

# (12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织  
国际局

(43) 国际公布日  
2018 年 5 月 31 日 (31.05.2018)



(10) 国际公布号  
**WO 2018/094565 A1**

- (51) 国际专利分类号:  
**G01S 7/28** (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2016/106779
- (22) 国际申请日: 2016 年 11 月 22 日 (22.11.2016)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (71) 申请人: 深圳大学(SHENZHEN UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国广东省深圳市南山区南海大道 3688 号, Guangdong 518060 (CN)。
- (72) 发明人: 阳 召 成 (YANG, Zhaocheng); 中国广东省深圳市南山区南海大道 3688 号, Guangdong 518060 (CN)。 汪小叶(WANG, Xiaoye); 中国广东省深圳市南山区南海大道 3688 号, Guangdong 518060 (CN)。 黄建军(HUANG, Jianjun); 中国广东省深圳市南山区南海大道 3688 号, Guangdong 518060 (CN)。

- (74) 代理人: 深圳市恒申知识产权事务所 (普通合伙)(HENSEN INTELLECTUAL PROPERTY FIRM); 中国广东省深圳市福田区南园路 68 号上步大厦 10H, Guangdong 518000 (CN)。
- (81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。
- (84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,

(54) Title: METHOD AND DEVICE FOR BEAMFORMING UNDER PULSE NOISE

(54) 发明名称: 脉冲噪声下的波束成形方法及装置

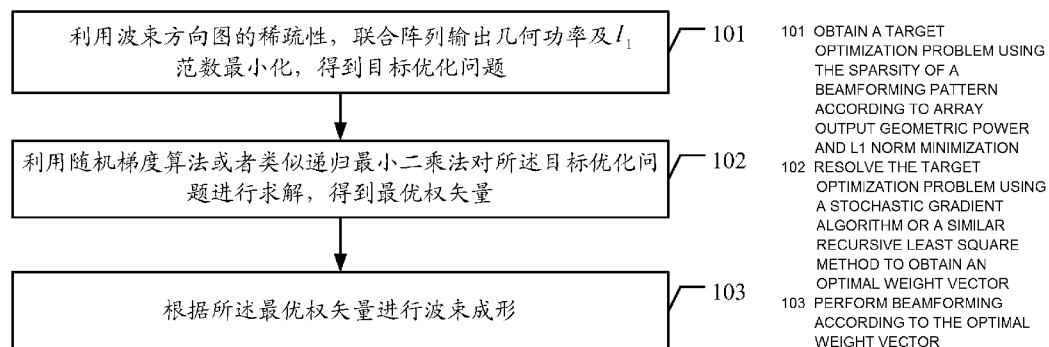


图 1

(57) Abstract: Disclosed are a method and device for beamforming under pulse noise. The method comprises: obtaining a target optimization problem using the sparsity of a beamforming pattern according to array output geometric power and  $l_1$  norm minimization; resolving the target optimization problem using a stochastic gradient algorithm or a similar recursive least square method to obtain an optimal weight vector; and performing beamforming according to the optimal weight vector. Compared with the prior art, by obtaining a target optimization problem using the sparsity of a beamforming pattern according to array output geometric power and  $l_1$  norm minimization, and resolving the target optimization problem using a stochastic gradient algorithm or a similar recursive least square method to obtain an optimal weight vector, the method and device can avoid estimating statistical parameters of pulse noise, are suitable for almost all noise pulses, and effectively reduce sidelobe interference and noise and improve output SINR.

IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,  
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,  
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布：

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

---

**(57) 摘要：**本发明公开了一种脉冲噪声下的波束成形方法及装置，该方法包括：利用波束成形方向图的稀疏性，联合阵列输出几何功率及 $l_1$ 范数最小化，得到目标优化问题，并利用随机梯度算法或者类似递归最小二乘法对目标优化问题进行求解，得到最优权矢量，根据该最优权矢量进行波束成形。相对于现有技术，通过利用波束方向图的稀疏性联合阵列输出几何功率及 $l_1$ 范数最小化得到目标优化问题，并利用随机梯度算法或者类似递归最小二乘法求解得到最优权矢量，可以避免估计脉冲噪声的统计参数，适用于几乎所有的噪声脉冲，同时有效降低了旁瓣干扰与噪声，提高了输出SINR。

## 脉冲噪声下的波束成形方法及装置

### 技术领域

本发明涉及阵列信号处理技术领域，尤其涉及一种脉冲噪声下的波束成形方法及装置。

### 背景技术

无论在雷达还是通信技术领域，阵列信号处理一直都是多天线系统的一项重要任务，而束波形成 ( Beam Forming , BF ) 技术又是阵列信号处理中一项最重要的技术，该技术的基本思想是通过增强感兴趣信号，抑制来自其它方向的干扰信号，以最大化输出信号与干扰加噪声比 ( (Signal to Interference plus Noise Ratio , SINR) )。

传统的波束成形方法都是基于阵列输出的二阶统计量来最小化阵列输出功率，如 Capon 波束成形技术，该技术通过使感兴趣信号方向的阵列增益为 1 来最小化阵列输出功率。然而，该技术旁瓣电平较高，特别是出现未预料的干扰，或噪声功率急剧增加时，波束成形性能会严重变差。那么这就必然导致了输出 SINR 的下降。为解决该问题，在 Capon 波束形成技术中加入了稀疏约束，旁瓣电平得到了较大改善。

然而，目前的波束形成技术都是假设信号服从高斯分布，而实际场景中，脉冲噪声是一种比高斯信号更常见的信号类型，可用  $\alpha$  稳定分布来建模该类型脉冲噪声 (  $\alpha$  为其特征指数 )。由于  $\alpha$  稳定分布不存在二阶统计量，所以把脉冲噪声用高斯分布来建模，传统的波束形成算法性能严重下降。

为了解决此脉冲噪声下传统波束形成算法性能下降的问题，学者们提出一些相关方法，如基于分数低阶矩(Fractional Lower-order Statistics, FLOS)的  $l_p$ -Capon 方法、 $l_1$  正则化最小绝对无畸变响应 (  $l_1$ -regularized Minimum Absolute Distortionless Response,  $l_1$ -MADR) BF 方法、基于零阶统计量 ( Zero-order Statistics , ZOS ) BF 方法等等。基于分数低阶矩的  $l_p$ -Capon 方法利用脉冲噪声存在  $p(0 < p < \alpha < 2)$  阶矩来改善波束形成的性能，但其性能的好坏依赖于阶

数 $P$ 先验知识的准确性,而且先验知识的高效性仍需要更多的研究;而 $l_1$ 正则化最小绝对无畸变响应BF方法仅仅适用于 $1 < \alpha < 2$ 脉冲噪声环境;同样基于零阶统计量BF方法利用脉冲噪声的对数矩作为统计量,因此这就避免估计脉冲噪声特征指数及其分数阶数 $P$ 。但是该方法旁瓣电平较高。

因此,在未知脉冲噪声统计特性的基础上,如何利用波束方向图的稀疏性降低旁瓣噪声,增强目标信号,提高输出SINR是目前亟待解决的问题。

## 发明内容

本发明的主要目的在于提供一种脉冲噪声下的波束成形方法及装置,旨在解决在未知脉冲噪声统计特性的基础上,如何利用波束方向图的稀疏性降低旁瓣噪声及干扰,增强目标信号,提高输出SINR的技术问题。

为实现上述目的,本发明第一方面提供一种脉冲噪声下的波束成形方法,包括:

利用波束方向图的稀疏性,联合阵列输出几何功率及 $l_1$ 范数最小化,得到目标优化问题;

利用随机梯度算法或者类似递归最小二乘法对所述目标优化问题进行求解,得到最优权矢量;

根据所述最优权矢量进行波束成形。

为实现上述目的,本发明第二方面提供一种脉冲噪声下的波束成形装置,包括:

优化模块,用于利用波束方向图的稀疏性,联合阵列输出几何功率及 $l_1$ 范数最小化,得到目标优化问题;

求解模块,用于利用随机梯度算法或者类似递归最小二乘法对所述目标优化问题进行求解,得到最优权矢量;

波束成形模块,用于根据所述最优权矢量进行波束成形。

本发明提供一种脉冲噪声下的波束成形方法,在该方法中,利用波束成形方向图的稀疏性,联合阵列输出几何功率及 $l_1$ 范数最小化,得到目标优化问题,并利用随机梯度算法或者类似递归最小二乘法对目标优化问题进行求解,得到最优权矢量,根据该最优权矢量进行

波束成形。相对于现有技术，通过利用波束方向图的稀疏性联合阵列输出几何功率及  $l_1$  范数最小化得到目标优化问题，并利用随机梯度算法或者类似递归最小二乘法求解得到最优权矢量，可以避免估计脉冲噪声的统计参数，适用于几乎所有的噪声脉冲，同时有效降低了旁瓣干扰与噪声，提高了输出 SINR。

## 附图说明

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所需要使用的附图作简单地介绍，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，对于本领域技术人员来讲，在不付出创造性劳动性的前提下，还可以根据这些附图获得其他的附图。

图1为本发明第一实施例中脉冲噪声下的波束成形方法的流程示意图；

图2为本发明第二实施例中脉冲噪声下的波束成形装置的功能模块的示意图；

图3a为本发明实施例中波束方向图效果的示意图；

图3b为本发明实施例中波束方向图效果的示意图；

图4为本发明实施例中SINR效果示意图。

## 具体实施方式

为使得本发明的发明目的、特征、优点能够更加的明显和易懂，下面将结合本发明实施例中的附图，对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述，显然，所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例，而非全部实施例。基于本发明中的实施例，本领域技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都属于本发明保护的范围。

由于现有技术中在未知脉冲噪声统计特性的基础上，存在如何利用波束方向图的稀疏性降低旁瓣噪声和干扰，增强目标信号，提高输出 SINR 的技术问题。

为了解决上述技术问题，本发明提出一种脉冲噪声下的波束成形方法，通过利用波束方向图的稀疏性联合阵列输出几何功率及  $l_1$  范数最小化得到目标优化问题，并利用随机梯度

算法或者类似递归最小二乘法求解得到最优权矢量，可以避免估计脉冲噪声的统计参数，适用于几乎所有的噪声脉冲，同时有效降低了旁瓣干扰与噪声，提高了输出 SINR。

请参阅图 1，为本发明第一实施例中脉冲噪声下的波束成形方法的流程示意图，该方法包括：

步骤 101、利用波束方向图的稀疏性，联合阵列输出几何功率及  $l_1$  范数最小化，得到目标优化问题；

步骤 102、利用随机梯度算法或者类似递归最小二乘法对所述目标优化问题进行求解，得到最优权矢量；

步骤 103、根据所述最优权矢量进行波束成形。

在本发明实施例中，脉冲噪声下的波束成形方法是由脉冲噪声下的波束成形装置实现的，假设一均匀线阵，包含  $M$  个天线阵元，一个窄带的感兴趣信号和多个不相干干扰信号从远场入射到该天线阵元上，波束成形装置将接收到  $M \times 1$  维信号，且波束成形装置将利用波束方向图的稀疏性，联合阵列输出功率及  $l_1$  范数最小化，得到目标优化问题。

其中，该目标优化问题如下：

$$\min_w \{ e^{E\{\log|w^H x(n)|\}} + \lambda \|w^H A\|_1 \}$$

$$s.t. w^H a(\theta_0) = 1$$

其中， $e^{E\{\log|w^H x(n)|\}}$  为阵列输出几何功率， $\lambda \|w^H A\|_1$  为稀疏约束项；

$\min_w$  表示对表达式  $e^{E\{\log|w^H x(n)|\}} + \lambda \|w^H A\|_1$  取最小值时对应的参数  $w$ ；

$E$  表示求统计均值， $w$  为  $M \times 1$  维权矢量， $M$  表示  $M$  个天线阵元， $H$  表示共轭转置， $x(n)$  表示为天线阵列在  $n$  时刻接收的  $M \times 1$  维信号， $\lambda$  表示权衡稀疏度与阵列输出几何功率的正则化参数， $A$  为旁瓣角度区域内空域采样形成的  $M \times L$  维导向矢量矩阵， $L$  为角度区域内采样个数， $\theta_0$  为感兴趣信号的方向， $s.t.$  表示约束条件；

其中， $A = [a(\theta_1), \dots, a(\theta_L)]$ ，且  $a(\theta_i) = [1, e^{j\frac{2\pi}{\xi}d\sin\theta_i}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\xi}(M-1)d\sin\theta_i}]$ ，其中， $d$  为阵元间距， $\xi$  表示波长， $i$  的值为 1 至  $L$ 。

在本发明实施例中，波束成形装置还将利用随机梯度算法或者类似递归最小二乘法对目标优化问题进行求解，得到最优权矢量。且具体包括：利用目标优化问题建立该目标优化问题的代价函数，利用随机梯度算法或者类似递归最小二乘法对该代价函数进行求解，得到最优权矢量。

其中，上述目标优化问题的代价函数为：

$$J(w) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \log |w^H x(n)| + \lambda \|w^H A\|_1 + \gamma (w^H a(\theta_0) - 1)$$

其中， $J(w)$  表示  $J$  是以  $w$  为参数的代价函数， $N$  表示快拍个数， $w$  为  $M \times 1$  维权矢量， $M$  表示  $M$  个天线阵元， $H$  表示共轭转置， $x(n)$  表示为天线阵列在  $n$  时刻接收的  $M \times 1$  维信号， $\lambda$  表示权衡稀疏度与阵列输出几何功率的正则化参数， $A$  为旁瓣角度区域内空域采样形成的  $M \times L$  维导向矢量矩阵， $L$  为角度区域内采样个数， $\theta_0$  为感兴趣信号的方向， $\gamma$  为拉格朗日乘子；

其中， $A = [a(\theta_1), \dots, a(\theta_L)]$ ，且  $a(\theta_i) = [1, e^{j\frac{2\pi}{\xi} d \sin \theta_i}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\xi} (M-1) d \sin \theta_i}]$ 。其中， $d$  为阵元间距， $\xi$  表示波长， $i$  的值为 1 至  $L$ 。

在本发明实施例中，在得到最优权矢量之后，波束成形装置将根据该最优权矢量进行波束成形，可以理解的是，根据权矢量进行波束成形的方法是现有技术，此处不做赘述。

在本发明实施例中，通过利用波束方向图的稀疏性联合阵列输出几何功率及  $l_1$  范数最小化得到目标优化问题，并利用随机梯度算法或者类似递归最小二乘法求解得到最优权矢量，可以避免估计脉冲噪声的统计参数，适用于几乎所有的噪声脉冲，同时有效降低了旁瓣干扰与噪声，提高了输出 SINR。

进一步的，在本发明实施例中，利用所述随机梯度算法得到的最优权矢量为：

$$w(n+1) = P \cdot \left\{ C \cdot w(n) - \mu \cdot \frac{y^*(n)x(n)}{|y(n)|^2} \right\} + F$$

其中，

$$\mathbf{P} = \mathbf{I} - \frac{a(\theta_0)a^H(\theta_0)}{a^H(\theta_0)a(\theta_0)},$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{I} - \mu \cdot \lambda \mathbf{A} \Pi(\mathbf{w}(n)) \mathbf{A}^H,$$

$$\Pi(\mathbf{w}(n)) = \text{diag} \left\{ \left| (\mathbf{A}^H \mathbf{w}(n))_1 \right|^{-1}, \dots, \left| (\mathbf{A}^H \mathbf{w}(n))_L \right|^{-1} \right\},$$

$$y(n) = \mathbf{w}(n)^H \mathbf{x}(n)$$

$$\mathbf{F} = \frac{a(\theta_0)}{a^H(\theta_0)a(\theta_0)}$$

其中,  $\mathbf{I}$  为  $M$  行  $M$  列的单位矩阵,  $\text{diag}\{\cdot\}$  表示以其中元素为对角元素构成的对角矩阵,  $*$  表示取共轭,  $H$  表示共轭转置,  $\mathbf{w}(n+1)$  表示在时刻  $n+1$  时计算得到的权矢量, 且  $n=N$  时的权矢量为最优权矢量,  $\mathbf{w}$  为  $M \times 1$  维权矢量,  $M$  表示  $M$  个天线阵元,  $\mu$  表示迭代步长, 为一个常数,  $x(n)$  表示为天线阵列在  $n$  时刻接收的  $M \times 1$  维信号,  $\theta_0$  为感兴趣信号的方向,  $\mathbf{A}$  为旁瓣角度区域内空域采样形成的  $M \times L$  维导向矢量矩阵,  $L$  为角度区域内采样个数,  $\lambda$  表示权衡稀疏度与阵列输出几何功率的正则化参数;

其中,  $\mathbf{A} = [a(\theta_1), \dots, a(\theta_L)]$ , 且  $a(\theta_i) = [1, e^{j\frac{2\pi}{\xi}d \sin \theta_i}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\xi}(M-1)d \sin \theta_i}]$ 。其中,  $d$  为阵元间距,  $\xi$  表示波长,  $i$  的值为 1 至  $L$ 。

为了更好的理解本发明实施例中的技术方案, 下面将详细介绍利用随机梯度算法得到最优权矢量的步骤, 如下:

$n=1, \dots, N$ , 循环执行以下步骤:

$$1、\Pi(\mathbf{w}(n)) = \text{diag} \left\{ \left| (\mathbf{A}^H \mathbf{w}(n))_1 \right|^{-1}, \dots, \left| (\mathbf{A}^H \mathbf{w}(n))_L \right|^{-1} \right\}$$

$$2、y(n) = \mathbf{w}(n)^H \mathbf{x}(n)$$

$$3、\mathbf{C}(n) = \mathbf{I} - \mu \lambda \mathbf{A} \Pi(\mathbf{w}(n)) \mathbf{A}^H$$

$$4、\mathbf{w}(n+1) = E\{\mathbf{C}(n) \cdot \mathbf{w}(n) - \mu \cdot \frac{y^*(n)\mathbf{x}(n)}{|\mathbf{y}(n)|^2}\} + \mathbf{F}$$

其中,  $n$  的初始值为 1, 且在执行步骤 4 之后, 将令  $\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n)$ , 返回执行步骤 1 进行迭代, 直至  $n=N$ , 且将  $\mathbf{w}(N+1)$  的值作为最优权矢量。

$$\text{其中, } \mathbf{F} = \frac{a(\theta_0)}{a^H(\theta_0)a(\theta_0)}, \mathbf{P} = \mathbf{I} - \frac{a(\theta_0)a^H(\theta_0)}{a^H(\theta_0)a(\theta_0)};$$

其中,  $\mathbf{A} = [a(\theta_1), \dots, a(\theta_L)]$ , 且  $a(\theta_i) = [1, e^{j\frac{2\pi}{\xi}d \sin \theta_i}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\xi}(M-1)d \sin \theta_i}]$ 。其中,

$d$  为阵元间距， $\xi$  表示波长， $i$  的值为 1 至  $L$ 。

其中， $\mathbf{I}$  为  $M$  行  $M$  列的单位矩阵， $\text{diag}\{\cdot\}$  表示以其中元素为对角元素构成的对角矩阵， $*$  表示取共轭， $\mathbf{H}$  表示共轭转置， $\mathbf{w}(n+1)$  表示在时刻  $n+1$  时计算得到的权矢量， $\mathbf{w}$  为  $M \times 1$  维权矢量， $M$  表示  $M$  个天线阵元， $\mu$  表示迭代步长，为一个常数， $x(n)$  表示为天线阵列在  $n$  时刻接收的  $M \times 1$  维信号， $\theta_0$  为感兴趣信号的方向， $\mathbf{A}$  为旁瓣角度区域内空域采样形成的  $M \times L$  维导向矢量矩阵， $L$  为角度区域内采样个数， $\lambda$  表示权衡稀疏度与阵列输出几何功率的正则化参数。

进一步的，在本发明实施例中，利用类似递归最小二乘法得到的最优权矢量为：

$$\mathbf{w} = \frac{\mathbf{Q}a(\theta_0)}{a^H(\theta_0)\mathbf{Q}a(\theta_0)}$$

其中，

$$\mathbf{Q} = \mathbf{P}(n) - \mathbf{P}(n)\lambda\mathbf{A} \left[ \mathbf{A}^H \mathbf{P}(n)\lambda\mathbf{A} + \Pi(\mathbf{w}(n))^{-1} \right]^{-1} \mathbf{A}^H \mathbf{P}(n)$$

$$\mathbf{P}(n) = \mathbf{P}(n-1) - \frac{|\mathbf{w}(n)\mathbf{x}(n)|^2 \mathbf{P}(n-1)\mathbf{x}(n)\mathbf{x}^H(n)\mathbf{P}(n-1)}{1 + |\mathbf{w}(n)\mathbf{x}(n)|^2 \mathbf{x}^H(n)\mathbf{P}(n-1)\mathbf{x}(n)}$$

其中， $\mathbf{w}$  为权矢量，且在  $n=N$  时得到的权矢量为最优权矢量， $\lambda$  表示权衡稀疏度与阵列输出几何功率的正则化参数， $\mathbf{A}$  为旁瓣角度区域内空域采样形成的  $M \times L$  维导向矢量矩阵， $L$  为角度区域内采样个数， $n$  属于 1 至  $N$ ，且  $N$  为快拍个数， $x(n)$  表示为天线阵列在  $n$  时刻接收的  $M \times 1$  维信号， $\theta_0$  为感兴趣信号的方向；

其中， $\mathbf{A} = [a(\theta_1), \dots, a(\theta_L)]$ ，且  $a(\theta_i) = [1, e^{j\frac{2\pi}{\xi}d\sin\theta_i}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\xi}(M-1)d\sin\theta_i}]$ 。其中， $d$  为阵元间距， $\xi$  表示波长， $i$  的值为 1 至  $L$ 。

为了更好的理解本发明实施例中的技术方案，下面将详细描述利用类似递归最小二乘法得到的最优权矢量的步骤，如下：

$n=1, \dots, N$ ，循环执行以下步骤：

$$1、\Pi(\mathbf{w}(n)) = \text{diag}\{ |(A^H \mathbf{w}(n))_1|^{-1}, \dots, |(A^H \mathbf{w}(n))_L|^{-1} \}$$

$$2、y(n) = \mathbf{w}(n)^H \mathbf{x}(n)$$

$$3、P(n) = P(n-1) - \frac{|y(n)^{-2}| P(n-1) x(n) x^H(n) P(n-1)}{1 + |y(n)^{-2}| x^H(n) P(n-1) x(n)}$$

$$4、Q = P(n) - P(n) \lambda A [A^H P(n) \lambda A + \Pi(w(n))^{-1}]^{-1} A^H P(n)$$

$$5、w = \frac{Q a(\theta_0)}{a^H(\theta_0) Q a(\theta_0)}$$

其中,  $w$  为权矢量, 且在  $n=N$  时得到的权矢量为最优权矢量,  $\lambda$  表示权衡稀疏度与阵列输出几何功率的正则化参数,  $A$  为旁瓣角度区域内空域采样形成的  $M \times L$  维导向矢量矩阵,  $L$  为角度区域内采样个数,  $n$  属于 1 至  $N$ , 且  $N$  为快拍个数,  $x(n)$  表示为天线阵列在  $n$  时刻接收的  $M \times 1$  维信号,  $\theta_0$  为感兴趣信号的方向;

其中,  $A = [a(\theta_1), \dots, a(\theta_L)]$ , 且  $a(\theta_i) = [1, e^{j\frac{2\pi}{\xi} d \sin \theta_i}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\xi} (M-1) d \sin \theta_i}]$ 。其中,  $d$  为阵元间距,  $\xi$  表示波长,  $i$  的值为 1 至  $L$ 。

请参阅图 2, 为本发明第二实施例中脉冲噪声下的波束成形装置的功能模块的示意图, 包括:

优化模块 201, 用于利用波束方向图的稀疏性, 联合阵列输出几何功率及  $l_1$  范数最小化, 得到目标优化问题;

求解模块 202, 用于利用随机梯度算法或者类似递归最小二乘法对所述目标优化问题进行求解, 得到最优权矢量;

波束成形模块 203, 用于根据所述最优权矢量进行波束成形。

在本发明实施例中, 假设一均匀线阵, 包含  $M$  个天线阵元, 一个窄带的感兴趣信号和多个不相干干扰信号从远场入射到该天线阵元上, 波束成形装置将接收到  $M \times 1$  维信号, 且优化模块 201 将利用波束方向图的稀疏性, 联合阵列输出功率及  $l_1$  范数最小化, 得到目标优化问题。

其中, 该目标优化问题如下:

$$\min_w \{ e^{E\{\log |w^H x(n)|\}} + \lambda \|w^H A\|_1 \}$$

$$s.t. w^H a(\theta_0) = 1$$

其中,  $e^{\{ \log |w^H x(n)| \}}$  为阵列输出几何功率,  $\lambda \|w^H A\|$  为稀疏约束项;

$\min_w$  表示对表达式  $e^{\{ \log |w^H x(n)| \}} + \lambda \|w^H A\|$  取最小值时对应的参数  $w$ ;

$E$  表示求统计均值,  $w$  为  $M \times 1$  维权矢量,  $M$  表示  $M$  个天线阵元,  $H$  表示共轭转置,  $x(n)$  表示为天线阵列在  $n$  时刻接收的  $M \times 1$  维信号,  $\lambda$  表示权衡稀疏度与阵列输出几何功率的正则化参数,  $A$  为旁瓣角度区域内空域采样形成的  $M \times L$  维导向矢量矩阵,  $L$  为角度区域内采样个数,  $\theta_0$  为感兴趣信号的方向,  $s.t.$  表示约束条件;

其中,  $A = [a(\theta_1), \dots, a(\theta_L)]$ , 且  $a(\theta_i) = [1, e^{j\frac{2\pi}{\xi} d \sin \theta_i}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\xi} (M-1) d \sin \theta_i}]$ , 其中,  $d$  为阵元间距,  $\xi$  表示波长,  $i$  的值为 1 至  $L$ 。

在本发明实施例中, 求解模块 202 利用随机梯度算法或者类似递归最小二乘法对目标优化问题进行求解, 得到最优权矢量。且具体包括: 利用目标优化问题建立该目标优化问题的代价函数, 利用随机梯度算法或者类似递归最小二乘法对该目标优化问题的代价函数进行求解, 得到最优权矢量。

其中, 上述目标优化问题的代价函数为:

$$J(w) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \log |w^H x(n)| + \lambda \|w^H A\| + \gamma (w^H a(\theta_0) - 1)$$

其中,  $J(w)$  表示  $J$  是以  $w$  为参数的代价函数,  $N$  表示快拍个数,  $w$  为  $M \times 1$  维权矢量,  $M$  表示  $M$  个天线阵元,  $H$  表示共轭转置,  $x(n)$  表示为天线阵列在  $n$  时刻接收的  $M \times 1$  维信号,  $\lambda$  表示权衡稀疏度与阵列输出几何功率的正则化参数,  $A$  为旁瓣角度区域内空域采样形成的  $M \times L$  维导向矢量矩阵,  $L$  为角度区域内采样个数,  $\theta_0$  为感兴趣信号的方向,  $\gamma$  为拉格朗日乘子;

其中,  $A = [a(\theta_1), \dots, a(\theta_L)]$ , 且  $a(\theta_i) = [1, e^{j\frac{2\pi}{\xi} d \sin \theta_i}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\xi} (M-1) d \sin \theta_i}]$ 。其中,  $d$  为阵元间距,  $\xi$  表示波长,  $i$  的值为 1 至  $L$ 。

在本发明实施例中, 在得到最优权矢量之后, 波束成形模块 203 将根据该最优权矢量进行波束成形, 可以理解的是, 根据权矢量进行波束成形的方法是现有技术, 此处不做赘述。

在本发明实施例中, 通过利用波束方向图的稀疏性联合阵列输出几何功率及  $l_1$  范数最小化得到目标优化问题, 并利用随机梯度算法或者类似递归最小二乘法求解得到最优权矢量,

可以避免估计脉冲噪声的统计参数，适用于几乎所有的噪声脉冲，同时有效降低了旁瓣干扰与噪声，提高了输出 SINR。

进一步的，在本发明实施例中，求解模块 202 利用所述随机梯度算法得到的最优权矢量为：

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{P} \cdot \left\{ \mathbf{C} \cdot \mathbf{w}(n) - \mu \cdot \frac{y^*(n)\mathbf{x}(n)}{|y(n)|^2} \right\} + \mathbf{F}$$

其中，

$$\mathbf{P} = \mathbf{I} - \frac{a(\theta_0)a^H(\theta_0)}{a^H(\theta_0)a(\theta_0)},$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{I} - \mu \cdot \lambda \mathbf{A} \Pi(\mathbf{w}(n)) \mathbf{A}^H,$$

$$\Pi(\mathbf{w}(n)) = \text{diag} \left\{ \left| (\mathbf{A}^H \mathbf{w}(n))_1 \right|^{-1}, \dots, \left| (\mathbf{A}^H \mathbf{w}(n))_L \right|^{-1} \right\},$$

$$y(n) = \mathbf{w}(n)^H \mathbf{x}(n)$$

$$\mathbf{F} = \frac{a(\theta_0)}{a^H(\theta_0)a(\theta_0)}$$

其中， $\mathbf{I}$  为  $M$  行  $M$  列的单位矩阵， $\text{diag}\{\cdot\}$  表示以其中元素为对角元素构成的对角矩阵， $*$  表示取共轭， $H$  表示共轭转置， $\mathbf{w}(n+1)$  表示在时刻  $n+1$  时计算得到的权矢量，且在  $n=N$  时的权矢量为最优权矢量， $\mathbf{w}$  为  $M \times 1$  维权矢量， $M$  表示  $M$  个天线阵元， $\mu$  表示迭代步长，为一个常数， $x(n)$  表示为天线阵列在  $n$  时刻接收的  $M \times 1$  维信号， $\theta_0$  为感兴趣信号的方向， $\mathbf{A}$  为旁瓣角度区域内空域采样形成的  $M \times L$  维导向矢量矩阵， $L$  为角度区域内采样个数， $\lambda$  表示权衡稀疏度与阵列输出几何功率的正则化参数；

其中， $\mathbf{A} = [a(\theta_1), \dots, a(\theta_L)]$ ，且  $a(\theta_i) = [1, e^{j\frac{2\pi}{\xi}d \sin \theta_i}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\xi}(M-1)d \sin \theta_i}]$ 。其中， $d$  为阵元间距， $\xi$  表示波长， $i$  的值为 1 至  $L$ 。

为了更好的理解本发明实施例中的技术方案，下面将详细介绍利用随机梯度算法得到最优权矢量的步骤，如下：

$n=1, \dots, N$ ，循环执行以下步骤：

$$1、\Pi(\mathbf{w}(n)) = \text{diag} \left\{ \left| (\mathbf{A}^H \mathbf{w}(n))_1 \right|^{-1}, \dots, \left| (\mathbf{A}^H \mathbf{w}(n))_L \right|^{-1} \right\}$$

$$2、y(n) = \mathbf{w}(n)^H \mathbf{x}(n)$$

$$3、C(n) = I - \mu \lambda A \Pi(w(n)) A^H$$

$$4、w(n+1) = E\{C(n) \cdot w(n) - \mu \frac{y^*(n)x(n)}{|y(n)|^2}\} + F$$

其中， $n$  的初始值为 1，且在执行步骤 4 之后，将令  $w(n+1) = w(n)$ ，返回执行步骤 1 进行迭代，直至  $n=N$ ，且将  $w(N+1)$  的值作为最优权矢量。

$$\text{其中，} F = \frac{a(\theta_0)}{a^H(\theta_0)a(\theta_0)}, \quad P = I - \frac{a(\theta_0)a^H(\theta_0)}{a^H(\theta_0)a(\theta_0)};$$

其中， $A = [a(\theta_1), \dots, a(\theta_L)]$ ，且  $a(\theta_i) = [1, e^{j\frac{2\pi}{\xi}d\sin\theta_i}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\xi}(M-1)d\sin\theta_i}]$ 。其中， $d$  为阵元间距， $\xi$  表示波长， $i$  的值为 1 至  $L$ 。

其中， $I$  为  $M$  行  $M$  列的单位矩阵， $\text{diag}\{\cdot\}$  表示以其中元素为对角元素构成的对角矩阵， $*$  表示取共轭， $H$  表示共轭转置， $w(n+1)$  表示在  $n+1$  时刻的权矢量， $w$  为  $M \times 1$  维权矢量， $M$  表示  $M$  个天线阵元， $\mu$  表示迭代步长，为一个常数， $x(n)$  表示为天线阵列在  $n$  时刻接收的  $M \times 1$  维信号， $\theta_0$  为感兴趣信号的方向， $A$  为旁瓣角度区域内空域采样形成的  $M \times L$  维导向矢量矩阵， $L$  为角度区域内采样个数， $\lambda$  表示权衡稀疏度与阵列输出几何功率的正则化参数。

进一步的，在本发明实施例中，求解模块 202 利用所述类似递归最小二乘法得到的最优权矢量为：

$$w = \frac{Qa(\theta_0)}{a^H(\theta_0)Qa(\theta_0)}$$

其中，

$$Q = P(n) - P(n)\lambda A [A^H P(n)\lambda A + \Pi(w(n))^{-1}]^{-1} A^H P(n)$$

$$P(n) = P(n-1) - \frac{|w(n)x(n)|^2 P(n-1)x(n)x^H(n)P(n-1)}{1 + |w(n)x(n)|^2 x^H(n)P(n-1)x(n)}$$

其中， $w$  为权矢量，且在  $n=N$  时得到的权矢量为最优权矢量， $\lambda$  表示权衡稀疏度与阵列输出几何功率的正则化参数， $A$  为旁瓣角度区域内空域采样形成的  $M \times L$  维导向矢量矩阵， $L$  为角度区域内采样个数， $n$  属于 1 至  $N$ ，且  $N$  为快拍个数， $x(n)$  表示为天线阵列在  $n$  时刻接收的  $M \times 1$  维信号， $\theta_0$  为感兴趣信号的方向，

其中， $A = [a(\theta_1), \dots, a(\theta_L)]$ ，且  $a(\theta_i) = [1, e^{j\frac{2\pi}{\xi}d\sin\theta_i}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\xi}(M-1)d\sin\theta_i}]$ 。其中，

$d$  为阵元间距,  $\xi$  表示波长,  $i$  的值为 1 至  $L$ 。

为了更好的理解本发明实施例中的技术方案, 下面将详细描述利用类似递归最小二乘法得到的最优权矢量的步骤, 如下:

$n=1, \dots, N$ , 循环执行以下步骤:

- 1、 $\Pi(w(n)) = \text{diag}\{[(A^H w(n))_1]^{-1}, \dots, [(A^H w(n))_L]^{-1}\}$
- 2、 $y(n) = w(n)^H x(n)$
- 3、 $P(n) = P(n-1) - \frac{|y(n)|^2 P(n-1) x(n) x^H(n) P(n-1)}{1 + |y(n)|^2 x^H(n) P(n-1) x(n)}$
- 4、 $Q = P(n) - P(n) \lambda A [A^H P(n) \lambda A + \Pi(w(n))^{-1}]^{-1} A^H P(n)$
- 5、 $w = \frac{Q a(\theta_0)}{a^H(\theta_0) Q a(\theta_0)}$

其中,  $w$  为权矢量, 且在  $n=N$  时得到的权矢量为最优权矢量,  $\lambda$  表示权衡稀疏度与阵列输出几何功率的正则化参数,  $A$  为旁瓣角度区域内空域采样形成的  $M \times L$  维导向矢量矩阵,  $L$  为角度区域内采样个数,  $n$  属于 1 至  $N$ , 且  $N$  为快拍个数,  $x(n)$  表示为天线阵列在  $n$  时刻接收的  $M \times 1$  维信号,  $\theta_0$  为感兴趣信号的方向;

其中,  $A = [a(\theta_1), \dots, a(\theta_L)]$ , 且  $a(\theta_i) = [1, e^{j\frac{2\pi}{\xi} d \sin \theta_i}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\xi} (M-1) d \sin \theta_i}]$ 。其中,  $d$  为阵元间距,  $\xi$  表示波长,  $i$  的值为 1 至  $L$ 。

基于上述描述, 在本发明实施例中, 通过利用波束方向图的稀疏性联合阵列输出几何功率及  $l_1$  范数最小化得到目标优化问题, 并利用随机梯度算法或者类似递归最小二乘法求解得到最优权矢量, 所提方法及装置可以避免估计脉冲噪声的统计参数, 适用于几乎所有的噪声脉冲, 同时有效降低了旁瓣干扰与噪声, 提高了输出 SINR。

可以理解的是, 本发明实施例中技术方案可以应用于雷达或通信中的阵列信号处理领域, 以提高雷达或通信系统抗低空干扰、脉冲噪声的能力。

为了更好理解本发明实施例中的技术方案, 下面将通过仿真数据来说明本发明实施例中脉冲噪声下的波束成形方法在波束方向图与 SINR 两方面的有益效果。

## 1、波束方向图

令阵元数为  $M=8$ ，阵元间距为  $d=0.5\zeta$  ( $\zeta$  为波长)，请参阅图 3a 及图 3b，为波束方向图效果的示意图，对于随机梯度算法， $\lambda=0.02$ ， $\mu=10^{-4}$ ；对于类似递归最小二乘算法， $\lambda=0.8$ ，最大迭代次数为 20 次；对于分数低阶矩 BF 算法，阶数  $P=1$ ，对于  $l_1$ -MADR 算法， $\lambda=0.01$ ，最大迭代次数为 20。且对所有算法，A 为  $[-90^\circ, 0^\circ)$  和  $(0^\circ, 90^\circ]$  角度范围内空域采样形成的导向矢量矩阵，采样间距为  $1^\circ$ ，感兴趣信号和两个干扰信号都建模为对称  $\alpha$  稳定分布，位置参数为 0，其特征函数为  $\varphi(\omega) = \exp(-\eta^\alpha |\omega|^\alpha)$  ( $\eta$  为尺度参数)。

其中，信噪比定义为  $10 \log_{10} \frac{(\eta_s)^\alpha}{(\eta_n)^\alpha}$  ( $\eta_s$  和  $\eta_n$  分别表示信号和噪声的尺度参数)。

可以理解的是，干扰比的定义与信噪比相同。感兴趣信号的到达方向为  $0^\circ$ ，两个干扰信号的到达方向分别为  $-30^\circ$  和  $30^\circ$ ，信噪比为 20dB，干噪比为 30dB，加性脉冲噪声建模为复对称  $\alpha$  稳定分布，快拍数 N 为 100，图中纵坐标表示的是归一化方向图增益，横坐标表示波束扫描的空域范围  $[-90^\circ, 90^\circ]$ 。

其中，图 3a 中， $a=1.5$ ，图 3b 中  $a=0.6$ ，该  $a$  表示特征指数，从图 3a 及图 3b 中可以看出在特征指数逐渐变小时，利用本发明实施例中的随机梯度算法及类似递归最小二乘法得到的波束方向图效果更优。

## 2、SINR

令特征指数  $\alpha \in [0.2, 2]$ ，请参阅图，为本发明实施例中 SINR 的效果示意图，其中，横坐标表示特征指数，纵坐标表示 SINR，从图 4 可以看出：稳定状态下，本发明比现有波束形成算法的输出 SINR 高 3dB，波束成形性能要好很多。此外，本发明在任意特征指数  $\alpha$  的脉冲噪声输出 SINR 都要高，对脉冲噪声有较好的稳健性。

在本申请所提供的几个实施例中，应该理解到，所揭露的装置和方法，可以通过其它的方式实现。例如，以上所描述的装置实施例仅仅是示意性的，例如，所述模块的划分，仅仅为一种逻辑功能划分，实际实现时可以有另外的划分方式，例如多个模块或组件可以结合或者可以集成到另一个系统，或一些特征可以忽略，或不执行。另一点，所显示或讨论的相互之间的耦合或直接耦合或通信连接可以是通过一些接口，装置或模块的间接耦合或通信连

接，可以是电性，机械或其它的形式。

所述作为分离部件说明的模块可以是或者也可以不是物理上分开的，作为模块显示的部件可以是或者也可以不是物理模块，即可以位于一个地方，或者也可以分布到多个网络模块上。可以根据实际的需要选择其中的部分或者全部模块来实现本实施例方案的目的。

另外，在本发明各个实施例中的各功能模块可以集成在一个处理模块中，也可以是各个模块单独物理存在，也可以两个或两个以上模块集成在一个模块中。上述集成的模块既可以采用硬件的形式实现，也可以采用软件功能模块的形式实现。

所述集成的模块如果以软件功能模块的形式实现并作为独立的产品销售或使用，可以存储在一个计算机可读取存储介质中。基于这样的理解，本发明的技术方案本质上或者说对现有技术做出贡献的部分或者该技术方案的全部或部分可以以软件产品的形式体现出来，该计算机软件产品存储在一个存储介质中，包括若干指令用以使得一台计算机设备（可以是个人计算机，服务器，或者网络设备等）执行本发明各个实施例所述方法的全部或部分步骤。而前述的存储介质包括：U盘、移动硬盘、只读存储器（ROM，Read-Only Memory）、随机存取存储器（RAM，Random Access Memory）、磁碟或者光盘等各种可以存储程序代码的介质。

需要说明的是，对于前述的各方法实施例，为了简便描述，故将其都表述为一系列的动作组合，但是本领域技术人员应该知悉，本发明并不受所描述的动作顺序的限制，因为依据本发明，某些步骤可以采用其它顺序或者同时进行。其次，本领域技术人员也应该知悉，说明书中所描述的实施例均属于优选实施例，所涉及的动作和模块并不一定都是本发明所必须的。

在上述实施例中，对各个实施例的描述都各有侧重，某个实施例中未详述的部分，可以参见其它实施例的相关描述。

以上为对本发明所提供的一种脉冲噪声下的波束成形方法及装置的描述，对于本领域的技术人员，依据本发明实施例的思想，在具体实施方式及应用范围上均会有改变之处，综上所述，本说明书内容不应理解为对本发明的限制。

## 权 利 要 求 书

1、一种脉冲噪声下的波束成形方法，其特征在于，包括：

利用波束方向图的稀疏性，联合阵列输出几何功率及  $l_1$  范数最小化，得到目标优化问题；

利用随机梯度算法或者类似递归最小二乘法对所述目标优化问题进行求解，得到最优权矢量；

根据所述最优权矢量进行波束成形。

2、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述目标优化问题如下：

$$\min_w \{ e^{E\{\log|w^H x(n)|\}} + \lambda \|w^H A\|_1 \}$$

$$s.t. w^H a(\theta_0) = 1$$

其中， $e^{E\{\log|w^H x(n)|\}}$  为阵列输出几何功率， $\lambda \|w^H A\|_1$  为稀疏约束项；

$\min_w$  表示对表达式  $e^{E\{\log|w^H x(n)|\}} + \lambda \|w^H A\|_1$  取最小值时对应的参数  $w$ ；

$E$  表示求统计均值， $w$  为  $M \times 1$  维权矢量， $M$  表示  $M$  个天线阵元， $H$  表示共轭转置， $x(n)$  表示为天线阵列在  $n$  时刻接收的  $M \times 1$  维信号， $\lambda$  表示权衡稀疏度与阵列输出几何功率的正则化参数， $A$  为旁瓣角度区域内空域采样形成的  $M \times L$  维导向矢量矩阵， $L$  为角度区域内采样个数， $\theta_0$  为感兴趣信号的方向， $s.t.$  表示约束条件；

其中， $A = [a(\theta_1), \dots, a(\theta_L)]$ ，且  $a(\theta_i) = [1, e^{j\frac{2\pi}{\xi}d \sin \theta_i}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\xi}(M-1)d \sin \theta_i}]$ ，其中， $d$  为阵元间距， $\xi$  表示波长， $i$  的值为 1 至  $L$ 。

3、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述利用随机梯度算法或者类似递归最小二乘法对所述目标优化问题进行求解，得到最优权矢量的步骤包括：

利用所述目标优化问题建立所述目标优化问题的代价函数；

利用所述随机梯度算法或者所述类似递归最小二乘法对所述代价函数进行求解，得到最优权矢量；

其中，所述目标优化问题的代价函数为：

$$J(w) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \log|w^H x(n)| + \lambda \|w^H A\|_1 + \gamma(w^H a(\theta_0) - 1)$$

其中,  $J(w)$  表示  $J$  是以  $w$  为参数的代价函数,  $N$  表示快拍个数,  $w$  为  $M \times 1$  维权矢量,  $M$  表示  $M$  个天线阵元,  $H$  表示共轭转置,  $x(n)$  表示为天线阵列在  $n$  时刻接收的  $M \times 1$  维信号,  $\lambda$  表示权衡稀疏度与阵列输出几何功率的正则化参数,  $A$  为旁瓣角度区域内空域采样形成的  $M \times L$  维导向矢量矩阵,  $L$  为角度区域内采样个数,  $\theta_0$  为感兴趣信号的方向,  $\gamma$  为拉格朗日乘子;

其中,  $A = [a(\theta_1), \dots, a(\theta_L)]$ , 且  $a(\theta_i) = [1, e^{j\frac{2\pi}{\xi}d\sin\theta_i}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\xi}(M-1)d\sin\theta_i}]$ 。其中,  $d$  为阵元间距,  $\xi$  表示波长,  $i$  的值为 1 至  $L$ 。

4、根据权利要求 3 所述的方法, 其特征在于, 利用所述随机梯度算法得到的最优权矢量为:

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{P} \cdot \left\{ \mathbf{C} \cdot \mathbf{w}(n) - \mu \cdot \frac{y^*(n)\mathbf{x}(n)}{|y(n)|^2} \right\} + \mathbf{F}$$

其中,

$$\mathbf{P} = \mathbf{I} - \frac{a(\theta_0)a^H(\theta_0)}{a^H(\theta_0)a(\theta_0)},$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{I} - \mu \cdot \lambda \mathbf{A} \Pi(\mathbf{w}(n)) \mathbf{A}^H,$$

$$\Pi(\mathbf{w}(n)) = \text{diag} \left\{ \left| (\mathbf{A}^H \mathbf{w}(n))_1 \right|^{-1}, \dots, \left| (\mathbf{A}^H \mathbf{w}(n))_L \right|^{-1} \right\},$$

$$y(n) = \mathbf{w}(n)^H \mathbf{x}(n)$$

$$\mathbf{F} = \frac{a(\theta_0)}{a^H(\theta_0)a(\theta_0)}$$

其中,  $\mathbf{I}$  为  $M$  行  $M$  列的单位矩阵,  $\text{diag}\{\cdot\}$  表示以其中元素为对角元素构成的对角矩阵,  $*$  表示取共轭,  $H$  表示共轭转置,  $\mathbf{w}(n+1)$  表示在时刻  $n+1$  时计算得到的权矢量, 且在  $n=N$  时的权矢量为最优权矢量,  $w$  为  $M \times 1$  维权矢量,  $M$  表示  $M$  个天线阵元,  $\mu$  表示迭代步长, 为一个常数,  $x(n)$  表示为天线阵列在  $n$  时刻接收的  $M \times 1$  维信号,  $\theta_0$  为感兴趣信号的方向,  $A$  为旁瓣角度区域内空域采样形成的  $M \times L$  维导向矢量矩阵,  $L$  为角度区域内采样个数,  $\lambda$  表示权衡稀疏度与阵列输出几何功率的正则化参数;

其中,  $A = [a(\theta_1), \dots, a(\theta_L)]$ , 且  $a(\theta_i) = [1, e^{j\frac{2\pi}{\xi}d\sin\theta_i}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\xi}(M-1)d\sin\theta_i}]$ 。其中,  $d$  为阵元间距,  $\xi$  表示波长,  $i$  的值为 1 至  $L$ 。

5、根据权利要求 3 所述的方法，其特征在于，所述利用所述类似递归最小二乘法得到的最优权矢量为：

$$\mathbf{w} = \frac{\mathbf{Q}a(\theta_0)}{a^H(\theta_0)\mathbf{Q}a(\theta_0)}$$

其中，

$$\mathbf{Q} = \mathbf{P}(n) - \mathbf{P}(n)\lambda\mathbf{A} \left[ \mathbf{A}^H\mathbf{P}(n)\lambda\mathbf{A} + \Pi(\mathbf{w}(n))^{-1} \right]^{-1} \mathbf{A}^H\mathbf{P}(n)$$

$$\mathbf{P}(n) = \mathbf{P}(n-1) - \frac{|\mathbf{w}(n)\mathbf{x}(n)|^{-2} \mathbf{P}(n-1)\mathbf{x}(n)\mathbf{x}^H(n)\mathbf{P}(n-1)}{1 + |\mathbf{w}(n)\mathbf{x}(n)|^{-2} \mathbf{x}^H(n)\mathbf{P}(n-1)\mathbf{x}(n)}$$

其中， $\mathbf{w}$  为权矢量，且在  $n=N$  时得到的权矢量为最优权矢量， $\lambda$  表示权衡稀疏度与阵列输出几何功率的正则化参数， $\mathbf{A}$  为旁瓣角度区域内空域采样形成的  $M \times L$  维导向矢量矩阵， $L$  为角度区域内采样个数， $n$  属于 1 至  $N$ ，且  $N$  为快拍个数， $x(n)$  表示为天线阵列在  $n$  时刻接收的  $M \times 1$  维信号， $\theta_0$  为感兴趣信号的方向，

其中， $\mathbf{A} = [a(\theta_1), \dots, a(\theta_L)]$ ，且  $a(\theta_i) = [1, e^{j\frac{2\pi}{\xi}d\sin\theta_i}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\xi}(M-1)d\sin\theta_i}]$ 。其中， $d$  为阵元间距， $\xi$  表示波长， $i$  的值为 1 至  $L$ 。

6、一种脉冲噪声下的波束成形装置，其特征在于，包括：

优化模块，用于利用波束方向图的稀疏性，联合阵列输出几何功率及  $l_1$  范数最小化，得到目标优化问题；

求解模块，用于利用随机梯度算法或者类似递归最小二乘法对所述目标优化问题进行求解，得到最优权矢量；

波束成形模块，用于根据所述最优权矢量进行波束成形。

7、根据权利要求 6 所述的装置，其特征在于，所述目标优化问题如下：

$$\min_w \{ e^{E\{\log|\mathbf{w}^H\mathbf{x}(n)|\}} + \lambda \|\mathbf{w}^H\mathbf{A}\|_1 \}$$

$$s.t. \mathbf{w}^H\mathbf{a}(\theta_0) = 1$$

其中， $e^{E\{\log|\mathbf{w}^H\mathbf{x}(n)|\}}$  为阵列输出几何功率， $\lambda \|\mathbf{w}^H\mathbf{A}\|_1$  为稀疏约束项；

$\min_w$  表示对表达式  $e^{E\{\log|\mathbf{w}^H\mathbf{x}(n)|\}} + \lambda \|\mathbf{w}^H\mathbf{A}\|_1$  取最小值时对应的参数  $w$ ；

$E$  表示求统计均值， $\mathbf{w}$  为  $M \times 1$  维权矢量， $M$  表示  $M$  个天线阵元， $H$  表示共轭转置， $\mathbf{x}(n)$

表示为天线阵列在  $n$  时刻接收的  $M \times 1$  维信号,  $\lambda$  表示权衡稀疏度与阵列输出几何功率的正则化参数,  $A$  为旁瓣角度区域内空域采样形成的  $M \times L$  维导向矢量矩阵,  $L$  为角度区域内采样个数,  $\theta_0$  为感兴趣信号的方向,  $s.t.$  表示约束条件;

其中,  $A = [a(\theta_1), \dots, a(\theta_L)]$ , 且  $a(\theta_i) = [1, e^{j\frac{2\pi}{\xi}d \sin \theta_i}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\xi}(M-1)d \sin \theta_i}]$ , 其中,  $d$  为阵元间距,  $\xi$  表示波长,  $i$  的值为 1 至  $L$ 。

8、根据权利要求 6 所述的装置, 其特征在于, 所述求解模块具体用于:

利用所述目标优化问题建立所述目标优化问题的代价函数;

利用所述随机梯度算法或者所述类似递归最小二乘法对所述代价函数进行求解, 得到最优权矢量;

其中, 所述目标优化问题的代价函数为:

$$J(w) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \log |w^H x(n)| + \lambda \|w^H A\|_1 + \gamma (w^H a(\theta_0) - 1)$$

其中,  $J(w)$  表示  $J$  是以  $w$  为参数的代价函数,  $N$  表示快拍个数,  $w$  为  $M \times 1$  维权矢量,  $M$  表示  $M$  个天线阵元,  $H$  表示共轭转置,  $x(n)$  表示为天线阵列在  $n$  时刻接收的  $M \times 1$  维信号,  $\lambda$  表示权衡稀疏度与阵列输出几何功率的正则化参数,  $A$  为旁瓣角度区域内空域采样形成的  $M \times L$  维导向矢量矩阵,  $L$  为角度区域内采样个数,  $\theta_0$  为感兴趣信号的方向,  $\gamma$  为拉格朗日乘子;

其中,  $A = [a(\theta_1), \dots, a(\theta_L)]$ , 且  $a(\theta_i) = [1, e^{j\frac{2\pi}{\xi}d \sin \theta_i}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\xi}(M-1)d \sin \theta_i}]$ 。其中,  $d$  为阵元间距,  $\xi$  表示波长,  $i$  的值为 1 至  $L$ 。

9、根据权利要求 8 所述的装置, 其特征在于, 所述求解模块利用所述随机梯度算法得到的最优权矢量为:

$$w(n+1) = P \cdot \left\{ C \cdot w(n) - \mu \cdot \frac{y^*(n)x(n)}{|y(n)|^2} \right\} + F$$

其中,

$$\begin{aligned} \mathbf{P} &= \mathbf{I} - \frac{a(\theta_0)a^H(\theta_0)}{a^H(\theta_0)a(\theta_0)}, \\ \mathbf{C} &= \mathbf{I} - \mu \cdot \lambda \mathbf{A} \Pi(\mathbf{w}(n)) \mathbf{A}^H, \\ \Pi(\mathbf{w}(n)) &= \text{diag} \left\{ \left| \left( \mathbf{A}^H \mathbf{w}(n) \right)_1 \right|^{-1}, \dots, \left| \left( \mathbf{A}^H \mathbf{w}(n) \right)_L \right|^{-1} \right\}, \\ y(n) &= \mathbf{w}(n)^H \mathbf{x}(n) \\ \mathbf{F} &= \frac{a(\theta_0)}{a^H(\theta_0)a(\theta_0)} \end{aligned}$$

其中,  $\mathbf{I}$  为  $M$  行  $M$  列的单位矩阵,  $\text{diag}\{\cdot\}$  表示以其中元素为对角元素构成的对角矩阵,  $*$  表示取共轭,  $H$  表示共轭转置,  $\mathbf{w}(n+1)$  表示在时刻  $n+1$  时计算得到的权矢量, 且在  $n=N$  时的权矢量为最优权矢量,  $\mathbf{w}$  为  $M \times 1$  维权矢量,  $M$  表示  $M$  个天线阵元,  $\mu$  表示迭代步长, 为一个常数,  $x(n)$  表示为天线阵列在  $n$  时刻接收的  $M \times 1$  维信号,  $\theta_0$  为感兴趣信号的方向,  $\mathbf{A}$  为旁瓣角度区域内空域采样形成的  $M \times L$  维导向矢量矩阵,  $L$  为角度区域内采样个数,  $\lambda$  表示权衡稀疏度与阵列输出几何功率的正则化参数;

其中,  $\mathbf{A} = [a(\theta_1), \dots, a(\theta_L)]$ , 且  $a(\theta_i) = [1, e^{j\frac{2\pi}{\xi}d \sin \theta_i}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\xi}(M-1)d \sin \theta_i}]$ 。其中,  $d$  为阵元间距,  $\xi$  表示波长,  $i$  的值为 1 至  $L$ 。

10、根据权利要求 8 所述的装置, 其特征在于, 所述求解模块利用所述类似递归最小二乘法得到的最优权矢量为:

$$\mathbf{w} = \frac{\mathbf{Q}a(\theta_0)}{a^H(\theta_0)\mathbf{Q}a(\theta_0)}$$

其中,

$$\begin{aligned} \mathbf{Q} &= \mathbf{P}(n) - \mathbf{P}(n)\lambda \mathbf{A} \left[ \mathbf{A}^H \mathbf{P}(n)\lambda \mathbf{A} + \Pi(\mathbf{w}(n))^{-1} \right]^{-1} \mathbf{A}^H \mathbf{P}(n) \\ \mathbf{P}(n) &= \mathbf{P}(n-1) - \frac{\left| \mathbf{w}(n)\mathbf{x}(n) \right|^2 \mathbf{P}(n-1)\mathbf{x}(n)\mathbf{x}^H(n)\mathbf{P}(n-1)}{1 + \left| \mathbf{w}(n)\mathbf{x}(n) \right|^2 \mathbf{x}^H(n)\mathbf{P}(n-1)\mathbf{x}(n)} \end{aligned}$$

其中,  $\mathbf{w}$  为权矢量, 且在  $n=N$  时得到的权矢量为最优权矢量,  $\lambda$  表示权衡稀疏度与阵列输出几何功率的正则化参数,  $\mathbf{A}$  为旁瓣角度区域内空域采样形成的  $M \times L$  维导向矢量矩阵,  $L$  为角度区域内采样个数,  $n$  属于 1 至  $N$ , 且  $N$  为快拍个数,  $x(n)$  表示为天线阵列在  $n$  时刻接收的  $M \times 1$  维信号,  $\theta_0$  为感兴趣信号的方向,

其中,  $\mathbf{A} = [a(\theta_1), \dots, a(\theta_L)]$ , 且  $a(\theta_i) = [1, e^{j\frac{2\pi}{\xi}d \sin \theta_i}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\xi}(M-1)d \sin \theta_i}]$ 。其中,

d 为阵元间距， $\xi$  表示波长，i 的值为 1 至 L。

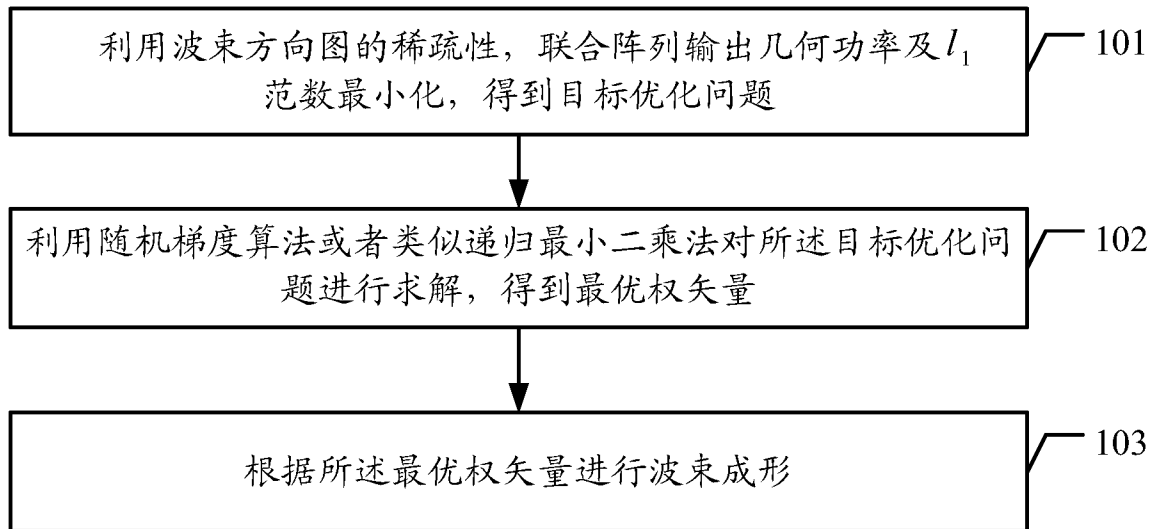


图 1



图 2

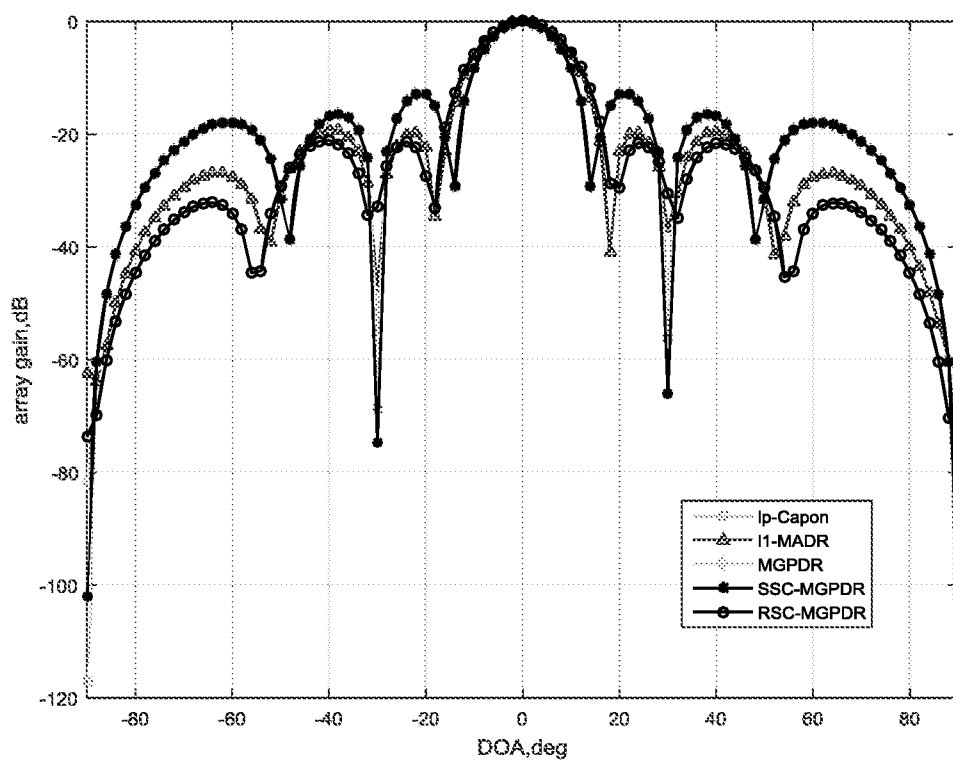


图 3a

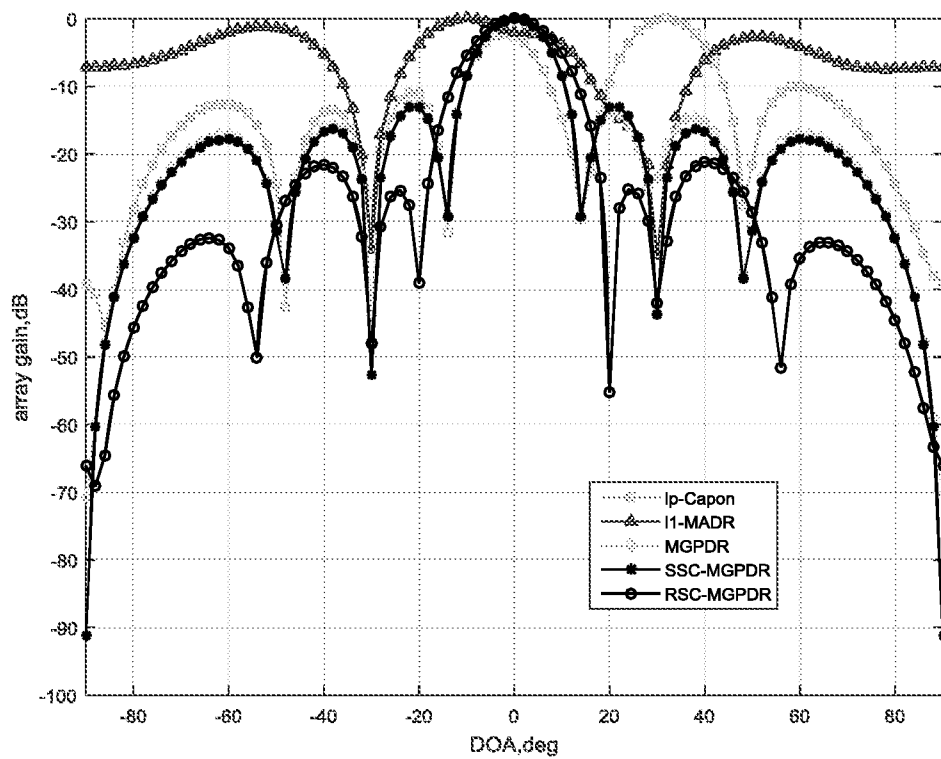


图 3b

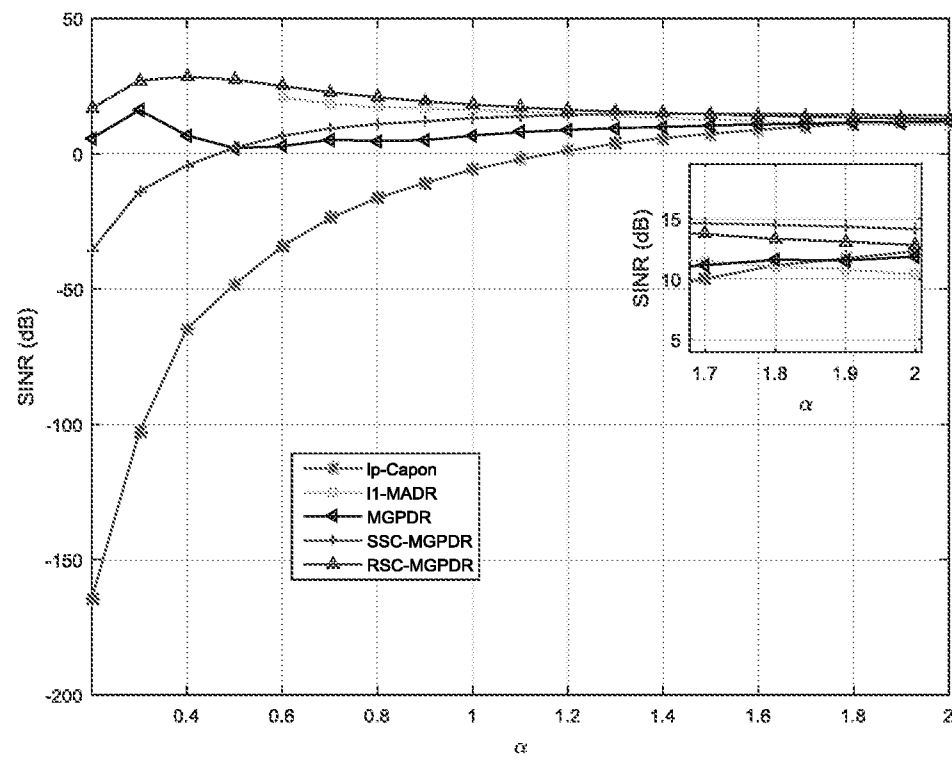


图 4

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.  
PCT/CN2016/106779

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01S 7/28 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01S; H04B; H04W; H04L; H04Q

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT,CNKI,WPI, EPODOC, IEEE: 稀疏, 脉冲噪声, 波束, 成形, 赋形, 加权, 阵列输出功率, 范数, 最优权矢量, 约束;  
sparse, impulsive noise, beam, forming, weight, array output power, norm, optimal weight vector, constraint

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                                                                                                                                                                                   | Relevant to claim No. |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| E         | CN 106680779 A (SHENZHEN UNIVERSITY), 17 May 2017 (17.05.2017), claims 1-10                                                                                                                                                                                          | 1-10                  |
| A         | 刘振等, 一种加权稀疏约束稳健 Capon 波束形成方法, 物理学报, 65(10), 13 April 2016 (13.04.2016), page 104303-3, left-hand column, lines 24 to 30, pages 104303-4, right-hand column, lines 12-16, (LIU, Zhen et al., RobustCapon beamforming weighted sparse constraint, Acta Physica Sinica) | 1-10                  |
| A         | 解虎等, 一种基于稀疏约束的稳健波束形成方法, 电子学报, 44(9), 30 September 2016 (30.09.2016), the whole document, (XIE, Hu et al., A Robust Beamforming Method Based on Sparse Constraint, ACTA ELECTRONICA SINICA)                                                                           | 1-10                  |
| A         | CN 104935367 A (UNIVERSITY OF ELECTRONIC SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA), 23 September 2015 (23.09.2015), the whole document                                                                                                                                        | 1-10                  |
| A         | US 2014153742 A1 (MITSUBISHI ELECTRIC RESEARCH LABORATORIES, INC.), 05 June 2014 (05.06.2014), the whole document                                                                                                                                                    | 1-10                  |

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

|                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| * Special categories of cited documents:                                                                                                                                | "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention                                              |
| "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance                                                                | "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone                                                                     |
| "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date                                                                               | "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art |
| "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) | "&" document member of the same patent family                                                                                                                                                                                                    |
| "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                  |
| "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                  |

|                                                                                                                                                                                                               |                                                                          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Date of the actual completion of the international search<br>23 June 2017                                                                                                                                     | Date of mailing of the international search report<br>10 August 2017     |
| Name and mailing address of the ISA<br>State Intellectual Property Office of the P. R. China<br>No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao<br>Haidian District, Beijing 100088, China<br>Facsimile No. (86-10) 62019451 | Authorized officer<br><br>SUN, Wei<br><br>Telephone No. (86-10) 62413854 |

International application No.  
PCT/CN2016/106779

Form PCT/ISA/210 (patent family annex) (July 2009)

## 国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2016/106779

## A. 主题的分类

G01S 7/28(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

## B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G01S; H04B; H04W; H04L; H04Q

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNPAT, CNKI, WPI, EPODOC, IEEE: 稀疏, 脉冲噪声, 波束, 成形, 赋形, 加权, 阵列输出功率, 范数, 最优权矢量, 约束; sparse, impulsive noise, beam, forming, weight, array output power, norm, optimal weight vector, constraint

## C. 相关文件

| 类 型* | 引用文件, 必要时, 指明相关段落                                                                                                              | 相关的权利要求 |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| E    | CN 106680779 A (深圳大学) 2017年 5月 17日 (2017 - 05 - 17)<br>权利要求1-10                                                                | 1-10    |
| A    | 刘振等. "一种加权稀疏约束稳健Capon波束形成方法"<br>物理学报, 第65卷, 第10期, 2016年 4月 13日 (2016 - 04 - 13),<br>第104303-3页左栏第24行-30行, 第104303-4页右栏第12行-16行 | 1-10    |
| A    | 解虎等. "一种基于稀疏约束的稳健波束形成方法"<br>电子学报, 第44卷, 第9期, 2016年 9月 30日 (2016 - 09 - 30),<br>全文                                              | 1-10    |
| A    | CN 104935367 A (电子科技大学) 2015年 9月 23日 (2015 - 09 - 23)<br>全文                                                                    | 1-10    |
| A    | US 2014153742 A1 (MITSUBISHI ELECTRIC RESEARCH LABORATORIES, INC) 2014年 6月<br>5日 (2014 - 06 - 05)<br>全文                        | 1-10    |

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

\* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&amp;” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2017年 6月 23日

国际检索报告邮寄日期

2017年 8月 10日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中华人民共和国国家知识产权局(ISA/CN)  
中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

受权官员

孙伟

电话号码 (86-10)62413854

国际检索报告  
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2016/106779

| 检索报告引用的专利文件 |            |    | 公布日<br>(年/月/日) | 同族专利 | 公布日<br>(年/月/日) |
|-------------|------------|----|----------------|------|----------------|
| CN          | 106680779  | A  | 2017年 5月 17日   | 无    |                |
| CN          | 104935367  | A  | 2015年 9月 23日   | 无    |                |
| US          | 2014153742 | A1 | 2014年 6月 5日    | 无    |                |