



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 107870315 B

(45) 授权公告日 2021.07.30

(21) 申请号 201711080647.X

CN 107315162 A, 2017.11.03

(22) 申请日 2017.11.06

CN 107300686 A, 2017.10.27

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 107102291 A, 2017.08.29

申请公布号 CN 107870315 A

CN 107037393 A, 2017.08.11

(43) 申请公布日 2018.04.03

CN 106324556 A, 2017.01.11

(73) 专利权人 重庆邮电大学

CN 104931920 A, 2015.09.23

地址 400065 重庆市南岸区黄桷垭崇文路2号

CN 104931923 A, 2015.09.23

US 2017090016 A1, 2017.03.30

(72) 发明人 刘松 庞育才 翁明江 余翔

刘松. 均匀圆阵高效波达方向估计关键技术研究.《中国博士学位论文全文数据库 信息科技辑》.2017, (第3期),

(74) 专利代理机构 北京同恒源知识产权代理有限公司 11275

Song Liu et al.. Unified ESPRIT spatial spectrum for Direction-of-Arrival estimation with an arbitrary sparse array.《2016 IEEE 13th International Conference on Signal Processing (ICSP)》.2017,

代理人 赵荣之

审查员 赵欢

(51) Int. Cl.

G01S 3/14 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 107092007 A, 2017.08.25

CN 106405487 A, 2017.02.15

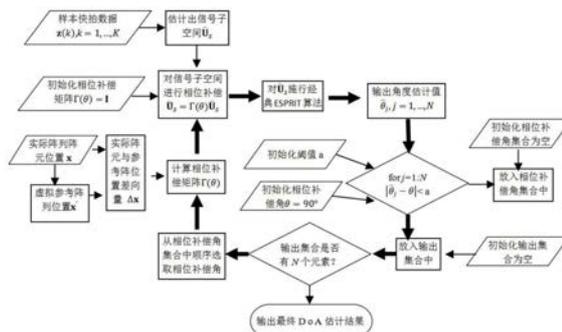
权利要求书2页 说明书6页 附图3页

(54) 发明名称

一种利用迭代相位补偿技术估计任意阵列波达方向方法

(57) 摘要

本发明涉及一种利用迭代相位补偿技术估计任意阵列波达方向方法,属于波达方向估计技术领域。该方法先根据实际阵列阵元位置构造一个虚拟均匀线阵作为参考阵列,然后引入迭代相位补偿操作,即将上一次经典ESPRIT算法输出的估计角度作为相位补偿角,根据实际阵列和参考阵列的位置差计算出相位补偿矩阵,并用该相位补偿矩阵对原始信号子空间进行相位补偿,从而对更新后的信号子空间迭代施行经典ESPRIT算法,直到获得稳定收敛的角度估计,并将其作为信号波达方向估计。本发明能快速获得基于任意非规则线阵波达方向估计,并且估计结果具有统计无偏性。



1. 一种利用迭代相位补偿技术估计任意阵列波达方向方法,其特征在于:该方法包括以下步骤:

$N=2$ 个信号分别以DoA $\theta_1=46.5658^\circ$ 和 $\theta_2=54.2785^\circ$ 入射到 $M=10$ 阵元非规则阵列上,阵列阵元位置向量为 $x=[0,0.3413,1.0147,1.6450,1.9917,2.6921,3.0240,3.4598,4.2969,4.5]\lambda$ ,其中 $\lambda$ 为信号工作波长,两信号信噪比相等,均为SNR;样本数为 $K=1000$ ,设定阈值 $a=0.1^\circ$ ;

S1:由实际阵列阵元位置坐标构造一个虚拟均匀线阵作为参考阵列,并确定实际阵列与虚拟参考阵列的位置差向量;

在步骤S1中,所述由实际阵列阵元位置坐标构造一个虚拟均匀线阵作为参考阵列具体为:按实际阵列阵元 $x$ 坐标从小到大顺序编号,得到阵元位置向量,令虚拟参考均匀线阵的两个端阵元位置与实际阵列的两个端阵元位置重合,虚拟参考阵列的其余阵元位置在端阵元之间均匀布置,虚拟参考阵元也按 $x$ 坐标从小到大顺序编号,得到虚拟阵列阵元位置向量,确定实际阵列与虚拟参考阵列的位置差向量,最后计算出虚拟参考阵相邻阵元之间的距离;

构造 $M=10$ 阵元参考均匀线阵,其位置向量为 $x'$ ,参考阵列端阵元坐标 $x'_1=x_1=0, x'_M=x_M=4.5\lambda$ ;相邻虚拟参考阵元之间的间距为 $d=\frac{x_M-x_1}{M-1}=0.5\lambda$ ,于是 $x'=[0,0.5,1,1.5,2,2.5,3,3.5,4,4.5]\lambda$ ,位置差向量为 $\Delta x=x-x'=[0,-0.1587,0.0147,0.1450,-0.0083,0.1921,0.0240,-0.0402,0.2969,0]\lambda$ ,于是基于补偿角 $\theta$ 的相位补偿矩阵为:

$$\Gamma(\theta)=diag\left\{\exp\left(\frac{-2\pi i(\Delta x)_1 \cos \theta}{\lambda}\right), \dots, \exp\left(\frac{-2\pi i(\Delta x)_M \cos \theta}{\lambda}\right)\right\}, \text{ 带入 } \Delta x \text{ 得到具体表达式;}$$

S2:由接收到的阵列快拍数据获得信号子空间的估计;

利用 $K=1000$ 个快拍矢量数据 $z(k), k=1, \dots, K$ 计算出样本协方差 $C_{cov}=\frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K-K} z(k)z^H(k)$ ;

对 $C_{cov}$ 进行特征值分解: $C_{cov}=\sum_{j=1}^{j=M} \mu_j \xi_j \xi_j^H$ ,其中 $\xi_j$ 为特征向量, $\gamma_j$ 为对应的特征值,且 $\gamma_1 \geq \gamma_2 \geq \dots \geq \gamma_M$ 并由最大 $N=2$ 个特征值对应的特征向量组成信号子空间的估计 $\hat{U}_s=[\xi_1, \xi_2]$ ;

S3:初始化相位补偿角,初始化相位补偿矩阵,设定阈值 $a$ ,初始化相位补偿角集合,初始化角度估计输出集合;设定 $\theta:=90^\circ, \Gamma(\theta):=I_M, a=0.1^\circ, \text{CompAngSet}=\{\text{NULL}\}, \text{OutputAngSet}=\{\text{NULL}\}$ ;

S4:将相位补偿矩阵与信号子空间矩阵相乘,完成相位补偿操作,并对经过相位补偿后的信号子空间施行经典的ESPRIT算法得到角度估计值,计算每个输出估计角度与输入相位补偿角的绝对差,并比较该绝对差和设定阈值的大小,小于阈值则将该估计角度放入输出集合中,否则将该估计角度放入相位补偿角集合中并顺序编号;

具体为:将相位补偿矩阵 $\Gamma(\theta)$ 与信号子空间矩阵 $\hat{U}_s$ 相乘,完成相位补偿操作, $\tilde{U}_s=\Gamma(\theta)\hat{U}_s$ ;对经过相位补偿后的信号子空间 $\tilde{U}_s$ 施行经典的ESPRIT算法得到角度估计

值,选取 $\tilde{\mathbf{U}}_s$ 的前M-1行组成子阵列1的信号子空间 $\tilde{\mathbf{U}}_s^1$ ,选择 $\tilde{\mathbf{U}}_s$ 的后M-1行组成子阵列2的信号子空间 $\tilde{\mathbf{U}}_s^2$ ;得到一个拟合方程 $\tilde{\mathbf{U}}_s^2 = \tilde{\mathbf{U}}_s^1 \tilde{\Theta}$ ,利用最小二乘原理解出拟合矩阵 $\tilde{\Theta}$ ,即 $\tilde{\Theta} = \left( (\tilde{\mathbf{U}}_s^1)^H \tilde{\mathbf{U}}_s^1 \right)^{-1} (\tilde{\mathbf{U}}_s^1)^H \tilde{\mathbf{U}}_s^2$ ;再对N×N维拟合矩阵 $\tilde{\Theta}$ 进行特征值分解,得到 $\tilde{\Theta} = \Psi \text{diag}\{\mu_1, \dots, \mu_N\}$ ,其中 $\Psi$ 为由N个特征向量组成的特征向量矩阵, $\mu_1, \dots, \mu_N$ 为N个特征值;最后再根据特征值的相角确定本次迭代的N个估计角度值 $\hat{\theta}_j = \arccos\left(\frac{\lambda \cdot \text{angle}(\mu_j)}{2\pi d}\right)$ , $j=1, 2$ ;判断每个输出估计角度与输入的相位补偿角的绝对差和阈值a的大小,若小于a则将该估计角度放入输出集合中;否则将该估计角度放入相位补偿角集合中去,并顺序编号,即判断 $|\hat{\theta}_j - \theta| < a$ 是否成立,成立则将 $\hat{\theta}_j$ 放入输出集合中去: $\text{OutputAngSet}\{\cdot\} = \text{OutputAngSet}\{\cdot\} + \{\hat{\theta}_j\}$ ,加入前需要判断该数值是否已经存在于现有的输出集合中,只有不存在的情况下才作为元素加入;否则将 $\hat{\theta}_j$ 放入到相位补偿角集合中去 $\text{CompAngSet}\{\cdot\} = \text{CompAngSet}\{\cdot\} + \{\hat{\theta}_j\}$ ,加入前需要判断该数值是否已经存在于现有的相位补偿角集合中,只有不存在的情况下才作为元素加入;

S5:判断输出集合中的元素个数是否与信号个数相等,不相等则继续执行S6,否则转向执行S7;

S6:从相位补偿角集合中按顺序取出一个相位补偿角,根据该相位补偿角结合位置差向量计算出相位补偿矩阵并转向S4;

在步骤S6中,所述根据该相位补偿角结合位置差向量计算出相位补偿矩阵并转向S4具体为:从相位补偿角集合中顺序取得一个相位补偿角,并结合S1中的位置差向量根据相位补偿矩阵计算公式计算出基于该相位补偿角的相位补偿矩阵并转向执行步骤S4;

S7:结束迭代验证并将输出集合中的角度估计值作为波达方向的最终估计值。

## 一种利用迭代相位补偿技术估计任意阵列波达方向方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于波达方向估计技术领域,涉及一种利用迭代相位补偿技术估计任意阵列波达方向方法。

### 背景技术

[0002] 空间信号波达方向 (DoA, Direction-of-Arrival) 估计,或者称为空间谱 (Spatial Spectrum) 估计,指的是利用天线系统接收空间来波信号并通过接收数据来确定信号方向的一种技术。DoA估计是现代阵列信号处理领域两大分支之一,具有较大的理论和实用价值。利用相控阵列,结合先进的DoA估计技术来对空间目标进行定位,已经在雷达、声纳、气象预测、天文观测等领域有着大量应用。新一代宽带无线通信系统,如4G/5G,利用“智能天线”(即阵列天线)来准确估计用户的方向,从而利用波束成形技术生成窄的无线波束与之通信,能有效降低系统能耗,从而提高系统容量。此外在地震源的确定,射线断层成像等都需要用到DoA估计技术。

[0003] 传统的DoA估计在雷达技术中又称为测角,即利用雷达天线发射较窄的无线电波对目标空间进行扫描,然后通过接收回波信号的有无来判断目标的存在与否,同时也可估计出该回波的DOA参数,即目标的方向。利用窄波束扫描再进行估计的方法称为Bartlett波束形成法,这种经典的波束形成技术获得的DoA估计的空间分辨率受瑞利限制,即不能分辨出同一个波束宽度内的多个空间目标;而后基于最小方差无畸变响应 (MVDR, Minimum Variance Distortionless Response) 原理的Capon算法或者最大熵法 (MEM, Maximum Entropy Method) 等自适应波束形成技术取得了高于瑞利限的空间分辨能力,被称为高分辨率空间谱估计技术;而由多重信号分类 (MUSIC, Multiple Signal Classification) 算法,利用旋转不变技术估计信号参数 (ESPRIT, Estimation of Signal Parameters Via Rotational Invariance Techniques) 算法以及最大似然 (ML, Maximum Likelihood) 算法为代表的超分辨率DoA估计算法在DoA估计领域内具有里程碑的意义。通过这些算法,可以获得针状的空间谱估计,空间分辨能力获得数量级的提升,因此超分辨率DoA估计算法获得了大量的关注和研究。

[0004] 一般来讲,ML类DoA估计算法估计精度高,均方误差小,但要涉及高维参数搜索,运算量较大;虽然有牛顿法,准牛顿法,交替迭代法等优化方法,但容易获得局部最优解,并且运算量仍然较高;MUSIC类算法可以普遍适用于各种阵列结构,它将ML算法的多维参数搜索转变为1维参数搜索 (1D, 1-Dimension DoA估计) 或者2维参数搜索 (2D DoA估计)。对于非相干信号源,已经证明MUSIC算法是ML算法的大样本实现,但MUSIC方法基于穷尽搜索策略,运算量也相当大,不利于实时应用;经典ESPRIT算法基于代数形式的解,运算效率最高,但要求阵列具有移不变结构,因此限制了该算法的应用范围。除了规则的阵列结构,实际中还存在着大量的非规则阵列,即任意结构的阵列,比如代表着高精技术的共形相控阵,一般就具有非规则的阵列结构。针对这种任意结构的阵列的DoA估计,要想得到高效率的DoA估计结果,目前主要有两种方法可供利用:一是采用阵列内插技术 (AIT, Array Interpolation

Technique),即将实际阵列流形在一定的空间角域内映射为均匀阵列流形,然后再使用ESPRIT进行估计,这种方法存在着映射误差,并且在事先确定的空间角域外误差更为明显;另一种方法称为流形分离技术(MST,Manifold Separation Technique),即将实际阵列的流形矢量进行Jacobi-Anger展开,再进行模式截断,从而将实际的流形矩阵分解为一个采样矩阵与一个范德蒙结构矩阵的乘积,从而利用求根MUSIC(Root-MUSIC)得到DoA估计的代数形式解。MST存在有截断误差,这将导致DoA估计存在偏差,同时对于稀疏阵列,为获得小的估计偏差需要截取一个较大模式数,最终会求解一个高阶代数方程,导致运算量较大。

[0005] 因此,设计一种能适用于非规则任意结构阵列,并且能获得统计无偏结果的DoA快速估计算法,就具有较大的理论和工程实际价值。

## 发明内容

[0006] 有鉴于此,本发明的目的在于提供一种利用迭代相位补偿技术估计任意阵列波达方向方法,基于迭代相位补偿技术,输出代数形式DoA估计式,能高效获得统计无偏的DoA估计结果。

[0007] 为达到上述目的,本发明提供如下技术方案:

[0008] 一种利用迭代相位补偿技术估计任意阵列波达方向方法,该方法包括以下步骤:

[0009] S1:由实际阵列阵元位置坐标构造一个虚拟均匀线阵作为参考阵列,并确定实际阵列与虚拟参考阵列的位置差向量;

[0010] S2:由接收到的阵列快拍数据获得信号子空间的估计;

[0011] S3:初始化相位补偿角,初始化相位补偿矩阵,设定阈值 $a$ ,初始化相位补偿角集合,初始化输出集合;

[0012] S4:将相位补偿矩阵与信号子空间矩阵相乘,完成相位补偿操作,并对经过相位补偿后的信号子空间施行经典的ESPRIT算法得到角度估计值,计算每个输出估计角度与输入的相位补偿角的绝对差,并比较该绝对差和设定阈值的大小,小于阈值则将该估计角度放入输出集合中,否则将该估计角度放入相位补偿角集合中并顺序编号;

[0013] S5:判断输出集合中的元素个数是否与信号个数相等,不相等则继续执行S6,否则转向执行S7;

[0014] S6:从相位补偿角集合中按顺序取出一个相位补偿角,根据该相位补偿角结合位置差向量计算出相位补偿矩阵并转向S4;

[0015] S7:结束迭代验证并将输出集合中的角度估计值作为波达方向的最终估计值。

[0016] 进一步,在步骤S1中,所述由实际阵列阵元位置坐标构造一个虚拟均匀线阵作为参考阵列具体为:按实际阵列阵元 $x$ 坐标从小到大顺序编号,得到阵元位置向量,令虚拟参考均匀线阵的两个端阵元位置与实际阵列的两个端阵元位置重合,虚拟参考阵列的其余阵元位置在端阵元之间均匀布置,虚拟参考阵元也按 $x$ 坐标从小到大顺序编号,得到虚拟阵列阵元位置向量,确定实际阵列与虚拟参考阵列的位置差向量,最后计算出虚拟参考阵相邻阵元之间的距离。

[0017] 进一步,在步骤S4中,所述对经过相位补偿后的信号子空间施行经典的ESPRIT算法得到角度估计具体为:从经过相位补偿后的信号子空间选择出两个子阵列的信号子空间,然后再利用最小二乘算法计算这两个子阵列信号空间的拟合矩阵,并对拟合矩阵进行

特征分解,获得拟合矩阵的特征值,最后利用每个特征值的相角参数获得角度值估计。

[0018] 进一步,在步骤S6中,所述根据取得的该相位补偿角结合位置差向量计算出相位补偿矩阵并转向S4具体为:从相位补偿角集合中顺序取得一个相位补偿角,并结合S1中的位置差向量根据相位补偿矩阵计算公式计算出基于该相位补偿角的相位补偿矩阵并转向执行步骤S4。

[0019] 本发明的有益效果在于:

[0020] (1) 本发明针对不规则阵列引入一个虚拟均匀线阵作为参考阵列,该虚拟阵列由实际阵列的阵元位置决定,并由实际阵列与虚拟参考阵列对应阵元之间的位置差以及一个相位补偿角度来定义相位补偿矩阵。相位补偿矩阵是一个酉对角矩阵,利用该酉矩阵对原始的信号子空间进行相位补偿,从而对相控阵列阵元空间位置的不规则空间采样进行补偿,使得经过补偿后的信号子空间逐步具有经典ESPRIT算法所要求的移不变性,从而适用高效的ESPRIT算法。

[0021] (2) 本发明采用迭代求解的方法使得对目标信号的相位补偿效果满足移不变要求,再利用ESPRIT算法给出DoA的代数形式的估计结果,估计具有统计无偏性。

[0022] (3) 本发明采用迭代方式使得输出快速收敛,相比穷尽搜索方法具有较大的运算优势,因此估计结果高效,便于实时系统实现。

## 附图说明

[0023] 为了使本发明的目的、技术方案和有益效果更加清楚,本发明提供如下附图进行说明:

[0024] 图1为一个M阵元任意非规则阵列及信号入射示意图;

[0025] 图2为一个M阵元虚拟参考均匀线阵示意图;

[0026] 图3为本发明算法框图;

[0027] 图4为利用一个M=10阵元非规则阵列对两信号入射情况下信号DoA的100次估计结果;

[0028] 图5为利用一个M=10阵元非规则阵列对两信号入射情况下信号DoA估计绝对偏差随信噪比(SNR)的变化情况;

[0029] 图6为利用一个M=10阵元非规则阵列对两信号入射情况下信号DoA估计均方根误差(RMSE)随信噪比(SNR)的变化情况。

## 具体实施方式

[0030] 下面将结合附图,对本发明的优选实施例进行详细的描述。

[0031] 本发明提供了一种利用迭代相位补偿技术估计任意阵列波达方向方法。该方法首先根据实际的M元阵列阵元位置构造一个M元虚拟均匀线阵作为参考阵列,参考阵列的端阵元位置与实际阵列端阵元位置重合,于是可确定实际阵列阵元与虚拟参考阵列阵元位置的位置差矩阵 $\Delta x$ ,结合一个相位补偿角变量 $\theta$ ,可计算出基于该相位补偿角的相位补偿矩阵 $\Gamma(\theta)$ ;然后由经典ESPRIT算法对估计得到的信号子空间进行初始角估计,此时对应初始相位补偿矩阵为一个单位阵,即不进行相位更新,接着用每个输出估计角度作为相位补偿角计算出相应的相位补偿矩阵,对原始信号子空间进行相位补偿,再对相位更新后的信号子空

间施行ESPRIT算法,再次得到角估计,如此迭代反复,直到ESPRIT算法输出的某个角度估计值收敛到据以计算相位补偿矩阵的相位补偿角,并把该角度估计值作为信号的DoA估计输出。

[0032] 所述的构造虚拟均匀线阵的方法指的是:根据M元实际阵列阵元位置坐标的最大值和最小值来设定虚拟参考阵的两个端阵元,其余虚拟参考阵元就在这两个端阵元之间均匀分布,按坐标从小到大的顺序给实际阵列阵元编号,组成的 $M \times 1$ 维位置向量为 $x$ ;记虚拟参考阵列的位置矢量为 $x'$ ,则两个虚拟端阵元的位置坐标为 $x'_1 = x_1$ 和 $x'_M = x_M$ ,相邻虚拟参考阵元之间的间距为 $(x_M - x_1) / (M - 1)$ ,其它虚拟阵元的位置坐标为 $x'_j = x_1 + (j - 1)d$ ,  $j = 2, \dots, M - 1$ ;最后即可确定实际阵列与虚拟参考阵之间的位置差向量为 $\Delta x = x - x'$ 。

[0033] 所述的结合一个相位补偿角变量 $\theta$ ,可计算出基于该相位补偿角的相位补偿矩阵 $\Gamma(\theta)$

具体为:相位补偿矩阵定义为 $\Gamma(\theta) = \text{diag} \left\{ \exp \left( \frac{-2\pi i (\Delta x)_1 \cos \theta}{\lambda} \right), \dots, \exp \left( \frac{-2\pi i (\Delta x)_M \cos \theta}{\lambda} \right) \right\}$ 。

[0034] 所述的用每个输出估计角度作为相位补偿角计算出相应的相位补偿矩阵,对原始信号子空间进行相位补偿具体为:设定输出的估计角度值为 $\hat{\theta}$ ,估得的原始信号子空间为 $\hat{U}_s$ ,则令该角度估计值为相位补偿角 $\theta$ ,即 $\theta = \hat{\theta}$ ,然后计算出相位补偿矩阵 $\Gamma(\theta)$ ,将相位补偿矩阵与原始信号子空间相乘,得到相位补偿后的信号子空间 $\tilde{U}_s$ ,即 $\tilde{U}_s = \Gamma(\theta) \hat{U}_s$ ,于是完成相位补偿操作。

[0035] 所述的再对相位更新后的信号子空间施行ESPRIT算法具体是指:设定待估信号数目为N,选择 $\tilde{U}_s$ 的前M-1行组成子阵列1的信号子空间 $\tilde{U}_s^1$ ;选择 $\tilde{U}_s$ 的后M-1行组成子阵列2的信号子空间 $\tilde{U}_s^2$ ;得到一个拟合方程 $\tilde{U}_s^2 = \tilde{U}_s^1 \tilde{\Theta}$ ,利用最小二乘原理解出拟合矩阵 $\tilde{\Theta}$ ,即 $\tilde{\Theta} = \left( (\tilde{U}_s^1)^H \tilde{U}_s^1 \right)^{-1} (\tilde{U}_s^1)^H \tilde{U}_s^2$ ;再对 $N \times N$ 维拟合矩阵 $\tilde{\Theta}$ 进行特征值分解,得到 $\tilde{\Theta} = \Psi \text{diag} \{ \mu_1, \dots, \mu_N \}$ ,其中 $\Psi$ 为N个特征向量组成的特征向量矩阵, $\mu_1, \dots, \mu_N$ 为N个特征值;最后再根据特征值的相

角确定本次迭代的N个估计角度值: $\hat{\theta}_j = \arccos \left( \frac{\lambda \cdot \text{angle}(\mu_j)}{2\pi d} \right)$ 。

[0036] 所述的ESPRIT算法输出的某个角度估计值收敛到据以计算相位补偿矩阵的相位补偿角具体是指:设定相位补偿角为 $\theta$ ,ESPRIT算法某个输出角度估计值为 $\hat{\theta}_j, j = 1, \dots, N$ ,实际是通过判断两个角度值的绝对差是否足够小来判断 $\hat{\theta}$ 是否收敛到 $\theta$ ,即若 $|\hat{\theta}_j - \theta| < a$ 成立则可判断收敛,其中a为预先设定的一个阈值,一般为一个较小的角度值,a越小最后输出的角度估计越为精确,但迭代次数相应增加,本发明具体实例中设置为 $0.1^\circ$ 。

[0037] 图1为一个M阵元任意非规则阵列示意图,N个信号分别以DoA $\theta_j, j = 1, \dots, N$ 同时入射到该阵列;

[0038] 图2为一个M阵元虚拟参考均匀线阵示意图,端阵元与实际阵列端阵元重合,其它阵元均匀布置在两个端阵元之间;

[0039] 图3为本发明算法框图;

[0040] 图4为利用一个M=10阵元非规则阵列对两信号入射情况下信号DoA的100次估计结果,信号信噪比相等且SNR=10dB,快拍样本数K=1000;

[0041] 图5为利用一个M=10阵元非规则阵列对两信号入射情况下DoA估计绝对偏差随信噪比(SNR)的变化情况,快拍样本数为K=1000;

[0042] 图6为利用一个M=10阵元非规则阵列对两信号入射情况信号下DoA估计均方根误差(RMSE)随信噪比(SNR)的变化情况,快拍样本数为K=1000。

[0043] 具体实施例:

[0044] N=2个信号分别以DoA  $\theta_1=46.5658^\circ$ 和 $\theta_2=54.2785^\circ$ 入射到M=10阵元非规则阵列上,阵列阵元位置向量为 $x=[0,0.3413,1.0147,1.6450,1.9917,2.6921,3.0240,3.4598,4.2969,4.5]\lambda$ ,其中 $\lambda$ 为信号工作波长,两信号信噪比相等,均为SNR;样本数为K=1000,设定阈值 $a=0.1^\circ$ 。

[0045] (1) 构造虚拟参考阵列及定义相位补偿矩阵

[0046] 构造M=10阵元参考均匀线阵,其位置向量为 $x'$ ,参考阵列端阵元坐标 $x'_1=x_1=0$ ,

$x'_M=x_M=4.5\lambda$ ;相邻虚拟参考阵元之间的间距为 $d=\frac{x_M-x_1}{M-1}=0.5\lambda$ ,于是 $x'=[0,0.5,1,$

$1.5,2,2.5,3,3.5,4,4.5]\lambda$ ,位置差向量为 $\Delta x=x-x'=[0,-0.1587,0.0147,0.1450,-0.0083,0.1921,0.0240,-0.0402,0.2969,0]\lambda$ ,于是基于补偿角 $\theta$ 的相位补偿矩阵为:

$\Gamma(\theta)=diag\left\{\exp\left(\frac{-2\pi i(\Delta x)_1 \cos \theta}{\lambda}\right),\dots,\exp\left(\frac{-2\pi i(\Delta x)_M \cos \theta}{\lambda}\right)\right\}$ ,带入 $\Delta x$ 即可得到具体表达式。

式。

[0047] (2) 由接收到的阵列快拍数据获得信号子空间的估计

[0048] 利用K=1000个快拍矢量数据 $z(k),k=1,\dots,K$ 计算出样本协方差

$C_{cov}=\frac{1}{K}\sum_{k=1}^{k=K}z(k)z^H(k)$ ;对 $C_{cov}$ 进行特征值分解: $C_{cov}=\sum_{j=1}^{j=M}\mu_j\xi_j\xi_j^H$ ,其中 $\xi_j$ 为特征向量,

$\gamma_j$ 为对应的特征值,且 $\gamma_1\geq\gamma_2\geq\dots\geq\gamma_M$ 并由最大N=2个特征值对应的特征向量组成信号子空间的估计 $\hat{U}_s=[\xi_1,\xi_2]$ 。

[0049] (3) 初始化相位补偿角,相位补偿矩阵,设定阈值a,初始化相位补偿角集合为空,初始化输出集合为空

[0050] 设定 $\theta:=90^\circ$ , $\Gamma(\theta):=I_M,a=0.1^\circ$ ,CompAngSet={NULL},OutputAngSet={NULL}。

[0051] (4) 将相位补偿矩阵 $\Gamma(\theta)$ 与信号子空间矩阵 $\hat{U}_s$ 相乘,完成相位补偿操作,即

$\tilde{U}_s=\Gamma(\theta)\hat{U}_s$ ,;并对经过相位补偿后的信号子空间 $\tilde{U}_s$ 施行经典的ESPRIT算法得到角度估计值,即选取 $\tilde{U}_s$ 的前M-1行组成子阵列1的信号子空间 $\tilde{U}_s^1$ ,选择 $\tilde{U}_s$ 的后M-1行组成子阵列2

的信号子空间 $\tilde{U}_s^2$ ;得到一个拟合方程 $\tilde{U}_s^2=\tilde{U}_s^1\tilde{\Theta}$ ,利用最小二乘原理解出拟合矩阵 $\tilde{\Theta}$ ,即

$\tilde{\Theta}=\left((\tilde{U}_s^1)^H\tilde{U}_s^1\right)^{-1}(\tilde{U}_s^1)^H\tilde{U}_s^2$ ;再对N×N维拟合矩阵 $\tilde{\Theta}$ 进行特征值分解,得到 $\tilde{\Theta}=\Psi diag\{\mu_1,\dots,\mu_N\}$ ,

其中 $\Psi$ 为由N个特征向量组成的特征向量矩阵, $\mu_1,\dots,\mu_N$ 为N个特征值;最后再根据特征值的

相角确定本次迭代的N个估计角度值  $\hat{\theta}_j = \arccos\left(\frac{\lambda \cdot \text{angle}(\mu_j)}{2\pi d}\right)$ ,  $j=1, 2$ ; 判断每个输出估计角度与输入的相位补偿角的绝对差和阈值a的大小, 若小于a则将该估计角度放入输出集合中; 否则将该估计角度放入相位补偿角集合中去, 并顺序编号, 即判断  $|\hat{\theta}_j - \theta| < a$  是否成立, 成立则将该  $\hat{\theta}_j$  放入输出集合中去:  $OutputAngSet\{\cdot\} = OutputAngSet\{\cdot\} + \{\hat{\theta}_j\}$ , 注意的是加入前需要判断该数值是否已经存在于现有的输出集合中, 只有不存在的情况下才作为元素加入; 否则将  $\hat{\theta}_j$  放入到相位补偿角集合中去  $CompAngSet\{\cdot\} = CompAngSet\{\cdot\} + \{\hat{\theta}_j\}$ , 同样的加入前需要判断该数值是否已经存在于现有的相位补偿角集合中, 只有不存在的情况下才作为元素加入。

[0052] (5) 判断输出集合中的元素个数是否与信号个数相等, 即是否有N个不同的元素, 不相等则继续顺序执行下面步骤(6), 否则转向执行步骤(7);

[0053] (6) 从相位补偿角集合中按顺序取出一个相位补偿角, 根据该相位补偿角结合位置差向量计算出对应的相位补偿矩阵并转向步骤(4);

[0054] (7): 结束迭代验证并将输出集合中的角度估计值作为DoA的最终估计值。

[0055] 最后说明的是, 以上优选实施例仅用以说明本发明的技术方案而非限制, 尽管通过上述优选实施例已经对本发明进行了详细的描述, 但本领域技术人员应当理解, 可以在形式上和细节上对其作出各种各样的改变, 而不偏离本发明权利要求书所限定的范围。

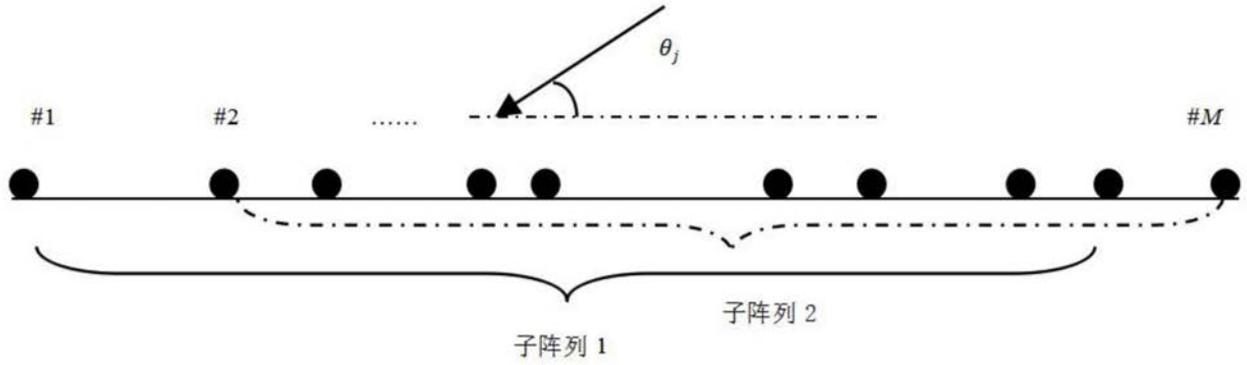


图1

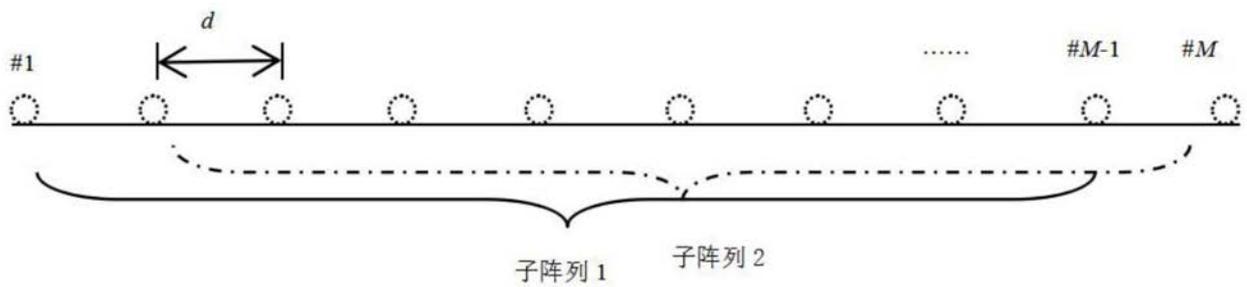


图2

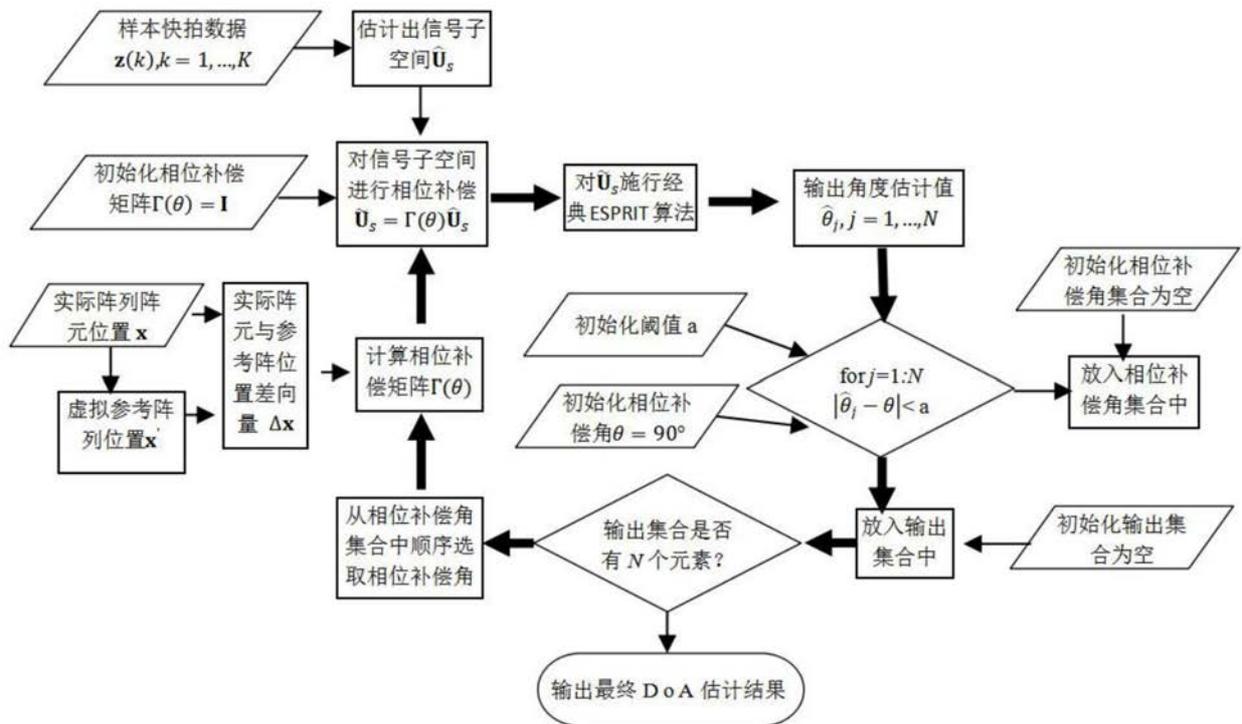


图3

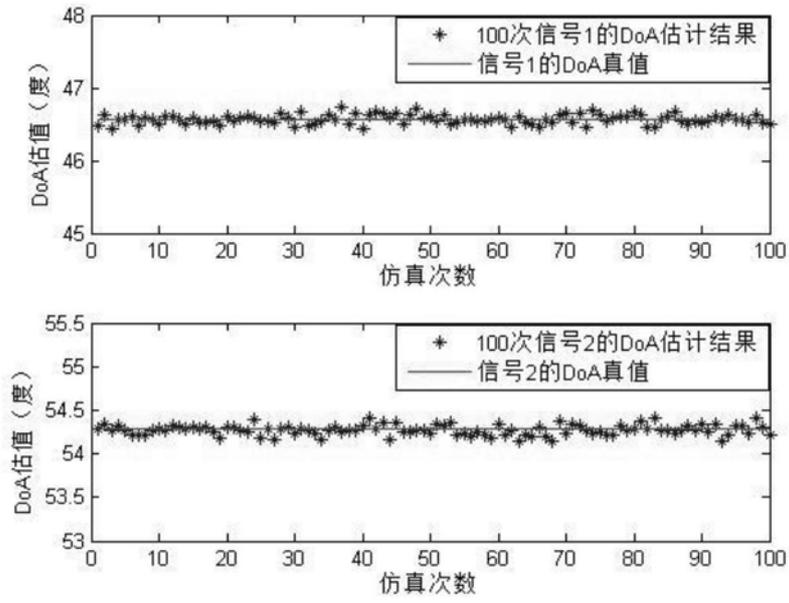


图4

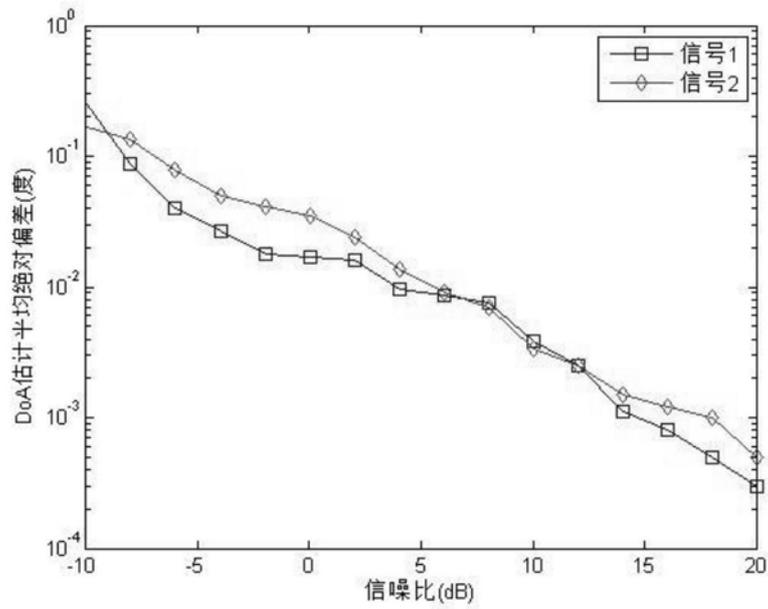


图5

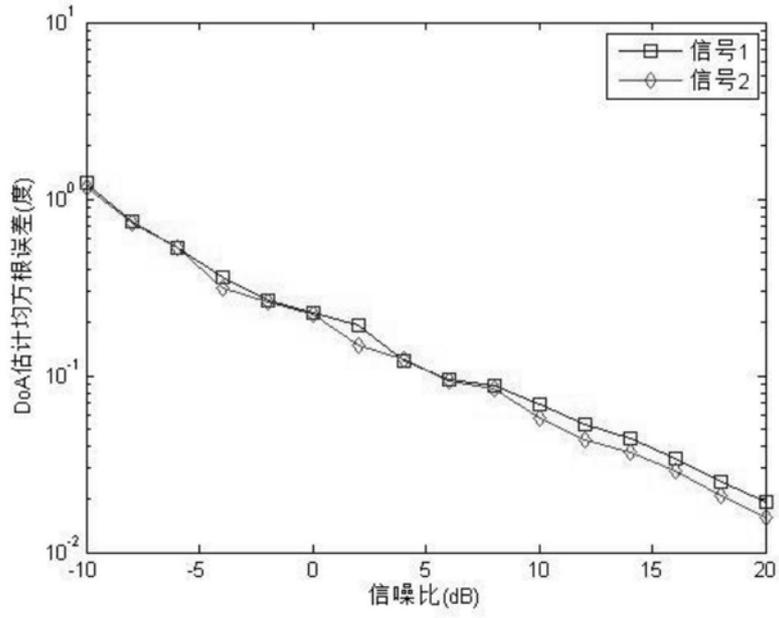


图6