



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107015191 B
(45)授权公告日 2019.09.27

(21)申请号 201710351027.9

(22)申请日 2017.05.18

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 107015191 A

(43)申请公布日 2017.08.04

(73)专利权人 哈尔滨工程大学
地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区南
通大街145号哈尔滨工程大学科技处
知识产权办公室

(72)发明人 司伟建 彭占立 曲志昱 曾富红
张春杰 侯长波 张朝柱 乔玉龙

(51)Int.Cl.
G01S 3/14(2006.01)

审查员 喻新

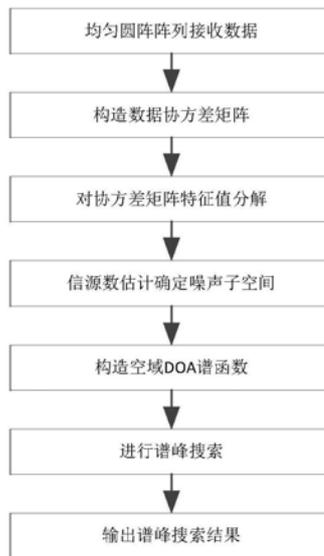
权利要求书1页 说明书5页 附图3页

(54)发明名称

一种在多径干扰环境下单偶极子极化敏感
阵列降维DOA估计方法

(57)摘要

本发明提供一种在多径干扰环境下单偶极子极化敏感阵列降维DOA估计方法,该阵列采用与圆周边缘共行的单偶极子组成均匀圆阵结构,可同时执行方位角和仰角的二维估计,并有效对抗多径干扰首先对均匀圆阵共行阵列接收的窄带信号进行数学建模,之后根据矩阵秩亏损原理,对极化MUSIC算法四维谱函数进行降维处理,构造空域谱函数,从而实现空域二维角度的快速搜索。同极化敏感阵列DOA与极化参数联合估计方法,本发明所述降维DOA估计方法能够在不增加硬件需求的条件下对信号源角度的快速估计,接收并利用信号源与干扰源的极化特性有效分辨目标和干扰,实现在复杂环境下对目标的估计,具有一定的工程应用价值。



1. 一种在多径干扰环境下单偶极子极化敏感阵列降维DOA估计方法,其特征在于:包括由M个单偶极子阵元组成的均匀圆阵极化敏感阵列和D个远场入射窄带信号,单偶极子天线与天线圆盘边缘共行,步骤如下:

步骤一:利用单偶极子阵元组成的均匀圆阵极化敏感阵列接收空间中的远场入射窄带信号,获得接收数据矢量 $X(t)$:

$$X(t) = AS(t) + N(t)$$

其中: $X(t)$ 为均匀圆阵极化敏感阵列的 $M \times 1$ 数据矢量, $S(t)$ 为空间信号的 $D \times 1$ 维矢量, $N(t)$ 为阵列的 $M \times 1$ 维噪声数据矢量, $A = (\mathbf{a}_{\theta_1, \varphi_1, \gamma_1, \eta_1}, \mathbf{a}_{\theta_2, \varphi_2, \gamma_2, \eta_2}, \dots, \mathbf{a}_{\theta_m, \varphi_m, \gamma_m, \eta_m}, \dots, \mathbf{a}_{\theta_D, \varphi_D, \gamma_D, \eta_D})$ 为空间阵列的 $M \times D$ 维阵列流型矩阵,其中 $\mathbf{a}_{\theta_m, \varphi_m, \gamma_m, \eta_m}$ 为第m个信号的导向矢量,

第m个信号的导向矢量可分解为:

$$\mathbf{a}_{\theta_m, \varphi_m, \gamma_m, \eta_m} = \mathbf{r}_{\theta_m, \varphi_m} \mathbf{B} \boldsymbol{\phi}_{\theta_m, \varphi_m} \mathbf{h}_{\gamma_m, \eta_m}$$

其中: $\mathbf{r}_{\theta_m, \varphi_m} = \text{diag}\{u_1, u_2, \dots, u_n, \dots, u_M\}$ 为第m个入射信号在阵列各阵元处的空域相位因子构成的对角阵,其为远场入射窄带信号波达方向角 (θ_m, φ_m) 的函数, u_n 为第m个信号于第n个阵元处的空域相位因子, B 是由各阵元的极化敏感矢量构成的极化敏感矩阵,

$\boldsymbol{\phi}_{\theta_m, \varphi_m} = \begin{bmatrix} -\sin \theta_m & \sin \varphi_m \cos \theta_m \\ \cos \theta_m & \sin \varphi_m \sin \theta_m \end{bmatrix}$ 为第m个信号的角度域矢量; $\mathbf{h}_{\gamma_m, \eta_m} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_m \\ \sin \gamma_m e^{j\eta_m} \end{bmatrix}$ 为第m个信

号的极化矢量;

步骤二:根据接收数据矢量 $X(t)$ 计算协方差矩阵 $R_x = E\{XX^H\}$, $E\{\cdot\}$ 表示求期望;

实际接收中利用阵列输出矢量 $x(t)$ 的K次独立快拍最大似然估计计算协方差矩阵为:

$$\hat{R}_{xx} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{x}(t_k) \mathbf{x}^H(t_k);$$

步骤三:对 \hat{R}_{xx} 进行特征值分解得到:

$$\hat{R}_{xx} = \mathbf{U}_S \boldsymbol{\Sigma}_S \mathbf{U}_S^H + \mathbf{U}_N \boldsymbol{\Sigma}_N \mathbf{U}_N^H$$

其中: $\boldsymbol{\Sigma}_S$ 为信号子空间对应的特征值矩阵, $\boldsymbol{\Sigma}_N$ 为噪声子空间对应的特征值矩阵, \mathbf{U}_S 是 $M \times D$ 维信号子空间, \mathbf{U}_N 是 $M \times (M-D)$ 维的噪声子空间;

步骤四:构造二维DOA的谱函数 $f(\theta, \varphi) = \det^{-1}\{\hat{H}(\theta, \varphi)\}$;其中 $\hat{H}(\theta, \varphi) = \mathbf{D}_{\theta, \varphi}^H \mathbf{U}_N \mathbf{U}_N^H \mathbf{D}_{\theta, \varphi}$;

$\mathbf{D}_{\theta_m, \varphi_m} = \mathbf{r}_{\theta_m, \varphi_m} \mathbf{B} \boldsymbol{\phi}_{\theta_m, \varphi_m}$, θ 和 φ 分别为待估计的方位角和仰角参数;

步骤五:改变谱函数中 θ 和 φ 的取值,对构造的谱函数进行谱峰搜索,找出D个极大值点对应的DOA取值。

一种在多径干扰环境下单偶极子极化敏感阵列降维DOA估计方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种在多径干扰环境下单偶极子极化敏感阵列降维DOA估计方法,属于高分辨阵列测向算法研究领域。

背景技术

[0002] 面向复杂电磁环境下实战背景,充分挖掘和利用蕴含在雷达天线和电磁波中的极化信息,最大限度的利用雷达系统所获得的电磁信息,提高被动雷达系统在恶劣电磁环境下的生存和对抗能力,使之能够适应复杂多变的战场环境。基于单偶极子天线构成的极化敏感阵列降维DOA估计是阵列信号处理的一个重要研究方向,其能够根据极化敏感阵列接收到的电磁波估计信号源的DOA和极化信息。与标量阵相比,极化敏感阵列对入射电磁波的极化信息敏感,能够同时获取和利用入射电磁波信号的空域信息与极化域信息,该阵列以矢量的形式对入射电磁波进行观测,获得的信息更为详细,可以有效提高测向系统的测向精度和分辨性能,具有较强的抗干扰能力。同时与传统的极化敏感阵列DOA与极化参数联合估计方法相比,该方法实现在二维空间估计信号的角度信息,速度较快,在实际环境中的具有很重要的应用意义。

[0003] 在实际电磁环境中,存在各种形式的干扰,特别是当存在一个与信号源同频的干扰源时,使用传统标量阵列算法不能对信号源角度信息进行有效估计,使用极化敏感阵列DOA与极化参数联合估计方法由于耗时较大而难以推广。因此根据干扰源与目标的电磁信号极化信息的不同,使用基于单偶极子的极化敏感阵列同时接收电磁波的角度域信息和极化域信息,可以有效分辨出目标和干扰,在二维空间快速对目标DOA进行估计。同时使用由单偶极子天线构成的均匀圆阵可以对入射信号的二维DOA信息进行估计,并且具有与方位角无关的波束宽度,是实际工程中应用常见的典型阵列之一。基于以上问题,本发明提出一种适用于多径干扰条件下基于单偶极子天线构成的极化敏感阵列降维DOA估计方法。实现在干扰条件下对目标和干扰源的有效分辨,并正确估计目标DOA参数。

发明内容

[0004] 本发明针对现有标量阵列信号处理算法不能有效分辨目标与干扰,以及基于极化敏感阵列DOA与极化参数联合估计方法耗时较大问题,提出一种在多径干扰环境下单偶极子极化敏感阵列降维DOA估计方法。在实际环境中,通过利用极化敏感阵列同时接收信号源和干扰的电磁波极化信息,可以轻易分辨出信号源和干扰。首先,利用单偶极子组成的极化敏感阵列接收信号并计算其协方差矩阵;其次,根据协方差矩阵特征值分解得到的特征值和特征向量进行信源数估计;最后,利用矩阵秩亏损原理构造空间谱函数,获取谱峰对应的角度值。

[0005] 本发明的目的是这样实现的:包括由M个单偶极子阵元组成的均匀圆阵极化敏感阵列和D个远场入射窄带信号,单偶极子天线与天线圆盘边缘共行,步骤如下:

[0006] 步骤一:利用单偶极子阵元组成的均匀圆阵极化敏感阵列接收空间中的远场入射窄带信号,获得接收数据矢量 $X(t)$:

$$[0007] \quad X(t) = AS(t) + N(t)$$

[0008] 其中: $X(t)$ 为均匀圆阵极化敏感阵列的 $M \times 1$ 数据矢量, $S(t)$ 为空间信号的 $D \times 1$ 维矢量, $N(t)$ 为阵列的 $M \times 1$ 维噪声数据矢量, $A = \left(\mathbf{a}_{\theta_1, \varphi_1, \gamma_1, \eta_1}, \mathbf{a}_{\theta_2, \varphi_2, \gamma_2, \eta_2}, \dots, \mathbf{a}_{\theta_m, \varphi_m, \gamma_m, \eta_m}, \dots, \mathbf{a}_{\theta_D, \varphi_D, \gamma_D, \eta_D} \right)$

为空间阵列的 $M \times D$ 维阵列流型矩阵,其中 $\mathbf{a}_{\theta_m, \varphi_m, \gamma_m, \eta_m}$ 为第 m 个信号的导向矢量,

[0009] 第 m 个信号的导向矢量可分解为:

$$[0010] \quad \mathbf{a}_{\theta_m, \varphi_m, \gamma_m, \eta_m} = \mathbf{r}_{\theta_m, \varphi_m} \mathbf{B} \boldsymbol{\phi}_{\theta_m, \varphi_m} \mathbf{h}_{\gamma_m, \eta_m}$$

[0011] 其中: $\mathbf{r}_{\theta_m, \varphi_m} = \text{diag}\{u_1, u_2, \dots, u_n, \dots, u_M\}$ 为第 m 个入射信号在阵列各阵元处的空域相位因子构成的对角阵,其为远场入射窄带信号波达方向角 (θ_m, φ_m) 的函数, u_n 为第 m 个信号于第 n 个阵元处的空域相位因子, \mathbf{B} 是由各阵元的极化敏感矢量构成的极化敏感矩阵,

$$\boldsymbol{\phi}_{\theta_m, \varphi_m} = \begin{bmatrix} -\sin \theta_m & \sin \varphi_m \cos \theta_m \\ \cos \theta_m & \sin \varphi_m \sin \theta_m \end{bmatrix} \text{为第} m \text{个信号的角度域矢量; } \mathbf{h}_{\gamma_m, \eta_m} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_m \\ \sin \gamma_m e^{j\eta_m} \end{bmatrix} \text{为第} m \text{个信号}$$

的极化矢量;

[0012] 步骤二:根据接收数据矢量 $X(t)$ 计算协方差矩阵 $R_X = E\{XX^H\}$, $E\{\cdot\}$ 表示求期望;

[0013] 实际接收中利用阵列输出矢量 $x(t)$ 的 K 次独立快拍最大似然估计计算协方差矩阵

$$\text{为: } \hat{R}_{xx} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{x}(t_k) \mathbf{x}^H(t_k);$$

[0014] 步骤三:对 \hat{R}_{xx} 进行特征值分解得到:

$$[0015] \quad \hat{R}_{xx} = \mathbf{U}_S \boldsymbol{\Sigma}_S \mathbf{U}_S^H + \mathbf{U}_N \boldsymbol{\Sigma}_N \mathbf{U}_N^H$$

[0016] 其中: $\boldsymbol{\Sigma}_S$ 为信号子空间对应的特征值矩阵, $\boldsymbol{\Sigma}_N$ 为噪声子空间对应的特征值矩阵, \mathbf{U}_S 是 $M \times D$ 维信号子空间, \mathbf{U}_N 是 $M \times (M-D)$ 维的噪声子空间;

[0017] 步骤四:构造二维DOA的谱函数 $f(\theta, \varphi) = \det^{-1}\{\hat{H}(\theta, \varphi)\}$;其中 $\hat{H}(\theta, \varphi) = \mathbf{D}_{\theta, \varphi}^H \mathbf{U}_N \mathbf{U}_N^H \mathbf{D}_{\theta, \varphi}$;

$$\mathbf{D}_{\theta_m, \varphi_m} = \mathbf{r}_{\theta_m, \varphi_m} \mathbf{B} \boldsymbol{\phi}_{\theta_m, \varphi_m};$$

[0018] 步骤五:改变谱函数中 θ 和 φ 的取值,对构造的谱函数进行谱峰搜索,找出 D 个极大值点对应的DOA取值。

[0019] 与现有技术相比,本发明的有益效果是:本发明所述的采用单偶极子天线构造极化敏感阵列进行降维DOA估计的方法,通过采用单偶极子天线接收空间的电磁波信号,构造接收信号数据矢量,并根据摆放的均匀圆阵阵列进行数学建模,构造阵列导向矢量,并在传统信号DOA与极化参数联合估计MUSIC算法的基础上,根据矩阵秩亏损原理合理推导并构造新的只包含信号DOA的二维谱函数。所述基于单偶极子极化敏感阵列降维DOA估计方法,采用单偶极子天线敏感接收电磁波信号,与传统标量MUSIC算法相比,充分接收并利用目标和干扰源的空间相位信息和极化信息,提高对干扰的分辨率。与DOA和极化参数联合估计MSUIC算法相比,本算法根据矩阵秩亏损原理,构造仅包含DOA的谱函数,进行谱峰搜索,提取出感兴趣的目标角度信息,算法执行速度较快,实现成本低,测向精度高,对干扰源分辨

率高。

[0020] 本发明的优点如下：

[0021] (1) 首次提出在多径干扰环境下利用单偶极子的均匀圆阵极化敏感阵列，推导基于该阵列形式的降维DOA估计算法，降低算法计算量；

[0022] (2) 首次提出利用单偶极子极化敏感阵列降维DOA估计算法抗多径干扰，根据目标和干扰信号共存条件建立数学模型，利用该方法构造谱函数，从而分辨目标和干扰源。

附图说明

[0023] 图1是利用所述单偶极子极化敏感阵列降维DOA估计方法流程图；

[0024] 图2是单偶极子极化敏感阵列结构图；

[0025] 图3为降维DOA估计空间谱图，图中谱峰分别对应为信号源和干扰源的方位角和仰角角度；

[0026] 图4为降维DOA估计等高线图。

具体实施方式

[0027] 下面结合附图与具体实施方式对本发明作进一步详细描述。

[0028] 本发明通过对DOA与极化信息联合估计的四维谱函数进行降维处理，构造出只包含信号空间域角度信息的二维谱函数，可有效分辨目标和干扰并提高算法的执行速度。

[0029] 同时，本发明还公开了一种利用所述单偶极子极化敏感阵列进行降维DOA估计方法的方法，本发明包括一种由M个单偶极子天线构成的极化敏感阵列，其中单偶极子天线与天线圆盘边缘共行；所述的均匀圆阵阵列，天线盘位于xoy平面内，且天线盘所在平面与z轴垂直，天线与x轴正方向的夹角分别为 $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_M$ ，极化敏感矩阵为 $B = [g_1, g_2, g_3, g_4, g_5, g_6, g_7, g_8]^T$ ，其中 $g_i = [\cos(\zeta_i), \sin(\zeta_i), 0, 0, 0, 0]$ ， $i = 1, \dots, M$ 。

[0030] 具体步骤如下：

[0031] 步骤(1)：根据单偶极子极化敏感阵列摆放形式构造信号模型。

[0032] 设由M个单偶极子阵元组成的均匀圆阵极化敏感阵列和D个远场入射窄带信号，信号入射方向与xoy面的夹角为仰角 φ ，信号入射方向在xoy投影与x轴正方向夹角为方位角 θ 。入射信号互不相关，并与噪声统计独立，则阵列输出M维信号矢量可表示为 $X(t) = AS(t) + N(t)$ ；

[0033] 式中， $X(t)$ 为阵列的 $M \times 1$ 维快拍数据矢量， $S(t)$ 为空间信号的 $D \times 1$ 维矢量， $N(t)$ 为阵列的 $M \times 1$ 维噪声数据矢量， $A = (\mathbf{a}_{\theta_1, \varphi_1, \gamma_1, \eta_1}, \mathbf{a}_{\theta_2, \varphi_2, \gamma_2, \eta_2}, \dots, \mathbf{a}_{\theta_D, \varphi_D, \gamma_D, \eta_D})$ 为空间阵列的 $M \times D$ 维阵列流型矩阵，其中 $\mathbf{a}_{\theta_m, \varphi_m, \gamma_m, \eta_m}$ 为第m个信号的导向矢量。将导向矢量分解可得 $\mathbf{a}_{\theta_m, \varphi_m, \gamma_m, \eta_m} = \mathbf{r}_{\theta_m, \varphi_m} \mathbf{B} \boldsymbol{\phi}_{\theta_m, \varphi_m} \mathbf{h}_{\gamma_m, \eta_m}$ ，其中 $\mathbf{r}_{\theta_m, \varphi_m} = \text{diag}\{u_1, u_2, \dots, u_n, \dots, u_M\}$ 为第m个入射信号在阵列各阵元处的空域相位因子构成的对角阵，其为入射信号波达方向角 (θ_m, φ_m) 的函数， $u_n = e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} [x_n \cos(\varphi_m) \cos(\theta_m) + y_n \cos(\varphi_m) \sin(\theta_m)]}$ 为第m个信号于第n个阵元处的空域相位因子， x_n 和 y_n 为第n个阵元的坐标。B称为极化敏感矩阵，由各阵元的极化敏感矢量构成，当天线阵列的阵元摆

放位置确定时,该阵列为一个常数矩阵。 $\phi_{\theta_m, \varphi_m} = \begin{bmatrix} -\sin \theta_m & \sin \varphi_m \cos \theta_m \\ \cos \theta_m & \sin \varphi_m \sin \theta_m \end{bmatrix}$ 为第m个信号的角度

域矢量; $h_{\gamma_m, \eta_m} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_m \\ \sin \gamma_m e^{j\eta_m} \end{bmatrix}$ 为第m个信号的极化矢量,它与信号的极化状态有关,但与阵列

响应特性及空间结构无关。因此导向矢量可表示成 $a_{\theta_m, \varphi_m, \gamma_m, \eta_m} = D_{\theta_m, \varphi_m} h_{\gamma_m, \eta_m}$,其中 $D_{\theta_m, \varphi_m} = r_{\theta_m, \varphi_m} B \phi_{\theta_m, \varphi_m}$ 。至此,完整构造出信号的导向矢量,用于后续构造降维空域谱函数。

[0034] 步骤(2):根据接收数据矢量 $X(t)$ 计算协方差矩阵 $R_X = E\{XX^H\}$, $E\{\cdot\}$ 表示求期望;实际接收中利用阵列输出矢量 $x(t)$ 的K次独立快拍最大似然估计计算协方差矩阵

$$\hat{R}_{xx} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K x(t_k) x^H(t_k)。$$

[0035] 步骤(3):对 \hat{R}_{xx} 进行特征分解可得 $\hat{R}_{xx} = U_S \Sigma_S U_S^H + U_N \Sigma_N U_N^H$ 。其中 Σ_S 为信号子空间对应的特征值矩阵, Σ_N 为噪声子空间对应的特征值矩阵, U_S 是 $M \times D$ 维信号子空间, U_N 是 $M \times (M-D)$ 维噪声子空间(其中D已知,或者已准确预估)。

[0036] 步骤(4):利用式 $f(\theta, \varphi) = \det^{-1}\{\hat{H}(\theta, \varphi)\}$ 构造二维DOA的谱函数。其中

$$\hat{H}(\theta, \varphi) = D_{\theta, \varphi}^H U_N U_N^H D_{\theta, \varphi}。$$

[0037] 步骤(5):改变谱函数中 θ 和 φ 的取值,对构造的谱函数进行谱峰搜索,找出D个极大值点对应的DOA取值。

[0038] 参照图1,是利用所述单偶极子极化敏感阵列降维DOA估计方法流程图;

[0039] 参照图2,是本发明中单偶极子极化敏感阵列空间布置结构图,单偶极子天线采用均匀圆阵布置方式,阵元与圆周边缘共行,阵元半径为r,阵元1到阵元M与X轴正方向的夹角分别为 $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_M$,与Z轴正方向夹角均为 90° 。则定义极化敏感矩阵为 $B = [g_1, g_2, g_3, g_4, g_5, g_6, g_7, g_8]^T$,其中 $g_i = [\cos(\zeta_i), \sin(\zeta_i), 0, 0, 0, 0]$, $i = 1, \dots, M$ 。

[0040] 参照图3和图4,是本发明中所述方法的估计谱图。其中图3为降维DOA估计空间谱图,谱峰分别对应为信号源和干扰源的方位角和仰角角度;图4为降维DOA估计等高线图。

[0041] 上述为本发明特举之实施例,并非用以限定本发明。本发明提供的在多径干扰环境下单偶极子天线构成极化敏感阵列降维DOA估计方法同样适用于阵元天线为其他天线的情况。在不脱离本发明的实质和范围内,可做些许的调整和优化,以本发明的保护范围以权利要求为准。

[0042] 综上,本发明公开了一种在多径干扰环境下单偶极子极化敏感阵列及其对应的降维DOA估计方法。该阵列采用与圆周边缘共行的单偶极子组成均匀圆阵结构,可同时执行方位角和仰角的二维估计,并有效对抗多径干扰。该发明所述的单偶极子极化敏感阵列降维DOA估计方法首先对均匀圆阵共行阵列接收的窄带信号进行数学建模,之后根据矩阵秩亏损原理,对极化MUSIC算法四维谱函数进行降维处理,构造空域谱函数,从而实现空域二维角度的快速搜索。同极化敏感阵列DOA与极化参数联合估计方法,本发明所述降维DOA估计方法能够实现在不增加硬件需求的条件下对信号源角度的快速估计,接收并利用信号源与干扰源的极化特性有效分辨目标和干扰,实现在复杂环境下对目标的估计,具有一定的工

程应用价值。

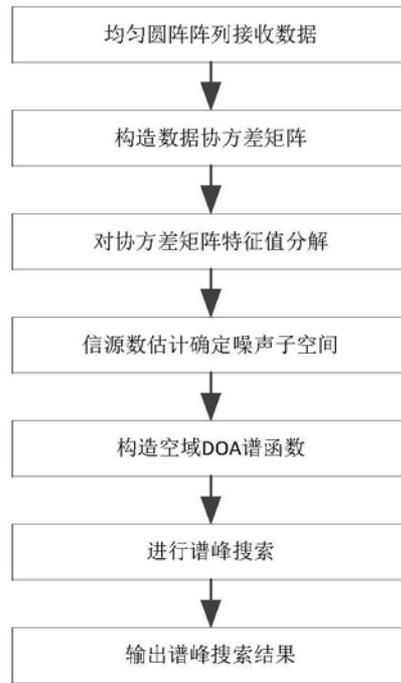


图1

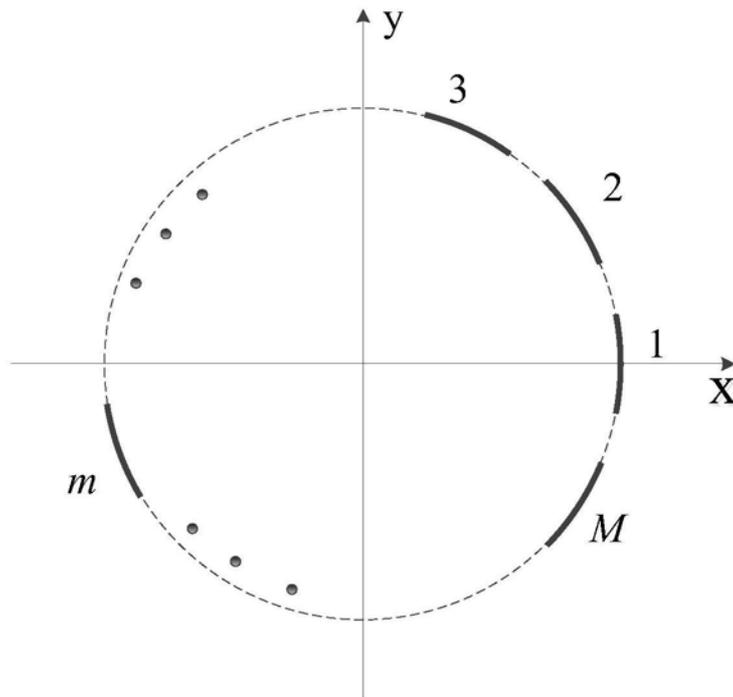


图2

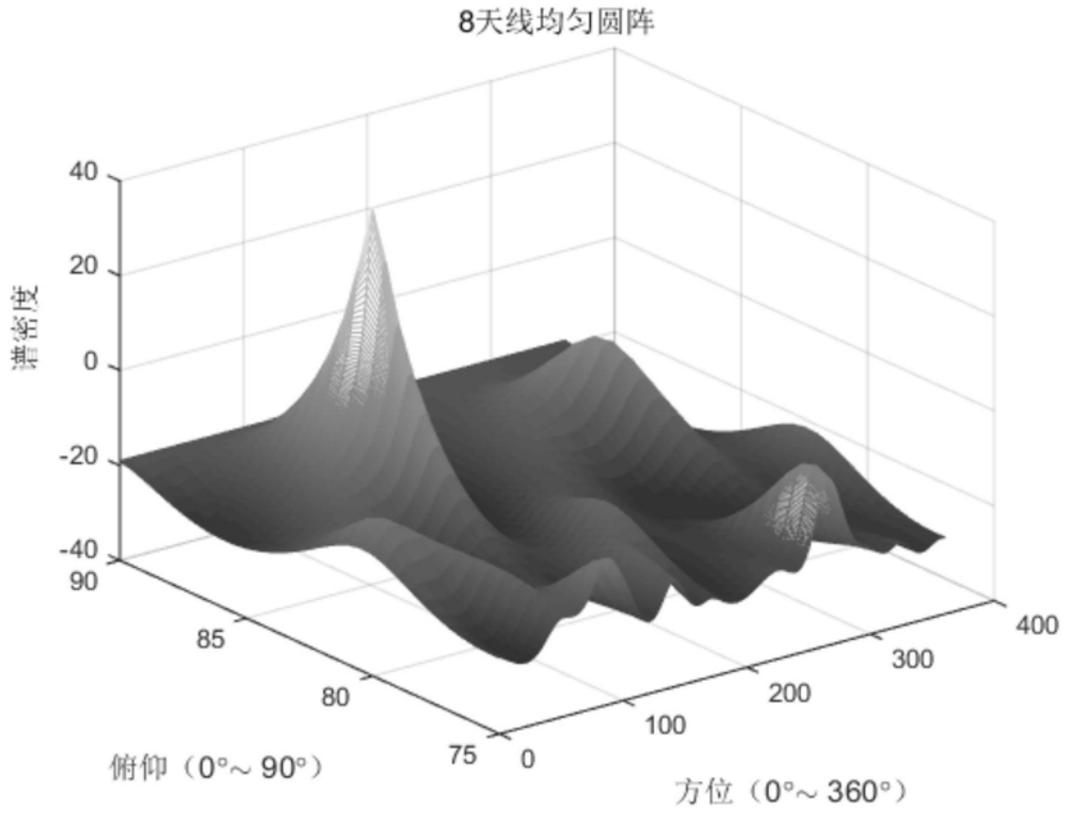


图3

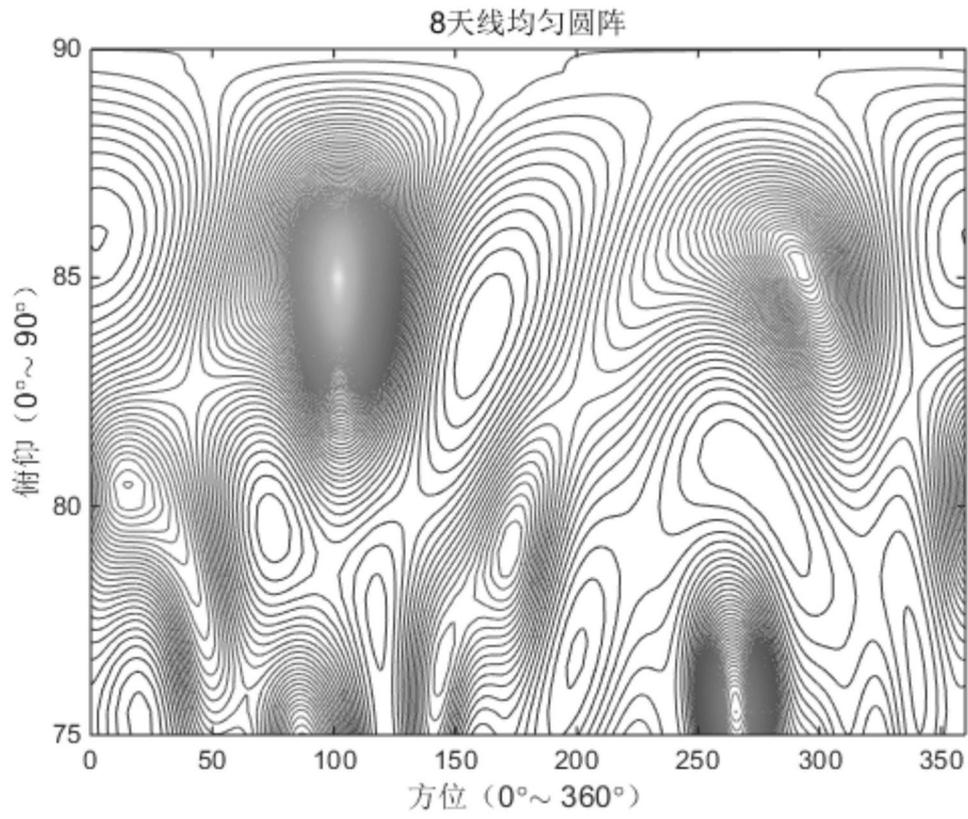


图4