



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107271989 A

(43)申请公布日 2017. 10. 20

(21)申请号 201710387452.3

(22)申请日 2017.05.27

(71)申请人 西北工业大学

地址 710072 陕西省西安市友谊西路127号

(72)发明人 刘雄厚 邓若凡 孙超 蒋光禹

樊宽

(74)专利代理机构 西北工业大学专利中心

61204

代理人 华金

(51) Int. Cl.

G01S 7/521(2006.01)

G01S 7/52(2006.01)

G01S 15/02(2006.01)

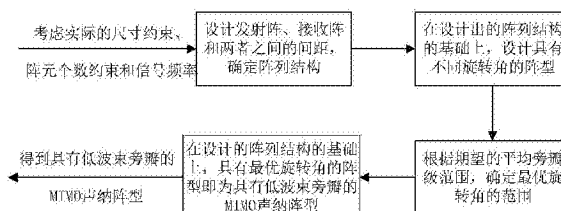
权利要求书2页 说明书13页 附图13页

(54)发明名称

一种具有最优旋转角的低波束旁瓣MIMO声纳阵型

(57)摘要

本发明涉及一种具有最优旋转角的低波束旁瓣MIMO声纳阵型,将发射和接收圆环阵的半径以及两者的阵元个数约束在一定范围内,根据已有的成本预算和平台能够提供的尺寸在此范围中选择合适的阵列半径和阵元个数,在此基础上计算出发射圆环阵和接收圆环阵之间的最优旋转角范围,从而获得具有最优旋转角的低波束旁瓣的MIMO声纳阵型。



1. 一种低波束旁瓣MIMO声纳阵列结构,其特征在于:包括一个M元发射圆环阵和一个N元接收圆环阵,两个圆环阵同心平行排列,两个圆环阵的间距 L_0 的取值范围是信号中心频率对应波长 λ 的0.5倍到2倍;发射圆环阵由M个发射阵元组成,接收圆环阵由N个接收阵元组成;接收圆环阵相邻两个接收阵元之间的弧长为发射信号中心频率波长的一半;旋转角大于等于0度且小于360/N度;其中旋转角定义为:首先在发射圆环阵所在的平面上建立一个平面直角坐标系 x_0y_0 ,将发射圆环阵圆心所在的位置定义为原点O,任选发射圆环阵的一个阵元作为发射阵的第一个阵元,以原点和发射阵的第一个阵元的几何中心的连线作为 Ox_0 轴,规定从原点O到发射阵的第一个阵元的几何中心的方向为 x_0 轴的正方向,垂直于 Ox_0 轴的直线为 Oy_0 轴。将 x_0y_0 平面的法线作为 Oz_0 轴,建立空间直角坐标系 $x_0y_0z_0$,合理选取 z_0 轴的正方向和 y_0 轴的正方向,使空间直角坐标系 $x_0y_0z_0$ 是右手系。在接收圆环阵所在的平面上建立一个平面直角坐标系 x_1y_1 ,将接收圆环阵圆心所在的位置定义为原点 O_1 ,与 Ox_0 轴平行的直线作为 O_1x_1 轴, x_1 轴的正方向与 x_0 轴的正方向同向,与 Oy_0 轴平行的直线作为 O_1y_1 轴, y_1 轴的正方向与 y_0 轴的正方向同向。在平面直角坐标系 x_1y_1 中,将N个接收阵元的几何中心与原点 O_1 连线,形成N条直线。以 x_1 轴为始边,N条直线为终边,沿逆时针方向构成N个角度。定义在这N个角度中,最小的角度对应的阵元为接收阵的第一个阵元。(规定逆时针方向为正方向)。定义以 x_1 轴为始边,接收阵的第一个阵元的几何中心投影到 x_0y_0 平面的投影点与原点O连线为终边,构成的角度为旋转角,用字母 φ 表示。

2. 如权利要求1所述的一种低波束旁瓣MIMO声纳阵列结构,其特征在于:所述M元发射圆环阵的阵型为M个发射阵元周向均布且圆心处不设有发射阵元,此时发射阵元个数M满足 $3 \leq M \leq 6$,接收阵元个数N满足 $3 \leq N \leq 4M$;发射圆环阵半径 R_t 和接收圆环阵半径 R_r 的关系为 $R_r \leq R_t \leq 1.5R_r$ 。

3. 如权利要求1所述的一种低波束旁瓣MIMO声纳阵列结构,其特征在于:所述M元发射圆环阵的阵型还可以为M-1个发射阵元周向均布且圆心处设有发射阵元,此时发射阵元个数M满足 $4 \leq M \leq 7$,接收阵元个数N满足 $3 \leq N \leq 4(M-1)$;发射圆环阵半径 R_t 和接收圆环阵半径 R_r 的关系为 $R_r \leq R_t \leq 1.5R_r$ 。

4. 基于如权利要求1所述的阵列结构,一种具有最优旋转角的低波束旁瓣MIMO声纳阵型,其特征在于:所述最优旋转角通过以下步骤获得:

步骤一:初始参数设置:

(1) 在最初所取的阵列结构下,通过改变旋转角 φ 的取值,得到具有不同旋转角的阵型:令 $0^\circ \leq \varphi < 360/N^\circ$ 即可, $\varphi = \Delta\varphi \times k$, $0 \leq k < \langle 360/(N \times \Delta\varphi) \rangle$, $k \in Z$,其中 $\langle \rangle$ 表示用四舍五入的方法取整数的运算,N是接收阵元个数,Z是整数集;旋转角 φ 的变化间隔 $\Delta\varphi$ 满足 $0^\circ \leq \Delta\varphi \leq 5^\circ$,单位为角度;

(2) 主瓣指向角 θ_0 :针对一个具有任意旋转角 φ 的MIMO声纳阵型,在主瓣指向不同的角度 θ_0 时进行波束形成,主瓣指向角 θ_0 满足 $\theta_{0,\min} \leq \theta_0 \leq \theta_{0,\max}$;如果选择第一种发射阵型,最小的主瓣指向角 $\theta_{0,\min}$ 满足 $0^\circ \leq \theta_{0,\min} \leq 360^\circ - \min\{[360/M, 360/N], 360\}^\circ$,最大的主瓣指向角 $\theta_{0,\max}$ 满足 $\theta_{0,\max} = \theta_{0,\min} + \min\{[360/M, 360/N], 360\}^\circ - \Delta\theta_0$,如果选择第二种发射阵型,最小的主瓣指向角 $\theta_{0,\min}$ 满足 $0^\circ \leq \theta_{0,\min} \leq 360^\circ - \min\{[360/(M-1), 360/N], 360\}^\circ$,最大的主瓣指向角 $\theta_{0,\max}$ 满足 $\theta_{0,\max} = \theta_{0,\min} + \min\{[360/(M-1), 360/N], 360\}^\circ - \Delta\theta_0$;其中 $\min\{a, b\}$ 表示取括

号内的数a,b的最小值, $[a, b]$ 表示求括号内的数a,b的最小公倍数, M是发射阵元个数, N是接收阵元个数, $\Delta \theta_0$ 是进行波束形成的主瓣指向角的变化间隔, $0^\circ \leq \Delta \theta_0 \leq 5^\circ$; 那么, 针对一个阵型, 进行波束形成的次数 $K = \langle (\theta_{0, \max} - \theta_{0, \min}) / \Delta \theta_0 \rangle + 1$, 其中 $\langle \rangle$ 表示用四舍五入的方法取整数的运算;

步骤二: 根据期望的平均旁瓣级的范围, 确定最优旋转角的范围

子步骤一: 针对步骤二中所选取的阵型, 获得某个主瓣指向 θ_0 下的波束图, 得到该阵型波束图的旁瓣级 $SLL(\varphi, \theta_0)$; 改变主瓣指向 θ_0 , 获得某个旋转角下的一组多个不同主瓣指向下的波束图的旁瓣级; 改变旋转角 φ , 可以获得多组不同旋转角下的波束图的旁瓣级;

子步骤二: 根据子步骤一中的不同旋转角下的波束图的旁瓣级, 求具有不同旋转角的阵型的平均旁瓣级 $\overline{SLL}(\varphi)$;

$$\overline{SLL}(\varphi) = \frac{\sum_{\theta_0 = \theta_{0, \min}}^{\theta_{0, \max}} SLL(\varphi, \theta_0)}{K}$$

子步骤三: 由期望的平均旁瓣级 \overline{SLL}_E 的范围确定最优旋转角 φ_E 的范围; 其中期望的平均旁瓣级的范围满足:

$$\min \{ \overline{SLL}(\varphi) \} \leq \overline{SLL}_E \leq \frac{2 \times \min \{ \overline{SLL}(\varphi) \} + \max \{ \overline{SLL}(\varphi) \}}{3},$$

$\min \{ \overline{SLL}(\varphi) \}$ 代表在子步骤二得到的所有的平均旁瓣级中最小的平均旁瓣级,

$\max \{ \overline{SLL}(\varphi) \}$ 代表在子步骤二得到的所有的平均旁瓣级中最大的平均旁瓣级; 则最优旋转角范围 φ_E 可由下列集合确定:

$\varphi_E \in \{ \varphi_E | \overline{SLL}(\varphi_E) \leq \overline{SLL}_E \}$, 其中 \in 表示属于,

$\{ \varphi_E | \overline{SLL}(\varphi_E) \leq \overline{SLL}_E \}$ 表示使得平均旁瓣级 $\overline{SLL}(\varphi_E)$ 小于等于期望旁瓣级 \overline{SLL}_E 的最优旋转角 φ_E 的集合;

步骤三: 在步骤二中得到的最优旋转角的范围中, 任取一个值, 作为最初所取的阵列结构下最优旋转角, 从而获得具有最优旋转角的低波束旁瓣MIMO声纳阵型。

一种具有最优旋转角的低波束旁瓣MIMO声纳阵型

技术领域

[0001] 本发明属于阵列信号处理领域,特别涉及一种低波束旁瓣MIMO声纳阵型及获得最优旋转角确定最优阵型的方法。

背景技术

[0002] 主动声纳为了获得 360° 视角,通常采用单个阵元发射和多元圆环阵接收的阵型,如航空吊放声纳等(支绍龙,刘颖,刘莹,张红.FLASH吊放声纳声学性能及单指向性阵元验证.中国声学学会水声学分会2015年学术会议,2015)。使用该阵型的声纳可以简化为单输入多输出(single-input multiple-output:SIMO)声纳。由于使用均匀圆环阵接收目标场景回波,会出现阵列波束旁瓣处于较高的水平的问题。在阵列结构不变时,为了抑制圆环阵的波束旁瓣,波束主瓣会随之展宽,导致角度分辨率下降(H.L.Van Trees, Detection, Estimation, and Modulation Theory, Optimum Array Processing, Wiley Interscience, 2002)。为了在保持一定角度分辨率的前提下降低波束旁瓣,传统的方法一般通过增加接收圆环阵阵元个数(接收圆环阵按照半波长布阵)以达到目的。但是,这种方法不但会导致声纳系统成本过高,也会带来圆环阵阵列尺寸过大难以由小型平台搭载等问题。

[0003] 不同于传统的SIMO声纳,多输入多输出(multiple-input multiple-output:MIMO)声纳通过各阵元发射相互正交信号,在接收端进行匹配滤波分离信号并实现波束形成,从而获得更大的虚拟阵列孔径(刘雄厚,孙超,卓颖,马茜,潘浩.一种用于高分辨扇扫成像的MIMO阵列.航空学报,2014,35(9):2540-2550.)。为了获得期望的阵列孔径和足够的自由度,MIMO声纳一般采用稀疏发射阵和密布接收阵进行布阵设计。但是,如此设计的MIMO声纳容易突破阵列尺寸约束,导致其难以应用到小型平台。因此,如何在一定的阵列尺寸约束下,设计合理的MIMO声纳阵型并结合相应的波束优化以获得期望的低旁瓣波束图,成为MIMO声纳在小型平台上应用过程中急需解决的问题之一。

发明内容

[0004] 本发明解决的技术问题是:为了在一定的约束下获得低旁瓣的MIMO声纳阵型,本发明提出一种基于圆环阵结构的低旁瓣MIMO声纳阵列结构及通过寻找最优旋转角确定最优阵型的方法。本发明将发射和接收圆环阵的半径以及两者的阵元个数约束在一定范围内,根据已有的成本预算和平台能够提供的尺寸在此范围中选择合适的阵列半径和阵元个数,在此基础上计算出发射圆环阵和接收圆环阵之间的最优旋转角范围,从而获得具有低旁瓣波束图的MIMO声纳阵型。

[0005] 本发明的技术方案是:一种低波束旁瓣MIMO声纳阵列结构,包括一个M元发射圆环阵和一个N元接收圆环阵,两个圆环阵同心平行排列,两个圆环阵的间距 L_D 的取值范围是信号中心频率对应波长 λ 的0.5倍到2倍;发射圆环阵由M个发射阵元组成,接收圆环阵由N个接收阵元组成;接收圆环阵相邻两个接收阵元之间的弧长为发射信号中心频率波长的一半;旋转角大于等于0度且小于 $360/N$ 度;其中旋转角定义为:首先在发射圆环阵所在的平面上

建立一个平面直角坐标系 xOy ,将发射圆环阵圆心所在的位置定义为原点 O ,任选发射圆环阵的一个阵元作为发射阵的第一个阵元,以原点和发射阵的第一个阵元的几何中心的连线作为 Ox 轴,规定从原点 O 到发射阵的第一个阵元的几何中心的方向为 x 轴的正方向,垂直于 Ox 轴的直线为 Oy 轴。将 xOy 平面的法线作为 Oz 轴,建立空间直角坐标系 $xOyz$,合理选取 z 轴的正方向和 y 轴的正方向,使空间直角坐标系 $xOyz$ 是右手系。在接收圆环阵所在的平面上建立一个平面直角坐标系 $x_1O_1y_1$,将接收圆环阵圆心所在的位置定义为原点 O_1 ,与 Ox 轴平行的直线作为 O_1x_1 轴, x_1 轴的正方向与 x 轴的正方向同向,与 Oy 轴平行的直线作为 O_1y_1 轴, y_1 轴的正方向与 y 轴的正方向同向。在平面直角坐标系 $x_1O_1y_1$ 中,将 N 个接收阵元的几何中心与原点 O_1 连线,形成 N 条直线。以 x_1 轴为始边, N 条直线为终边,沿逆时针方向构成 N 个角度。定义在这 N 个角度中,最小的角度对应的阵元为接收阵的第一个阵元。(规定逆时针方向为正方向)。定义以 x_1 轴为始边,接收阵的第一个阵元的几何中心投影到 xOy 平面的投影点与原点 O 连线为终边,构成的角度为旋转角,用字母 φ 表示。

[0006] 本发明的进一步技术方案是:所述 M 元发射圆环阵的阵型为 M 个发射阵元周向均布且圆心处不设有发射阵元,此时发射阵元个数 M 满足 $3 \leq M \leq 6$,接收阵元个数 N 满足 $3 \leq N \leq 4M$;发射圆环阵半径 R_t 和接收圆环阵半径 R_r 的关系为 $R_r \leq R_t \leq 1.5R_r$ 。

[0007] 本发明的进一步技术方案是:所述 M 元发射圆环阵的阵型还可以为 $M-1$ 个发射阵元周向均布且圆心处设有发射阵元,此时发射阵元个数 M 满足 $4 \leq M \leq 7$,接收阵元个数 N 满足 $3 \leq N \leq 4(M-1)$;发射圆环阵半径 R_t 和接收圆环阵半径 R_r 的关系为 $R_r \leq R_t \leq 1.5R_r$ 。

[0008] 本发明的进一步技术方案是:所述最优旋转角通过以下步骤获得:

[0009] 步骤一:初始参数设置:

[0010] (1) 在最初所取的阵列结构下,通过改变旋转角 φ 的取值,得到具有不同旋转角的阵型:令 $0^\circ \leq \varphi < 360/N^\circ$ 即可, $\varphi = \Delta\varphi \times k^\circ$, $0 \leq k < \langle 360/(N \times \Delta\varphi) \rangle$, $k \in Z$,其中 $\langle \rangle$ 表示用四舍五入的方法取整数的运算, N 是接收阵元个数, Z 是整数集;旋转角 φ 的变化间隔 $\Delta\varphi$ 满足 $0^\circ \leq \Delta\varphi \leq 5^\circ$,单位为角度;

[0011] (2) 主瓣指向角 θ_0 :针对一个具有任意旋转角 φ 的MIMO声纳阵型,在主瓣指向不同的角度 θ_0 时进行波束形成,主瓣指向角 θ_0 满足 $\theta_{0,\min} \leq \theta_0 \leq \theta_{0,\max}$;如果选择第一种发射阵型,最小的主瓣指向角 $\theta_{0,\min}$ 满足 $0^\circ \leq \theta_{0,\min} \leq 360^\circ - \min\{[360/M, 360/N], 360\}^\circ$,最大的主瓣指向角 $\theta_{0,\max}$ 满足 $\theta_{0,\max} = \theta_{0,\min} + \min\{[360/M, 360/N], 360\}^\circ - \Delta\theta_0$,如果选择第二种发射阵型,最小的主瓣指向角 $\theta_{0,\min}$ 满足 $0^\circ \leq \theta_{0,\min} \leq 360^\circ - \min\{[360/(M-1), 360/N], 360\}^\circ$,最大的主瓣指向角 $\theta_{0,\max}$ 满足 $\theta_{0,\max} = \theta_{0,\min} + \min\{[360/(M-1), 360/N], 360\}^\circ - \Delta\theta_0$;其中 $\min\{a, b\}$ 表示取括号内的数 a, b 的最小值, $[a, b]$ 表示求括号内的数 a, b 的最小公倍数, M 是发射阵元个数, N 是接收阵元个数, $\Delta\theta_0$ 是进行波束形成的主瓣指向角的变化间隔, $0^\circ \leq \Delta\theta_0 \leq 5^\circ$;那么,针对一个阵型,进行波束形成的次数 $K = \langle (\theta_{0,\max} - \theta_{0,\min}) / \Delta\theta_0 \rangle + 1$,其中 $\langle \rangle$ 表示用四舍五入的方法取整数的运算;

[0012] 步骤二:根据期望的平均旁瓣级的范围,确定最优旋转角的范围

[0013] 子步骤一:针对步骤二种所选取的阵型,获得某个主瓣指向 θ_0 下的波束图,得到该阵型波束图的旁瓣级 $SLL(\varphi, \theta_0)$;改变主瓣指向 θ_0 ,获得某个旋转角下的一组多个不同主瓣指向下的波束图的旁瓣级;改变旋转角 φ ,可以获得多组不同旋转角下的波束图的旁瓣级;

[0014] 子步骤二:根据子步骤一中的不同旋转角下的波束图的旁瓣级,求具有不同旋转角的阵型的平均旁瓣级 $\overline{SSL}(\varphi)$;

$$[0015] \quad \overline{SSL}(\varphi) = \frac{\sum_{\theta_0=\theta_{0,\min}}^{\theta_{0,\max}} SSL(\varphi, \theta_0)}{K}$$

[0016] 子步骤三:由期望的平均旁瓣级 \overline{SSL}_E 的范围确定最优旋转角 φ_E 的范围;其中期望的平均旁瓣级的范围满足: $\min\{\overline{SSL}(\varphi)\} \leq \overline{SSL}_E \leq \frac{2 \times \min\{\overline{SSL}(\varphi)\} + \max\{\overline{SSL}(\varphi)\}}{3}$,

$\min\{\overline{SSL}(\varphi)\}$ 代表在子步骤二得到的所有的平均旁瓣级中最小的平均旁瓣级,

$\max\{\overline{SSL}(\varphi)\}$ 代表在子步骤二得到的所有的平均旁瓣级中最大的平均旁瓣级;则最优旋

转角范围 φ_E 可由下列集合确定: $\varphi_E \in \{\varphi_E | \overline{SSL}(\varphi_E) \leq \overline{SSL}_E\}$,其中 \in 表示属于,

$\{\varphi_E | \overline{SSL}(\varphi_E) \leq \overline{SSL}_E\}$ 表示使得平均旁瓣级 $\overline{SSL}(\varphi_E)$ 小于等于期望旁瓣级 \overline{SSL}_E 的最优旋转角 φ_E 的集合;

[0017] 步骤三:在步骤二中得到的最优旋转角的范围中,任取一个值,作为对应最初所取的阵列结构下最优旋转角,从而获得具有最优旋转角的低波束旁瓣MIMO声纳阵型。

[0018] 发明效果

[0019] 本发明的技术效果在于:本发明的基本原理和实施方案经过了计算机数值仿真的验证,其结果表明:与未经优化设计的阵型相比,使用本发明中设计的阵型可以在不增加阵列尺寸和阵元个数的前提下,使波束图的旁瓣级降低到期望的水平。

附图说明

[0020] 表1是本发明实施实例中4个MIMO阵列结构所涉及到的参数。

[0021] 表2是本发明实施实例中针对4个MIMO阵列结构,分别设计出的最优旋转角的范围和最优旋转角对应的旁瓣级的范围。

[0022] 图1是本发明获得期望阵型的流程图。

[0023] 图2是本发明确定旋转角的流程图。

[0024] 图3是本发明MIMO声纳的三维视图,其中图(a)是3发6收发射阵采用第一种圆心没有阵元的方式布阵的MIMO声纳的三维视图,图(b)是4发6收发射阵采用第二种圆心有阵元的方式布阵的MIMO声纳的三维视图,图(c)是4发8收发射阵采用第一种圆心没有阵元的方式布阵的MIMO声纳的三维视图,图(d)是4发8收发射阵采用第二种圆心有阵元的方式布阵的MIMO声纳的三维视图。

[0025] 图4是本发明MIMO声纳的二维俯视图,其中图(a)是3发6收发射阵采用第一种圆心没有阵元的方式布阵的MIMO声纳的二维俯视图,图(b)是4发6收发射阵采用第二种圆心有阵元的方式布阵的MIMO声纳的二维俯视图,图(c)是4发8收发射阵采用第一种圆心没有阵元的方式布阵的MIMO声纳的二维俯视图,图(d)是4发8收发射阵采用第二种圆心有阵元的

方式布阵的MIMO声纳的二维俯视图。

[0026] 图5是本发明3发6收的MIMO声纳,在不同的旋转角和不同的主瓣指向角下的波束图的旁瓣级。

[0027] 图6是本发明3发6收的MIMO声纳,在不同的旋转角下的平均旁瓣级。

[0028] 图7是本发明3发6收的MIMO声纳,以旋转角为 29° 的阵型和旋转角为 0° 的阵型为例,在不同的主瓣指向角下的波束图。其中图(a)是旋转角为 29° 的阵型在不同主瓣指向角下的波束图,图(b)是旋转角为 0° 的阵型在不同主瓣指向角下的波束图。

[0029] 图8是本发明3发6收的MIMO声纳,以旋转角为 29° 的阵型和旋转角为 0° 的阵型为例,在不同的主瓣指向角下的旁瓣级。

[0030] 图9是本发明4发6收的MIMO声纳,在不同的旋转角和不同的主瓣指向角下的波束图的旁瓣级。

[0031] 图10是本发明4发6收的MIMO声纳,在不同的旋转角下的平均旁瓣级。

[0032] 图11是本发明4发6收的MIMO声纳,以旋转角为 30° 的阵型和旋转角为 0° 的阵型为例,在不同的主瓣指向角下的波束图。其中图(a)是旋转角为 30° 的阵型在不同主瓣指向角下的波束图,图(b)是旋转角为 0° 的阵型在不同主瓣指向角下的波束图。

[0033] 图12是本发明4发6收的MIMO声纳,以旋转角为 30° 的阵型和旋转角为 0° 的阵型为例,在不同的主瓣指向角下的旁瓣级。

[0034] 图13是本发明4发8收的MIMO声纳,在不同的旋转角和不同的主瓣指向角下的波束图的旁瓣级。

[0035] 图14是本发明4发8收的MIMO声纳,在不同的旋转角下的平均旁瓣级。

[0036] 图15是本发明4发8收的MIMO声纳,以旋转角为 34° 的阵型和旋转角为 0° 的阵型为例,在不同的主瓣指向角下的波束图。其中图(a)是旋转角为 34° 的阵型在不同主瓣指向角下的波束图,图(b)是旋转角为 0° 的阵型在不同主瓣指向角下的波束图。

[0037] 图16是本发明4发8收的MIMO声纳,以旋转角为 34° 的阵型和旋转角为 0° 的阵型为例,在不同的主瓣指向角下的旁瓣级。

[0038] 图17是本发明5发8收的MIMO声纳,在不同的旋转角和不同的主瓣指向角下的波束图的旁瓣级。

[0039] 图18是本发明5发8收的MIMO声纳,在不同的旋转角下的平均旁瓣级。

[0040] 图19是本发明5发8收的MIMO声纳,以旋转角为 30° 的阵型和旋转角为 0° 的阵型为例,在不同的主瓣指向角下的波束图。其中图(a)是旋转角为 30° 的阵型在不同主瓣指向角下的波束图,图(b)是旋转角为 0° 的阵型在不同主瓣指向角下的波束图。

[0041] 图20是本发明5发8收的MIMO声纳,以旋转角为 30° 的阵型和旋转角为 0° 的阵型为例,在不同的主瓣指向角下的旁瓣级。

[0042] 图21是本发明3发6收的MIMO声纳,旋转角以旋转角为 29° 为例的最优阵型,其中,(a)是该阵型的三维视图,图(b)是该阵型的二维俯视图。

[0043] 图22是本发明4发6收的MIMO声纳,旋转角以旋转角为 30° 为例的最优阵型,其中(a)是该阵型的三维视图,图(b)是该阵型的二维俯视图。

[0044] 图23是本发明4发8收的MIMO声纳,旋转角以旋转角为 34° 为例的最优阵型,其中,(a)是该阵型的三维视图,图(b)是该阵型的二维俯视图。

[0045] 图24是本发明5发8收的MIMO声纳,旋转角以旋转角为 30° 为例的最优阵型,其中,(a)是该阵型的三维视图,图(b)是该阵型的二维俯视图。

具体实施方式

[0046] 为了方便描述本发明的内容,首先作以下术语定义:

[0047] 定义1、旋转角:参见图4,首先在发射圆环阵所在的平面上建立一个平面直角坐标系 x_0y_0 ,将发射圆环阵圆心所在的位置定义为原点 O_0 ,任选发射圆环阵的一个阵元作为发射阵的第一个阵元,以原点和发射阵的第一个阵元的几何中心的连线作为 O_0x_0 轴,规定从原点 O_0 到发射阵的第一个阵元的几何中心的方向为 x_0 轴的正方向,垂直于 O_0x_0 轴的直线为 O_0y_0 轴。将 x_0y_0 平面的法线作为 O_0z_0 轴,建立空间直角坐标系 $x_0y_0z_0$,合理选取 z_0 轴的正方向和 y_0 轴的正方向,使空间直角坐标系 $x_0y_0z_0$ 是右手系。在接收圆环阵所在的平面上建立一个平面直角坐标系 x_1y_1 ,将接收圆环阵圆心所在的位置定义为原点 O_1 ,与 O_0x_0 轴平行的直线作为 O_1x_1 轴, x_1 轴的正方向与 x_0 轴的正方向同向,与 O_0y_0 轴平行的直线作为 O_1y_1 轴, y_1 轴的正方向与 y_0 轴的正方向同向。在平面直角坐标系 x_1y_1 中,将 N 个接收阵元的几何中心与原点 O_1 连线,形成 N 条直线。以 x_1 轴为始边, N 条直线为终边,沿逆时针方向构成 N 个角度。定义在这 N 个角度中,最小的角度对应的阵元为接收阵的第一个阵元。(规定逆时针方向为正方向)。定义以 x_1 轴为始边,接收阵的第一个阵元的几何中心投影到 x_0y_0 平面的投影点与原点 O_0 连线为终边,构成的角度为旋转角,用字母 φ 表示。

[0048] 在四个不同的阵列结构下,MIMO声纳阵型的三维视图如图3所示,MIMO声纳阵型的旋转角如图4所示。图3(a)、图3(b)、图3(c)和图3(d)分别表示圆心位置没有发射阵元的3发6收声纳阵型的三维视图、圆心位置有发射阵元的4发6收声纳阵型的三维视图、圆心位置没有发射阵元的4发8收声纳阵型的三维视图、圆心位置有发射阵元的5发8收声纳阵型的三维视图。图4(a)、图4(b)、图4(c)和图4(d)分别表示圆心位置没有发射阵元的3发6收声纳阵型的二维俯视图、圆心位置有发射阵元的4发6收声纳阵型的二维俯视图、圆心位置没有发射阵元的4发8收声纳阵型的二维俯视图、圆心位置有发射阵元的5发8收声纳阵型的二维俯视图。其中字母 φ 表示旋转角, θ_0 表示波束形成时的主瓣指向角。

[0049] 需要说明的是,发射圆环阵和接收圆环阵的相对上下位置可以和图4中相反。

[0050] 定义2、平均旁瓣级

[0051] 针对一个具有任意旋转角 φ 的MIMO声纳阵型,主瓣指向不同的角度 θ_0 时进行波束形成,能得到一组多个波束图。搜索主瓣以外的区域,可以得到一组多个旁瓣级 $SLL(\varphi, \theta_0)$ 。定义平均旁瓣级为:具有此旋转角 φ 的阵型在所有感兴趣的主瓣指向旁瓣级的平均值 $\overline{SLL}(\varphi)$ 。

[0052] 定义3、均匀圆环阵

[0053] 如果有一个阵型满足:在由阵元组成的圆周上,任意两个相邻阵元之间的弧长相同,那么这个阵型是均匀圆环阵。

[0054] 本发明的主要内容有:

[0055] 1.提出了一种具有最优旋转角的低波束旁瓣MIMO声纳阵型。 M 发 N 收圆环阵MIMO声纳阵型的发射圆环阵和接收圆环阵位于两个相互平行的平面中,且这两个平面的间距 L_0 的

取值范围是信号中心频率所对应波长 λ 的0.5倍到2倍,即: $0.5\lambda \leq L_D \leq 2\lambda$ 。N元接收圆环阵为均匀圆环阵(其中相邻阵元的弧长为发射信号中心频率对应的半波长),M元发射圆环阵的阵型有两种:第一种是M元均匀圆环阵并且圆心位置没有发射阵元,第二种是M-1元均匀圆环阵并且圆心位置有1个发射阵元。在设计MIMO声纳阵型时,任意选择一种发射阵型即可。使用第一种发射圆环阵时,发射阵元个数M满足 $3 \leq M \leq 6$,接收阵元个数N满足 $3 \leq N \leq 4M$;使用第二种发射圆环阵时,发射阵元个数M满足 $4 \leq M \leq 7$,接收阵元个数N满足 $3 \leq N \leq 4(M-1)$ 。为约束阵列尺寸并获得期望波束性能,发射圆环阵半径 R_t 和接收圆环阵半径 R_r 的取值范围满足 $R_r \leq R_t \leq 1.5R_r$ 。在这些参数确定的基础上,利用波束图来确定发射阵和接收阵之间的最优旋转角范围,使得在满足阵元个数约束、阵列半径约束、主瓣宽度约束、阵列加权系数2-范数约束时,该旋转角范围下MIMO声纳具有期望的低旁瓣级。设期望的平均旁瓣级为

$$\overline{SLL}_E, \text{其中期望的平均旁瓣级的范围满足: } \min\{\overline{SLL}(\varphi)\} \leq \overline{SLL}_E \leq \frac{2 \times \min\{\overline{SLL}(\varphi)\} + \max\{\overline{SLL}(\varphi)\}}{3},$$

$\min\{\overline{SLL}(\varphi)\}$ 代表不同旋转角对应的平均旁瓣级中最小的平均旁瓣级, $\max\{\overline{SLL}(\varphi)\}$ 代表不同旋转角对应的平均旁瓣级中最大的平均旁瓣级。则最优旋转角范围 φ_E 可由下列集合确定: $\varphi_E \in \{\varphi_E | \overline{SLL}(\varphi_E) \leq \overline{SLL}_E\}$,其中 \in 表示属于, $\{\varphi_E | \overline{SLL}(\varphi_E) \leq \overline{SLL}_E\}$ 表示使得平均旁瓣级 $\overline{SLL}(\varphi_E)$ 小于等于期望旁瓣级 \overline{SLL}_E 的最优旋转角 φ_E 的集合。在设计阵型时旋转角 φ 在最优旋转角 φ_E 范围内任意选取。

[0056] 2.通过计算机数值仿真,给出了在一定约束条件下的最优MIMO声纳阵型。将具有最优旋转角阵型的MIMO声纳波束性能与未经优化设计的MIMO声纳波束性能进行对比,证明了在满足阵列尺寸约束、阵元个数约束、波束图主瓣宽度约束、加权系数二范数约束时,所设计的具有最优旋转角的MIMO声纳阵型能够获得期望的低旁瓣波束效果。

[0057] 本发明的技术方案

[0058] 本发明解决现存问题所采用的技术方案可分为以下4个步骤:

[0059] 1)根据尺寸约束、阵元个数约束、信号频率确定阵列结构。本发明中MIMO声纳由一个M元发射圆环阵和一个N元接收圆环阵构成。发射圆环阵和接收圆环阵位于两个相互平行的平面中,且这两个平面的间距 L_D 的取值范围是信号中心频率所对应波长 λ 的0.5倍到2倍,即: $0.5\lambda \leq L_D \leq 2\lambda$ 。在 $0.5\lambda \leq L_D \leq 2\lambda$ 的范围内选择这两个平面的间距 L_D 。N元接收圆环阵为按照相邻阵元的弧长为发射信号中心频率对应的半波长布阵的均匀圆环阵,M元发射圆环阵的阵型有两种:选择一种发射阵型:第一种是M元均匀圆环阵并且圆心位置没有发射阵元,第二种是M-1元均匀圆环阵并且圆心位置有1个发射阵元。在设计MIMO声纳阵型时,任意选择一种发射阵型即可。使用第一种发射圆环阵时,发射阵元个数M满足 $3 \leq M \leq 6$,接收阵元个数N满足 $3 \leq N \leq 4M$;使用第二种发射圆环阵时,发射阵元个数M满足 $4 \leq M \leq 7$,接收阵元个数N满足 $3 \leq N \leq 4(M-1)$,在此约束的范围内选择发射阵元个数M和接收阵元个数N。发射圆环阵半径 R_t 和接收圆环阵半径 R_r 的关系为 $R_r \leq R_t \leq 1.5R_r$ 。在 $R_r \leq R_t \leq 1.5R_r$ 的范围内选择发射圆环阵半径 R_t 和接收圆环阵半径 R_r 。

[0060] 2)在步骤1)设计的阵列结构的基础上,设计具有不同旋转角的阵型

[0061] 在设计发射圆环阵和接收圆环阵之间的旋转角 φ 时,令 $0^\circ \leq \varphi < 360/N^\circ$ 即可。感

兴趣的旋转角 φ 的变化间隔 $\Delta\varphi$ 满足 $0^\circ \leq \Delta\varphi \leq 5^\circ$ 。通过改变旋转角 φ 的取值,可以得到具有不同旋转角的阵型。感兴趣的旋转角 $\varphi = \Delta\varphi \times k^\circ, 0 \leq k < \langle 360 / (N \times \Delta\varphi) \rangle, k \in Z$,其中 $\langle \rangle$ 表示用四舍五入的方法取整数的运算, N 是接收阵元个数, Z 是整数集,感兴趣的旋转角 φ 的变化间隔 $\Delta\varphi$ 的单位是角度。

[0062] 3) 根据期望的平均旁瓣级的范围,确定最优旋转角的范围

[0063] 针对某个旋转角 φ 下的阵型,获得某个主瓣指向 θ_0 下的波束图,可以得到该阵型波束图的旁瓣级 $SLL(\varphi, \theta_0)$ 。改变主瓣指向,可以获得某个旋转角下的一组多个不同主瓣指向下的波束图的旁瓣级。改变旋转角,可以获得多组不同旋转角下的波束图的旁瓣级。由公式(3)求出具有不同旋转角的阵型的平均旁瓣级 $\overline{SLL}(\varphi)$ 。由期望的平均旁瓣级 \overline{SLL}_E 的范围确定最优旋转角 φ_E 的范围。其中期望的平均旁瓣级的范围满足:

$$\min \{ \overline{SLL}(\varphi) \} \leq \overline{SLL}_E \leq \frac{2 \times \min \{ \overline{SLL}(\varphi) \} + \max \{ \overline{SLL}(\varphi) \}}{3}, \quad \min \{ \overline{SLL}(\varphi) \}$$

代表在不同旋转角对应的平均旁瓣级中最小的平均旁瓣级, $\max \{ \overline{SLL}(\varphi) \}$ 代表在不同旋转角对应的平均旁瓣级中最大的平均旁瓣级。则最优旋转角范围 φ_E 可由下列集合确定:

$\varphi_E \in \{ \varphi_E | \overline{SLL}(\varphi_E) \leq \overline{SLL}_E \}$,其中 \in 表示属于, $\{ \varphi_E | \overline{SLL}(\varphi_E) \leq \overline{SLL}_E \}$ 表示使得平均旁瓣级 $\overline{SLL}(\varphi_E)$ 小于等于期望旁瓣级 \overline{SLL}_E 的最优旋转角 φ_E 的集合。

[0064] 感兴趣的主瓣指向角满足 $\theta_{0,\min} \leq \theta_0 \leq \theta_{0,\max}$ 。如果选择第一种发射阵型,最小的主瓣指向角 $\theta_{0,\min}$ 满足 $0^\circ \leq \theta_{0,\min} \leq 360^\circ - \min \{ [360/M, 360/N], 360 \}^\circ$,如果选择第二种发射阵型,最小的主瓣指向角 $\theta_{0,\min}$ 满足 $0^\circ \leq \theta_{0,\min} \leq 360^\circ - \min \{ [360/(M-1), 360/N], 360 \}^\circ$ 。其中 $\min \{ a, b \}$ 表示取括号内的数 a, b 的最小值, $[a, b]$ 表示求括号内的数 a, b 的最小公倍数, M 是发射阵元个数, N 是接收阵元个数。最大的主瓣指向角 $\theta_{0,\max}$ 由公式(1)确定,不同主瓣指向下的波束图个数 K 由公式(2)决定。

[0065] 主瓣指向角的最大值 $\theta_{0,\max}$ 可表示为:

[0066]

$$\theta_{0,\max} = \begin{cases} \theta_{0,\min} + \min \{ [360/M, 360/N], 360 \}^\circ - \Delta\theta_0, & \text{选择第一种发射阵型} \\ \theta_{0,\min} + \min \{ [360/(M-1), 360/N], 360 \}^\circ - \Delta\theta_0, & \text{选择第二种发射阵型} \end{cases} \quad (1)$$

[0067] 其中, $\min \{ a, b \}$ 表示取括号内的数 a, b 的最小值, $[a, b]$ 表示求括号内的数 a, b 的最小公倍数, $\Delta\theta_0$ 是感兴趣的主瓣指向角的变化间隔, $0^\circ \leq \Delta\theta_0 \leq 5^\circ$ 。

[0068] 在某个旋转角 φ 下所能获得的波束图的个数 K 可表示为:

$$[0069] \quad K = \left\langle \frac{\theta_{0,\max} - \theta_{0,\min}}{\Delta\theta_0} \right\rangle + 1 \quad (2)$$

[0070] 其中, $\langle \rangle$ 表示用四舍五入的方法取整数的运算。

[0071] 平均旁瓣级 $\overline{SSL}(\varphi)$ 可表示为:

$$[0072] \quad \overline{SSL}(\varphi) = \frac{\sum_{\theta_0=\theta_{0,\min}}^{\theta_{0,\max}} SSL(\varphi, \theta_0)}{K} \quad (3)$$

[0073] 以某个旋转角下的阵型为例,给出其在某个主瓣指向角下的波束图和波束旁瓣级的计算过程。

[0074] 以坐标原点为参考点, M元发射圆环阵对 θ_j 方向的响应向量 $a_t(u)$ 可表示为 $M \times 1$ 维列向量:

$$[0075] \quad a_t(u_j) = \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda} [x_{t,1}u_j, x_{t,2}u_j, \dots, x_{t,t}u_j, \dots, x_{t,M}u_j]^T \right\} \quad (4)$$

[0076] 其中, $x_{t,i}$ 为第 i ($i=1, 2, \dots, M$) 个发射阵元的位置坐标:

$$[0077] \quad x_{t,i} = [x_{t,i}, y_{t,i}] \quad (5)$$

[0078] u_j 是方位角 θ_j 对应的方向向量:

$$[0079] \quad u_j = [\cos\theta_j, \sin\theta_j]^T \quad (6)$$

[0080] $[\]^T$ 代表转置, 下标 t 表示发射, $x_{t,i}$ 为第 i ($i=1, 2, \dots, M$) 个发射阵元沿 x 轴方向的坐标, $y_{t,i}$ 为第 i ($i=1, 2, \dots, M$) 个发射阵元沿 y 轴方向的坐标, λ 为信号中心频率所对应波长。

[0081] 以坐标原点为参考点, N元接收圆环阵对 θ_j 方向的响应向量 $a_r(u_j)$ 可表示为 $N \times 1$ 维列向量:

$$[0082] \quad a_r(u_j) = \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda} [x_{r,1}u_j, x_{r,2}u_j, \dots, x_{r,i}u_j, \dots, x_{r,N}u_j]^T \right\} \quad (7)$$

[0083] 其中, $x_{r,i}$ 为第 i ($i=1, 2, \dots, N$) 个接收阵元的位置坐标:

$$[0084] \quad x_{r,i} = [x_{r,i}, y_{r,i}] \quad (8)$$

[0085] 下标 r 表示接收, $x_{r,i}$ 为第 i ($i=1, 2, \dots, N$) 个接收阵元沿 x 轴方向的坐标, $y_{r,i}$ 为第 i ($i=1, 2, \dots, N$) 个接收阵元沿 y 轴方向的坐标。

[0086] MIMO声纳的发射与接收联合阵列对 θ_j 方向的响应向量 $a_{tr}(u_j)$ 可表示为(刘雄厚, 孙超, 杨益新, 卓颀. 单基地多输入多输出声纳的方位分辨力[J]. 声学学报, 2016, 第41卷(第2期): 163-173):

$$[0087] \quad a_{tr}(u_j) = a_t(u_j) \otimes a_r(u_j) \quad (9)$$

[0088] 其中, 下标 tr 表示发射与接收, \otimes 表示Hadamard积, 即: MIMO声纳的响应向量为发射阵列的响应向量与接收阵列的响应向量的直积。

[0089] 当主瓣指向角为 θ_0 时, 使用加权向量 $w(u_0)$ 进行波束形成, 可以得到波束图:

$$[0090] \quad B_{MIMO}(u; u_0) = w(u_0)^H a_{tr}(u)$$

$$[0091] \quad (10)$$

[0092] 其中, $[\]^H$ 代表共轭转置, u 是空间扫描角度 θ 的方向向量, u_0 是主瓣指向角 θ_0 的方向向量, $w(u_0)$ 是在主瓣指向角为 θ_0 时, 波束形成的加权系数, $a_{tr}(u)$ 是MIMO声纳对空间扫描角

度 θ 的响应向量。

[0093] 以波束旁瓣最低作为优化目标,加权系数 $w(u_0)$ 可以通过求解以下最优化问题得到

$$\begin{aligned}
 & \min_w \quad \max_{|\theta-\theta_0| \geq BW_{SL}/2} |B_{MIMO}(u; u_0)| \\
 [0094] \quad & s.t. \quad \mathbf{w}(u_0)^H \mathbf{a}_r(u_0) = 1 \\
 & \quad \quad \|\mathbf{w}(u_0)\|_2 \leq T_0
 \end{aligned} \tag{11}$$

[0095] 其中, $\mathbf{a}_{tr}(u_0)$ 是MIMO声纳对主瓣指向 θ_0 的响应向量, θ 是空间扫描角度, BW_{SL} 是主瓣宽度, $\|\mathbf{w}(u_0)\|_2$ 代表加权系数的2-范数, T_0 是加权系数2-范数的约束系数。

[0096] 搜索主瓣以外方向上波束形成的输出,其最大值就是此波束图的旁瓣级SLL,计算公式如下:

$$[0097] \quad SLL = \max_{|\theta-\theta_0| \geq BW_{SL}/2} |B_{MIMO}(u; u_0)| \tag{12}$$

[0098] 4) 确定具有低波束旁瓣的MIMO声纳阵型

[0099] 由步骤1) 设计出发射阵、接收阵(包括基本阵型、阵元数、阵列半径)和两者之间的间距 L_D ,由步骤3) 设计出在此基础上的最优旋转角的范围。结合步骤1) 和步骤3) 的参数设计出具有最优旋转角的低波束旁瓣的MIMO声纳阵型。

[0100] 以4个不同阵列结构的MIMO声纳(分别对应2种发射阵阵型,每个发射阵阵型下有2个阵列结构)为例,给出本发明的实施实例。

[0101] 步骤1: 根据尺寸约束、阵元个数约束、信号频率确定阵列结构。

[0102] 设发射信号为声波,其在水下的传播速度为1500米/秒,发射信号中心频率 $f=1500\text{Hz}$,对应的波长 $\lambda=1\text{m}$ 。

[0103] 设计以下4个MIMO声纳的阵列结构。发射圆环阵和接收圆环阵位于两个相互平行的平面中,且这两个平面的间距 $L_D=1.5\text{m}$ 。这4个阵列结构的发射阵元个数 M 、接收阵元个数 N 、发射阵半径 R_t 、接收阵半径 R_r 、所采用的发射阵型以及之后波束形成的主瓣宽度 BW_{SL} 、加权系数 w 的2-范数约束 T_0 如表1所示,并且前两个阵列结构的发射阵半径 R_t 均为接收阵半径 R_r 的1倍,即: $R_t=R_r$;后两个阵列结构的发射阵半径 R_t 均为接收阵半径 R_r 的1.5倍,即: $R_t=1.5R_r$ 。

[0104] 表1

[0105]

| 阵元个数 | 发射阵半径 $R_t(m)$ | 接收阵半径 $R_r(m)$ | 所采用的发射阵型 | 主瓣宽度 $BW_{sl}(^\circ)$ | 加权系数 w 的 2-范数约束 T_0 |
|------------|----------------|----------------|------------------|------------------------|-------------------------|
| M=3 N=6 | 0.4775 | 0.4775 | 第一种阵型 (圆心无阵元) | 56 | 5 |
| M=4 N=6 | 0.4775 | 0.4775 | 第二种阵型 (圆心有阵元) | 42 | 5 |
| M=4 N=8 | 0.9549 | 0.6366 | 第一种阵型 (圆心无阵元) | 28 | 5 |
| M=5 N=8 | 0.9549 | 0.6366 | 第二种阵型 (圆心有阵元) | 28 | 5 |

[0106] 这4个阵列结构的三维视图分别如图3(a)、图3(b)、图3(c)和图3(d)所示,二维俯视图分别如图4(a)、图4(b)、图4(c)和图4(d)所示。

[0107] 2) 在步骤1)设计的阵列结构的基础上,设计具有不同旋转角的阵型

[0108] 当 $N=6$ 时,令 $0 \leq \varphi < 360/N=60^\circ$,即: $0^\circ \leq \varphi < 60^\circ$ 。设置感兴趣的旋转角 φ 的变化间隔 $\Delta\varphi=1^\circ$,那么,感兴趣的旋转角 $\varphi=k^\circ, 0 \leq k < 60, k \in Z, Z$ 是整数集。通过改变旋转角 φ 的取值,得到具有不同旋转角的阵型。

[0109] 当 $N=8$ 时,令 $0 \leq \varphi < 360/N=45^\circ$,即: $0^\circ \leq \varphi < 45^\circ$ 。设置感兴趣的旋转角 φ 的变化间隔 $\Delta\varphi=1^\circ$,那么,感兴趣的旋转角 $\varphi=k^\circ, 0 \leq k < 45, k \in Z, Z$ 是整数集。通过改变旋转角 φ 的取值,得到具有不同旋转角的阵型。

[0110] 3) 根据期望的平均旁瓣级的范围,确定最优旋转角的范围

[0111] 当 $M=3, N=6$ 时,取主瓣指向角的最小值 $\theta_{0, \min}=60^\circ$,主瓣指向角的间隔 $\Delta\theta_0=2^\circ$,主瓣指向角的最大值 $\theta_{0, \max}=\theta_{0, \min}+\min\{[360/M, 360/N], 360\}^\circ-\Delta\theta_0=178^\circ$ 。波束形成的次数

$$K = \left\lfloor \frac{\theta_{0, \max} - \theta_{0, \min}}{\Delta\theta_0} \right\rfloor + 1 = \left\lfloor \frac{178 - 60}{2} \right\rfloor + 1 = 60$$

针对步骤2)设计的每个旋转角 φ 下的阵型,做60次不同主瓣指向下的波束形成,得到其在不同主瓣指向下旁瓣级 $SLL(\varphi, \theta_0)$ 如图5所示。由公式(3)求出其平均旁瓣级 $\overline{SLL}(\varphi)$ 如图6所示。根据期望的平均旁瓣级的范围 $-25.05dB \leq \overline{SLL}_E \leq -22.84dB$,确定最优旋转角的范围为 $4^\circ \leq \varphi_E \leq 56^\circ$ 。

[0112] 以旋转角为 29° 的阵型(在最优旋转角的范围内)和旋转角为 0° 的阵型(在最优旋转角的范围外)为例,在不同的主瓣指向角下的波束图如图7所示。其中图(a)是旋转角为 29° 的阵型在不同主瓣指向角下的波束图,图(b)是旋转角为 0° 的阵型在不同主瓣指向角下

的波束图。

[0113] 以旋转角为 29° 的阵型(在最优旋转角的范围内)和旋转角为 0° 的阵型(在最优旋转角的范围外)为例,这两种阵型在 $60^\circ \leq \theta_0 \leq 178^\circ$ 的主瓣指向下,对应的旁瓣级如图8所示。由图7和图8可知,在相同的阵列结构下,本发明所设计的具有最优旋转角的阵型比未经最优化设计的阵型的旁瓣级更低。

[0114] 当 $M=4$ 、 $N=6$ 时,取主瓣指向角的最小值 $\theta_{0,\min}=60^\circ$,主瓣指向角的间隔 $\Delta\theta_0=2^\circ$,最大的主瓣指向 $\theta_{0,\max}=\theta_{0,\min}+\min\{[360/(M-1), 360/N], 360\}^\circ-\Delta\theta_0=178^\circ$ 。波束形成的次数

$$K = \left\langle \frac{\theta_{0,\max} - \theta_{0,\min}}{\Delta\theta_0} \right\rangle + 1 = \left\langle \frac{178 - 60}{2} \right\rangle + 1 = 60$$

针对步骤2)设计的每个旋转角 φ 下的阵型,做60次不同主瓣指向下的波束形成,得到其在不同主瓣指向下旁瓣级 $SLL(\varphi, \theta_0)$ 如图9所示。由公式(3)求出其平均旁瓣级 $\overline{SLL}(\varphi)$ 如图10所示。根据期望的平均旁瓣级的范围 $-23.33dB \leq \overline{SLL}_E \leq -21.39dB$,确定最优旋转角的范围为 $7^\circ \leq \varphi_E \leq 53^\circ$ 。

[0115] 以旋转角为 30° 的阵型(在最优旋转角的范围内)和旋转角为 0° 的阵型(在最优旋转角的范围外)为例,在不同的主瓣指向角下的波束图如图11所示。其中图(a)是旋转角为 30° 的阵型在不同主瓣指向角下的波束图,图(b)是旋转角为 0° 的阵型在不同主瓣指向角下的波束图。

[0116] 以旋转角为 30° 的阵型(在最优旋转角的范围内)和旋转角为 0° 的阵型(在最优旋转角的范围外)为例,这两种阵型在 $60^\circ \leq \theta_0 \leq 178^\circ$ 的主瓣指向下,对应的旁瓣级如图12所示。由图11和图12可知,在相同的阵列结构下,本发明所设计的具有最优旋转角的阵型比未经最优化设计的阵型的旁瓣级更低。

[0117] 当 $M=4$ 、 $N=8$ 时,取主瓣指向角的最小值 $\theta_{0,\min}=90^\circ$,主瓣指向角的间隔 $\Delta\theta_0=2^\circ$,主瓣指向角的最大值 $\theta_{0,\max}=\theta_{0,\min}+\min\{[360/M, 360/N], 360\}^\circ-\Delta\theta_0=178^\circ$ 。波束形成的次数

$$K = \left\langle \frac{\theta_{0,\max} - \theta_{0,\min}}{\Delta\theta_0} \right\rangle + 1 = \left\langle \frac{178 - 90}{2} \right\rangle + 1 = 45$$

针对步骤2)设计的每个旋转角 φ 下的阵型,做45次不同主瓣指向下的波束形成,得到其在不同主瓣指向下旁瓣级 $SLL(\varphi, \theta_0)$ 如图13所示。由公式(3)求出其平均旁瓣级 $\overline{SLL}(\varphi)$ 如图14所示。根据期望的平均旁瓣级的范围 $-24.09dB \leq \overline{SLL}_E \leq -23.77dB$,确定最优旋转角的范围为 $4^\circ \leq \varphi_E \leq 41^\circ$ 。

[0118] 以旋转角为 34° 的阵型(在最优旋转角的范围内)和旋转角为 0° 的阵型(在最优旋转角的范围外)为例,在不同的主瓣指向角下的波束图如图15所示。其中图(a)是旋转角为 34° 的阵型在不同主瓣指向角下的波束图,图(b)是旋转角为 0° 的阵型在不同主瓣指向角下的波束图。

[0119] 以旋转角为 34° 的阵型(在最优旋转角的范围内)和旋转角为 0° 的阵型(在最优旋转角的范围外)为例,这两种阵型在 $90^\circ \leq \theta_0 \leq 178^\circ$ 的主瓣指向下,对应的旁瓣级如图16所示。由图15和图16可知,在相同的阵列结构下,本发明所设计的具有最优旋转角的阵型比未经最优化设计的阵型的旁瓣级更低。

[0120] 当 $M=5$ 、 $N=8$ 时,取主瓣指向角的最小值 $\theta_{0,\min}=90^\circ$,主瓣指向角的间隔 $\Delta\theta_0=2^\circ$,最大的主瓣指向 $\theta_{0,\max}=\theta_{0,\min}+\min\{[360/(M-1),360/N],360\}^\circ-\Delta\theta_0=178^\circ$ 。波束形成的次数

$$K=\left\lceil\frac{\theta_{0,\max}-\theta_{0,\min}}{\Delta\theta_0}\right\rceil+1=\left\lceil\frac{178-90}{2}\right\rceil+1=45$$

针对步骤2)设计的每个旋转角 φ 下的阵型,做45次不同主瓣指向下的波束形成,得到其在不同主瓣指向下旁瓣级 $SLL(\varphi,\theta_0)$ 如图17所示。由公式(3)求出其平均旁瓣级 $\overline{SLL}(\varphi)$ 如图18所示。根据期望的平均旁瓣级的范围 $-24.32dB\leq\overline{SLL}_E\leq-24.04dB$,确定最优旋转角的范围为 $5^\circ\leq\varphi_E\leq40^\circ$ 。

[0121] 以旋转角为 30° 的阵型(在最优旋转角的范围内)和旋转角为 0° 的阵型(在最优旋转角的范围外)为例,在不同的主瓣指向角下的波束图如图19所示。其中图(a)是旋转角为 30° 的阵型在不同主瓣指向角下的波束图,图(b)是旋转角为 0° 的阵型在不同主瓣指向角下的波束图。

[0122] 以旋转角为 30° 的阵型(在最优旋转角的范围内)和旋转角为 0° 的阵型(在最优旋转角的范围外)为例,这两种阵型在 $90^\circ\leq\theta_0\leq178^\circ$ 的主瓣指向下,对应的旁瓣级如图20所示。由图19和图20可知,在相同的阵列结构下,本发明所设计的具有最优旋转角的阵型比未经最优化设计的阵型的旁瓣级更低。

[0123] 步骤4:确定具有低波束旁瓣的MIMO声纳阵型

[0124] 由步骤1)设计出4种发射阵、接收阵(包括基本阵型、阵元数、阵列半径)和两者之间的间距 L_D ,由步骤3)设计出这4种阵列结构分别对应的最优旋转角的范围如表2所示。结合二者的参数设计出具有低波束旁瓣的MIMO声纳阵型。其中, $[\]$ 代表闭区间, $[a,b]$ 代表大于等于a且小于等于b的集合。

[0125] 表2

[0126]

| 阵型 | 最优旋转角范围($^\circ$) | 最优旋转角的平均旁瓣级范围(dB) |
|------|---------------------|-------------------|
| 3发6收 | [4,56] | [-25.05,-22.84] |
| 4发6收 | [7,53] | [-23.33,-21.39] |
| 4发8收 | [4,41] | [-24.09,-23.77] |
| 5发8收 | [5,40] | [-24.32,-24.04] |

[0127] 在第一种3发6收的阵列结构下,最优旋转角的范围为 $4^\circ\leq\varphi_E\leq56^\circ$ 。最优阵型的旋转角在 $[4^\circ,56^\circ]$ 之间,以具有旋转角为 29° 的阵型为例,其阵型如图21所示,其中图(a)是该阵型的三维视图,图(b)是该阵型的二维俯视图。

[0128] 在第二种4发6收的阵列结构下,最优旋转角的范围为 $7^\circ\leq\varphi_E\leq53^\circ$ 。最优阵型的旋转角在 $[7^\circ,53^\circ]$ 之间,以具有旋转角为 30° 的阵型为例,其阵型如图22所示,其中图(a)是该阵型的三维视图,图(b)是该阵型的二维俯视图。

[0129] 在第三种4发8收的阵列结构下,最优旋转角的范围为 $4^\circ\leq\varphi_E\leq41^\circ$ 。最优阵型的

旋转角在 $[4^\circ, 41^\circ]$ 之间,以具有旋转角为 34° 的阵型为例,其阵型如图23所示,其中图(a)是该阵型的三维视图,图(b)是该阵型的二维俯视图。

[0130] 在第四种5发8收的阵列结构下,最优旋转角的范围为 $5^\circ \leq \varphi_E \leq 40^\circ$ 。最优阵型的旋转角在 $[5^\circ, 40^\circ]$ 之间,以具有旋转角为 30° 的阵型为例,其阵型如图24所示,其中图(a)是该阵型的三维视图,图(b)是该阵型的二维俯视图。

[0131] 根据实施实例,可以认为:本发明中所提出的最优旋转角下的MIMO声纳阵型,可以在相同的阵元个数约束、阵列半径约束、主瓣宽度约束、阵列加权2-范数约束下,比未经优化设计的MIMO声纳阵型具有更低的波束旁瓣。

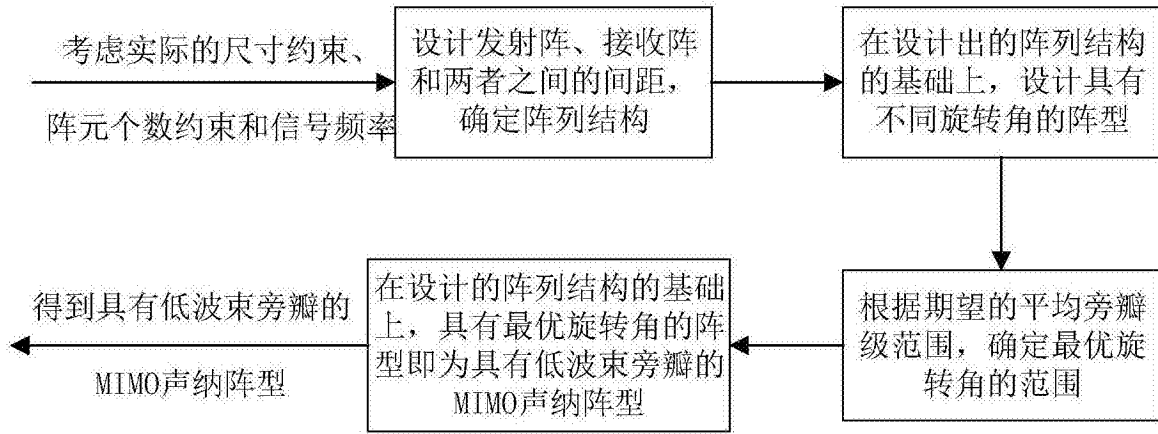


图1

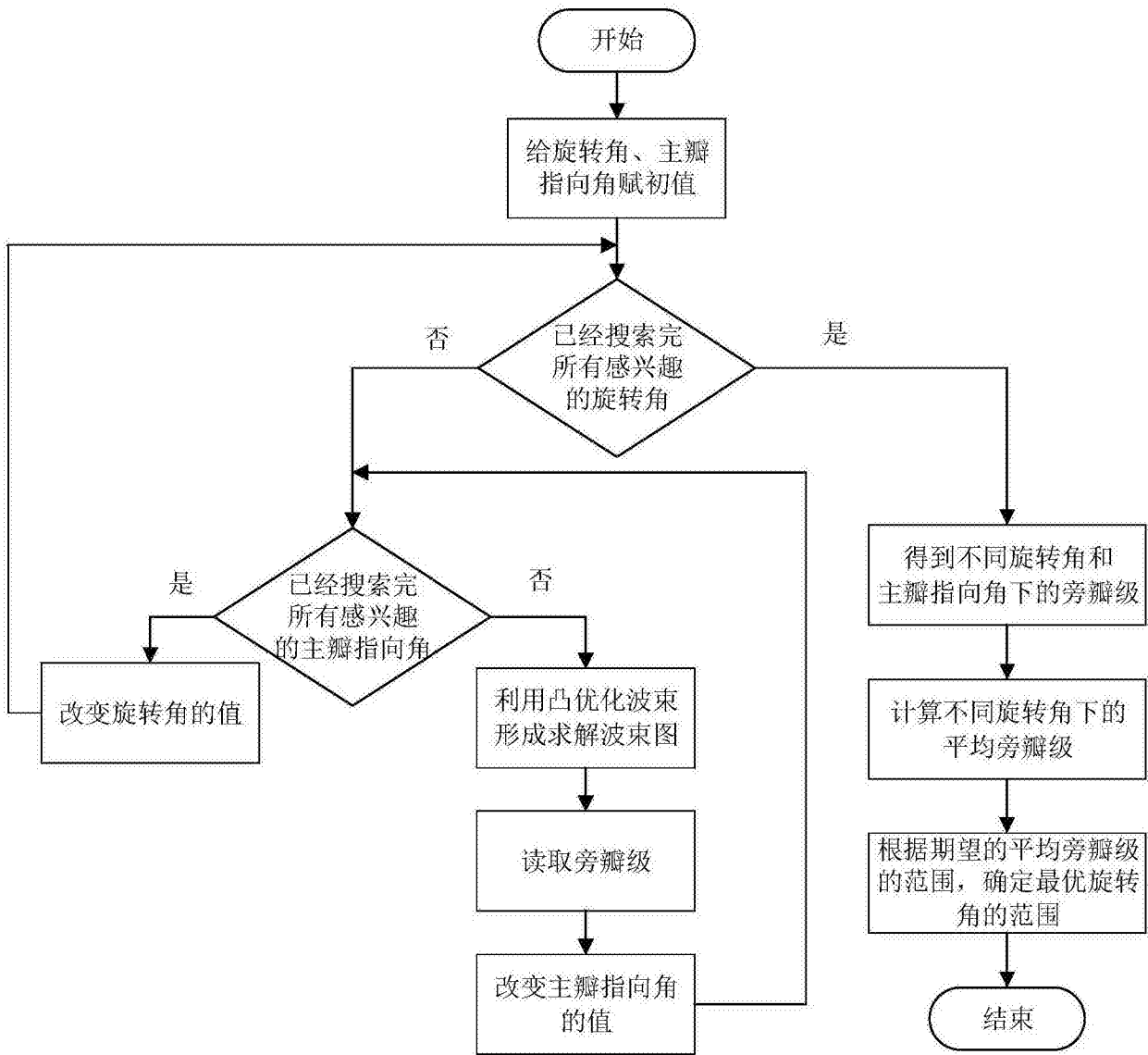


图2

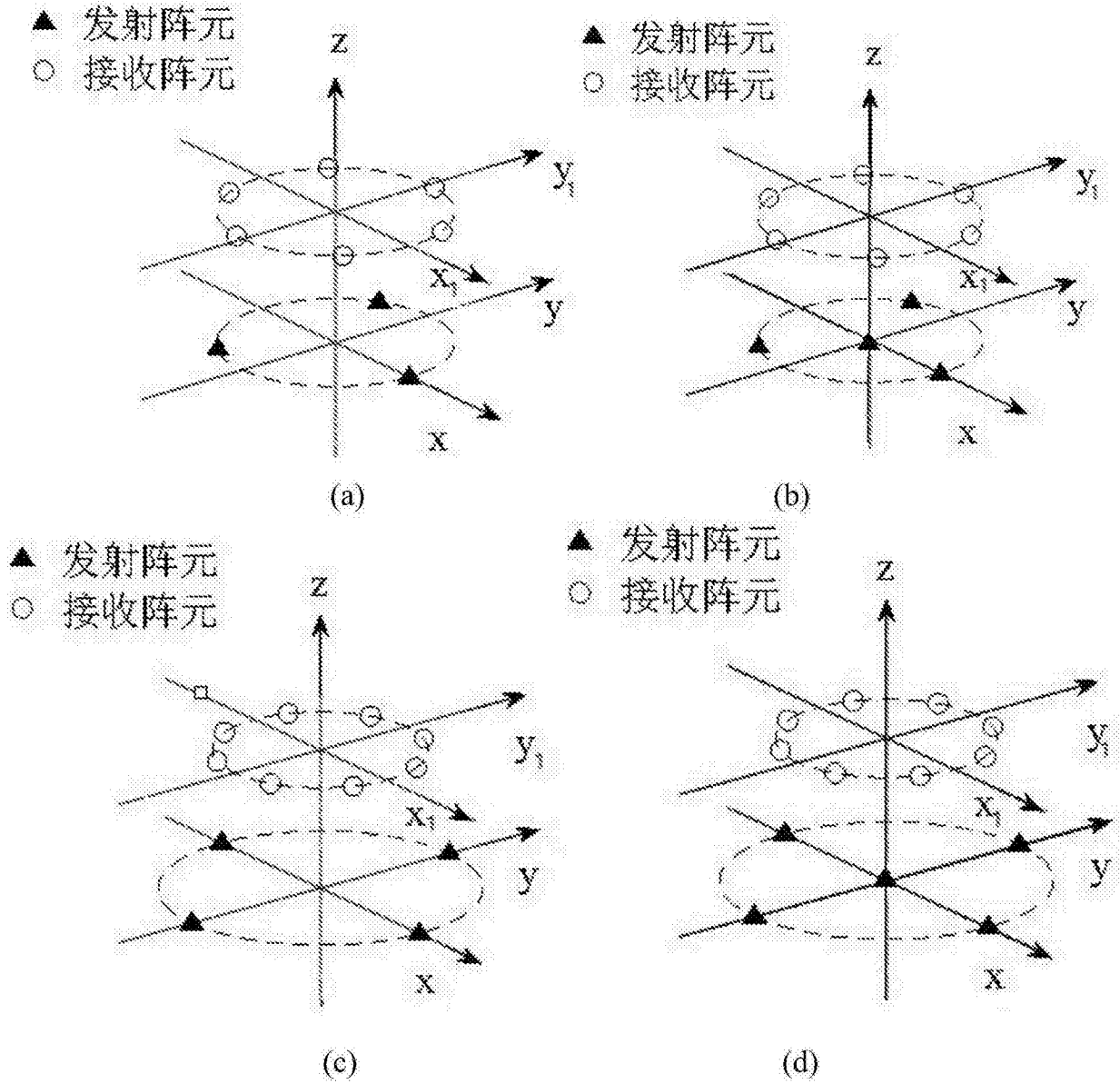


图3

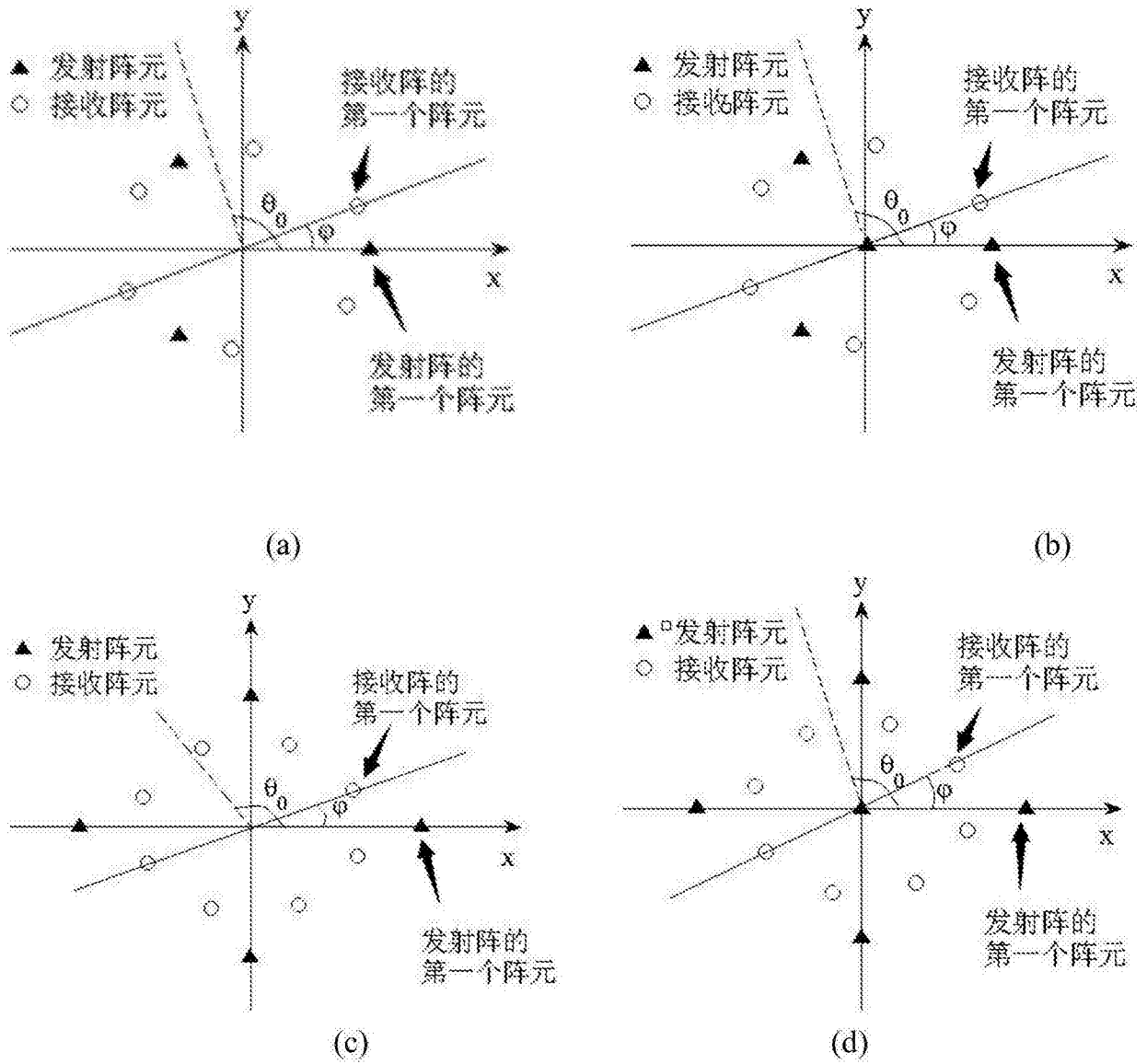


图4

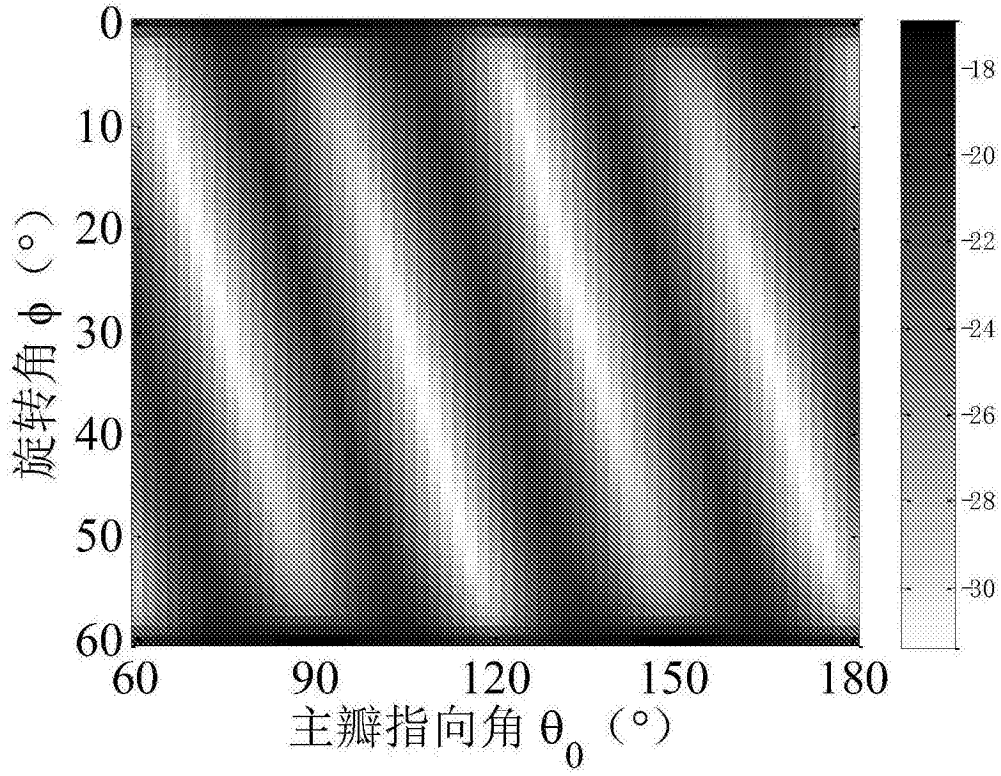


图5

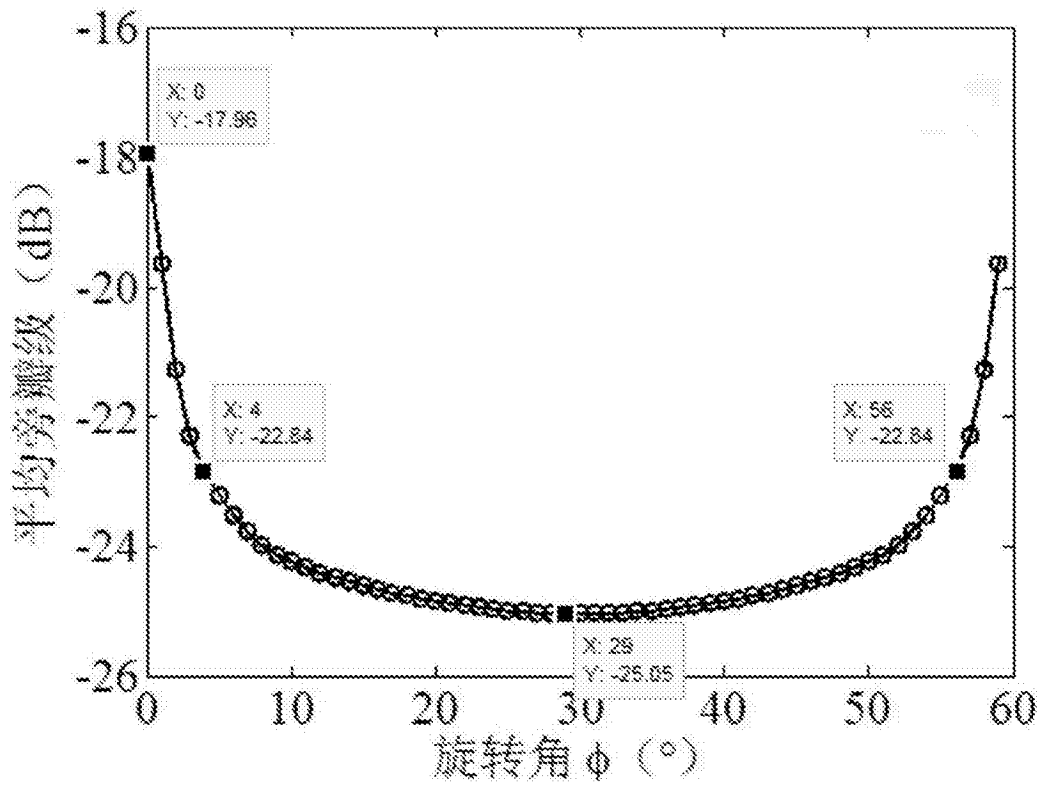


图6

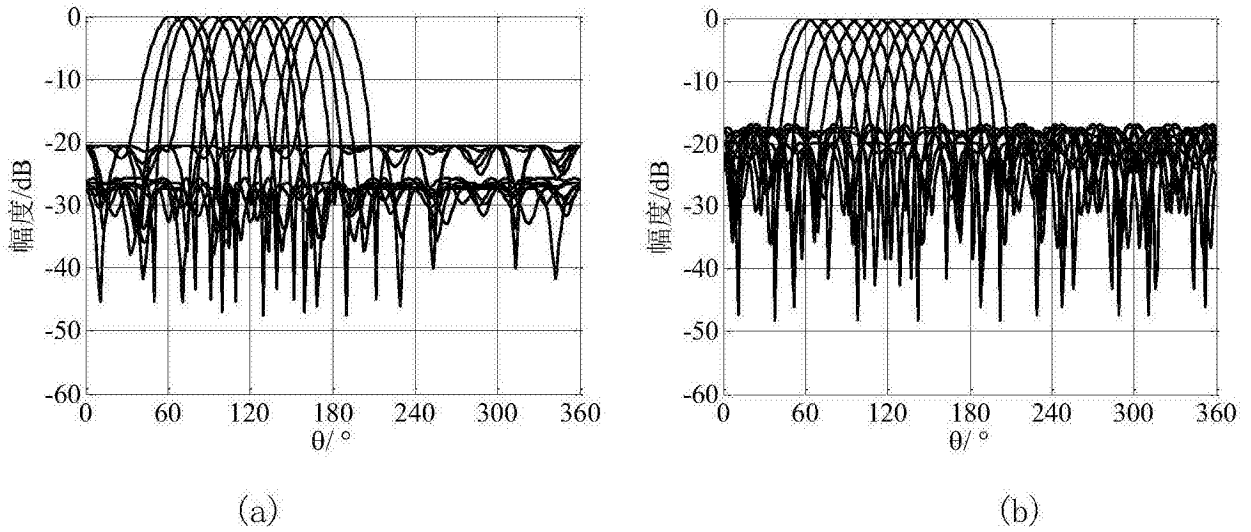


图7

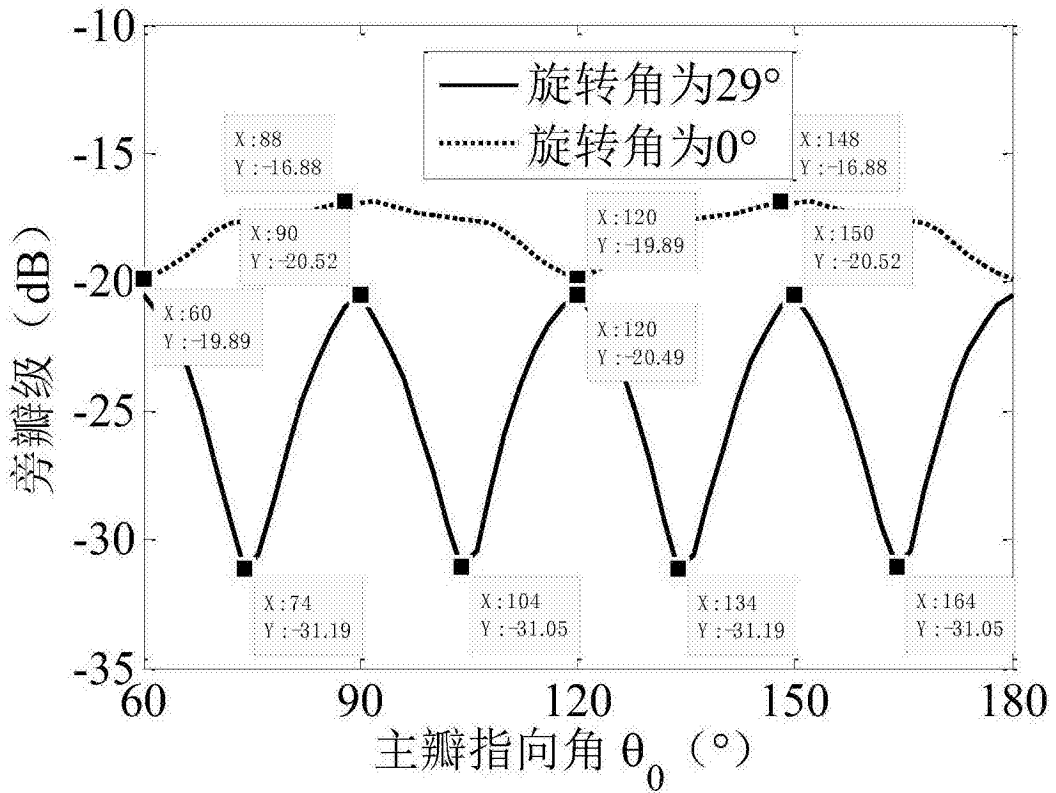


图8

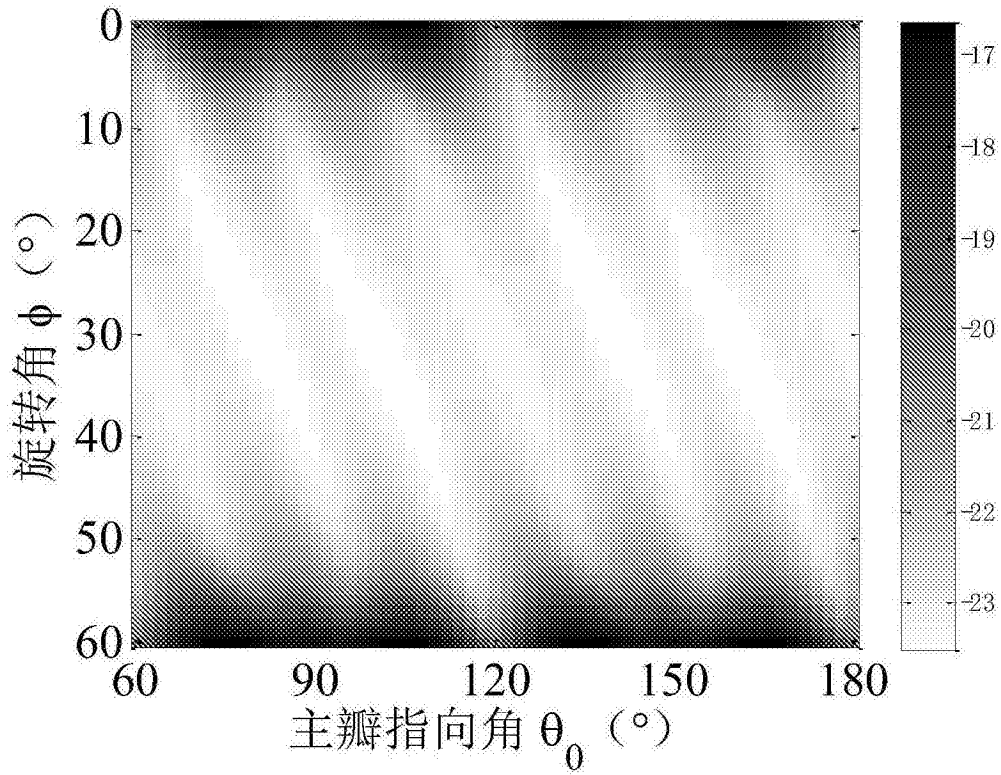


图9

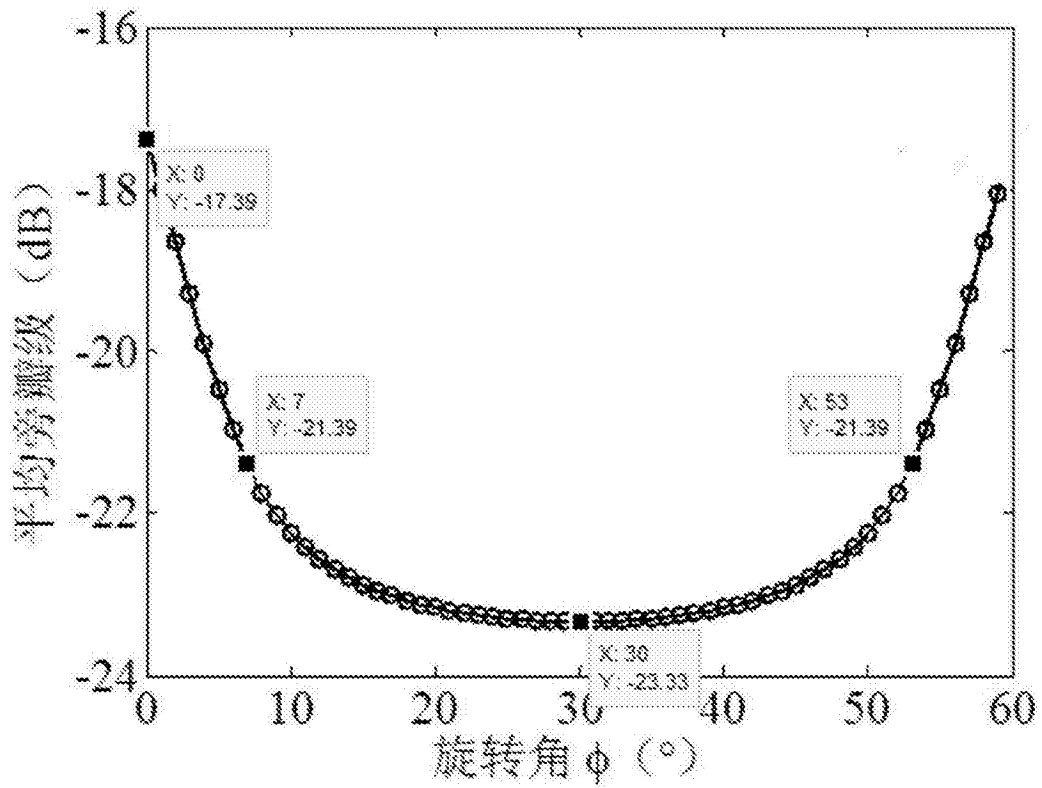


图10

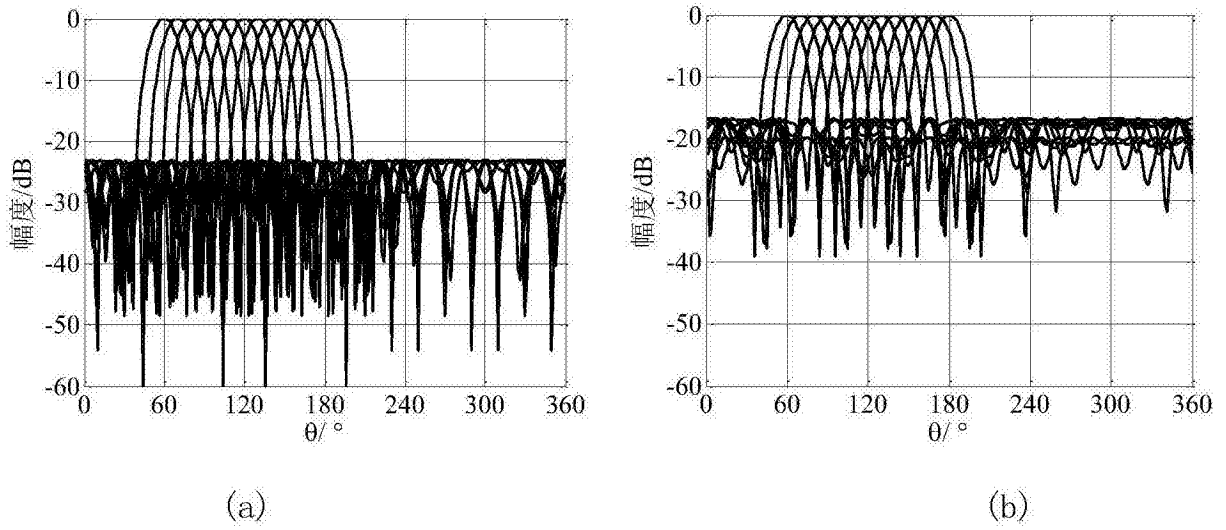


图11

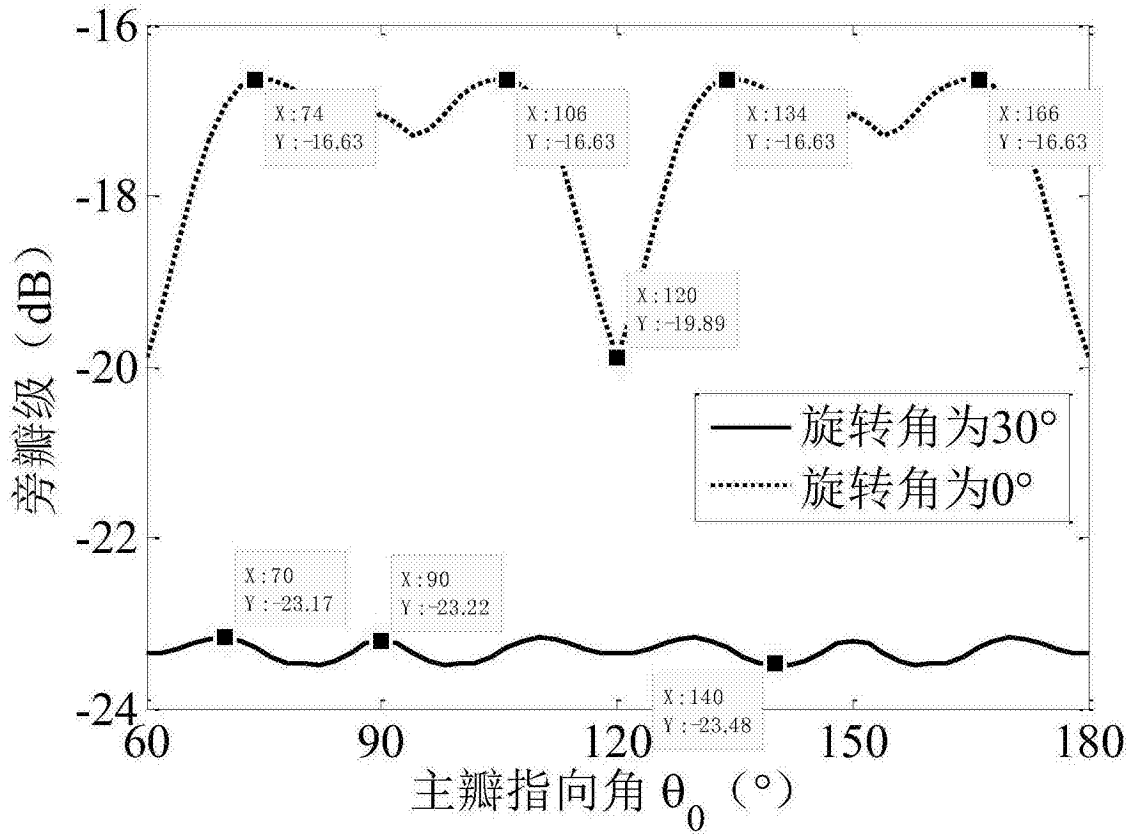


图12

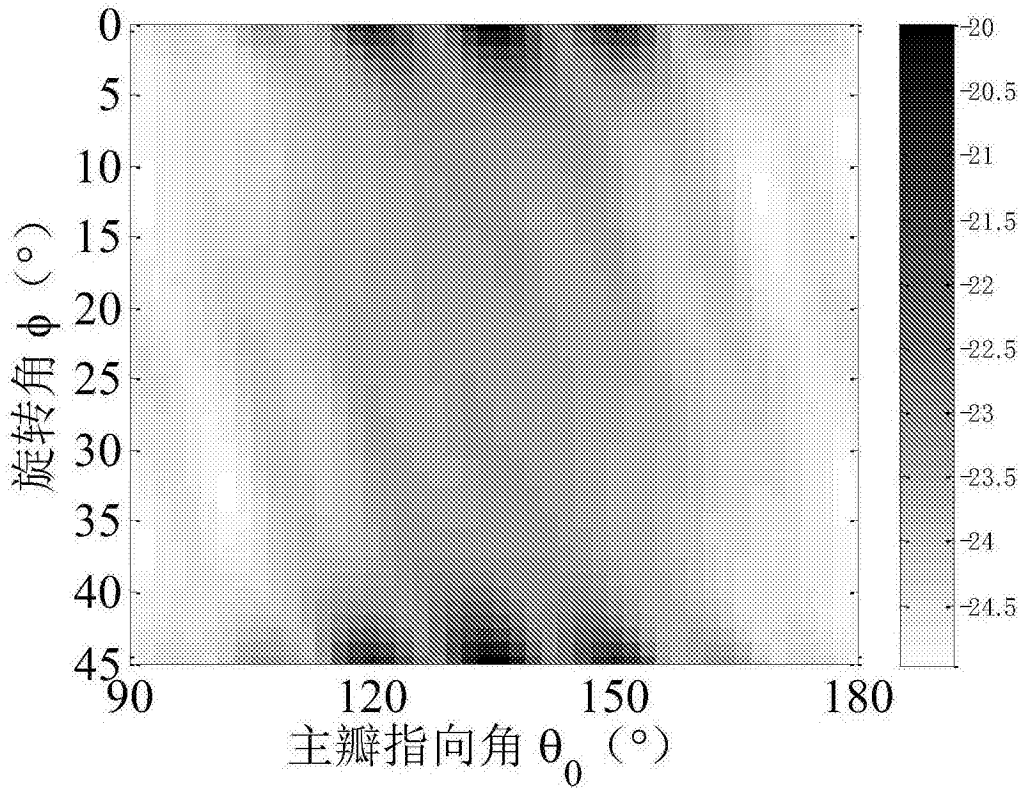


图13

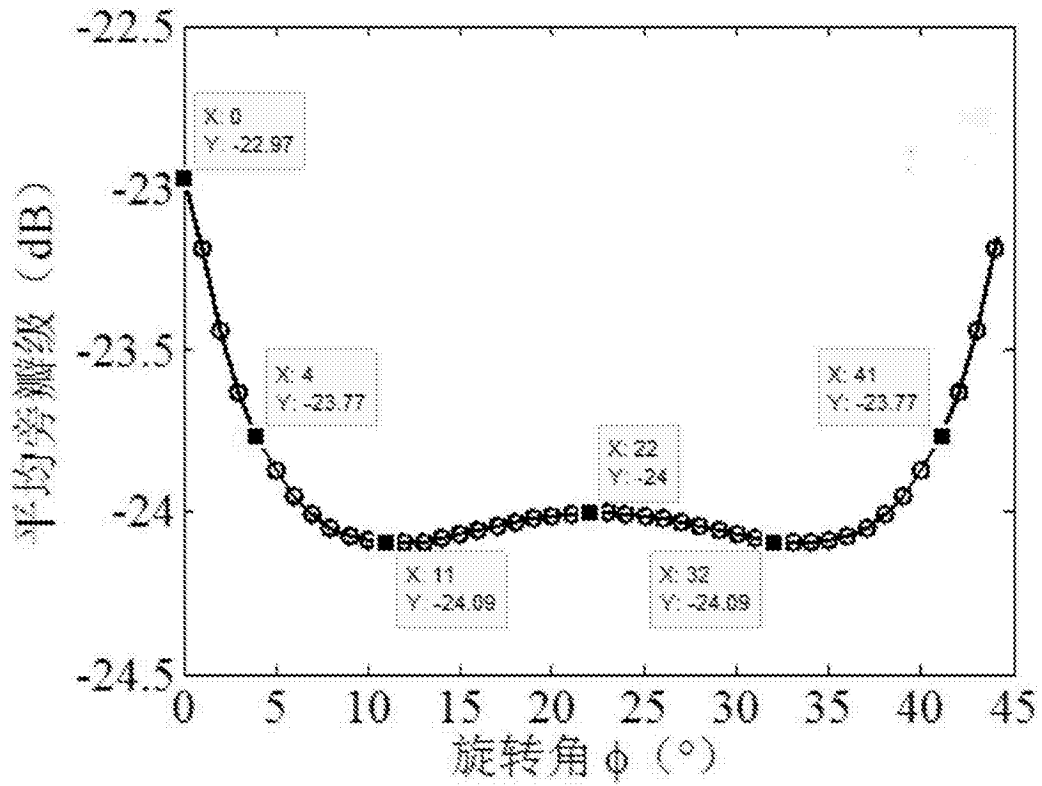


图14

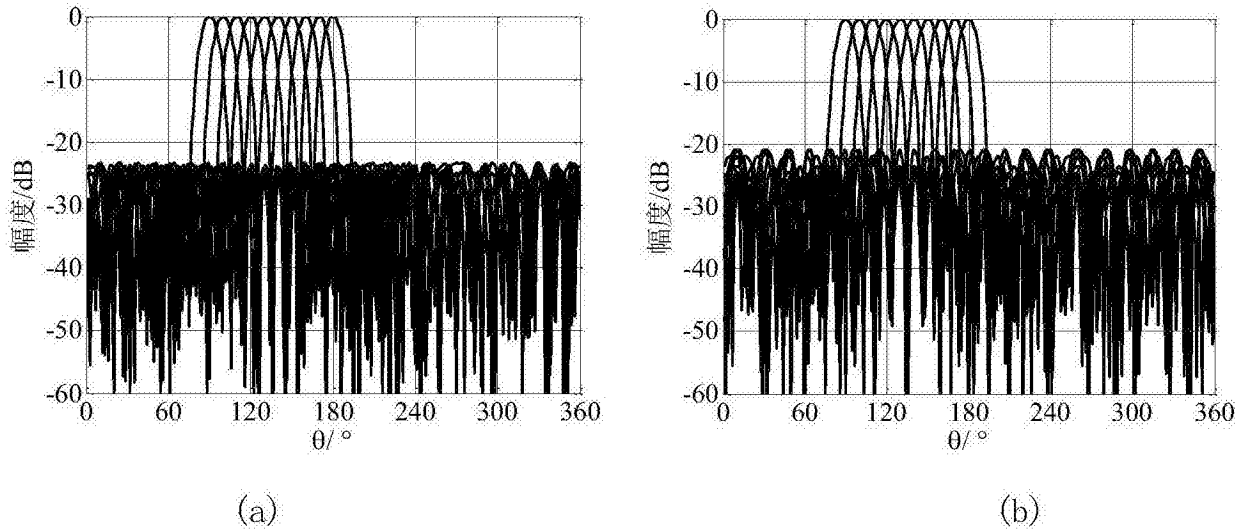


图15

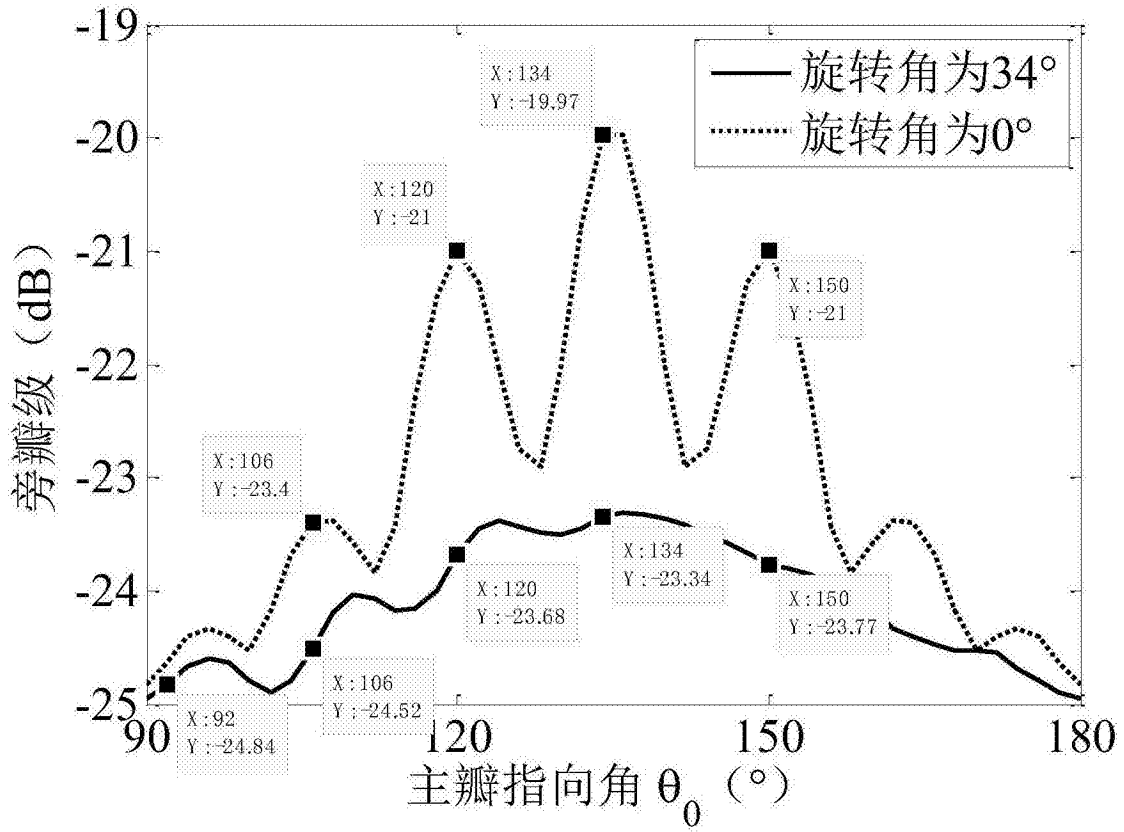


图16

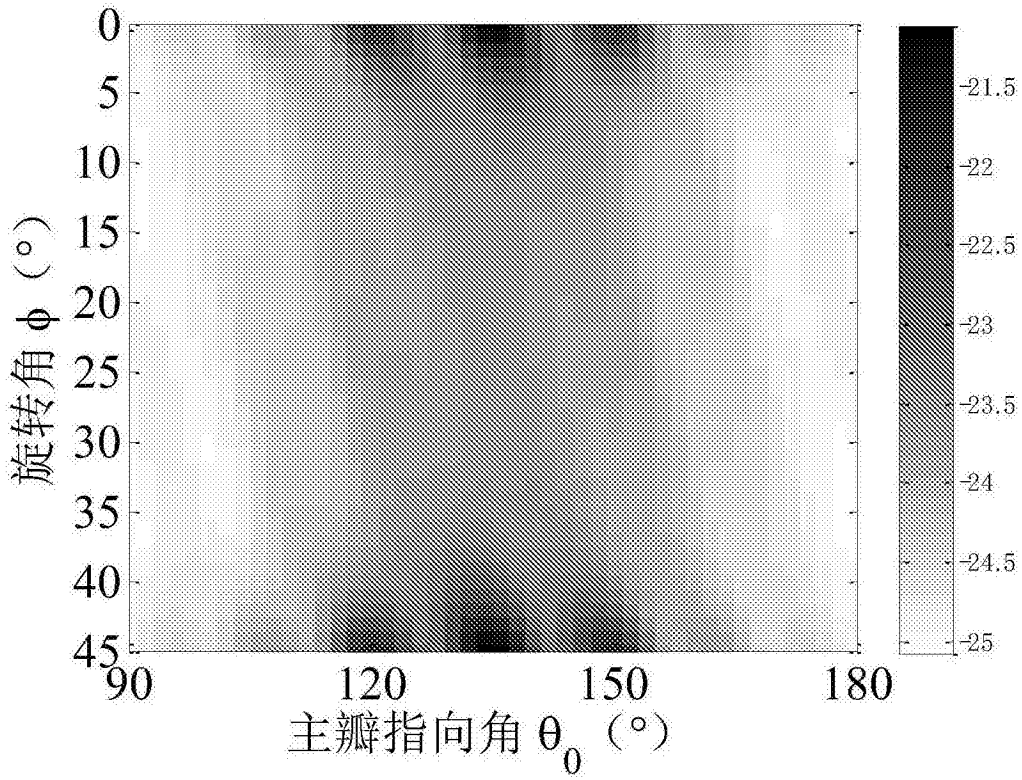


图17

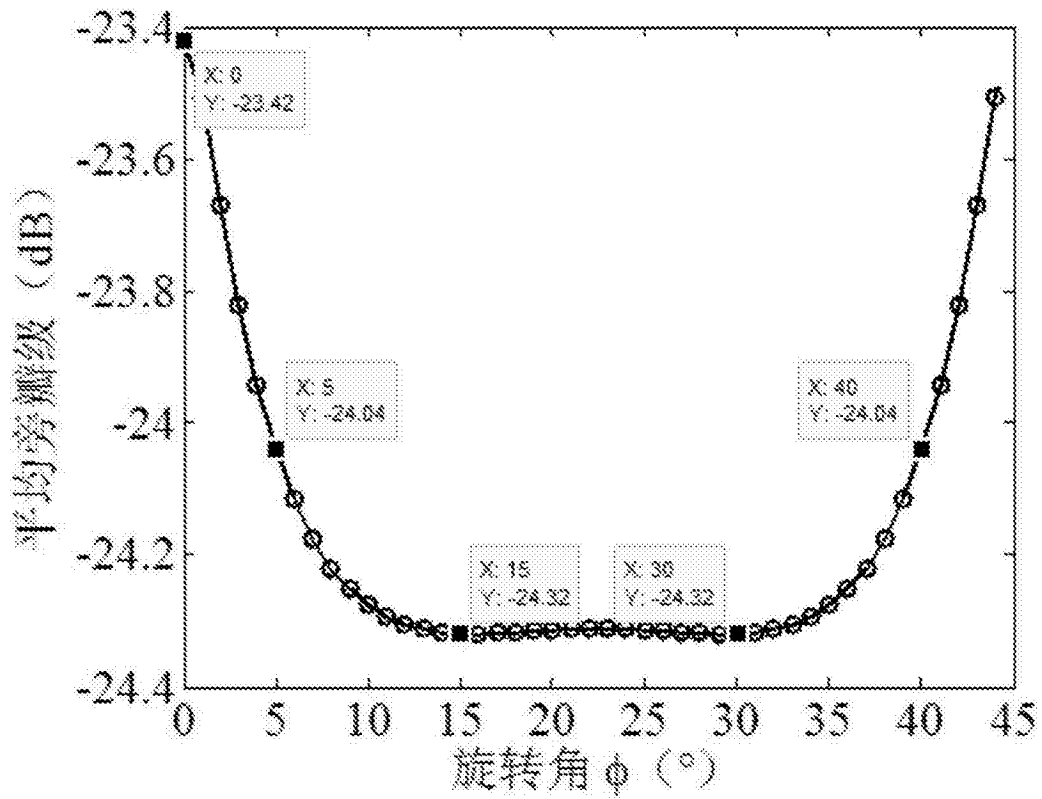


图18

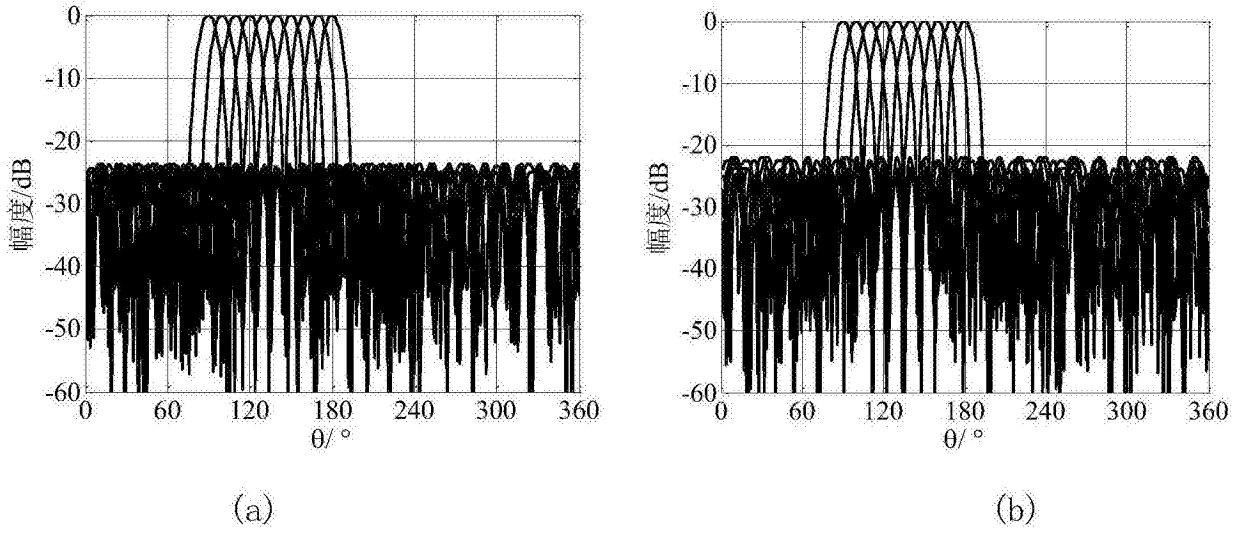


图19

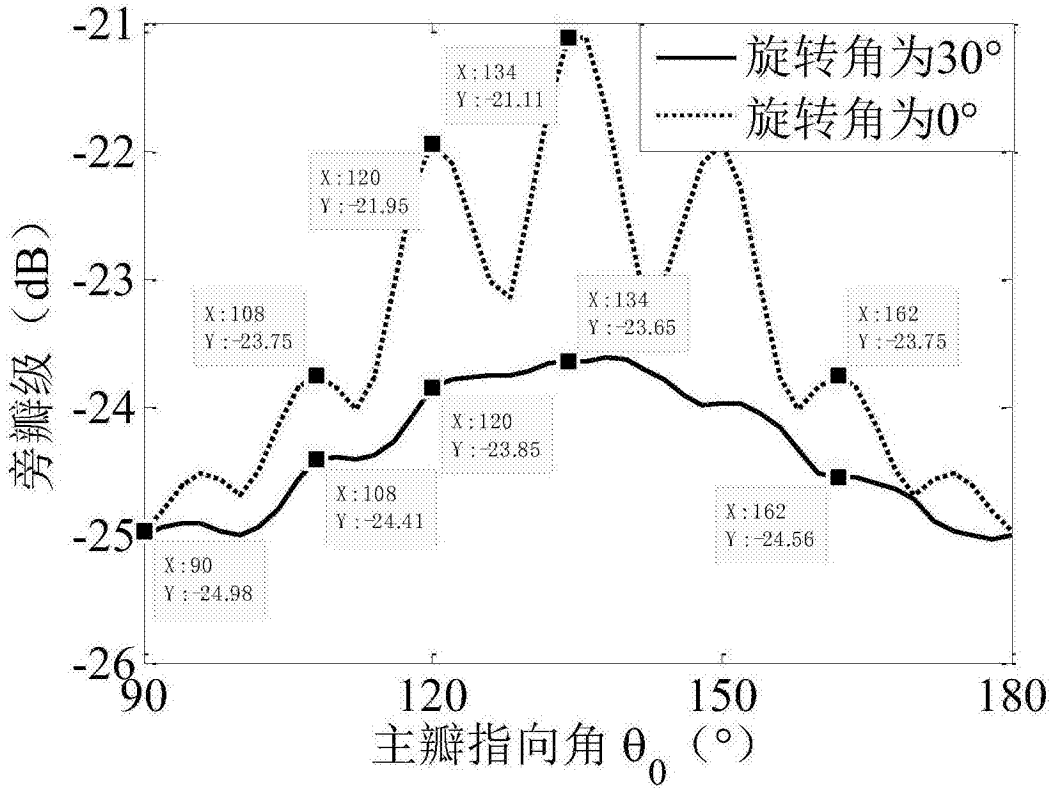
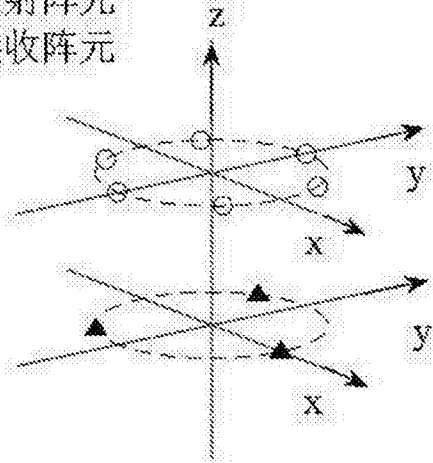
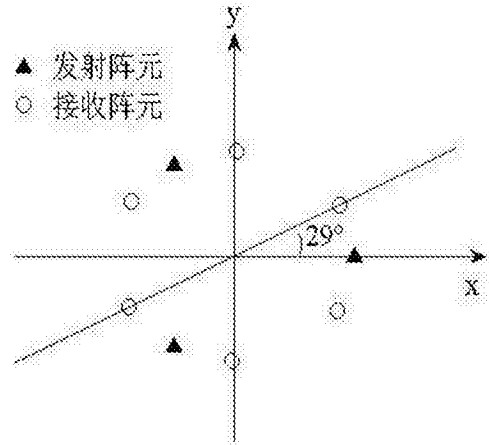


图20

▲ 发射阵元
○ 接收阵元



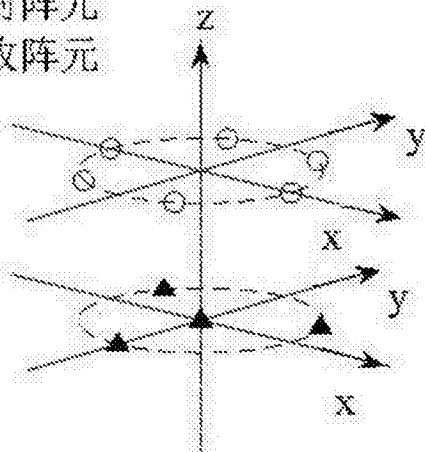
(a)



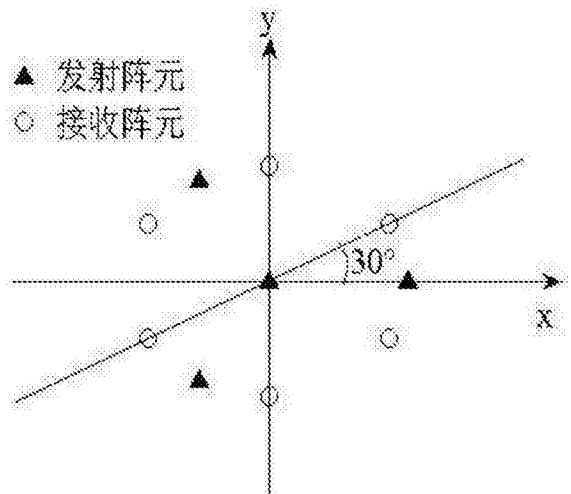
(b)

图21

▲ 发射阵元
○ 接收阵元



(a)



(b)

图22

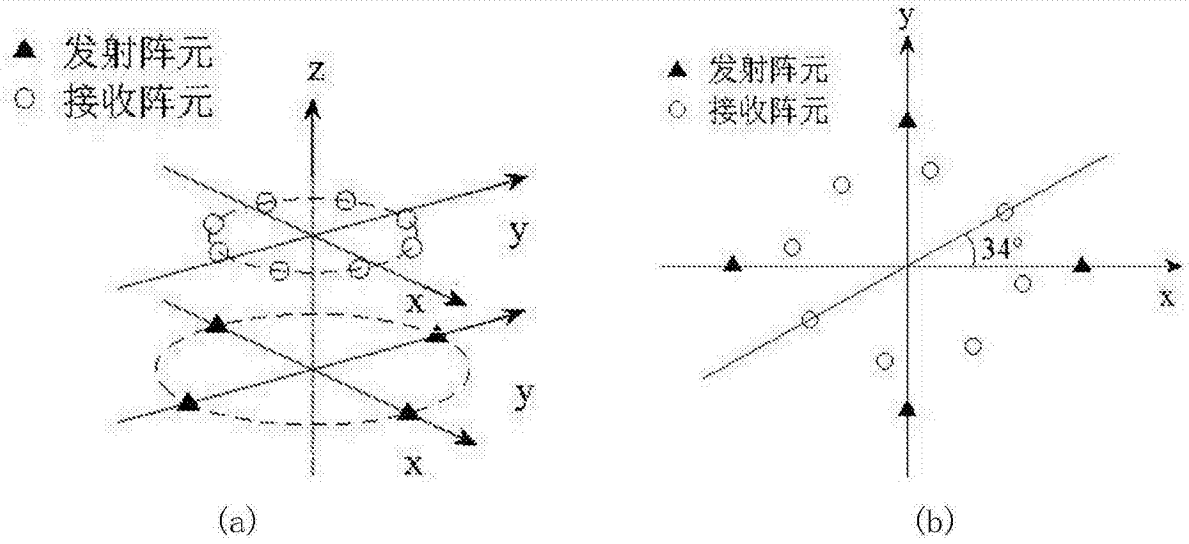


图23

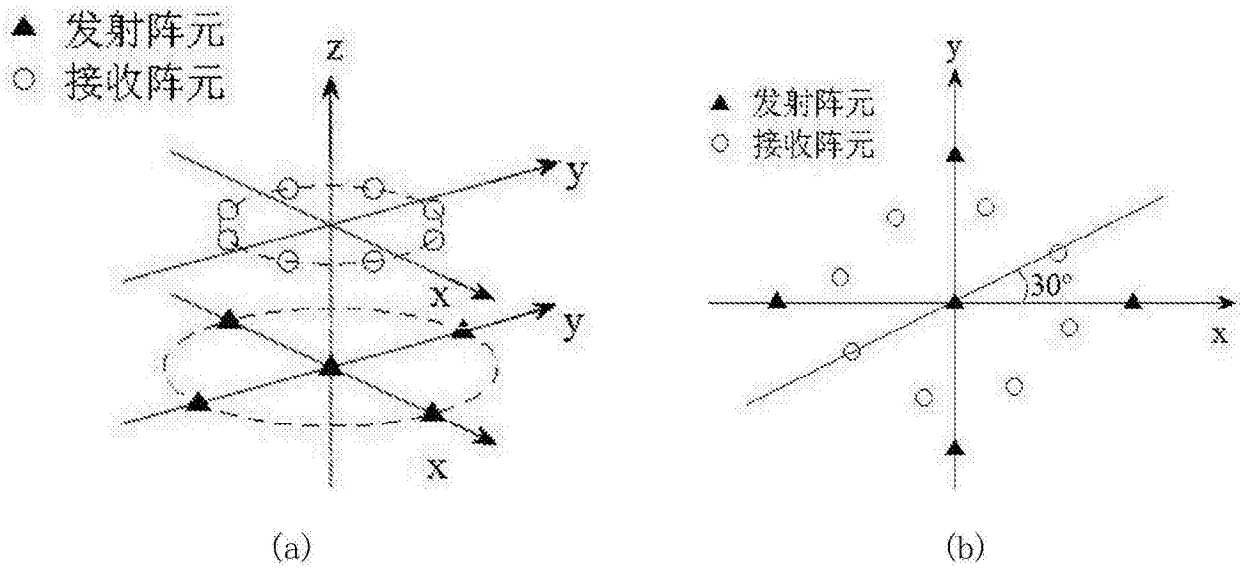


图24