



# (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 109358312 B

(45) 授权公告日 2023. 05. 26

(21) 申请号 201811348931.5

审查员 裴治棋

(22) 申请日 2018.11.13

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 109358312 A

(43) 申请公布日 2019.02.19

(73) 专利权人 内蒙古科技大学

地址 014010 内蒙古自治区包头市昆都仑区阿尔丁大街7号

(72) 发明人 杜永兴 李晨璐 秦岭 李宝山

(74) 专利代理机构 北京酷爱智慧知识产权代理有限公司 11514

专利代理师 占丽君

(51) Int. Cl.

G01S 3/14 (2006.01)

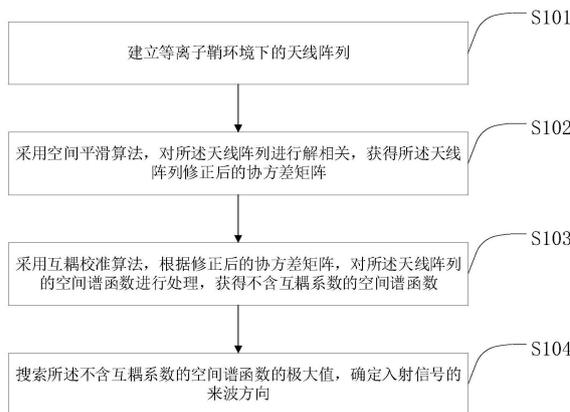
权利要求书2页 说明书9页 附图6页

## (54) 发明名称

确定入射信号来波方向的方法、装置、介质及设备

## (57) 摘要

本发明提供了一种确定入射信号来波方向的方法,基于等离子鞘环境,包括:建立等离子鞘环境下的天线阵列;采用空间平滑算法,对所述天线阵列进行解相关,获得所述天线阵列修正后的协方差矩阵;采用互耦校准算法,根据修正后的协方差矩阵,对所述天线阵列的空间谱函数进行处理,获得不含互耦系数的空间谱函数;搜索所述不含互耦系数的空间谱函数的极大值,确定入射信号的来波方向。通过结合空间平滑算法和互耦校准算法,能够得到不含互耦系数的空间谱函数,再通过不含互耦系数的空间谱函数确定入射信号的来波方向,能够减弱多径效应与天线耦合这两种误差对入射信号来波方向确定的影响,进而能估算出更加准确的来波方向。



1. 一种确定入射信号来波方向的方法, 基于等离子鞘环境, 其特征在于, 包括:  
建立等离子鞘环境下的天线阵列;

采用空间平滑算法, 对所述天线阵列进行解相关, 获得所述天线阵列修正后的协方差矩阵;

采用互耦校准算法, 根据修正后的协方差矩阵, 对所述天线阵列的空间谱函数进行处理, 获得不含互耦系数的空间谱函数;

搜索所述不含互耦系数的空间谱函数的极大值, 确定入射信号的来波方向;

其中, 根据修正后的协方差矩阵, 对所述天线阵列的空间谱函数进行处理, 获得不含互耦系数的空间谱函数的步骤之前, 还包括:

采用子空间理论, 获得所述天线阵列的空间谱函数;

其中, 所述天线阵列包括阵列流形, 所述采用空间平滑算法, 对所述天线阵列进行解相关, 获得所述天线阵列修正后的协方差矩阵, 包括:

对所述阵列流形进行修正;

根据修正后的阵列流形, 获得入射信号的协方差矩阵;

采用空间平滑算法, 基于所述协方差矩阵, 获得前后向平滑协方差矩阵;

根据所述前后向平滑协方差矩阵, 修正所述协方差矩阵, 获得所述天线阵列修正后的协方差矩阵;

其中, 所述采用互耦校准算法, 根据修正后的协方差矩阵, 对所述天线阵列的空间谱函数进行处理, 获得不含互耦系数的空间谱函数, 包括:

根据互耦矩阵的Toeplitz性质, 获得新互耦矩阵;

根据所述新互耦矩阵, 获得新阵列流形;

根据所述修正后的协方差矩阵和所述新阵列流形, 获得不含互耦系数的空间谱函数。

2. 根据权利要求1所述的方法, 其特征在于, 所述对所述阵列流形进行修正, 包括:  
阵列流形中的每个方向矢量可以修正为:

$$\tilde{a}(\theta) = Ca(\theta)$$

其中, C是均匀线阵的互耦矩阵, 它是一个带状、对称Toeplitz矩阵;

$$C = \begin{bmatrix} 1 & c_1 & \cdots & c_{p-1} & \cdots & 0 \\ c_1 & 1 & c_1 & \cdots & \ddots & 0 \\ \vdots & c_1 & 1 & \ddots & \cdots & c_{p-1} \\ c_{p-1} & \cdots & \ddots & \ddots & c_1 & \vdots \\ 0 & \ddots & \cdots & c_1 & 1 & c_1 \\ 0 & \cdots & c_{p-1} & \cdots & c_1 & 1 \end{bmatrix}$$

设阵元间的间距为 $d = \lambda/2$ , 互耦自由度为 $p$ , 即两个阵元间间距大于 $d(p-1)$ 时, 互耦系数为0, 其中, 第一行互耦系数满足关系 $0 < |c_{p-1}| < \cdots < c_1 < c_0 = 1$ 。

3. 一种确定入射信号来波方向的装置, 基于等离子鞘环境, 其特征在于, 包括:

阵列建立模块, 用于建立等离子鞘环境下的天线阵列;

解相关模块, 用于采用空间平滑算法, 对所述天线阵列进行解相关, 获得所述天线阵列

修正后的协方差矩阵；

盲校准模块,用于采用互耦校准算法,根据修正后的协方差矩阵,对所述天线阵列的空间谱函数进行处理,获得不含互耦系数的空间谱函数；

方向确定模块,用于搜索所述不含互耦系数的空间谱函数的极大值,确定入射信号的来波方向；

其中,还包括:预获取模块,用于采用子空间理论,获得所述天线阵列的空间谱函数；

其中,所述天线阵列包括阵列流形,所述解相关模块具体用于:

对所述阵列流形进行修正；

根据修正后的阵列流形,获得入射信号的协方差矩阵；

采用空间平滑算法,基于所述协方差矩阵,获得前后向平滑协方差矩阵；

根据所述前后向平滑协方差矩阵,修正所述协方差矩阵,获得所述天线阵列修正后的协方差矩阵；

其中,所述盲校准模块具体用于:

根据互耦矩阵的Toeplitz性质,获得新互耦矩阵；

根据所述新互耦矩阵,获得新阵列流形；

根据所述修正后的协方差矩阵和所述新阵列流形,获得不含互耦系数的空间谱函数。

4. 根据权利要求3所述的装置,其特征在于,所述阵列建立模块,具体用于:

设等离子鞘环境下,M个天线阵元均匀排列,从远场 $\theta_k, k=1, 2, \dots, N$ 处入射N个窄带信源,波长为 $\lambda$ ,建立天线阵列,为:

$$X(t) = A(\theta)S(t) + N(t)$$

其中,A( $\theta$ )是指方向矢量的阵列流形,S(t)是指信号,N(t)是指噪声。

5. 一种计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,其特征在于,该程序被处理器执行时实现权利要求1-2之一所述的方法。

6. 一种确定入射信号来波方向的处理设备,基于等离子鞘环境,包括:存储器、处理器及存储在存储器上并可在处理器上运行的计算机程序,其特征在于,所述处理器执行所述程序时实现权利要求1-2之一所述的方法。

## 确定入射信号来波方向的方法、装置、介质及设备

### 技术领域

[0001] 本发明涉及卫星导航技术领域,具体涉及一种确定入射信号来波方向的方法、装置、介质及设备。

### 背景技术

[0002] 飞行器重返大气层至落地的过程称为再入过程。再入过程中,高超声速飞行器与大气相互作用,在飞行器前形成弓形脱体激波,激波后气体温度急剧升高呈现“高温效应”,空气分子发生离解、电离反应;同时,飞行器表面的耐热烧蚀材料在高温、高热流作用下烧蚀,将烧蚀产物释放到飞行器周围流场中,形成了成分多样的复杂的再入绕流流场。再入绕流流场是一团电离气体,当气体的电离度达到一定程度时,电离气体表现出等离子体所具有的集体行为而成为等离子体,此时再入绕流流场亦称为等离子体包覆流场、再入等离子体或等离子体鞘套。再入等离子体的形成,使得电磁波传播的功率衰减,且使电磁波产生反射、折射及散射。

[0003] 信号穿过等离子体鞘后在飞行器表面和等离子体鞘之间产生多次反射,从而引起多径效应。这里的多径效应是指GPS接收机除直接接收到卫星信号外,尚可能接收到经等离子体鞘发射后,经过不同的传播路径到达天线信号。从而形成的定位误差,多径效应会降低接收机的定位精度,并使处理时间加长,在WAAS(Wide Area Augmentation System)和DGPS(Difference Global Positioning System)系统中,多径效应误差将导致误差传递,严重降低系统中用户的定位精度。

[0004] 等离子鞘套的厚度和电子密度影响天线间的耦合特性,天线间的互耦影响着阵列天线的工作性能,因此,利用波束形成技术减弱等离子鞘的影响需考虑对耦合误差进行校正。在现有的等离子鞘模型中还没有可以校准阵列互耦的方法,如果能有效的校准等离子体鞘产生的多径效应和互耦影响,将为消除多径和耦合效应的影响起到重要的作用。

### 发明内容

[0005] 针对现有技术中的缺陷,本发明提供一种确定入射信号来波方向的方法、装置、介质及设备,能够减弱多径效应与天线耦合这两种误差对入射信号来波方向确定的影响,进而能估算出更加准确的来波方向。

[0006] 第一方面,本发明提供了一种确定入射信号来波方向的方法,基于等离子鞘环境,包括:

[0007] 建立等离子鞘环境下的天线阵列;

[0008] 采用空间平滑算法,对所述天线阵列进行解相关,获得所述天线阵列修正后的协方差矩阵;

[0009] 采用互耦校准算法,根据修正后的协方差矩阵,对所述天线阵列的空间谱函数进行处理,获得不含互耦系数的空间谱函数;

[0010] 搜索所述不含互耦系数的空间谱函数的极大值,确定入射信号的来波方向。

[0011] 可选的,所述建立等离子鞘环境下的天线阵列,包括:

[0012] 设等离子鞘环境下,M个天线阵元均匀排列,从远场 $\theta_k$  ( $k=1,2,\dots,N$ )处入射N个窄带信源(波长为 $\lambda$ ),建立天线阵列,为:

$$[0013] \quad X(t) = A(\theta)S(t) + N(t)$$

[0014] 其中,A( $\theta$ )是指方向矢量的阵列流形,S(t)是指信号,N(t)是指噪声。

[0015] 可选的,所述采用空间平滑算法,对所述天线阵列进行解相关,获得所述天线阵列修正后的协方差矩阵,包括:

[0016] 对所述阵列流形进行修正;

[0017] 根据修正后的阵列流形,获得入射信号的协方差矩阵;

[0018] 采用空间平滑算法,基于所述协方差矩阵,获得前后向平滑协方差矩阵;

[0019] 根据所述前后向平滑协方差矩阵,修正所述协方差矩阵,获得所述天线阵列修正后的协方差矩阵。

[0020] 可选的,在所述采用互耦校准算法,根据修正后的协方差矩阵,对所述天线阵列的空间谱函数进行处理,获得不含互耦系数的空间谱函数的步骤之前,还包括:

[0021] 采用子空间理论,获得所述天线阵列的空间谱函数。

[0022] 可选的,所述对所述阵列流形进行修正,包括:

[0023] 阵列流形中的每个方向矢量可以修正为:

$$[0024] \quad \tilde{a}(\theta) = Ca(\theta)$$

[0025] 其中,C是均匀线阵的互耦矩阵,它是一个带状、对称Toeplitz矩阵;

$$[0026] \quad C = \begin{bmatrix} 1 & c_1 & \cdots & c_{p-1} & \cdots & 0 \\ c_1 & 1 & c_1 & \cdots & \ddots & 0 \\ \vdots & c_1 & 1 & \ddots & \cdots & c_{p-1} \\ c_{p-1} & \cdots & \ddots & \ddots & c_1 & \vdots \\ 0 & \ddots & \cdots & c_1 & 1 & c_1 \\ 0 & \cdots & c_{p-1} & \cdots & c_1 & 1 \end{bmatrix}$$

[0027] 设阵元间的间距为 $d = \lambda/2$ ,互耦自由度为p(即两个阵元间间距大于 $d(p-1)$ 时,互耦系数为0),其中,第一行互耦系数满足关系 $0 < |c_{p-1}| < \cdots < c_1 < c_0 = 1$ 。

[0028] 可选的,所述采用互耦校准算法,根据修正后的协方差矩阵,对所述天线阵列的空间谱函数进行处理,获得不含互耦系数的空间谱函数,包括:

[0029] 根据所述互耦矩阵的Toeplitz性质,获得新互耦矩阵;

[0030] 根据所述新互耦矩阵,获得新阵列流形;

[0031] 根据所述修正后的协方差矩阵和所述新阵列流形,获得不含互耦系数的空间谱函数。

[0032] 第二方面,本发明提供一种确定入射信号来波方向的装置,基于等离子鞘环境,包括:

[0033] 阵列建立模块,用于建立等离子鞘环境下的天线阵列;

[0034] 解相关模块,用于采用空间平滑算法,对所述天线阵列进行解相关,获得所述天线

阵列修正后的协方差矩阵；

[0035] 盲校准模块,用于采用互耦校准算法,根据修正后的协方差矩阵,对所述天线阵列的空间谱函数进行处理,获得不含互耦系数的空间谱函数；

[0036] 方向确定模块,用于搜索所述不含互耦系数的空间谱函数的极大值,确定入射信号的来波方向。

[0037] 可选的,所述阵列建立模块,具体用于：

[0038] 设等离子鞘环境下,M个天线阵元均匀排列,从远场 $\theta_k$  ( $k=1,2,\dots,N$ )处入射N个窄带信源(波长为 $\lambda$ ),建立天线阵列,为：

[0039]  $X(t) = A(\theta)S(t) + N(t)$

[0040] 其中,A( $\theta$ )是指方向矢量的阵列流形,S(t)是指信号,N(t)是指噪声。

[0041] 第三方面,本发明提供一种计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,该程序被处理器执行时实现上述一种确定入射信号来波方向的方法。

[0042] 第四方面,本发明提供一种确定入射信号来波方向的处理设备,基于等离子鞘环境,包括:存储器、处理器及存储在存储器上并可在处理器上运行的计算机程序,所述处理器执行所述程序时实现上述一种确定入射信号来波方向的方法。

[0043] 本发明通过结合空间平滑算法和互耦校准算法,能够得到不含互耦系数的空间谱函数,再通过不含互耦系数的空间谱函数确定入射信号的来波方向,能够减弱多径效应与天线耦合这两种误差对入射信号来波方向确定的影响,进而能估算出更加准确的来波方向。

## 附图说明

[0044] 为了更清楚地说明本发明具体实施方式或现有技术中的技术方案,下面将对具体实施方式或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍。在所有附图中,类似的元件或部分一般由类似的附图标记标识。附图中,各元件或部分并不一定按照实际的比例绘制。

[0045] 图1为本发明提供了一种确定入射信号来波方向的方法的流程图；

[0046] 图2为本发明提供的三种方法计算的空间谱曲线的对比图；

[0047] 图3为本发明提供的未校准的阵列天线三维方向图；

[0048] 图4为本发明提供的未校准的阵列天线二维方向图；

[0049] 图5为本发明提供的经过校准的阵列天线三维方向图；

[0050] 图6为本发明提供的经过校准的阵列天线二维方向图；

[0051] 图7为本发明提供了一种确定入射信号来波方向的装置的示意图。

## 具体实施方式

[0052] 下面将结合附图对本发明技术方案的实施例进行详细的描述。以下实施例仅用于更加清楚地说明本发明的技术方案,因此只是作为示例,而不能以此来限制本发明的保护范围。

[0053] 需要注意的是,除非另有说明,本申请使用的技术术语或者科学术语应当为本发明所属领域技术人员所理解的通常意义。

[0054] 本发明提供了一种确定入射信号来波方向的方法、装置、介质及设备。下面结合附

图对本发明的实施例进行说明。

[0055] 请参考图1,图1为本发明具体实施例提供的一种确定入射信号来波方向的方法的流程图,本实施例提供的一种确定入射信号来波方向的方法,基于等离子鞘环境,包括:

[0056] 步骤S101:建立等离子鞘环境下的天线阵列。

[0057] 步骤S102:采用空间平滑算法,对所述天线阵列进行解相关,获得所述天线阵列修正后的协方差矩阵。

[0058] 步骤S103:采用互耦校准算法,根据修正后的协方差矩阵,对所述天线阵列的空间谱函数进行处理,获得不含互耦系数的空间谱函数。

[0059] 步骤S104:搜索所述不含互耦系数的空间谱函数的极大值,确定入射信号的来波方向。

[0060] 通过结合空间平滑算法和互耦校准算法,能够得到不含互耦系数的空间谱函数,再通过不含互耦系数的空间谱函数确定入射信号的来波方向,能够减弱多径效应与天线耦合这两种误差对入射信号来波方向确定的影响,进而能估算出更加准确的来波方向。

[0061] 在本发明提供的一个具体实施例中,所述建立等离子鞘环境下的天线阵列,包括:设等离子鞘环境下,M个天线阵元均匀排列,从远场 $\theta_k$  ( $k=1,2,\dots,N$ )处入射N个窄带信源(波长为 $\lambda$ ),建立天线阵列,为:

$$[0062] \quad X(t) = A(\theta)S(t) + N(t) \quad (1)$$

[0063] 其中, $A(\theta)$ 是指方向矢量的阵列流形, $S(t)$ 是指信号, $N(t)$ 是指噪声。

[0064] 在建立天线阵列时,可以通过HFSS仿真出等离子鞘环境下的天线阵列。

[0065] 在本发明提供的一个具体实施例中,所述采用空间平滑算法,对所述天线阵列进行解相关,获得所述天线阵列修正后的协方差矩阵,包括:对所述阵列流形进行修正;根据修正后的阵列流形,获得入射信号的协方差矩阵;采用空间平滑算法,基于所述协方差矩阵,获得前后向平滑协方差矩阵;根据所述前后向平滑协方差矩阵,修正所述协方差矩阵,获得所述天线阵列修正后的协方差矩阵。

[0066] 对阵列流形的修正:

[0067] 当存在互耦误差时,阵列流形中的每个方向矢量可以修正为:

$$[0068] \quad \tilde{a}(\theta) = Ca(\theta) \quad (2)$$

[0069] 其中,C是均匀线阵的互耦矩阵,它是一个带状、对称Toeplitz矩阵。 $\tilde{a}(\theta)$ 表示修正后的方向矢量, $a(\theta)$ 表示修正前的方向矢量。

$$[0070] \quad C = \begin{bmatrix} 1 & c_1 & \cdots & c_{p-1} & \cdots & 0 \\ c_1 & 1 & c_1 & \cdots & \ddots & 0 \\ \vdots & c_1 & 1 & \ddots & \cdots & c_{p-1} \\ c_{p-1} & \cdots & \ddots & \ddots & c_1 & \vdots \\ 0 & \ddots & \cdots & c_1 & 1 & c_1 \\ 0 & \cdots & c_{p-1} & \cdots & c_1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

[0071] 设阵元间的间距为 $d=\lambda/2$ 。互耦自由度为p(即两个阵元间间距大于 $d(p-1)$ )时,互

耦系数为0)。其中,第一行互耦系数满足关系 $0 < |c_{p-1}| < \dots < c_1 < c_0 = 1$ 。

[0072] 根据修正后的阵列流形,获得入射信号的协方差矩阵:

[0073] 根据公式(2),可以得到阵列输出的协方差矩阵,具体为:

$$[0074] \quad R_{XX} = E[X(t)X(t)^H] = C A R_S A^H C^H + \sigma^2 I \quad (4)$$

[0075] 其中, $R_S$ 表示入射信号的协方差矩阵; $\sigma$ 表示噪声功率; $I$ 表示单位矩阵。

[0076] 采用空间平滑算法,基于所述协方差矩阵,获得前后向平滑协方差矩阵,具体过程为:

[0077] 将M元的等距天线矩阵用滑动方式分成L个子阵,每个子阵有K个单元,其中 $K = M - L + 1$ 。那么,第1个向前子阵的输出为:

$$[0078] \quad \begin{aligned} x_l^f(t) &= [x_l(t), x_{l+1}(t), \dots, x_{l+m-1}(t)]^T \\ &= A_M D^{l-1} s(t) + n_l(t) \end{aligned} \quad (5)$$

[0079] 其中, $D = \text{diag} (e^{j \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta_1}, e^{j \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta_2}, \dots, e^{j \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta_K})$ ,  $1 \leq l \leq L$

[0080]  $A_M$ 表示子阵的方向矢量阵列流形; $s(t)$ 表示子阵的输入信号; $n_l(t)$ 表示子阵的噪声。

[0081] 所以,第1个前向子阵的协方差矩阵为:

$$[0082] \quad \begin{aligned} R_l^f &= E[x_l^f(t)x_l^f(t)^H] \\ &= A_M D^{l-1} R_S (A_M D^{l-1})^H + \sigma^2 I \end{aligned} \quad (6)$$

[0083] 定义前向空间平滑协方差矩阵为:

$$[0084] \quad R_f = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L R_l^f \quad (7)$$

[0085] 同理,可得后向空间平滑协方差矩阵为:

$$[0086] \quad R_b = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L R_l^b \quad (8)$$

[0087] 因此,定义前后向平滑协方差矩阵为:

$$[0088] \quad R_{fb} = \frac{1}{2} (R_f + R_b) \quad (9)$$

[0089] 根据所述前后向平滑协方差矩阵,修正所述协方差矩阵,获得所述天线阵列修正后的协方差矩阵,具体过程为:

[0090] 通常, $R_{fb}$ 只是Hermite矩阵,并不是Toeplitz矩阵。利用Toeplitz性质,对 $R_{fb}$ 进行修正, $R_{fbX}$ 是 $R_{fb}$ 的无偏估计,因此,对公式(4)进行空间平滑后得:

$$[0091] \quad R_{fbX} = R_{fb} + I_V R_{fb}^* I_V \quad (10)$$

[0092] 其中,  $I_V = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 0 & \cdots & 1 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 1 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$  (11)

[0093] 在本发明提供的一个具体实施例中,在所述采用互耦校准算法,根据修正后的协方差矩阵,对所述天线阵列的空间谱函数进行处理,获得不含互耦系数的空间谱函数的步骤之前,还包括:采用子空间理论,获得所述天线阵列的空间谱函数。

[0094] 根据子空间理论:

[0095]  $\tilde{a}(\theta)^H U_N U_N^H \tilde{a}(\theta) = 0$  (12)

[0096] 得到阵列空间谱函数  $P_{MUSIC}(\theta)$  为

[0097] 
$$P_{MUSIC}(\theta) = 1 / \left\| \tilde{a}^H(\theta) U_N \right\|^2$$

$$= 1 / \left\| (Ca(\theta))^H U_N \right\|^2$$
 (13)

[0098] 其中,  $U_N$  为噪声子空间。

[0099] 对公式(13)中的角度进行变化,通过寻找波峰来确定入射信号的来波方向。

[0100] 在本发明提供的一个具体实施例中,所述采用互耦校准算法,根据修正后的协方差矩阵,对所述天线阵列的空间谱函数进行处理,获得不含互耦系数的空间谱函数,包括:根据所述互耦矩阵的Toeplitz性质,获得新互耦矩阵;根据所述新互耦矩阵,获得新阵列流形;根据所述修正后的协方差矩阵和所述新阵列流形,获得不含互耦系数的空间谱函数。

[0101] 根据所述互耦矩阵的Toeplitz性质,获得新互耦矩阵,具体过程为:

[0102] 由于C是一个对称Toeplitz矩阵,从构成互耦矩阵的每个互耦系数入手,将C表示为:

$$C = \sum_{q=0}^{p-1} c_q E_q$$

[0103]  $E_q(i, j) = \delta(C(i, j) - c_q)$  (14)

$$\delta(k) = \begin{cases} 1, k = 0 \\ 0, \text{其它} \end{cases}$$

[0104] 得到新互耦矩阵,其中,  $c_q$  为互耦系数,这时,阵列流形可以表示为新阵列流形,为:

[0105] 
$$\tilde{a}(\theta) = Ca(\theta) = \sum_{q=0}^{p-1} c_q E_q a(\theta) = \sum_{q=0}^{p-1} c_q W_q(\theta)$$
 (15)

$$= [W_1(\theta), W_2(\theta), \dots, W_p(\theta)]c = W(\theta)c$$

[0106] 其中,  $c = [c_0, c_1, c_2, \dots, c_{p-1}]^T$  是互耦系数矩阵,  $W(\theta)$  为  $M \times p$  维由导向矢量组成的

变换矩阵。

[0107] 根据所述修正后的协方差矩阵和所述新阵列流形,获得不含互耦系数的空间谱函数,具体过程为:

[0108] 对公式(10)进行特征值分解,得到噪声子空间 $U_N$ ,代入公式(13),得:

$$[0109] P_{\text{MUSIC}}(\theta) = 1/|| (Ca(\theta))^H U_N ||^2 \quad (16)$$

[0110] 将公式(15)代入公式(16),得:

$$[0111] P_{\text{MUSIC}}(\theta) = 1/|| (W(\theta)c)^H U_N ||^2$$

$$[0112] = 1/(c^H W(\theta)^H U_N U_N^H W(\theta)c)$$

$$[0113] = 1/(c^H \Phi(\theta)c) \quad (17)$$

[0114] 其中, $\Phi(\theta) = W(\theta)^H U_N U_N^H W(\theta)$ ,与互耦系数不相关。

[0115] 求 $P_{\text{MUSIC}}(\theta)$ 的极大值问题可以转化为线性约束下的二次规划问题。即

$$[0116] \min c^H \Phi(\theta)c$$

$$[0117] \text{s.t. } \varepsilon^T c = 1 \quad (18)$$

[0118] 其中, $c\varepsilon = 1, \varepsilon = [1, 0, \dots, 0]^T$ 。

[0119] 用拉格朗日求解法求得,

$$[0120] c = \frac{\Phi^{-1}(\theta)\varepsilon}{\varepsilon^T \Phi^{-1}(\theta)\varepsilon} \quad (19)$$

[0121] 代入空间谱函数公式(17)得,

$$[0122] P_{\text{MUSIC}}(\theta) = \varepsilon^T \Phi^{-1}(\theta)\varepsilon \quad (20)$$

[0123] 得到不含互耦系数的空间谱函数。利用构成的不含互耦系数的空间谱函数,搜索其极大值位置,确定入射信号的来波方向。

[0124] 在使用本发明时,可以使用MATLAB仿真本发明的方法,验证该方法的准确性。具体过程为:使用HFSS仿真等离子鞘环境下的阵列模型,阵元数 $M=8$ ,等离子体碰撞频率 $\nu=2.1e10\text{Hz}$ ,电子密度 $N_e=1.6e12\text{cm}^{-3}$ ,厚度 $\delta=0.2\text{cm}$ 。所加源为GPS信号中心频率 $1.57542\text{GHz}$ ,阵元间距为入射信号的半波长。在使用MATLAB仿真本发明时,互耦自由度选为3,互耦系数选取HFSS仿真的互耦参数为 $[1, -0.2232-0.3432i, -0.1143+0.1456i]^T$ 。噪声为零均值高斯白噪声,2个相干信号源,方位角分别为0和65,实验次数为100次,快拍数为200,信噪比为10dB。

[0125] 结果表明,阵列互耦存在时,常规的空间平滑算法无法得到正确的谱峰而失效,本发明方法能够准确地分辨出来波方向为0和65。如图2所示。

[0126] 通过本发明确定出阵列耦合的校准信息,即每个阵元需调节的幅度和相位。将校准信息加载到HFSS的阵列模型上,得到校准结果。

[0127] 经过耦合校准之后的阵列天线得到了明显的改善,如图3-6所示。

[0128] 本发明基于空间平滑的解相干处理技术,通过盲校准法校正阵列的耦合影响并估计出准确的波达方向。适合于卫星导航系统中消除等离子鞘产生的多径效应和耦合的影响,提高卫星的定位精度。

[0129] 以上,为本发明提供的一种确定入射信号来波方向的方法。

[0130] 基于与上述一种确定入射信号来波方向的方法相同的发明构思,与之相对应的,

本发明实施例还提供了一种确定入射信号来波方向的装置,如图2所示。由于装置实施例基本相似与方法实施例,所以描述得比较简单,相关之处参见方法实施例的部分说明即可。

[0131] 本发明提供了一种确定入射信号来波方向的装置,基于等离子鞘环境,包括:

[0132] 阵列建立模块101,用于建立等离子鞘环境下的天线阵列;

[0133] 解相关模块102,用于采用空间平滑算法,对所述天线阵列进行解相关,获得所述天线阵列修正后的协方差矩阵;

[0134] 盲校准模块103,用于采用互耦校准算法,根据修正后的协方差矩阵,对所述天线阵列的空间谱函数进行处理,获得不含互耦系数的空间谱函数;

[0135] 方向确定模块104,用于搜索所述不含互耦系数的空间谱函数的极大值,确定入射信号的来波方向。

[0136] 在本发明提供的一个具体实施例中,所述阵列建立模块101,具体用于:

[0137] 设等离子鞘环境下,M个天线阵元均匀排列,从远场 $\theta_k$  ( $k=1,2,\dots,N$ )处入射N个窄带信源(波长为 $\lambda$ ),建立天线阵列,为:

[0138]  $X(t) = A(\theta)S(t) + N(t)$

[0139] 其中,A( $\theta$ )是指方向矢量的阵列流形,S( $t$ )是指信号,N( $t$ )是指噪声。

[0140] 在本发明提供的一个具体实施例中,所述解相关模块102,包括:

[0141] 阵列流形修正单元,用于对所述阵列流形进行修正;

[0142] 协方差矩阵获得单元,用于根据修正后的阵列流形,获得入射信号的协方差矩阵;

[0143] 平滑计算单元,用于采用空间平滑算法,基于所述协方差矩阵,获得前后向平滑协方差矩阵;

[0144] 修正矩阵单元,用于根据所述前后向平滑协方差矩阵,修正所述协方差矩阵,获得所述天线阵列修正后的协方差矩阵。

[0145] 在本发明提供的一个具体实施例中,所述装置,还包括:

[0146] 谱函数计算模块,用于采用子空间理论,获得所述天线阵列的空间谱函数。

[0147] 在本发明提供的一个具体实施例中,所述阵列流形修正单元,具体用于:

[0148] 阵列流形中的每个方向矢量可以修正为:

[0149]  $\tilde{a}(\theta) = Ca(\theta)$

[0150] 其中,C是均匀线阵的互耦矩阵,它是一个带状、对称Toeplitz矩阵;

$$[0151] \quad C = \begin{bmatrix} 1 & c_1 & \cdots & c_{p-1} & \cdots & 0 \\ c_1 & 1 & c_1 & \cdots & \ddots & 0 \\ \vdots & c_1 & 1 & \ddots & \cdots & c_{p-1} \\ c_{p-1} & \cdots & \ddots & \ddots & c_1 & \vdots \\ 0 & \ddots & \cdots & c_1 & 1 & c_1 \\ 0 & \cdots & c_{p-1} & \cdots & c_1 & 1 \end{bmatrix}$$

[0152] 设阵元间的间距为 $d = \lambda/2$ ,互耦自由度为 $p$ (即两个阵元间间距大于 $d(p-1)$ 时,互耦系数为0),其中,第一行互耦系数满足关系 $0 < |c_{p-1}| < \cdots < c_1 < c_0 = 1$ 。

[0153] 在本发明提供的一个具体实施例中,所述盲校准模块103,包括:

[0154] 性质分析单元,用于根据所述互耦矩阵的Toeplitz性质,获得新互耦矩阵;

[0155] 新阵列流形获得单元,用于根据所述新互耦矩阵,获得新阵列流形;

[0156] 谱函数计算单元,用于根据所述修正后的协方差矩阵和所述新阵列流形,获得不含互耦系数的空间谱函数。

[0157] 以上,为本发明提供的一种确定入射信号来波方向的装置。

[0158] 基于与上述一种确定入射信号来波方向的方法相同的发明构思,与之相对应的,本发明实施例还提供了一种计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,该程序被处理器执行时实现上述一种确定入射信号来波方向的方法。

[0159] 由上述技术方案可知,本实施例提供的一种计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,该程序被处理器执行时,能够通过结合空间平滑算法和互耦校准算法,得到不含互耦系数的空间谱函数,再通过不含互耦系数的空间谱函数确定入射信号的来波方向,减弱多径效应与天线耦合这两种误差对入射信号来波方向确定的影响,进而能估算出更加准确的来波方向。

[0160] 基于与上述一种确定入射信号来波方向的方法相同的发明构思,与之相对应的,本发明实施例还提供了一种确定入射信号来波方向的处理设备,包括:存储器、处理器及存储在存储器上并可在处理器上运行的计算机程序,所述处理器执行所述程序时实现上述一种确定入射信号来波方向的方法。

[0161] 由上述技术方案可知,本实施例提供的一种确定入射信号来波方向的处理设备,通过结合空间平滑算法和互耦校准算法,能够得到不含互耦系数的空间谱函数,再通过不含互耦系数的空间谱函数确定入射信号的来波方向,能够减弱多径效应与天线耦合这两种误差对入射信号来波方向确定的影响,进而能估算出更加准确的来波方向。

[0162] 本发明的说明书中,说明了大量具体细节。然而,能够理解,本发明的实施例可以在没有这些具体细节的情况下实践。在一些实例中,并未详细示出公知的方法、结构和技术,以便不模糊对本说明书的理解。

[0163] 在本说明书的描述中,参考术语“一个实施例”、“一些实施例”、“示例”、“具体示例”、或“一些示例”等的描述意指结合该实施例或示例描述的具体特征、结构、材料或者特点包含于本发明的至少一个实施例或示例中。在本说明书中,对上述术语的示意性表述不必针对的是相同的实施例或示例。而且,描述的具体特征、结构、材料或者特点可以在任一个或多个实施例或示例中以合适的方式结合。此外,在不相互矛盾的情况下,本领域的技术人员可以将本说明书中描述的不同实施例或示例以及不同实施例或示例的特征进行结合和组合。

[0164] 最后应说明的是:以上各实施例仅用以说明本发明的技术方案,而非对其限制;尽管参照前述各实施例对本发明进行了详细的说明,本领域的普通技术人员应当理解:其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分或者全部技术特征进行等同替换;而这些修改或者替换,并不使相应技术方案的本质脱离本发明各实施例技术方案的范围,其均应涵盖在本发明的权利要求和说明书的范围当中。

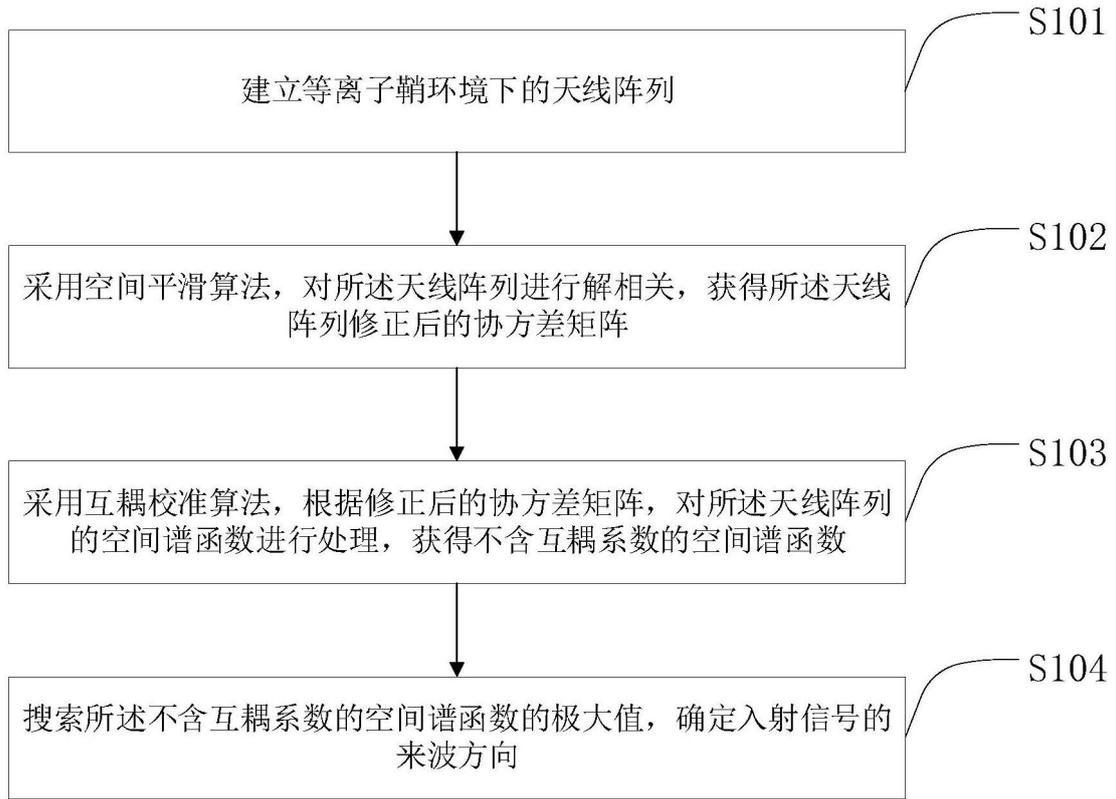


图1

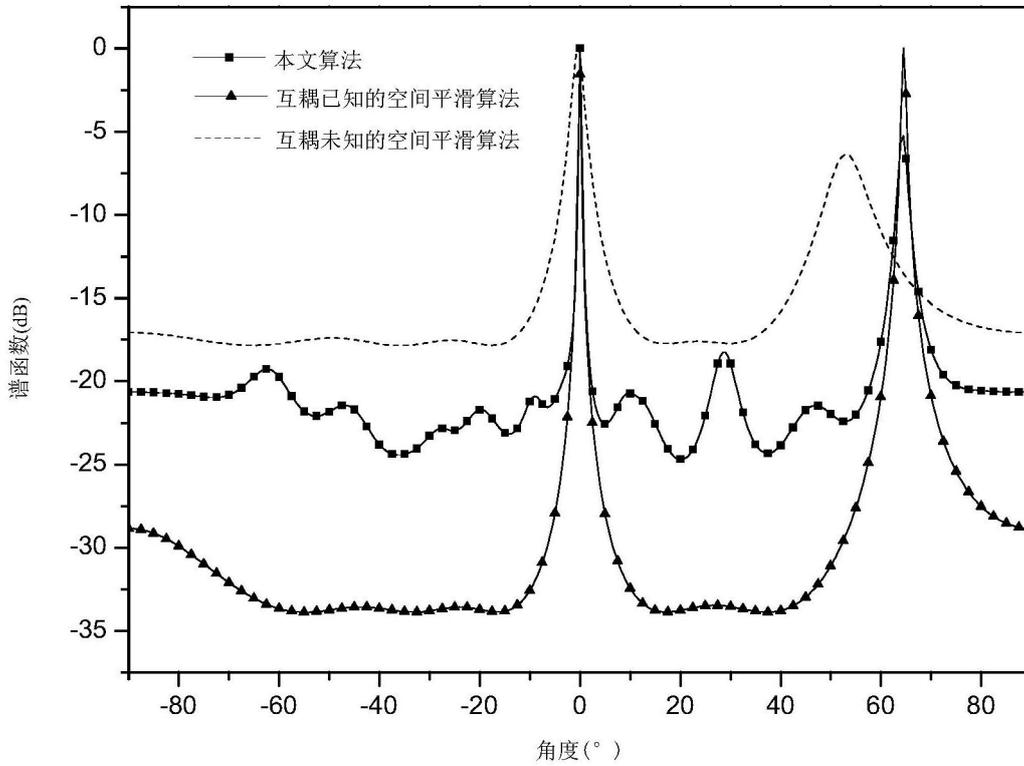


图2

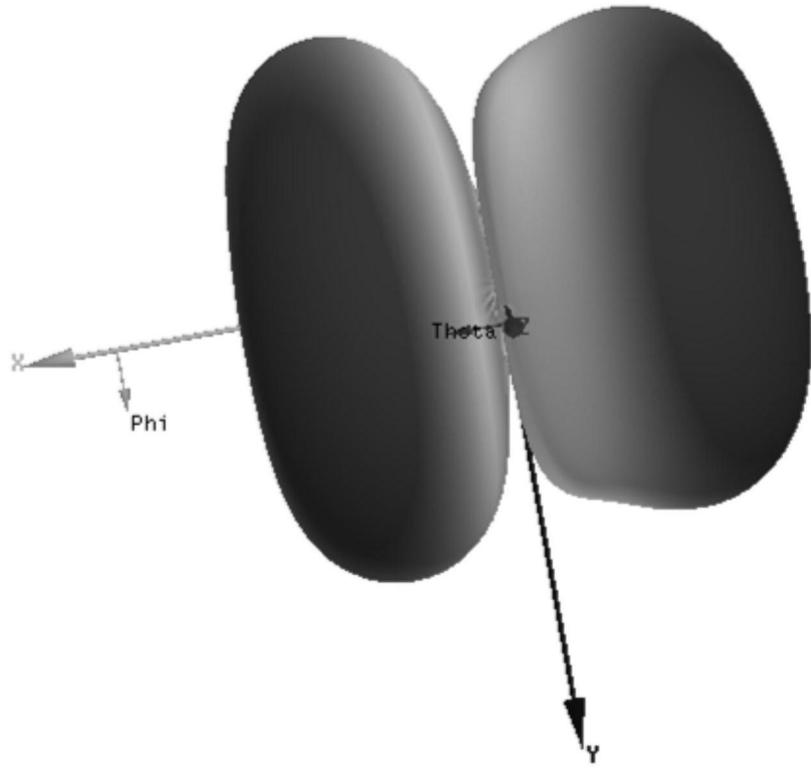


图3

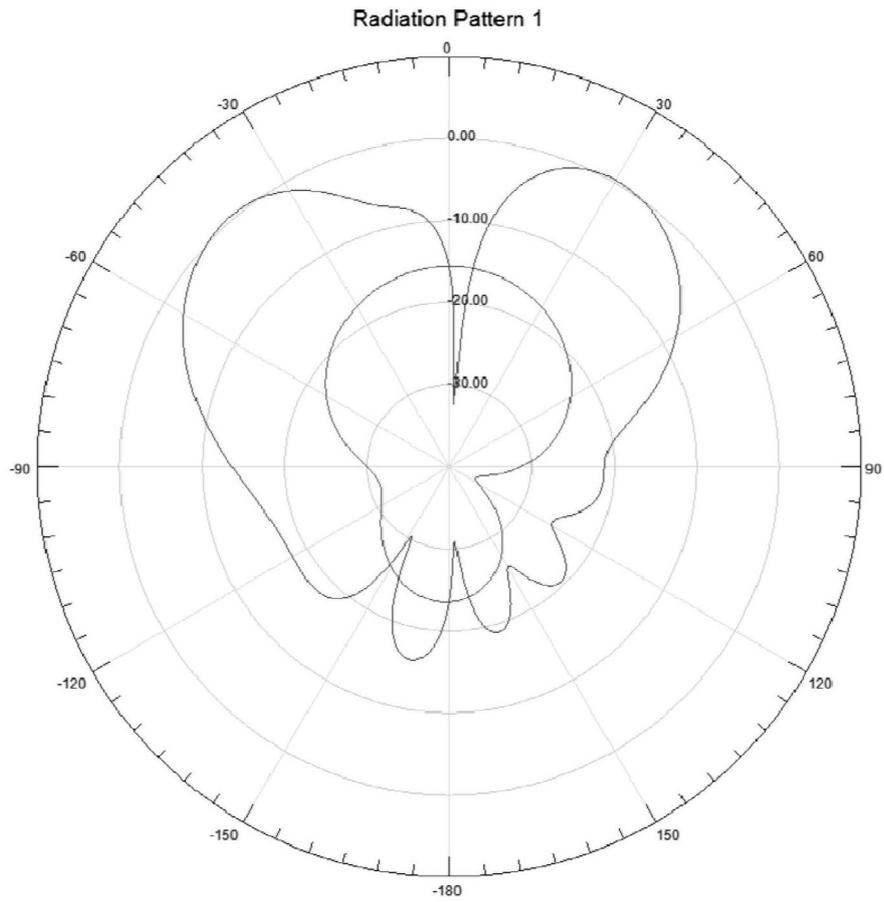


图4

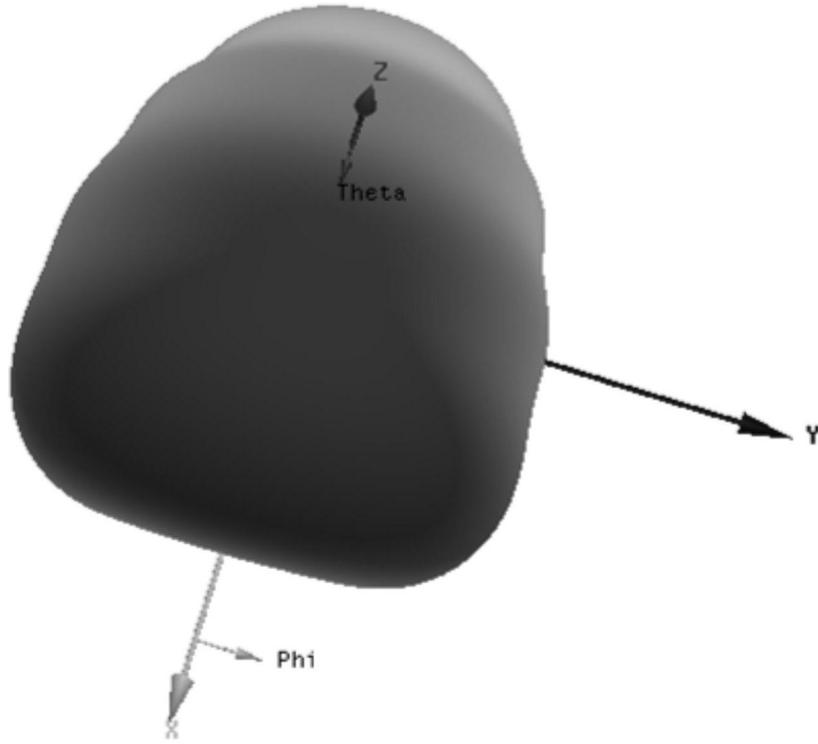


图5

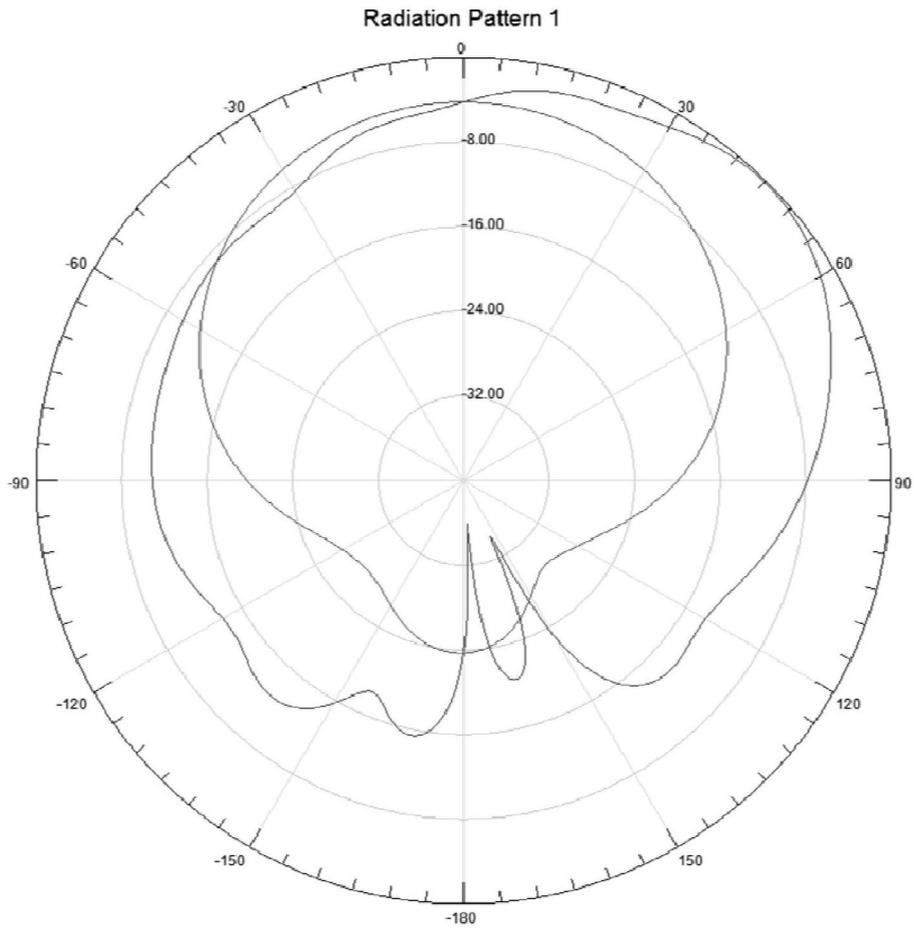


图6

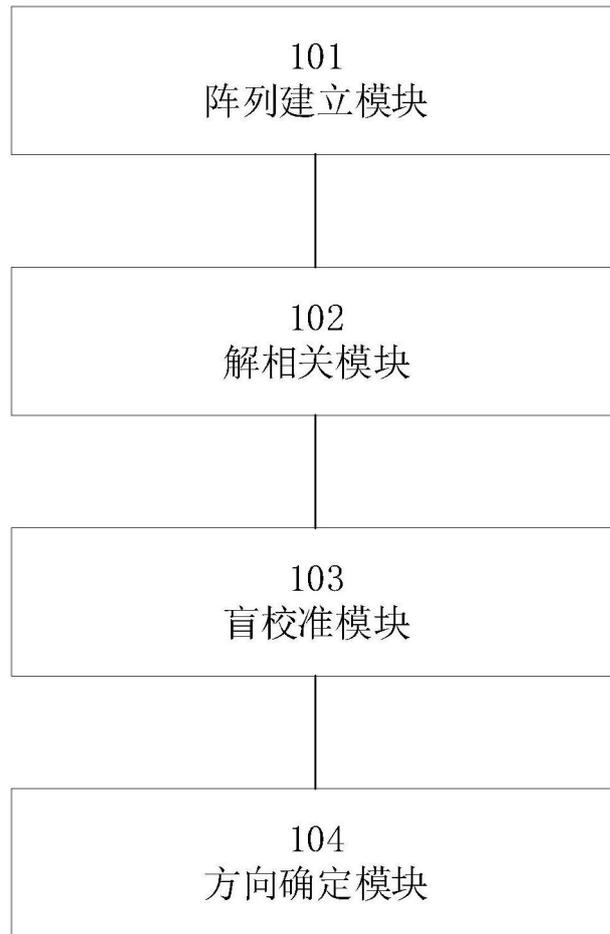


图7