

基于快拍矩阵重构的宽带相关信号 DOA 估计

DOA estimation for wideband coherent signals based on the snapshot matrix reconstruction

(1.吉林大学;2.空军第一航空学院;3.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所) 伍逸枫^{1,2} 丛玉良¹ 何斌³
WU Yi-feng CONG Yu-liang HE Bin

摘要:针对相关信号空间平滑算法中阵列孔径损失的问题,提出了一种有效的去相关算法。该算法将直接数据快拍及其共轭反置矩阵构造一新的矩阵,通过对原数据矩阵和新矩阵的协方差矩阵的奇异值分解,再采用 MUSIC 算法对相关信号进行 DOA 估计,没有阵列孔径损失。仿真实验通过与 MMUSIC 算法和 ISM 算法及 CSM 算法相比较,验证了该算法的有效性。

关键词:波达方向;相关;快拍;反置矩阵;空间平滑

中图分类号: TN911

文献标识码: A

Abstract: An effective method is proposed for the problem of the array aperture loss in the spatial smoothing algorithm against coherent signals. It constructs a new matrix by the direct data snapshots and its conjugate inversion and gets the singular value decomposition of covariance matrix of the original data and the new matrix, then the DOA of coherent signals are estimated by the conventional MUSIC without the aperture loss. Compared with the MMUSIC, ISM and CSM algorithms, the simulation results demonstrate the effectiveness of the method.

Key words: DOA; coherent; snapshot; inversion matrix; spatial smoothing

1 引言

在多径传播或存在欺骗干扰的军事环境中,信号高度相关, MUSIC 算法的协方差矩阵不满秩,造成参数估计失效,目标丢失。因此探索一种相关环境下适用所有信号目标方位估计的算法很重要。

基于空间平滑技术的改进 MUSIC 去相关算法有很好的去相关性能,但它由于将接收阵列分成了多个子阵,减小了阵元数和阵面孔径,进而减小了可估计信源数目,对前向空间平滑和前后向平滑可估计的信源数分别为 $M/2$ 和 $2M/3$ 。同时,由于阵列孔径变小,对非相关信号源的 DOA 估计性能下降。另外由于空间平滑去相关技术把阵列分成了多个子阵列,也大大增加了计算量。

本文在研究空间平滑去相关技术的基础上,考虑实际应用中观测矩阵是一个复矩阵,将原始数据快拍和共轭反置矩阵融合起来,被利用的数据长度等效于增加了一倍,并且充分利用了原始矩阵和共轭反置矩阵之间的自相关和互相关信息,大大提高了 DOA 估计性能。

2 基于数据快拍矩阵重构的平滑技术

设阵列数据快拍矩阵为 $X(k)$,在修正 MUSIC(MMUSIC)算法中,令 $Y(k) = J_M X^*(k)$,其中 $X^*(k)$ 为 $X(k)$ 的复共轭, J_M 是 M 阶实交换矩阵,除反对角线上元素为 1 外,其余元素均为零,且有 $J_M J_M = I_M$,可得 $Y(k)$ 的相关矩阵为: $R_{yy} = E[Y(k)Y^H(k)] = J_M R_{xx}^* J_M$
令 $R = R_{yy} + R_{xx} = R_{xx} + J_M R_{xx}^* J_M$

对于相关信源,新构成的矩阵 R 通常具有满秩,这就解决了矩阵秩亏缺的问题,从而达到了解相关的目的。因此对进行 R 特征分解,并用 MUSIC 算法进行信号 DOA 估计,能够达到解相关的目的。修正 MUSIC 算法是空间平滑技术的一种特殊情况,它实质上相当于将空间阵列划分为两个子阵,子阵阵元数目等同于阵元数目,没有阵元数目损失,因此对于相关源和非相关源都有很好的估计性能。

本文提出了一种基于直接数据快拍矩阵重构的平滑去相关 MUSIC 改进算法,通过将数据快拍矩阵 $X(k)$ 与其共轭反置矩阵 $Y(k)$ 合并构成一新的矩阵: $Z = [X(k) \quad Y(k)]$

数据快拍矩阵 Z 的相关矩阵为 R_z ,考虑新的矩阵 $\hat{R} = [R_{xx} \quad R_{xx}^*]$,通过对构造的矩阵 \hat{R} 进行奇异值分解分离出信号子空间和噪声子空间,再利用 MUSIC 谱估计技术对相关源进行 DOA 估计。

其算法流程可以总结为以下几个步骤:

- 1) 由天线各阵元得数据快拍矩阵 $X(k)$,并计算其相关矩阵 R_{xx} ;
- 2) 取 $X(k)$ 共轭反置矩阵 $Y(k) = J_M X^*(K)$,构造快拍矩阵 $Z = [X(k) \quad Y(k)]$;
- 3) 计算矩阵 Z 的相关矩阵 R_z ,构造矩阵 $\hat{R} = [R_{xx} \quad R_{xx}^*]$;
- 4) 对 \hat{R} 进行奇异值分解(SVD),分离出信号子空间和噪声子空间;
- 5) 根据 MUSIC 算法估计信源 DOA。

3 窄带相关信源波达方向估计仿真

假设接收的信号为远场源窄带信号,信号类型为复高斯随机信号,噪声类型为复高斯加性白噪声,仿真阵列为各向同性的均匀线阵,波长 $\lambda = 1$,阵元间距 $d = 0.4\lambda$,快拍数 $T = 1024$,阵元数目 $K = 12$ 。信号源数目 $M = 3$,分别采用 MUSIC 算法、修

伍逸枫:讲师 硕士

基金项目:基金申请人:丛玉良;项目名称:宽带相关信号的波达方向(DOA)估计;基金颁发部门:吉林省科技厅(20080520)

正 MUSIC 平滑算法和本文算法对信号进行 DOA 估计。

实验一:信源角位置分别为 5° 、 10° 和 15° , 前两个信源相关, 每个阵元的信噪比为 20dB 。如图 1 所示:

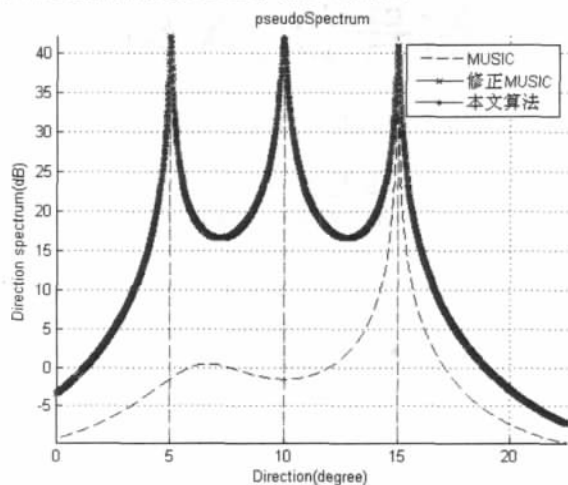


图 1 信噪比 20dB 时远距相关源 DOA 估计

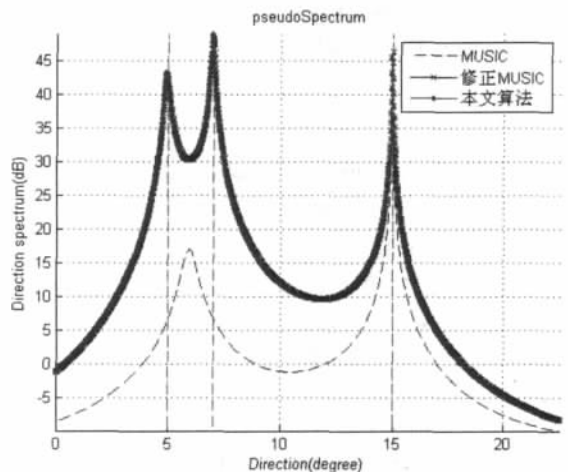


图 2 信噪比 20dB 时近距相关源 DOA 估计

实验二:信源角位置分别为 5° 、 7° 和 10° , 前两个信源相关, 每个阵元的信噪比为 20dB 。仿真结果如图 2 所示:

实验三:将每个阵元的信噪比降为 10dB , 重做实验二。仿真结果如图 4 所示:

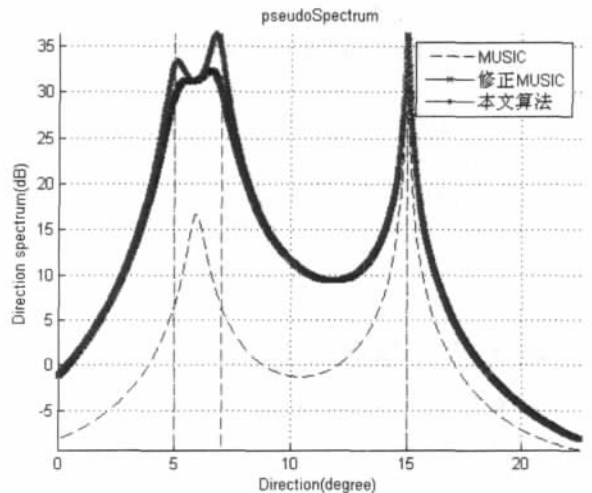


图 3 信噪比 10dB 时近距相关源 DOA 估计

表 1 修正 MUSIC 算法和本文算法 DOA 估计的均值和标准差

| 信噪比 | 修正 MUSIC 算法 | | | | 本文算法 | | | |
|-------------------|-------------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| | 5 (度) | | 15 (度) | | 5 (度) | | 15 (度) | |
| | 均值 | 标准差 | 均值 | 标准差 | 均值 | 标准差 | 均值 | 标准差 |
| 信噪比 20dB | 5.12 | 0.0182 | 15.16 | 0.0243 | 4.96 | 0.0175 | 15.08 | 0.0124 |
| 信噪比 15dB | 5.21 | 0.0843 | 15.25 | 0.0612 | 4.92 | 0.0723 | 15.14 | 0.0536 |
| 信噪比 10dB | 5.47 | 0.3046 | 15.47 | 0.3017 | 4.83 | 0.2634 | 15.23 | 0.2415 |
| 信噪比 5dB | 5.81 | 0.7392 | 15.78 | 0.8192 | 4.54 | 0.6028 | 15.42 | 0.5897 |

由图 1 和图 2 可以看出在信噪比较高的情况下,无论是近距和远距相关源, MUSIC 算法都无法正确估计出 DOA, 而修正 MUSIC 算法和本文算法都能较好地估计出信源到达角。而当信噪比变坏时,对于角度间隔比较小的相关源,如图 3 所示修正 MUSIC 算法也无能为力, 而本文算法依然能够分辨出两个相关信源。

从表 1 修正 MUSIC 算法和本文算法的估计均值和标准差的比较中可以看出,无论是对相关信源(5°)还是对非相关信源(15°)进行 DOA 估计,本文算法的性能均要优于修正 MUSIC 算法。因此,本文算法在对窄带相关和非相关信号进行 DOA 估计时,均具有较好的性能,尤其是当信噪比变坏时,仍然可以分辨出十分相近的相关源。

4 宽带相关信号波达方向估计仿真

宽带相关信号 DOA 估计主要包括信号子空间非相干处理方法(ISM 方法)和信号子空间相干处理方法(CSM 方法)。CSM 算法虽然能比较有效估计出宽带相干信号源的波达方向(DOA),但 CSM 算法首先得对信号到达角度进行预估,然后构造聚焦矩阵,最后才进行谱估计,运算量较大,很难达到实时处理。ISM 方法虽然不能处理相关源,但对非相干信源的处理却有较好的性能,并且运算量也不是很大。因此,只要能把相关信号源进行去相关处理,使之成为非相关源,再利用非相干信号子空间方法进行 DOA 估计,就能比较容易的估计出信号的波达方向。因此可以考虑将上述窄带去相关算法与 ISM 算法相融合应用到宽带相关信号上来。

改进的宽带相关信号 ISM 算法步骤归纳如下:

- (1) 阵列输出作 DFT;
- (2) 把宽带信号分为 J 个窄带, 对每个子阵构造矩阵 $\hat{R} = [\hat{R}_1 \quad \hat{R}_2]$;
- (3) 对每个窄带 \hat{R} 进行奇异值分解,构造特征值与特征向量;
- (4) 在每一个窄带上使用新的噪声特征向量构造 MUSIC 空间谱;
- (5) 利用

$$P(\theta) = \frac{1}{\sum_{j=1}^J \|a^H(f_c, \theta) E_N E_N^H a(f_c, \theta)\|^2} \quad j=1, 2, \dots, J$$

对各个子带的 DOA 谱求平均,得到宽带信号的空间谱估计。

仿真采用各向同性的均匀线阵, 波长 $\lambda = 0.1\text{m}$, 阵元间距 $d = 0.45\lambda$, 快拍数 $T = 1024$, 阵元数目 $K = 8$, 接收的信号为远场源信号。源信号为相关的宽带雷达信号, 具有相同的中心频率 $3 \times 10^9\text{Hz}$ 和相同的带宽 $2 \times 10^9\text{Hz}$ 。噪声是正态分布的随机噪声, 与信号有相同的带宽, 噪声之间相互独立, 且与信号不相关。信号源数目 $M = 2$, 角位置分别为 25° 、 40° , 阵元的信噪比为 10dB 。分别采用 ISM 方法和 CSM 方法和本文算法对信号进行 DOA 估计。得到的空间谱估计。仿真结果分别如图 4、5、6 所示。图 7 为 CSM 方法和本文算法在不同信噪比下的均方差比较。

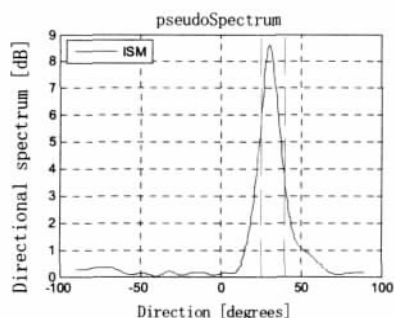


图4 ISM 宽带相关信号 DOA 估计

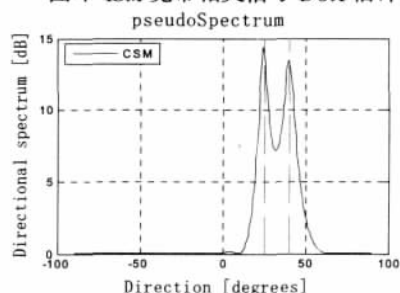


图5 CSM 宽带相关信号 DOA 估计

通过仿真结果可以看出,当信号为相关的宽带信号时,分别用 ISM 方法、CSM 方法和本文算法对信号进行 DOA 估计,由于信号是相关信号,ISM 方法已经不能分辨出两相关信号的 DOA,而本文算法由于首先对相关信号进行了去相关处理,能够同 CSM 方法一样能较好完成宽带相关信号的波达方向估计。而从 CSM 算法和本文算法在不同信噪比下的均方差比较结果可以看出,CSM 算法的性能要稍优于本文算法的性能,但由于 CSM 方法需要进行预估计和构造聚焦矩阵,运算量较大。因此本文算法能有效地实现对宽带相关信号 DOA 估计。

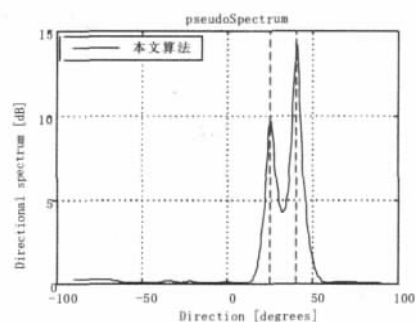


图6 本文算法对宽带相关信号的 DOA 估计

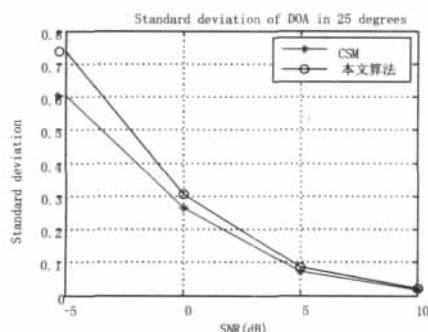


图7 CSM 算法和本文算法的性能比较

5 结束语

在分析空间平滑算法缺点的基础上,提出了基于快拍数据

矩阵重构的去相关算法。由仿真结果可以看出本文算法能够较好地实现对窄带、宽带相关信号的波达方向估计。对于窄带相关信号,本文算法的估计分辨率优于修正 MUSIC 算法;对于宽带相关信号,虽然估计的性能稍逊于 CSM 算法,但由于其具有较小的运算量,因此,就实时估计的角度来看利用本文方法对宽带相关信号进行 DOA 估计,更具有现实意义。

本文创新点:修正 MUSIC 只利用了接收数据矩阵及其共轭反置矩阵的自相关信息,而忽略了互相关信息,估计精度不够高。本文算法将快拍数据矩阵重构,充分利用自相关以及互相关信息,更具平均意义,大大提高了低信噪比下对相关信源的 DOA 估计能力。

项目经济效益:该算法对相关和非相关信号均具有较好的估计性能,尤其是当低信噪比,仍然可以分辨出十分相近的相关源,这在实际应用中具有重要的意义,运用前景广阔。

参考文献

- [1]Schmidt,R.O.,Multiple emitter location and signal parameter estimation. IEEE Transactions on Antennas and Propagation[J],1986. P-34(3):p.276-280.
- [2]吴海箐,张莉,吴瑛,相关信号源空间平滑法及其改进[J],信息工程大学学报,2001,2(4),31-34.
- [3]吴江华,周围,DOA 估计的一种改进 MUSIC 算法[J],无线电通信技术,2008.1,39-41.
- [4]Kim KK,Sarkar TK,Wang H,etal ,Direction of arrival estimation based on temporal and spatial processing using direct data domain (D3)approach [J].IEEE Transon Antennas and Propagation,2004,52 (2):533-541.
- [5]何子述,黄振兴,修正 MUSIC 算法对相关信号源的估计性能[J],通信学报,2000,21(10),14-17.
- [6]张江利,相关信源 DOA 估计算法研究[D],西南交通大学,硕士论文,2006,25-30.
- [7]刘德树,罗景春,空间谱估计及应用[M],中国科学技术出版社,1997.
- [8]吴思励,周焰,乐艳丽,李加庆,基于实测数据的雷达探测概率计算方法[J],微计算机信息,2008 ,Vol.24(7-3):198-201.
- [9]吴娟,宽带信号的 DOA 估计超分辨算法研究[D],哈尔滨工程大学,硕士论文,2007,30-40.

作者简介:伍逸枫(1978-),男(汉族),河南人,讲师,硕士,研究方向:雷达信号处理;丛玉良(1966-),女(汉族),山东人,教授,博士,研究方向:现代信号处理及应用;何斌(1961-),男(汉族),吉林人,博士,研究员,研究方向:空间遥感技术与图像处理。

Biography: WU Yi-feng (1978-), male, Henan Province, Lecturer, Master, Research area: the Radar signal processing. (130025 长春市 吉林大学通信工程学院) 伍逸枫 丛玉良 (464000 河南省信阳市 空军第一航空学院) 伍逸枫 (130025 长春市 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所) 何斌

(College of Communication Engineering of Jilin University, Changchun,130025,China) WU Yi-feng CONG Yu-liang (the First Aeronautic Insititute of Air Force, Xinyang, Henan province,464000,China) WU Yi-feng (Changchun Institute of Optics,Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun,130025,China) HE Bin 通讯地址:(464000 河南省信阳市 河南省信阳市航空路 23 号 801 信箱) 伍逸枫

(收稿日期:2009.06.25)(修稿日期:2009.7.25)