(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106908754 A
(43)申请公布日 2017.06.30

(21)申请号 201710098049.9

(22)申请日 2017.02.22

(71)申请人 西安电子科技大学
地址 710071 陕西省西安市雁塔区太白南路2号

(72)发明人 王兰美 郭立新 惠哲 刘聪锋 张艳艳 王瑶

(51)Int.Cl.
G01S 3/802(2006.01)

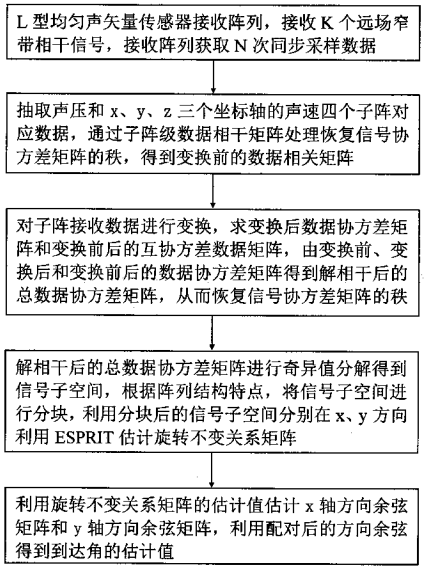
权利要求书2页 说明书6页 附图5页

(54)发明名称

L型声矢量传感器阵列ESPRIT解相干参数估计方法

(57)摘要

L型声矢量传感器阵列ESPRIT解相干参数估计方法，阵列接收K个远场窄带相干信号，接收阵列输出N次同步采样数据；抽取声压和x、y、z三个坐标轴的声速四个子阵数据，计算子阵数据协方差矩阵、变换后子阵协方差数据矩阵和变换前后的互协方差数据矩阵，分别由协方差数据矩阵算术平均得到解相干后的协方差数据矩阵，由解相干后的三个协方差矩阵构造总的解相干数据协方差矩阵，最后对解相干后的总数据协方差矩阵奇异值分解得到信号子空间，根据阵列结构特点将信号子空间分块，分别在x、y方向利用旋转不变关系估计x和y轴方向的方向余弦，利用全阵列信号子空间进行参数配对，由配对后的方向余弦得到到达角估计，本方明方法参数配对简单，计算量低。



CN 106908754 A

1.L型声矢量传感器阵列ESPRIT解相干参数估计方法，其特征在于：

所述声矢量传感器阵列由2M-1个均匀分布x轴和y轴的声矢量传感器构成，其中M个阵元沿x轴均匀排列阵元间隔为d_x，M个阵元沿y轴均匀排列，阵元间隔为d_y，坐标原点的两轴共用，所述阵元是具有空间共点同步测量声压以及x轴、y轴和z轴方向振速分量的声矢量传感器，相邻阵元间距$d_x \leq \lambda_{min}/2$，$d_y \leq \lambda_{min}/2$，λ_{min}为入射声波信号的最小波长；

L型声矢量传感器阵列解相干参数估计方法的步骤如下：均匀L型声矢量传感器阵列接收K个相干窄带、平稳远场声源信号，

步骤一、L型均匀声矢量传感器接收阵列，接收K个远场窄带相干信号，接收阵列获取N次同步采样数据Z；

步骤二、抽取声压和x、y、z三个坐标轴的声速四个子阵对应的子阵数据Z_p、Z_x、Z_y、Z_z，通过子阵级数据协方差矩阵处理恢复数据协方差矩阵的秩，得到变换前的数据协方差矩阵R_Z；

根据阵列数据Z的排布规律将数据分成声压以及x轴、y轴和z轴方向振速四个子阵数据，计算4个子阵数据的协方差矩阵$\tilde{\mathbf{R}}_p$、$\tilde{\mathbf{R}}_x$ $\tilde{\mathbf{R}}_y$和$\tilde{\mathbf{R}}_z$，其中，$\tilde{\mathbf{R}}_p = \mathbf{Z}_p\mathbf{Z}_p^H/N$，$\tilde{\mathbf{R}}_x = \mathbf{Z}_x\mathbf{Z}_x^H/N$，$\tilde{\mathbf{R}}_y = \mathbf{Z}_y\mathbf{Z}_y^H/N$，$\tilde{\mathbf{R}}_z = \mathbf{Z}_z\mathbf{Z}_z^H/N$，通过4个子阵数据协方差矩阵的算术平均$\mathbf{R}_Z = \left(\tilde{\mathbf{R}}_p + \tilde{\mathbf{R}}_x + \tilde{\mathbf{R}}_y + \tilde{\mathbf{R}}_z\right)/4$得到变换前的满秩数据协方差矩阵$R_Z$；

步骤三、对子阵数据进行变换，求变换后的数据协方差矩阵R_Y和变换前后的互协方差数据矩阵R_{ZY}，由矩阵R_Z、R_Y和R_{ZY}得到解相干后的总数据协方差矩阵R，从而恢复信号协方差矩阵的秩；

对子阵数据Z_p、Z_x、Z_y、Z_z进行变换$\mathbf{Y}_p = \mathbf{J}_M\mathbf{Z}_p^*$，$\mathbf{Y}_x = \mathbf{J}_M\mathbf{Z}_x^*$，$\mathbf{Y}_y = \mathbf{J}_M\mathbf{Z}_y^*$，$\mathbf{Y}_z = \mathbf{J}_M\mathbf{Z}_z^*$，其中，$J_M$是M×M的反对角变换矩阵，$J_{l,M-l+1}=1$ (l＝1，…，M) 是J_M的第l行第M-l+1列的元素，J_M的其它元素全部为零，$\mathbf{Z}_p^*$、$\mathbf{Z}_x^*$、$\mathbf{Z}_y^*$、$\mathbf{Z}_z^*$表示对子阵数据Z_p、Z_x、Z_y、Z_z取共轭后的数据，求变换后子阵数据Y_p、Y_x、Y_y、Y_z的数据协方差矩阵$\bar{\mathbf{R}}_p$、$\bar{\mathbf{R}}_x$、$\bar{\mathbf{R}}_y$、$\bar{\mathbf{R}}_z$，其中$\bar{\mathbf{R}}_p = \mathbf{Y}_p\mathbf{Y}_p^H/N$，$\bar{\mathbf{R}}_x = \mathbf{Y}_x\mathbf{Y}_x^H/N$，$\bar{\mathbf{R}}_y = \mathbf{Y}_y\mathbf{Y}_y^H/N$，$\bar{\mathbf{R}}_z = \mathbf{Y}_z\mathbf{Y}_z^H/N$，求变换前后数据的互协方差矩阵：$Q_p$、$Q_x$、$Q_y$、$Q_z$，其中，$\mathbf{Q}_p = \mathbf{Z}_p\mathbf{Y}_p^H/N$，$\mathbf{Q}_x = \mathbf{Z}_x\mathbf{Y}_x^H/N$，$\mathbf{Q}_y = \mathbf{Z}_y\mathbf{Y}_y^H/N$，$\mathbf{Q}_z = \mathbf{Z}_z\mathbf{Y}_z^H/N$，变换后子阵协方差矩阵的算术平均得到变换后协方差矩阵$\mathbf{R}_Y = \left(\bar{\mathbf{R}}_p + \bar{\mathbf{R}}_x + \bar{\mathbf{R}}_y + \bar{\mathbf{R}}_z\right)/4$，变换前后子阵数据的互协方差矩阵求算术平均得到变换前后互协方差矩阵R_{ZY}＝(Q_p+Q_x+Q_y+Q_z)/4，构造解相干总数据协方差矩阵R＝[R_{ZY} R_Z R_Y]；

步骤四、由解相干后的总数据协方差矩阵R进行奇异值分解得到信号子空间U_s，根据阵列的结构特点，将信号子空间进行分块，利用分块后的信号子空间分别在x、y方向利用ESPRIT估计旋转不变关系矩阵$\hat{\mathbf{\Phi}}_x$和$\hat{\mathbf{\Phi}}_y$；

根据阵列数据的排布规律，将信号子空间U_s进行分块运算，信号子空间U_s分成x轴子阵对应的信号子空间U_{sx}和y轴子阵对应的子空间U_{sy}，U_{sx}分成x轴子阵的前M-1个阵元对应的信号子空间U_{sx1}和后M-1个阵元对应的信号子空间U_{sx2}，U_{sy}分成y轴子阵的前M-1个阵元对应的信号子空间U_{sy1}和后M-1个阵元对应的信号子空间U_{sy2}，x轴上的两个均匀子阵满足的平移不

变关系为$U_{sx1}=A_{x1}T_1$，$U_{sx2}=A_{x2}T_1$，$A_{x2}=A_{x1}\Phi_x$，其中，T_1是K×K的非奇异变换矩阵，$\boldsymbol{\Phi}_x=\mathrm{diag}\left(\left[e^{j\frac{2\pi}{\lambda_1}d_x\sin\theta_1\cos\phi_1},\cdots,e^{j\frac{2\pi}{\lambda_k}d_x\sin\theta_k\cos\phi_k},\cdots,e^{j\frac{2\pi}{\lambda_K}d_x\sin\theta_K\cos\phi_K}\right]\right)$是旋转不变关系矩阵，$U_{sy1}=A_{y1}T_2$，$U_{sy2}=A_{y2}T_2$，$A_{y2}=A_{y1}\Phi_y$，其中，$T_2$是K×K的非奇异变换矩阵，$\boldsymbol{\Phi}_y=\mathrm{diag}\left(\left[e^{j\frac{2\pi}{\lambda_1}d_y\sin\theta_1\sin\phi_1},\cdots,e^{j\frac{2\pi}{\lambda_k}d_y\sin\theta_k\sin\phi_k},\cdots,e^{j\frac{2\pi}{\lambda_K}d_y\sin\theta_K\sin\phi_K}\right]\right)$是旋转不变关系矩阵且$\mathbf{U}_{sy1}^{\#}\mathbf{U}_{sy2}\mathbf{T}_2=\boldsymbol{\Phi}_y\mathbf{T}_2$，$\mathbf{U}_{sx1}^{\#}\mathbf{U}_{sx2}\mathbf{T}_1=\boldsymbol{\Phi}_x\mathbf{T}_1$，对$\mathbf{U}_{sy1}^{\#}\mathbf{U}_{sy2}$进行特征分解，特征值构成旋转不变关系矩阵$\Phi_y$的估计$\hat{\boldsymbol{\Phi}}_y$，对$\mathbf{U}_{sx1}^{\#}\mathbf{U}_{sx2}$进行特征分解，特征值构成旋转不变关系矩阵$\Phi_x$的估计$\hat{\boldsymbol{\Phi}}_x$，其中$\mathbf{U}_{sy1}^{\#}=\left(\mathbf{U}_{sy1}^{\mathrm{H}}\mathbf{U}_{sy1}\right)^{-1}\mathbf{U}_{sy1}^{\mathrm{H}}$，$\mathbf{U}_{sx1}^{\#}=\left(\mathbf{U}_{sx1}^{\mathrm{H}}\mathbf{U}_{sx1}\right)^{-1}\mathbf{U}_{sx1}^{\mathrm{H}}$；

步骤五、利用旋转不变关系矩阵的估计值$\hat{\boldsymbol{\Phi}}_x$和$\hat{\boldsymbol{\Phi}}_y$估计x轴方向余弦矩阵$\hat{\mathbf{u}}_x=\left[\hat{u}_{1x},\cdots\hat{u}_{ix},\cdots,\hat{u}_{Kx}\right]$和y轴方向余弦矩阵$\hat{\mathbf{u}}_y=\left[\hat{u}_{1y},\cdots\hat{u}_{ky},\cdots,\hat{u}_{Ky}\right]$，其中$\hat{u}_{ix}=\sin\hat{\theta}_i\cos\hat{\phi}_i$，$\hat{u}_{ky}=\sin\hat{\theta}_k\sin\hat{\phi}_k$，利用配对后的方向余弦$\hat{u}_{kx}$和$\hat{u}_{ky}$得到到达角的估计值$\hat{\theta}_k$和$\hat{\phi}_k$；

因为x轴和y轴方向的旋转不变关系矩阵$\hat{\boldsymbol{\Phi}}_x$和$\hat{\boldsymbol{\Phi}}_y$是由两次独立的特征分解得到的，所以$\hat{\boldsymbol{\Phi}}_x$和$\hat{\boldsymbol{\Phi}}_y$估计x轴方向余弦矩阵$\hat{\mathbf{u}}_x$和y轴方向的方向余弦矩阵$\hat{\mathbf{u}}_y$中信号的排列顺序不同，必须进行配对运算才能使同一个信号的x轴方向余弦和y轴方向的方向余弦匹配成对，本发明根据同一个信号x轴方向余弦和y轴方向的方向余弦构成的阵列导向矢量位于信号子空间，因此有$u_{kx}=\underset{u_{ix}}{\arg\max}\left|\mathbf{A}\left(u_{ix},u_{ky}\right)\mathbf{U}_s^{\mathrm{H}}\mathbf{U}_s\mathbf{A}^{\mathrm{H}}\left(u_{ix},u_{ky}\right)\right|$，利用这种方式对第k个y轴方向余弦$\hat{u}_{ky}$与所有的x轴方向余弦进行组合，根据表达式$\left|\mathbf{A}\left(u_{ix},u_{ky}\right)\mathbf{U}_s^{\mathrm{H}}\mathbf{U}_s\mathbf{A}^{\mathrm{H}}\left(u_{ix},u_{ky}\right)\right|$最大的原则找到的$u_{ix}$和$u_{ky}$配对成功，此时的$\hat{u}_{ix}=\hat{u}_{kx}=\sin\hat{\theta}_k\cos\hat{\phi}_k$，$\hat{u}_{ky}=\sin\hat{\theta}_k\sin\hat{\phi}_k$，从而可以得到到达角的估计值：

$$\hat{\theta}_k=\arcsin\left(\sqrt{\hat{u}_{kx}^2+\hat{u}_{ky}^2}\right),$$

$$\hat{\phi}_k=\begin{cases}\arctan\left(\dfrac{\hat{u}_{ky}}{u_{kx}}\right), & \hat{u}_{kx}\geq 0\\ \pi+\arctan\left(\dfrac{\hat{u}_{ky}}{u_{kx}}\right), & \hat{u}_{kx}<0\end{cases};$$

前述步骤中的k=1,...,K,i=1,...,K。

L型声矢量传感器阵列ESPRIT解相干参数估计方法

技术领域

[0001] 本发明属于信号处理技术领域，尤其涉及一种声矢量传感器阵列的相干源二维到达角估计方法。

背景技术

[0002] 由于实际环境日益复杂性，在实际环境中相关或是相干信号是普遍存在的，如信号传输过程中的多径现象，以及在战争中敌方有意设置的干扰等。在实际情况下，很难会只有一个信号的情况，当多个信号同时存在时，这些信号可以是不相关的、相关的或者相干的，当入射信号是相干信号时，信号子空间的维数将小于信号源个数，信号子空间扩散到了噪声子空间，从而导致信号子空间和噪声子空间不完全垂直，以MUSIC为代表的子空间类方法将失效，无法进行方向估计。对于非相干信号的参数估计，理论已经比较完善，但强相关或相干信号源的检测与估计仍然是信号参数估计中的一个十分棘手的问题。以ESPRIT和MUSIC为代表的子空间类方法的因为分辨率高而倍受青睐，但一般的ESPRIT方法无法直接应用于相干信号的参数估计中，而基于空间平滑的二维ESPRIT方法通过修正接收数据的协方差矩阵来实现解相干的目的，但空间平滑方法减小了阵列孔径，降低了阵列的分辨能力，且空间平滑一般只适用于均匀线阵，严重限制了方法的应用范围。声矢量传感器是一种新型的声源信号测向设备，它是由三个相互正交的质点振速传感器和一个声压传感器构成，因而能够同步测量声场中某处的声压强度和质点振速。声矢量传感器阵列与标量传感器阵列相比较，声矢量传感器阵列不仅能够获取阵列孔径信息，而且蕴含矢量传感器各分量之间的正交信息，因而具有更高的空间分辨力和测向精度，近年来已成为国内外学者研究的热点问题。本发明针对现有方法的不足提出了适用于均匀L型声矢量传感器阵列解相干ESPRIT方法，利用了声矢量传感器阵列自身的矢量结构特性，将声矢量传感器阵列分成声压子阵、x轴振速子阵、y轴振速子阵和z轴振速子阵，然后根据子阵的旋转不变特性解相干，这种解相干称为空间旋转解相干方法，对数据协方差矩阵特征分解，在x和y轴方向分别利用ESPRIT方法估计得到x和y轴方向的方向余弦，通过配对得到信号到达角的估计。

发明内容

[0003] 本发明的目的是提供一种L型声矢量传感器阵列ESPRIT解相干参数估计方法。

[0004] 为了实现上述目的，本发明采取如下的技术解决方案：

[0005] L型声矢量传感器阵列ESPRIT解相干参数估计方法，K个相干窄带、平稳远场声源信号从不同的方向(θ_k,Φ_k)入射到该接收阵列上，$\theta_k\in[0,\pi/2]$是第k个信号的俯仰角，$\Phi_k\in[0,2\pi]$是第k个信号的方位角，所述阵列由2M-1个均匀分布于x轴和y轴的声矢量传感器构成，其中，M个阵元沿x轴均匀排列且阵元间隔为d_x，M个阵元沿y轴均匀排列且阵元间隔为d_y，坐标原点的两轴共用，所述阵元是具有空间共点同步测量声压以及x轴、y轴和z轴方向振速分量的声矢量传感器，所有传感器的对应通道相互平行：所有的声压传感器相互平行，所有的x轴方向振速传感器相互平行，所有的y轴方向振速传感器相互平行，以及所有的z轴

方向振速传感器相互平行；相邻阵元间距$d_x \leqslant \lambda_{min}/2$，$d_y \leqslant \lambda_{min}/2$，$\lambda_{min}$为入射声波信号的最小波长；

[0006] ESPRIT解相干二维参数估计方法步骤如下：

[0007] 步骤一、L型均匀声矢量传感器接收阵列，接收K个远场窄带相干信号，接收阵列获取N次同步采样数据Z；

[0008] 步骤二、抽取声压和x、y、z三个坐标轴的声速四个子阵对应的子阵数据Z_p、Z_x、Z_y、Z_z，通过子阵级数据协方差矩阵处理恢复数据协方差矩阵的秩，得到变换前的数据协方差矩阵R_Z；

[0009] 根据阵列数据Z的排布规律将数据分成声压以及x轴、y轴和z轴方向振速四个子阵数据，计算4个子阵数据的协方差矩阵$\tilde{\mathbf{R}}_p$、$\tilde{\mathbf{R}}_x$、$\tilde{\mathbf{R}}_y$和$\tilde{\mathbf{R}}_z$，其中，$\tilde{\mathbf{R}}_p=\mathbf{Z}_p\mathbf{Z}_p^{\mathrm{H}}/\mathrm{N}$，$\tilde{\mathbf{R}}_x=\mathbf{Z}_x\mathbf{Z}_x^{\mathrm{H}}/\mathrm{N}$，$\tilde{\mathbf{R}}_y=\mathbf{Z}_y\mathbf{Z}_y^{\mathrm{H}}/\mathrm{N}$，$\tilde{\mathbf{R}}_z=\mathbf{Z}_z\mathbf{Z}_z^{\mathrm{H}}/\mathrm{N}$，通过4个子阵数据协方差矩阵的算术平均$\mathbf{R}_Z=\left(\tilde{\mathbf{R}}_p+\tilde{\mathbf{R}}_x+\tilde{\mathbf{R}}_y+\tilde{\mathbf{R}}_z\right)/4$得到变换前的满秩数据协方差矩阵$R_Z$；

[0010] 步骤三、对子阵数据进行变换，求变换后的数据协方差矩阵R_Y和变换前后的互协方差数据矩阵R_{ZY}，由矩阵R_Z、R_Y和R_{ZY}得到解相干后的总数据协方差矩阵R，从而恢复信号协方差矩阵的秩；

[0011] 对子阵数据Z_p、Z_x、Z_y、Z_z进行变换$\mathbf{Y}_p=\mathbf{J}_M\mathbf{Z}_p^*$，$\mathbf{Y}_x=\mathbf{J}_M\mathbf{Z}_x^*$，$\mathbf{Y}_y=\mathbf{J}_M\mathbf{Z}_y^*$，$\mathbf{Y}_z=\mathbf{J}_M\mathbf{Z}_z^*$，其中，$J_M$是M×M的反对角变换矩阵，$J_{1,M-l+1}=1$(l=1，…，M)是$J_M$的第l行第M-l+1列的元素，$J_M$的其它元素全部为零，$\mathbf{Z}_p^*$、$\mathbf{Z}_x^*$、$\mathbf{Z}_y^*$、$\mathbf{Z}_z^*$表示对子阵数据$Z_p$、$Z_x$、$Z_y$、$Z_z$取共轭后的数据，求变换后子阵数据$Y_p$、$Y_x$、$y_y$、$Y_z$的数据协方差矩阵$\bar{\mathbf{R}}_p$、$\bar{\mathbf{R}}_x$、$\bar{\mathbf{R}}_y$、$\bar{\mathbf{R}}_z$，其中$\bar{\mathbf{R}}_p=\mathbf{Y}_p\mathbf{Y}_p^{\mathrm{H}}/\mathrm{N}$，$\bar{\mathbf{R}}_x=\mathbf{Y}_x\mathbf{Y}_x^{\mathrm{H}}/\mathrm{N}$，$\bar{\mathbf{R}}_y=\mathbf{Y}_y\mathbf{Y}_y^{\mathrm{H}}/\mathrm{N}$，$\bar{\mathbf{R}}_z=\mathbf{Y}_z\mathbf{Y}_z^{\mathrm{H}}/\mathrm{N}$，求变换前后数据的互协方差矩阵：$Q_p$、$Q_x$、$Q_y$、$Q_z$，其中，$\mathbf{Q}_p=\mathbf{Z}_p\mathbf{Y}_p^{\mathrm{H}}/\mathrm{N}$，$\mathbf{Q}_x=\mathbf{Z}_x\mathbf{Y}_x^{\mathrm{H}}/\mathrm{N}$，$\mathbf{Q}_y=\mathbf{Z}_y\mathbf{Y}_y^{\mathrm{H}}/\mathrm{N}$，$\mathbf{Q}_z=\mathbf{Z}_z\mathbf{Y}_z^{\mathrm{H}}/\mathrm{N}$，变换后子阵协方差矩阵的算术平均得到变换后协方差矩阵$\mathbf{R}_Y=\left(\bar{\mathbf{R}}_p+\bar{\mathbf{R}}_x+\bar{\mathbf{R}}_y+\bar{\mathbf{R}}_z\right)/4$，变换前后子阵数据的互协方差矩阵求算术平均得到变换前后互协方差矩阵$R_{ZY}=(Q_p+Q_x+Q_y+Q_z)/4$，构造解相干总数据协方差矩阵$R=[R_{ZY}\ R_Z\ R_Y]$；

[0012] 步骤四、由解相干后的总数据协方差矩阵R进行奇异值分解得到信号子空间U_s，根据阵列的结构特点，将信号子空间进行分块，利用分块后的信号子空间分别在x、y方向利用ESPRIT估计旋转不变关系矩阵$\hat{\mathbf{\Phi}}_x$和$\hat{\mathbf{\Phi}}_y$；

[0013] 根据阵列数据的排布规律，将信号子空间U_s进行分块运算，信号子空间U_s分成x轴子阵对应的信号子空间U_{sx}和y轴子阵对应的子空间U_{sy}，U_{sx}分成x轴子阵的前M-1个阵元对应的信号子空间U_{sx1}和后M-1个阵元对应的信号子空间U_{sx2}，U_{sy}分成y轴子阵的前M-1个阵元对应的信号子空间U_{sy1}和后M-1个阵元对应的信号子空间U_{sy2}，x轴上的两个均匀子阵满足的平移不变关系为$U_{sx1}=A_{x1}T_1$，$U_{sx2}=A_{x2}T_1$，$A_{x2}=A_{x1}\Phi_x$，其中，T_1是K×K的非奇异变换矩阵，$\mathbf{\Phi}_x=\mathrm{diag}\left(\left[e^{j\frac{2\pi}{\lambda_1}d_x\sin\theta_1\cos\phi_1},\cdots,e^{j\frac{2\pi}{\lambda_k}d_x\sin\theta_k\cos\phi_k},\cdots,e^{j\frac{2\pi}{\lambda_K}d_x\sin\theta_K\cos\phi_K}\right]\right)$是旋转不变关系矩阵，$U_{sy1}=A_{y1}T_2$，$U_{sy2}=A_{y2}T_2$，$A_{y2}=A_{y1}\Phi_y$，其中，$T_2$是K×K的非奇异变换矩阵，

$\boldsymbol{\Phi}_y=\mathrm{diag}\left(\left[\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi}{\lambda}d_y\sin\theta_1\sin\phi_1},\cdots,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi}{\lambda_k}d_y\sin\theta_k\sin\phi_k},\cdots,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi}{\lambda_K}d_y\sin\theta_K\sin\phi_K}\right]\right)$是旋转不变关系矩阵且$\mathbf{U}_{sy1}^{\#}\mathbf{U}_{sy2}\mathbf{T}_2=\boldsymbol{\Phi}_y\mathbf{T}_2$，$\mathbf{U}_{sx1}^{\#}\mathbf{U}_{sx2}\mathbf{T}_1=\boldsymbol{\Phi}_x\mathbf{T}_1$，对$\mathbf{U}_{sy1}^{\#}\mathbf{U}_{sy2}$进行特征分解，特征值构成旋转不变关系矩阵$\Phi_y$的估计$\hat{\boldsymbol{\Phi}}_y$，对$\mathbf{U}_{sx1}^{\#}\mathbf{U}_{sx2}$进行特征分解，特征值构成旋转不变关系矩阵$\Phi_x$的估计$\hat{\boldsymbol{\Phi}}_x$，其中$\mathbf{U}_{sy1}^{\#}=\left(\mathbf{U}_{sy1}^{\mathrm{H}}\mathbf{U}_{sy1}\right)^{-1}\mathbf{U}_{sy1}^{\mathrm{H}}$，$\mathbf{U}_{sx1}^{\#}=\left(\mathbf{U}_{sx1}^{\mathrm{H}}\mathbf{U}_{sx1}\right)^{-1}\mathbf{U}_{sx1}^{\mathrm{H}}$；

[0014] 步骤五、利用旋转不变关系矩阵的估计值$\hat{\boldsymbol{\Phi}}_x$和$\hat{\boldsymbol{\Phi}}_y$估计x轴方向余弦矩阵$\hat{\mathbf{u}}_x=\left[\hat{u}_{1x},\cdots\hat{u}_{ix},\cdots,\hat{u}_{Kx}\right]$和y轴方向余弦矩阵$\hat{\mathbf{u}}_y=\left[\hat{u}_{1y},\cdots\hat{u}_{ky},\cdots,\hat{u}_{Ky}\right]$，其中$\hat{u}_{ix}=\sin\hat{\theta}_i\cos\hat{\phi}_i$，$\hat{u}_{ky}=\sin\hat{\theta}_k\sin\hat{\phi}_k$，利用配对后的方向余弦$\hat{u}_{kx}$和$\hat{u}_{ky}$得到到达角的估计值$\hat{\theta}_k$和$\hat{\phi}_k$；

[0015] 因为x轴和y轴方向的旋转不变关系矩阵$\hat{\boldsymbol{\Phi}}_x$和$\hat{\boldsymbol{\Phi}}_y$是由两次独立的特征分解得到的，所以$\hat{\boldsymbol{\Phi}}_x$和$\hat{\boldsymbol{\Phi}}_y$估计x轴方向余弦矩阵$\hat{\mathbf{u}}_x$和y轴方向的方向余弦矩阵$\hat{\mathbf{u}}_y$中信号的排列顺序不同，必须进行配对运算才能使同一个信号的x轴方向余弦和y轴方向的方向余弦匹配成对，本发明根据同一个信号x轴方向余弦和y轴方向的方向余弦构成的阵列导向矢量位于信号子空间，因此有$u_{kx}=\arg\max_{u_{ix}}\left|\mathbf{A}\left(u_{ix},u_{ky}\right)\mathbf{U}_s^{\mathrm{H}}\mathbf{U}_s\mathbf{A}^{\mathrm{H}}\left(u_{ix},u_{ky}\right)\right|$，利用这种方式对第k个y轴方向余弦$\hat{u}_{ky}$与所有的x轴方向余弦进行组合，根据表达式$\left|\mathbf{A}\left(u_{ix},u_{ky}\right)\mathbf{U}_s^{\mathrm{H}}\mathbf{U}_s\mathbf{A}^{\mathrm{H}}\left(u_{ix},u_{ky}\right)\right|$最大的原则找到的$u_{ix}$和$u_{ky}$配对成功，此时的$\hat{u}_{ix}=\hat{u}_{kx}=\sin\hat{\theta}_k\cos\hat{\phi}_k$，$\hat{u}_{ky}=\sin\hat{\theta}_k\sin\hat{\phi}_k$，从而可以得到到达角的估计值：

[0016] $$\hat{\theta}_k=\arcsin\left(\sqrt{\hat{u}_{kx}^2+\hat{u}_{ky}^2}\right),$$

[0017] $$\hat{\phi}_k=\begin{cases}\arctan\left(\dfrac{\hat{u}_{ky}}{u_{kx}}\right), & \hat{u}_{kx}\geq 0\\ \pi+\arctan\left(\dfrac{\hat{u}_{ky}}{u_{kx}}\right), & \hat{u}_{kx}<0\end{cases};$$

[0018] 前述步骤中的k＝1，...，K，i＝1，...，K，j表示虚数单位。

[0019] 本发明利用声矢量传感器阵列自身的矢量结构特性，通过子阵的旋转不变关系解相干，并联合利用自协方差和互协方差矩阵提高解相干性能和参数估计精度，该方法突破了现有空间平滑仅适用于均匀线阵的局限性，将解相干方法推广到均匀L型阵列的二维到达角估计中，本发明方法的解相干保留了全阵列的空域导向矢量信息，所以解相干后可以利用传统的旋转不变参数估计方法进行参数估计，本发明方法利用全阵列信号子空间进行参数配对运算，参数配对运算简单，计算量低。本发明方法克服了现有空间平滑解相干方法一般只适用于均匀线阵的不足，为声矢量传感器阵列解相干提供了一种全新的解决方案。

附图说明

[0020] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案，下面将对实施例或现有技术描述中需要使用的附图做简单介绍，显而易见地，下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动的前提下，还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0021] 图1为本发明实施例L型声矢量传感器阵列的示意图；

[0022] 图2为本发明方法的流程图；

[0023] 图3为本发明方法在-1dB时的到达角估计散布图；

[0024] 图4为本发明方法在2dB时的到达角估计散布图；

[0025] 图5为本发明方法的俯仰角估计均方根误差随信噪比的变化曲线图；

[0026] 图6为本发明方法的方位角估计均方根误差随信噪比的变化曲线图；

[0027] 图7为本发明方法的到达角估计成功概率随信噪比的变化曲线图。

具体实施方式

[0028] 为了让本发明的上述和其它目的、特征及优点能更明显，下文特举本发明实施例，并配合所附图示，做详细说明如下。

[0029] 图1所示为本发明实施例的L型声矢量传感器阵列的示意图。本发明的声矢量传感器阵列由2M-1个均匀分布x轴和y轴的声矢量传感器构成，其中M个阵元沿x轴均匀排列阵元间隔为d_x，M个阵元沿y轴均匀排列，阵元间隔为d_y，坐标原点的两轴共用，所述阵元是具有同步共点测量声压以及x轴、y轴和z轴方向振速分量的声矢量传感器，相邻阵元间距$d_x \leqslant \lambda_{min}/2$，$d_y \leqslant \lambda_{min}/2$，$\lambda_{min}$为入射声波信号的最小波长；

[0030] 参照图2，本发明的ESPRIT解相干参数估计方法的步骤如下：均匀L型声矢量传感器阵列接收K个相关窄带、平稳远场声源信号，K为入射声源信号的数量，

[0031] 步骤一、L型均匀声矢量传感器接收阵列，接收K个远场窄带相干信号，接收阵列获取N次同步采样数据Z；

[0032] 步骤二、抽取声压和x、y、z三个坐标轴的声速四个子阵对应的子阵数据Z_p、Z_x、Z_y、Z_z，通过子阵级数据协方差矩阵处理恢复数据协方差矩阵的秩，得到变换前的数据协方差矩阵R_Z；

[0033] 根据阵列数据Z的排布规律将数据分成声压以及x轴、y轴和z轴方向振速四个子阵数据，计算4个子阵数据的协方差矩阵$\tilde{\mathbf{R}}_p$、$\tilde{\mathbf{R}}_x$、$\tilde{\mathbf{R}}_y$和$\tilde{\mathbf{R}}_z$，其中，$\tilde{\mathbf{R}}_p = \mathbf{Z}_p\mathbf{Z}_p^{\mathrm{H}}/\mathrm{N}$，$\tilde{\mathbf{R}}_x = \mathbf{Z}_x\mathbf{Z}_x^{\mathrm{H}}/\mathrm{N}$，$\tilde{\mathbf{R}}_y = \mathbf{Z}_y\mathbf{Z}_y^{\mathrm{H}}/\mathrm{N}$，$\tilde{\mathbf{R}}_z = \mathbf{Z}_z\mathbf{Z}_z^{\mathrm{H}}/\mathrm{N}$，通过4个子阵数据协方差矩阵的算术平均$\mathbf{R}_Z = \left(\tilde{\mathbf{R}}_p + \tilde{\mathbf{R}}_x + \tilde{\mathbf{R}}_y + \tilde{\mathbf{R}}_z\right)/4$得到变换前的满秩数据协方差矩阵$R_Z$；

[0034] 步骤三、对子阵数据进行变换，求变换后的数据协方差矩阵R_Y和变换前后的互协方差数据矩阵R_{ZY}，由矩阵R_Z、R_Y和R_{ZY}得到解相干后的总数据协方差矩阵R，从而恢复信号协方差矩阵的秩；

[0035] 对子阵数据Z_p、Z_x、Z_y、Z_z进行变换$\mathbf{Y}_p = \mathbf{J}_M\mathbf{Z}_p^*$，$\mathbf{Y}_x = \mathbf{J}_M\mathbf{Z}_x^*$，$\mathbf{Y}_y = \mathbf{J}_M\mathbf{Z}_y^*$，$\mathbf{Y}_z = \mathbf{J}_M\mathbf{Z}_z^*$，其中，$J_M$是M×M的反对角变换矩阵，$J_{1,M-l+1}=1$ (l=1，…，M) 是J_M的第l行第M-l+1列的元素，J_M的其它元素全部为零，$\mathbf{Z}_p^*$、$\mathbf{Z}_x^*$、$\mathbf{Z}_y^*$、$\mathbf{Z}_z^*$表示对子阵数据Z_p、Z_x、Z_y、Z_z取共轭后

的数据，求变换后子阵数据Y_p、Y_x、Y_y、Y_z的数据协方差矩阵$\bar{\mathbf{R}}_p$、$\bar{\mathbf{R}}_x$、$\bar{\mathbf{R}}_y$、$\bar{\mathbf{R}}_z$，其中$\bar{\mathbf{R}}_p=\mathbf{Y}_p\mathbf{Y}_p^{\mathrm{H}}/\mathrm{N}$，$\bar{\mathbf{R}}_x=\mathbf{Y}_x\mathbf{Y}_x^{\mathrm{H}}/\mathrm{N}$，$\bar{\mathbf{R}}_y=\mathbf{Y}_y\mathbf{Y}_y^{\mathrm{H}}/\mathrm{N}$，$\bar{\mathbf{R}}_z=\mathbf{Y}_z\mathbf{Y}_z^{\mathrm{H}}/\mathrm{N}$，求变换前后数据的互协方差矩阵：$Q_p$、$Q_x$、$Q_y$、$Q_z$，其中，$\mathbf{Q}_p=\mathbf{Z}_p\mathbf{Y}_p^{\mathrm{H}}/\mathrm{N}$，$\mathbf{Q}_x=\mathbf{Z}_x\mathbf{Y}_x^{\mathrm{H}}/\mathrm{N}$，$\mathbf{Q}_y=\mathbf{Z}_y\mathbf{Y}_y^{\mathrm{H}}/\mathrm{N}$，$\mathbf{Q}_z=\mathbf{Z}_z\mathbf{Y}_z^{\mathrm{H}}/\mathrm{N}$，变换后子阵协方差矩阵的算术平均得到变换后协方差矩阵$\mathbf{R}_Y=\left(\bar{\mathbf{R}}_p+\bar{\mathbf{R}}_x+\bar{\mathbf{R}}_y+\bar{\mathbf{R}}_z\right)/4$，变换前后子阵数据的互协方差矩阵求算术平均得到变换前后互协方差矩阵$R_{ZY}=(Q_p+Q_x+Q_y+Q_z)/4$，构造解相干总数据协方差矩阵$R=[R_{ZY}\ R_Z\ R_Y]$；

[0036] 步骤四、由解相干后的总数据协方差矩阵R进行奇异值分解得到信号子空间U_s，根据阵列的结构特点，将信号子空间进行分块，利用分块后的信号子空间分别在x、y方向利用ESPRIT估计旋转不变关系矩阵$\hat{\mathbf{\Phi}}_x$和$\hat{\mathbf{\Phi}}_y$；

[0037] 根据阵列数据的排布规律，将信号子空间U_s进行分块运算，信号子空间U_s分成x轴子阵对应的信号子空间U_{sx}和y轴子阵对应的子空间U_{sy}，U_{sx}分成x轴子阵的前M-1个阵元对应的信号子空间U_{sx1}和后M-1个阵元对应的信号子空间U_{sx2}，U_{sy}分成y轴子阵的前M-1个阵元对应的信号子空间U_{sy1}和后M-1个阵元对应的信号子空间U_{sy2}，x轴上的两个均匀子阵满足的平移不变关系为$U_{sx1}=A_{x1}T_1$，$U_{sx2}=A_{x2}T_1$，$A_{x2}=A_{x1}\Phi_x$，其中，T_1是K×K的非奇异变换矩阵，$\mathbf{\Phi}_x=\mathrm{diag}\left(\left[\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi}{\lambda_1}d_x\sin\theta_1\cos\phi_1},\cdots,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi}{\lambda_k}d_x\sin\theta_k\cos\phi_k},\cdots,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi}{\lambda_K}d_x\sin\theta_K\cos\phi_K}\right]\right)$是旋转不变关系矩阵，$U_{sy1}=A_{y1}T_2$，$U_{sy2}=A_{y2}T_2$，$A_{y2}=A_{y1}\Phi_y$，其中，$T_x$是K×K的非奇异变换矩阵，$\mathbf{\Phi}_y=\mathrm{diag}\left(\left[\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi}{\lambda_1}d_y\sin\theta_1\sin\phi_1},\cdots,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi}{\lambda_k}d_y\sin\theta_k\sin\phi_k},\cdots,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi}{\lambda_K}d_y\sin\theta_K\sin\phi_K}\right]\right)$是旋转不变关系矩阵且$\mathbf{U}_{sy1}^{\#}\mathbf{U}_{sy2}\mathbf{T}_2=\mathbf{\Phi}_y\mathbf{T}_2$，$\mathbf{U}_{sx1}^{\#}\mathbf{U}_{sx2}\mathbf{T}_1=\mathbf{\Phi}_x\mathbf{T}_1$，对$\mathbf{U}_{sy1}^{\#}\mathbf{U}_{sy2}$进行特征分解，特征值构成旋转不变关系矩阵$\Phi_y$的估计$\hat{\mathbf{\Phi}}_y$，对$\mathbf{U}_{sx1}^{\#}\mathbf{U}_{sx2}$进行特征分解，特征值构成旋转不变关系矩阵$\Phi_x$的估计$\hat{\mathbf{\Phi}}_x$，其中$\mathbf{U}_{sy1}^{\#}=\left(\mathbf{U}_{sy1}^{\mathrm{H}}\mathbf{U}_{sy1}\right)^{-1}\mathbf{U}_{sy1}^{\mathrm{H}}$，$\mathbf{U}_{sx1}^{\#}=\left(\mathbf{U}_{sx1}^{\mathrm{H}}\mathbf{U}_{sx1}\right)^{-1}\mathbf{U}_{sx1}^{\mathrm{H}}$；

[0038] 步骤五、利用旋转不变关系矩阵的估计值$\hat{\mathbf{\Phi}}_x$和$\hat{\mathbf{\Phi}}_y$估计x轴方向余弦矩阵$\hat{\mathbf{u}}_x=\left[\hat{u}_{1x},\cdots\hat{u}_{ix},\cdots,\hat{u}_{Kx}\right]$和y轴方向的方向余弦矩阵$\hat{\mathbf{u}}_y=\left[\hat{u}_{1y},\cdots\hat{u}_{ky},\cdots,\hat{u}_{Ky}\right]$，其中$\hat{u}_{ix}=\sin\hat{\theta}_i\cos\hat{\phi}_i$，$\hat{u}_{ky}=\sin\hat{\theta}_k\sin\hat{\phi}_k$，利用配对后的方向余弦$\hat{u}_{kx}$和$\hat{u}_{ky}$得到到达角的估计值$\hat{\theta}_k$和$\hat{\phi}_k$；

[0039] 因为x轴和y轴方向的旋转不变关系矩阵$\hat{\mathbf{\Phi}}_x$和$\hat{\mathbf{\Phi}}_y$是由两次独立的特征分解得到的，所以$\hat{\mathbf{\Phi}}_x$和$\hat{\mathbf{\Phi}}_y$估计x轴方向余弦矩阵$\hat{\mathbf{u}}_x$和y轴方向的方向余弦矩阵$\hat{\mathbf{u}}_y$中信号的排列顺序不同，必须进行配对运算才能使同一个信号的x轴方向余弦和y轴方向的方向余弦匹配成对，本发明根据同一个信号x轴方向余弦和y轴方向的方向余弦构成的阵列导向矢量位于信号子空间，因此有$u_{kx}=\underset{u_{ix}}{\arg\max}\left|\mathbf{A}\left(u_{ix},u_{ky}\right)\mathbf{U}_s^{\mathrm{H}}\mathbf{U}_s\mathbf{A}^{\mathrm{H}}\left(u_{ix},u_{ky}\right)\right|$，利用这种方式对第k个y轴方向余弦$\hat{u}_{ky}$与所有的x轴方向余弦进行组合，根据表达式$\left|\mathbf{A}\left(u_{ix},u_{ky}\right)\mathbf{U}_s^{\mathrm{H}}\mathbf{U}_s\mathbf{A}^{\mathrm{H}}\left(u_{ix},u_{ky}\right)\right|$最大

的原则找到的u_{ix}和u_{ky}配对成功，此时的$\hat{u}_{ix}=\hat{u}_{kx}=\sin\hat{\theta}_k\cos\hat{\phi}_k$，$\hat{u}_{ky}=\sin\hat{\theta}_k\sin\hat{\phi}_k$，从而可以得到到达角的估计值：

[0040] $$\hat{\theta}_k=\arcsin\left(\sqrt{\hat{u}_{kx}^2+\hat{u}_{ky}^2}\right),$$

[0041] $$\hat{\phi}_k=\begin{cases}\arctan\left(\dfrac{\hat{u}_{ky}}{u_{kx}}\right), & \hat{u}_{kx}\geq 0\\ \pi+\arctan\left(\dfrac{\hat{u}_{ky}}{u_{kx}}\right), & \hat{u}_{kx}<0\end{cases};$$

[0042] 前述步骤中的k＝1，...，K，i＝1，...，K。

[0043] 本发明采用的均匀L型阵列，阵列的阵元为由声压传感器和x轴、y轴及z轴方向的振速传感器构成的声矢量传感器，并且所有的声压传感器相互平行，利用声矢量传感器阵列自身的矢量结构特性，将声矢量传感器阵列分成四个子阵，然后分别通过子阵数据协方差矩阵、变换后子阵数据协方差矩阵和变换前后子阵数据协方差矩阵的算术平均解相干，并利用解相干后的三个数据协方差矩阵构造总的协方差数据矩阵，最后通过总数据协方差矩阵奇异值分解得到信号子空间，根据阵列的结构特点，在x和y轴方向分别利用平移不变关系估计得到x和y轴方向的方向余弦矩阵，然后利用全阵列信号子空间进行配对运算，利用配对后的方向余弦得到信号到达角的估计。

[0044] 本发明的效果可以通过以下的仿真结果进一步说明：

[0045] 仿真实验条件如下：

[0046] 两个相干窄带、平稳远场声源信号入射到由8个等间隔布置于x轴上的阵元和8个等间隔布置于y轴上的阵元构成的L型声矢量传感器阵列，如图1所示，该接收阵列由15个阵元组成，阵元间隔为$d_x=d_y=0.5\lambda_{min}$，入射信号的参数为：$(\theta_1,\Phi_1)=(10^\circ,20^\circ)$，$(\theta_2,\Phi_2)=(45^\circ,60^\circ)$，快拍数为512次。

[0047] 仿真实验结果如图3至图7所示，图3和图4为信噪比分别是-1dB和2dB时，本发明方法到达角估计的散布图，从图3可以看出，在信噪比是-1dB时，本发明方法到达角参数估计精度较低，而在图4中，当信噪比是2dB时，本发明方法可以估计出到达角参数，且本发明方法有较高的的到达角参数估计精度；从图5和图6可以看出本发明方法，俯仰角和方位角估计的均方根误差较小，也就是估计值在真值附近的较小范围内扰动；到达角估计成功概率是指在200次独立试验中俯仰角和方位角估计值满足关系式$\sqrt{\left(\hat{\theta}_i-\theta_0\right)^2+\left(\hat{\phi}_i-\phi_0\right)^2}<1^\circ$的实验次数占总实验次数的百分比；其中，$\theta_0$和$\Phi_0$是真值，$\hat{\theta}_i$和$\hat{\phi}_i$是指第i次实验的估计值，从图7可以看出，本发明方法的成功概率很高，信噪比是2dB时，本发明方法的成功概率都超过80％，特别是信噪比是3dB时，本发明方法的成功概率超过99％。

[0048] 以上所述，仅是本发明的较佳实施例而已，并非对本发明做任何形式上的限制，虽然本发明已以较佳实施例揭露如上，然而并非用以限定本发明，任何熟悉本专业的技术人员，在不脱离本发明技术方案范围内，当可利用上述揭示的技术内容做出些许更动或修饰为等同变化的等效实施例，但凡是未脱离本发明技术方案的内容，依据本发明的技术实质对以上实施例所作的任何简单修改、等同变化与修饰，均仍属于本发明技术方案的范围内。

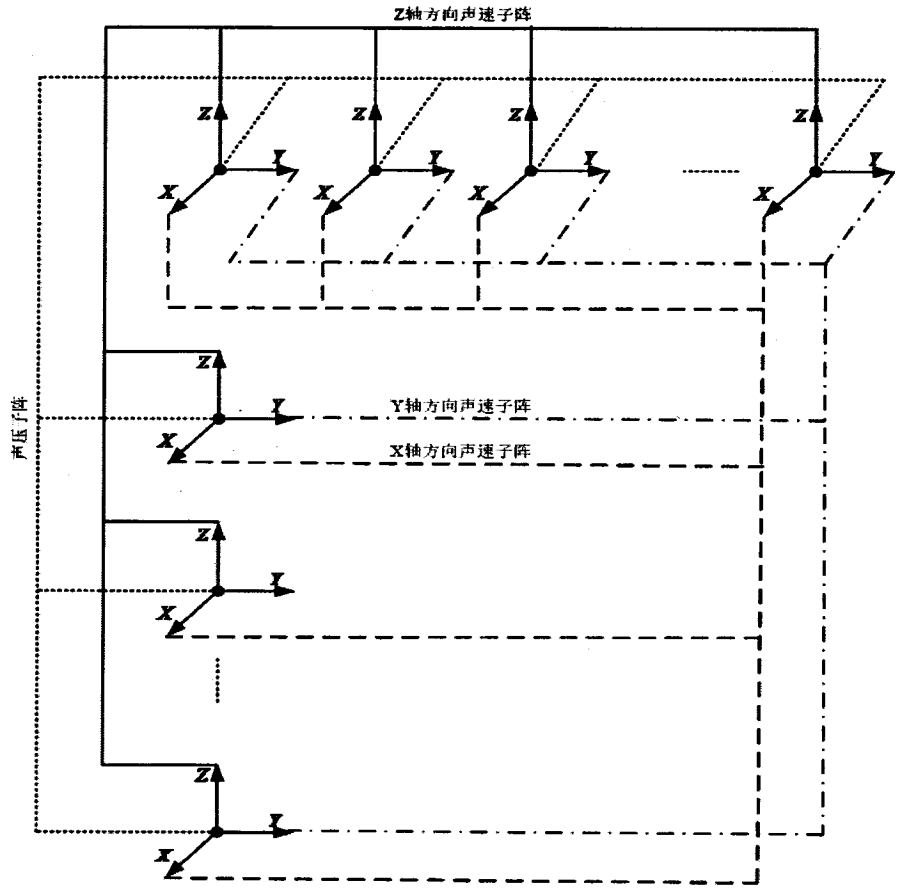


图1

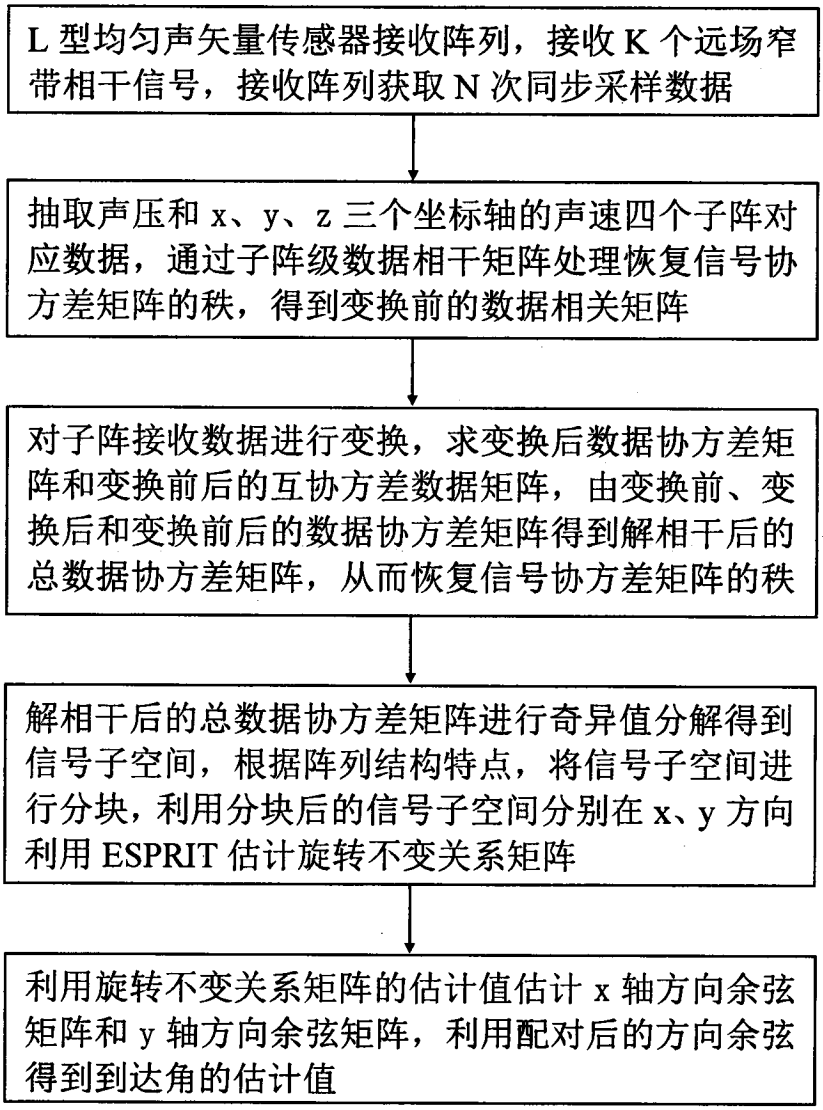

L 型均匀声矢量传感器接收阵列，接收 K 个远场窄带相干信号，接收阵列获取 N 次同步采样数据
抽取声压和 x、y、z 三个坐标轴的声速四个子阵对应数据，通过子阵级数据相干矩阵处理恢复信号协方差矩阵的秩，得到变换前的数据相关矩阵
对子阵接收数据进行变换，求变换后数据协方差矩阵和变换前后的互协方差数据矩阵，由变换前、变换后和变换前后的数据协方差矩阵得到解相干后的总数据协方差矩阵，从而恢复信号协方差矩阵的秩
解相干后的总数据协方差矩阵进行奇异值分解得到信号子空间，根据阵列结构特点，将信号子空间进行分块，利用分块后的信号子空间分别在 x、y 方向利用 ESPRIT 估计旋转不变关系矩阵
利用旋转不变关系矩阵的估计值估计 x 轴方向余弦矩阵和 y 轴方向余弦矩阵，利用配对后的方向余弦得到到达角的估计值

图2

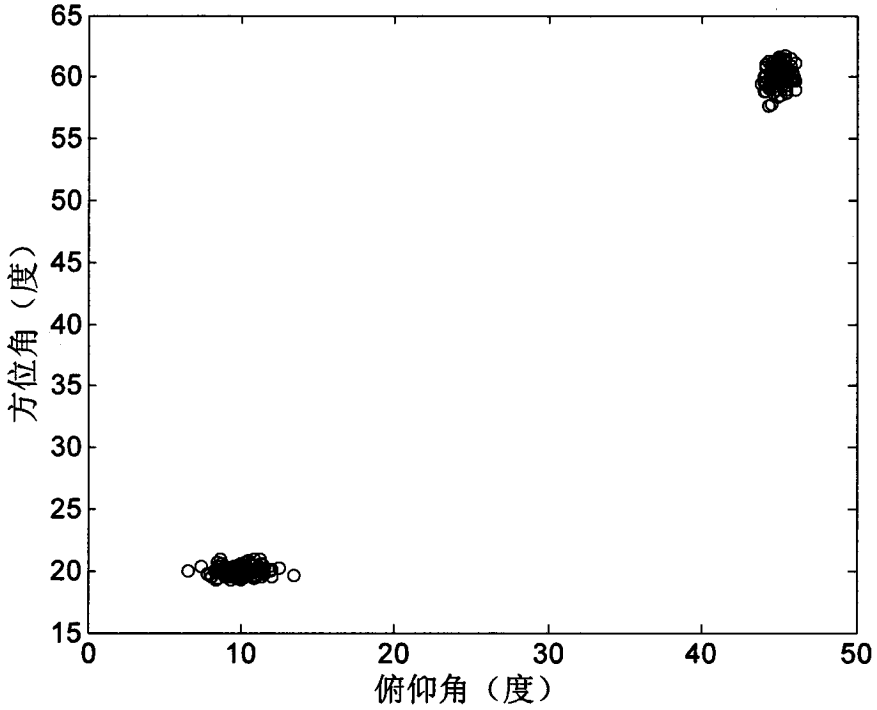

65
60
55
50
45
40
35
30
25
20
15
方位角（度）
0
10
20
30
40
50
俯仰角（度）

图3

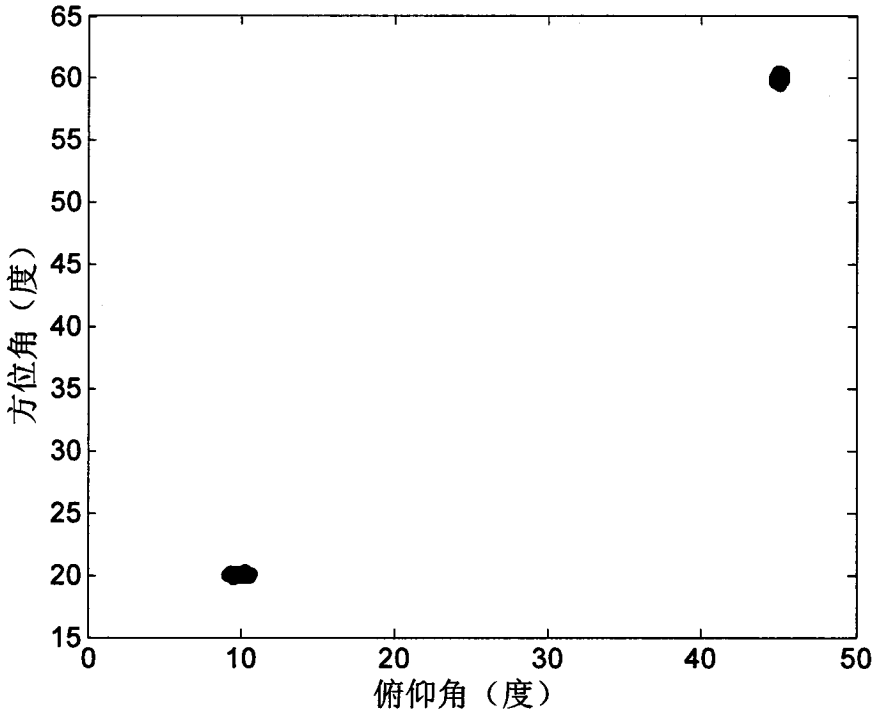

65
60
55
50
45
40
35
30
25
20
15
方位角（度）
0
10
20
30
40
50
俯仰角（度）

图4

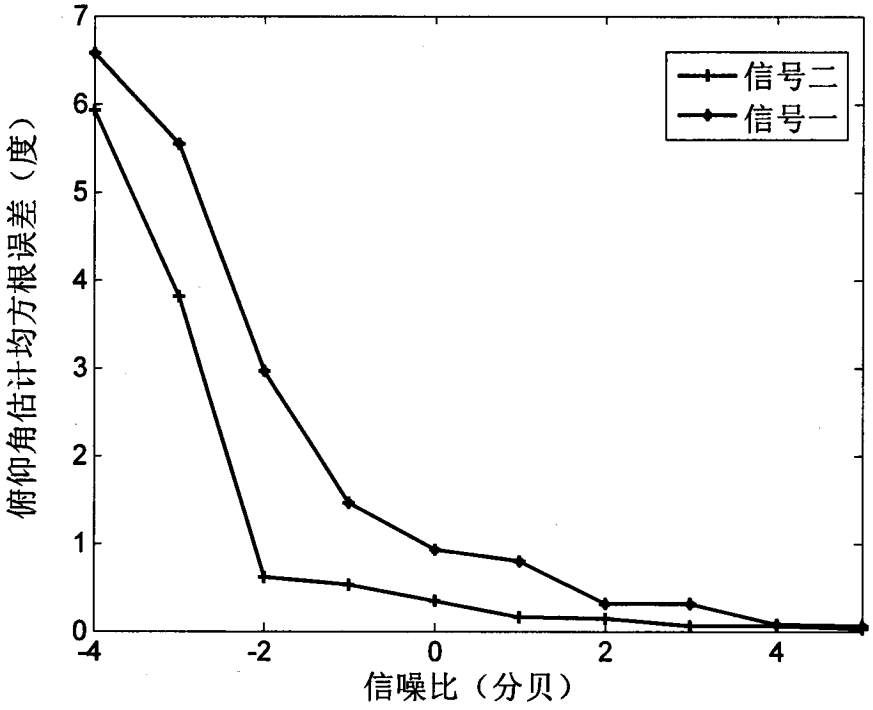

信号二
信号一
俯仰角估计均方根误差（度）
信噪比（分贝）
7
6
5
4
3
2
1
0
-4
-2
0
2
4

图5

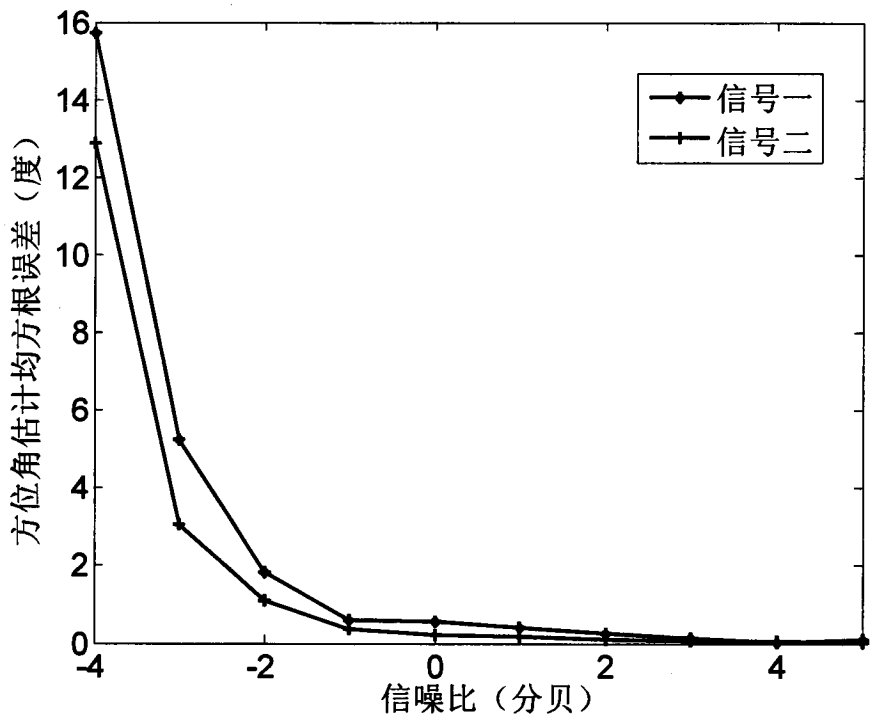

信号一
信号二
方位角估计均方根误差（度）
信噪比（分贝）
16
14
12
10
8
6
4
2
0
-4
-2
0
2
4

图6

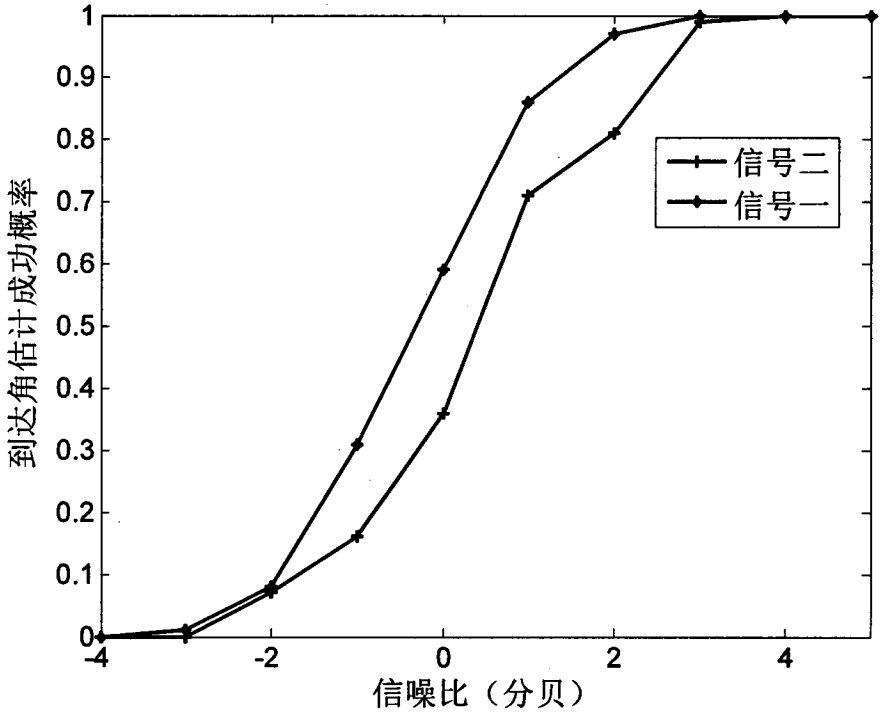


图7