

一种强干扰条件下微弱信号 DOA 估计的新方法

柴立功 罗景青

(解放军电子工程学院 206 研究室 合肥 230037)

摘要: 给出了一种基于均匀线性阵列的既能抑制强烈干扰, 又能同时进行微弱信号 DOA 估计的算法。在已知强干扰源个数和入射方向的前提下, 先使用改进的波束形成方法, 在子阵上进行波束形成以抗干扰, 再对加权后的子阵进行微弱信号的 DOA 估计。该方法的优点是当干扰和希望信号处在同一个波束内时, 不需要提高信号的信噪比就可以正确地估计出信号的入射方向。理论分析和计算机仿真都表明该算法是有效的。

关键词: 抗干扰, 波束形成, DOA 估计

中图分类号: TN911.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2005)10-1517-04

A Novel Algorithm for Weak Signals' DOA Estimation under Intensive Interferences

Chai Li-gong Luo Jing-qing

(Section 206 Electronic Engineering Institute PLA, Hefei 230037, China)

Abstract A novel algorithm both for restraining intensive interferences and for estimating weak signals' DOA(Direction Of Arrival) information is presented on the basis of uniform linear array. Under the assumption knowing the number and directions of intensive interferences, first, the algorithm forms the beam on the sub-array level with the improved beam-forming method to constrain interferences; then, the algorithm estimates weak signals' DOA information based on all of these weighed sub-arrays. When both the desired signal and the interference are in the same beam, the merit of this algorithm shows higher estimation accuracy than that of high-resolution methods without improving the SNR for weak signal. Both the theoretical analysis and computer simulation indicate that the algorithm is effective.

Key words Anti-jamming, Beam-forming, DOA estimation

1 引言

微弱信号的检测和参数估计在雷达、通信、声纳、地震探测等许多领域都得到了广泛应用。在存在有强烈干扰源的情况下, 系统对微弱信号的检测概率和波达方向(DOA)估计的精度都会受到很大的影响。通常的阵列信号处理有两种方法: 或者采用波束形成方法在干扰的入射方向上形成波束零陷通过波束扫描来检测目标, 或者使用超分辨算法将干扰和所需信号同时处理^[1-5]。第一种方法虽然可以有效地抗干扰, 也可以在指定的方向上得到一定的空间增益, 但这种方法很难同时估计多个信号的DOA信息; 而采用旁瓣匿影或干扰抵消等方法, 零陷的个数和宽度都会受到阵列孔径的影响, 当信号和干扰位于同一波束内时, 信号也将受到抑制^[6,7]。第二种方法在一定程度上可以同时估计强干扰和微弱信号的全部入射方向。但当干扰和信号的入射角度在同一波束内时, 对强干扰入射方向的估计会发生偏差, 而且弱信号的估

计效果较差, 估计效果还受到信噪比门限的影响^[4,5], 本文的计算机仿真验证了这些结果。最近的文献主要致力于解决 DOA与其它参数的联合估计、各种误差对估计精度的影响和性能分析等方面^[8-10], 在抑制干扰的同时, 如何有效地估计微弱信号的DOA信息, 具有重要意义。本文作者在文献[11]中曾对此问题作过一定程度的探讨, 并给出了初步仿真结果。

一般情况下, 干扰信号总比待检测的信号强很多, 为了计算简便, 可以使用简单的空域 FFT 运算来确定强干扰的个数和大致入射方向。因为空域 FFT 算法在空域快拍数据量较小的情况下, 对强信号 DOA 的估计结果虽然不是太准确, 但对强信号的个数估计还是比较准确的; 同时还可以利用空域 FFT 算法对信噪比较敏感的特点直接完成强信号和微弱信号的分离。至于强干扰准确入射方向的估计, 只要从原始阵列中提取一个子阵(阵元个数稍大于强干扰源的个数即

可)进行超分辨DOA估计就可以了。除此之外,源数估计的方法有很多,也很成熟,例如基于信息论准则的AIC, MDL等,已有专著论述^[4];超分辨DOA估计的算法也有很多,本文将直接使用这两类方法。

本文提出了一种强干扰条件下微弱信号DOA估计的新方法。先使用已知的算法精确地估计强干扰源的个数和入射方向;在此基础上,将原始阵列划分为若干子阵,在子阵级别上形成波束零陷以有效地抑制干扰;最后将加权后的子阵作为一个“有向”阵元,组成一个新的干扰抑制阵列,再使用超分辨处理技术,利用新阵列的输出数据对弱信号进行DOA估计。

2 干扰抑制模型

设有 N 个全向阵元组成一个均匀线性阵(ULA)。选取由 $k, k+1, \dots, k+L-1$ 个连续的阵元 ($k=1, 2, \dots, N-L+1$) 构成一个 ULA 子阵,先分析子阵抑制干扰的数学模型。设有 J 个干扰源和 P 个微弱信号同时进入阵列,它们彼此相互独立。以阵列的法线方向为入射角度的参考方向,阵列左边第一个阵元为相位参考点, d 为相邻阵元之间的间距,干扰与信号的入射方向分别为 $\theta_{jk} (k=1, \dots, J)$ 和 $\theta_{sp} (p=1, \dots, P)$ 。则第 k 个子阵列感应的复包络为

$$\mathbf{X}_k(t) = \sum_{i=1}^J \mathbf{a}_k(\theta_{ji}) s_{ji}(t) + \sum_{i=1}^P \mathbf{a}_k(\theta_{si}) s_{si}(t) + \mathbf{N}_k(t) \quad (1)$$

其中 $\mathbf{a}_k(\theta)$ 表示第 k 个子阵列对来自 θ 方向信号的方向矢量。

$$\mathbf{a}_k(\theta) = \left[\exp\left(j \frac{2\pi d}{\lambda} (k-1) \sin \theta\right), \exp\left(j \frac{2\pi d}{\lambda} k \sin \theta\right), \dots, \exp\left(j \frac{2\pi d}{\lambda} (k+L-1) \sin \theta\right) \right]^T \quad (2)$$

将式(1)重写

$$\mathbf{X}_k(t) = \mathbf{A}_k(\theta) \mathbf{S}(t) + \mathbf{N}_k(t) \quad (3)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{X}_k(t) &= [x_k(t), \dots, x_{k+L-1}(t)]^T \\ \mathbf{N}_k(t) &= [n_k(t), \dots, n_{k+L-1}(t)]^T \\ \mathbf{A}_k(\theta) &= [\mathbf{a}_k(\theta_{j1}), \dots, \mathbf{a}_k(\theta_{jJ}), \mathbf{a}_k(\theta_{s1}), \dots, \mathbf{a}_k(\theta_{sP})] \\ \mathbf{S}(t) &= [s_{j1}(t), \dots, s_{jJ}(t), s_{s1}(t), \dots, s_{sP}(t)]^T \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中 $s_{jk}(t)$ 和 $s_{sp}(t)$ 分别表示第 k 个干扰和第 p 个信号在参考点接收到的信号; $\mathbf{N}_k(t)$ 为阵列的噪声矢量,诸阵元噪声为空间平稳、彼此独立的零均值高斯白噪声;并假设信号和噪声彼此不相关。上标 T, H, *, -1 分别表示矩阵的转置、复共轭转置、复共轭和求逆运算。

设 $\mathbf{W}_k = [w_{k,1}, \dots, w_{k,L}]^T$ 为第 k 个子阵列的加权向量,加权后的子阵输出信号为

$$z_k(t) = \mathbf{W}_k^T \mathbf{X}_k(t) = \sum_{i=1}^L w_{k,i} x_i(t) \quad (5)$$

经典的自适应波束形成算法都需要有一个期望信号作为参考。在已知所有干扰源的个数及入射角度的前提下,这类方法都可以得到较好的干扰抑制性能^[1,2]。如果同时存在多个微弱信号时,这些算法就会失效。本文作者在文献[3]中将此方法推广应用到了已知多个信号和干扰的个数及入射方向的情况。而主瓣约束算法在指定的方向上可以得到最大的空间增益,但对干扰的抑制不是很好,特别是在主瓣内存在多个信号时,峰值位置会偏离信号方向。在实际应用中,希望信号的个数和入射方向是很难预先知道的,因此较好的方法是保证 $z(t)$ 中的全部干扰得到较好抑制的同时,使阵列对其它方向上的入射信号有较均匀的响应,即

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{W}_k^T \mathbf{a}_L(\theta_{jk}) &= 0, & k=1, \dots, J \\ \mathbf{W}_k^T \mathbf{a}_L(\theta) &\neq 0, & \theta \neq \theta_{jk}, k=1, \dots, J \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

这是一个关于加权向量 \mathbf{W} 的线性欠定方程组, \mathbf{W}_k 的解不唯一。可以增加一个约束条件 $\mathbf{W}_k^T \mathbf{W}_k^* = 1$, 并求它的最小二乘解。为了计算方便,先假设 $w_{k,1} = 1$, 求出 \mathbf{W}_k 的最小二乘解,再将 \mathbf{W}_k 进行归一化处理。在 $J < L$ 的前提下,将能够较好地抑制全部干扰。

3 在干扰抑制下弱信号的处理

如前所述,将整个阵列划分为若干子阵,每个子阵由相邻的 L 个阵元组成,即由 $(1 \sim L)$ 阵元组成第 1 个子阵 ($L > J$), $(2 \sim L+1)$ 阵元组成第 2 个子阵 ..., 如此共有 $K = (N - L + 1)$ 个子阵。利用上述波束形成方法对诸子阵进行加权,加权后的子阵可以看成是一个虚拟“有向”阵元,将这 K 个虚拟有向阵元组成一个新的虚拟阵列,由于这些“阵元”的输出中干扰已经被抑制掉了,就可以对微弱信号进行准确的源数 P 及信号的真实入射方向 θ_{sp} 的估计。

上述虚拟阵元之间的等效间距仍然为 d , 在 $d/\lambda \leq 0.5$ 的情况下,此虚拟阵列仍然满足不出现栅瓣的条件。此时,干扰已得到抑制, θ_{sp} 简写为 θ_p , s_{sp} 简写为 s_p 。将阵列输出写成矩阵形式:

$$\mathbf{Z}(t) = \mathbf{U} \mathbf{A}_N \mathbf{S}(t) + \mathbf{U} \mathbf{N}(t) \quad (7)$$

其中

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} w_{11} & \dots & w_{1L} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & w_{21} & \dots & w_{2L} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & & \ddots & & & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & w_{(K-1),1} & \dots & w_{(K-1),L} & 0 \\ 0 & \dots & & 0 & w_{K,1} & \dots & w_{K,L} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{Z}(t) &= [z_1(t), \dots, z_K(t)]^T \\ \mathbf{a}_N(\theta) &= \left[1, e^{j\frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta}, \dots, e^{j\frac{2\pi d}{\lambda} (N-1) \sin \theta} \right]^T \\ \mathbf{A}_N &= [\mathbf{a}_N(\theta_1), \dots, \mathbf{a}_N(\theta_p)] \\ \mathbf{S}(t) &= [s_1(t), \dots, s_p(t)]^T \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

\mathbf{U} 为加权向量组成的变换矩阵。此时虚拟阵列接收信号的协方差矩阵为

$$\mathbf{R}_Z = \mathbf{U} \mathbf{A}_N \mathbf{R}_S \mathbf{A}_N^H \mathbf{U}^H + \sigma^2 \mathbf{U} \mathbf{U}^H \quad (10)$$

其中 $\mathbf{R}_S = E\{\mathbf{S}\mathbf{S}^H\}$ 为信号的协方差矩阵， $E\{\bullet\}$ 表示统计平均。从式(10)可以看出：在上述对噪声的假设条件下，诸虚拟阵元的噪声也是均值为零，方差为 $\sum_{i=1}^L |w_{k,i}|^2 \sigma^2 = \sigma^2$ 的平稳高斯噪声，由于 \mathbf{U} 的存在，诸噪声之间将不再相互空间独立。因此，噪声的协方差矩阵 $\mathbf{R}_n = E\{\mathbf{N}\mathbf{N}^H\} = \sigma^2 \mathbf{U} \mathbf{U}^H$ 已不再是对角阵。

从式(7)容易看出 \mathbf{U} 为行满秩矩阵，因此可以找到 $K \times K$ 满秩矩阵 \mathbf{Q} ，满足：

$$\mathbf{Q} \sigma^2 \mathbf{U} \mathbf{U}^H \mathbf{Q}^H = \sigma^2 \mathbf{I} \quad (11)$$

其中 \mathbf{I} 为 $K \times K$ 单位阵。因为 $\mathbf{U} \mathbf{U}^H$ 为酉阵，所以该矩阵的特征值是正实数，即

$$\mathbf{U} \mathbf{U}^H = \sum_{i=1}^K \lambda_i \mathbf{e}_i \mathbf{e}_i^H, \quad \lambda_i > 0, \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (12)$$

式中 λ_i 和 \mathbf{e}_i 分别为矩阵 $\mathbf{U} \mathbf{U}^H$ 的特征值与对应的特征向量，可以取

$$\mathbf{Q} = (\mathbf{U} \mathbf{U}^H)^{-1/2} = \sum_{i=1}^K \lambda_i^{-1/2} \mathbf{e}_i \mathbf{e}_i^H \quad (13)$$

则

$$\mathbf{Q} \mathbf{R}_Z \mathbf{Q}^H = \mathbf{Q} \mathbf{U} \mathbf{A}_N \mathbf{R}_S (\mathbf{Q} \mathbf{U} \mathbf{A}_N)^H + \sigma^2 \mathbf{I} \quad (14)$$

对式(14)进行特征分解，并将特征值按降序排列，其最小的 $(K - P)$ 个特征值对应的特征向量是 $(\mathbf{e}_{p+1}, \dots, \mathbf{e}_K)$ 。设 $\mathbf{E}_{eN} = [\mathbf{e}_{p+1}, \dots, \mathbf{e}_K]^\infty$ ，用 MUSIC 得出的谱估计表达式为

$$P_{\text{MU}} = \frac{1}{\left\| \mathbf{a}_N^H(\theta) (\mathbf{U}^H \mathbf{Q}^H \mathbf{E}_{eN}) \right\|^2} \quad (15)$$

从以上分析可以看出，由于子阵加权在强干扰的入射方向上形成了零陷，因此，使用超分辨的 DOA 估计方法可以有效地检测到强干扰附近的微弱信号；在远离干扰的方向上，DOA 估计精度仍由超分辨算法本身决定。

4 计算机仿真与性能分析

设有一个由全向阵元组成的均匀线性阵，阵元数

表 1 MDL 源数估计结果(1)

SNR(dB)	MDL(1)	MDL(2)	MDL(3)
0	4	4	2
-5	4	3	2
-10	3	2~3	1~0
-15	2	2	0

表 2 MDL 源数估计结果 (2)

SNR(dB)	MDL(1)	MDL(2)	MDL(3)
0	4	4	2
-5	4	3	2
-10	3	2	0
-15	2	2	0

$N = 50$ ，阵元间距 d 为半波长，快拍数 $M = 200$ 。假设已知两个干扰的入射方向分别为 -40° 和 0° ，干噪比均为 80dB；两个信号分别从 -1° 和 50° 方向入射，诸干扰和信号相互独立。将干扰和希望信号全部作为欲估计的信号先使用 MDL 方法进行源数估计，注意此时 0° 的干扰和 -1° 的信号处在同一个波束内，源数估计的结果见表 1，表 2 是将 -1° 的信号入射方向改为 -5° ，其它参数不变时源数估计的结果，此时，此信号和 0° 的干扰已不在同一波束。表 1 和表 2 中的 MDL(1)表示直接对原始阵列数据进行的 MDL 源数估计；MDL(2)是将原始数据进行空间平滑后的 MDL；MDL(3)表示对虚拟阵列进行的 MDL 源数估计。在 SNR = -5dB 时，对原始阵列数据和对加权后的“虚拟”阵列数据进行的源数估计结果相同，而空间平滑以后的源数估计已出现漏报。表 1 中的 2~3 表示有时源数估计的结果为 2 个源，有时为 3 个源。从表 1 和表 2 可以看出，对原始阵列数据和虚拟阵列数据进行源数估计得到的结果相同。因此，本文提出的子阵列加权方法对源数估计的结果没有任何影响。

取 $L = 15 > J$ 个相邻阵元组成一个子阵，则共有 $K = 36$ 个子阵，将此 36 个子阵看成为“有向”阵元，并组成一个新的“虚拟”阵列。图 1 给出了其中某一个子阵的方向图，该方向图除了在干扰方向上形成很深的零陷外，在其它方向上的响应基本是均匀的。在正确估计出强干扰的个数和入射角度的条件下，分别对原始阵列和此虚拟阵列使用 MUSIC 方法进行 DOA 估计，估计结果见图 2，图 3。图 2，图 3(a)是直接对原始阵列数据进行 DOA 估计的结果；图 2(b) 是对虚拟阵列进行的 DOA 估计结果。当信号和干扰彼此不在同一个波束内时，两种方法估计结果基本一致，图 2(a)在微弱信号的入射方向上有幅度很小的峰值出现；如果信号和干扰在同一个波束内(0° 的干扰和 -1° 的信号)，常规 MUSIC 方法已不能估计出该弱信号，而基于虚拟阵列的 MUSIC 方法却

可以,估计结果的比较见图3(a)和图3(b)。图2(b)~图4(b)的估计结果都是在正确地假设信号源个数(等于2)的前提下得出的。如果估计的信号个数大于等于实际信号的个数,则DOA估计的结果较好;相反容易造成漏报。

图4给出了子阵阵元数目选择不同时的DOA估计结果比较。图4(a)取子阵阵元数目 $L=5$,图4(b)为 $L=40$ 。图4(b)中由于阵列孔径损失较大,估计误差有所增大,方向 50° 上信号的DOA估计结果为 49 。因此,子阵阵元数目 L 的选择要合理兼顾干扰源的个数和阵列孔径损失。

以上计算机仿真的结果证实了本文提出的方法是有效的。如果诸干扰和信号之间存在相关或相干关系,则在DOA估计之前,必须先进行去相关处理,去相关处理之后的估计结果与上述相同,因此就不再给出了。

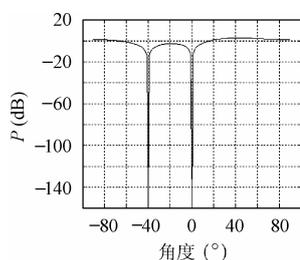


图1 加权后子阵方向图

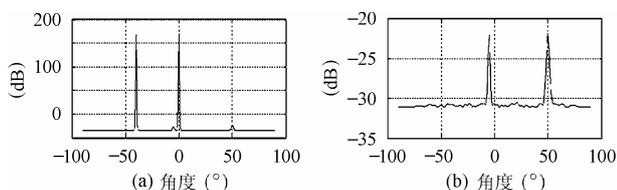


图2 DOA估计结果1

干扰: -40° 和 0° ; 信号: -5° 和 50° ; 干噪比: 80dB; 信噪比: -10 dB

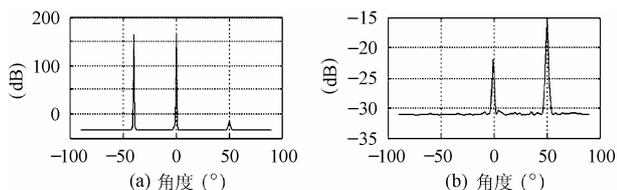


图3 DOA估计结果2

干扰: -40° 和 0° ; 信号: -1° 和 50° ; 干噪比: 80dB; 信噪比: -10 dB

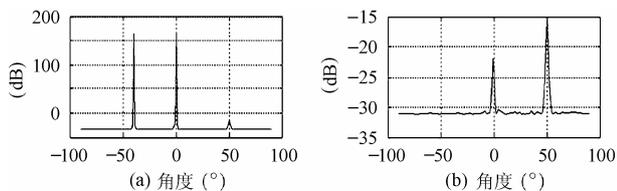


图4 子阵阵元数目选择不同时的DOA比较

干扰: -40° 和 0° ; 信号: -1° 和 50° ; 干噪比: 80dB; 信噪比: -10 dB

5 结束语

本文提出的方法较好地解决了存在强烈干扰时系统对

微弱信号的DOA估计问题,特别是当信号和干扰处在同一个波束内时,本方法比常规的超分辨算法分辨率更高。算法成功的关键在于找到了变换矩阵 U 和 Q ,并证明了虚拟阵列的噪声协方差矩阵 R_n 满秩。如果 R_n 不满秩,将不能使用基于特征结构的这一类超分辨算法。

参考文献

- [1] Monzingo R A, Miller T A 著. 沈铁汉, 梁福生等译. 自适应阵导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988年3月: 6-13.
- [2] 黄振兴, 张明友等译著. 自适应阵处理进展[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1991: 1-19.
- [3] 柴立功, 罗景青. 多信号源多干扰条件下自适应阵的抗干扰技术研究[J]. 中国航空学会信号与信息处理专业全国第七届学术年会[D], 海南: 海口, 三亚, 2003年10月: 145-148.
- [4] 罗景青, 保铮. 雷达阵列信号处理技术的新进展[J]. 现代雷达, 1993: 15-18(2,3,4,5).
- [5] 刘德树, 罗景青, 张剑云. 空间谱估计及其应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1995, 第1, 2, 3, 5章.
- [6] Manolakis D G, Ingle V K, Kogon S M 著. 周正等译. 统计与自适应信号处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003年5月: 395-397.
- [7] 何振亚著. 自适应信号处理[M]. 北京: 科学出版社, 2002年4月: 239-259.
- [8] 吴云韬, 廖桂生, 田孝华. 一种波达方向、频率联合估计快速算法[J]. 电波科学学报, 2003-8, 18(4): 380-384.
- [9] 廖桂生, 张林让, 保铮. 基于盲波束形成的波达方向-多普勒稳健估计[J]. 电子学报, 2003, 27(3): 5-8.
- [10] 王安义, 保铮, 张林让. 阵列估计误差和扰动误差引起方向图畸变的校正[J]. 西安电子科技大学学报, 1999, 26(5): 614-618.
- [11] Chai Li-gong, Luo Jing-qing. A combined algorithm both for restraining intensive interferences and for weak signals DOA estimation[J]. Beijing: The 4th International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT2004), 2004, 8: 243-246.

柴立功: 男, 1969年生, 博士生, 目前从事阵列信号处理、自适应信号处理、雷达信号处理等方面研究。

罗景青: 男, 1957年生, 博士, 教授, 博士生导师, 863-707专家组成员, 解放军电子工程学院信号与信息处理学科负责人。目前的研究方向是: 雷达信号处理、阵列信号处理、空间电子信号处理等。