

基于空间谱估计的多目标信号分离研究

沙晶晶¹, 施浒立²

(1. 江苏信息职业技术学院, 江苏 无锡 214153; 2. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012)

摘要:现代战争中, 同一时间、同一空间、相同频率或不同频率上出现多个信号源的现象经常会出现, 为了对这样的多目标信号进行有效分离, 提出了空间谱估计测向的方法。在分析该方法基本原理的基础上, 提出了适用于同频与不同频信号分离的通用测向算法, 并对算法进行了仿真。仿真结果证明了该测向算法的有效性, 从而为目标识别器的研制提供了一种有价值的方案。

关键词:多目标信号; 空间谱估计; MUSIC 算法; 信号分离

中图分类号:TN914-34

文献标识码:A

文章编号:1004-373X(2010)23-0085-03

Research of Multi-target Signals Separation Based on Spatial Spectrum Estimation

SHA Jing-jing¹, SHI Hu-li²

(1. Jiangsu College of Information Technology, Wuxi 214153, China;

2. National Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Multiple signals with the same or different frequency often occur at the same time and space in modern warfares. A method of direction finding of spacial spectrum is proposed to separate the multi-target signals efficiently. Based on the analysis of the basic principle of the method, a universal algorithm which can separate signals with both the same and different frequencies is presented. The simulation results show that the algorithm is efficient. It provides a valuable method for the development of "target recognition machine".

Keywords: multi-target signal; spacial spectrum estimation; MUSIC algorithm; signal separation

0 引言

现代战争中, 同一时间、同一空间、相同频率或不同频率上出现多个信号源的现象经常会出现, 在对这些目标进行探测、定位、跟踪、识别时, 首先要解决的问题是多目标信号的分离。如何有效地分离这些信号呢? 单从信号频谱上分析此问题还不够, 还需要从空间上分离处于不同位置的信号源。为此, 本文提出运用测向技术实现空间信号分离。

文献[1]对无线电测向中的各种体制进行了概述, 可以看出传统测向体制一般采用单天线或瞬时单天线加单通道, 或双天线双通道设备。由于它依赖于天线阵列孔径或天线方向图的尖锐程度, 对位于一个波束宽度内的空间多个目标信号是不可分辨的, 因此空间分辨能力受到限制。目前阵列信号处理技术快速发展, 为多目标测向提出了新的思路, 通过灵活的软件处理算法实现灵活的波束控制, 以提高信号增益、抗干扰和进行高分辨方向的估计。阵列信号处理主要包括自适应数字波束形成(ADBF)及空间谱的估计。

1 基于空间谱估计的测向技术

这里采用空间谱估计测向技术, 即布置多个天线同时接收并采集信号, 对采集的数据进行空间谱分析。空间谱实际上是空间各个方向上的能量分布, 由于它对入射波到达方向的渐近无偏估计特性和超分辨特性, 完全可用于高密度信号环境下的测向分辨, 称为具有超分辨特性的空间谱估计测向法。基于空间谱估计的测向系统的主要组成如图 1 所示。

系统的核心部分是高分辨信号空间谱估计算法软件。“空间谱估计器”中采用 MUSIC (Multiple Signal Classification) 算法进行信号到达方向的估计。

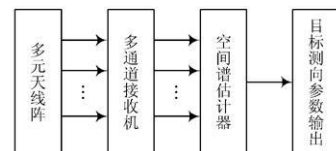


图 1 空间谱估计器测向系统主要组成框图

2 多重信号分类方法(MUSIC)

MUSIC 算法的基本思想^[2]是通过对阵列接收数据

协方差矩阵进行特征分解,得到信号子空间和噪声子空间。利用这两个子空间相互正交关系构造“针状”空间谱峰,通过软件进行角度搜索,从而估计信号的入射方向。

如图2所示,设远场有 P 个窄带信号源入射到空间 N 个间距为 $\lambda/2$ 的天线阵元上,且阵元无方向性。以最左边的第1个阵元为基准,从一个方向 θ_k 的来波开始进行探讨,则第 i 个阵元的接收信号复包络可表示为:

$$x_i(t) = \sum_{k=1}^P S_k(t) \exp(j\varphi_{ik}) + n_i(t),$$

$$i = 1, 2, \dots, N; \quad k = 1, 2, \dots, P \quad (1)$$

式中: $S_k(t)$ 为第 k 个信号源复包络; $n_i(t)$ 为第 i 个阵元

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_N(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ e^{j2\pi(d/\lambda)\sin\theta_1} & e^{j2\pi(d/\lambda)\sin\theta_2} \\ e^{j2\pi(d/\lambda)2\sin\theta_1} & e^{j2\pi(d/\lambda)2\sin\theta_2} \\ \vdots & \vdots \\ e^{j2\pi(d/\lambda)(N-1)\sin\theta_1} & e^{j2\pi(d/\lambda)(N-1)\sin\theta_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1(t) \\ S_2(t) \\ \vdots \\ S_P(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \\ \vdots \\ n_N(t) \end{bmatrix}$$

可将式(3)记为:

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}(\theta)\mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (4)$$

式中: $\mathbf{X}(t)$ 为阵列输出快拍向量; $\mathbf{S}(t)$ 为窄带信号向量; $\mathbf{A}(\theta)$ 为信号方向矩阵,且 $\mathbf{A}(\theta) = [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_P)]$; $\mathbf{N}(t)$ 为0均值、 σ^2 方差的白噪声向量。噪声与信号统计独立;列向量 $\mathbf{a}(\theta_k)$ ($k = 1, 2, \dots, P$)为接收信号的方向向量,且 $\mathbf{a}(\theta_k) = [1, e^{j2\pi(\frac{d}{\lambda})\sin\theta_k}, \dots, e^{j2\pi(\frac{d}{\lambda})(N-1)\sin\theta_k}]^T$,当 $d \leq \lambda/2$ 及 $\theta_i \neq \theta_j$ ($i \neq j, i, j = 1, 2, \dots, P$)时, $\mathbf{a}(\theta_k)$ 与 θ_k 是一一对应的。

在上述的数学模型中,假设信号与噪声是相互独立的,且噪声是零均值的白高斯过程,阵列输出 $\mathbf{X}(t)$ 的协方差矩阵 \mathbf{R} 为:

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{X}(t)\mathbf{X}^H(t)] = \mathbf{A}\mathbf{R}_s\mathbf{A}^H + \sigma^2\mathbf{I} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{R}_s = E[\mathbf{S}(t)\mathbf{S}^H(t)]$ 为源信号的协方差矩阵; \mathbf{H} 为复共轭转置; \mathbf{I} 为单位矩阵。

由于阵列协方差矩阵是 Hermitian 矩阵,所以各特征值相对应的特征向量严格正交;且矩阵的特征方程解是惟一的,不同方向的入射信号对应不同的特征值和特征向量,并且每个信号所对应的特征向量与其他信号对应的特征向量及噪声特征向量都是正交的。

3 不同频、同频多目标信号测向

3.1 信号源由 P 个不同频信号源组成

假设信号源中由 P 个不同频的信号组成,此时 \mathbf{R}_s 将具有满秩 P ,即 $\text{Rank}\{\mathbf{S}\} = P$ 。根据协方差矩阵 \mathbf{R} 的特征分解特性^[3],现假设 \mathbf{R} 特征值分解得到 N 个特征值和 N 个特征向量,则 P 个大特征值对应的特征向量 \mathbf{E}_s

在 t 时刻的噪声; φ_{ik} 为第 k 个信号到达第 i 个阵元时相对于基准阵元的相移:

$$\varphi_{ik} = 2\pi(d/\lambda)(i-1)\sin\theta_k \quad (2)$$

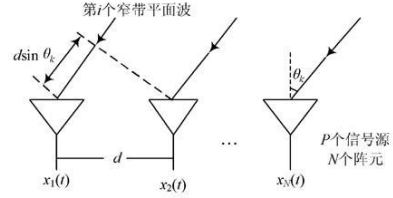


图2 线性阵列数学模型示意图

于是 N 个单元天线在特定时刻接收的信号可以用矩阵式表述为:

$$\begin{bmatrix} \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j2\pi(d/\lambda)\sin\theta_1} \\ e^{j2\pi(d/\lambda)2\sin\theta_1} \\ \vdots \\ e^{j2\pi(d/\lambda)(N-1)\sin\theta_P} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} S_1(t) \\ S_2(t) \\ \vdots \\ S_P(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \\ \vdots \\ n_N(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$= [\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_P]$ 张成信号子空间 Ω_s , $N-P$ 个小特征值对应的特征向量 $\mathbf{E}_N = [\mathbf{e}_{P+1}, \mathbf{e}_{P+2}, \dots, \mathbf{e}_N]$ 张成噪声子空间 Ω_n ,且有:

$$\Omega_s \perp \Omega_n \quad (6)$$

而阵列流形 $\mathbf{A}(\theta)$ 的列空间 $\text{rang}[\mathbf{A}(\theta)]$ 恰又与信号子空间重合,因此信号方向向量 $\mathbf{a}(\theta_i)$ 与噪声子空间正交,所以:

$$\mathbf{E}_N^H \mathbf{a}(\theta_i) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, P \quad (7)$$

MUSIC 空间扫描谱表示为:

$$P_{\text{MUSIC}}(\theta) = 1/[\mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{E}_N\mathbf{E}_N^H\mathbf{a}(\theta)] \quad (8)$$

利用 MUSIC 空间谱估计进行多目标信号测向,过程转化为软件中谱峰的搜索过程,通过谱峰搜索,便可求出波达方向角 θ 。理想情况下,搜索到的角度 θ 等于信号到达角时,函数式(8)出现奇异点,两个奇异点之间可分辨距离的极限为零,因此理想情况下空间谱估计具有无穷高的测向分辨力。在实际情况下,因为受到信噪比、快拍数、阵元、通道不一致等因素的影响,测向的分辨能力有所降低。

3.2 信号源 S 中存在 P 个同频信号源

假设所有接收信号同频,这时它们之间的相位关系固定不变,通过多次快拍,直接获取的信号向量不是线性独立的,即 \mathbf{R} 不满秩。降秩了的相关矩阵 \mathbf{R} 特征分解后得到的信号特征向量的个数将小于信号源的个数,即信号矢量将有可能落入噪声子空间中,这时若采用3.1节中的方法直接划分信号、噪声子空间,对 P 个信号源方向估计就会有偏差。

已有文献[3-4]对信号特征向量的可解性进行了分析,得出结论:可以从这些较少的信号特征向量中唯一地求解所有信号的到达方向角度值。又从扰动理论分析,大特征值对应的特征向量将受干扰噪声的影响较小,因此希望信号特征向量能够包含所有到达角度的信息,并从这些特征向量中求得信号的到达方向角。

这里针对多个同频信号源出现的情况,首先采用空间平滑技术^[5-6]对信号进行预处理。方法是将阵列划分为结构完全相同的 m 个子阵,然后对每个子阵作平均预滑处理,如果子阵阵元数目 $m \geq P$,空间平滑数据协方差矩阵是满秩的,从而可以实现求解相干解。空间谱估计关键在于子空间的正确划分,实际上,空间平滑技术中划分后的相邻子阵间存在一个固定间距,这个固定间距反映出子阵间的旋转不变性。空间平滑技术一方面解决了同频信号的分辨问题,但在另一方面恰恰损失了阵列的有效阵元数目,可以证明^[7],前向平滑法能分辨的最大信号源的数目 $P_{\max} \leq N/2$,前后向平滑法能分辨的最大信号源的数目 $P_{\max} \leq 2N/3$,因此还需综合使用其他的改进方法来提高分辨同频信号个数的能力,目前国内也有很多学者致力于信号谱估计算法的研究^[8]。

图 3 给出了一种适用于同频与不同频多目标信号的通用测向算法流程。

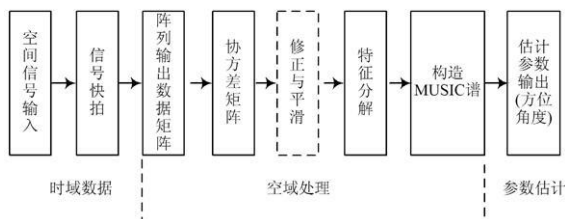


图 3 空间谱估计测向软件算法框图

4 实验仿真

(1) 不同频信号分离仿真

模型:间隔为半波长的 8 个阵元组成线性阵列;假设接收三个频率分别为 500 MHz, 600 MHz, 700 MHz 的信号;入射方向角分别为 $-20^\circ, 0^\circ, 10^\circ$;信噪比为 3 dB,则采用提出的算法得到的测向结果如图 4 所示。

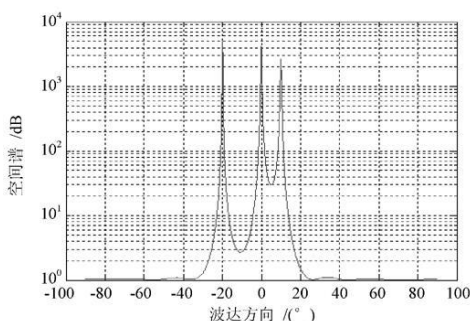


图 4 三个不同频信号测向结果

(2) 同频信号分离仿真

模型:间隔为半波长的 8 个阵元组成线性阵列;三个余弦信号的频率都为 500 MHz;入射方向角分别为 $-20^\circ, 0^\circ, 10^\circ$;信噪比为 3 dB,则采用提出的算法得到的测向结果如图 5 所示。

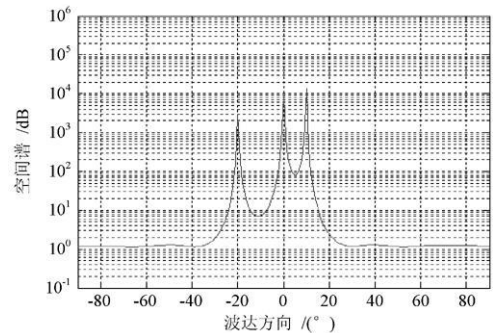


图 5 三个同频信号测向结果

5 结论

从算法原理上可以看出,空间谱估计测向具有多信号测向,能对密集信号进行分离,分离准确度高,分辨率高等优点,通过配备专门的信号处理机和快速算法可以实现快速测向,同时测出方位角,给出入射信号数目。因此,它是一种值得推广的多目标测向方法。利用空间谱估计方法在实现测向功能的同时,完成了同频、不同频多目标信号的初步分离,然后借助于其他信号分析手段,如频谱分析、时频分析、信号调制特征分析等完成信号的分离与识别,该方案的提出为目标识别器的工程实现提供了理论参考,具有重要的意义。

参考文献

- [1] 徐子久,韩俊英.无线电测向体制概述[J].中国无线电管理,2002(3):29-35.
- [2] SCHMIDT R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation [J]. IEEE Trans. on Antennas Propagation, 1986, 34(3):267-280.
- [3] 刘青光,邹理和.信号特征向量分解与到达波方向估计[J].电子学报,1993,21(1):8-14.
- [4] WAX M, ZISKIND I. On unique localization of multiple sources by passive sensor arrays [J]. IEEE Trans. on ASSP, 1989, 37(2): 996-1000.
- [5] QI Chong-ying, WANG Yong-liang. Spatial difference smoothing for DOA estimation of coherent signals [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2005, 12(11): 800-802.
- [6] PILLAI S U, KWON B. Forward/backward spatial smoothing techniques for coherent signal identification [J]. IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1989, 37(1): 8-15.

估计了 p 个分量):

$$\mathbf{w}_{p+1} = \mathbf{w}_{p+1} - \sum_{j=1}^p \mathbf{w}_{p+1}^T \mathbf{w}_j \quad (22)$$

$$\mathbf{w}_{p+1} = \mathbf{w}_{p+1} / \sqrt{\mathbf{w}_{p+1}^T \mathbf{w}_{p+1}} \quad (23)$$

与基于梯度的算法相比,固定点算法不需要选择学习步长或其它参数,使得这种算法更易使用,更可靠。由于这个算法一次只提取一个独立分量,而不是所有的分量,所以,如果只要提取某个分量,又有足够的先验知识,就可以很快地把它提取出来,从而减小计算量。此外,不管是具有正峭度还是负峭度的分量,采用该算法都能提取出来。

5 结 语

盲源分离技术是近二十年发展起来的一门新型科学,在各国科学家和研究人员的努力下获得了长足的发展,但是 ICA 的研究方兴未艾,它毕竟是一个涉及面广并且仍处在发展前沿的课题,在理论上还远没有成熟,许多问题都有待进一步研究和解决。

(1) 非平稳混合信号的盲源分离算法。许多情况下源信号可能是非平稳的,如何利用信号的非平稳特性进行盲源分离,是摆在广大研究人员面前的一个现实问题。

(2) 带噪混合信号的盲分离问题。盲信号处理中的未知条件太多,混合信号含有的噪声情况下的盲源分离问题解决起来是相当困难的。尽管目前已有部分算法对存在噪声的情况表现出了良好的性能,但由于噪声种类繁多,因此处理起来仍很棘手。现有的大多数盲源分离或盲解卷积算法都假设不含噪声或者把噪声看作是一个独立的信源信号来处理。

(3) 卷积混合信号的盲源分离算法。在实际中,系统接收到的混合输入信号是源信号经过不同的传播途径到达接收器的信号。在这个过程中,不可避免地存在信号的时延和反射。针对这种情况的盲源分离算法还很不成熟。

(4) ICA 的推广应用。在算法应用方面,ICA 可以取得进一步的发展,如可以在语音识别、图像处理、特征

提取、医学信号处理方面作进一步的研究。目前的关键问题是如何将理论算法转化为实际应用,以及如何建立更加符合实际情况的模型等。

(5) 算法的收敛性。算法全局收敛性的研究,可以考虑将遗传算法、混沌算法等具有全局收敛性的优化算法和 ICA 结合起来,以提高算法的全局收敛性。

参 考 文 献

- [1] 杨福生,洪波.独立分量分析的原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2006.
- [2] HYVARINEN A. Survey on independent component analysis[J]. Neural Computing Surveys, 1999, 2(4): 94-128.
- [3] BELL A J, SEJNOWSKI T J. An information-maximization approach to blind separation and blind deconvolution [J]. Neural Computation, 1995, 7(7): 1129-1159.
- [4] COMMON P. Independent component analysis [J]. Signal Processing, 1994, 36(3): 287-314.
- [5] LEE T W, GIROLAMI M, BELL A J, et al. A Unifying Information-theoretic framework for independent component analysis [J]. Computers & Mathematics with Applications, 2003, 1(11): 1-22.
- [6] COMMON P. Independent component analysis: a new concept [J]. Signal Processing, 1994, 36(3): 191-235.
- [7] 杨行峻,郑君里.人工神经网络与盲信号处理[M].北京:清华大学出版社,2003.
- [8] GARDOSO J F. Entropic contrast for source separation: geometry and stability unsupervised adaptive filtering, volume 1: blind source separation [M]. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2000: 129-189.
- [9] AMARI S, CARDOSO J F. Blind source separation-semi-parametric statistical approach [J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 1997, 45(11): 2692-2700.
- [10] HYVARINEN A, KARHUNEN J, OJA E. Independent component analysis [M]. Canada: [s.n.], 2001.
- [11] 虞晓,胡光锐.基于统计估计的盲信号分离算法[J].上海交通大学学报,1999,33(5): 566-569.
- [12] 张贤达,保铮.盲源分离[J].电子学报,2001,29(12): 1766-1771.

作者简介:王怀文 男,1985 年出生,硕士。主要研究方向为信号与信息处理。

(上接第 87 页)

- [7] 张贤达,保铮.通信信号处理[M].北京:国防工业出版社,2000.
- [8] 王永良.空间谱估计理论与算法[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [9] 张贤达.现代信号处理[M].2 版.北京:清华大学出版

社,2002.

- [10] 罗利春.无线电侦察信号分析与处理[M].北京:国防工业出版社,2003.
- [11] 胡广书.数字信号处理理论、算法与实现[M].北京:清华大学出版社,2003.