

(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 2 月 3 日 (03.02.2022)



(10) 国际公布号
WO 2022/022239 A1

- (51) 国际专利分类号:
G01S 7/41 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2021/104677
- (22) 国际申请日: 2021 年 7 月 6 日 (06.07.2021)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
202010736841.4 2020 年 7 月 28 日 (28.07.2020) CN
- (71) 申请人: 南京航空航天大学 (NANJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS) [CN/CN]; 中国江苏省南京市秦淮区御道街 29 号, Jiangsu 210016 (CN)。
- (72) 发明人: 晋本周 (JIN, Benzhou); 中国江苏省南京市秦淮区御道街 29 号, Jiangsu 210016 (CN)。申宇彤 (SHEN, Yutong); 中国江苏省南京市秦淮区御道街 29 号, Jiangsu 210016 (CN)。李建峰 (LI, Jianfeng); 中国江苏省南京市秦淮区御道街 29 号, Jiangsu 210016 (CN)。张小飞 (ZHANG, Xiaofei); 中国江苏省南京市秦淮区御道街 29 号, Jiangsu 210016 (CN)。吴启晖 (WU, Qihui); 中国江苏省南京市秦淮区御道街 29 号, Jiangsu 210016 (CN)。
- (74) 代理人: 南京苏高专利商标事务所 (普通合伙) (NANJING SUGAO PATENT AND TRADEMARK FIRM (ORDINARY PARTNERSHIP)); 中国江

(54) **Title:** RADAR TARGET DETECTION METHOD BASED ON PRE-DETECTION ESTIMATION

(54) 发明名称: 一种基于检测前估计的雷达目标检测方法

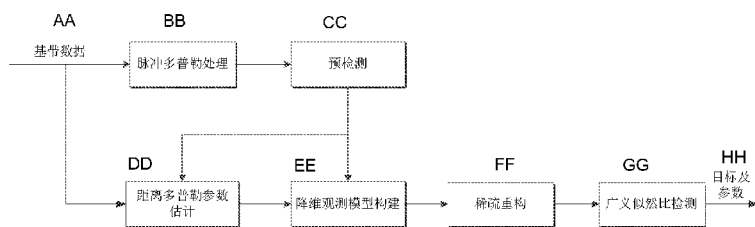


图 1

AA Baseband data
BB Pulse Doppler processing
CC Pre-detection
DD Ranging Doppler parameter estimation
EE Dimensionality reduction observation model construction
FF Sparse reconstruction
GG Generalised likelihood ratio detection
HH Target and parameters

(57) **Abstract:** A radar target detection method based on pre-detection estimation, comprising the following steps: on the basis of conventional pulse Doppler processing and pre-detection, acquiring point-of-interest tracing prior information; estimating tracing range and speed parameters to implement pre-detection parameter estimation; on the basis of point-of-interest tracing parameters, establishing a dimensionality reduction observation model of a received signal; on the basis of a sparse restoration algorithm, reconstructing a target vector in the dimensionality reduction observation model; and, on the basis of the reconstruction result, designing a generalised likelihood ratio detector and performing target detection; radar signal processing loss can be significantly reduced, and the target detector has a constant false alarm rate feature, greatly improving weak target detection performance.

(57) **摘要:** 一种基于检测前估计的雷达目标检测方法, 包括以下步骤: 基于常规脉冲多普勒处理与预检测, 获取感兴趣点迹先验信息; 对点迹距离和速度参数进行估计, 在检测前完成参数估计; 基于感兴趣点迹参数, 建立接收信号的降维观测模型; 基于稀疏恢复算法重构降维观测模型中的目标向量; 基于重构结果, 设计广义似然比检测器, 进行目标检测, 能够显著降低雷达信号处理损失, 且目标检测器具有恒虚警特性, 可大幅提升微弱目标检测性能。



苏省南京市白下区中山东路198号龙台国际大厦1912室, Jiangsu 210005 (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, 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)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

一种基于检测前估计的雷达目标检测方法

技术领域

本发明涉及雷达信号处理领域，具体涉及一种基于检测前估计的雷达目标检测方法。

背景技术

常规雷达信号处理通常基于匹配滤波器，采用先检测后估计的架构，为了降低空、时、频三个域强散射点副瓣对微弱目标检测的影响，需在滤波前对原始数据进行加窗。同时，由于目标参数未知，滤波器参数无法与真实目标相匹配。上述因素导致匹配滤波存在失配损失，大幅降低了雷达目标检测性能。

基于稀疏恢复的方法为解决上述问题提供了可行的思路。通过将目标参数空间离散化，构建完备观测矩阵 $\mathbf{A}_{od}$ ，接收回波信号可以表示为 $\mathbf{y} = \mathbf{A}_{od}\mathbf{x} + \mathbf{n}$ ， $\mathbf{x}$ 表示待重构目标向量， $\mathbf{n}$ 表示噪声。那么，通过求解 $\mathbf{x}$ 即可实现对目标的重构及参数估计。通常， $\mathbf{x}$ 是稀疏的，求解 $\mathbf{x}$ 可以归结为稀疏恢复问题。然而，基于稀疏重构方法进行目标检测尚面临三个方面的挑战：超高维度条件下的低复杂度重构、离网格下的精确重构、基于重构结果的恒虚警检测。

在超高维度条件下的低复杂度处理研究方面，通常，雷达目标探测所面临的信号模型维度巨大，低复杂度算法成为稀疏重构在雷达目标检测中应用的关键。迭代阈值类算法具有较低的复杂度，研究已经比较成熟。然而，此类方法收敛速度很慢，且迭代过程中，噪声（真实与估计值之间的差）逐渐偏离高斯分布，导致目标重构性能较差。另外，由于噪声的统计特性分析困难，难以基于重构结果进行CFAR(Constant False Alarm Rate, 恒虚警)检测。近似消息传递(Approximate Message Passing, AMP)类方法在保持相对较低的复杂度同时，提升了目标重构精度，然而，应用于雷达目标检测与估计问题时，仍然需要降维。

离网格下的稀疏恢复方法研究方面，当前，解决离网格问题主要有两种方法。一种是通过在观测矩阵上引入观测误差，建立真实观测模型。模型中的观测矩阵与目标向量均未知，基于交替迭代的方法分别进行求解。显然，迭代过程大幅增加稀疏恢复算法复杂度。另一种是原子范数类方法，此类方法涉及超高维矩阵分解、矩阵求逆等，算法复杂度更加难以承受，在雷达目标检测与估计问题中难以使用。

基于重构结果的目标检测方面，实际上，目前的研究主要集中在重构精度方面，对

于虚警率和检测概率关注较少。虽然大多重构算法本身包括非线性去噪，但仍然没有直接给出判决信息，需要进一步基于重构结果进行目标检测。由于去噪函数的非线性，重构输出噪声的统计特性与探测场景密切相关，基于重构输出进行目标恒虚警检测面临众多困难。基于 AMP 方法，有关学者研究了目标检测问题，研究结果表明，在大系统极限条件下，AMP 迭代过程中噪声仍然服从高斯分布，进而使得 CFAR 检测器设计成为可能。然而，如何在降维条件下，进行有效目标检测，尚缺乏相关方法。

发明内容

发明目的：针对常规基于稀疏重构的目标检测方法面临的挑战，本发明提供一种基于检测前估计的雷达目标检测方法。

技术方案：一种基于检测前估计的雷达目标检测方法，包括以下步骤：

1) 对接收的基带数据，进行脉冲压缩和相参积累，得到距离多普勒谱，基于距离多普勒谱进行预检测，获得感兴趣点迹，所在距离单元和多普勒单元对应的距离和多普勒频率分别用 r_c 和 f_c 表示；

2) 对预检测得到的点迹距离和多普勒参数进行估计，得到估计值 $\hat{r}_c$ 和 $\hat{f}_c$ ；

3) 基于 $\hat{r}_c$ 和 $\hat{f}_c$ 建立接收信号的降维观测模型；

4) 基于稀疏恢复算法对降维观测模型中的目标向量进行重构；

5) 基于重构结果，利用广义最大似然比检测器进行目标检测，输出目标检测结果和参数。

有益效果：本发明在基于点迹参数估计结果建立降维观测模型后，进一步利用目标稀疏先验信息，采用稀疏恢复算法进行目标重构和检测，解决了基于稀疏恢复的目标检测方法面临的三个关键问题，即超高维度条件下的降维、离网格条件下的精确重构和基于非线性重构结果的恒虚警目标检测。本发明在检测前完成目标参数估计，使得“匹配”信号处理成为可能，可大幅降低信号处理损失，提升目标检测性能。仿真和实测数据验证结果表明，与常规方法相比，本发明目标检测性能改善大于 1.5dB。

附图说明

图 1 为本发明的基于检测前估计的雷达目标检测方法流程图；

图 2 为本发明实施例提供的点迹参数估计精度示意图；

图 3 为本发明实施例提供的基于降维模型的重构输出噪声统计特性示意图；

图 4 为本发明实施例提供的仿真条件下 4 种检测器目标检测性能对比示意图；

图 5 为本发明实施例提供的实测数据距离多普勒谱示意图；

图 6 为实测数据条件下本发明方法与常规方法性能对比示意图。

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。

本发明适用于采用线性调频脉冲的脉冲体制雷达，目标检测处理流程如图 1 所示，包括以下步骤：

步骤 1) 对接收的基带数据，进行常规脉冲压缩和相参积累，得到距离多普勒谱，基于距离多普勒谱进行预检测，获得感兴趣点迹；

基带数据可以包括快时间、慢时间和空域数据，本发明适用于对三个域数据进行处理。因空域数据模型与慢时间域类似，本发明以快时间和慢时间域为例进行介绍。假设一个相参处理间隔中，距离单元数为 L ，脉冲数为 K ，接收信号可以表示为矩阵 $\mathbf{Y} \in \mathbb{C}^{L \times K}$ 。忽略距离多普勒走动影响，其元素可以表示为：

$$y_{l,k} = \sum_{p=0}^{P-1} \alpha_p \text{rect} \left(\frac{lT_s - 2r_p/c}{T_{\text{pul}}} \right) \exp(j\pi\mu(lT_s - 2r_p/c)^2 + j2\pi f_{d,p}kT_I) + n_{l,k}, \quad (1)$$

其中 $y_{l,k}$ 为第 l 个距离单元、第 k 个脉冲回波信号， $0 \leq k \leq K-1$ ， $0 \leq l \leq L-1$ 。 P 为目标数， T_s 为采样时间间隔， α_p 为第 p 个目标幅度， r_p 为目标距离， T_{pul} 为脉冲持续时间， T_I 为脉冲间隔， μ 为调频斜率， c 为光速。 $f_{d,p} = 2v_p/\lambda$ 为多普勒频移， v_p 为目标速度， λ 为载波波长。 $n_{l,k}$ 为加性高斯白噪声。 j 表示虚数， rect 表示矩形函数。

在快时间域进行脉冲压缩、慢时间进行相参积累，可获得距离多普勒谱。然后，基于距离多普勒谱，采用常规自适应恒虚警检测方法，进行目标预检测，获得感兴趣点迹，所在距离单元和多普勒单元对应的距离和多普勒频率分别用 $\mathbf{r}_\zeta$ 和 $\mathbf{f}_\zeta$ 表示。

步骤 2) 对预检测得到的点迹距离和多普勒参数进行估计，得到估计值 $\hat{\mathbf{r}}_q$ 和 $\hat{\mathbf{f}}_q$ ；

假设预检测点迹数目为 I ，根据 I 个点迹所在距离单元和频率单元，可分别计算出对应的距离 $\mathbf{r}_\zeta$ 和多普勒频率 $\mathbf{f}_\zeta$ 。

因为预检测点迹包含了接收信号的主要成分，基于 I 、 $\mathbf{r}_\zeta$ 和 $\mathbf{f}_\zeta$ ，接收信号可近似表示

为:

$$\mathbf{y} \approx \mathbf{A}_\zeta \boldsymbol{\beta} + \mathbf{n}, \quad (2)$$

其中, $\mathbf{y}$ 表示一个相参处理间隔的接收信号, 由 $\mathbf{Y}$ 按列排列成一个向量得到, $\boldsymbol{\beta}$ 为降维目标向量, 其第 i 元素 β_i 表示第 i 个点迹的真实复幅度, 如果第 i 个点迹为虚警, 则 $\beta_i = 0$ 。 $\mathbf{n}$ 为加性高斯白噪声向量。 $\mathbf{A}_\zeta \in \mathbb{C}^{LK \times I}$ 为近似的降维观测矩阵, 其第 i 列为:

$$\mathbf{a}_{\zeta,i} = \mathbf{s}_d(f_{\zeta,i}) \otimes \mathbf{s}_t(r_{\zeta,i}), \quad (3)$$

符号 $\otimes$ 表示 Kronecker 积, $\mathbf{s}_d(f_{\zeta,i})$ 表示多普勒频率为 $f_{\zeta,i}$ 的点迹所对应的多普勒域导向矢量, $\mathbf{s}_t(r_{\zeta,i})$ 表示距离为 $r_{\zeta,i}$ 的点迹所对应的快时间域导向矢量。 $\mathbf{s}_d(f_{\zeta,i})$ 和 $\mathbf{s}_t(r_{\zeta,i})$ 分别为:

$$\mathbf{s}_d(f_{\zeta,i}) = [1, \dots, \exp(j2\pi f_{\zeta,i} k T_I), \dots, \exp(j2\pi f_{\zeta,i} (K-1) T_I)]^T, \quad (4)$$

$$\mathbf{s}_t(r_{\zeta,i}) = [q_i(0), \dots, q_i(l), \dots, q_i(L-1)]^T \quad (5)$$

上标 T 表示转置。

其中,

$$q_i(l) = \text{rect}\left(\frac{lT_s - 2r_{\zeta,i}/c}{T_{\text{pul}}}\right) \exp(j\pi\mu(lT_s - 2r_{\zeta,i}/c)^2). \quad (6)$$

通常, $\boldsymbol{\beta}$ 仍然是稀疏的, 可基于稀疏恢复对 $\boldsymbol{\beta}$ 进行重构, 假设重构结果用 $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ 表示, 那么, 基于 $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ 即可实现目标检测。然而, 实际应用中点迹并不位于整数单元, 即 $\mathbf{r}_\zeta$ 和 $\mathbf{f}_\zeta$ 与点迹真实值存在偏差, 直接基于式(2)进行重构面临离网格问题。对此, 本发明首先基于 $\mathbf{r}_\zeta$ 和 $\mathbf{f}_\zeta$, 对点迹真实的参数 $\mathbf{r}_\varrho$ 和 $\mathbf{f}_\varrho$ 进行估计, 然后再进行目标重构和检测。

假设预检测点迹所对应的真实观测矩阵为 $\mathbf{A}_\varrho$, 忽略预检测时漏检目标的影响, 接收信号可以表示为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}_\varrho(\boldsymbol{\theta}_\varrho) \boldsymbol{\beta} + \mathbf{n}. \quad (7)$$

其中, $\boldsymbol{\theta}_\varrho = [\mathbf{r}_\varrho; \mathbf{f}_\varrho]$, 符号 $;$ 表示连接两个向量, 形成一个向量。 $\mathbf{A}_\varrho$ 的第 i 列为 $\mathbf{a}_{\varrho,i} = \mathbf{s}_d(f_{\varrho,i}) \otimes \mathbf{s}_t(r_{\varrho,i})$ 。 $\mathbf{A}_\varrho$ 是未知的, 但显然 $\mathbf{A}_\varrho$ 与 $\mathbf{A}_\zeta$ 很接近, 即真实目标参数与预检测点迹所在整数单元对应的参数相差不大。令 $\boldsymbol{\theta}_\zeta = [\mathbf{r}_\zeta; \mathbf{f}_\zeta]$, $\mathbf{r}_\zeta$ 、 $\mathbf{f}_\zeta$ 是已知的。既然 $\mathbf{A}_\varrho$ 与 $\mathbf{A}_\zeta$ 很接近, 那么 $\boldsymbol{\theta}_\varrho$ 和 $\boldsymbol{\theta}_\zeta$ 也很接近, 即 $\|\boldsymbol{\theta}_\varrho - \boldsymbol{\theta}_\zeta\|_2^2$ 很小。因此, 本发明中考虑基于 $\boldsymbol{\theta}_\zeta$ 估计 $\boldsymbol{\theta}_\varrho$, 进一步可得到观测矩阵 $\mathbf{A}_\varrho$ 。具体过程如下:

基于最大似然准则， θ_ρ 和 β 的估计分别为：

$$\{\hat{\theta}_\rho, \hat{\beta}\} = \arg \min_{\theta, \beta} \|\mathbf{y} - \mathbf{A}(\theta)\beta\|_2^2, \quad (8)$$

其中， $\theta = [\mathbf{r}; \mathbf{f}]$ ， $\mathbf{r}$ 和 $\mathbf{f}$ 分别表示距离和多普勒频率；最小化式(8)目标函数，可得：

$$\hat{\beta} = (\mathbf{A}(\theta)^H \mathbf{A}(\theta))^{-1} \mathbf{A}(\theta)^H \mathbf{y} \quad (9)$$

则，式(8)中的目标函数可进一步表示为：

$$g(\theta) = \|\mathbf{y} - \mathbf{A}(\theta)(\mathbf{A}(\theta)^H \mathbf{A}(\theta))^{-1} \mathbf{A}(\theta)^H \mathbf{y}\|_2^2, \quad (10)$$

显然，当 $\theta = \theta_\rho$ 时，式(10)可取得最小值。对 $g(\theta)$ 的一阶导数在 θ_ρ 处进行一阶泰勒近似可得：

$$\nabla_{\theta} g(\theta) \approx \nabla_{\theta} g(\theta_\rho) + \nabla_{\theta}^2 g(\theta_\rho)(\theta - \theta_\rho), \quad (11)$$

显然， $\nabla_{\theta} g(\theta_\rho) = \mathbf{0}$ ，那么，

$$\theta_\rho \approx \theta - (\nabla_{\theta}^2 g(\theta_\rho))^{-1} (\nabla_{\theta} g(\theta)). \quad (12)$$

因为， θ_ρ 和 θ_ς 也很接近，用 θ_ς 替代 θ ，并将 Hessian 矩阵 $(\nabla_{\theta}^2 g(\theta_\rho))$ 中的 θ_ρ 用 θ_ς 代替，可得 θ_ρ 的估计为：

$$\hat{\theta}_\rho \approx \theta_\varsigma - (\nabla_{\theta}^2 g(\theta_\varsigma))^{-1} (\nabla_{\theta} g(\theta_\varsigma)). \quad (13)$$

式(13)中需要求 $g(\theta)$ 的一阶导数向量和二阶导数矩阵，计算非常复杂，下面进一步给出一种简化求解方法。

由(7)可得：

$$\mathbf{W}_i \mathbf{y} = \mathbf{W}_i \mathbf{A}_\rho(\theta_\rho) \beta + \mathbf{W}_i \mathbf{n} \quad (14)$$

其中， $\mathbf{W}_i = \text{diag}(\mathbf{w}_i) = \text{diag}(\mathbf{w}_d \otimes \mathbf{w}_{\ell,i})$ ， $\mathbf{w}_d$ 表示慢时间域的归一化窗函数， $\mathbf{w}_{\ell,i}$ 表示第 i 个点迹的快时间域归一化窗函数， $\mathbf{w}_{\ell,i} = [q_{w,0}, \dots, q_{w,l}, \dots, q_{w,L-1}]^T$ ，且

$$q_{w,l} = \text{rect}\left(\frac{lT_s - 2r_{\varsigma,i}/c}{T_{\text{pul}}}\right) w_c(lT_s - 2r_{\varsigma,i}/c). \quad (15)$$

$w_c(t)$ 为该窗函数在时间 T_{pul} 内的连续形式。归一化的情况下，显然有，

$\|\mathbf{w}_i\|_2^2 = \|\mathbf{W}_i\|_F = 1$ ，下标 F 表示矩阵的 Frobenius 范数。那么，基于最小二乘准则， θ_ρ

和 β 的估计分别为:

$$\{\hat{\theta}_\rho, \hat{\beta}\} = \arg \min_{\theta, \beta} \|\mathbf{W}_i \mathbf{y} - \mathbf{W}_i \mathbf{A}(\theta) \beta\|_2^2. \quad (16)$$

实际上, 式(14)是在快时间和慢时间域对数据进行加权, 通过加权可以实现第 i 个点迹与回波中的其它点迹解耦合, 即第 i 个点迹与其它点迹近似不存在相互影响。那么, $g(\theta)$ 可进一步近似表示为:

$$g(\theta) = \|\mathbf{W}_i \mathbf{y} - \beta_i \mathbf{W}_i \mathbf{a}_i(\eta_i)\|_2^2 + \|\mathbf{W}_i \mathbf{y} - \mathbf{W}_i \mathbf{A}_{\setminus i}(\theta) \beta_{\setminus i}\|_2^2 - (\mathbf{W}_i \mathbf{y})^H \mathbf{W}_i \mathbf{y} \quad (17)$$

其中, $\eta_i = [r_i, f_i]^T$, r_i 、 f_i 分别表示第 i 个点迹的距离和多普勒频率, $\mathbf{a}_i$ 表示第 i 个点迹的导向矢量, 通过公式(3)计算, $\mathbf{A}_{\setminus i}$ 表示去掉矩阵 $\mathbf{A}$ 的第 i 列, $\beta_{\setminus i}$ 表示去掉向量 β 的第 i 个元素。那么, 最小化 $g(\theta)$ 必须使得 $u_i(\eta_i) = \|\mathbf{W}_i \mathbf{y} - \beta_i \mathbf{W}_i \mathbf{a}_i(\eta_i)\|_2^2$ 最小。通过最小化 $u_i(\eta_i)$ 可以获得第 i 点迹所对应真实参数 $\eta_{\rho, i} = [r_{\rho, i}, f_{\rho, i}]^T$ 的估计值 $\hat{\eta}_{\rho, i} = [\hat{r}_{\rho, i}, \hat{f}_{\rho, i}]^T$ 。

最小化 $u_i(\eta_i)$ 可得 β_i 的估计为:

$$\hat{\beta}_i = \mathbf{a}_i^H(\eta_i) \mathbf{W}_i^2 \mathbf{y}. \quad (18)$$

将式(18)带入 $u_i(\eta_i)$, 那么, 最小化 $u_i(\eta_i)$ 等价于最小化下式:

$$z_i(\eta_i) = (\mathbf{a}_i^H(\eta_i) \mathbf{W}_i^2 \mathbf{y})(\mathbf{y}^H \mathbf{W}_i^2 \mathbf{a}_i(\eta_i)). \quad (19)$$

参考式(13), $\eta_{\rho, i}$ 的估计为:

$$\begin{pmatrix} \hat{r}_{\rho, i} \\ \hat{f}_{\rho, i} \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} r_{\varsigma, i} \\ f_{\varsigma, i} \end{pmatrix} - \left(\begin{pmatrix} \frac{\partial^2 z_i}{\partial r_i^2} & 0 \\ 0 & \frac{\partial^2 z_i}{\partial f_i^2} \end{pmatrix} \right)_{(\eta_i = \eta_{\varsigma, i})}^{-1} \begin{pmatrix} \frac{\partial z_i}{\partial r_i} \\ \frac{\partial z_i}{\partial f_i} \end{pmatrix}_{(\eta_i = \eta_{\varsigma, i})}, \quad (20)$$

其中, $\eta_{\varsigma, i} = [r_{\varsigma, i}, f_{\varsigma, i}]^T$ 。为了获得更高的估计精度, 可以采用如下迭代更新估计值:

$$\hat{\eta}_{\rho, i}^t = \hat{\eta}_{\rho, i}^{t-1} - (\nabla_{\eta}^2 z_i(\hat{\eta}_{\rho, i}^{t-1}))^{-1} \nabla_{\eta} z_i(\hat{\eta}_{\rho, i}^{t-1}), \quad (21)$$

其中, $\hat{\eta}_{\rho, i}^0 = \eta_{\varsigma, i}$, t 为迭代次数, 通常 $t=2$ 即可满足实际需求。分别对每一个点迹进行参数估计, 即可获得 $\hat{\theta}_\rho$ 。

步骤3) 基于估计值 $\hat{\mathbf{r}}_\rho$ 和 $\hat{\mathbf{f}}_\rho$ 建立接收信号的降维观测模型;

基于 $\hat{\theta}_\rho$ (即 $\hat{\mathbf{r}}_\rho$ 和 $\hat{\mathbf{f}}_\rho$) 可得到 $\hat{\mathbf{A}}_\rho$, 基于估计得到的 $\hat{\mathbf{A}}_\rho$, 接收信号可进一步表示为:

$$\mathbf{y} \approx \hat{\mathbf{A}}_g \boldsymbol{\beta} + \mathbf{n}. \quad (22)$$

通常, 预检测点迹数目 I 远小于距离多普勒谱所对应的单元数, 因此, 式 (22) 可大幅降低待重构向量的维度, 式(22)即为本发明的降维观测模型。

步骤 4) 基于降维观测模型和稀疏恢复算法, 对目标向量进行重构;

稀疏重构方法可选择广义消息传递方法 (Generalized Approximate Message Passing, GAMP)、稀疏贝叶斯学习方法等, 本发明基于 GAMP 算法和式(22)重构 $\boldsymbol{\beta}$ 。此处, 假设 $\boldsymbol{\beta}$ 服从独立同分布的伯努利-高斯分布, 其边缘概率密度函数为:

$$p(\beta_i) = (1 - \rho)\delta(\beta_i) + \rho\mathcal{CN}(\beta_i; \kappa, \tau^q) \quad (23)$$

其中, δ 为狄拉克函数, ρ 为稀疏度, κ 和 τ^q 分别表示高斯分量的均值和方差。 ρ 、 κ 和 τ^q 均是未知的, 可以通过 EM (Expectation-Maximum) 算法迭代学习得到。

实际上, GAMP 算法既可以输出稀疏结果 $\hat{\boldsymbol{\beta}}$, 也可以得到“含噪”重构结果 $\tilde{\boldsymbol{\beta}}$ 。可以证明, $\tilde{\boldsymbol{\beta}}$ 中噪声的模值近似服从高斯分布, 仿真验证结果如图 3 所示。

步骤 5) 基于重构结果, 设计广义最大似然比检测器, 进行目标检测, 输出检测结果和参数。

本发明基于 $\tilde{\boldsymbol{\beta}}$ 进行目标检测。对于第 i 个点迹, 判断其是否是目标, 可以归结为如下假设检验问题:

$$\begin{aligned} H_0: & \quad \mathbf{y} = \mathbf{A}_{g,\setminus i} \boldsymbol{\beta}_{\setminus i} + \mathbf{n} \\ H_1: & \quad \mathbf{y} = \beta_i \mathbf{a}_{g,i} + \mathbf{A}_{g,\setminus i} \boldsymbol{\beta}_{\setminus i} + \mathbf{n}. \end{aligned} \quad (24)$$

H_0 和 H_1 是假设检验问题中的两个假设。 H_0 表示第 i 个点迹不是目标, H_1 表示是目标。 $\mathbf{a}_{g,i}$ 是第 i 个点迹真实的导向矢量, 同样由公式(3)计算, 距离和多普勒参数用真实值。

基于广义似然比准则, 经推导和近似, 对于第 i 个点迹, 检测方法为:

$$|\tilde{\beta}_i| \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} \gamma \tilde{\sigma}, \quad (25)$$

其中, $\tilde{\sigma}$ 为 $\tilde{\boldsymbol{\beta}}$ 中噪声模值的方差, γ 是检测阈值, 因为噪声的模值近似服从高斯分布, 则式(25)是恒虚警检测器。

上面描述了本发明所提的基于检测前估计的雷达目标检测方法的实施步骤, 为了验证该方法的有效性, 下面通过仿真和实测试验进行说明。下文中本发明的方法简称为 EBD (Estimate-before-detection)。图 2 给出了本发明检测前的参数估计性能。仿真参数如表 1 所示, 接收数据中加入 4 个目标, 考虑三种情况: 情况 1: 目标位于整数多普

勒单元,距离单元分别为 100,100.2,140.3 和 191.5(小数部分表示偏离整数单元的大小);情况 2: 目标位于整数距离单元, 频率单元分别为 10, 15.2, 31.3 和 42.5; 情况 3: 目标的多普勒和距离均偏离整数单元, 分别为(15.2,105.3), (31.2,,140.4), (42.3,191.1)和(53.5,270.5); 三种情况下目标参数估计精度均用均方误差 (MSE) 衡量, 结果如图 2 所示。结果表明, 本发明检测前参数估计方法可以有效估计出目标的距离和多普勒。

表 1 雷达仿真参数

序号	参数	取值
1	脉冲间隔	0.2ms
2	脉冲宽度	25 μ s
3	带宽	4MHz
4	采样率	5MHz
5	脉冲数	5
6	线性处理 FFT 点数	64
7	线性处理时域窗函数	汉明
8	线性处理频域窗函数	切比雪夫, -45dB

图 3 给出了 GAMP 重构结果 $\tilde{\beta}$ 中噪声模值的统计特性, 仿真中仍然采用表 1 所示参数。考虑 2 种情况: 情况 1: 接收信号中不包含目标; 情况 2: 接收信号中加入 10 个目标, SNR 均为 0dB。统计噪声特性时, 去除真实目标样本, 即仅统计噪声样本。图 3(a)和(b)分别给出了两种情况下噪声样本的 QQplot 曲线, 并与标准高斯分布进行比较。图 3(c)统计了两种情况下噪声样本的相关系数。结果表明, 稀疏重构输出噪声的模值服从独立高斯分布。

图 4 的仿真实验对比了本发明所提的 EBD 与另外 3 种检测器的性能, 包括传统检测方法 (TSPM, 加窗)、理想匹配滤波 (IMF, 不加窗)、直接基于式 (2) 直接进行稀疏重构和检测的方法 (OGSR)。仿真中, 仍然采用表 1 所示参数, 每次仿真加入 10 个目标, 目标距离和多普勒随机产生, 仿真结果如图 4 所示。仿真结果表明, EBD 均有恒虚警检测能力, 在虚警率为 10^{-5} 条件下, 与常规检测 (TSPM) 相比, 检测性能增益约为 1.9dB。

图 5 和图 6 基于实测数据对本发明方法进行了验证。所采用数据对应的雷达参数如下: 带宽 8MHz, 采样率 10MHz, 脉冲宽度 12 微秒, 单帧脉冲数 128 个, FFT 点数 128,

重复频率 12.5KHz。试验中，采用两架大疆精灵 3 无人机作为合作目标，选择其中 1 帧进行分析，距离多普勒谱如图 5(a)所示。当前帧波束指向空域无其它目标。由于两架无人机 SNR 较高，分别为 26.3dB 和 21.3dB，为了验证提出算法的性能，在原始回波数据中加入噪声，在不同的噪声功率增加量情况下，基于蒙特卡洛仿真进行目标检测性能验证。例如，在原始信号中，噪声功率增加 6dB 后，采用常规处理的距离多普勒谱如图 5(b)所示。

EBD 与 TSPM 性能对比如图 6 所示，图中横坐标表示噪声增加量，用 $\Delta\sigma_n^2$ 表示。从结果可以看出，EBD 比 TSPM 具有更强的抗噪能力，即具有更好的目标检测性能。对于两个合作目标，在虚警率为 10^{-5} 条件下，EBD 分别具有 2.2dB 和 1.5dB 的性能增益。

权 利 要 求 书

1、一种基于检测前估计的雷达目标检测方法，其特征在于，包括以下步骤：

1) 对接收的基带数据，进行脉冲压缩和相参积累，得到距离多普勒谱，基于距离多普勒谱进行预检测，获得感兴趣点迹，所在距离单元和多普勒单元对应的距离和多普勒频率分别用 $\mathbf{r}_\zeta$ 和 $\mathbf{f}_\zeta$ 表示；

2) 对预检测得到的点迹距离和多普勒频率进行估计，得到估计值 $\hat{\mathbf{r}}_\zeta$ 和 $\hat{\mathbf{f}}_\zeta$ ；

3) 基于 $\hat{\mathbf{r}}_\zeta$ 和 $\hat{\mathbf{f}}_\zeta$ 建立接收信号的降维观测模型；

4) 基于稀疏恢复算法对降维观测模型中的目标向量进行重构；

5) 基于重构结果，利用广义最大似然比检测器进行目标检测，输出目标检测结果和参数。

2、根据权利要求1所述的基于检测前估计的雷达目标检测方法，其特征在于，所述步骤2)包括：

分别用 $\mathbf{r}_\zeta$ 和 $\mathbf{f}_\zeta$ 表示距离和多普勒频率的真实值，令 $\boldsymbol{\theta}_\zeta = [\mathbf{r}_\zeta; \mathbf{f}_\zeta]$ ， $\boldsymbol{\theta}_\zeta = [\mathbf{r}_\zeta; \mathbf{f}_\zeta]$ ，括号中的符号;表示连接两个向量，接收信号表示为：

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}_\zeta(\boldsymbol{\theta}_\zeta)\boldsymbol{\beta} + \mathbf{n}. \quad (7)$$

式(7)中 $\mathbf{y}$ 表示一个相参处理间隔的接收信号， $\boldsymbol{\beta}$ 为降维目标向量，其第 i 元素 β_i 表示第 i 个点迹的真实复幅度， $\mathbf{A}_\zeta$ 为观测矩阵， $\mathbf{n}$ 为加性高斯白噪声向量；

基于最大似然准则， $\boldsymbol{\theta}_\zeta$ 和 $\boldsymbol{\beta}$ 的估计分别为：

$$\{\hat{\boldsymbol{\theta}}_\zeta, \hat{\boldsymbol{\beta}}\} = \arg \min_{\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\beta}} \|\mathbf{y} - \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta})\boldsymbol{\beta}\|_2^2, \quad (8)$$

其中， $\boldsymbol{\theta} = [\mathbf{r}; \mathbf{f}]$ ，最小化式(8)目标函数，得：

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta})^H \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}))^{-1} \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta})^H \mathbf{y} \quad (9)$$

则，式(8)中的目标函数表示为：

$$g(\boldsymbol{\theta}) = \|\mathbf{y} - \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta})(\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta})^H \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}))^{-1} \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta})^H \mathbf{y}\|_2^2, \quad (10)$$

显然，当 $\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\theta}_\zeta$ 时，式(10)取得最小值，对 $g(\boldsymbol{\theta})$ 的一阶导数在 $\boldsymbol{\theta}_\zeta$ 处进行一阶泰勒近似：

$$\nabla_{\boldsymbol{\theta}} g(\boldsymbol{\theta}) \approx \nabla_{\boldsymbol{\theta}} g(\boldsymbol{\theta}_\zeta) + \nabla_{\boldsymbol{\theta}}^2 g(\boldsymbol{\theta}_\zeta)(\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}_\zeta), \quad (11)$$

显然， $\nabla_{\boldsymbol{\theta}} g(\boldsymbol{\theta}_\zeta) = \mathbf{0}$ ，那么有：

$$\boldsymbol{\theta}_\varrho \approx \boldsymbol{\theta} - (\nabla_{\boldsymbol{\theta}}^2 g(\boldsymbol{\theta}_\varrho))^{-1} (\nabla_{\boldsymbol{\theta}} g(\boldsymbol{\theta})). \quad (12)$$

用 $\boldsymbol{\theta}_\varsigma$ 替代 $\boldsymbol{\theta}$ ，则得到 $\boldsymbol{\theta}_\varrho$ 的估计为：

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_\varrho \approx \boldsymbol{\theta}_\varsigma - (\nabla_{\boldsymbol{\theta}}^2 g(\boldsymbol{\theta}_\varsigma))^{-1} (\nabla_{\boldsymbol{\theta}} g(\boldsymbol{\theta}_\varsigma)). \quad (13)$$

求解 $g(\boldsymbol{\theta})$ 的一阶偏导和 Hessian 矩阵，根据 $\boldsymbol{\theta}_\varsigma$ 得到 $\boldsymbol{\theta}_\varrho$ 。

3、根据权利要求 2 所述的基于检测前估计的雷达目标检测方法，其特征在于，所述 $\boldsymbol{\theta}_\varrho$ 的估计采用如下简化方法，包括：

利用窗函数将式（7）表示为：

$$\mathbf{W}_i \mathbf{y} = \mathbf{W}_i \mathbf{A}_\varrho(\boldsymbol{\theta}_\varrho) \boldsymbol{\beta} + \mathbf{W}_i \mathbf{n} \quad (14)$$

其中， $\mathbf{W}_i = \text{diag}(\mathbf{w}_i) = \text{diag}(\mathbf{w}_d \otimes \mathbf{w}_{t,i})$ ， $\mathbf{w}_d$ 表示慢时间域的归一化窗函数， $\mathbf{w}_{t,i}$ 表示第 $i(i = 1, 2, \dots, I)$ 个预检测点迹的快时间域归一化窗函数， I 表示预检测点迹数目；归一化的情况下，显然有 $\|\mathbf{w}_i\|_2^2 = \|\mathbf{W}_i\|_F = 1$ ，那么，基于最小二乘准则， $\boldsymbol{\theta}_\varrho$ 和 $\boldsymbol{\beta}$ 的估计分别为：

$$\{\hat{\boldsymbol{\theta}}_\varrho, \hat{\boldsymbol{\beta}}\} = \arg \min_{\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\beta}} \|\mathbf{W}_i \mathbf{y} - \mathbf{W}_i \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}) \boldsymbol{\beta}\|_2^2. \quad (16)$$

$g(\boldsymbol{\theta})$ 进一步表示为：

$$g(\boldsymbol{\theta}) = \|\mathbf{W}_i \mathbf{y} - \beta_i \mathbf{W}_i \mathbf{a}_i(\boldsymbol{\eta}_i)\|_2^2 + \|\mathbf{W}_i \mathbf{y} - \mathbf{W}_i \mathbf{A}_{\setminus i}(\boldsymbol{\theta}) \boldsymbol{\beta}_{\setminus i}\|_2^2 - (\mathbf{W}_i \mathbf{y})^H \mathbf{W}_i \mathbf{y} \quad (17)$$

其中， $\boldsymbol{\eta}_i = [r_i, f_i]^T$ ， r_i 、 f_i 分别表示第 i 个点迹的距离和多普勒频率， $\mathbf{a}_i$ 表示第 i 个点迹的导向矢量， $\mathbf{A}_{\setminus i}$ 表示去掉矩阵 $\mathbf{A}$ 的第 i 列， $\boldsymbol{\beta}_{\setminus i}$ 表示去掉向量 $\boldsymbol{\beta}$ 的第 i 个元素，那么，最小化 $g(\boldsymbol{\theta})$ 必须使得 $u_i(\boldsymbol{\eta}_i) = \|\mathbf{W}_i \mathbf{y} - \beta_i \mathbf{W}_i \mathbf{a}_i(\boldsymbol{\eta}_i)\|_2^2$ 最小，通过最小化 $u_i(\boldsymbol{\eta}_i)$ 即能够获得第 i 个点迹所对应真实参数 $\boldsymbol{\eta}_{\varrho,i} = [r_{\varrho,i}, f_{\varrho,i}]^T$ 的估计值 $\hat{\boldsymbol{\eta}}_{\varrho,i} = [\hat{r}_{\varrho,i}, \hat{f}_{\varrho,i}]^T$ ；

最小化 $u_i(\boldsymbol{\eta}_i)$ ，得到 β_i 的估计为：

$$\hat{\beta}_i = \mathbf{a}_i^H(\boldsymbol{\eta}_i) \mathbf{W}_i^2 \mathbf{y}. \quad (18)$$

将式(18)带入 $u_i(\boldsymbol{\eta}_i)$ ，那么，最小化 $u_i(\boldsymbol{\eta}_i)$ 等价于最小化下式：

$$z_i(\boldsymbol{\eta}_i) = (\mathbf{a}_i^H(\boldsymbol{\eta}_i) \mathbf{W}_i^2 \mathbf{y})(\mathbf{y}^H \mathbf{W}_i^2 \mathbf{a}_i(\boldsymbol{\eta}_i)). \quad (19)$$

参考式(13), $\eta_{\varrho,i}$ 的估计为:

$$\begin{pmatrix} \hat{r}_{\varrho,i} \\ \hat{f}_{\varrho,i} \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} r_{\varsigma,i} \\ f_{\varsigma,i} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 z_i}{\partial r_i^2} & 0 \\ 0 & \frac{\partial^2 z_i}{\partial f_i^2} \end{pmatrix}_{(\eta_i=\eta_{\varsigma,i})}^{-1} \begin{pmatrix} \frac{\partial z_i}{\partial r_i} \\ \frac{\partial z_i}{\partial f_i} \end{pmatrix}_{(\eta_i=\eta_{\varsigma,i})}, \quad (20)$$

其中, $\eta_{\varsigma,i} = [r_{\varsigma,i}, f_{\varsigma,i}]^T$; 采用如下迭代更新估计值:

$$\hat{\eta}_{\varrho,i}^t = \hat{\eta}_{\varrho,i}^{t-1} - (\nabla_{\eta}^2 z_i(\hat{\eta}_{\varrho,i}^{t-1}))^{-1} \nabla_{\eta} z_i(\hat{\eta}_{\varrho,i}^{t-1}), \quad (21)$$

其中, $\hat{\eta}_{\varrho,i}^0 = \eta_{\varsigma,i}$, t 为迭代次数。

4、根据权利要求2所述的基于检测前估计的雷达目标检测方法, 其特征在于, 所述步骤3) 包括:

基于点迹距离和多普勒频率的估计值 $\hat{\theta}_{\varrho}$ 得到 $\hat{\mathbf{A}}_{\varrho}$;

基于估计得到的 $\hat{\mathbf{A}}_{\varrho}$, 将接收信号表示为: $\mathbf{y} \approx \hat{\mathbf{A}}_{\varrho} \boldsymbol{\beta} + \mathbf{n}$, 即为降维观测模型。

5、根据权利要求2所述的基于检测前估计的雷达目标检测方法, 其特征在于, 所述步骤5) 中广义最大似然比检测器形式为:

$$|\tilde{\beta}_i| \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} \gamma \tilde{\sigma},$$

其中 γ 是检测阈值, $\tilde{\sigma}$ 为 $\tilde{\boldsymbol{\beta}}$ 中噪声模值的方差, H_0 和 H_1 所表示的假设检验为:

$$\begin{aligned} H_0: \quad & \mathbf{y} = \mathbf{A}_{\varrho, \setminus i} \boldsymbol{\beta}_{\setminus i} + \mathbf{n} \\ H_1: \quad & \mathbf{y} = \beta_i \mathbf{a}_{\varrho,i} + \mathbf{A}_{\varrho, \setminus i} \boldsymbol{\beta}_{\setminus i} + \mathbf{n}. \end{aligned}$$

H_0 表示第 i 个点迹不是目标, H_1 表示是目标, $\mathbf{A}_{\varrho, \setminus i}$ 表示去掉矩阵 $\mathbf{A}_{\varrho}$ 的第 i 列, $\boldsymbol{\beta}_{\setminus i}$ 表示去掉向量 $\boldsymbol{\beta}$ 的第 i 个元素, $\mathbf{a}_{\varrho,i}$ 是第 i 个点迹真实的导向矢量。

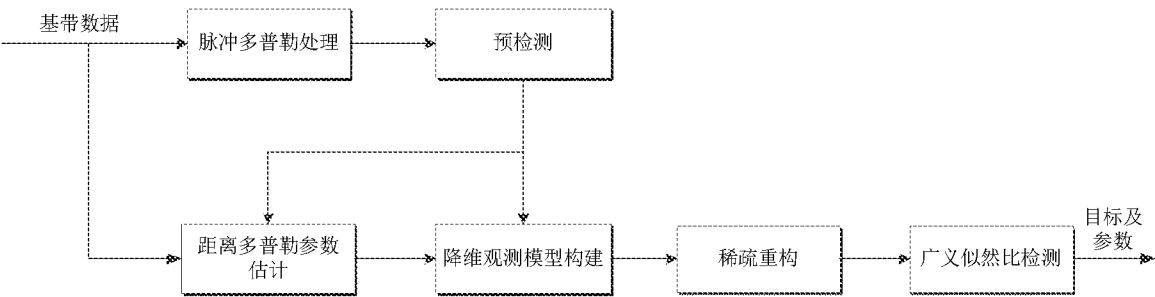


图 1

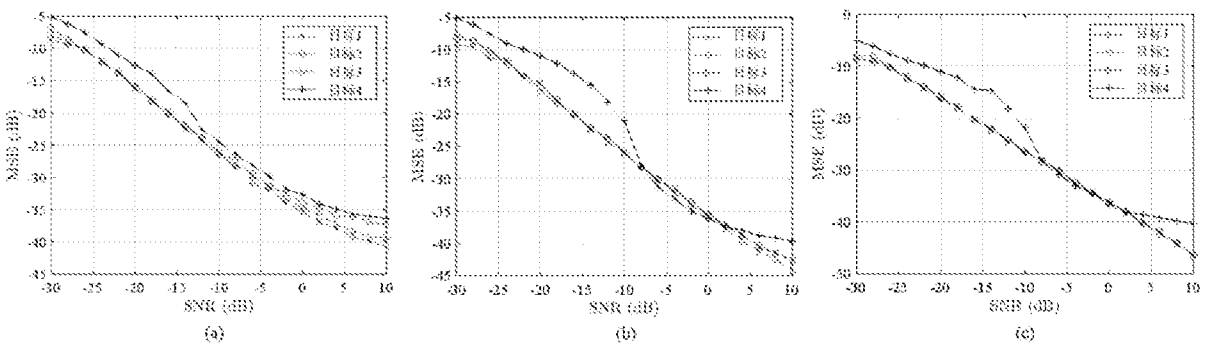


图 2

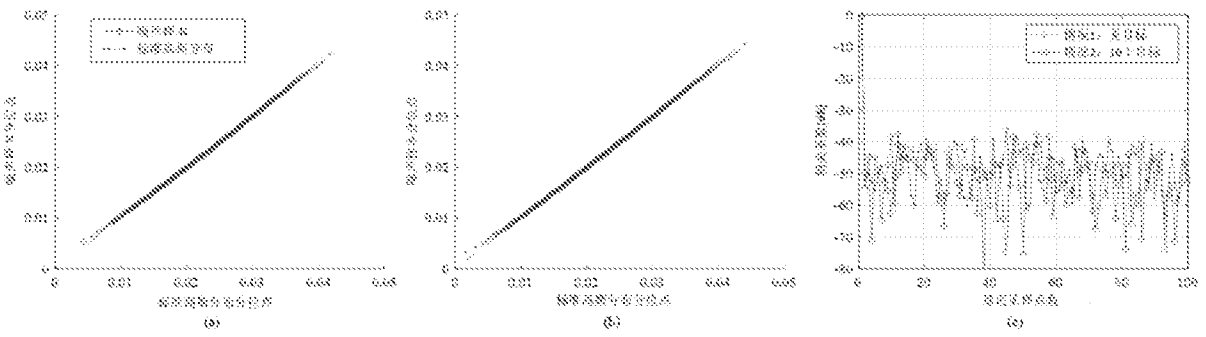


图 3

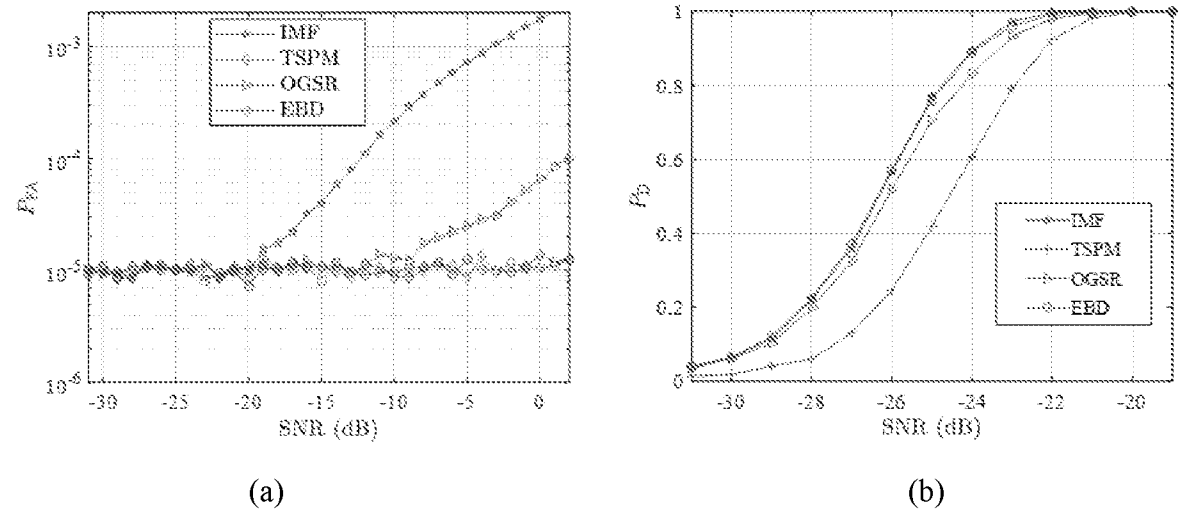


图 4

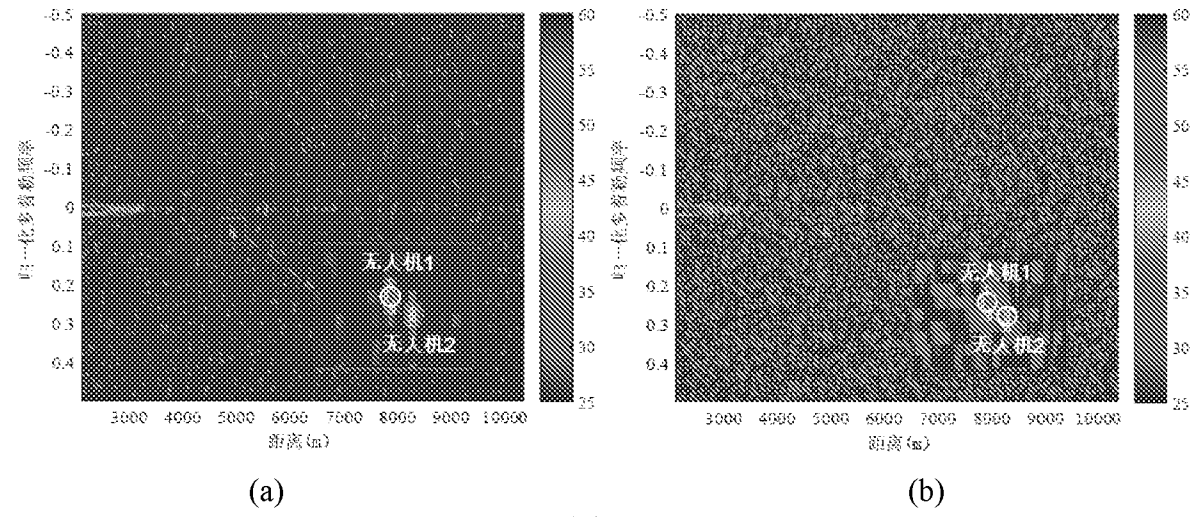


图 5

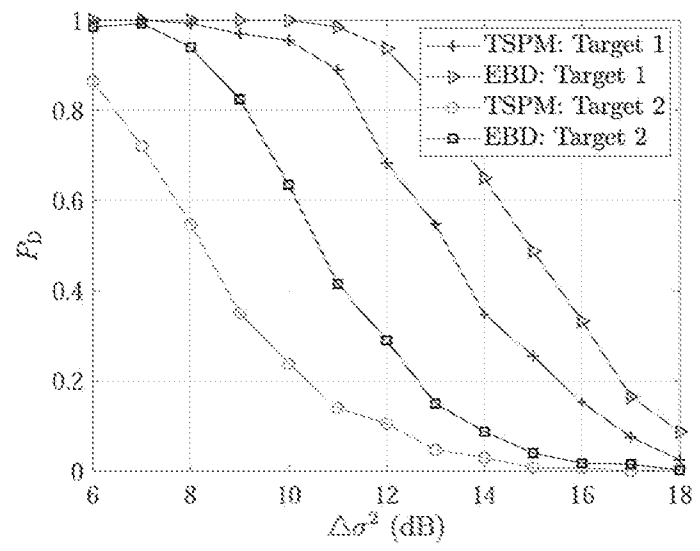


图 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2021/104677

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 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) WPI, EPODOC, CNPAT, CNKI: 雷达, 目标, 多普勒, 点迹, 降维, 虚警, 先验, 重构, 似然比, 最大, 相参, 积累; radar, target, doppler, trace, stap, refactor, reduction, false, alarm, maximum, likelihood, ratio																				
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT <table border="1"> <thead> <tr> <th>Category*</th> <th>Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages</th> <th>Relevant to claim No.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X</td> <td>尤君 (YOU, Jun). "基于多调频广播信号的外辐射源雷达关键技术研 (Key Techniques of Multi-FM-Broadcasting-Based Passive Radar)" 《中国优秀博硕士学位论文全文数据库(博士) 信息科技辑》 (Chinese Selected Doctoral Dissertations and Master's Theses Full-Text Databases (Doctoral), Information Science and Technology), No. 7, 15 July 2018 (2018-07-15), ISSN: 1674-022X, Full text, pages 5, 11, 24, 43, 86</td> <td>1-5</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 103969629 A (HOHAI UNIVERSITY) 06 August 2014 (2014-08-06) entire document</td> <td>1-5</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 102279387 A (XIDIAN UNIVERSITY) 14 December 2011 (2011-12-14) entire document</td> <td>1-5</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 104914421 A (CIVIL AVIATION UNIVERSITY OF CHINA) 16 September 2015 (2015-09-16) entire document</td> <td>1-5</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 106324596 A (SHENZHEN UNIVERSITY) 11 January 2017 (2017-01-11) entire document</td> <td>1-5</td> </tr> </tbody> </table>			Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.	X	尤君 (YOU, Jun). "基于多调频广播信号的外辐射源雷达关键技术研 (Key Techniques of Multi-FM-Broadcasting-Based Passive Radar)" 《中国优秀博硕士学位论文全文数据库(博士) 信息科技辑》 (Chinese Selected Doctoral Dissertations and Master's Theses Full-Text Databases (Doctoral), Information Science and Technology), No. 7, 15 July 2018 (2018-07-15), ISSN: 1674-022X, Full text, pages 5, 11, 24, 43, 86	1-5	A	CN 103969629 A (HOHAI UNIVERSITY) 06 August 2014 (2014-08-06) entire document	1-5	A	CN 102279387 A (XIDIAN UNIVERSITY) 14 December 2011 (2011-12-14) entire document	1-5	A	CN 104914421 A (CIVIL AVIATION UNIVERSITY OF CHINA) 16 September 2015 (2015-09-16) entire document	1-5	A	CN 106324596 A (SHENZHEN UNIVERSITY) 11 January 2017 (2017-01-11) entire document	1-5
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.																		
X	尤君 (YOU, Jun). "基于多调频广播信号的外辐射源雷达关键技术研 (Key Techniques of Multi-FM-Broadcasting-Based Passive Radar)" 《中国优秀博硕士学位论文全文数据库(博士) 信息科技辑》 (Chinese Selected Doctoral Dissertations and Master's Theses Full-Text Databases (Doctoral), Information Science and Technology), No. 7, 15 July 2018 (2018-07-15), ISSN: 1674-022X, Full text, pages 5, 11, 24, 43, 86	1-5																		
A	CN 103969629 A (HOHAI UNIVERSITY) 06 August 2014 (2014-08-06) entire document	1-5																		
A	CN 102279387 A (XIDIAN UNIVERSITY) 14 December 2011 (2011-12-14) entire document	1-5																		
A	CN 104914421 A (CIVIL AVIATION UNIVERSITY OF CHINA) 16 September 2015 (2015-09-16) entire document	1-5																		
A	CN 106324596 A (SHENZHEN UNIVERSITY) 11 January 2017 (2017-01-11) entire document	1-5																		
☒ 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 15 September 2021		Date of mailing of the international search report 28 September 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

International application No.

PCT/CN2021/104677

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 10620296 B1 (TOYON RESEARCH CORPORATION) 14 April 2020 (2020-04-14) entire document	1-5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2021/104677

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	103969629	A	06 August 2014	None			
CN	102279387	A	14 December 2011	CN	102279387	B	27 February 2013
CN	104914421	A	16 September 2015	None			
CN	106324596	A	11 January 2017	CN	106324596	B	23 April 2019
US	10620296	B1	14 April 2020	None			

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2021/104677

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 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)) WPI, EPDOC, CNPAT, CNKI: 雷达, 目标, 多普勒, 点迹, 降维, 虚警, 先验, 重构, 似然比, 最大, 相参, 积累; radar, target, doppler, trace, stap, refactor, reduction, false, alarm, maximum, likelihood, ratio		
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
X	尤君. “基于多调频广播信号的外辐射源雷达关键技术研究” 《中国优秀硕士学位论文全文数据库 (博士) 信息科技辑》, 第7期, 2018年 7月 15日 (2018 - 07 - 15), ISSN: 1674-022X, 正文第5, 11, 24, 43, 86页	1-5
A	CN 103969629 A (河海大学) 2014年 8月 6日 (2014 - 08 - 06) 全文	1-5
A	CN 102279387 A (西安电子科技大学) 2011年 12月 14日 (2011 - 12 - 14) 全文	1-5
A	CN 104914421 A (中国民航大学) 2015年 9月 16日 (2015 - 09 - 16) 全文	1-5
A	CN 106324596 A (深圳大学) 2017年 1月 11日 (2017 - 01 - 11) 全文	1-5
A	US 10620296 B1 (TOYON RESEARCH CORPORATION) 2020年 4月 14日 (2020 - 04 - 14) 全文	1-5
☐ 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 9月 15日		国际检索报告邮寄日期 2021年 9月 28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		受权官员 刘玫 电话号码 86- (10) -53962559

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2021/104677

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	103969629	A	2014年 8月 6日	无	
CN	102279387	A	2011年 12月 14日	CN 102279387	B 2013年 2月 27日
CN	104914421	A	2015年 9月 16日	无	
CN	106324596	A	2017年 1月 11日	CN 106324596	B 2019年 4月 23日
US	10620296	B1	2020年 4月 14日	无	