



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104849694 A

(43) 申请公布日 2015. 08. 19

(21) 申请号 201510213577. 5

(22) 申请日 2015. 04. 29

(71) 申请人 陕西理工学院

地址 723000 陕西省汉中市汉台区东关正街  
505 号

(72) 发明人 王桂宝 任亚杰 龙光利 王战备  
王剑华

(74) 专利代理机构 广东秉德律师事务所 44291  
代理人 杨焕军

(51) Int. Cl.  
G01S 3/74(2006. 01)

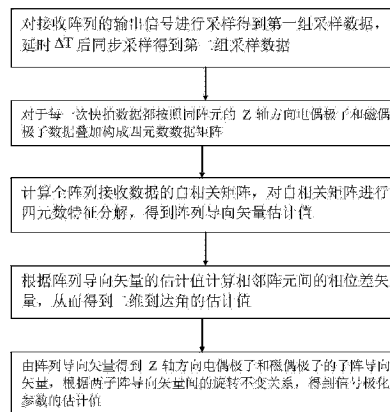
权利要求书3页 说明书9页 附图6页

(54) 发明名称

电磁偶极子对阵列的四元数 ESPRIT 参数估计方法

(57) 摘要

电磁偶极子对阵列的四元数 ESPRIT 参数估计方法, 步骤如下: 对电磁矢量传感器阵列的输出信号进行采样得到第一组采样数据, 延时  $\Delta T$  后同步采样得到第二组采样数据; 构造第一组接收四元数数据矩阵和第二组接收四元数数据矩阵及全阵列接收数据; 计算全阵列接收数据的自相关矩阵, 对自相关矩阵进行四元数特征分解, 分别得到第一组采样数据和第二组采样数据对应的阵列导向矢量估计值以及全数据对应的阵列导向矢量矩阵估计值; 由第一组采样数据对应的阵列导向矢量估计值获得信号到达角的估计值; 重构 Z 轴方向的电偶极子子阵的阵列导向矢量估计值和磁偶极子子阵的阵列导向矢量估计值, 根据子阵导向矢量间的旋转不变关系得到信号极化参数的估计值。



1. 电磁偶极子对阵列的四元数 ESPRIT 参数估计方法, 其特征在于, 包括以下步骤: K 个互不相关完全极化横电磁波信号同时入射到电磁矢量传感器阵列上, 所述阵列阵元是由一个电偶极子和一个磁偶极子组成的电磁偶极子对,

步骤一、对电磁矢量传感器阵列的输出信号进行 M 次采样得到第一组采样数据 X, 延时  $\Delta T$  后同步采样 M 次, 得到第二组采样数据 Y;

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{1e}(1), \dots, x_{1e}(m), \dots, x_{1e}(M) \\ x_{1h}(1), \dots, x_{1h}(m), \dots, x_{1h}(M) \\ \vdots, \dots, \vdots, \dots, \vdots \\ x_{ne}(1), \dots, x_{ne}(m), \dots, x_{ne}(M) \\ x_{nh}(1), \dots, x_{nh}(m), \dots, x_{nh}(M) \\ \vdots, \dots, \vdots, \dots, \vdots \\ x_{Ne}(1), \dots, x_{Ne}(m), \dots, x_{Ne}(M) \\ x_{Nh}(1), \dots, x_{Nh}(m), \dots, x_{Nh}(M) \end{bmatrix}, \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_{1e}(1), \dots, y_{1e}(m), \dots, y_{1e}(M) \\ y_{1h}(1), \dots, y_{1h}(m), \dots, y_{1h}(M) \\ \vdots, \dots, \vdots, \dots, \vdots \\ y_{ne}(1), \dots, y_{ne}(m), \dots, y_{ne}(M) \\ y_{nh}(1), \dots, y_{nh}(m), \dots, y_{nh}(M) \\ \vdots, \dots, \vdots, \dots, \vdots \\ y_{Ne}(1), \dots, y_{Ne}(m), \dots, y_{Ne}(M) \\ y_{Nh}(1), \dots, y_{Nh}(m), \dots, y_{Nh}(M) \end{bmatrix},$$

其中,  $x_{ne}(m)$  表示第 n 个阵元的电偶极子输出信号的第 m 次采样数据,  $x_{nh}(m)$  表示第 n 个阵元的磁偶极子输出信号的第 m 次采样数据,  $y_{ne}(m)$  表示延时  $\Delta T$  后第 n 个阵元的电偶极子输出信号的第 m 次采样数据,  $y_{nh}(m)$  表示延时  $\Delta T$  后第 n 个阵元的磁偶极子输出信号的第 m 次采样数据;

步骤二、将第一组采样数据 X 和第二组采样数据 Y 分别按照同阵元的电偶极子和磁偶极子的同次快拍数据叠加构成第一组接收四元数数据矩阵  $Z_1$  和第二组接收四元数数据矩阵  $Z_2$ , 构造全阵列接收数据矩阵 Z;

$$\mathbf{Z}_1 = \begin{bmatrix} x_{1e}(1) + \tilde{\mathbf{i}} x_{1h}(1), \dots, x_{1e}(m) + \tilde{\mathbf{i}} x_{1h}(m), \dots, x_{1e}(M) + \tilde{\mathbf{i}} x_{1h}(M) \\ \vdots, \dots, \vdots, \dots, \vdots \\ x_{ne}(1) + \tilde{\mathbf{i}} x_{nh}(1), \dots, x_{ne}(m) + \tilde{\mathbf{i}} x_{nh}(m), \dots, x_{ne}(M) + \tilde{\mathbf{i}} x_{nh}(M) \\ \vdots, \dots, \vdots, \dots, \vdots \\ x_{Ne}(1) + \tilde{\mathbf{i}} x_{Nh}(1), \dots, x_{Ne}(m) + \tilde{\mathbf{i}} x_{Nh}(m), \dots, x_{Ne}(M) + \tilde{\mathbf{i}} x_{Nh}(M) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{Z}_2 = \begin{bmatrix} y_{1e}(1) + \tilde{\mathbf{i}} y_{1h}(1), \dots, y_{1e}(m) + \tilde{\mathbf{i}} y_{1h}(m), \dots, y_{1e}(M) + \tilde{\mathbf{i}} y_{1h}(M) \\ \vdots, \dots, \vdots, \dots, \vdots \\ y_{ne}(1) + \tilde{\mathbf{i}} y_{nh}(1), \dots, y_{ne}(m) + \tilde{\mathbf{i}} y_{nh}(m), \dots, y_{ne}(M) + \tilde{\mathbf{i}} y_{nh}(M) \\ \vdots, \dots, \vdots, \dots, \vdots \\ y_{Ne}(1) + \tilde{\mathbf{i}} y_{Nh}(1), \dots, y_{Ne}(m) + \tilde{\mathbf{i}} y_{Nh}(m), \dots, y_{Ne}(M) + \tilde{\mathbf{i}} y_{Nh}(M) \end{bmatrix},$$

其中,  $x_{ne}(m) + \tilde{\mathbf{i}} x_{nh}(m)$  表示由第 n 个阵元的电偶极子和磁偶极子输出信号的第 m 次采样数据叠加构成的四元数数据,  $y_{ne}(m) + \tilde{\mathbf{i}} y_{nh}(m)$  表示延时  $\Delta T$  由第 n 个阵元的电偶极子和磁偶极子输出信号的第 m 次采样数据叠加构成的四元数数据;

第一组采样数据 X 构成的四元数数据矩阵  $Z_1 = A_1 S + N_1$ , 其中,

$A_1 = [a_1(\theta_1, \phi_1, \gamma_1, \eta_1), \dots, a_1(\theta_k, \phi_k, \gamma_k, \eta_k), \dots, a_1(\theta_K, \phi_K, \gamma_K, \eta_K)]$  是第一

组采样数据对应的阵列导向矢量,  $\mathbf{a}_1(\theta_k, \phi_k, \gamma_k, \eta_k) = c_k \mathbf{q}(\theta_k, \phi_k)$ ,  $c_k = e_{kz} + \tilde{\mathbf{h}}_{kz}$  是第  $k$  个入射信号的第一组采样数据中电磁场的四元数数据表示,  $e_{kz} = -\sin\theta_k \sin\gamma_k e^{j\eta_k}$  和  $h_{kz} = \sin\theta_k \cos\gamma_k$  分别为第  $k$  个入射信号在坐标原点处沿  $z$  轴方向的电场分量和磁场分量,  $\mathbf{q}(\theta_k, \phi_k)$  为全阵列相位中心的空域导向矢量,  $\theta_k$  是第  $k$  个入射信号的俯仰角,  $\phi_k$  是第  $k$  个入射信号的方位角,  $\gamma_k$  是第  $k$  个入射信号的辅助极化角,  $\eta_k$  是第  $k$  个入射信号的极化相位差,  $\mathbf{N}_1$  是高斯白噪声矢量,  $\mathbf{S}$  为入射信号构成的幅度矩阵;

第二组采样数据  $\mathbf{Y}$  构成的四元数数据矩阵  $\mathbf{Z}_2 = \mathbf{A}_2 \mathbf{S} + \mathbf{N}_2 = \mathbf{A}_1 \Phi \mathbf{S} + \mathbf{N}_2$ , 其中,  $\mathbf{A}_2 = \mathbf{A}_1 \Phi$  是第二组采样数据对应的阵列导向矢量,  $\Phi$  为时延矩阵,  $\mathbf{N}_2$  是高斯白噪声矢量;

构造全阵列接收数据矩阵  $\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_1 \\ \mathbf{Z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \end{bmatrix} \mathbf{S} + \mathbf{N} = \mathbf{A} \mathbf{S} + \mathbf{N}$ , 其中,  $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \end{bmatrix}$  是全数据

对应的阵列导向矢量矩阵,  $\mathbf{N} = \begin{bmatrix} \mathbf{N}_1 \\ \mathbf{N}_2 \end{bmatrix}$  是全数据噪声矩阵;

步骤三、计算全阵列接收数据矩阵的自相关矩阵  $\mathbf{R}_z$ , 对自相关矩阵进行四元数特征分解, 得到第一组采样数据对应的阵列导向矢量估计值  $\hat{\mathbf{A}}_1$ 、第二组采样数据对应的阵列导向矢量估计值  $\hat{\mathbf{A}}_2$  和全数据对应的阵列导向矢量矩阵估计值  $\hat{\mathbf{A}}$ ;

$$\mathbf{R}_z = \frac{1}{M} [\mathbf{Z} \mathbf{Z}^H] = \mathbf{A} \mathbf{R}_s \mathbf{A}^H + \sigma^2 \mathbf{I},$$

其中,  $\mathbf{R}_s = \frac{1}{M} [\mathbf{S} \mathbf{S}^H]$  为入射信号的自相关函数,  $\sigma^2$  为噪声的方差,  $\mathbf{I}$  为单位矩阵,  $(\cdot)^H$

表示转置复共轭操作;

对自相关矩阵  $\mathbf{R}_z$  进行四元数矩阵特征分解得到信号子空间  $\mathbf{E}_s$ , 根据子空间原理, 存在  $K \times K$  的非奇异矩阵  $\mathbf{T}$ , 且  $\mathbf{E}_s = \mathbf{A} \mathbf{T}$ , 分别取  $\mathbf{E}_s$  的前  $N$  行及后  $N$  行分别组成的矩阵  $\mathbf{E}_1$  和  $\mathbf{E}_2$ , 由信号子空间的定义,  $\mathbf{A}_1$ 、 $\mathbf{A}_2$  与  $\mathbf{E}_1$ 、 $\mathbf{E}_2$  之间满足  $\mathbf{E}_1 = \mathbf{A}_1 \mathbf{T}$ ,  $\mathbf{E}_2 = \mathbf{A}_2 \mathbf{T} = \mathbf{A}_1 \Phi \mathbf{T}$ , 则有

$$(\mathbf{E}_1^H \mathbf{E}_2)^H \mathbf{T}^H = \mathbf{T}^H \Phi^H;$$

对矩阵  $(\mathbf{E}_1^H \mathbf{E}_2)^H$  进行四元数特征分解,  $K$  个大特征值构成延时矩阵估计值  $\hat{\Phi}$ , 特征值对应的特征矢量构成非奇异矩阵估计值  $\hat{\mathbf{T}}$ , 根据  $\mathbf{E}_1^H = (\mathbf{E}_1^H \mathbf{E}_1)^{-1} \mathbf{E}_1^H$ , 得到

$$[\hat{\mathbf{A}}_1 = \mathbf{E}_1 \hat{\mathbf{T}}^{-1}, \hat{\mathbf{A}}_2 = \mathbf{E}_2 \hat{\mathbf{T}}^{-1}, \hat{\mathbf{A}} = \mathbf{E}_s \hat{\mathbf{T}}^{-1};$$

步骤四、计算信号到达角的估计值;

根据  $\hat{\mathbf{A}}_1$  计算相邻两阵元间的相位差矢量  $\bar{\mathbf{q}}(\hat{\theta}_k, \hat{\phi}_k) = \mathbf{A}_1(2:N, k) ./ \mathbf{A}_1(1:N-1, k)$ , 其中,  $\mathbf{A}_1(2:N, k)$  表示  $\mathbf{A}_1$  的第  $k$  列的第 2 到第  $N$  个元素,  $\mathbf{A}_1(1:N-1, k)$  表示  $\mathbf{A}_1$  的第  $k$  列的第 1 到第  $N-1$  个元素,  $./$  表示对应的元素相除;

计算相位矩阵  $\mathbf{\Omega} = \arg[\bar{\mathbf{q}}(\hat{\theta}_k, \hat{\phi}_k)]$ ,  $\arg(\cdot)$  表示取相位;

根据  $\mathbf{\Omega} = \mathbf{W} \cdot \begin{bmatrix} \hat{\alpha}_k \\ \hat{\beta}_k \end{bmatrix}$ , 计算第 k 个入射信号的方向余弦估计值  $\hat{\alpha}_k$  和 y 轴方向

的方向余弦估计值  $\hat{\beta}_k$ :  $\begin{bmatrix} \hat{\alpha}_k \\ \hat{\beta}_k \end{bmatrix} = [\mathbf{W}]^\# \mathbf{\Omega}$ ,  $[\mathbf{W}]^\#$  是位置矩阵  $\mathbf{W}$  的伪逆矩阵;

根据方向余弦的估计值  $\hat{\alpha}_k = \sin \hat{\theta}_k \sin \hat{\phi}_k$ ,  $\hat{\beta}_k = \sin \hat{\theta}_k \cos \hat{\phi}_k$ , 得到信号到达角的估计值:

$$\begin{cases} \hat{\theta}_k = \arcsin(\sqrt{\hat{\alpha}_k^2 + \hat{\beta}_k^2}) \\ \begin{cases} \hat{\phi}_k = \arctan\left(\frac{\hat{\alpha}_k}{\hat{\beta}_k}\right), \hat{\beta}_k \geq 0 \\ \hat{\phi}_k = \pi + \arctan\left(\frac{\hat{\alpha}_k}{\hat{\beta}_k}\right), \hat{\beta}_k < 0 \end{cases} \end{cases};$$

步骤五、由  $\hat{\mathbf{A}}_1$  的实部和三个虚部重构 z 轴方向的电偶极子子阵的阵列导向矢量估计值  $\hat{\mathbf{A}}_e$  和磁偶极子子阵的阵列导向矢量估计值  $\hat{\mathbf{A}}_h$ , 根据子阵导向矢量间的旋转不变关系得到信号极化参数的估计值;

$\hat{\mathbf{A}}_1 = \hat{\mathbf{A}}_{10} + \hat{\mathbf{A}}_{11}\tilde{\mathbf{i}} + \hat{\mathbf{A}}_{12}\tilde{\mathbf{j}} + \hat{\mathbf{A}}_{13}\tilde{\mathbf{k}}$ ,  $\hat{\mathbf{A}}_{10}$  是  $\hat{\mathbf{A}}_1$  的实部,  $\hat{\mathbf{A}}_{11}, \hat{\mathbf{A}}_{12}, \hat{\mathbf{A}}_{13}$  是  $\hat{\mathbf{A}}_1$  的三个虚部, 根据步骤二中四元数矩阵的构成,  $\hat{\mathbf{A}}_1 = \hat{\mathbf{A}}_e + \tilde{\mathbf{i}}\hat{\mathbf{A}}_h$ , 重构 z 轴方向的电偶极子子阵的阵列导向矢量估计值  $\hat{\mathbf{A}}_e = \hat{\mathbf{A}}_{10} + \tilde{\mathbf{j}}\hat{\mathbf{A}}_{12}$  和磁偶极子子阵阵列导向矢量估计值  $\hat{\mathbf{A}}_h = \hat{\mathbf{A}}_{11} + \tilde{\mathbf{j}}\hat{\mathbf{A}}_{13}$ , 两子阵阵列导向矢量间的旋转不变关系为  $\hat{\mathbf{A}}_e = \hat{\mathbf{A}}_h \hat{\Psi}$ ,  $\hat{\Psi}$  为两子阵间的旋转不变矩阵, 根据  $\hat{\Psi}$  计算信号极化参数的估计值:

$$\hat{\gamma}_k = \tan^{-1}\left(\left|\hat{\Psi}(k, k)\right|\right),$$

$$\hat{\eta}_k = \arg\left(\hat{\Psi}(k, k)\right),$$

其中,  $\hat{\Psi}(k, k)$  表示旋转不变矩阵  $\hat{\Psi}$  的第 k 行第 k 列元素;

前述步骤中的  $n = 1, \dots, N, m = 1, \dots, M, N$  为阵列的阵元数,  $M$  为采样次数,  $\tilde{\mathbf{i}}, \tilde{\mathbf{j}}, \tilde{\mathbf{k}}$  为四元数的 3 个虚数单位。

2. 根据权利要求 1 所述的电磁偶极子对阵列的四元数 ESPRIT 参数估计方法, 其特征在于: 所述阵列为圆环形阵列, 电偶极子的轴线和磁偶极子的轴线平行于 z 轴,  $N$  个阵元均匀分布在圆环上, 坐标原点位于圆环的圆心。

## 电磁偶极子对阵列的四元数 ESPRIT 参数估计方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于信号处理技术领域,尤其涉及电磁矢量传感器阵列的参数估计方法。

### 背景技术

[0002] 电磁矢量传感器阵列不仅能够同时获得来波信号的方位参数和极化参数,还能有效的揭示电磁波各个分量的正交特性,一经提出便因其完备的电磁波接收能力成为学者们的研究热点,并且取得了一些很有价值的研究成果。但是现有的电磁矢量传感器阵列的信号处理算法大都套用经典的 ESPRIT、MUSIC 等子空间类的长矢量算法,长矢量算法模型是电磁矢量传感器阵列在不同空间位置上的多分量输出用一个复数长矢量进行表述,虽然能正确估计信号参数,但破坏了各分量输出数据本身所具有的矢量结构,不能完全体现入射信号的时-空-极化三维特性。

[0003] 近年来,人们利用四元数代数体系理论对电磁矢量传感器阵列信号波达方向估计问题展开了研究,四元数模型突破了传统的基于复数域长矢量模型的局限性,在对电磁矢量传感器阵列进行信号处理时将阵列数据的代数结构进行扩展,建立了超复数域的四元数模型,从而形成了超复数域上的阵列信号处理算法,从而达到保留阵列输出局部矢量特性的目的。

### 发明内容

[0004] 本发明的目的是提供一种可以减小耦合误差的电磁矢量传感器阵列的参数估计方法。

[0005] 为了实现上述目的,本发明采取如下的技术方案:

[0006] 电磁偶极子对阵列的四元数 ESPRIT 参数估计方法,包括以下步骤:K 个互不相关完全极化横电磁波信号同时入射到电磁矢量传感器阵列上,所述阵列的阵元是由一个电偶极子和一个磁偶极子组成的电磁偶极子对,

[0007] 步骤一、对电磁矢量传感器阵列的输出信号进行 M 次采样得到第一组采样数据 X,延时  $\Delta T$  后同步采样 M 次,得到第二组采样数据 Y;

[0008]

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{1e}(1), \dots, x_{1e}(m), \dots, x_{1e}(M) \\ x_{1h}(1), \dots, x_{1h}(m), \dots, x_{1h}(M) \\ \vdots, \dots, \vdots, \dots, \vdots \\ x_{ne}(1), \dots, x_{ne}(m), \dots, x_{ne}(M) \\ x_{nh}(1), \dots, x_{nh}(m), \dots, x_{nh}(M) \\ \vdots, \dots, \vdots, \dots, \vdots \\ x_{Ne}(1), \dots, x_{Ne}(m), \dots, x_{Ne}(M) \\ x_{Nh}(1), \dots, x_{Nh}(m), \dots, x_{Nh}(M) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_{1e}(1), \dots, y_{1e}(m), \dots, y_{1e}(M) \\ y_{1h}(1), \dots, y_{1h}(m), \dots, y_{1h}(M) \\ \vdots, \dots, \vdots, \dots, \vdots \\ y_{ne}(1), \dots, y_{ne}(m), \dots, y_{ne}(M) \\ y_{nh}(1), \dots, y_{nh}(m), \dots, y_{nh}(M) \\ \vdots, \dots, \vdots, \dots, \vdots \\ y_{Ne}(1), \dots, y_{Ne}(m), \dots, y_{Ne}(M) \\ y_{Nh}(1), \dots, y_{Nh}(m), \dots, y_{Nh}(M) \end{bmatrix},$$

[0009] 其中,  $x_{ne}(m)$  表示第 n 个阵元的电偶极子输出信号的第 m 次采样数据,  $x_{nh}(m)$  表示

第  $n$  个阵元的磁偶极子输出信号的第  $m$  次采样数据,  $y_{ne}(m)$  表示延时  $\Delta T$  后第  $n$  个阵元的电偶极子输出信号的第  $m$  次采样数据,  $y_{nh}(m)$  表示延时  $\Delta T$  后第  $n$  个阵元的磁偶极子输出信号的第  $m$  次采样数据;

[0010] 步骤二、将第一组采样数据  $X$  和第二组采样数据  $Y$  分别按照同阵元的电偶极子和磁偶极子的同次快拍数据叠加构成第一组接收四元数数据矩阵  $Z_1$  和第一组接收四元数数据矩阵  $Z_2$ , 构造全阵列接收数据矩阵  $Z$ ;

[0011]

$$\mathbf{Z}_1 = \begin{bmatrix} x_{1e}(1) + \tilde{i}x_{1h}(1), \dots, x_{1e}(m) + \tilde{i}x_{1h}(m), \dots, x_{1e}(M) + \tilde{i}x_{1h}(M) \\ \vdots, \dots, \vdots, \dots, \vdots \\ x_{ne}(1) + \tilde{i}x_{nh}(1), \dots, x_{ne}(m) + \tilde{i}x_{nh}(m), \dots, x_{ne}(M) + \tilde{i}x_{nh}(M) \\ \vdots, \dots, \vdots, \dots, \vdots \\ x_{Ne}(1) + \tilde{i}x_{Nh}(1), \dots, x_{Ne}(m) + \tilde{i}x_{Nh}(m), \dots, x_{Ne}(M) + \tilde{i}x_{Nh}(M) \end{bmatrix},$$

[0012]

$$\mathbf{Z}_2 = \begin{bmatrix} y_{1e}(1) + \tilde{i}y_{1h}(1), \dots, y_{1e}(m) + \tilde{i}y_{1h}(m), \dots, y_{1e}(M) + \tilde{i}y_{1h}(M) \\ \vdots, \dots, \vdots, \dots, \vdots \\ y_{ne}(1) + \tilde{i}y_{nh}(1), \dots, y_{ne}(m) + \tilde{i}y_{nh}(m), \dots, y_{ne}(M) + \tilde{i}y_{nh}(M) \\ \vdots, \dots, \vdots, \dots, \vdots \\ y_{Ne}(1) + \tilde{i}y_{Nh}(1), \dots, y_{Ne}(m) + \tilde{i}y_{Nh}(m), \dots, y_{Ne}(M) + \tilde{i}y_{Nh}(M) \end{bmatrix},$$

[0013] 其中,  $x_{ne}(m) + \tilde{i}x_{nh}(m)$  表示由第  $n$  个阵元的电偶极子和磁偶极子输出信号的第  $m$  次采样数据叠加构成的四元数数据,  $y_{ne}(m) + \tilde{i}y_{nh}(m)$  表示延时  $\Delta T$  由第  $n$  个阵元的电偶极子和磁偶极子输出信号的第  $m$  次采样数据叠加构成的四元数数据;

[0014] 第一组采样数据  $X$  构成的四元数数据矩阵  $Z_1 = A_1 S + N_1$ , 其中,  $A_1 = [a_1(\theta_1, \phi_1, \gamma_1, \eta_1), \dots, a_1(\theta_k, \phi_k, \gamma_k, \eta_k), \dots, a_1(\theta_K, \phi_K, \gamma_K, \eta_K)]$  是第一组采样数据对应的阵列导向矢量,  $a_1(\theta_k, \phi_k, \gamma_k, \eta_k) = c_k q(\theta_k, \phi_k)$ ,  $c_k = e_{kz} + \tilde{i}h_{kz}$  是第  $k$  个入射信号的第一组采样数据中电磁场的四元数数据表示,  $e_{kz} = -\sin\theta_k \sin\gamma_k e^{i\eta_k}$  和  $h_{kz} = \sin\theta_k \cos\gamma_k$  分别为第  $k$  个入射信号在坐标原点处沿  $z$  轴方向的电场分量和磁场分量,  $q(\theta_k, \phi_k)$  为全阵列相位中心的空域导向矢量,  $\theta_k$  是第  $k$  个入射信号的俯仰角,  $\phi_k$  是第  $k$  个入射信号的方位角,  $\gamma_k$  是第  $k$  个入射信号的辅助极化角,  $\eta_k$  是第  $k$  个入射信号的极化相位差,  $N_1$  是 Gaussian 白噪声矢量,  $S$  为入射信号构成的幅度矩阵;

[0015] 第二组采样数据  $Y$  构成的四元数数据矩阵  $Z_2 = A_2 S + N_2 = A_1 \Phi S + N_2$ , 其中,  $A_2 = A_1 \Phi$  是第二组采样数据对应的阵列导向矢量,  $\Phi$  为时延矩阵,  $N_2$  是 Gaussian 白噪声矢量;

[0016] 构造全阵列接收数据矩阵  $\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_1 \\ \mathbf{Z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \end{bmatrix} \mathbf{S} + \mathbf{N} = \mathbf{A} \mathbf{S} + \mathbf{N}$ , 其中,  $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \end{bmatrix}$  是全

数据对应的阵列导向矢量矩阵,  $\mathbf{N} = \begin{bmatrix} \mathbf{N}_1 \\ \mathbf{N}_2 \end{bmatrix}$  是全数据噪声矩阵;

[0017] 步骤三、计算全阵列接收数据矩阵的自相关矩阵  $R_z$ ，对自相关矩阵进行四元数特征分解，得到第一组采样数据对应的阵列导向矢量估计值  $\hat{\mathbf{A}}_1$ 、第二组采样数据对应的阵列导向矢量估计值  $\hat{\mathbf{A}}_2$  和全数据对应的阵列导向矢量矩阵估计值  $\hat{\mathbf{A}}$ ；

$$[0018] \quad \mathbf{R}_z = \frac{1}{M} [\mathbf{Z}\mathbf{Z}^H] = \mathbf{A}\mathbf{R}_s\mathbf{A}^H + \sigma^2\mathbf{I},$$

[0019] 其中， $\mathbf{R}_s = \frac{1}{M} [\mathbf{S}\mathbf{S}^H]$  为入射信号的自相关函数， $\sigma^2$  为噪声的方差， $\mathbf{I}$  为单位矩阵，

$(\cdot)^H$  表示转置复共轭操作；

[0020] 对自相关矩阵  $R_z$  进行四元数矩阵特征分解得到信号子空间  $E_s$ ，根据子空间原理，存在  $K \times K$  的非奇异矩阵  $T$ ，且  $E_s = AT$ ，分别取  $E_s$  的前  $N$  行及后  $N$  行分别组成的矩阵  $E_1$  和  $E_2$ ，由信号子空间的定义， $A_1$ 、 $A_2$  与  $E_1$ 、 $E_2$  之间满足  $E_1 = A_1T$ ， $E_2 = A_2T = A_1\Phi T$ ，则有  $(\mathbf{E}_1^H\mathbf{E}_2)^H \mathbf{T}^H = \mathbf{T}^H\Phi^H$ ；

[0021] 对矩阵  $(\mathbf{E}_1^H\mathbf{E}_2)^H$  进行四元数特征分解， $K$  个大特征值构成延时矩阵估计值  $\hat{\Phi}$ ，特征值对应的特征矢量构成非奇异矩阵估计值  $\hat{\mathbf{T}}$ ，根据  $\mathbf{E}_1^H = (\mathbf{E}_1^H\mathbf{E}_1)^{-1}\mathbf{E}_1^H$ ，得到  $\hat{\mathbf{A}}_1 = \mathbf{E}_1\mathbf{T}^{-1}$ ， $\hat{\mathbf{A}}_2 = \mathbf{E}_2\mathbf{T}^{-1}$ ， $\hat{\mathbf{A}} = \mathbf{E}_s\mathbf{T}^{-1}$ ；

[0022] 步骤四、计算信号到达角的估计值；

[0023] 根据  $\hat{\mathbf{A}}_1$  计算相邻两阵元间的相位差矢量  $\hat{\mathbf{q}}(\hat{\theta}_k, \hat{\phi}_k) = \mathbf{A}_1(2:N, k) ./ \mathbf{A}_1(1:N-1, k)$ ，其中， $\mathbf{A}_1(2:N, k)$  表示  $\mathbf{A}_1$  的第  $k$  列的第 2 到第  $N$  个元素， $\mathbf{A}_1(1:N-1, k)$  表示  $\mathbf{A}_1$  的第  $k$  列的第 1 到第  $N-1$  个元素， $./$  表示对应的元素相除；

[0024] 计算相位矩阵  $\mathbf{\Omega} = \arg[\hat{\mathbf{q}}(\hat{\theta}_k, \hat{\phi}_k)]$ ， $\arg(\cdot)$  表示取相位；

[0025] 根据  $\mathbf{\Omega} = \mathbf{W} \cdot \begin{bmatrix} \hat{\alpha}_k \\ \hat{\beta}_k \end{bmatrix}$ ，计算第  $k$  个入射信号的方向余弦估计值  $\hat{\alpha}_k$  和  $y$  轴方向的方向余弦估计值  $\hat{\beta}_k$ ： $\begin{bmatrix} \hat{\alpha}_k \\ \hat{\beta}_k \end{bmatrix} = [\mathbf{W}]^\# \mathbf{\Omega}$ ， $[\mathbf{W}]^\#$  是位置矩阵  $\mathbf{W}$  的伪逆矩阵；

[0026] 根据方向余弦的估计值  $\hat{\alpha}_k = \sin\hat{\theta}_k \sin\hat{\phi}_k$ ， $\hat{\beta}_k = \sin\hat{\theta}_k \cos\hat{\phi}_k$ ，得到信号到达角的估计值：

$$[0027] \quad \begin{cases} \hat{\theta}_k = \arcsin(\sqrt{\hat{\alpha}_k^2 + \hat{\beta}_k^2}) \\ \hat{\phi}_k = \arctan\left(\frac{\hat{\alpha}_k}{\hat{\beta}_k}\right), \hat{\beta}_k \geq 0 \\ \hat{\phi}_k = \pi + \arctan\left(\frac{\hat{\alpha}_k}{\hat{\beta}_k}\right), \hat{\beta}_k < 0 \end{cases} ;$$

[0028] 步骤五、由  $\hat{\mathbf{A}}_1$  的实部和三个虚部重构 Z 轴方向的电偶极子子阵的阵列导向矢量估计值  $\hat{\mathbf{A}}_e$  和磁偶极子子阵的阵列导向矢量估计值  $\hat{\mathbf{A}}_h$ ，根据子阵导向矢量间的旋转不变关系得到信号极化参数的估计值；

[0029]  $\hat{\mathbf{A}}_1 = \hat{\mathbf{A}}_{10} + \hat{\mathbf{A}}_{11}\tilde{i} + \hat{\mathbf{A}}_{12}\tilde{j} + \hat{\mathbf{A}}_{13}\tilde{k}$ ， $\hat{\mathbf{A}}_{10}$  是  $\hat{\mathbf{A}}_1$  的实部， $\hat{\mathbf{A}}_{11}, \hat{\mathbf{A}}_{12}, \hat{\mathbf{A}}_{13}$  是  $\hat{\mathbf{A}}_1$  的三个虚部，根据步骤二中四元数矩阵的构成， $\hat{\mathbf{A}}_1 = \hat{\mathbf{A}}_e + \tilde{i}\hat{\mathbf{A}}_h$ ，重构 Z 轴方向的电偶极子子阵的阵列导向矢量估计值  $\hat{\mathbf{A}}_e = \hat{\mathbf{A}}_{10} + \tilde{j}\hat{\mathbf{A}}_{12}$  和磁偶极子子阵阵列导向矢量估计值  $\hat{\mathbf{A}}_h = \hat{\mathbf{A}}_{11} + \tilde{j}\hat{\mathbf{A}}_{13}$ ，两子阵阵列导向矢量间的旋转不变关系为  $\hat{\mathbf{A}}_e = \hat{\mathbf{A}}_h\hat{\Psi}$ ， $\hat{\Psi}$  为两子阵间的旋转不变矩阵，根据  $\hat{\Psi}$  计算信号极化参数的估计值：

$$[0030] \quad \hat{\gamma}_k = \tan^{-1}\left(\left|\hat{\Psi}(k, k)\right|\right),$$

$$[0031] \quad \hat{\eta}_k = \arg\left(\hat{\Psi}(k, k)\right),$$

[0032] 其中， $\hat{\Psi}(k, k)$  表示旋转不变矩阵  $\hat{\Psi}$  的第 k 行第 k 列的元素；

[0033] 前述步骤中的  $n = 1, \dots, N$ ， $m = 1, \dots, M$ ，N 为阵列的阵元数，M 为采样次数， $\tilde{i}$ ， $\tilde{j}$ ， $\tilde{k}$  为四元数的 3 个虚数单位。

[0034] 本发明的阵列为圆环阵列，电偶极子的轴线和磁偶极子的轴线平行于 z 轴，N 个阵元均匀分布在圆环上，坐标原点位于圆环的圆心。

[0035] 由于四元数方法能够更好地保持四元数矢量特性，具有比长矢量方法更好的性能，耦合误差更小。本发明方法采用基于四元数的 ESPRIT 算法对入射信号的多参数进行估计，与现有技术的长矢量方法相比，可以更好的体现电磁矢量传感器各组成分量的正交特性，提高参数估计的精度。

## 附图说明

[0036] 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。

[0037] 图 1 为本发明实施例电磁矢量传感器阵列的示意图。

[0038] 图 2 为本发明方法的流程图。

[0039] 图 3 为仿真实验的俯仰角估计均方根误差与信噪比的关系图。

[0040] 图 4 为仿真实验的方位角估计均方根误差与信噪比的关系图。

[0041] 图 5 为仿真实验的辅助极化角估计均方根误差与信噪比的关系图。

[0042] 图 6 为仿真实验的极化相位差估计均方根误差与信噪比的关系图。

[0043] 图 7 为仿真实验的到达角估计成功概率随信噪比的关系图。

[0044] 图 8 为仿真实验的极化角估计成功概率随信噪比的关系图。

[0045] 图 9 为本发明方法到达角估计散布图。



- [0046] 图 10 为长矢量算法到达角估计散布图。  
 [0047] 图 11 为本发明方法极化角估计散布图。  
 [0048] 图 12 为长矢量算法极化角估计散布图。

### 具体实施方式

[0049] 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。

[0050] 图 1 所示为本发明的电磁矢量传感器阵列的示意图。如图 1 所示，电磁矢量传感器阵列均为圆环阵列，其阵元是由一个电偶极子和一个磁偶极子组成的电磁偶极子对，图 1 中以箭头表示电偶极子，小圆环表示磁偶极子。电偶极子的轴线平行于 z 轴，磁偶极子的轴线也平行于 z 轴，电偶极子和磁偶极子分别接收 z 轴方向的电场和磁场。N 个阵元在半径为 R 的圆环上均匀分布，第 1 个阵元位于 x 轴上，沿圆周逆时针方向分别是第 1, ..., N 个阵元，坐标原点位于圆环的圆心，第 n 个阵元与 x 轴正向的夹角  $\varphi_n = \frac{2\pi}{N}(n-1)$ ,  $n = 1, \dots, N$ 。

[0051] 结合图 2，本发明的电磁偶极子对阵列的四元数参数估计方法，包括以下步骤：K 个互不相关完全极化横电磁波信号同时入射到电磁矢量传感器阵列上，

[0052] 步骤一、对电磁矢量传感器阵列的输出信号进行 M 次采样得到第一组采样数据 X，延时  $\Delta T$  后同步采样 M 次，得到第二组采样数据 Y，X 和 Y 均为  $2N \times M$  的矩阵， $K < N-1$ ；

[0053]

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{1e}(1), \dots, x_{1e}(m), \dots, x_{1e}(M) \\ x_{1h}(1), \dots, x_{1h}(m), \dots, x_{1h}(M) \\ \vdots, \dots, \vdots, \dots, \vdots \\ x_{ne}(1), \dots, x_{ne}(m), \dots, x_{ne}(M) \\ x_{nh}(1), \dots, x_{nh}(m), \dots, x_{nh}(M) \\ \vdots, \dots, \vdots, \dots, \vdots \\ x_{Ne}(1), \dots, x_{Ne}(m), \dots, x_{Ne}(M) \\ x_{Nh}(1), \dots, x_{Nh}(m), \dots, x_{Nh}(M) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_{1e}(1), \dots, y_{1e}(m), \dots, y_{1e}(M) \\ y_{1h}(1), \dots, y_{1h}(m), \dots, y_{1h}(M) \\ \vdots, \dots, \vdots, \dots, \vdots \\ y_{ne}(1), \dots, y_{ne}(m), \dots, y_{ne}(M) \\ y_{nh}(1), \dots, y_{nh}(m), \dots, y_{nh}(M) \\ \vdots, \dots, \vdots, \dots, \vdots \\ y_{Ne}(1), \dots, y_{Ne}(m), \dots, y_{Ne}(M) \\ y_{Nh}(1), \dots, y_{Nh}(m), \dots, y_{Nh}(M) \end{bmatrix},$$

[0054] 其中， $x_{ne}(m)$  表示第 n 个阵元的电偶极子输出信号的第 m 次采样数据， $x_{nh}(m)$  表示第 n 个阵元的磁偶极子输出信号的第 m 次采样数据， $y_{ne}(m)$  表示延时  $\Delta T$  后第 n 个阵元的电偶极子输出信号的第 m 次采样数据， $y_{nh}(m)$  表示延时  $\Delta T$  后第 n 个阵元的磁偶极子输出信号的第 m 次采样数据， $m = 1, \dots, M$ ；

[0055] 步骤二、将第一组采样数据 X 和第二组采样数据 Y 分别按照同阵元的电偶极子和磁偶极子的同次快拍数据叠加构成第一组接收四元数数据矩阵  $Z_1$  和第一组接收四元数数据矩阵  $Z_2$ ；

[0056]

$$\mathbf{Z}_1 = \begin{bmatrix} x_{1e}(1) + \tilde{i}x_{1h}(1), \dots, x_{1e}(m) + \tilde{i}x_{1h}(m), \dots, x_{1e}(M) + \tilde{i}x_{1h}(M) \\ \vdots, \dots, \vdots, \dots, \vdots \\ x_{ne}(1) + \tilde{i}x_{nh}(1), \dots, x_{ne}(m) + \tilde{i}x_{nh}(m), \dots, x_{ne}(M) + \tilde{i}x_{nh}(M) \\ \vdots, \dots, \vdots, \dots, \vdots \\ x_{Ne}(1) + \tilde{i}x_{Nh}(1), \dots, x_{Ne}(m) + \tilde{i}x_{Nh}(m), \dots, x_{Ne}(M) + \tilde{i}x_{Nh}(M) \end{bmatrix},$$

[0057]

$$\mathbf{Z}_2 = \begin{bmatrix} y_{1e}(1) + \tilde{i}y_{1h}(1), \dots, y_{1e}(m) + \tilde{i}y_{1h}(m), \dots, y_{1e}(M) + \tilde{i}y_{1h}(M) \\ \vdots, \dots, \vdots, \dots, \vdots \\ y_{ne}(1) + \tilde{i}y_{nh}(1), \dots, y_{ne}(m) + \tilde{i}y_{nh}(m), \dots, y_{ne}(M) + \tilde{i}y_{nh}(M) \\ \vdots, \dots, \vdots, \dots, \vdots \\ y_{Ne}(1) + \tilde{i}y_{Nh}(1), \dots, y_{Ne}(m) + \tilde{i}y_{Nh}(m), \dots, y_{Ne}(M) + \tilde{i}y_{Nh}(M) \end{bmatrix},$$

[0058] 其中,  $x_{ne}(m) + \tilde{i}x_{nh}(m)$  表示由第  $n$  个阵元的电偶极子和磁偶极子输出信号的第  $m$  次采样数据叠加构成的四元数数据,  $y_{ne}(m) + \tilde{i}y_{nh}(m)$  表示延时  $\Delta T$  由第  $n$  个阵元的电偶极子和磁偶极子输出信号的第  $m$  次采样数据叠加构成的四元数数据;

[0059]  $K$  个完全极化且互不相关横电磁波信号同时入射到接收阵列上, 则第一组采样数据  $X$  构成的四元数数据矩阵为:  $Z_1 = A_1 S + N_1$ , 其中,  $A_1 = [a_1(\theta_1, \phi_1, \gamma_1, \eta_1), \dots, a_1(\theta_k, \phi_k, \gamma_k, \eta_k), \dots, a_1(\theta_K, \phi_K, \gamma_K, \eta_K)]$  是第一组采样数据对应的阵列导向矢量,  $a_1(\theta_k, \phi_k, \gamma_k, \eta_k) = c_k q(\theta_k, \phi_k)$ ,  $c_k = e_{kz} + \tilde{i}h_{kz}$  是第  $k$  个入射信号的第一组采样数据中电磁场的四元数数据表示,  $e_{kz} = -\sin\theta_k \sin\gamma_k e^{j\eta_k}$  和  $h_{kz} = \sin\theta_k \cos\gamma_k$  分别为第  $k$  个入射信号在坐标原点处沿  $z$  轴方向的电场分量和磁场分量,  $q(\theta_k, \phi_k) = [q_1(\theta_k, \phi_k), \dots, q_n(\theta_k, \phi_k), \dots, q_N(\theta_k, \phi_k)]$  为全阵列相位中心的空域导向矢量,  $q_n(\theta_k, \phi_k) = e^{j\frac{2\pi}{\lambda} R \sin\theta_k \cos(\phi_k - \phi_n)}$  是第  $n$  个阵元相对于坐标原点的相位差,  $\theta_k (0 \leq \theta_k \leq 90^\circ)$  是第  $k$  个入射信号的俯仰角,  $\phi_k (0 \leq \phi_k \leq 360^\circ)$  是第  $k$  个入射信号的方位角,  $\gamma_k (0 \leq \gamma_k \leq 90^\circ)$  是第  $k$  个入射信号的辅助极化角,  $\eta_k (-180^\circ \leq \eta_k \leq 180^\circ)$  是第  $k$  个入射信号的极化相位差,  $N_1$  是均值为零、方差为  $\sigma^2$  的高斯白噪声矢量,  $S = [s_1, \dots, s_K]^T$  为  $K$  个互不相关信号构成的  $K \times M$  幅度矩阵;

[0060] 同样的, 第二组采样数据  $Y$  构成的四元数数据矩阵为:  $Z_2 = A_2 S + N_2 = A_1 \Phi S + N_2$ , 其中,  $N_2$  是均值为零、方差为  $\sigma^2$  的高斯白噪声矢量,  $A_2$  是第二组采样数据对应的阵列导向矢量,  $A_2 = A_1 \Phi$ ,  $\Phi = \text{diag}[e^{j2\pi f_1 \Delta T}, \dots, e^{j2\pi f_k \Delta T}, \dots, e^{j2\pi f_K \Delta T}]$  为时延矩阵,  $f_k$  为第  $k$  个入射信号的频率;

[0061] 构造全阵列接收数据矩阵  $Z$ :  $Z = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} S + N = AS + N$ ; 其中,  $A = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix}$  是

全数据对应的阵列导向矢量矩阵,  $\mathbf{N} = \begin{bmatrix} \mathbf{N}_1 \\ \mathbf{N}_2 \end{bmatrix}$  是全数据噪声矩阵;

[0062] 步骤三、计算全阵列接收数据矩阵  $Z$  的自相关矩阵  $R_z$ , 并对自相关矩阵进行四元数特征分解, 从而得到第一组采样数据对应的阵列导向矢量估计值  $\hat{\mathbf{A}}_1$ 、第二组采样数据对应的阵列导向矢量估计值  $\hat{\mathbf{A}}_2$  和全数据对应的阵列导向矢量矩阵估计值  $\hat{\mathbf{A}}$ ;

$$[0063] \quad \mathbf{R}_z = \frac{1}{M} [\mathbf{Z}\mathbf{Z}^H] = \mathbf{A}\mathbf{R}_s\mathbf{A}^H + \sigma^2\mathbf{I},$$

[0064] 其中,  $\mathbf{R}_s = \frac{1}{M} [\mathbf{S}\mathbf{S}^H]$  为入射信号的自相关函数,  $\sigma^2$  为噪声的方差,  $\mathbf{I}$  为单位矩阵,

$(\cdot)^H$  表示转置复共轭操作;

[0065] 对  $R_z$  进行四元数矩阵特征分解得到信号子空间  $E_s$ , 根据子空间原理, 存在  $K \times K$  的非奇异矩阵  $T$ , 且  $E_s = \mathbf{A}T$ , 分别取  $E_s$  的前  $N$  行及后  $N$  行分别组成的矩阵  $E_1$  和  $E_2$ , 由信号子空间的定义,  $A_1, A_2$  与  $E_1, E_2$  之间满足  $E_1 = A_1T, E_2 = A_2T = A_1\Phi T$ , 则有  $(\mathbf{E}_1^H\mathbf{E}_2)^H \mathbf{T}^H = \mathbf{T}^H\Phi^H$ ;

[0066] 对矩阵  $(\mathbf{E}_1^H\mathbf{E}_2)^H$  进行四元数特征分解,  $K$  个大特征值构成延时矩阵估计值  $\hat{\Phi}$ , 特征值对应的特征矢量构成非奇异矩阵估计值  $\hat{\mathbf{T}}$ , 根据  $\mathbf{E}_1^H = (\mathbf{E}_1^H\mathbf{E}_1)^{-1} \mathbf{E}_1^H$ , 得到  $\hat{\mathbf{A}}_1 = \mathbf{E}_1\mathbf{T}^{-1}, \hat{\mathbf{A}}_2 = \mathbf{E}_2\mathbf{T}^{-1}, \hat{\mathbf{A}} = \mathbf{E}_s\mathbf{T}^{-1}$ ;

[0067] 步骤四、由第一组采样数据对应的阵列导向矢量估计值  $\hat{\mathbf{A}}_1$  获得信号到达角的估计值;

[0068] 根据  $\hat{\mathbf{A}}_1$  计算相邻两阵元间的相位差矢量  $\hat{\mathbf{q}}(\hat{\theta}_k, \hat{\phi}_k) = \mathbf{A}_1(2:N, k) ./ \mathbf{A}_1(1:N-1, k)$ , 其中,  $\mathbf{A}_1(2:N, k)$  表示  $\mathbf{A}_1$  的第  $k$  列的第 2 到第  $N$  个元素,  $\mathbf{A}_1(1:N-1, k)$  表示  $\mathbf{A}_1$  的第  $k$  列的第 1 到第  $N-1$  个元素,  $./$  表示对应的元素相除;

[0069] 计算相位矩阵  $\mathbf{\Omega} = \arg[\hat{\mathbf{q}}(\hat{\theta}_k, \hat{\phi}_k)]$ ,  $\arg(\cdot)$  表示取相位;

[0070] 根据相位矩阵  $\mathbf{\Omega}$  和位置矩阵  $\mathbf{W}$  的关系  $\mathbf{\Omega} = \mathbf{W} \cdot \begin{bmatrix} \hat{\alpha}_k \\ \hat{\beta}_k \end{bmatrix}$ , 计算第  $k$  个入射信号的  $x$  轴方向的方向余弦估计值  $\hat{\alpha}_k$  和  $y$  轴方向的方向余弦估计值  $\hat{\beta}_k$ ;

$$[0071] \quad \begin{bmatrix} \hat{\alpha}_k \\ \hat{\beta}_k \end{bmatrix} = [\mathbf{W}]^\# \mathbf{\Omega},$$

[0072] 其中,  $[\mathbf{W}]^\#$  是位置矩阵  $\mathbf{W}$  的伪逆矩阵,  $[\mathbf{W}]^\# = [(\mathbf{W})^H\mathbf{W}]^{-1}(\mathbf{W})^H$ , 位置矩阵

$$\mathbf{W} = \frac{2\pi R}{\lambda_k} \begin{bmatrix} \sin \Delta & \cos \Delta - 1 \\ \sin 2\Delta - \sin \Delta & \cos 2\Delta - \cos \Delta \\ \vdots & \vdots \\ \sin N\Delta - \sin[(N-1)\Delta] & \cos N\Delta - \cos[(N-1)\Delta] \end{bmatrix}, \quad \Delta = \frac{2\pi}{N}$$

弧对应的圆心角,  $R$  为圆环阵列的半径,  $\lambda_k$  为第  $k$  个入射信号的波长;

[0073] 根据方向余弦的估计值  $\hat{\alpha}_k = \sin \hat{\theta}_k \sin \hat{\phi}_k$ ,  $\hat{\beta}_k = \sin \hat{\theta}_k \cos \hat{\phi}_k$ , 进一步得到信号到达角的估计值:

$$[0074] \quad \begin{cases} \hat{\theta}_k = \arcsin(\sqrt{\hat{\alpha}_k^2 + \hat{\beta}_k^2}) \\ \hat{\phi}_k = \arctan\left(\frac{\hat{\alpha}_k}{\hat{\beta}_k}\right), \hat{\beta}_k \geq 0 \\ \hat{\phi}_k = \pi + \arctan\left(\frac{\hat{\alpha}_k}{\hat{\beta}_k}\right), \hat{\beta}_k < 0 \end{cases};$$

[0075] 步骤五、由  $\hat{\mathbf{A}}_1$  的实部和三个虚部重构  $Z$  轴方向的电偶极子子阵的阵列导向矢量估计值  $\hat{\mathbf{A}}_e$  和磁偶极子子阵的阵列导向矢量估计值  $\hat{\mathbf{A}}_h$ , 根据子阵导向矢量间的旋转不变关系得到信号极化参数的估计值;

[0076]  $\hat{\mathbf{A}}_1 = \hat{\mathbf{A}}_{10} + \hat{\mathbf{A}}_{11}\tilde{\mathbf{i}} + \hat{\mathbf{A}}_{12}\tilde{\mathbf{j}} + \hat{\mathbf{A}}_{13}\tilde{\mathbf{k}}$ ,  $\hat{\mathbf{A}}_{10}$  是  $\hat{\mathbf{A}}_1$  的实部,  $\hat{\mathbf{A}}_{11}, \hat{\mathbf{A}}_{12}, \hat{\mathbf{A}}_{13}$  是  $\hat{\mathbf{A}}_1$  的三个虚部,  $\tilde{\mathbf{i}}, \tilde{\mathbf{j}}, \tilde{\mathbf{k}}$  是四元数的 3 个虚数单位, 根据步骤二中四元数矩阵的构成, 第一组采样数据对应的阵列导向矢量估计值  $\hat{\mathbf{A}}_1$  可以表示为  $\hat{\mathbf{A}}_1 = \hat{\mathbf{A}}_e + \tilde{\mathbf{i}}\hat{\mathbf{A}}_h$ , 重构  $Z$  轴方向的电偶极子子阵的导向矢量估计值  $\hat{\mathbf{A}}_e = \hat{\mathbf{A}}_{10} + \tilde{\mathbf{j}}\hat{\mathbf{A}}_{12}$  和磁偶极子子阵导向矢量估计值  $\hat{\mathbf{A}}_h = \hat{\mathbf{A}}_{11} + \tilde{\mathbf{j}}\hat{\mathbf{A}}_{13}$ , 两子阵导向矢量间的旋转不变关系为  $\hat{\mathbf{A}}_e = \hat{\mathbf{A}}_h \hat{\Psi}$ ,  $\hat{\Psi} = \text{diag}[-\tan \hat{\gamma}_1 e^{j\hat{\eta}_1}, \dots, -\tan \hat{\gamma}_K e^{j\hat{\eta}_K}]$  为两子阵间的旋转不变矩阵,  $\text{diag}[\cdot]$  表示以括号里的元素为对角元素的对角矩阵;

[0077] 根据  $\hat{\Psi}$  计算信号极化参数的估计值:

$$[0078] \quad \hat{\gamma}_k = \tan^{-1}\left(\left|\hat{\Psi}(k, k)\right|\right),$$

$$[0079] \quad \hat{\eta}_k = \arg\left(\hat{\Psi}(k, k)\right),$$

[0080] 其中,  $\hat{\Psi}(k, k)$  表示旋转不变矩阵  $\hat{\Psi}$  的第  $k$  行第  $k$  列的元素。

[0081] 本发明利用两组同步采样数据构造全阵列接收数据及其自相关矩阵, 对自相关矩阵进行四元数特征分解, 并根据子空间理论得到阵列导向矢量的估计, 通过空域导向矢量分块运算得到  $x$  轴方向和  $y$  轴方向的方向余弦, 从而得到信号二维到达角的估计, 根据阵列导向矢量重构  $x$  轴方向和  $y$  轴方向的电偶极子子阵导向矢量, 利用两个子阵导向矢量间的关系得到极化参数的估计。

[0082] 本发明的效果可以通过以下的仿真结果进一步说明:

[0083] 仿真实验条件如下：采用半径为  $R = 0.5\lambda$  的均匀圆形阵列作为接收阵列， $N = 14$  个电磁偶极子对均匀分布于圆周上。两个入射信号参数分别为  $(\theta_1, \phi_1, \gamma_1, \eta_1) = (72^\circ, 85^\circ, 30^\circ)$ ， $(\theta_2, \phi_2, \gamma_2, \eta_2) = (30^\circ, 43^\circ, 67^\circ, 80^\circ)$ ，进行 1024 次快拍，500 次独立蒙特卡罗试验。

[0084] 仿真实验采用现有技术的长矢量算法与本发明方法的四元数算法进行对比。如图 3 至图 6 所示，在信噪比区间内本发明方法的均方根误差都低于长矢量算法的均方根误差，在信噪比为 0dB 时，本发明方法在俯仰角、方位角、辅助极化角、极化相位差估计均方根误差跟长矢量方法相比分别小  $0.8^\circ$ 、 $0.15^\circ$ 、 $0.2^\circ$  和  $0.5^\circ$ 。

[0085] 由图 7 可以看出，在 0dB 时基于本发明方法的到达角估计成功概率为 0.95，而基于长矢量的到达角估计成功概率不到 0.55。由图 8 可以看出，在 0dB 时本发明方法的极化参数成功概率接近 1，而基于长矢量的极化参数的成功概率仅为 0.65。

[0086] 从图 9 与图 10 的对比中能看出，在信噪比为 10dB 时，本发明方法的到达角估计值在真值附近较小范围内扰动，估计值的误差较小，而长矢量算法估计值则偏离真值较多，估计误差较大。

[0087] 从图 11 与图 12 的对比中能看出，在信噪比为 10dB 时，本发明方法的极化参数估计值紧紧围绕在真值附近，估计误差较小。而长矢量算法估计值偏离真实值较多，估计误差较大。

[0088] 因此从参数估计的均方根误差、成功概率和散布图上可以看出本发明方法比长矢量方法具有更高的参数估计性能。

[0089] 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。

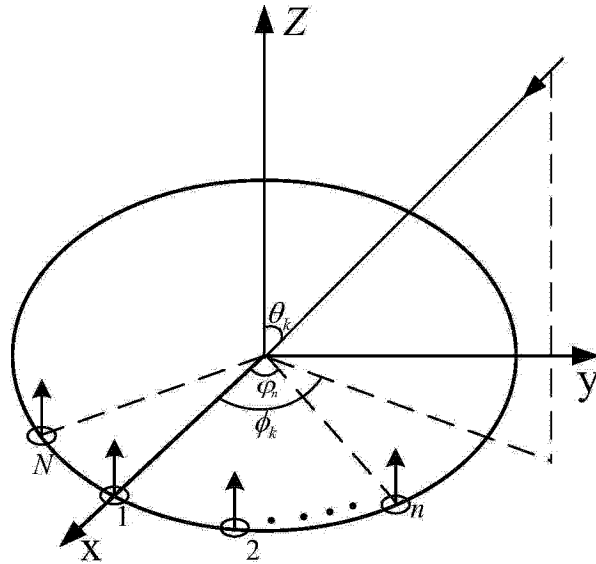


图 1

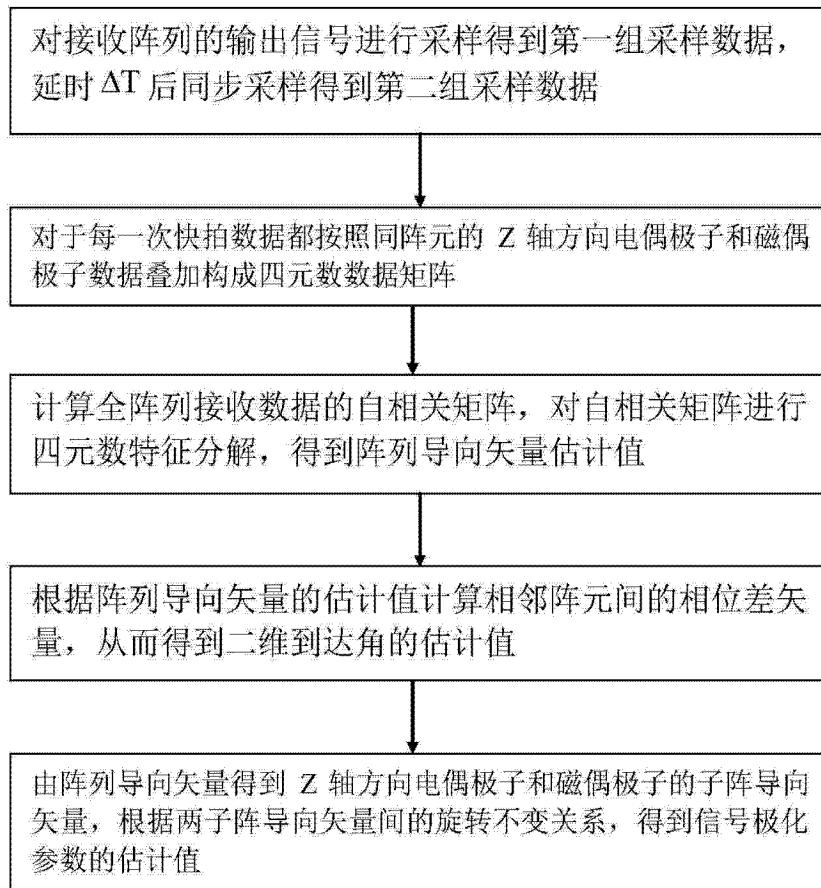


图 2

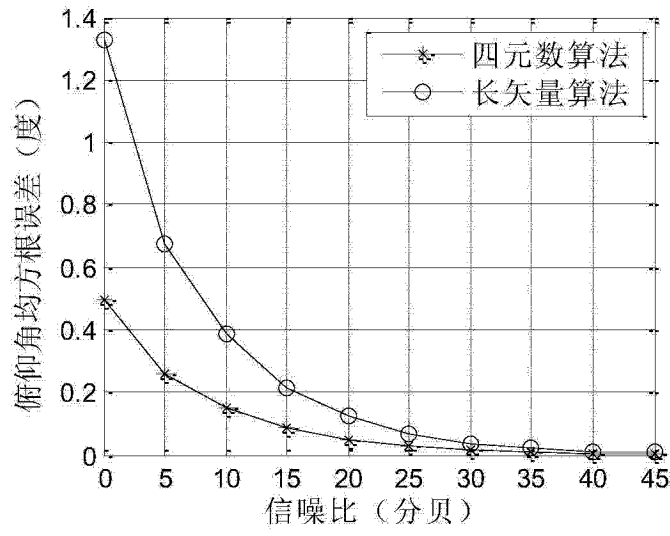


图 3

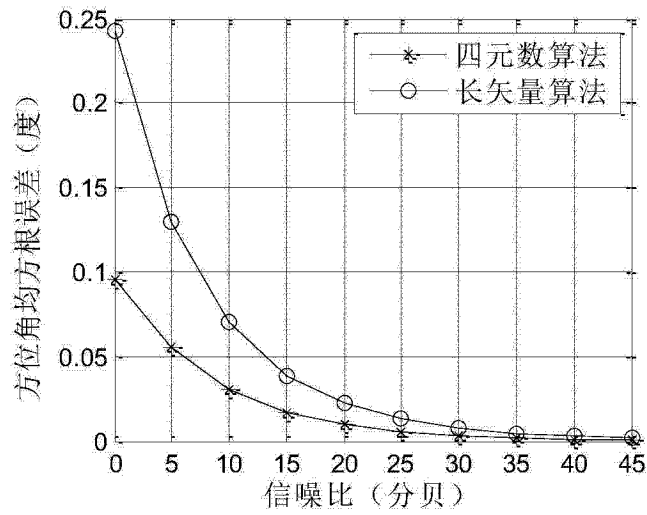


图 4

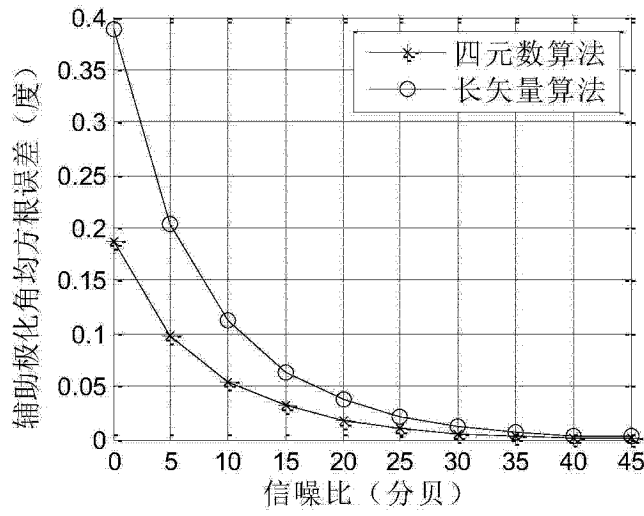


图 5

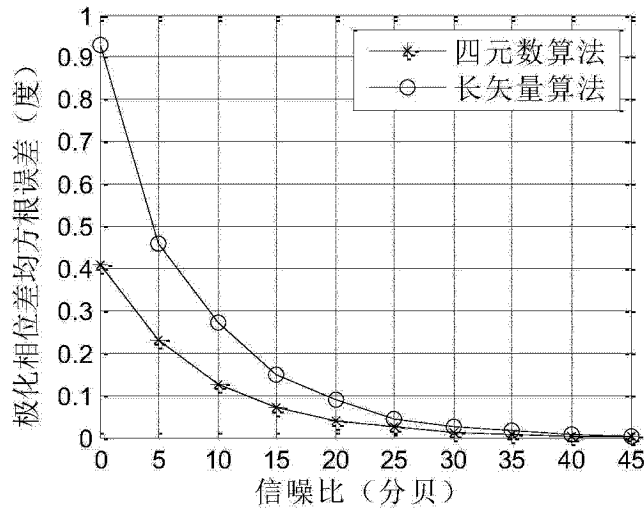


图 6



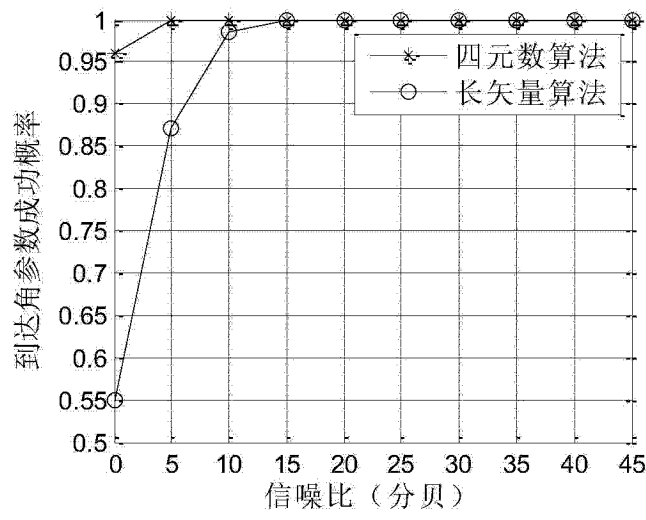


图 7

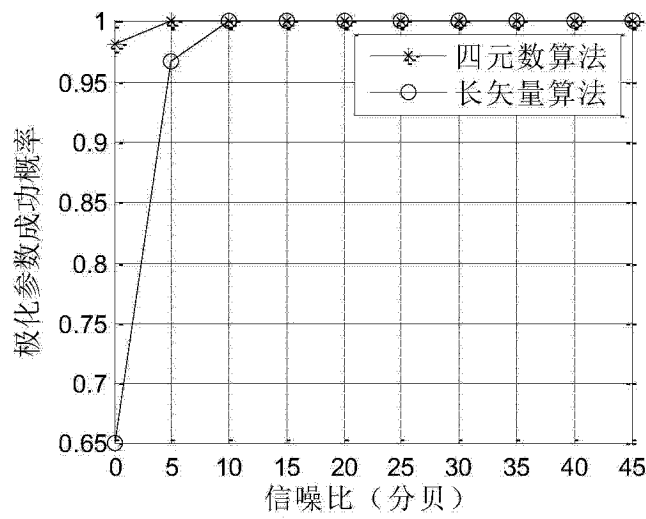


图 8

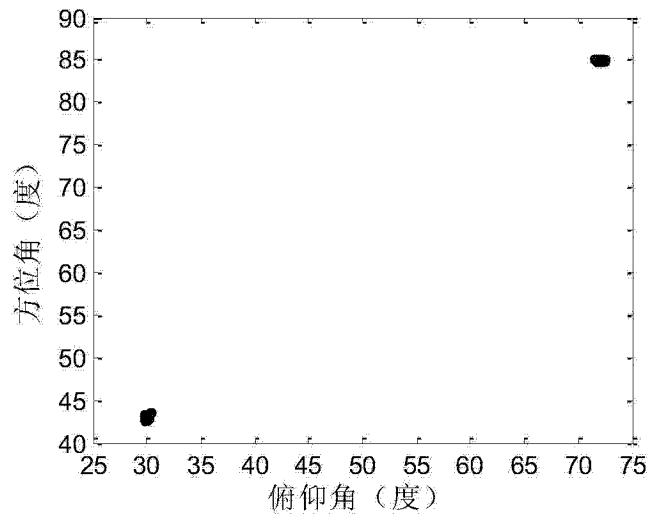


图 9

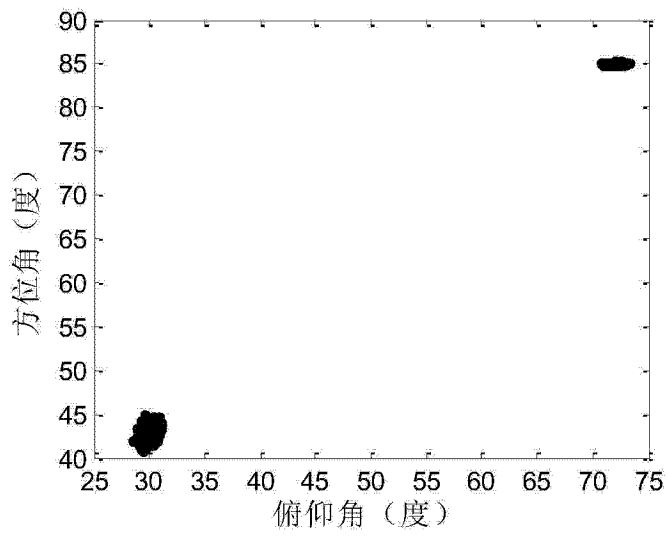


图 10

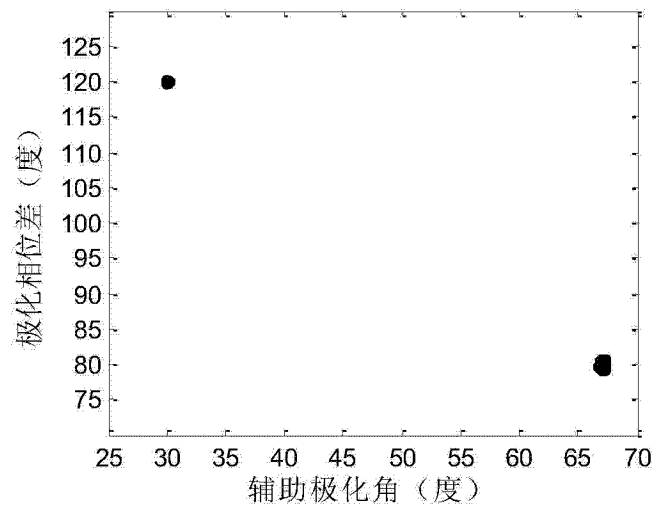


图 11

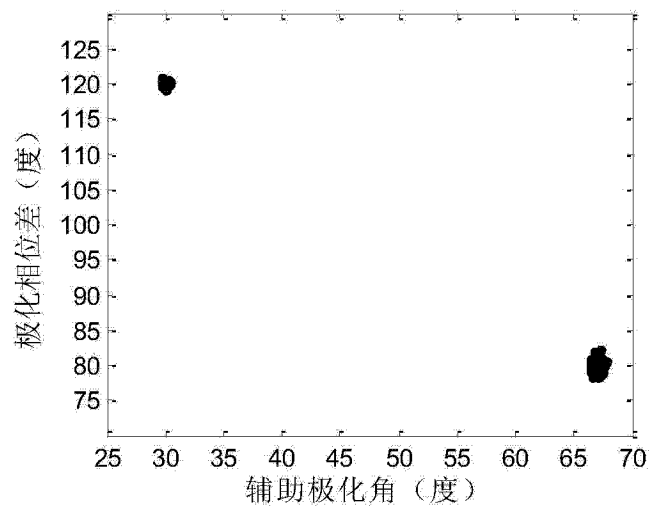


图 12