

(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 3 月 22 日 (22.03.2018)



(10) 国际公布号
WO 2018/049595 A1

(51) 国际专利分类号:
G01S 7/41 (2006.01)

广东省深圳市南山区南海大道 3688 号,
Guangdong 518060 (CN)。

(21) 国际申请号: PCT/CN2016/099023

(22) 国际申请日: 2016 年 9 月 14 日 (14.09.2016)

(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)。 朱 轶 昂 (ZHU, Yiang); 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

(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, 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,

(54) Title: ADMM-BASED ROBUST SPARSE RECOVERY STAP METHOD AND SYSTEM THEREOF

(54) 发明名称: 一种基于交替方向乘子法的稳健稀疏恢复STAP方法及其系统

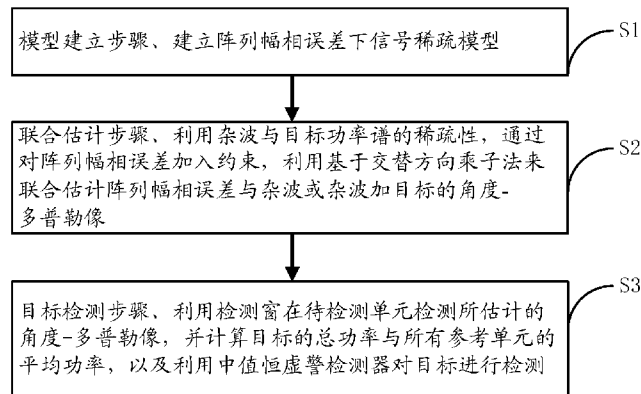


图 1

S1 MODEL ESTABLISHMENT STEP: ESTABLISH A SIGNAL SPARSE MODEL WITH ARRAY GAIN-PHASE ERRORS
S2 JOINT ESTIMATION STEP: USING THE SPARSITY OF CLUTTER AND TARGET POWER SPECTRA, AND BY ADDING CONSTRAINTS TO ARRAY GAIN-PHASE ERRORS, PERFORM ADMM-BASED JOINT ESTIMATION OF THE ANGLE-DOPPLER IMAGE OF ARRAY GAIN-PHASE ERRORS AND CLUTTER OR CLUTTER PLUS TARGET
S3 TARGET DETECTION STEP: DETECT, USING A DETECTION WINDOW, THE ESTIMATED ANGLE-DOPPLER IMAGE OF A UNIT TO BE DETECTED, CALCULATE THE TOTAL POWER OF THE TARGET AND THE AVERAGE POWER OF ALL THE REFERENCE UNITS, AND DETECT THE TARGET USING A CM-CFAR DETECTOR

(57) Abstract: Provided is an ADMM-based robust sparse recovery STAP method. The method comprises a model establishment step: establishing a signal sparse model with array gain-phase errors (S1); a joint estimation step: using the sparsity of clutter and target power spectra, and by adding constraints to array gain-phase errors, performing ADMM-based joint estimation of the angle-Doppler image of array gain-phase errors and clutter or clutter plus target (S2); and a target detection step: detecting, using a detection window, the estimated angle-Doppler image of a unit to be detected, calculating the total power of the target and the average power of all the

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, 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))。

reference units, and detecting the target using a CM-CFAR detector (S3). Also provided is an ADMM-based robust sparse recovery STAP system. The method and the system of the present invention can overcome the problem of severe performance degradation caused by array gain-phase errors, thereby improving clutter suppression and target detection capabilities of a radar system.

(57) 摘要: 提供一种基于交替方向乘子法的稳健稀疏恢复STAP方法, 包括: 模型建立步骤、建立阵列幅相误差下信号稀疏模型 (S1); 联合估计步骤、利用杂波与目标功率谱的稀疏性, 通过对阵列幅相误差加入约束, 利用基于交替方向乘子法来联合估计阵列幅相误差与杂波或杂波加目标的角度-多普勒像 (S2); 目标检测步骤、利用检测窗在待检测单元检测所估计的角度-多普勒像, 并计算目标的总功率与所有参考单元的平均功率, 以及利用中值恒虚警检测器对目标进行检测 (S3)。同时还提供一种基于交替方向乘子法的稳健稀疏恢复STAP系统。所述方法和系统能克服阵列幅相误差所带来的性能严重下降的影响, 进而提高雷达系统杂波抑制与目标检测能力。

一种基于交替方向乘子法的稳健稀疏恢复 STAP 方法及其系统

技术领域

本发明涉及雷达信号处理领域，尤其涉及一种基于交替方向乘子法的稳健稀疏恢复 STAP 方法及其系统。

背景技术

无论在军用还是民用领域，检测运动目标一直都是机载雷达的一项重要任务。且该运动目标检测技术是以目标多普勒频率不同于杂波多普勒频率为前提。然而，由于机载平台自身移动会扩宽杂波多普勒谱，因此目标经常被杂波所掩盖，那么这就必然导致了目标检测性能的下降。

传统的运动目标检测技术仅仅只利用多普勒维对目标进行检测，而空时自适应处理（Space-Time Adaptive Processing, STAP）技术不仅利用多普勒维，而且还同时联合利用空间（角度）维，来分离目标与背景。因此，相比传统的运动目标检测技术，空时自适应处理技术提供了更高的系统自由度来处理杂波。

但是正因系统自由度高，满秩 STAP 方法不仅收敛慢，而且对独立同分布训练样本数的需求大。很显然，在真实的场景中接收端很难获得这些大量的样本数，而且在非均匀杂波的环境中此情况则是更难。为了解决此收敛慢的问题，学者们提出一些相关方法，如降维 (Reduced Dimension) STAP 方法、降秩 (Reduced Rank) STAP 方法、主分量法 (Principle Components, PC)、局域联合处理方法 (Joint Domain Localized, JDL)、互谱尺度法 (Cross-Spectral Metric)、多级维纳滤波法 (Multistage Wiener Filter, MWF)、辅助矢量滤波器 (Auxiliary-Vector Filters, AVF)、联合插值/抽取/滤波开关法 (Switched Joint Interpolation, Decimation and Filtering, SJIDF) 等等。同样，为了解决独立同分布训练样本不足的问题，学者们也提出了相关方法，如基于多通道自回归的参数自适应匹配滤波法、基于所接收数据与权矢量稀疏性的稀疏空时波束发生器法、基于知识的 (Knowledge-Aided, KA) STAP 方法，该方法利用环境的先验知识来提高目标的检测性能，但其性能的好坏依赖于先验知识的准确性，而且先验知识的高效性仍需要更多的研究；此外，还有基于直接数据域的最小二乘法 (Direct Data Domain Least-Squares, D3-LS) STAP 方法，该方法仅仅只需要被检测单元的数据即可实现目标检测，而不需要额外的训练数据，因此这就避免了可能由于训练数据不服从同一统计特性所造成的估计失真。但是该方法却要以损失系统自由度为代价，且系统自由度

的降低会导致目标检测性能的下降。

近来随着压缩感知技术的发展，基于稀疏的 STAP 方法在地面运动目标检测的运用上也得到了快速发展。该类方法的基本思想是将三种场景（即包括含目标加杂波、只含杂波、只含目标）的估计问题转化为稀疏恢复\表示问题。与传统降维、降秩 STAP 方法相比，该类方法能够达到超分辨的能力，而且在少量训练样本、甚至是单训练样本的前提下能够表现出更优的性能。

然而，该类方法却依赖于稀疏模型的准确性，如当存在阵列误差与杂波内部运动等时，真实模型会与假设模型失配，从而导致假设的稀疏模型的准确性降低，进而影响目标检测性能。

发明内容

有鉴于此，本发明的目的在于提供一种基于交替方向乘子法的稳健稀疏恢复 STAP 方法及其系统，旨在解决现有技术中由于过度依赖稀疏模型的准确性而导致影响目标检测性能的问题。

本发明提出一种基于交替方向乘子法的稳健稀疏恢复 STAP 方法，主要包括：

模型建立步骤、建立阵列幅相误差下信号稀疏模型；

联合估计步骤、利用杂波与目标功率谱的稀疏性，通过对阵列幅相误差加入约束，利用基于交替方向乘子法来联合估计阵列幅相误差与杂波或杂波加目标的角度-多普勒像；

目标检测步骤、利用检测窗在待检测单元检测所估计的角度-多普勒像，并计算目标的总功率与所有参考单元的平均功率，以及利用中值恒虚警检测器对目标进行检测。

另一方面，本发明还提供一种基于交替方向乘子法的稳健稀疏恢复 STAP 系统，所述系统包括：

模型建立模块，用于建立阵列幅相误差下信号稀疏模型；

联合估计模块，用于利用杂波与目标功率谱的稀疏性，通过对阵列幅相误差加入约束，利用基于交替方向乘子法来联合估计阵列幅相误差与杂波或杂波加目标的角度-多普勒像；

目标检测模块，用于利用检测窗在待检测单元检测所估计的角度-多普勒像，并计算目标的总功率与所有参考单元的平均功率，以及利用中值恒虚警检测器对目标进行检测。

本发明提供的技术方案，先建立阵列幅相误差下信号稀疏模型，然后利用杂波与目标功率谱的稀疏性，通过对阵列幅相误差加入约束，基于交替方向乘子法（Alternating Direction Method of Multipliers, ADM）将传统基于稀疏的 STAP 问题转化为联合估计杂波（或杂波加目标）角度-多普勒像与阵列幅相误差的优化问题，求解该优化问题得到角度-多普勒像与阵

列幅相误差的估计,最后再设计检测器对目标进行检测。本发明提供的技术方案能克服阵列幅相误差所带来的性能严重下降的影响,从而提高基于交替方向乘子法的稳健稀疏恢复 STAP 目标检测的性能,提高雷达系统杂波抑制与目标检测能力。

附图说明

图 1 为本发明一实施方式中基于交替方向乘子法的稳健稀疏恢复 STAP 方法流程图;

图 2 为本发明一实施方式中从所估计的角度-多普勒像中进行目标检测的过程示意图;

图 3 为本发明一实施方式中基于交替方向乘子法的稳健稀疏恢复 STAP 系统 10 的内部结构示意图;

图 4(a)为在完全知道阵列幅相误差时,采用 ADM 算法进行角度-多普勒像重构的质量效果图;

图 4(b) 在未对阵列幅相误差校正时,采用 ADM 算法进行角度-多普勒像重构的质量效果图;

图 4(c)为本发明一实施方式中进行角度-多普勒像重构的质量效果图;

图 4(d) 为采用 CVX 算法进行角度-多普勒像重构的质量效果图;

图 4(e) 为采用 IAA 算法进行角度-多普勒像重构的质量效果图;

图 5(a)为在不含误差时,现有恢复算法的目标检测概率(P_d)的示意图;

图 5(b)为当 $\epsilon_{max} = 0.025, \phi_{max} = 0.025\pi$ 时,现有恢复算法的目标检测概率(P_d)的示意图;

图 5(c)为当 $\epsilon_{max} = 0.05, \phi_{max} = 0.05\pi$ 时,现有恢复算法的目标检测概率(P_d)的示意图;

图 6(a)为在阵列幅相误差完全已知时,AMD 算法的目标检测概率(P_d) 的示意图;

图 6(b)为在阵列幅相误差未知时,本发明一实施方式中的目标检测概率(P_d) 的示意图;

图 7(a)为阵列幅相误差为 $\epsilon_{max}=0.1, \phi_{max}=0.1\pi$ 时,慢速目标的性能检测示意图;

图 7(b)为阵列幅相误差为 $\epsilon_{max}=0.1, \phi_{max}=0.1\pi$ 时,中速目标的性能检测示意图;

图 7(c)为阵列幅相误差为 $\epsilon_{max}=0.1, \phi_{max}=0.1\pi$ 时,相对快速目标的性能检测示意图;

图 8 为在理想的空域导向矢量下,各方法对应的角度-多普勒像的恢复质量的对比示意图;

图 9 为在实际的空域导向矢量下,各方法对应的角度-多普勒像的恢复质量的对比示意图。

具体实施方式

为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白，以下结合附图及实施例，对本发明进行进一步详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。

本发明提供的技术方案，先建立阵列幅相误差下信号稀疏模型，然后利用杂波与目标功率谱的稀疏性，通过对阵列幅相误差加入约束，基于交替方向乘子法（Alternating Direction Method of Multipliers, ADM）将传统基于稀疏的 STAP 问题转化为联合估计杂波（或杂波加目标）角度-多普勒像与阵列幅相误差的优化问题，求解该优化问题得到角度-多普勒像与阵列幅相误差的估计，最后再设计检测器对目标进行检测。本发明提供的技术方案能克服阵列幅相误差所带来的性能严重下降的影响，从而提高基于交替方向乘子法的稳健稀疏恢复 STAP 目标检测的性能，提高雷达系统杂波抑制与目标检测能力。

以下将对本发明所提供的一种基于交替方向乘子法的稳健稀疏恢复 STAP 方法进行详细说明。

请参阅图 1，为本发明一实施方式中基于交替方向乘子法的稳健稀疏恢复 STAP 方法流程图。

在步骤 S1 中，模型建立步骤、建立阵列幅相误差下信号稀疏模型。

在本实施方式中，将整个空时平面划分为 $N_d N_s$ ($N_d N_s \gg NM$) 个网格， N_s 与 N_d 分别为沿着空间频率轴与时间/多普勒频率轴的网格点数。

在本实施方式中，所述模型建立步骤具体包括：

在阵列不存在幅相误差的情况下，根据公式 $\mathbf{x} = \mathbf{x}_c + \mathbf{n} = \Phi \boldsymbol{\alpha} + \mathbf{n}$ 计算 $NM \times 1$ 维的不含目标的空时快拍，其中， M 表示脉冲-多普勒正侧视机载雷达天线所包括接收阵元的个数， N 表示该雷达天线在一个相干处理单元内发射脉冲的个数， $\mathbf{x}_c$ 表示杂波所对应的空时快拍， $\mathbf{n}$ 表示 $NM \times 1$ 维的接收机热噪声， $N_d N_s \times 1$ 维的 $\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_{1,1}, \alpha_{1,2}, \dots, \alpha_{N_d N_s}]^T$ 表示杂波在空时导向词典中所对应的角度-多普勒像，矩阵 $\Phi = [\mathbf{v}(f_{d,1}, f_{s,1}), \dots, \mathbf{v}(f_{d,1}, f_{s,2}), \dots, \mathbf{v}(f_{d,N_d}, f_{s,N_s})]$ 表示 $NM \times N_d N_s$ 维的在阵列不存在幅相误差的情况下的空时导向词典， $(\cdot)^T$ 表示转置操作， $NM \times 1$ 维向量 $\mathbf{v}(f_{d,i}, f_{s,k}) = \mathbf{v}_d(f_{d,i}) \otimes \mathbf{v}_s(f_{s,k})$ 表示在阵列不存在幅相误差的情况下的空时导向矢量， $\mathbf{v}_d(f_{d,i}) = [1, e^{j2\pi f_{d,i}}, \dots, e^{j2(N-1)\pi f_{d,i}}]^T$ 与 $\mathbf{v}_s(f_{s,k}) = [1, e^{j2\pi f_{s,k}}, \dots, e^{j2(M-1)\pi f_{s,k}}]^T$ 分别表示时域导向矢量与空域导向矢量， $(f_{d,i}, f_{s,k})$ 表示第 i 个时域网格点与第 k 个空域网格点， N_s 与 N_d 分别表示沿着空间频率轴与时间/多普勒频率轴的网格点数；

根据天线阵列的幅相误差 $\mathbf{c} = [c_1, c_2, \dots, c_M]^T$ ，计算阵列幅相误差下的空时导向矢量 $\mathbf{v}(f_{d,i}, f_{s,k}) = \mathbf{v}_d(f_{d,i}) \otimes (\mathbf{v}_s(f_{s,k}) \odot \mathbf{c}_k)$ ，其中， c_i 表示第 i 个阵元的幅度与相位误差，令

$\mathbf{C} = \mathbf{I}_N \otimes (\text{diag}(\mathbf{c}))$, 其中, $\mathbf{I}_N$ 表示 $N \times N$ 维的单位矩阵, $\text{diag}(\mathbf{c})$ 表示 $\mathbf{c}$ 对角化后的对角矩阵, $\otimes$ 表示 Kronecker 积, $\odot$ 表示 Hadamard 积;

在阵列幅相误差下, 根据公式 $\mathbf{x} = \mathbf{C}\Phi\alpha + \mathbf{n}$ 计算所接收到的不含目标的空时快拍, 其中, $\mathbf{C}\Phi$ 表示在阵列幅相误差下完备空时导向词典。

在本实施方式中, 为了方便起见, 令 $\mathbf{T}\mathbf{x} = \Phi\alpha + \mathbf{n}'$, 其中 $\mathbf{T} = \mathbf{I}_N \otimes \text{diag}(\mathbf{t})$, $\mathbf{t} = [t_1, \dots, t_M]^T$, $t_m = c_m^{-1}$, $1 \leq m \leq M$, 辅助变量 $\mathbf{r} = \mathbf{T}\mathbf{x} - \Phi\alpha$ 。

在步骤 S2 中, 联合估计步骤、利用杂波与目标功率谱的稀疏性, 通过对阵列幅相误差加入约束, 利用基于交替方向乘子法来联合估计阵列幅相误差与杂波或杂波加目标的角度-多普勒像。

在本实施方式中, 所述联合估计步骤具体包括:

构造优化问题

$$\min_{\alpha_l, \mathbf{r}_l, \mathbf{t}_l, \lambda_l} \sum_{l=1}^L \|\alpha_l\|_1 + \frac{1}{2\rho} \sum_{l=1}^L \|\mathbf{r}_l\|_2^2 - \Re\{\sum_{l=1}^L \lambda_l^H (\Phi\alpha_l + \mathbf{r}_l - \mathbf{T}\mathbf{x}_l)\} + \frac{\beta}{2} \sum_{l=1}^L \|\Phi\alpha_l + \mathbf{r}_l - \mathbf{T}\mathbf{x}_l\|_2^2 - \Re\{\gamma^* (\sum_{m=1}^M t_m - \varsigma)\}$$
, 其中, 快拍个数为 $L (L \geq 1)$, $\lambda_l \in \mathbb{C}^{NM}$ 表示第 l 个快拍所对应的拉格朗日乘子, $\beta > 0$ 表示惩罚参数, $\rho > 0$ 表示权衡稀疏度与总均方误差的正则化参数, $\mathbf{r}_l$ 表示第 l 个快拍所对应的辅助变量, $\varsigma \in \mathbb{C}$ 表示任意标量常数, γ 表示拉格朗日乘子;

令 $\mathbf{Y} = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_L]$, $\mathbf{\Gamma} = [\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_L]$, $\mathbf{\Lambda} = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_L]$, $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_L]$, 并分别求得所述优化问题关于变量 $\alpha_l, \mathbf{r}_l, \mathbf{t}_l, \lambda_l$ 最小时 $\alpha_l, \mathbf{r}_l, \mathbf{t}_l, \lambda_l$ 的取值。

在本实施方式中, 假设已经在第 p 次迭代后获得了 $\mathbf{Y}^p, \mathbf{\Lambda}^p, \mathbf{\Gamma}^p$, 则

第一, 优化问题

$$\min_{\alpha_l, \mathbf{r}_l, \mathbf{t}_l, \lambda_l} \sum_{l=1}^L \|\alpha_l\|_1 + \frac{1}{2\rho} \sum_{l=1}^L \|\mathbf{r}_l\|_2^2 - \Re\{\sum_{l=1}^L \lambda_l^H (\Phi\alpha_l + \mathbf{r}_l - \mathbf{T}\mathbf{x}_l)\} + \frac{\beta}{2} \sum_{l=1}^L \|\Phi\alpha_l + \mathbf{r}_l - \mathbf{T}\mathbf{x}_l\|_2^2 - \Re\{\gamma^* (\sum_{m=1}^M t_m - \varsigma)\}$$
 关于 $\mathbf{r}_l^*$ 为最小值时: $\mathbf{\Gamma}^{p+1} = \frac{\rho\beta}{1+\rho\beta} \left(\frac{\mathbf{\Lambda}^p}{\beta} - \Phi\mathbf{Y}^p + \mathbf{T}^p\mathbf{X} \right)$;

第二, 优化问题

$$\min_{\alpha_l, \mathbf{r}_l, \mathbf{t}_l, \lambda_l} \sum_{l=1}^L \|\alpha_l\|_1 + \frac{1}{2\rho} \sum_{l=1}^L \|\mathbf{r}_l\|_2^2 - \Re\{\sum_{l=1}^L \lambda_l^H (\Phi\alpha_l + \mathbf{r}_l - \mathbf{T}\mathbf{x}_l)\} + \frac{\beta}{2} \sum_{l=1}^L \|\Phi\alpha_l + \mathbf{r}_l - \mathbf{T}\mathbf{x}_l\|_2^2 - \Re\{\gamma^* (\sum_{m=1}^M t_m - \varsigma)\}$$
 关于 α_l^* 为最小值时:

$$\mathbf{Y}^{p+1} = \arg \min_{\alpha_l} \sum_{l=1}^L \left\{ \|\alpha_l\|_1 + \frac{\beta}{2} \left\| \Phi\alpha_l + \mathbf{r}_l^{p+1} - \mathbf{T}^p\mathbf{x}_l \right\|_2^2 \right\};$$

其解为:

$$\mathbf{Y}^{p+1} = \text{soft} \left(\mathbf{Y}^p - \tau \mathbf{G}^p, \frac{\tau}{\beta} \right) = \max \left\{ |\mathbf{Y}^p - \tau \mathbf{G}^p| - \frac{\tau}{\beta}, 0 \right\} \frac{\mathbf{Y}^p - \tau \mathbf{G}^p}{|\mathbf{Y}^p - \tau \mathbf{G}^p|}$$

其中, $\mathbf{G}^p = \Phi^H (\Phi\mathbf{Y}^p + \mathbf{\Gamma}^{p+1} - \mathbf{T}^p\mathbf{X} - \frac{\mathbf{Y}^p}{\beta})$

第三, 优化问题

$\min_{\alpha_l, \mathbf{r}_l, \mathbf{t}_l, \lambda_l} \sum_{l=1}^L \|\alpha_l\|_1 + \frac{1}{2\rho} \sum_{l=1}^L \|\mathbf{r}_l\|_2^2 - \Re\{\sum_{l=1}^L \lambda_l^H (\Phi \alpha_l + \mathbf{r}_l - \mathbf{T} \mathbf{x}_l)\} + \frac{\beta}{2} \sum_{l=1}^L \|\Phi \alpha_l + \mathbf{r}_l - \mathbf{T} \mathbf{x}_l\|_2^2 - \Re\{\gamma^* (\sum_{m=1}^M t_m - \varsigma)\}$ 关于 $\mathbf{t}^*$ 为最小值时:

$$\mathbf{t}^{p+1} = \arg \min_{\mathbf{t}} \sum_{l=1}^L \frac{\beta}{2} \left\{ \left\| \Phi \alpha_l^{p+1} + \mathbf{r}_l^{p+1} - \mathbf{T}^p \mathbf{x}_l - \frac{\lambda_l^p}{\beta} \right\|_2^2 \right\} - \Re \left\{ \gamma^* \left(\sum_{m=1}^M t_m - \varsigma \right) \right\}$$

求解可得:

$$\mathbf{t}^{p+1} = \left[\frac{\sum_{l=1}^L b_{l,1} + \tilde{\gamma}}{\sum_{l=1}^L a_{l,1}}, \dots, \frac{\sum_{l=1}^L b_{l,M} + \tilde{\gamma}}{\sum_{l=1}^L a_{l,M}} \right]^T$$

其中, $b_{l,m} = \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N x_{l,(n-1)M+m}^* z_{l,(n-1)M+m}^p$, $a_{l,m} = \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N |x_{l,(n-1)M+m}|^2$,

$$\tilde{\gamma} = \frac{\varsigma - \sum_{m=1}^M \frac{\sum_{l=1}^L b_{l,m}}{\sum_{l=1}^L a_{l,m}}}{\sum_{m=1}^M \frac{1}{\sum_{l=1}^L a_{l,m}}}, \quad \mathbf{Z}^p = [z_1^p, z_2^p, \dots, z_L^p]^T = \Phi \mathbf{Y}^{p+1} + \mathbf{\Gamma}^{p+1} - \frac{\Lambda^p}{\beta};$$

第四, 优化问题

$\min_{\alpha_l, \mathbf{r}_l, \mathbf{t}_l, \lambda_l} \sum_{l=1}^L \|\alpha_l\|_1 + \frac{1}{2\rho} \sum_{l=1}^L \|\mathbf{r}_l\|_2^2 - \Re\{\sum_{l=1}^L \lambda_l^H (\Phi \alpha_l + \mathbf{r}_l - \mathbf{T} \mathbf{x}_l)\} + \frac{\beta}{2} \sum_{l=1}^L \|\Phi \alpha_l + \mathbf{r}_l - \mathbf{T} \mathbf{x}_l\|_2^2 - \Re\{\gamma^* (\sum_{m=1}^M t_m - \varsigma)\}$ 关于 λ_l^* 为最小值时:

$$\Lambda^{p+1} = \Lambda^p - \beta (\Phi \mathbf{Y}^{p+1} + \mathbf{\Gamma}^{p+1} - \mathbf{T}^{p+1} \mathbf{X}).$$

在本实施方式中, 以上交替过程亦可见表 1 所示。此外, 当观测场景中含有目标加杂波时, 其角度-多普勒像的估计过程同上。

表 1

Initialization:
$\alpha_l^0 = \mathbf{0}_{N_d N_s}, \lambda_l^0 = \mathbf{0}_{NM}, l = 1, \dots, L,$
$\mathbf{t}^0 = \mathbf{1}_M, \mathbf{T}^0 = \mathbf{I}_N \otimes \text{diag}(\mathbf{t}^0), p = 0$
Repeat
1 $\mathbf{\Gamma}^{p+1} = \frac{\rho\beta}{1+\rho\beta} \left(\frac{\Lambda^p}{\beta} - \Phi \mathbf{Y}^p + \mathbf{T}^p \mathbf{X} \right),$
2 $\mathbf{G}^p = \Phi^H \left(\Phi \mathbf{Y}^p + \mathbf{\Gamma}^{p+1} - \mathbf{T}^p \mathbf{X} - \frac{\mathbf{\Gamma}^p}{\beta} \right),$
3 $\mathbf{Y}^{p+1} = \text{soft} \left(\mathbf{Y}^p - \tau \mathbf{G}^p, \frac{\tau}{\beta} \right),$
4 Update $\mathbf{Z}^p, b_{l,m}, a_{l,m}$ and $\tilde{\gamma}$
5 $\mathbf{t}^{p+1} = \left[\frac{\sum_{l=1}^L b_{l,1} + \tilde{\gamma}}{\sum_{l=1}^L a_{l,1}}, \dots, \frac{\sum_{l=1}^L b_{l,M} + \tilde{\gamma}}{\sum_{l=1}^L a_{l,M}} \right]^T$
6 $\Lambda^{p+1} = \Lambda^p - \beta (\Phi \mathbf{Y}^{p+1} + \mathbf{\Gamma}^{p+1} - \mathbf{T}^{p+1} \mathbf{X}),$
Until $\frac{\sum_{l=1}^L \ \alpha_l^p - \alpha_l^{p+1}\ _2}{\sum_{l=1}^L \ \alpha_l^{p+1}\ _2} \leq \zeta$

在步骤 S3 中, 目标检测步骤、利用检测窗在待检测单元检测所估计的角度-多普勒像, 并计算目标的总功率与所有参考单元的平均功率, 以及利用中值恒虚警检测器对目标进行检测。

在本实施方式中, 所述目标检测步骤具体包括:

在去除待检测单元附近的多个快拍后, 用检测窗在待检测单元中检测所估计的角度-多普勒像 $\hat{\alpha}_{\text{CUT}}$, 其中, 所述检测窗的空间频率与多普勒频率的分辨率分别为 $\frac{1}{M}f_s$ 与 $\frac{1}{N}f_d$;

取 L 个快拍作为参考单元, 并计算目标的总功率与所有参考单元的平均功率;

利用中值恒虚警检测器 $20 \lg \vartheta_{\text{CUT}} - 20 \lg \text{median}(\vartheta_l) \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} \xi$ 对目标进行检测, 其中,

$\vartheta_{\text{CUT}} = \sum_{k,i} |\tilde{\alpha}_{\text{CUT},k,i}|$, $\vartheta_l = \sum_{k,i} |\tilde{\alpha}_{l,k,i}|$, $l = 1, 2, \dots, L$, ξ 表示临界检测门限, $\text{median}(y)$ 表示求取 y 中所有元素的中值, H_0 表示只有干扰存在, H_1 表示有目标加干扰存在。

在本实施方式中, 主要考虑从所估计的角度-多普勒像中进行目标检测, 其检测过程如图 2 所示。为了避免目标相消, 在此本发明首先去除待检测单元附近的几个快拍, 之后再用检测窗在待检测单元检测所估计的角度-多普勒像 $\hat{\alpha}_{\text{CUT}}$, 其中检测窗的空间频率与多普勒频率的分辨率分别为 $\frac{1}{M}f_s$ 与 $\frac{1}{N}f_d$ 。由于机载雷达在某一观测方位(角度)下所发射的脉冲通常都保持着高增益(由此会导致在一个相干处理单元中出现一个主瓣), 以及目标多普勒频率的未知, 本发明先假设目标的空间频率为 $f_s^{t_0}$, 然后再遍历所有可能的目标多普勒频率。确切的说, 当一个目标可能的多普勒频率为 f_d^t 时, 检测窗的频率范围为 $(f_d^t - \frac{1}{2N}, f_d^t + \frac{1}{2N})$ 和 $(f_s^{t_0} - \frac{1}{2M}, f_s^{t_0} + \frac{1}{2M})$ 。接着, 本发明再从 $\hat{\alpha}_{\text{CUT}}$ 中找出所有属于检测窗频率的角度-多普勒像, 即:

$$\tilde{\alpha}_{\text{CUT}} = \left\{ \hat{\alpha}_{\text{CUT},k,i} | f_{d,k} \in \left(f_d^t - \frac{1}{2N}, f_d^t + \frac{1}{2N} \right), f_{s,i} \in \left(f_s^{t_0} - \frac{1}{2M}, f_s^{t_0} + \frac{1}{2M} \right) \right\}$$

类似的, 本发明取 L 个参考快拍, 即:

$$\tilde{\alpha}_l = \left\{ \hat{\alpha}_{l,k,i} | f_{d,k} \in \left(f_d^t - \frac{1}{2N}, f_d^t + \frac{1}{2N} \right), f_{s,i} \in \left(f_s^{t_0} - \frac{1}{2M}, f_s^{t_0} + \frac{1}{2M} \right) \right\}$$

其中, $l = 1, 2, \dots, L$ 。

由于估计误差与词典划分误差的存在, 在检测窗中单目标的角度-多普勒像可能不是集中在某一个角度-多普勒网格点上, 而是分布在多个角度-多普勒网格点上, 因此我们在 $\tilde{\alpha}_{\text{CUT}}$ 中取所有属于检测窗频率的角度-多普勒像的绝对值之和, 并将其作为可能的目标数据。类似地, 本发明对 L 个参考单元也进行同样的处理, 处理后的这些数据作为生成杂波加噪声背景。最后利用如下的中值恒虚警 (median constant false alarm rate, CFAR) 检测器对目标进行检测。

本发明提供一种基于交替方向乘子法的稳健稀疏恢复 STAP 方法, 先建立阵列幅相误差下信号稀疏模型, 然后利用杂波与目标功率谱的稀疏性, 通过对阵列幅相误差加入约束,

基于交替方向乘子法 (Alternating Direction Method of Multipliers, ADM) 将传统基于稀疏的 STAP 问题转化为联合估计杂波 (或杂波加目标) 角度-多普勒像与阵列幅相误差的优化问题, 求解该优化问题得到角度-多普勒像与阵列幅相误差的估计, 最后再设计检测器对目标进行检测。本发明提供的技术方案能克服阵列幅相误差所带来的性能严重下降的影响, 从而提高基于交替方向乘子法的稳健稀疏恢复 STAP 目标检测的性能, 提高雷达系统杂波抑制与目标检测能力。

以下将对本发明所提供的一种基于交替方向乘子法的稳健稀疏恢复 STAP 系统进行详细说明。

请参阅图 3, 所示为本发明一实施方式中基于交替方向乘子法的稳健稀疏恢复 STAP 系统 10 的结构示意图。

在本实施方式中, 基于交替方向乘子法的稳健稀疏恢复 STAP 系统 10, 主要包括模型建立模块 11、联合估计模块 12 以及目标检测模块 13。

模型建立模块 11, 用于建立阵列幅相误差下信号稀疏模型。

在本实施方式中, 所述模型建立模块 11 具体用于:

在阵列不存在幅相误差的情况下, 根据公式 $\mathbf{x} = \mathbf{x}_c + \mathbf{n} = \mathbf{\Phi}\mathbf{\alpha} + \mathbf{n}$ 计算 $NM \times 1$ 维的不含目标的空时快拍, 其中, M 表示脉冲-多普勒正侧视机载雷达天线所包括接收阵元的个数, N 表示该雷达天线在一个相干处理单元内发射脉冲的个数, $\mathbf{x}_c$ 表示杂波所对应的空时快拍, $\mathbf{n}$ 表示 $NM \times 1$ 维的接收机热噪声, $N_d N_s \times 1$ 维的 $\mathbf{\alpha} = [\alpha_{1,1}, \alpha_{1,2}, \dots, \alpha_{N_d, N_s}]^T$ 表示杂波在空时导向词典中所对应的角度-多普勒像, 矩阵 $\mathbf{\Phi} = [\mathbf{v}(f_{d,1}, f_{s,1}), \dots, \mathbf{v}(f_{d,1}, f_{s,2}), \dots, \mathbf{v}(f_{d, N_d}, f_{s, N_s})]$ 表示 $NM \times N_d N_s$ 维的在阵列不存在幅相误差的情况下的空时导向词典, $(\cdot)^T$ 表示转置操作, $NM \times 1$ 维向量 $\mathbf{v}(f_{d,i}, f_{s,k}) = \mathbf{v}_d(f_{d,i}) \otimes \mathbf{v}_s(f_{s,k})$ 表示在阵列不存在幅相误差的情况下的空时导向矢量, $\mathbf{v}_d(f_{d,i}) = [1, e^{j2\pi f_{d,i}}, \dots, e^{j2(N-1)\pi f_{d,i}}]^T$ 与 $\mathbf{v}_s(f_{s,k}) = [1, e^{j2\pi f_{s,k}}, \dots, e^{j2(M-1)\pi f_{s,k}}]^T$ 分别表示时域导向矢量与空域导向矢量, $(f_{d,i}, f_{s,k})$ 表示第 i 个时域网格点与第 k 个空域网格点, N_s 与 N_d 分别表示沿着空间频率轴与时间/多普勒频率轴的网格点数;

根据天线阵列的幅相误差 $\mathbf{c} = [c_1, c_2, \dots, c_M]^T$, 计算阵列幅相误差下的空时导向矢量 $\mathbf{v}(f_{d,i}, f_{s,k}) = \mathbf{v}_d(f_{d,i}) \otimes (\mathbf{v}_s(f_{s,k}) \odot \mathbf{c}_k)$, 其中, c_i 表示第 i 个阵元的幅度与相位误差, 令 $\mathbf{C} = \mathbf{I}_N \otimes (\text{diag}(\mathbf{c}))$, 其中, $\mathbf{I}_N$ 表示 $N \times N$ 维的单位矩阵, $\text{diag}(\mathbf{c})$ 表示 $\mathbf{c}$ 对角化后的对角矩阵, $\otimes$ 表示 Kronecker 积, $\odot$ 表示 Hadamard 积;

在阵列幅相误差下, 根据公式 $\mathbf{x} = \mathbf{C}\mathbf{\Phi}\mathbf{\alpha} + \mathbf{n}$ 计算所接收到的不含目标的空时快拍, 其中, $\mathbf{C}\mathbf{\Phi}$ 表示在阵列幅相误差下完备空时导向词典。

联合估计模块 12, 用于利用杂波与目标功率谱的稀疏性, 通过对阵列幅相误差加入约束, 利用基于交替方向乘子法来联合估计阵列幅相误差与杂波或杂波加目标的角度-多普勒像。

在本实施方式中, 所述联合估计模块 12 具体用于:

构造优化问题

$$\min_{\alpha_l, \mathbf{r}_l, \mathbf{t}_l, \lambda_l} \sum_{l=1}^L \|\alpha_l\|_1 + \frac{1}{2\rho} \sum_{l=1}^L \|\mathbf{r}_l\|_2^2 - \Re\{\sum_{l=1}^L \lambda_l^H (\Phi \alpha_l + \mathbf{r}_l - \mathbf{T} \mathbf{x}_l)\} + \frac{\beta}{2} \sum_{l=1}^L \|\Phi \alpha_l + \mathbf{r}_l - \mathbf{T} \mathbf{x}_l\|_2^2 - \Re\{\gamma^* (\sum_{m=1}^M t_m - \varsigma)\}$$
, 其中, 快拍个数为 $L (L \geq 1)$, $\lambda_l \in \mathbb{C}^{NM}$ 表示第 l 个快拍所对应的拉格朗日乘子, $\beta > 0$ 表示惩罚参数, $\rho > 0$ 表示权衡稀疏度与总均方误差的正则化参数, $\mathbf{r}_l$ 表示第 l 个快拍所对应的辅助变量, $\varsigma \in \mathbb{C}$ 表示任意标量常数, γ 表示拉格朗日乘子;

令 $\mathbf{Y} = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_L]$, $\mathbf{\Gamma} = [\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_L]$, $\mathbf{\Lambda} = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_L]$, $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_L]$, 并分别求得所述优化问题关于变量 $\alpha_l, \mathbf{r}_l, \mathbf{t}_l, \lambda_l$ 最小时 $\alpha_l, \mathbf{r}_l, \mathbf{t}_l, \lambda_l$ 的取值。

目标检测模块 13, 用于利用检测窗在待检测单元检测所估计的角度-多普勒像, 并计算目标的总功率与所有参考单元的平均功率, 以及利用中值恒虚警检测器对目标进行检测。

在本实施方式中, 所述目标检测模块 13 具体用于:

在去除待检测单元附近的多个快拍后, 用检测窗在待检测单元中检测所估计的角度-多普勒像 $\hat{\alpha}_{\text{CUT}}$, 其中, 所述检测窗的空间频率与多普勒频率的分辨率分别为 $\frac{1}{M} f_s$ 与 $\frac{1}{N} f_d$;

取 L 个快拍作为参考单元, 并计算目标的总功率与所有参考单元的平均功率;

利用中值恒虚警检测器 $20 \lg \vartheta_{\text{CUT}} - 20 \lg \text{median}(\vartheta_l) \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} \xi$ 对目标进行检测, 其中,

$\vartheta_{\text{CUT}} = \sum_{k,i} |\tilde{\alpha}_{\text{CUT},k,i}|$, $\vartheta_l = \sum_{k,i} |\tilde{\alpha}_{l,k,i}|$, $l = 1, 2, \dots, L$, ξ 表示临界检测门限, $\text{median}(y)$ 表示求取 y 中所有元素的中值, H_0 表示只有干扰存在, H_1 表示有目标加干扰存在。

本发明提供一种基于交替方向乘子法的稳健稀疏恢复 STAP 系统 10, 能克服阵列幅相误差所带来的性能严重下降的影响, 从而提高基于交替方向乘子法的稳健稀疏恢复 STAP 目标检测的性能, 提高雷达系统杂波抑制与目标检测能力。

以下, 本发明通过仿真数据来说明本发明在角度-多普勒像的重构质量与目标的检测概率 (P_d) 两方面的有益效果。

首先, 从角度-多普勒像的重构质量方面

本发明令阵列幅相误差的表示式为 $c_m = (1 + \epsilon_m) e^{j\phi_m}$, 其中 $m = 1, 2, \dots, M$, ϵ_m 与 ϕ_m 分别在区间 $[-\epsilon_{\max}, \epsilon_{\max}]$ 与 $[-\phi_{\max}, \phi_{\max}]$ 中均服从均匀分布。如下图 4 所示, Case1、Case2、Case3 分别表示 $\epsilon_{\max} = 0, \phi_{\max} = 0$ (即不含误差)、 $\epsilon_{\max} = 0.05, \phi_{\max} = 0.05\pi$ 、 $\epsilon_{\max} =$

$0.2, \phi_{max} = 0.2\pi$ 。对于 ADM 算法, $\beta = 0.1, \rho = 0.01, \xi = 10^{-4}$, 最大迭代次数为 500 次; 对于 CVX 算法, 噪声允许误差为 10^{-3} , 最大迭代次数为 500 次; 对于 IAA (iterative adaptive approach) 算法, 中止迭代条件是前后两次迭代解的相对变化量小于等于 10^{-4} , 或最大迭代次数达到 20 次。另外对所有算法, $N_d \times N_s = 5M \times 5N = 50 \times 50$ 。图中纵坐标表示的是归一化多普勒频率 $[0.5, -0.5]$, 横坐标表示归一化的空间频率 $[-0.5, 0.5]$, 并且假设在感兴趣单元中, 含有三个慢速目标, 即它们都靠近杂波脊线。即包括目标 1: 多普勒频率 -0.13 , 信杂噪比 20dB; 目标 2: 多普勒频率 0.11 , 信杂噪比 16dB; 目标 3: 多普勒频率 0.41 , 信杂噪比 16dB。图 4 可以看出本发明在误差逐渐变大时, 仍然表现出比其它几种算法更优的恢复效果。

其次, 从目标的检测概率(P_d)方面

本发明将虚警概率设为 $P_{fa} = 10^{-3}$, 并且假设慢速目标的多普勒频率为 0.36 。图 6, Case1: $\epsilon_{max} = 0, \phi_{max} = 0$; Case2: $\epsilon_{max} = 0.025, \phi_{max} = 0.025\pi$; Case3: $\epsilon_{max} = 0.05, \phi_{max} = 0.05\pi$; Case4: $\epsilon_{max} = 0.1, \phi_{max} = 0.1\pi$; Case5: $\epsilon_{max} = 0.15, \phi_{max} = 0.15\pi$; Case6: $\epsilon_{max} = 0.2, \phi_{max} = 0.2\pi$ 。由图 5 和图 6 可得: 在存在阵列幅相误差且不对其进行校正时, 现有恢复算法的目标检测性能都会因此受到很大影响。此外, 本发明 (JIE-ADM) 的目标检测性能仅稍次于当阵列幅相误差完全已知时的目标检测性能。

如图 7, 阵列幅相误差为 $\epsilon_{max}=0.1, \phi_{max}=0.1\pi$, 从接收机性能曲线可知: 无论是快速目标还是慢速目标, 本发明都能表现出比较好的目标检测性能。

最后, 本发明再结合 MCARM 实测数据来更进一步的说明本发明的有益效果。此处, MCARM 数据是由 L-波段 (1.24GHz) 的有源相控阵阵列天线而获得 (采用 22 个接收模块), 每一个相干处理单元包含 128 个脉冲, 且脉冲的重复频率为 1984Hz, 另外距离分辨率为 120m。如图 8, 图 9 所示, 本发明对阵列幅相误差的校正更准确, 对阵列幅相误差下的角度-多普勒像的恢复效果也更优。

值得注意的是, 上述实施例中, 所包括的各个单元只是按照功能逻辑进行划分的, 但并不局限于上述的划分, 只要能够实现相应的功能即可; 另外, 各功能单元的具体名称也只是为了便于相互区分, 并不用于限制本发明的保护范围。

另外, 本领域普通技术人员可以理解实现上述各实施例方法中的全部或部分步骤是可以通程序来指令相关的硬件来完成, 相应的程序可以存储于一计算机可读取存储介质中, 所述的存储介质, 如 ROM/RAM、磁盘或光盘等。

以上所述仅为本发明的较佳实施例而已, 并不用以限制本发明, 凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等, 均应包含在本发明的保护范围之内。

权利要求书

1. 一种基于交替方向乘子法的稳健稀疏恢复 STAP 方法, 其特征在于, 所述方法包括:
模型建立步骤、建立阵列幅相误差下信号稀疏模型;

联合估计步骤、利用杂波与目标功率谱的稀疏性, 通过对阵列幅相误差加入约束, 利用基于交替方向乘子法来联合估计阵列幅相误差与杂波或杂波加目标的角度-多普勒像;

目标检测步骤、利用检测窗在待检测单元检测所估计的角度-多普勒像, 并计算目标的总功率与所有参考单元的平均功率, 以及利用中值恒虚警检测器对目标进行检测。

2. 如权利要求 1 所述的基于交替方向乘子法的稳健稀疏恢复 STAP 方法, 其特征在于, 所述模型建立步骤具体包括:

在阵列不存在幅相误差的情况下, 根据公式 $\mathbf{x} = \mathbf{x}_c + \mathbf{n} = \Phi\alpha + \mathbf{n}$ 计算 $NM \times 1$ 维的不含目标的空时快拍, 其中, M 表示脉冲-多普勒正侧视机载雷达天线所包括接收阵元的个数, N 表示该雷达天线在一个相干处理单元内发射脉冲的个数, $\mathbf{x}_c$ 表示杂波所对应的空时快拍, $\mathbf{n}$ 表示 $NM \times 1$ 维的接收机热噪声, $N_d N_s \times 1$ 维的 $\alpha = [\alpha_{1,1}, \alpha_{1,2}, \dots, \alpha_{N_d, N_s}]^T$ 表示杂波在空时导向词典中所对应的角度-多普勒像, 矩阵 $\Phi = [\mathbf{v}(f_{d,1}, f_{s,1}), \dots, \mathbf{v}(f_{d,1}, f_{s,2}), \dots, \mathbf{v}(f_{d, N_d}, f_{s, N_s})]$ 表示 $NM \times N_d N_s$ 维的在阵列不存在幅相误差的情况下的空时导向词典, $(\cdot)^T$ 表示转置操作, $NM \times 1$ 维向量 $\mathbf{v}(f_{d,i}, f_{s,k}) = \mathbf{v}_d(f_{d,i}) \otimes \mathbf{v}_s(f_{s,k})$ 表示在阵列不存在幅相误差的情况下的空时导向矢量, $\mathbf{v}_d(f_{d,i}) = [1, e^{j2\pi f_{d,i}}, \dots, e^{j2(N-1)\pi f_{d,i}}]^T$ 与 $\mathbf{v}_s(f_{s,k}) = [1, e^{j2\pi f_{s,k}}, \dots, e^{j2(M-1)\pi f_{s,k}}]^T$ 分别表示时域导向矢量与空域导向矢量, $(f_{d,i}, f_{s,k})$ 表示第 i 个时域网格点与第 k 个空域网格点, N_s 与 N_d 分别表示沿着空间频率轴与时间/多普勒频率轴的网格点数;

根据天线阵列的幅相误差 $\mathbf{c} = [c_1, c_2, \dots, c_M]^T$, 计算阵列幅相误差下的空时导向矢量 $\mathbf{v}(f_{d,i}, f_{s,k}) = \mathbf{v}_d(f_{d,i}) \otimes (\mathbf{v}_s(f_{s,k}) \odot \mathbf{c}_k)$, 其中, c_i 表示第 i 个阵元的幅度与相位误差, 令 $\mathbf{C} = \mathbf{I}_N \otimes (\text{diag}(\mathbf{c}))$, 其中, $\mathbf{I}_N$ 表示 $N \times N$ 维的单位矩阵, $\text{diag}(\mathbf{c})$ 表示 $\mathbf{c}$ 对角化后的对角矩阵, $\otimes$ 表示 Kronecker 积, $\odot$ 表示 Hadamard 积;

在阵列幅相误差下, 根据公式 $\mathbf{x} = \mathbf{C}\Phi\alpha + \mathbf{n}$ 计算所接收到的不含目标的空时快拍, 其中, $\mathbf{C}\Phi$ 表示在阵列幅相误差下完备空时导向词典。

3. 如权利要求 2 所述的基于交替方向乘子法的稳健稀疏恢复 STAP 方法, 其特征在于, 所述联合估计步骤具体包括:

构造优化问题

$$\min_{\alpha_l, \mathbf{r}_l, t_l, \lambda_l} \sum_{l=1}^L \|\alpha_l\|_1 + \frac{1}{2\rho} \sum_{l=1}^L \|\mathbf{r}_l\|_2^2 - \Re\{\sum_{l=1}^L \lambda_l^H (\Phi\alpha_l + \mathbf{r}_l - \mathbf{T}\mathbf{x}_l)\} + \frac{\beta}{2} \sum_{l=1}^L \|\Phi\alpha_l + \mathbf{r}_l - \mathbf{T}\mathbf{x}_l\|_2^2 - \Re\{\gamma^* (\sum_{m=1}^M t_m - \varsigma)\}$$
, 其中, 快拍个数为 $L (L \geq 1)$, $\lambda_l \in \mathbb{C}^{NM}$ 表示第 l 个快拍所

对应的拉格朗日乘子, $\beta > 0$ 表示惩罚参数, $\rho > 0$ 表示权衡稀疏度与总均方误差的正则化参数, $\mathbf{r}_l$ 表示第 l 个快拍所对应的辅助变量, $\varsigma \in \mathbb{C}$ 表示任意标量常数, γ 表示拉格朗日乘子;

令 $\mathbf{Y} = [\boldsymbol{\alpha}_1, \boldsymbol{\alpha}_2, \dots, \boldsymbol{\alpha}_L]$, $\mathbf{\Gamma} = [\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_L]$, $\mathbf{\Lambda} = [\boldsymbol{\lambda}_1, \boldsymbol{\lambda}_2, \dots, \boldsymbol{\lambda}_L]$, $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_L]$, 并分别求得所述优化问题关于变量 $\boldsymbol{\alpha}_l, \mathbf{r}_l, \mathbf{t}_l, \boldsymbol{\lambda}_l$ 最小时 $\boldsymbol{\alpha}_l, \mathbf{r}_l, \mathbf{t}_l, \boldsymbol{\lambda}_l$ 的取值。

4. 如权利要求3所述的基于交替方向乘子法的稳健稀疏恢复 STAP 方法, 其特征在于, 所述目标检测步骤具体包括:

在去除待检测单元附近的多个快拍后, 用检测窗在待检测单元中检测所估计的角度-多普勒像 $\hat{\alpha}_{\text{CUT}}$, 其中, 所述检测窗的空间频率与多普勒频率的分辨率分别为 $\frac{1}{M}f_s$ 与 $\frac{1}{N}f_d$;

取 L 个快拍作为参考单元, 并计算目标的总功率与所有参考单元的平均功率;

利用中值恒虚警检测器 $20 \lg \vartheta_{\text{CUT}} - 20 \lg \text{median}(\vartheta_l) \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} \xi$ 对目标进行检测, 其中,

$\vartheta_{\text{CUT}} = \sum_{k,i} |\tilde{\alpha}_{\text{CUT},k,i}|$, $\vartheta_l = \sum_{k,i} |\tilde{\alpha}_{l,k,i}|$, $l = 1, 2, \dots, L$, ξ 表示临界检测门限, $\text{median}(y)$ 表示求取 y 中所有元素的中值, H_0 表示只有干扰存在, H_1 表示有目标加干扰存在。

5. 一种基于交替方向乘子法的稳健稀疏恢复 STAP 系统, 其特征在于, 所述系统包括:

模型建立模块, 用于建立阵列幅相误差下信号稀疏模型;

联合估计模块, 用于利用杂波与目标功率谱的稀疏性, 通过对阵列幅相误差加入约束, 利用基于交替方向乘子法来联合估计阵列幅相误差与杂波或杂波加目标的角度-多普勒像;

目标检测模块, 用于利用检测窗在待检测单元检测所估计的角度-多普勒像, 并计算目标的总功率与所有参考单元的平均功率, 以及利用中值恒虚警检测器对目标进行检测。

6. 如权利要求5所述的基于交替方向乘子法的稳健稀疏恢复 STAP 系统, 其特征在于, 所述模型建立模块具体用于:

在阵列不存在幅相误差的情况下, 根据公式 $\mathbf{x} = \mathbf{x}_c + \mathbf{n} = \mathbf{\Phi}\boldsymbol{\alpha} + \mathbf{n}$ 计算 $NM \times 1$ 维的不含目标的空时快拍, 其中, M 表示脉冲-多普勒正侧视机载雷达天线所包括接收阵元的个数, N 表示该雷达天线在一个相干处理单元内发射脉冲的个数, $\mathbf{x}_c$ 表示杂波所对应的空时快拍, $\mathbf{n}$ 表示 $NM \times 1$ 维的接收机热噪声, $N_d N_s \times 1$ 维的 $\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_{1,1}, \alpha_{1,2}, \dots, \alpha_{N_d N_s}]^T$ 表示杂波在空时导向词典中所对应的角度-多普勒像, 矩阵 $\mathbf{\Phi} = [\mathbf{v}(f_{d,1}, f_{s,1}), \dots, \mathbf{v}(f_{d,1}, f_{s,2}), \dots, \mathbf{v}(f_{d,N_d}, f_{s,N_s})]$ 表示 $NM \times N_d N_s$ 维的在阵列不存在幅相误差的情况下的空时导向词典, $(\cdot)^T$ 表示转置操作, $NM \times 1$ 维向量 $\mathbf{v}(f_{d,i}, f_{s,k}) = \mathbf{v}_d(f_{d,i}) \otimes \mathbf{v}_s(f_{s,k})$ 表示在阵列不存在幅相误差的情况下的空时导向矢量, $\mathbf{v}_d(f_{d,i}) = [1, e^{j2\pi f_{d,i}}, \dots, e^{j2(N-1)\pi f_{d,i}}]^T$ 与 $\mathbf{v}_s(f_{s,k}) = [1, e^{j2\pi f_{s,k}}, \dots, e^{j2(M-1)\pi f_{s,k}}]^T$ 分别表示时域导向矢量与空域导向矢量, $(f_{d,i}, f_{s,k})$ 表示第 i 个时域网格点与第 k 个空域网格点, N_s

与 N_d 分别表示沿着空间频率轴与时间/多普勒频率轴的网格点数;

根据天线阵列的幅相误差 $\mathbf{c} = [c_1, c_2, \dots, c_M]^T$, 计算阵列幅相误差下的空时导向矢量 $\mathbf{v}(f_{d,i}, f_{s,k}) = \mathbf{v}_d(f_{d,i}) \otimes (\mathbf{v}_s(f_{s,k}) \odot \mathbf{c}_k)$, 其中, c_i 表示第 i 个阵元的幅度与相位误差, 令 $\mathbf{C} = \mathbf{I}_N \otimes (\text{diag}(\mathbf{c}))$, 其中, $\mathbf{I}_N$ 表示 $N \times N$ 维的单位矩阵, $\text{diag}(\mathbf{c})$ 表示 $\mathbf{c}$ 对角化后的对角矩阵, $\otimes$ 表示 Kronecker 积, $\odot$ 表示 Hadamard 积;

在阵列幅相误差下, 根据公式 $\mathbf{x} = \mathbf{C}\Phi\alpha + \mathbf{n}$ 计算所接收到的不含目标的空时快拍, 其中, $\mathbf{C}\Phi$ 表示在阵列幅相误差下完备空时导向词典。

7. 如权利要求6所述的基于交替方向乘子法的稳健稀疏恢复 STAP 系统, 其特征在于, 所述联合估计模块具体用于:

构造优化问题

$$\min_{\alpha_l, \mathbf{r}_l, \mathbf{t}_l, \lambda_l} \sum_{l=1}^L \|\alpha_l\|_1 + \frac{1}{2\rho} \sum_{l=1}^L \|\mathbf{r}_l\|_2^2 - \Re\{\sum_{l=1}^L \lambda_l^H (\Phi\alpha_l + \mathbf{r}_l - \mathbf{T}\mathbf{x}_l)\} + \frac{\beta}{2} \sum_{l=1}^L \|\Phi\alpha_l + \mathbf{r}_l - \mathbf{T}\mathbf{x}_l\|_2^2 - \Re\{\gamma^* (\sum_{m=1}^M t_m - \varsigma)\}$$
, 其中, 快拍个数为 $L (L \geq 1)$, $\lambda_l \in \mathbb{C}^{NM}$ 表示第 l 个快拍所对应的拉格朗日乘子, $\beta > 0$ 表示惩罚参数, $\rho > 0$ 表示权衡稀疏度与总均方误差的正则化参数, $\mathbf{r}_l$ 表示第 l 个快拍所对应的辅助变量, $\varsigma \in \mathbb{C}$ 表示任意标量常数, γ 表示拉格朗日乘子;

令 $\mathbf{Y} = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_L]$, $\mathbf{\Gamma} = [\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_L]$, $\mathbf{\Lambda} = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_L]$, $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_L]$, 并分别求得所述优化问题关于变量 $\alpha_l, \mathbf{r}_l, \mathbf{t}_l, \lambda_l$ 最小时 $\alpha_l, \mathbf{r}_l, \mathbf{t}_l, \lambda_l$ 的取值。

8. 如权利要求7所述的基于交替方向乘子法的稳健稀疏恢复 STAP 系统, 其特征在于, 所述目标检测模块具体用于:

在去除待检测单元附近的多个快拍后, 用检测窗在待检测单元中检测所估计的角度-多普勒像 $\hat{\alpha}_{\text{CUT}}$, 其中, 所述检测窗的空间频率与多普勒频率的分辨率分别为 $\frac{1}{M}f_s$ 与 $\frac{1}{N}f_d$;

取 L 个快拍作为参考单元, 并计算目标的总功率与所有参考单元的平均功率;

利用中值恒虚警检测器 $20 \lg \vartheta_{\text{CUT}} - 20 \lg \text{median}(\vartheta_l) \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} \xi$ 对目标进行检测, 其中,

$\vartheta_{\text{CUT}} = \sum_{k,i} |\tilde{\alpha}_{\text{CUT},k,i}|$, $\vartheta_l = \sum_{k,i} |\tilde{\alpha}_{l,k,i}|$, $l = 1, 2, \dots, L$, ξ 表示临界检测门限, $\text{median}(\mathbf{y})$ 表示求取 $\mathbf{y}$ 中所有元素的中值, H_0 表示只有干扰存在, H_1 表示有目标加干扰存在。

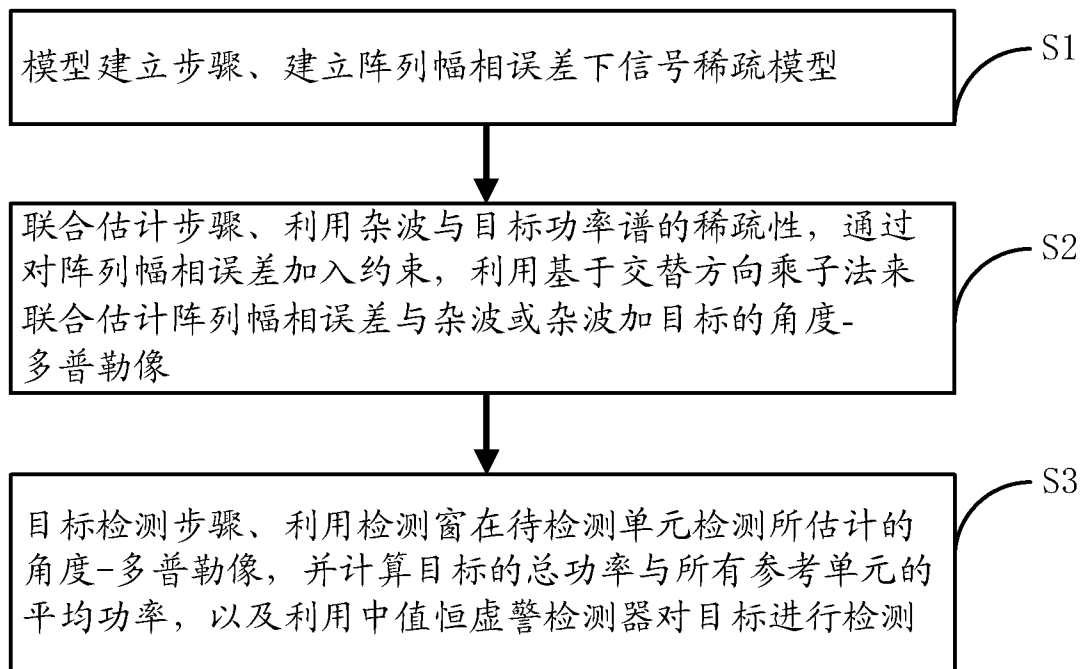


图 1

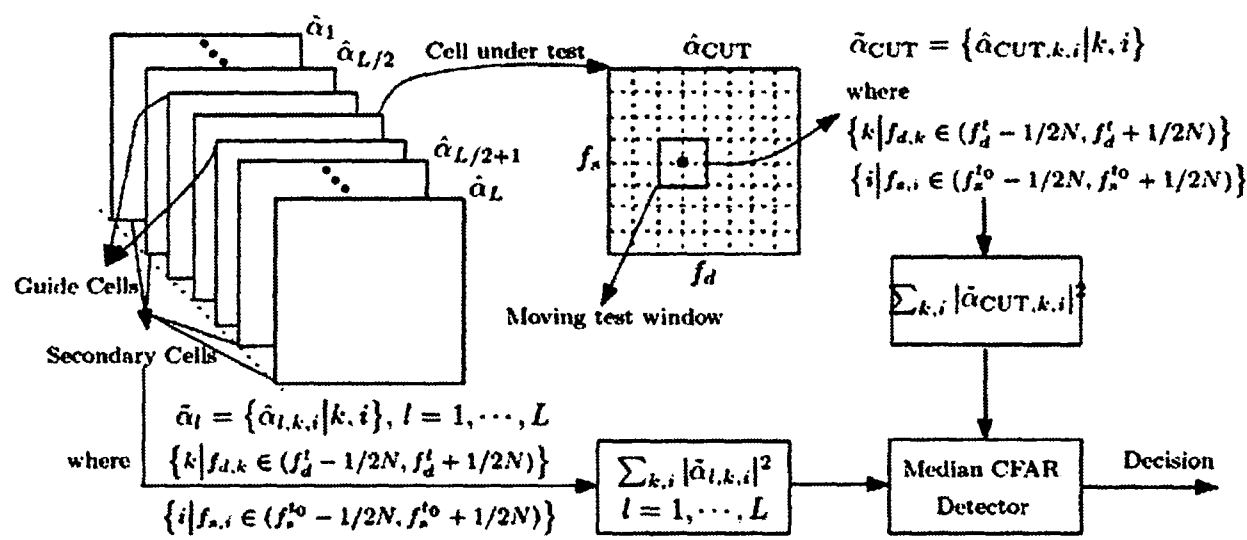


图 2

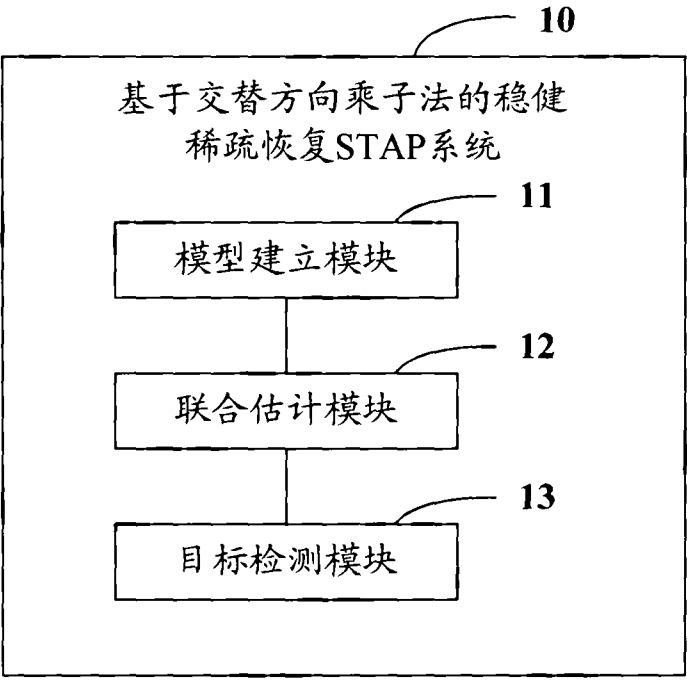


图 3

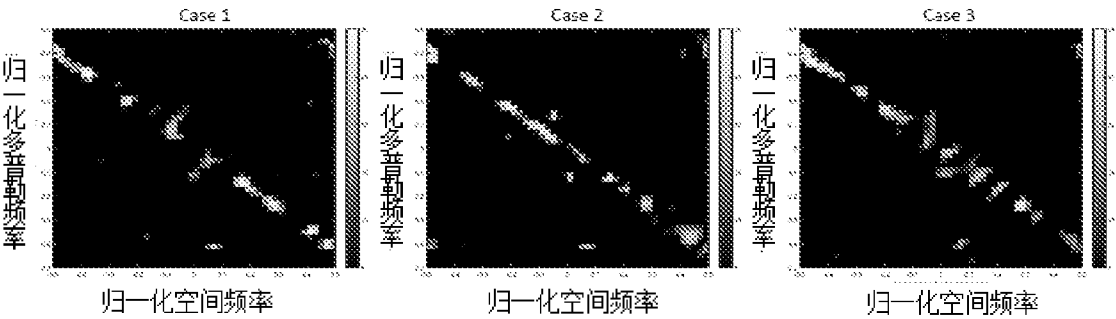


图 4 (a)

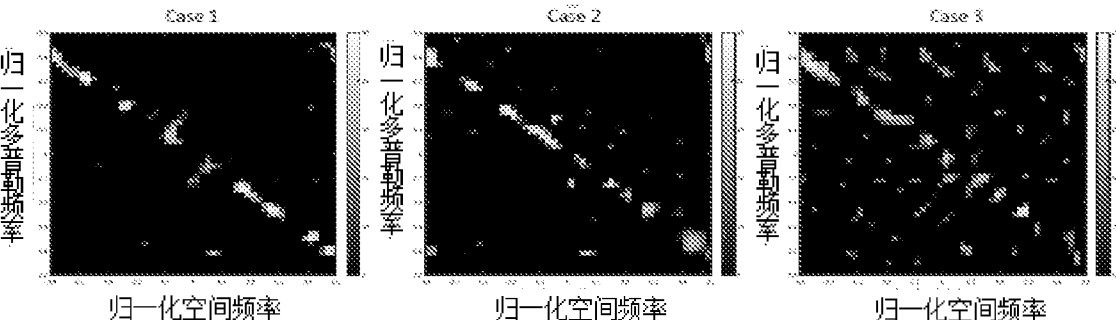


图 4 (b)

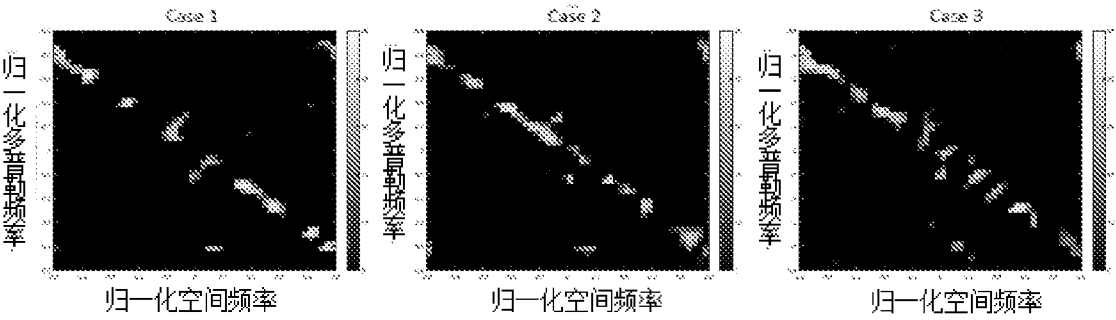


图 4 (c)

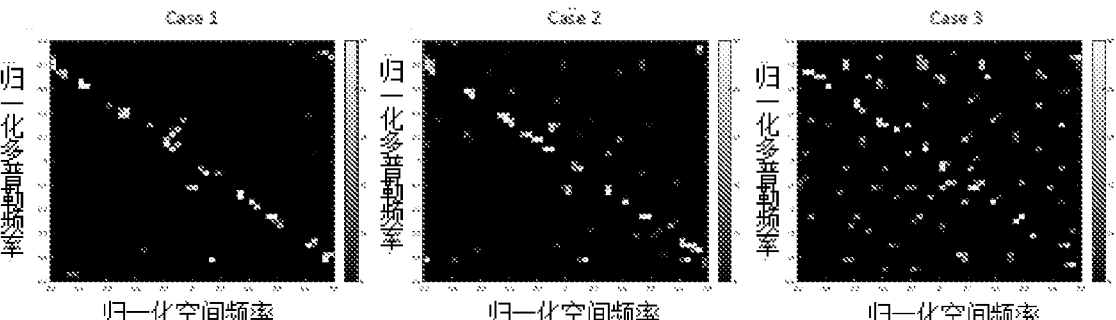


图 4 (d)

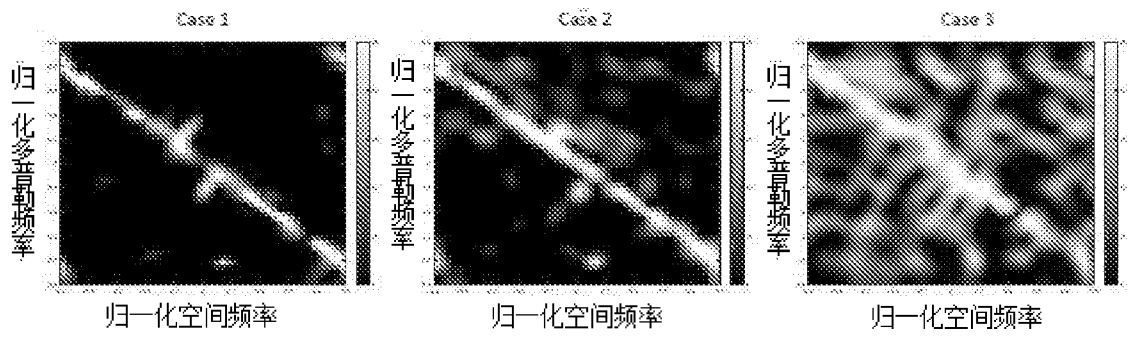


图 4 (e)

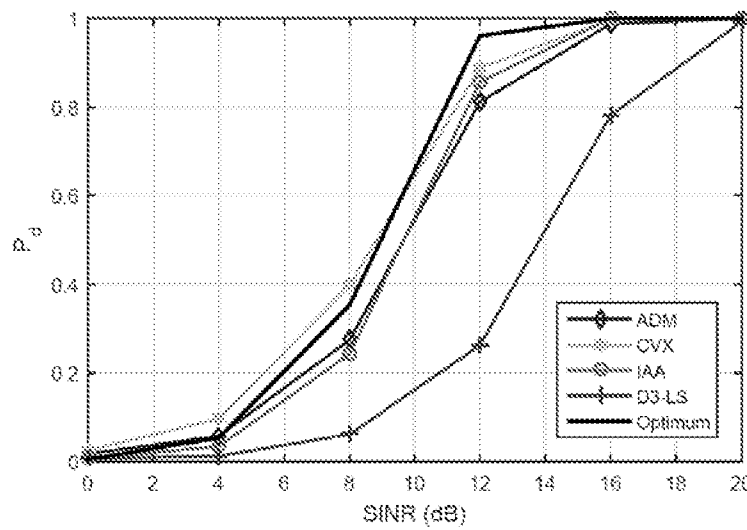


图 5 (a)

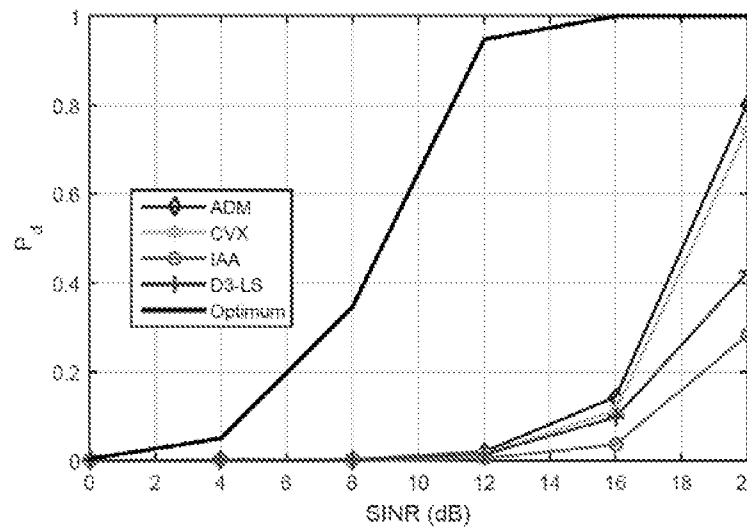


图 5 (b)

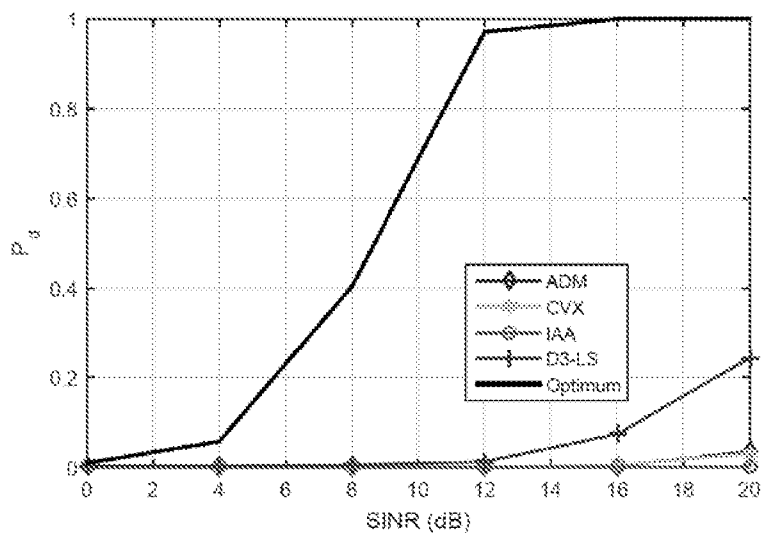


图 5 (c)

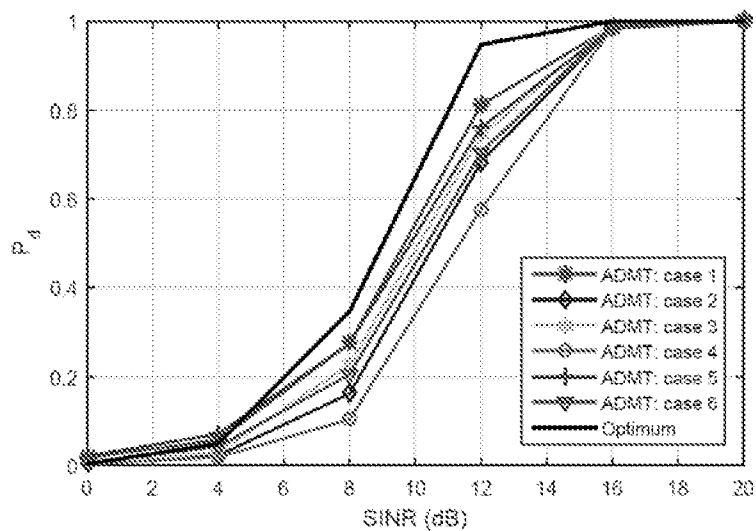


图 6 (a)

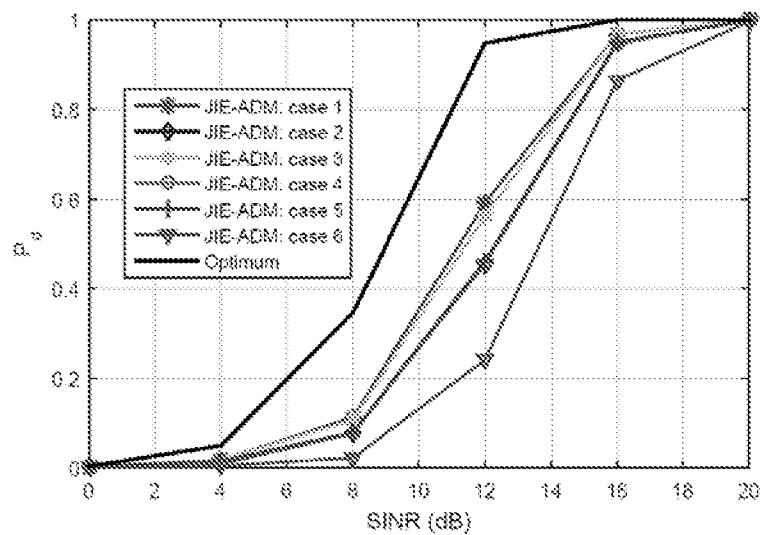


图 6 (b)

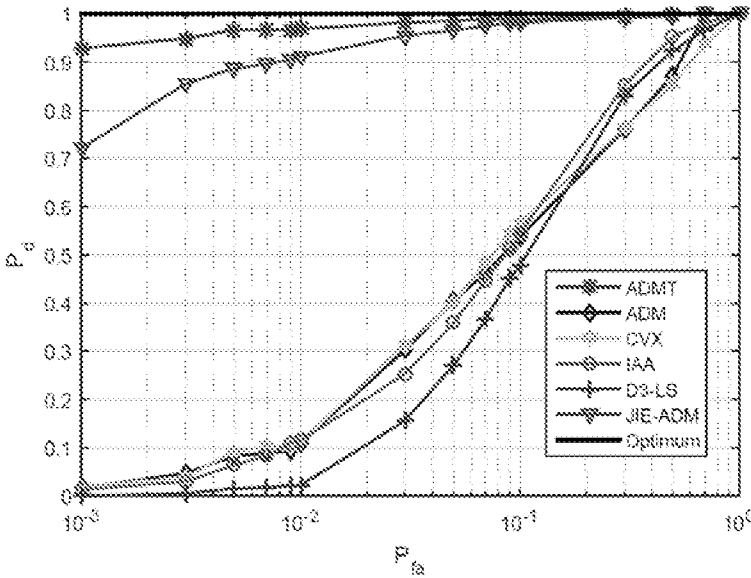


图 7 (a)

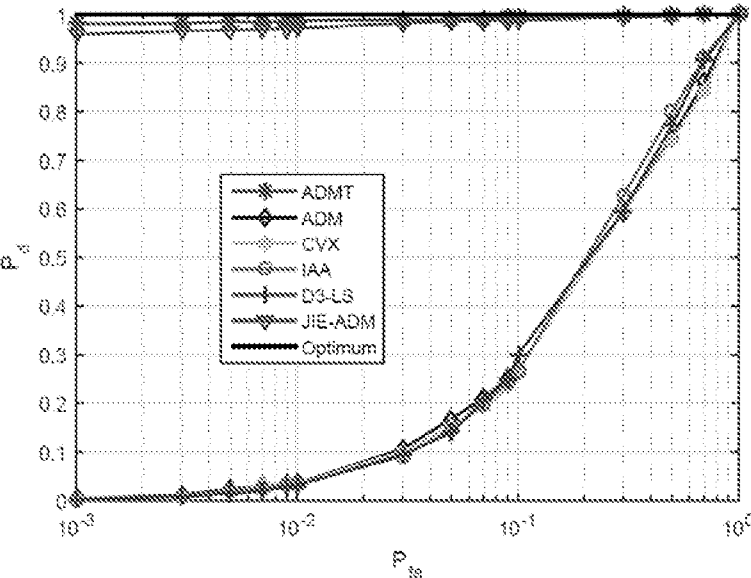


图 7 (b)

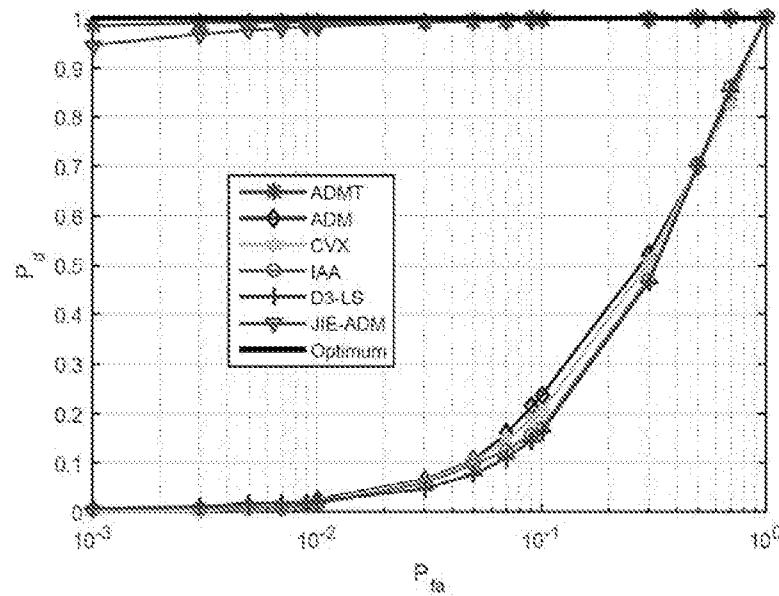


图 7 (c)

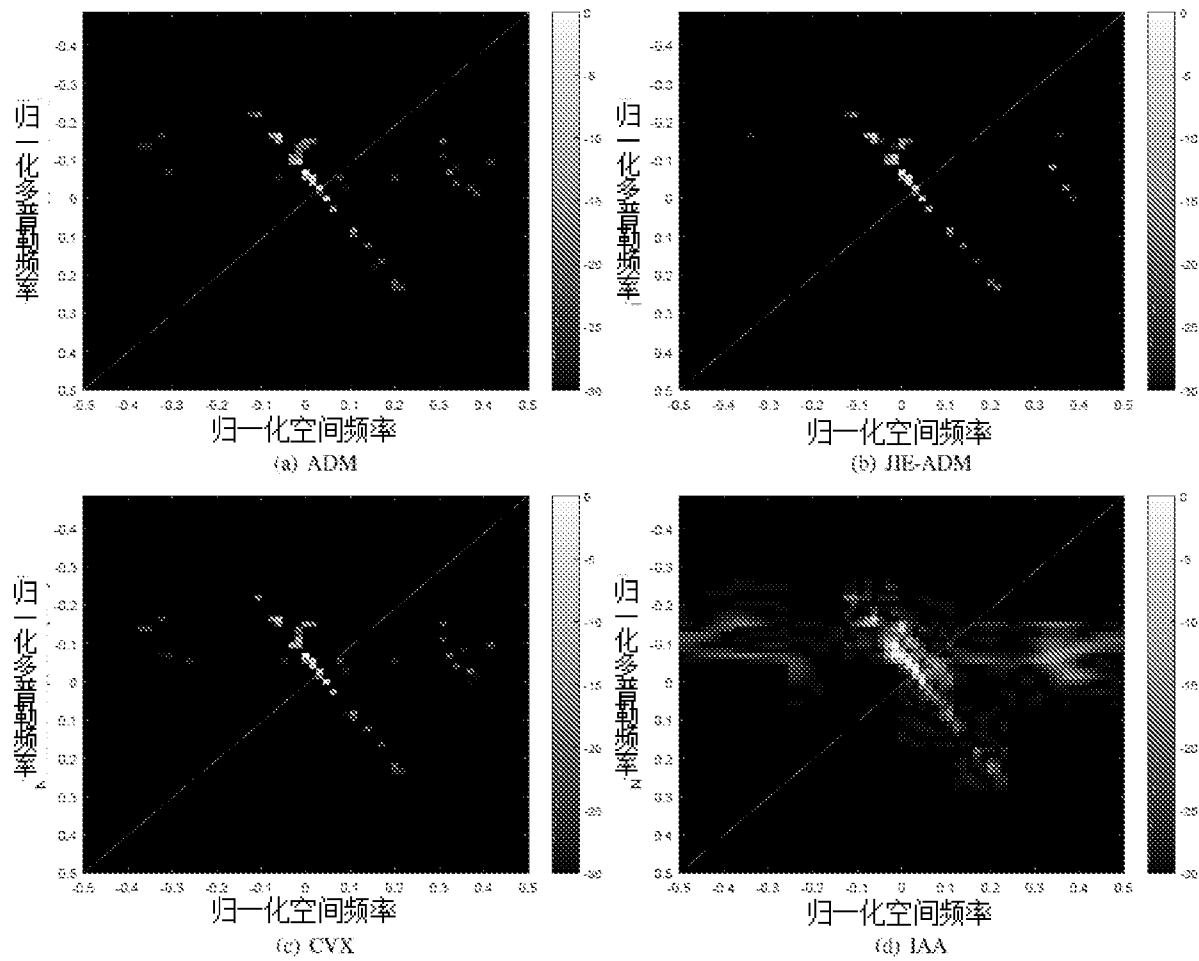


图 8

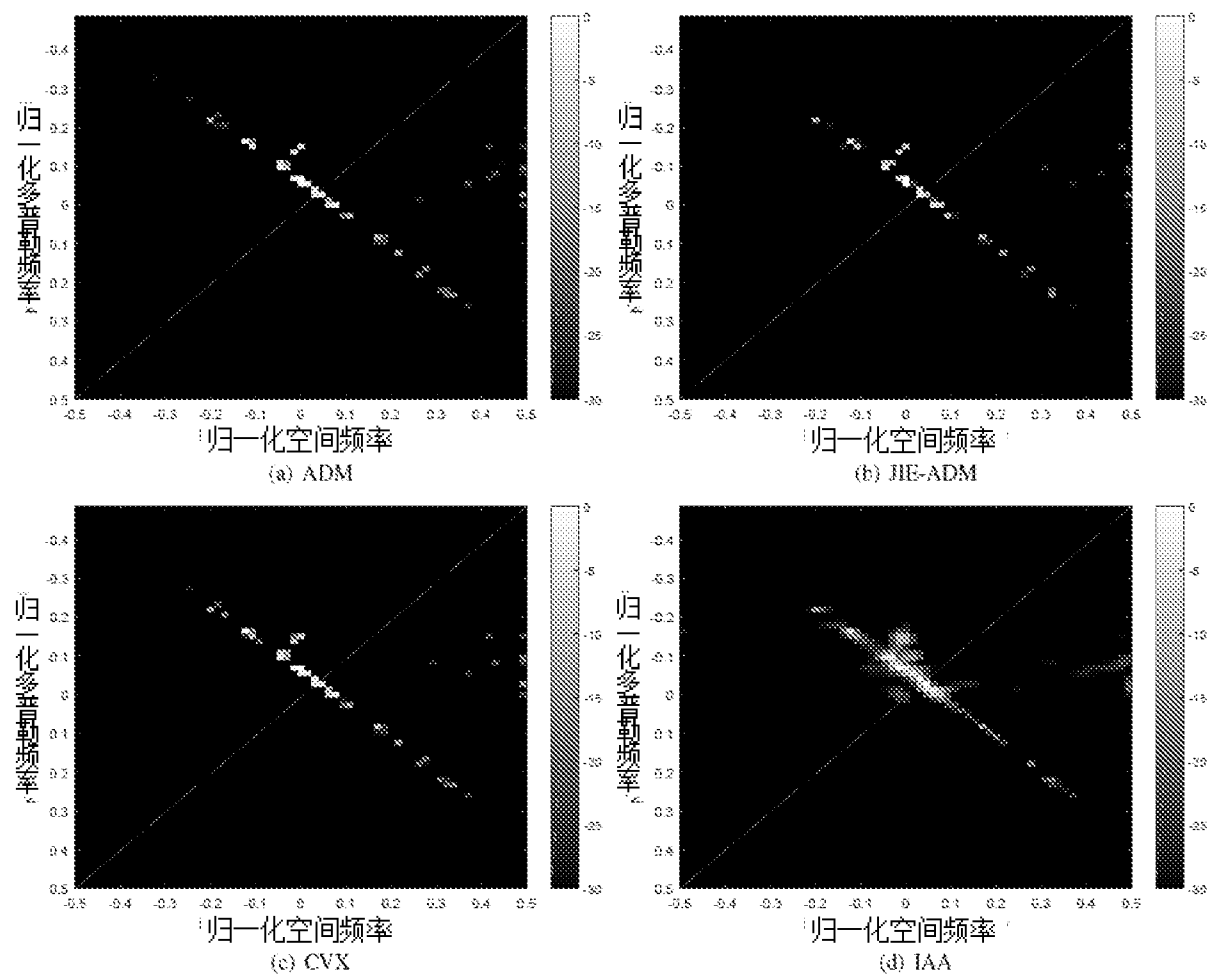


图 9

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2016/099023

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01S 7/41 (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 7; G01S 13

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)

CNTXT, CPRSABS, VEN, DWPI, SIPOABS, CJFD, CNKI, IEL, 深圳大学, 阳召成, 朱轶昂, 黄建军, 稀疏, 空时自适应处理, 交替方向乘法, 幅相误差, 目标功率谱, 角度-多普勒像, 空时谱, 虚警, 检测, sparse, STAP, AMD, amplitude phase error, power spectrum, space time, false alarm, detect

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
E	CN 106501785 A (SHENZHEN UNIVERSITY), 15 March 2017 (15.03.2017), claims 1-8	1-8
A	阳召成, “基于稀疏性的空时自适应处理理论和方法”, 基于稀疏性的空时自适应处理理论和方法, vol. 10, 15 October 2014 (15.10.2014), ISSN: 1674-022X, the main body, page 47, paragraph 2 to page 50, penultimate paragraph, (YANG, Zhaocheng, “Theory and Methods of Sparsity-Based Space-Time Adaptive Processing”, Theory and Methods of Sparsity-Based Space-Time Adaptive Processing)	1-8
A	CN 104111458 A (XIDIAN UNIVERSITY), 22 October 2014 (22.10.2014), entire document	1-8
A	US 2005237236 A1 (BUDIC, R.D.), 27 October 2005 (27.10.2005), entire document	1-8

☐ 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	Date of mailing of the international search report 20 June 2017
Name and mailing address of the ISA State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No. (86-10) 62019451	Authorized officer YU, Yingjie Telephone No. (86-10) 01062085716

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2016/099023

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 106501785 A	15 March 2017	None	
CN 104111458 A	22 October 2014	CN 104111458 B	24 August 2016
US 2005237236 A1	27 October 2005	EP 1751578 A2	14 February 2007
		EP 1751578 A4	02 September 2009
		WO 2005106524 A2	10 November 2005
		WO 2005106524 A3	13 July 2006
		US 2007247353 A1	25 October 2007
		US 7369083 B2	06 May 2008
		US 7038618 B2	02 May 2006

A. 主题的分类 G01S 7/41 (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 7; G01S 13 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)) CNTXT, CPRSABS, VEN, DWPI, SIPOABS, CJFD, CNKI, IEL, 深圳大学, 阳召成, 朱轶昂, 黄建军, 稀疏, 空时自适应处理, 交替方向乘法, 幅相误差, 目标功率谱, 角度-多普勒像, 空时谱, 虚警, 检测, sparse, STAP, AMD, amplitude phase error, power spectrum, space time, false alarm, detect																	
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>E</td> <td>CN 106501785 A (深圳大学) 2017年 3月 15日 (2017 - 03 - 15) 权利要求1-8</td> <td>1-8</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>阳召成. “基于稀疏性的空时自适应处理理论和方法” 基于稀疏性的空时自适应处理理论和方法, 第10期, 2014年 10月 15日 (2014 - 10 - 15), ISSN: 1674-022X, 正文第47页第2段至第50页倒数第2段</td> <td>1-8</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 104111458 A (西安电子科技大学) 2014年 10月 22日 (2014 - 10 - 22) 全文</td> <td>1-8</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>US 2005237236 A1 (BUDIC R.D.) 2005年 10月 27日 (2005 - 10 - 27) 全文</td> <td>1-8</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	E	CN 106501785 A (深圳大学) 2017年 3月 15日 (2017 - 03 - 15) 权利要求1-8	1-8	A	阳召成. “基于稀疏性的空时自适应处理理论和方法” 基于稀疏性的空时自适应处理理论和方法, 第10期, 2014年 10月 15日 (2014 - 10 - 15), ISSN: 1674-022X, 正文第47页第2段至第50页倒数第2段	1-8	A	CN 104111458 A (西安电子科技大学) 2014年 10月 22日 (2014 - 10 - 22) 全文	1-8	A	US 2005237236 A1 (BUDIC R.D.) 2005年 10月 27日 (2005 - 10 - 27) 全文	1-8
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求															
E	CN 106501785 A (深圳大学) 2017年 3月 15日 (2017 - 03 - 15) 权利要求1-8	1-8															
A	阳召成. “基于稀疏性的空时自适应处理理论和方法” 基于稀疏性的空时自适应处理理论和方法, 第10期, 2014年 10月 15日 (2014 - 10 - 15), ISSN: 1674-022X, 正文第47页第2段至第50页倒数第2段	1-8															
A	CN 104111458 A (西安电子科技大学) 2014年 10月 22日 (2014 - 10 - 22) 全文	1-8															
A	US 2005237236 A1 (BUDIC R.D.) 2005年 10月 27日 (2005 - 10 - 27) 全文	1-8															
☐ 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		国际检索报告邮寄日期															
		2017年 6月 20日															
ISA/CN的名称和邮寄地址		受权官员															
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		余莹洁															
		电话号码 (86-10) 01062085716															

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2016/099023

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	106501785	A	2017年 3月 15日	无	
CN	104111458	A	2014年 10月 22日	CN	104111458 B 2016年 8月 24日
US	2005237236	A1	2005年 10月 27日	EP	1751578 A2 2007年 2月 14日
				EP	1751578 A4 2009年 9月 2日
				WO	2005106524 A2 2005年 11月 10日
				WO	2005106524 A3 2006年 7月 13日
				US	2007247353 A1 2007年 10月 25日
				US	7369083 B2 2008年 5月 6日
				US	7038618 B2 2006年 5月 2日

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2009年7月)