



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103207380 B

(45) 授权公告日 2014. 10. 01

(21) 申请号 201310078902. 2

(22) 申请日 2013. 03. 12

(73) 专利权人 西安电子科技大学

地址 710071 陕西省西安市太白南路 2 号

(72) 发明人 赵光辉 刘自成 王学磊 石光明

沈方芳

(74) 专利代理机构 陕西电子工业专利中心

61205

代理人 王品华 朱红星

(51) Int. Cl.

G01S 3/00(2006. 01)

(56) 对比文件

CN 101799535 A, 2010. 08. 11, 全文.

CN 102608588 A, 2012. 07. 25, 全文.

CN 101349742 A, 2009. 01. 21, 全文.

US 2010/0033377 A1, 2010. 02. 11, 全文.

王峰. 基于稀疏分解的宽带信号波达方向估计. 《中国优秀硕士学位论文全文数据库 信息科技辑 I136-92》. 2007, 全文.

Guanghai Zhao 等. Compressive direction finding with robust sparsity prior. 《2011 IEEE CIE International Conference on Radar》. 2011, 全文.

于红旗. 宽带信号阵列高分辨到达角估计技术研究. 《中国博士学位论文全文数据库 信息科技辑 I136-19》. 2009, 全文.

赵光辉. 基于SIAR体制的稀布阵米波雷达若干问题研究. 《中国博士学位论文全文数据库 信息科技辑 I136-102》. 2009, 全文.

审查员 王晓东

权利要求书2页 说明书5页 附图3页

(54) 发明名称

基于二维频域稀疏约束的宽带目标测向方法

(57) 摘要

本发明公开一种基于二维频域稀疏约束的宽带目标测向方法, 主要解决现有方法角度分辨率低、相干信号源估计精度差以及常见算法计算量大的问题。其技术方案是: 充分利用目标的空间稀疏性以及阵元接收信号在二维频域的先验知识, 对阵元接收信号进行二维频域投影变换得到二维投影频谱; 经过对测角范围进行角度划分, 设计二维投影频谱的稀疏基; 利用解优化算法求解优化问题, 获得高分辨角度谱; 最后通过阈值比较法对角度谱进行峰值检测, 得到目标角度值。本发明具有计算量小, 测角精度和角度分辨率高的优点, 可用于雷达、声呐的目标角度估计。



1. 一种基于二维频域稀疏约束的宽带目标测向方法,包括如下步骤:

(1) 设雷达发射的宽带信号为 $s(t)$,第 i 个目标和第 m 个阵元之间的距离引起的信号传播相对时间延迟为 τ_{mi} ,得到第 m 个阵元接收到的目标反射信号为:

$$x_m(t) = \sum_{i=1}^N s(t - \tau_{mi}) + n_m(t), \quad m=1,2,\dots,M$$

其中, $x_m(t)$ 为第 m 个阵元接收到的目标反射信号, t 表示时间, N 为目标总数, M 为阵元数目, $n_m(t)$ 为第 m 个阵元接收到的噪声;

(2) 对目标反射信号 $x_m(t)$ 进行离散采样,得到离散数据 $x_m(n)$,再以离散数据 $x_m(n)$ 作为第 m 行,构造接收信号矩阵 $X(m, n)$:

$$X(m, n) = \begin{bmatrix} x_1(n) \\ \vdots \\ x_m(n) \\ \vdots \\ x_M(n) \end{bmatrix};$$

对接收信号矩阵 $X(m, n)$ 进行预处理,即对接收信号矩阵 $X(m, n)$ 第 m 行的数据乘以 $(-1)^m$,得到预处理后的数据 $X'(m, n)$;

(3) 对预处理后的数据 $X'(m, n)$ 做二维频域投影变换,得到二维投影频谱 $F(\omega, u)$,其中 ω 表示投影空频位置, u 表示离散时频采样点;

(4) 对二维投影频谱 $F(\omega, u)$ 沿行累加,得到投影谱线 $Y(\omega)$;

(5) 按下式将雷达测角范围 $\theta_{\min} \sim \theta_{\max}$ 等角度划分为 P 个角度:

$$\theta_i = \theta_{\min} + \frac{i-1}{P-1}(\theta_{\max} - \theta_{\min}), \quad i=1,2,\dots,P,$$

其中, θ_{\min} 、 θ_{\max} 分别为测角范围的最小值与最大值;

(6) 分别计算无噪情况下,目标角度为 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$ 时的对应投影谱线 $Y_1(\omega), Y_2(\omega), \dots, Y_p(\omega)$;

(7) 由投影谱线 $Y_1(\omega), Y_2(\omega), \dots, Y_p(\omega)$ 构造稀疏基:

$$W = [Y_1(\omega), Y_2(\omega), \dots, Y_p(\omega)];$$

(8) 利用稀疏基 W 和投影谱线 $Y(\omega)$,通过牛顿法或共轭梯度法以及加权迭代最小二乘优化算法求解下式,获得角度谱向量 β :

$$\min_{\beta} \{ \|Y(\omega) - W\beta\|_2 + \lambda \|\beta\|_1 \}$$

其中, $\min_{\beta} \{ \}$ 表示求最小值的运算符号, λ 为由用户输入的正则化参数, $\| \cdot \|_1$ 、 $\| \cdot \|_2$ 分别表示求向量的 1 范数和 2 范数;

(9) 采用阈值比较法,对角度谱向量 β 进行峰值检测,获得角度谱向量峰值元素索引值 l ;

(10) 由峰值索引值 l 按下式确定出目标的角度值 θ 为:

$$\theta = \theta_{\min} + \frac{l-1}{P-1}(\theta_{\max} - \theta_{\min}).$$

2. 根据权利要求 1 所述的基于二维频域稀疏约束的宽带目标测向方法,其中步骤 (3)

所述的对预处理后的数据 $X'(m, n)$ 做二维频域投影变换, 按如下公式进行:

$$F(\omega, u) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{T-1} X'(m, n) e^{-j\frac{2\pi}{T}nu} e^{-j\frac{2\pi}{M}m \left[\frac{1}{u_p} \left(u - \frac{T}{2} \right) \left(\omega - \frac{M}{2} \right) + \frac{M}{2} \right]}$$

其中, $F(\omega, u)$ 为二维频域投影变换后的二维投影频谱, T 表示时间采样点数, T' 表示离散时频采样点数, M' 表示离散空频采样点数, u_p 表示投影时频轴。

3. 根据权利要求 1 所述的基于二维频域稀疏约束的宽带目标测向方法, 其中步骤 (9) 所述的采用阈值比较法, 对角度谱向量 β 进行峰值检测, 获得角度谱向量峰值元素索引值 l , 按如下步骤进行:

(9a) 对角度谱向量 β 进行归一化处理, 得到归一化角度谱向量 $\bar{\beta}$;

(9b) 设置阈值 $\varepsilon = 0.1$, 按下式获取峰值索引值 l 为:

$$l = \{i \mid \bar{\beta}_i > \varepsilon, i = 1, 2, \dots, P\}$$

其中, $\bar{\beta}_i$ 为归一化角度谱向量 $\bar{\beta}$ 的第 i 个元素。

基于二维频域稀疏约束的宽带目标测向方法

技术领域

[0001] 本发明属于通信技术领域,更进一步涉及阵列信号处理领域中一种基于二维频域稀疏约束的宽带目标测向方法,可用于雷达、声呐的目标角度估计。

背景技术

[0002] 相控阵是利用电磁波的相干原理,通过计算机控制馈往各辐射阵元电流的相位,从而改变波束方向的阵列天线。传统的基于机械扫描结构来调整波束指向的方法,由于转动频率较低,数据更新缓慢而无法适应高机动目标的实时侦测任务。相控阵天线采用电子扫描方式,可实现回波数据的实时更新,因此获得了广泛的关注。其中利用相控阵测角是相控阵应用的一个主要方面。

[0003] 目前,宽带相控阵测角技术主要有基于非相干信号的处理方法 ISM 和基于相干信号的处理方法 CSM 两种。

[0004] 第一种,基于非相干信号处理方法 ISM。该类方法是将宽带数据分解为不同的窄带数据,然后对每个窄带信号按照窄带信号处理方法进行处理,最终综合获得角度谱。例如,周宁,郭娜论文“基于奇异值分解的 ISM 算法”(《新乡学院学报》2009, 26(6))就是一种非相干信号处理方法,该方法的最大不足是计算量大、无法估计相干信号源。

[0005] 第二种,基于相干信号处理方法。该类方法将宽带信号不同频率成分的信号空间聚焦到参考频率点,然后再采用窄带信号处理的方法进行高分辨角度估计。例如,于红旗,刘剑,黄知涛,周一宇论文“基于 CSM 的波束域宽带 DOA 估计方法”(《电子对抗》2007, No. 5)就是一种相关信号处理方法。该方法存在的不足是需要构造聚焦矩阵和进行角度预估计,且估计精度容易受预估计误差的影响。

发明内容

[0006] 本发明目的在于针对上述已有技术的不足,提出一种基于二维频域稀疏约束的宽带目标测向方法,以减小非相干信号处理的计算量,避免相干信号处理中角度预估计对测角精度的影响。

[0007] 实现本发明目的的技术思路是通过建立稀疏重构模型,迭代求解优化问题获得高分辨角度谱,通过对角度谱进行峰值检测得到目标的角度信息。其具体步骤包括如下:

[0008] (1) 设雷达发射的宽带信号为 $s(t)$,第 i 个目标和第 m 个阵元之间的距离引起的信号传播相对时间延迟为 τ_{mi} ,构建第 m 个阵元接收到的目标反射信号模型为:

$$[0009] \quad x_m(t) = \sum_{i=1}^N s(t - \tau_{mi}) + n_m(t), \quad m=1, 2, \dots, M$$

[0010] 其中, $x_m(t)$ 为第 m 个阵元接收到的目标反射信号, t 表示时间, N 为目标总数, M 为阵元数目, $n_m(t)$ 为第 m 个阵元接收到的噪声;

[0011] (2) 对目标反射信号 $x_m(t)$ 进行离散采样,得到离散数据 $x_m(n)$,再以离散数据 $x_m(n)$ 作为第 m 行,构造接收信号矩阵 $X(m, n)$:

$$[0012] \quad X(m, n) = \begin{bmatrix} x_1(n) \\ \vdots \\ x_m(n) \\ \vdots \\ x_M(n) \end{bmatrix};$$

[0013] 对接收信号矩阵 $X(m, n)$ 进行预处理,即对接收信号矩阵 $X(m, n)$ 第 m 行的数据乘以 $(-1)^m$,得到预处理后的数据 $X'(m, n)$;

[0014] (3) 对预处理后的数据 $X'(m, n)$ 做二维频域投影变换,得到二维投影频谱 $F(\omega, u)$,其中 ω 表示投影空频位置, u 表示离散时频采样点;

[0015] (4) 对二维投影频谱 $F(\omega, u)$ 沿行累加,得到投影谱线 $Y(\omega)$;

[0016] (5) 按下式将雷达测角范围 $\theta_{\min} \sim \theta_{\max}$ 等角度划分为 P 个角度:

$$[0017] \quad \theta_i = \theta_{\min} + \frac{i-1}{P-1}(\theta_{\max} - \theta_{\min}), \quad i = 1, 2, \dots, P,$$

[0018] 其中, θ_{\min} 、 θ_{\max} 分别为测角范围的最小值与最大值;

[0019] (6) 分别计算无噪情况下,目标角度为 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$ 时的对应投影谱线 $Y_1(\omega), Y_2(\omega), \dots, Y_p(\omega)$;

[0020] (7) 由投影谱线 $Y_1(\omega), Y_2(\omega), \dots, Y_p(\omega)$ 构造稀疏基:

$$[0021] \quad W = [Y_1(\omega), Y_2(\omega), \dots, Y_p(\omega)];$$

[0022] (8) 利用稀疏基 W 和投影谱线 $Y(\omega)$,通过求解下式,获得角度谱向量 β :

$$[0023] \quad \min_{\beta} \{ \|Y(\omega) - W\beta\|_2 + \lambda \|\beta\|_1 \}$$

[0024] 其中, $\min_{\beta} \{ \}$ 表示求最小值的运算符, λ 为由用户输入的正则化参数, $\|\cdot\|_1$ 、 $\|\cdot\|_2$ 分别表示求向量的 1 范数和 2 范数;

[0025] (9) 采用阈值比较法,对角度谱向量 β 进行峰值检测,获得角度谱向量峰值元素索引值 l ;

[0026] (10) 由峰值索引值 l 按下式确定出目标的角度值 θ 为:

$$[0027] \quad \theta = \theta_{\min} + \frac{l-1}{P-1}(\theta_{\max} - \theta_{\min}).$$

[0028] 本发明与现有技术相比具有如下优点:

[0029] 第一,由于本发明整个信号处理过程都是对宽带回波信号整体进行处理,充分利用了宽带信号的信息,可以达到更高的分辨率。

[0030] 第二,由于本发明通过基于发射信号建立稀疏基,对相干信号的角度检测效果更加突出。

[0031] 第三,由于本发明稀疏基的构造方式与目标角度值无关,避免了相干信号处理中角度预估计的步骤,因此对相干信号的角度检测更加精确、稳定。

附图说明

[0032] 图 1 为本发明的流程图;

[0033] 图 2 为用现有非相干信号处理方法获得角度谱向量的仿真结果图;

[0034] 图 3 为用现有相干信号处理方法获得角度谱向量的仿真结果图；

[0035] 图 4 为用本发明方法获得角度谱向量的仿真结果图。

具体实施方式

[0036] 下面结合附图对本发明做进一步的详细描述。

[0037] 参照图 1, 本发明的具体实施步骤如下：

[0038] 步骤 1, 获取第 m 个阵元接收到的目标反射信号。

[0039] 设雷达发射的宽带信号为 $s(t)$, 第 i 个目标和第 m 个阵元之间的距离引起的信号传播相对时间延迟为 τ_{mi} , 得到第 m 个阵元接收到的目标反射信号为：

$$[0040] \quad x_m(t) = \sum_{i=1}^N s(t - \tau_{mi}) + n_m(t), \quad m=1, 2, \dots, M$$

[0041] 其中, $x_m(t)$ 为第 m 个阵元接收到的目标反射信号, t 表示时间, N 为目标总数, M 为阵元数目, $n_m(t)$ 为第 m 个阵元接收到的噪声。

[0042] 步骤 2, 构造接收信号矩阵。

[0043] 对目标反射信号 $x_m(t)$ 进行离散采样, 得到离散数据 $x_m(n)$, 再以该离散数据 $x_m(n)$ 作为第 m 行, 构造接收信号矩阵 $X(m, n)$ ：

$$[0044] \quad X(m, n) = \begin{bmatrix} x_1(n) \\ \vdots \\ x_m(n) \\ \vdots \\ x_M(n) \end{bmatrix};$$

[0045] 对接收信号矩阵 $X(m, n)$ 进行预处理, 即对接收信号矩阵 $X(m, n)$ 第 m 行的数据乘以 $(-1)^m$, 得到预处理后的数据 $X'(m, n)$ 。

[0046] 步骤 3, 对预处理后的数据 $X'(m, n)$ 进行二维频域投影变换, 获得二维投影频谱。

[0047] (3. a) 将预处理后的数据 $X'(m, n)$ 按如下式进行二维傅里叶变换, 得到二维频谱 $H(v, u)$ ：

$$[0048] \quad H(v, u) = \sum_{m=0}^{M'-1} \sum_{n=0}^{T'-1} X'(m, n) e^{-j\frac{2\pi}{M'}mv} e^{-j\frac{2\pi}{T'}nu}$$

[0049] 其中, v 表示离散空频采样点, u 表示离散时频采样点, M' 表示离散空频采样点数, T' 表示离散时频采样点数；

[0050] (3. b) 对二维频谱 $H(v, u)$ 中的数据按如下公式进行投影, 得到二维投影频谱 $F(\omega, u)$ ：

$$[0051] \quad F(\omega, u) = H(v, u)$$

[0052] 其中 ω 表示投影位置, 由下式得到

$$[0053] \quad \omega = \text{round} \left(\frac{v - \frac{M'}{2}}{u} u_p + \frac{M'}{2} \right)$$

[0054] 式中, u_p 表示投影时频轴, $\text{round}()$ 表示取整运算；

[0055] (3. c) 将步骤 (3. a) 与步骤 (3. b) 综合为一步实现, 得到二维投影频谱 $F(\omega, u)$

为：

$$[0056] \quad F(\omega, u) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{T-1} X'(m, n) e^{-j\frac{2\pi}{T}nu} e^{-j\frac{2\pi}{M}u \left[\frac{u}{u_p} \left(\omega - \frac{Mf}{2} \right) + \frac{Mf}{2} \right]},$$

[0057] 步骤 4, 相参累加。

[0058] 对二维投影频谱 $F(\omega, u)$ 沿行累加, 得到投影谱线 $Y(\omega)$ 为：

$$[0059] \quad Y(\omega) = \sum_{u=1}^T F(\omega, u)$$

[0060] 步骤 5, 构造稀疏基。

[0061] (5. a) 按下式将雷达测角范围 $\theta_{\min} \sim \theta_{\max}$ 等角度划分为 P 个角度：

$$[0062] \quad \theta_i = \theta_{\min} + \frac{i-1}{P-1}(\theta_{\max} - \theta_{\min}), \quad i=1, 2, \dots, P,$$

[0063] 其中, θ_{\min} 、 θ_{\max} 分别为测角范围的最小值与最大值；

[0064] (5. b) 分别计算无噪情况下, 目标角度为 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$ 时的对应投影谱线 $Y_1(\omega), Y_2(\omega), \dots, Y_p(\omega)$ ；

[0065] (5. c) 由投影谱线 $Y_1(\omega), Y_2(\omega), \dots, Y_p(\omega)$ 构造稀疏基：

$$[0066] \quad W = [Y_1(\omega), Y_2(\omega), \dots, Y_p(\omega)].$$

[0067] 步骤 6, 获得角度谱向量。

[0068] 利用稀疏基 W 和投影谱线 $Y(\omega)$, 可以通过牛顿法或共轭梯度法以及加权迭代最小二乘等优化算法求解下式, 获得角度谱向量 β 为：

$$[0069] \quad \min_{\beta} \{ \|Y(\omega) - W\beta\|_2 + \lambda \|\beta\|_1 \}$$

[0070] 其中, $\min_{\beta} \{ \}$ 表示求最小值的运算符号, λ 为由用户输入的正则化参数, $\| \cdot \|_1$ 、 $\| \cdot \|_2$ 分别表示求向量的 1 范数和 2 范数。

[0071] 步骤 7, 确定目标角度值。

[0072] (7. a) 对角度谱向量 β 进行归一化处理, 得到归一化角度谱向量 $\bar{\beta}$ ；

[0073] (7. b) 设置阈值 $\varepsilon = 0.1$, 按下式获取峰值索引值 l 为：

$$[0074] \quad l = \{ i \mid \bar{\beta}_i > \varepsilon, i=1, 2, \dots, P \}$$

[0075] 其中, $\bar{\beta}_i$ 为归一化角度谱向量 $\bar{\beta}$ 的第 i 个元素；

[0076] (7. d) 由峰值索引值 l 按下式确定出目标的角度值 θ 为：

$$[0077] \quad \theta = \theta_{\min} + \frac{l-1}{P-1}(\theta_{\max} - \theta_{\min}).$$

[0078] 本发明的效果可以通过下述仿真实验加以说明：

[0079] 1. 仿真条件

[0080] 运行系统为 Intel (R) Core (TM) Duo CPU E8400@3.00GHz, 32 位 Windows 操作系统, 仿真软件采用 MATLAB R(2011b), 仿真参数设置如下表所示。

[0081]

参数	参数值
系统载频	1GHz
调频带宽	400MHz
阵元个数	16
系统阵元间距	0.125m
阵列孔径	2m
时间采样点数	32
时间采样频率	2.4GHz
信噪比	10dB
目标个数	2
目标角度	0° , 3.5°

[0082] 2. 仿真内容与结果

[0083] 仿真 1, 用现有非相干信号处理方法获得角度谱向量, 仿真结果如图 2 所示;

[0084] 仿真 2, 用现有相干信号处理方法获得角度谱向量, 仿真结果如图 3 所示;

[0085] 仿真 3, 用本发明方法获得角度谱向量, 仿真结果如图 4 所示。

[0086] 由图 2 和图 3 可知, 现有非相干信号处理方法以及现有相干信号处理方法在阵列孔径有限的情况下, 无法分辨角度间隔小且相干的两个目标;

[0087] 由图 4 可知, 本发明方法成功分辨出角度间隔小且相干的两个目标。两个目标所在的角度如表 1:

[0088] 表 1 目标角度值计算结果

[0089]

空间目标	目标 1	目标 2
角度	0.2°	3.5°

[0090] 由表 1 可知, 两个目标的角度值均得到了高精度的计算。

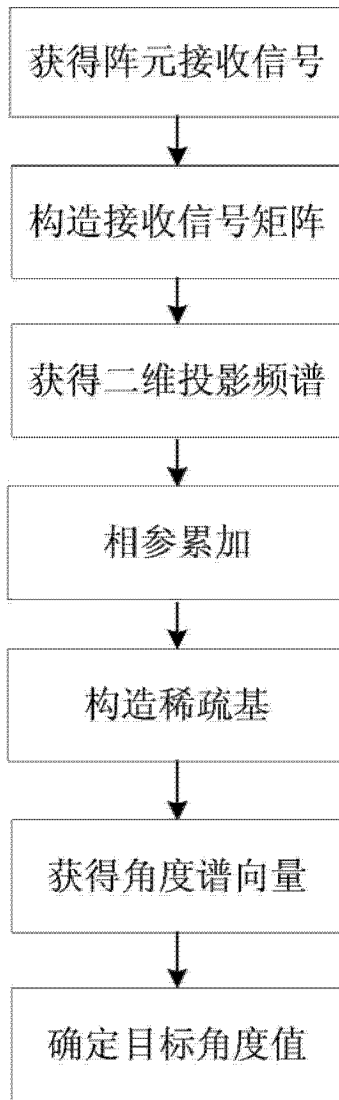


图 1

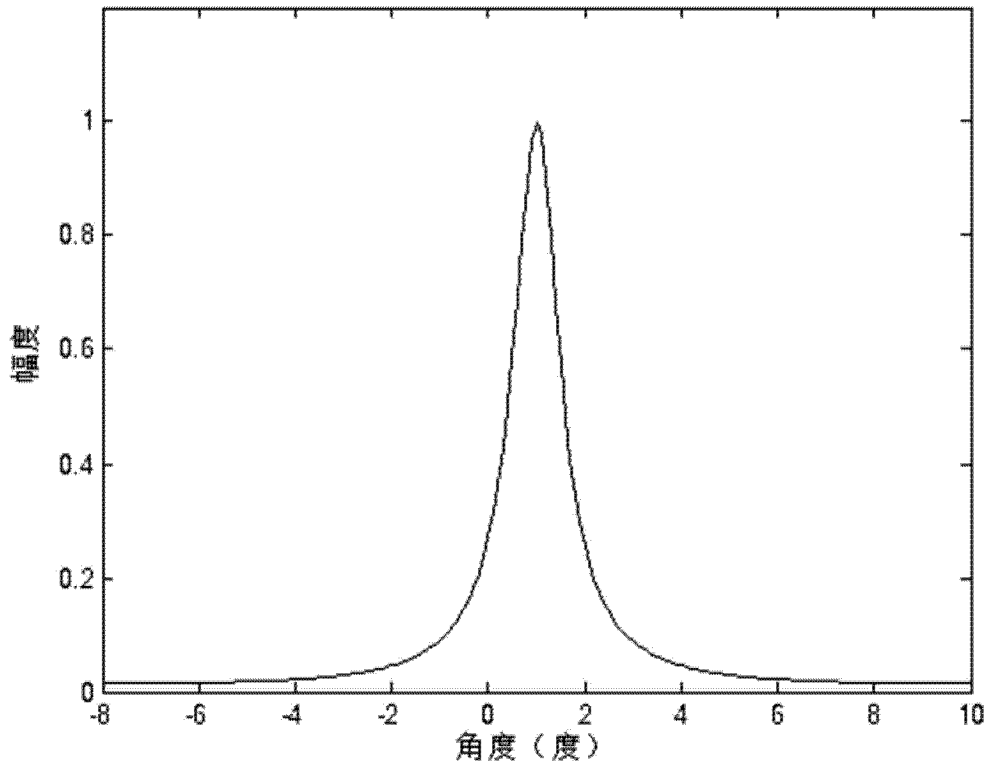


图 2

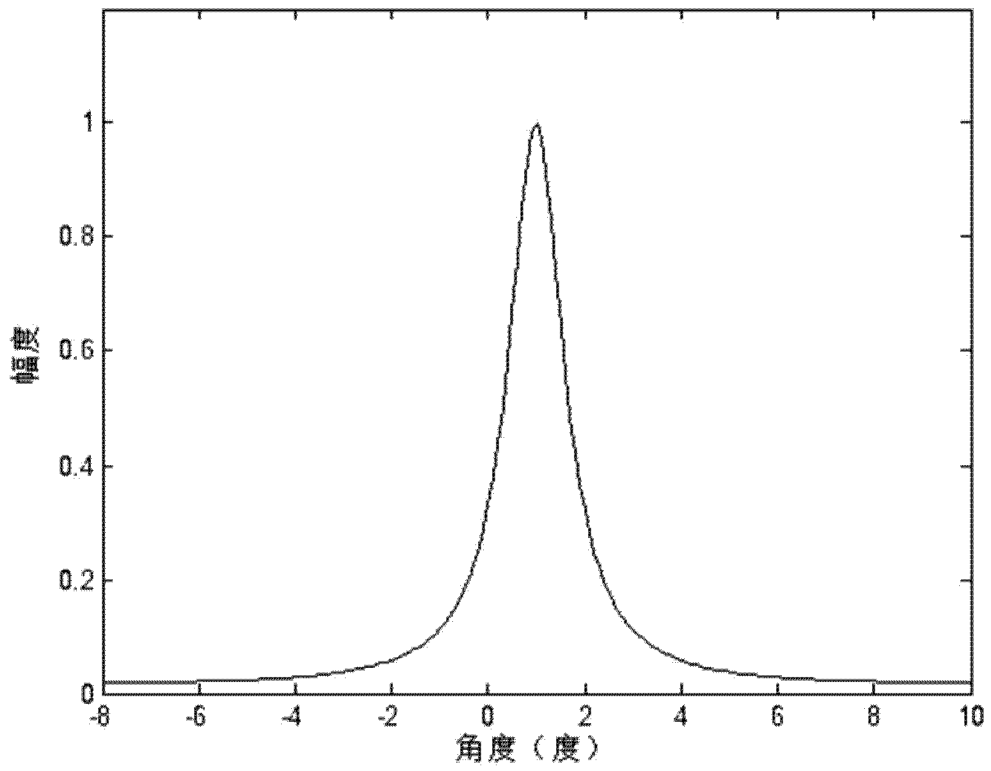


图 3

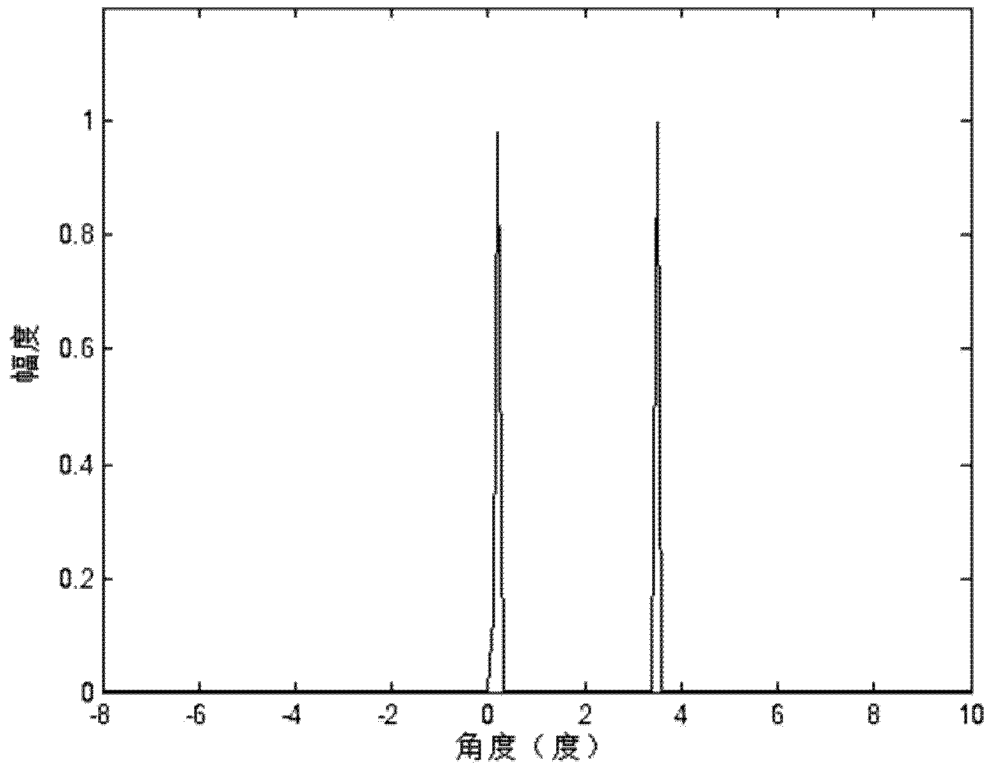


图 4