

阵列信号处理中 DOA 估计的误差分析

成先敏 李世中 乔晶晶¹ 王楠

(中北大学机电工程学院, 机械工程与自动化学院¹, 太原 030051)

摘要 多重信号分类法(即 MUSIC 算法)具有很高的分辨力、估计精度及稳定性,在阵列信号处理中对 DOA(direction of arrival)的估计也一直是人们研究的热点。通过对 MUSIC 算法中影响 DOA 估计的误差因素进行分析和研究,讨论 MUSIC 算法的估计性能。理论分析和仿真结果表明,对非相关或相干信号, MUSIC 算法是一种有效的测量目标方位角的方法。

关键词 MUSIC 算法 阵列信号处理 DOA 估计

中图分类号 TN957.524; **文献标志码** A

目前,精确定位技术是武器系统的关键技术之一,而目标方位角和俯仰角的确定首当其冲^[1]。在信号处理过程中, MUSIC 算法由于具有较高的分辨力、估计精度和稳定性而备受青睐^[2]。另外,作为信号处理领域内的一个重要分支,阵列信号处理在近 30 年来得到迅速发展,广泛应用于雷达、通信、声纳、地震勘探、射电天文以及生物医学工程等众多军事及国民经济领域。利用阵列信号处理技术对波达方向的估计(也称空间谱估计)也一直是人们研究的热点。从 20 世纪 70 年代末开始,在空间谱估计方面涌现出了大量的研究成果和文献,其中以美国的 Schmidt R. O 等人提出的多重信号分类(MUSIC)算法最为突出。MUSIC 算法的特点就是通过对阵列接收数据的数学分解,将接收的数据划分为相互正交的信号子空间和噪声子空间,利用其正交特性构造出“针状”空间谱峰,从而提高算法的分辨力。

1 信号模型及 MUSIC 算法

天线阵列有多种,均匀线性阵列结构简单,分析和工程实现都比较容易。均匀线阵的模型^[3](见图

1),空间信号的全部信息包含在阵列信号矢量 $x(t)$ 中, MUSIC 算法的基本思想是先对信号协方差矩阵进行特征分解,将信号子空间和噪声子空间分离,然后进行信号子空间匹配完成空间谱估计(角度估计)。具体算法为:

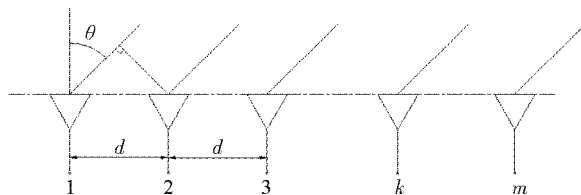


图1 线阵列天线的示意图

假设空间有 N 个信号 $(s_1(t), s_2(t), \dots, s_N(t))$ 入射到 m 元均匀线阵,各信号源入射角分别为: $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N$, 各阵元噪声为: $n_1(t), n_2(t), \dots, n_m(t)$, 假定噪声是相互独立、具有相同的功率、空间平稳的高斯白噪声,则第 i 个阵元输出为:

$$x_i(t) = \sum_{k=1}^N s_k(t + (i-1)\tau_k) + n_i(t)。$$

式中: $i = 1, 2, \dots, m$, $\tau_k = \frac{d \sin \theta_k}{c}$ 为各信号在相邻阵元之间的相对延迟; d 为相邻阵元间距; c 为光速。

在窄带假设下有:

$$x_i(t) = \sum_{k=1}^N s_k(t) e^{j\omega_0(i-1)\tau_k} + n_i(t)。$$

2009 年 11 月 17 日收到

第一作者简介:成先敏(1984—),男,汉族,湖北汉川人,硕士研究生,研究方向:信号处理与信息处理技术。

信号向量张成的子空间为:

$$A(\theta) = [a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_N)]。$$

其中:信号向量 $a(\theta_k)$, 也称信号流型 ($k = 1, 2, \dots, N$):

$$a(\theta_k) = [1, e^{-j\omega_0 r_k}, \dots, e^{-j(m-1)\omega_0 r_k}]^T。$$

各阵元输出(以矩阵形式表示)为:

$$x(t) = A(\theta)s(t) + n(t)。$$

因此,阵列协方差矩阵 R 为:

$$R = E[x(t)x(t)^H] = A(\theta)R_s A(\theta)^H + \sigma^2 I。$$

式中: R_s 是信号协方差矩阵, 并且 $R_s = E[s(t)s(t)^H]$, σ^2 为高斯白噪声方差值, I 为单位矩阵, $\{\}^H$ 为共轭转置运算。

对阵列协方差矩阵 R 进行特征分解就可以得到 N 个较大的特征值和 $m - N$ 个等于 σ^2 的特征值。按照特征结构的性质, 若 $m > N$, 将特征值按降序排列, 前 N 个最大特征值对应的特征向量构成的矩阵其张成的空间称为信号子空间, 后 $m - N$ 个最小特征值对应的特征向量构成的矩阵其张成的空间称为噪声子空间。假设各信号非相关, 则信号子空间和 $A(\theta)$ 的列向量 $a(\theta_k)$ 所张成的子空间 $L(A)$ 相同。信号特征向量张成的空间和噪声向量张成的空间正交, 亦信号空间的任意向量和噪声向量正交, 有:

$$a^H(\theta_k) v_j = 0。$$

式中: $j = N + 1, N + 2, \dots, m$, 利用这一特性, 可以对 R 矩阵进行特征空间分解, 得出信号空间及噪声空间, 根据信号参数进行谱峰搜索, 极大值点所对应的角度就是信号入射方向。

2 误差分析

影响目标方位角估计的误差因素大体上有三个部分:建模引起的误差、信噪比引起的误差、阵元数引起的误差等等。

2.1 建模误差

实际系统中的模型误差总是存在的, 测向定位技术对模型误差的敏感性使得系统不容易实现。模型误差主要有通道失配误差、阵元间互耦误差和阵元位置误差, 任一误差因素都会对系统精度产生很

大的影响。建模引起的误差是不可避免的, 在实际中要多加考虑, 只能对误差做全面的补偿。另外, 实际过程阵列的校正也不一定精确, 各通道的幅相也不一定一致。

2.2 信噪比引起的误差

信噪比降低的影响有两个方面:第一, 信噪比降低导致信号源数目估计与真实信号源数目不一致时, 也就是信号子空间、噪声子空间估计不准使得信号子空间和噪声子空间的划分错误而造成虚警或漏报, 也就会在估计信号方向时有偏差;第二, 实际计算时, 只能得到协方差估计矩阵, 而噪声电平的提高会破坏由协方差估计矩阵分解得到的信号子空间和噪声子空间的正交性, 同样会使角度估计的分辨率下降, 估计偏移量及方差增加。

在信噪比分别 -20 dB、 -15 dB、 -10 dB、 -5 dB、 0 dB、 5 dB、 10 dB、 20 dB 时进行仿真, 仿真计算采用 8 元均匀线阵, 空间存在 4 个互不相关的窄带源, 其方位角分别为: 16° 、 0° 、 -17° 、 39° 。为了仿真计算方便, 将窄带信号近似等同于正弦信号, 其表达式为: $x(t) = \cos \omega_0 t$, 根据雷达接收的实际情况, X 波段 [$8 \sim 12.5$] GHz 是机载雷达的常用工作范围, 工作最短波长 $\lambda_{\min} = 0.024$ m, 取阵元间距 $d = \frac{\lambda_{\min}}{2} = 0.012$ m, 取信号回波的频率分别为 8 GHz、 9 GHz、 10 GHz、 12 GHz, 空间采样数为 $N_x = 1280$ 。对于噪声信号, 可取均值为零, 方差为 σ^2 的高斯白噪声。

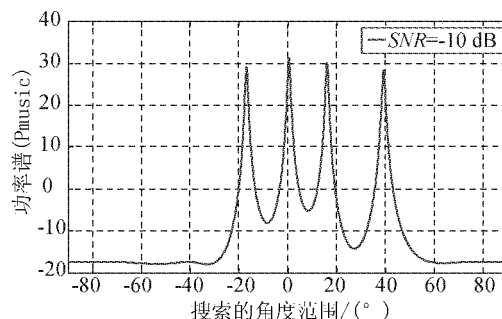


图2 MUSIC算法角度估计图

MUSIC算法估计角度(见图2), 峰值对应的横坐标就是目标的方位角, 从图中可以看出在

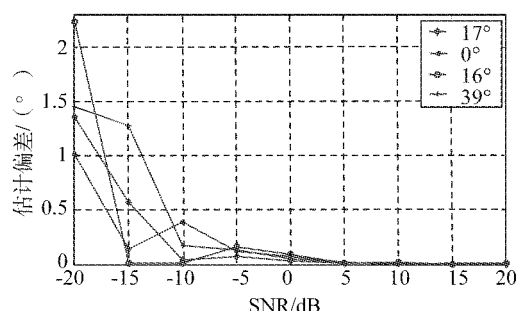


图3 角度的估计偏差与信噪比的关系

SNR = -10 dB 的时候,角度的分辨率还是很高的。

信噪比误差的仿真结果(见图3),由图可以看出,MUSIC 算法随着信噪比的增加分辨率也相应逐渐提高。在仿真过程中,在信噪比为 -20 dB 的时候,两信号源的谱峰出现了叠加的现象,几乎不能分辨。由此可见,信噪比在 MUSIC 算法中是一个很重要的因素。

2.3 阵元数引起的误差

阵元数作为模型的基本物理参数,在波达方向估计中也有一定的影响。取阵元数分别为 8、9、10、11、12、13,信噪比为 -10 dB,窄带源的角度、频率、阵元间距以及空间采样数均同 2.2 中所列,进行仿真,结果见图4,由图4可以看出,随着阵元的增加,算法的估计精度也逐步提高;但阵元的增加加大了计算量,效率降低。因此,在保证精度的前提下应选用合适天线阵元数。

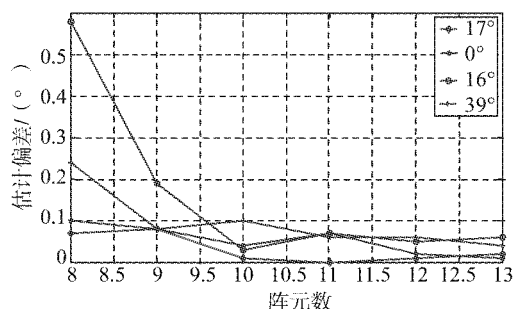


图4 角度的估计偏差与阵元数的关系

除此之外,还有其它因素影响波达方向的估计精度,比如阵元间距^[4](通常取工作波长的一半)、两信号源之间的角度差、阵列孔径等等。因此,在误差允许的情况下,应权衡各个因素以达到最佳效果。

3 结论

通过对 MUSIC 算法以及在波达方向估计中误差的分析与研究,从理论和仿真两方面证明将此法用于目标方位角估计的实用价值。尽管 MUSIC 算法在搜索过程中使用了所有的噪声特征向量导致了较大的计算量,但是作为空间谱估计理论体系中的标志性算法,MUSIC 算法仍具有很高的分辨力、估计精度及稳定性,应用领域和前景十分广阔。民用上如海上救援,军用上如空中预警,智能制导武器系统,尤其是用于精确打击的机载雷达探测定位系统。另外,MUSIC 算法的许多改良版^[5],如基于相干的 MUSIC 算法、基于波速空间的 MUSIC 算法、求根 MUSIC 算法等等,也大大丰富了 MUSIC 算法的内容。

参 考 文 献

- 1 毕兰金,刘勇志. 精确制导武器在现代战争中的应用与发展趋势. 战术导弹技术,2004;23(6):54—57
- 2 王永良,陈 辉,彭应宁,等. 空间谱估计理论与算法. 北京:清华大学出版社,2004
- 3 张光义,赵玉洁. 相控阵雷达技术. 北京:电子工业出版社,2006
- 4 弋 稳. 雷达接收机技术. 北京:电子工业出版社,2005
- 5 Kundu D. Modified MUSIC algorithm for estimating DOA of signals. Signal Processing,1996;(48):85—90

(下转第 1162 页)

- 2 舒志兵. 交流伺服运动控制系统. 北京:清华大学出版社,2006; 3:56—62
- 3 Dorster P. Clarke & Park Transforms on the TMS320C2xx. Ti Application Report, BPRA048. <http://focus.ti.com/general/docs/techdocsabstract.tsp?abstractName=bpra048>. Jan. 1996
- 4 Yu Zhenyu. Space-vector PWM with TMS320C24x/F24x using hardware and software determined switching patterns. Ti Application Report SPRA524. <http://focus.ti.com/general/docs/techdocsabstract.tsp?abstractName=spra524>. Feb. 1999

The Application of a Hybrid Space Vector SVPWM Module in the PMSM Controller

WU Heng, WANG Gan-quan^{*}, CHEN Gui-lin

(Shanghai Institute of Technology Physics, Shanghai 200083, P. R. China)

[**Abstract**] In order to reduce the influence of the dead band compensation of the PMSM (Permanent Magnet Synchronous Machine) controller, the author here analyses the rules of the SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation), introduces a hybrid vector SVPWM strategy without compensation. The math model and the work period calculation of the hybrid vector SVPWM are given out and the PMSM Controller based on this type of SVWPM is built. The test result is that the hybrid vector SVPWM could get the same excellent result as the 180 degree space vector without dead band compensation. When design a high-power PMSM controller, this way is even remarkable to be realized.

[**Key words**] hybrid vector SVPWM dead band compensation PMSM

(上接第 1155 页)

Inaccuracies Analysis for DOA Estimation on the Array Signal Processing

CHENG Xian-min, LI Shi-zhong, QIAO Jing-jing¹, WANG Nan

(School of Mechanical and Electronic Engineering, School of Mechanical Engineering and Automatization¹,
The North University of China, Taiyuan 030051, P. R. China)

[**Abstract**] The multiple signal classification is also MUSIC algorithm with higher resolving power, estimation precision and stability, which is also a hot research field all the time to DOA estimation on radar signal processing. The inaccuracy factors of DOA estimation are analysed and studied on MUSIC algorithm and discussed the estimation performances and features of MUSIC algorithm. The theory analysis and simulation results demonstrate that, to the non-correlation signal, MUSIC algorithm is also an effective method for the measure of target direction angle.

[**Key words**] MUSIC algorithm array signal processing DOA estimation