \lambda_m)^2} u_m u_m^H \quad (7)$$

$$E[\epsilon_i^H \epsilon_i] = \frac{\lambda_i}{2N} \sum_{m=1, m \neq i}^M \frac{1}{(\lambda_i - \lambda_m)^2} u_i^H u_i \quad (8)$$

利用上面两式可以求得空间倒谱  $Z(\cdot)$  的估计的期望为,

$$E[Z(\cdot)] = E[1 - \mathbf{a}^H(\cdot) \mathbf{U}_s \mathbf{U}_s^H \mathbf{a}(\cdot)] Z(\cdot) - \mathbf{a}^H(\cdot) \left\{ \sum_{p=1}^P \left[ \sum_{m=1, m \neq p}^M \frac{1}{N(\lambda_p - \lambda_m)^2} (u_m u_m^H - u_p u_p^H) \right] \right\} \mathbf{a}(\cdot) \quad (9)$$

假设信源个数  $P=2$ , 其功率均为  $\frac{2}{s}$ , 由上式可得,

$$E[Z(\cdot)] = Z(\cdot) \left[ 1 - \frac{1}{N(\lambda_1 - \lambda_2)^2} - \frac{1}{N(\lambda_2 - \lambda_1)^2} \right] + \frac{2}{N} \mathbf{a}^H(\cdot) \left[ \frac{(M-2)}{(\lambda_1 - \lambda_2)^2} u_1 u_1^H + \frac{(M-2)}{(\lambda_2 - \lambda_1)^2} u_2 u_2^H \right] \mathbf{a}(\cdot) \quad (10)$$

若信源间不相关, 由参考文献[7]可知,

$$\lambda_1, \lambda_2 = M \frac{2}{s} \left( 1 \pm \left| \frac{1}{M} \mathbf{a}^H(\cdot) \mathbf{a}(\cdot) \right| \right) \quad (11)$$

把上式和波达方向角  $\rho$  代入(10)得,

$$E[Z(\rho)] = \frac{(M-2)}{N} \left[ \frac{1}{2M(\frac{2}{s})^2} + \frac{3}{2M^4(\frac{2}{s})^2(d/\lambda)^2(\sin \theta_1 - \sin \theta_2)^2} \right] \quad (12)$$

可见, 当阵元间距变大, 空间倒谱在波达方向角上误差较小, 即谱峰变得更加尖锐, 算法分辨率增高, 估计性能更好. 同理, 可以得到空间倒谱的方差,

$$\text{var}[Z(\rho)] = \left\{ \frac{(M-2)}{N} \left[ \frac{1}{2M(\frac{2}{s})^2} + \frac{3}{2M^4(\frac{2}{s})^2(d/\lambda)^2(\sin \theta_1 - \sin \theta_2)^2} \right] \right\}^2 \quad (13)$$

把上式代入到  $l$  的表达式中有,

$$l = \frac{2}{N^{5/2}} \left\{ (M-2) \left[ \frac{1}{2M(\frac{2}{s})^2} + \frac{3}{2M^4(\frac{2}{s})^2(d/\lambda)^2(\sin \theta_1 - \sin \theta_2)^2} \right] \right\}^2 t_{/2}(N-1) \quad (14)$$

由此可见, 当阵元间距变大时, 空间倒谱的置信区间变小, 这也表明天线阵列的性能更好.

### 4 阵元间距与空间谱出现虚假谱峰的关系

在参考文献[8]和[9]都提到, 为使 ULA 阵列流形结构的导向矢量和空间角之间不发生多值模糊, 其阵元间距不能大于载波波长的半, 但都没有给出定量的结果. 根据上一小节的分析可知, 阵元间距变大相当于是阵列孔径增大, 可以提高 MUSIC 算法的空间分辨率, 然而阵元间距过大, 大于载波半波长, 就有可能会在空间谱上出现虚假的谱峰. 下面将详细分析阵元间距与空间谱出现虚假谱峰的定量关系.

对于 DOA 估计的方向角  $\theta$  是位于区间  $\left[ -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right]$ , 而天线阵列流形结构的方向矢量的相位  $\phi$

$= 2 \frac{d}{\lambda} \sin \theta$  将位于区间  $\left[-2 \frac{d}{\lambda}, 2 \frac{d}{\lambda}\right]$  上. 显然导向矢量  $a(\theta)$  的每个元素都是复指数的形式, 所以它将以  $2 \frac{d}{\lambda}$  为周期. 设  $\theta$  为真实的波达方向角,  $\hat{\theta}$  为估计角, 则,

$$2 \frac{d}{\lambda} \sin \hat{\theta} = 2 \frac{d}{\lambda} \sin \theta + 2k \quad (15)$$

即所有谱峰如下式所示,

$$\hat{\theta} = \arcsin \left( \sin \theta + \frac{k}{\frac{d}{\lambda}} \right) \quad (16)$$

其中  $k$  是使  $\left( \sin \theta + \frac{k}{\frac{d}{\lambda}} \right) \in [-1, 1]$  的整数.

#### 4.1 阵元间距不大于载波的半波长

当  $\frac{d}{\lambda} \leq \frac{1}{2}$  时,  $\frac{k}{\frac{d}{\lambda}} = 2k, k \geq 0$  或  $\frac{k}{\frac{d}{\lambda}} = -2k, k < 0$ , 而  $-1 \leq \sin \theta \leq 1$ , 所以为使  $\left( \sin \theta + \frac{k}{\frac{d}{\lambda}} \right) \in [-1, 1]$ ,  $k$  只能取 0 (除了  $\frac{d}{\lambda} = \frac{1}{2}$  且波达方向角为  $\pm 90^\circ$  时  $k$  可以取 0 和 -1 或 1), 所以这种情况下相位  $\theta$  所在区间包含在  $[-\theta, \theta]$  这样的一个周期内, 可估计出唯一的波达方向, 没有虚假谱峰.

#### 4.2 阵元间距大于载波的半波长

当阵元间距大于载波的半波长时, 也就是  $\frac{d}{\lambda} > \frac{1}{2}$  时, 相位  $\theta$  所在区间超出区间  $[-\theta, \theta]$  这样的一个周期, 即可能存在多个相位  $\theta$  可以使得导向矢量  $a(\theta)$  与  $U_n$  正交, 出现其它的虚假谱峰, 从而导致 MUSIC 算法失效. 当然, 并非对于所有的 DOA 估计角都会出现虚假谱峰, 下面分两种情况具体讨论:

(1) 当  $\frac{1}{2} < \frac{d}{\lambda} < 1$  时,  $k < \frac{k}{\frac{d}{\lambda}} < 2k, k \geq 0$  或  $2k < \frac{k}{\frac{d}{\lambda}} < k, k < 0$ , 而  $-1 \leq \sin \theta \leq 1$ , 为使  $\left( \sin \theta + \frac{k}{\frac{d}{\lambda}} \right) \in [-1, 1]$ . 此时若  $|\sin \theta| < \frac{1}{d} - 1$  时, 即

$$\theta \in (-\arcsin(\frac{1}{d} - 1), \arcsin(\frac{1}{d} - 1)) \quad (17)$$

则不会出现出现虚假谱峰, 利用这一性质使阵元间距稍微大于半波长, 从而在不加大阵元数目和增加设备成本的情况下提高算法的实时性和分辨率; 若  $\frac{1}{d} - 1 < |\sin \theta| < 1$ , 即  $\theta \in [-\frac{\pi}{2}, -\arcsin(\frac{1}{d} - 1)]$ , 那么  $k$

可以取 1 产生虚假谱峰, 或  $\theta \in [\arcsin(\frac{1}{d} - 1), \frac{\pi}{2}]$ , 那么  $k$  可以取 -1 产生虚假谱峰. 所以这种情况下对于每一个信源可能出现一个虚假谱峰, 也有可能不出现.

(2) 当  $\frac{d}{\lambda} \geq 1$  时,  $\frac{k}{\frac{d}{\lambda}} = k, k \geq 0$  或  $\frac{k}{\frac{d}{\lambda}} = -k, k < 0$ , 而  $-1 \leq \sin \theta \leq 1$ , 所以为使  $\left( \sin \theta + \frac{k}{\frac{d}{\lambda}} \right) \in [-1, 1]$ ,  $k$  除了能取 0 外, 对于  $0 < \sin \theta < 1$ ,  $k$  至少还可以取 -1, 对于 -1

$\leq \sin \theta < 1$ ,  $k$  至少还可以取 1. 因此这种情况下一定会出现虚假谱峰, 并且  $\frac{d}{\lambda}$  越大, 虚假谱峰越多. 根据前面的分析易见, 对于每一个信源而言, 若  $\frac{d}{\lambda/2} = n, n \in \mathbf{Z}$ , 那么将有  $n$  个谱峰, 其中  $n-1$  个虚假谱峰. 若  $\frac{d}{\lambda/2}$  不为整数, 可令其整数部分为  $\left[ \frac{d}{\lambda/2} \right] = n$ , 小数部分为  $\Delta$ , 则  $\frac{d}{\lambda/2} = n + \Delta, n \in \mathbf{Z}, n \geq 1$ , 那么  $\theta = \arcsin \left( \sin \theta + \frac{2k}{n + \Delta} \right)$ , 此时若  $\theta \in \left( -\arcsin \left( \frac{\lambda}{d} n - 1 \right), \arcsin \left( \frac{\lambda}{d} n - 1 \right) \right)$ , 那么有  $n-1$  个虚假谱峰, 否则, 有  $n$  个虚假谱峰.

#### 4.3 主动测向中真实谱峰的一种提取方法

在某些测向应用中, 由于被测对象高速运动导致天线阵接收信号的载波频率发生变化, 而此时阵元间距是固定的, 因此往往可能会产生虚假谱峰. 那么在出现虚假谱峰的情况下, 提出使用不同载波频率的方法来识别真实谱峰. 从公式(16)可知, 谱峰的位置是由  $\frac{d}{\lambda}$  的值决定的. 若阵元间距  $d$  的大小是固定的, 那么可以调整波长, 即载波频率来改变  $\frac{d}{\lambda}$  的值. 观察公式(16)可见, 真实谱峰出现在  $k$  取 0 的时候, 其位置不会收到  $\frac{d}{\lambda}$  的影响, 而虚假谱峰出现在  $k$  取非 0 整数的时候, 其位置显然是受到  $\frac{d}{\lambda}$  影响的. 也就是说, 真实谱峰的位置始终都是不变的, 而虚假谱峰的位置是会随着载波频率的变化而变化. 因此, 根据这样的原理, 可以从虚假谱峰中提取出真实谱峰.

### 5 仿真实验

图 1 是采用含有 8 个阵元的 ULA, 两非相干信源从  $30^\circ, 35^\circ$  入射, 信噪比均为 10dB, 快拍数为 1024, 对于每一个  $\frac{d}{\lambda}$  的值进行 100 次 Monte Carlo 试验, 在置信度为 95% 时, 置信区间大小  $l$  与  $\frac{d}{\lambda} (\frac{d}{\lambda} \geq 1/2)$  的关系曲线. 可见, 阵元间距增大, 置信区间变小, MUSIC 算法的性能变好. 图 2 为两非相干信源入射角度分别为  $5^\circ$  和  $10^\circ$ , 信噪比均为 0dB, 阵元数为 12 个, 快拍数 256, 阵元

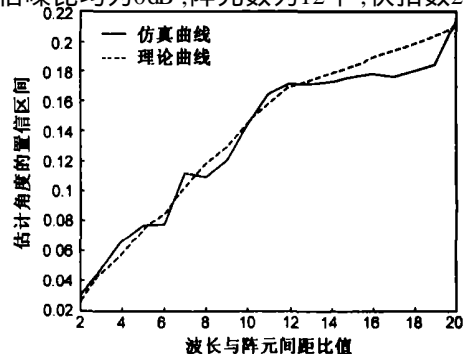


图 1  $d/\lambda \leq 0.5$  时阵元间距与 MUSIC 性能关系

间距分别为四分之一波长,半波长时 DOA 空间谱的情况.可见阵元间距过短时,本应存在的两个谱峰只能搜索到一个,不能有效分辨两个波达方向角;增大阵元间距到半波长时可以提高其空间分辨率,辨别出两个波达方向角.

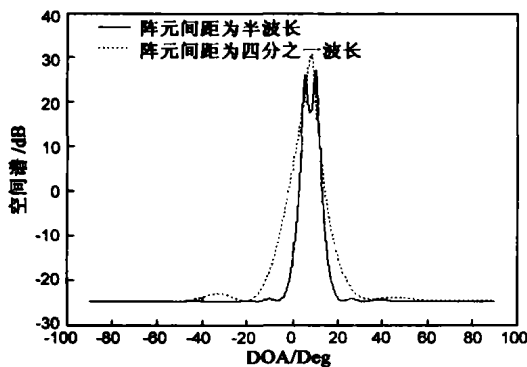


图 2 两组不同阵元间距的 DOA 空间谱

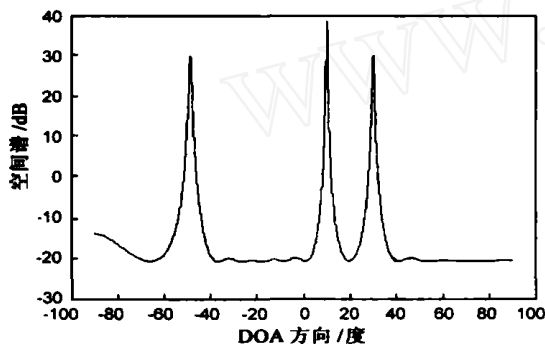


图 3  $d/\lambda=0.8$  时空间谱情况

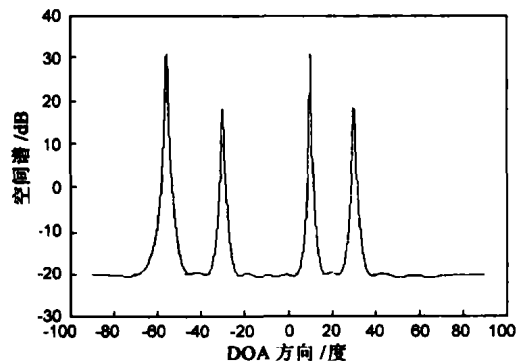


图 4  $d/\lambda=1$  时空间谱情况

图 3 是采用含有 8 个阵元的 ULA, 有两非相干个信源从  $10^\circ, 30^\circ$  分别入射, 信噪比均为 0dB, 快拍数为 128,  $d/\lambda = 0.8$ . 由于  $\arcsin(\lambda/d - 1) = 14.48^\circ$ ,  $10^\circ < 14.48^\circ < 30^\circ$ , 所以在图上可见  $10^\circ$  方向的信源没有虚假谱峰, 而  $30^\circ$  方向的信源产生了一个虚假谱峰.

图 4, 图 5 阵元间距和波长比值分别为  $d/\lambda = 1$ ,  $d/\lambda = 1.5$ , 其他参数同图 3. 两图分别含有两组和三组谱峰, 其中虚假谱峰分别有一组和两组, 与理论分析是一致的, 即虚假谱峰的个数与  $\frac{d}{\lambda}$  是成正比的.

图 6 是在阵元间距  $d$  不变的情况下使用 1.8GHz 和 2GHz 载波的空间谱, 其他参数同图 3. 1.8GHz 的载波对应  $d/\lambda = 0.9$ , 其空间谱为实线, 2GHz 的载波对应  $d/\lambda = 1$ , 其空间谱为虚线. 这两种情况都会产生虚假谱峰, 但是它们各自的虚假谱峰各不相同, 而真实谱峰却完全是重合的, 这与前面的分析一致. 因此利用不同载波频率的方法是可以提取出真实谱峰的.

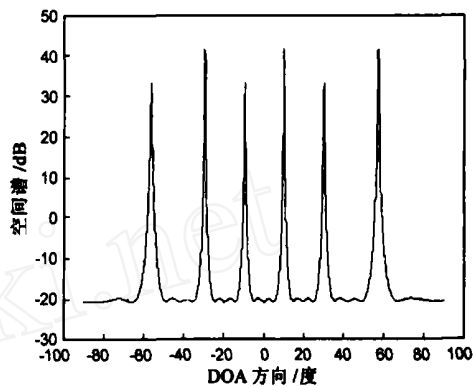


图 5  $d/\lambda=1.5$  时空间谱情况

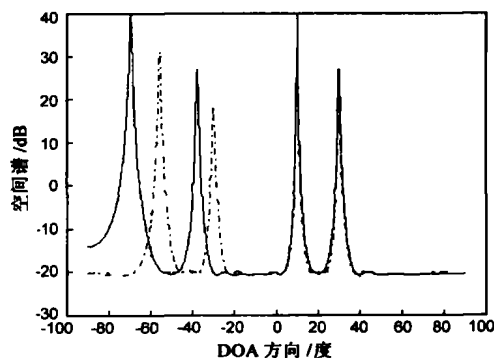


图 6 空间谱中真实谱峰提取

## 6 结论

从本文的理论推导和仿真可得出以下结论:

- (1)  $d/\lambda \leq 0.5$  时, 不会出现虚假谱峰, 并且 MUSIC 算法的性能也会随着阵元间距的增大而更好.
- (2)  $0.5 < d/\lambda < 1$  时, 若待估计信源方向  $(-\arcsin(\lambda/d) - 1, \arcsin(\lambda/d) - 1)$ , 那么也不会有虚假谱峰出现, 也就是说当感兴趣的 DOA 区间为  $(-\arcsin(\lambda/d) - 1, \arcsin(\lambda/d) - 1)$ ,  $0^\circ < \theta < 90^\circ$ , 则不产生虚假谱峰的最大阵元间距为  $d = \lambda / (1 + \sin \theta)$ ; 否则, 对于每一个信源将出现一个虚假谱峰.
- (3)  $d/\lambda \geq 1$  时, 必定会出现虚假谱峰, 对于每一个信源而言, 若  $\frac{d}{\lambda} = n$ ,  $n \in \mathbf{Z}$ , 那么将会有  $n$  个谱峰出现, 其中  $n - 1$  个是虚假谱峰.
- (4) 在主动测向出现虚假谱峰的情况下, 通过不同载波频率的方法可以从虚假谱峰中提取出真实谱峰.

## 参考文献:

- [1] Kaveh P, Prashant K. 无线网络通信原理与应用[M]. 刘剑, 安晓波, 李春生, 等, 译. 北京:清华大学出版社, 2002. 411 - 422.  
Kaveh P, Prashant K. Principles of Wireless Networks [M]. Translated by Liu Jian, An Xiao-bo, Li Chun-sheng, et al. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. 411 - 422. (in Chinese)
- [2] Schmidt R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. IEEE Trans, 1986, AP-34(3): 276 - 280.
- [3] Porat B, Friedlander B. Analysis of the asymptotic relative efficiency of the MUSIC algorithm[J]. IEEE Trans, 1988, ASSP-36(4): 532 - 544.
- [4] Wang H, Kaveh M. On the performance of signal-subspace processing—Part I: Narrow-band system[J]. IEEE Trans, 1986, ASSP-34(10): 1201 - 1209.
- [5] Guo Y, Wang H, Luo B. Analysis of DOA estimation spatial resolution using MUSIC algorithm [A]. Proceedings of SPIE: vol5985 part one [C]. Washington: SPIE, 2005. 59852S1-59852S4.
- [6] Zoltowski M D, Mathews C P. Real-time frequency and 2-D angle estimation with sub-Nyquist spatiotemporal sampling [J]. IEEE Trans, 1994, SP-42(10): 2781 - 2794.
- [7] J E Hudson. Adaptive Array Principles [M]. Stevenage, U K: Peregrinus, 1981. 52 - 58.
- [8] 张贤达, 保铮. 通信信号处理[M]. 北京:国防工业出版社, 2000. 312 - 316.  
Zhang Xi-an-da, Bao Zheng. Communication Signal Processing [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000. 312 - 316. (in Chinese)
- [9] 司伟建. MUSIC 算法多值模糊问题研究[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(7): 960 - 962.

Si Wei-jian. Study of MUSIC algorithm about blur of multiple value[J]. System Engineering and Electronics, 2004, 26(7): 960 - 962. (in Chinese)

## 作者简介:



郭 跃 男, 1979 年 9 月出生, 2001 年和 2004 年分别获华中科技大学电子与信息工程系通信工程专业学士学位和硕士学位, 现攻读华中科技大学电子与信息工程系通信与信息系博士学位。主要研究方向为无线局域网间视频通信, 阵列信号处理, 目标识别等。现担任华中科技大学电子与信息工程系研究生学术委员会委员。E-mail: leap.guo@yahoo.com.cn



王宏远 男, 1946 年出生, 1970 年毕业于北京理工大学无线电系, 1978 年调入华中理工大学电子与信息工程系工作。1984 ~ 1985 年留美访问学者, 现为华中科技大学电子与信息工程系数字视频与通信中心主任, 教授, 博士生导师, 主要研究方向是多媒体通信, 通信信号处理, 移动通信, 信道辨识等。目前已在国内外重要刊物上发表论文 30 余篇, 其中包括 IEEE Transaction, 电子学报和自动化学报等权威杂志。现指导博士生 20 人(包括已毕业的博士生), 硕士生 40 余人(包括已毕业的硕士研究生)。

E-mail: wythwyd@public.wh.hb.cn



周 隰 男, 1983 年出生, 现为华中科技大学电子与信息工程系博士研究生。主要研究方向是无线测向技术, 数字信号处理及多媒体通信等。  
E-mail: icystarlight@gmail.com