

(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
2022 年 1 月 27 日 (27.01.2022)



(10) 国际公布号
WO 2022/016796 A1

- (51) 国际专利分类号:
G01S 7/02 (2006.01) *G06F 17/16* (2006.01)
H04B 7/08 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2020/137877
- (22) 国际申请日: 2020 年 12 月 21 日 (21.12.2020)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
202010708433.8 2020 年 7 月 22 日 (22.07.2020) CN
- (71) 申请人: 东南大学 (SOUTHEAST UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国江苏省南京市江宁区东南大学路 2 号, Jiangsu 211189 (CN)。
- (72) 发明人: 毛卫宁 (MAO, Weining); 中国江苏省南京市江宁区东南大学路 2 号, Jiangsu 211189 (CN)。钱进 (QIAN, Jin); 中国江苏省南京市江宁区东南大学路 2 号, Jiangsu 211189 (CN)。陈建润 (CHEN, Jianrun); 中国江苏省南京市江宁区东南大学路 2 号, Jiangsu 211189 (CN)。
- (74) 代理人: 南京瑞弘专利商标事务所 (普通合伙) (NANJING RUIHONG PATENT & TRADEMARK AGENCY (ORDINARY PARTNERSHIP)); 中国江苏省南京市玄武区龙蟠路 155 号 3 幢 411 室, Jiangsu 210000 (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,

(54) Title: ARRAY EXPANSION METHOD FOR LINEAR ARRAY

(54) 发明名称: 一种线列阵阵列扩展方法

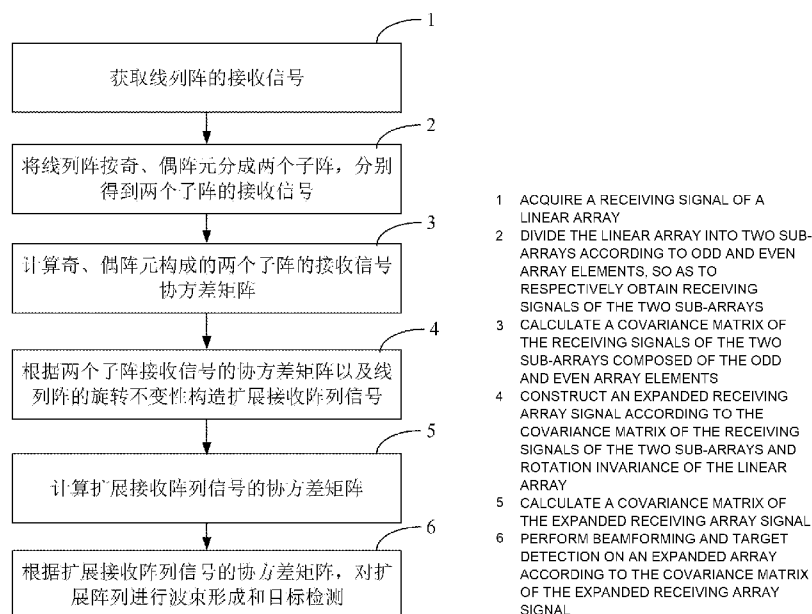


图 1

(57) Abstract: A array expansion method for a linear array, belonging to the technical field of array beamforming. Said method comprises: (1) acquiring a receiving signal of a linear array; (2) dividing the linear array into two sub-arrays according to odd and even array elements, so as to respectively obtain receiving signals of the two sub-arrays; (3) calculating a covariance matrix of the receiving signals of the two sub-arrays composed of the odd and even array elements; (4) constructing an expanded receiving array signal according to the covariance matrix of the receiving signals of the two sub-arrays and rotation invariance of the linear array; (5) calculating a covariance matrix of the expanded receiving array signal; and (6) performing, by means of a beamforming method,

GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, 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, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, 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, 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)。

根据细则4.17的声明:

— 发明人资格(细则4.17(iv))

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

beamforming and target detection on an expanded array according to the covariance matrix of the expanded receiving array signal Y. The present invention solves the problems of reduced performance and poor robustness; the requirement of non-circular symmetry of a source signal, which is limited in application; complex array expansion method and a large amount of calculation, etc. under a low signal-to-noise ratio of the existing linear array expansion methods.

(57) 摘要: 一种线性列阵阵列扩展方法, 属于列阵波束形成技术领域, 包括: (1) 获取线性列阵接收信号; (2) 按奇、偶阵元将线性列阵划分为两个子阵, 分别得到两个子阵的接收信号; (3) 计算奇、偶阵元构成的两个子阵的接收信号协方差矩阵; (4) 根据两个子阵接收信号的协方差矩阵以及列阵列的旋转不变性构造扩展接收阵列信号; (5) 计算扩展接收阵列的信号协方差矩阵; (6) 根据扩展接收阵列信号Y的协方差矩阵, 利用波束形成方法对扩展阵列进行波束形成和目标检测。解决了现有线性列阵阵列扩展方法低信噪比下性能下降, 鲁棒性差; 要求信源信号具有非圆对称性, 应用有局限性; 阵列扩展方法复杂, 计算量大等问题。

一种线列阵阵列扩展方法

技术领域

本发明涉及阵列信号处理方法，具体涉及一种线列阵阵列扩展方法。

背景技术

阵列信号处理技术广泛应用于雷达、通信、声呐等众多军用和民用领域，是这些领域中的一个焦点问题。信噪比是影响阵列信号处理性能的一个关键因素。对于给定的阵列配置，物理阵元数和阵列孔径是确定的，如何提高低信噪比下弱目标的探测性能是工程应用中亟待解决的问题。利用阵列扩展技术，通过虚拟增加阵元数目，实现阵列孔径扩展，提高低信噪比下弱目标的探测性能不失为一种有效途径。目前常用的阵列扩展技术主要有：基于高阶累积量法、基于内插变换法、基于信源和接收信号特性的重构数据法和基于宽带信号时延特性和信号非圆对称性的线列阵扩展方法等。

高阶累积量法有良好稳定的阵列扩展特性，且根据高斯信号的高阶累积量为零的性质，能够对系统中的高斯噪声起到抑制作用，使得其能够在不同的高斯噪声环境下具有良好的估计性能，但该方法计算量庞大，存在很多的冗余信息，当阵元数增加时，这些冗余信息可能使阵元之间发生耦合；内插变换法通过增加阵元数实现阵列扩展，但子区域的长度和内插变换角度的步长难以确定，如何兼顾算法计算量和计算精度是内插变换法的一大难点；基于信源和接收信号特性重构数据法的提出旨在解决内插变换法中存在的“角度敏感”、“插值步长敏感”以及运算量大等问题，但主要应用于L型阵列等特殊二维阵列，如何将该方法运用到一维阵列模型有待研究；目前常用的一维线列阵扩展方法有基于线列阵时延特性的扩展方法和基于接收信号非圆特性的线列阵扩展方法，前者可以在阵列扩展的同时，实现相干信源的解相干，但在低信噪比条件下鲁棒性较差，后者要求入射信号具有非圆对称性，应用中有局限性。

因此，有必要提出一种新的线列阵的阵列扩展方法。

发明内容

发明目的：为克服上述现有技术的不足，本发明提供一种低信噪比条件下鲁棒性好、运算量小的线列阵阵列扩展方法。

技术方案：为实现上述目的，本发明采用如下技术方案：

一种线列阵阵列扩展方法，包括以下步骤：

(1) 获取线列阵的接收信号 $\mathbf{x}(t)$ ；

(2) 将线列阵按奇、偶阵元分成两个子阵，分别得到两个子阵的接收信号 $\mathbf{x}_o(t)$ 和 $\mathbf{x}_e(t)$ ；

(3) 计算奇、偶阵元构成的两个子阵的接收信号协方差矩阵 $\mathbf{R}_{xx}$;

(4) 根据两个子阵接收信号的协方差矩阵 $\mathbf{R}_{xx}$ 以及线列阵的旋转不变性构造扩展接收阵列信号 $\mathbf{Y}$;

(5) 计算扩展接收阵列信号 $\mathbf{Y}$ 的协方差矩阵 $\mathbf{R}_{YY}$;

(6) 根据扩展接收阵列信号 $\mathbf{Y}$ 的协方差矩阵 $\mathbf{R}_{YY}$, 利用波束形成方法对扩展阵列进行波束形成和目标检测。

进一步的, 所述步骤(1)中接收阵为均匀线列阵, 阵元数为 $2M$, K 个远场信号源以平面波入射到接收阵, 阵列接收信号为:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t)$$

其中, $\mathbf{x}(t)$ 为 $2M \times 1$ 维阵列接收信号向量:

$$\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_{2M}(t)]^T$$

$\mathbf{s}(t)$ 和 $\mathbf{n}(t)$ 分别为 $K \times 1$ 维源信号向量和 $2M \times 1$ 维噪声向量:

$$\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_K(t)]^T$$

$$\mathbf{n}(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_{2M}(t)]^T$$

$\mathbf{A}$ 为 $2M \times K$ 维的阵列流型矩阵:

$$\mathbf{A} = [a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_K)]$$

其中, $\mathbf{a}(\theta_k) = \left[1, e^{j2\pi d \cos \theta_k / \lambda}, \dots, e^{j2\pi (2M-1)d \cos \theta_k / \lambda} \right]^T$, λ 为信号波长, d 为阵元间距, θ_k 为第 k

个信号源的方位, $k = 1, 2, \dots, K$ 。

进一步的, 所述步骤(2)中, 线列阵按奇、偶阵元分成两个子阵, 两个子阵的接收信号分别为:

$$\mathbf{x}_o(t) = [x_1(t), x_3(t), \dots, x_{2M-1}(t)]^T$$

$$\mathbf{x}_e(t) = [x_2(t), x_4(t), \dots, x_{2M}(t)]^T$$

其中, $x_i(t)$ 为第 i 个阵元的接收信号, $\mathbf{x}_o(t)$ 为奇数号阵元构成的子阵的接收信号, $\mathbf{x}_e(t)$ 为偶数号阵元构成的子阵的接收信号。

进一步的, 所述步骤(3)中, 奇、偶阵元构成的两个子阵的接收信号协方差矩阵为:

$$\mathbf{R}_{xx} = E \{ \mathbf{x}_o(t) \cdot \mathbf{x}_e^H(t) \} = \mathbf{A}_o \mathbf{R}_{ss} \mathbf{A}_e^H$$

其中, $\mathbf{A}_o$ 和 $\mathbf{A}_e$ 分别为奇、偶阵元构成的两个子阵的阵列流型矩阵, 由阵列流型矩阵 $\mathbf{A}$ 得

到, $\mathbf{R}_{ss}$ 为源信号协方差矩阵。

进一步的, 所述步骤(4)中, 构造的扩展接收阵列信号为:

$$\mathbf{Y} = [\mathbf{Y}_1^T, \mathbf{Y}_2^T, \mathbf{Y}_3^T, \mathbf{Y}_4^T]^T$$

其中, $\mathbf{Y}_1 = \mathbf{R}_{xx}(:, 1:M-1)$, $\mathbf{Y}_2 = \mathbf{R}_{xx}(:, 2:M)$, $\mathbf{R}_{xx}(:, 1:M-1)$ 和 $\mathbf{R}_{xx}(:, 2:M)$ 分别为协方差矩阵 $\mathbf{R}_{xx}$ 的前 $M-1$ 列和后 $M-1$ 列构成的矩阵, 矩阵 $\mathbf{Y}_3$ 为矩阵 $\mathbf{Y}_2$ 的共轭和行、列倒置, 矩阵 $\mathbf{Y}_4$ 为矩阵 $\mathbf{Y}_1$ 的共轭和行、列倒置。

进一步的, 所述步骤(5)中, 扩展接收阵列的信号协方差矩阵为:

$$\mathbf{R}_{YY} = E(\mathbf{Y}\mathbf{Y}^H)$$

更进一步的, 所述步骤(6)中, 利用常规波束形成 CBF 或最小方差无畸变响应 MVDR 波束形成方法对扩展阵列进行波束形成和目标检测, CBF 和 MVDR 波束形成的波束输出功率为:

$$P_{CBF} = \mathbf{w}^H \mathbf{R}_{YY} \mathbf{w}$$

$$P_{MVDR}(\theta) = \frac{1}{\mathbf{w}^H \mathbf{R}_{YY}^{-1} \mathbf{w}}$$

其中, $\mathbf{w} = [(a_0)^T, (a_0 b^{-1})^T, (a_0 b)^T, (a_0)^T]^T$, $b = e^{j2\pi 2d \cos \theta / \lambda}$, a_0 为奇数号阵元所构成的子阵的导向向量, $a_0 = [1 \ e^{j2\pi 2d \cos \theta / \lambda} \dots e^{j2\pi (2M-2)d \cos \theta / \lambda}]^T$, λ 为信号波长, d 为阵元间距, θ 为空间的波束扫描方位。

有益效果: 本发明利用各阵元噪声的不相关性, 以及线列阵的旋转不变性重构阵列数据, 实现了一维线列阵的扩展。通过阵列扩展提高弱目标的探测性能, 可以大大降低探测系统的硬件成本。与现有技术相比, 本发明在阵列扩展的同时, 进一步减小了噪声的影响, 降低了波束输出旁瓣, 有利于低信噪比下弱目标的检测, 提高了鲁棒性; 阵列扩展方法简单, 计算量小, 不要求信源信号具有非圆对称性, 提高了实用性。

附图说明

图1是本发明实施例提供的线列阵阵列扩展方法流程图;

图2是根据本发明实施例得到的扩展阵常规波束形成波束输出功率随方位变化曲线示意图;

图3是根据本发明实施例得到的扩展阵最小方差无畸变响应波束形成波束输出功率随方位变化曲线示意图;

图4是根据本发明实施例得到的扩展阵检测概率随信噪比变化的曲线示意图。

具体实施方式

下面结合附图对本发明的技术方案作进一步说明。

参照图 1，在一实施例中，针对一维线列阵的阵列扩展方法包括以下步骤：

步骤（1），获取线列阵接收信号：

给定目标源信号为带限噪声，频带为 2000Hz-2400Hz，采样频率 16000Hz，采用阵元数为 6 的均匀线列阵，声速 1500m/s，阵元间距为中心频率波长的一半，单次快拍数为 1024，信源数为 1，目标方位为 60° ，信噪比为 -10dB。

阵列接收信号为：

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

其中， $\mathbf{x}(t)$ 为 $2M \times 1$ 维阵列接收信号向量：

$$\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_{2M}(t)]^T \quad (2)$$

$\mathbf{s}(t)$ 和 $\mathbf{n}(t)$ 分别为 $K \times 1$ 维信号向量（信号源发出）和 $2M \times 1$ 维噪声向量：

$$\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_K(t)]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{n}(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_{2M}(t)]^T \quad (4)$$

噪声是均值为零，方差为 σ^2 的高斯白噪声， $\mathbf{A}$ 为 $2M \times K$ 维的阵列流型矩阵：

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_K)] \quad (5)$$

其中， $\mathbf{a}(\theta_k) = \left[1, e^{j2\pi d \cos \theta_k / \lambda}, \dots, e^{j2\pi (2M-1)d \cos \theta_k / \lambda} \right]^T$ ， λ 为信号波长， d 为阵元间距， θ_k 为第 k

个信号源的方位， $k=1, 2, \dots, K$ ； j 表示复数因子；

步骤（2），按奇、偶阵元将线列阵划分为两个子阵：

奇、偶阵元构成的两个子阵的接收信号为：

$$\mathbf{x}_o(t) = [x_1(t), x_3(t), \dots, x_{2M-1}(t)]^T \quad (6)$$

$$\mathbf{x}_e(t) = [x_2(t), x_4(t), \dots, x_{2M}(t)]^T \quad (7)$$

其中， $x_i(t)$ 为第 i 个阵元的接收信号， $\mathbf{x}_o(t)$ 为奇数号阵元构成的子阵的接收信号， $\mathbf{x}_e(t)$ 为偶数号阵元构成的子阵的接收信号。

步骤（3），计算奇、偶阵元构成的两个子阵的接收信号协方差矩阵：

$$\mathbf{R}_{xx} = E \{ \mathbf{x}_o(t) \cdot \mathbf{x}_e^H(t) \} = \mathbf{A}_o \mathbf{R}_{ss} \mathbf{A}_e^H \quad (8)$$

其中, $\mathbf{A}_o$ 和 $\mathbf{A}_e$ 分别为奇、偶阵元构成的两个子阵的阵列流型矩阵, 可由阵列流型矩阵 $\mathbf{A}$ 得到, 如上所述, $\mathbf{A}$ 是 $2M \times K$ 维矩阵, 提取 $\mathbf{A}$ 中的奇数行 $\times K$ 维得到 $\mathbf{A}_o$, 将 $\mathbf{A}$ 中的偶数行 $\times K$ 维得到 $\mathbf{A}_e$, $\mathbf{R}_{ss}$ 为源信号协方差矩阵。上标 T 表示转置, 上标 H 表示共轭。由于各阵元的噪声不相关, 奇、偶阵元构成的子阵的接收信号协方差矩阵 $\mathbf{R}_{xx}$ 去除了噪声的影响。

步骤 (4), 构造扩展接收阵列信号:

$$\mathbf{Y} = [\mathbf{Y}_1^T, \mathbf{Y}_2^T, \mathbf{Y}_3^T, \mathbf{Y}_4^T]^T \quad (9)$$

其中, $\mathbf{Y}_1 = \mathbf{R}_{xx}(:, 1:M-1)$, $\mathbf{Y}_2 = \mathbf{R}_{xx}(:, 2:M)$, $\mathbf{R}_{xx}(:, 1:M-1)$ 和 $\mathbf{R}_{xx}(:, 2:M)$ 分别为协方差矩阵 $\mathbf{R}_{xx}$ 的前 $M-1$ 列和后 $M-1$ 列构成的矩阵, 前 $M-1$ 列指的是 1 到 $M-1$ 列, 后 $M-1$ 列指的是 2 到 M 列, 矩阵 $\mathbf{Y}_3$ 、 $\mathbf{Y}_4$ 由线列阵的旋转不变性得到, 分别为矩阵 $\mathbf{Y}_2$ 、 $\mathbf{Y}_1$ 的共轭和行、列倒置; 具体地, $\mathbf{Y}_3$ 是由 $\mathbf{Y}_2$ 先共轭再行列倒置得到, $\mathbf{Y}_4$ 是由 $\mathbf{Y}_1$ 先共轭再行列倒置得到。

步骤 (5), 计算扩展接收阵列的信号协方差矩阵:

$$\mathbf{R}_{YY} = E(\mathbf{Y}\mathbf{Y}^H) \quad (10)$$

步骤 (6), 计算常规波束形成(Conventional Beamforming, CBF)和最小方差无畸变响应波束形成(Minimum Variance Distortionless Response, MVDR)的波束输出功率:

$$P_{CBF} = \mathbf{w}^H \mathbf{R}_{YY} \mathbf{w} \quad (11)$$

$$P_{MVDR}(\theta) = \frac{1}{\mathbf{w}^H \mathbf{R}_{YY}^{-1} \mathbf{w}} \quad (12)$$

其中, $\mathbf{w} = [(a_o)^T, (a_o b^{-1})^T, (a_o b)^T, (a_o)^T]^T$, $b = e^{j2\pi 2d \cos \theta / \lambda}$, a_o 为奇阵元所构成的子阵的导向向量, $a_o = [1 \ e^{j2\pi 2d \cos \theta / \lambda} \dots e^{j2\pi (2M-2)d \cos \theta / \lambda}]^T$, λ 为信号波长, d 为阵元间距, θ 为空间的波束扫描方位。

图 2 示出了扩展线列阵与未扩展线列阵常规波束形成波束输出功率随方位的变化, 图 3 为扩展线列阵与未扩展线列阵 MVDR 波束形成波束输出功率随方位的变化, 由图 2 和图 3 可见, 扩展线列阵具有更低的旁瓣, 表明对噪声的抑制能力增强; 图 4 为扩展线列阵与未扩展线列阵检测概率随信噪比的变化, 由 100 次蒙特卡洛实验得到, 由图 4 可见, 低信噪比下扩展线列阵的检测概率明显高于未扩展线列阵, 有利于弱目标的检测。

权 利 要 求 书

1、一种线列阵阵列扩展方法，其特征在于，包括以下步骤：

- (1) 获取线列阵的接收信号 $\mathbf{x}(t)$ ；
- (2) 将线列阵按奇、偶阵元分成两个子阵，分别得到两个子阵的接收信号 $\mathbf{x}_o(t)$ 和 $\mathbf{x}_e(t)$ ；
- (3) 计算奇、偶阵元构成的两个子阵的接收信号协方差矩阵 $\mathbf{R}_{xx}$ ；
- (4) 根据两个子阵接收信号的协方差矩阵 $\mathbf{R}_{xx}$ 以及线列阵的旋转不变性构造扩展接收阵列信号 $\mathbf{Y}$ ；
- (5) 计算扩展接收阵列信号 $\mathbf{Y}$ 的协方差矩阵 $\mathbf{R}_{YY}$ ；
- (6) 根据扩展接收阵列信号 $\mathbf{Y}$ 的协方差矩阵 $\mathbf{R}_{YY}$ ，利用波束形成方法对扩展阵列进行波束形成和目标检测。

2、根据权利要求 1 所述的线列阵阵列扩展方法，其特征在于，所述步骤 (1) 中线列阵的接收信号为：

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t)$$

其中， $\mathbf{x}(t)$ 为 $2M \times 1$ 维阵列接收信号向量：

$$\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_{2M}(t)]^T$$

$\mathbf{s}(t)$ 和 $\mathbf{n}(t)$ 分别为 $K \times 1$ 维源信号向量和 $2M \times 1$ 维噪声向量：

$$\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_K(t)]^T$$

$$\mathbf{n}(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_{2M}(t)]^T$$

$\mathbf{A}$ 为 $2M \times K$ 维的阵列流型矩阵：

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_K)]$$

其中， $\mathbf{a}(\theta_k) = \left[1, e^{j2\pi d \cos \theta_k / \lambda}, \dots, e^{j2\pi (2M-1)d \cos \theta_k / \lambda} \right]^T$ ， λ 为信号波长， d 为阵元间距， θ_k 为第 k

个信号源的方位， $k=1, 2, \dots, K$ ， K 为信号源个数， $2M$ 为线列阵的阵元数。

3、根据权利要求 1 所述的线列阵阵列扩展方法，其特征在于，所述步骤 (2) 中，线列阵按奇、偶阵元分成两个子阵，两个子阵的接收信号分别为：

$$\mathbf{x}_o(t) = [x_1(t), x_3(t), \dots, x_{2M-1}(t)]^T$$

$$\mathbf{x}_e(\mathbf{t}) = [x_2(t), x_4(t), \dots, x_{2M}(t)]^T$$

其中 $x_i(t)$ 为第 i 个阵元的接收信号, $\mathbf{x}_o(\mathbf{t})$ 为奇数号阵元构成的子阵的接收信号, $\mathbf{x}_e(\mathbf{t})$ 为偶数号阵元构成的子阵的接收信号, $2M$ 为线列阵的阵元数目。

4、根据权利要求 1 所述的线列阵阵列扩展方法, 其特征在于, 所述步骤 (3) 中, 奇、偶阵元构成的两个子阵接收信号协方差矩阵为:

$$\mathbf{R}_{xx} = E\{\mathbf{x}_o(\mathbf{t}) \cdot \mathbf{x}_e^H(\mathbf{t})\} = \mathbf{A}_o \mathbf{R}_{ss} \mathbf{A}_e^H$$

其中, $\mathbf{A}_o$ 和 $\mathbf{A}_e$ 分别为奇、偶阵元构成的两个子阵的阵列流型矩阵, $\mathbf{R}_{ss}$ 为源信号协方差矩阵。

5、根据权利要求 1 所述的线列阵阵列扩展方法, 其特征在于, 所述步骤 (4) 中, 构造的扩展接收阵列信号 $\mathbf{Y}$ 为:

$$\mathbf{Y} = [\mathbf{Y}_1^T, \mathbf{Y}_2^T, \mathbf{Y}_3^T, \mathbf{Y}_4^T]^T$$

其中, $\mathbf{Y}_1 = \mathbf{R}_{xx}(:, 1:M-1)$, $\mathbf{Y}_2 = \mathbf{R}_{xx}(:, 2:M)$, $\mathbf{R}_{xx}(:, 1:M-1)$ 和 $\mathbf{R}_{xx}(:, 2:M)$ 分别为协方差矩阵 $\mathbf{R}_{xx}$ 的前 $M-1$ 列和后 $M-1$ 列构成的矩阵, 矩阵 $\mathbf{Y}_3$ 为矩阵 $\mathbf{Y}_2$ 的共轭和行、列倒置, 矩阵 $\mathbf{Y}_4$ 为矩阵 $\mathbf{Y}_1$ 的共轭和行、列倒置。

6、根据权利要求 5 所述的线列阵阵列扩展方法, 其特征在于, 所述步骤 (5) 中, 扩展接收阵列的信号协方差矩阵为: $\mathbf{R}_{YY} = E(\mathbf{Y}\mathbf{Y}^H)$ 。

7、根据权利要求 1 所述的线列阵阵列扩展方法, 其特征在于, 所述步骤 (6) 中, 利用常规波束形成 CBF 或最小方差无畸变响应 MVDR 波束形成方法对扩展阵列进行波束形成和目标检测, CBF 和 MVDR 波束形成的波束输出功率分别为:

$$P_{CBF} = \mathbf{w}^H \mathbf{R}_{YY} \mathbf{w}$$

$$P_{MVDR}(\theta) = \frac{1}{\mathbf{w}^H \mathbf{R}_{YY}^{-1} \mathbf{w}}$$

其中, $\mathbf{w} = [(a_0)^T, (a_0 b^{-1})^T, (a_0 b)^T, (a_0)^T]^T$, $b = e^{j2\pi 2d \cos \theta / \lambda}$, a_0 为奇数号阵元所构成的子阵的导向向量, $a_0 = [1 \ e^{j2\pi 2d \cos \theta / \lambda} \dots e^{j2\pi (2M-2)d \cos \theta / \lambda}]^T$, λ 为信号波长, d 为阵元间距, θ 为空间的波束扫描方位。

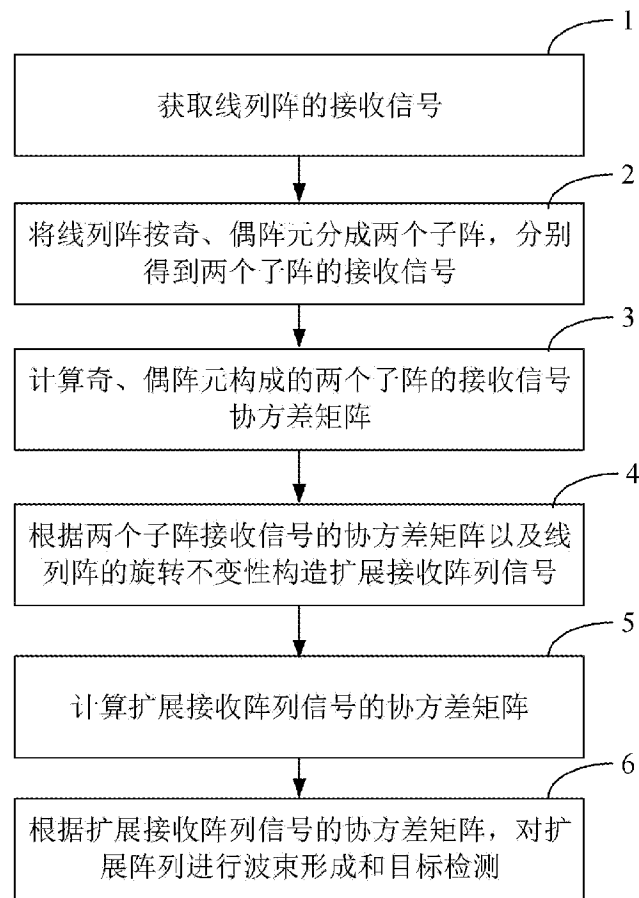


图 1

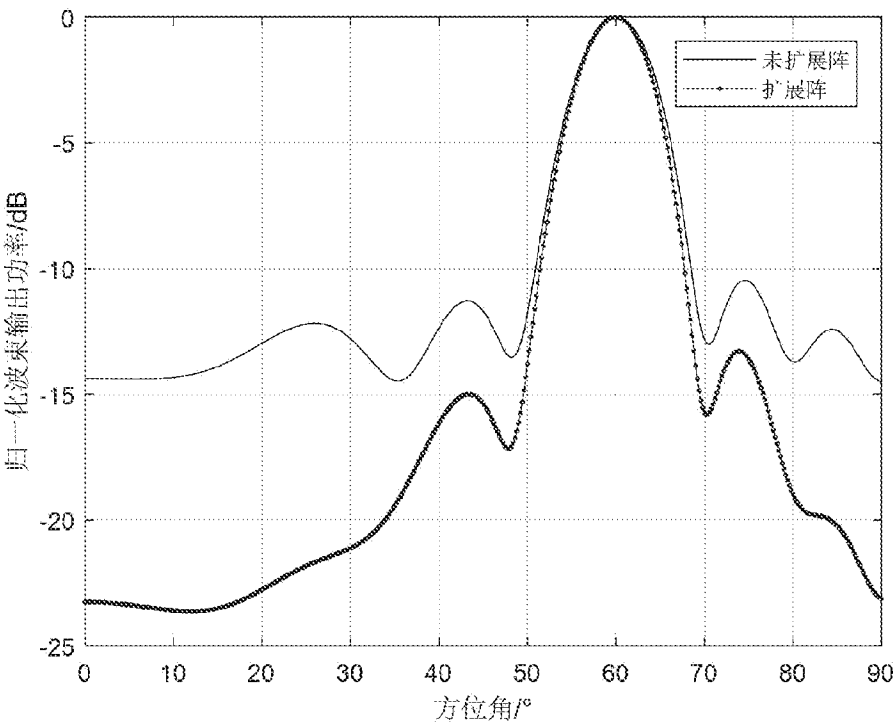


图 2

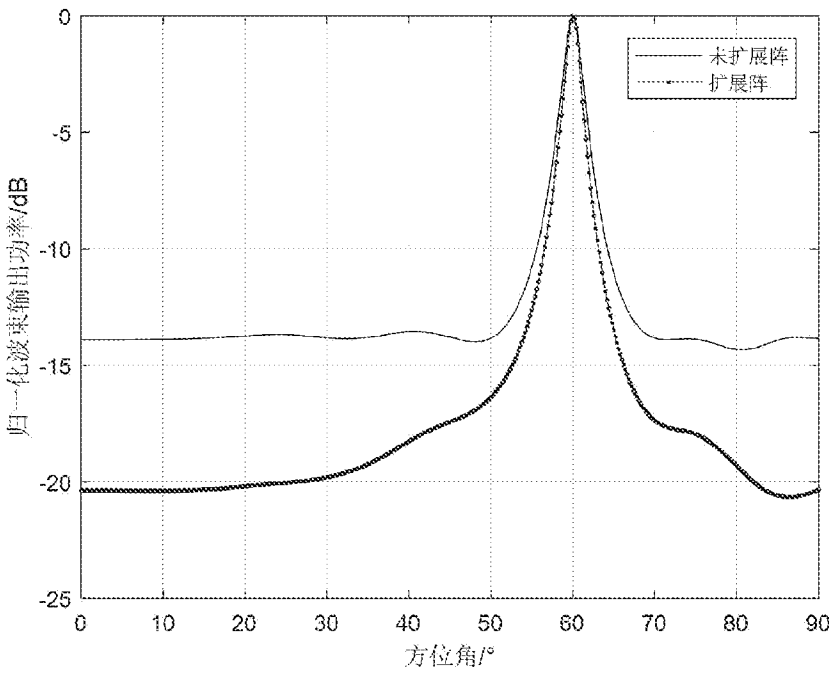


图 3

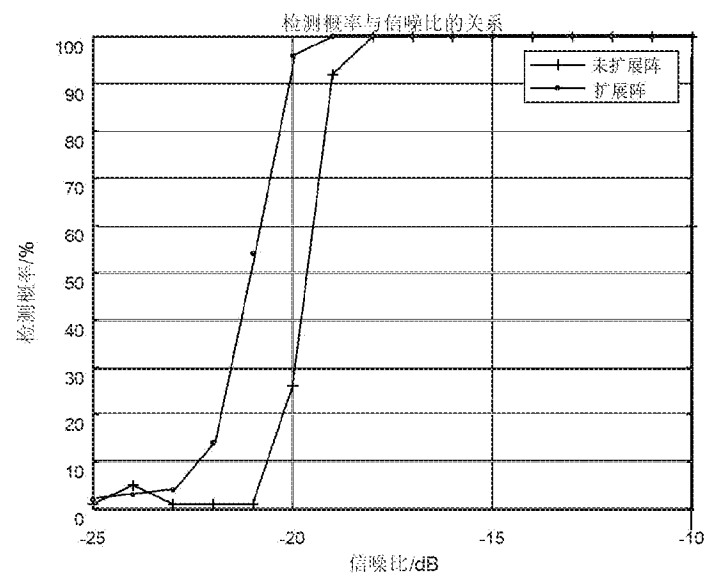


图 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2020/137877

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01S 7/02(2006.01)i; H04B 7/08(2006.01)i; G06F 17/16(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; G06F

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: 阵列, 列阵, 扩展, 信号, 奇, 偶, 矩阵, 协方差, array, expand, extend, signal, odd, even, matrix, covariance

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 111736118 A (SOUTHEAST UNIVERSITY) 02 October 2020 (2020-10-02) claims 1-7	1-7
X	闫锋刚 等 (YAN, Fenggang et al.). "联合互协方差矩阵的快速波达方向估计 (Joint Cross-Covariance Matrix Based Fast Direction of Arrival Estimation)" 系统工程与电子技术 (Systems Engineering and Electronics), Vol. 4, No. 40, 30 April 2018 (2018-04-30), ISSN: 1001-506X, pp. 734-736	1-4, 7
A	CN 103546221 A (SOUTHEAST UNIVERSITY) 29 January 2014 (2014-01-29) entire document	1-7
A	CN 103308877 A (XIDIAN UNIVERSITY) 18 September 2013 (2013-09-18) entire document	1-7
A	CN 111273219 A (SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 12 June 2020 (2020-06-12) entire document	1-7
A	JP 2020091263 A (TOSHIBA K.K. et al.) 11 June 2020 (2020-06-11) entire document	1-7



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"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)

"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

"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

"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

"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

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

23 March 2021

Date of mailing of the international search report

21 April 2021

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2020/137877

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	111736118	A	02 October 2020	CN	111736118	B	17 November 2020
CN	103546221	A	29 January 2014	CN	103546221	B	16 September 2015
CN	103308877	A	18 September 2013	CN	103308877	B	18 November 2015
CN	111273219	A	12 June 2020	None			
JP	2020091263	A	11 June 2020	None			

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2020/137877

A. 主题的分类

G01S 7/02(2006.01)i; H04B 7/08(2006.01)i; G06F 17/16(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; G06F

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, EP0D0C: 阵列, 列阵, 扩展, 信号, 奇, 偶, 矩阵, 协方差, array, expand, extend, signal, odd, even, matrix, covariance

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
PX	CN 111736118 A (东南大学) 2020年 10月 2日 (2020 - 10 - 02) 权利要求1-7	1-7
X	闫锋刚 等. “联合互协方差矩阵的快速波达方向估计” 系统工程与电子技术, 第4卷, 第40期, 2018年 4月 30日 (2018 - 04 - 30), ISSN: 1001-506X, 第734-736页	1-4, 7
A	CN 103546221 A (东南大学) 2014年 1月 29日 (2014 - 01 - 29) 全文	1-7
A	CN 103308877 A (西安电子科技大学) 2013年 9月 18日 (2013 - 09 - 18) 全文	1-7
A	CN 111273219 A (华南理工大学) 2020年 6月 12日 (2020 - 06 - 12) 全文	1-7
A	JP 2020091263 A (TOSHIBA K.K. 等) 2020年 6月 11日 (2020 - 06 - 11) 全文	1-7

☐ 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

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2021年 3月 23日

国际检索报告邮寄日期

2021年 4月 21日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局(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

授权官员

全宇军

电话号码 86-(10)-53962561

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2020/137877

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	111736118	A	2020年 10月 2日	CN 111736118 B	2020年 11月 17日
CN	103546221	A	2014年 1月 29日	CN 103546221 B	2015年 9月 16日
CN	103308877	A	2013年 9月 18日	CN 103308877 B	2015年 11月 18日
CN	111273219	A	2020年 6月 12日	无	
JP	2020091263	A	2020年 6月 11日	无	