

文章编号: 2095-4980(2023)06-0830-08

基于稀疏度自适应匹配追踪算法的微动杂波抑制

陈 梅, 万显荣*, 占伟杰, 张 勋, 刘玉琪

(武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 目标或目标组成部分的机械振动或旋转产生微多普勒效应, 在目标分类和识别中起着重要作用。然而, 环境中许多物体(例如风力涡轮机、空调等)的微多普勒效应对雷达系统而言就像时变的杂波, 导致雷达探测性能下降。本文针对外辐射源雷达微动杂波影响目标检测的问题, 提出了一种基于稀疏度自适应匹配追踪改进算法(SAMP)的微动杂波抑制方法。考虑到微动杂波的稀疏特性, 将复杂的微动杂波抑制问题转化为稀疏信号表示问题, 分离微动杂波并将其抑制, 便于目标观测。相比于原 SAMP 算法, 改进后的 SAMP 算法能自动调整步长并在残差达到自适应阈值后快速停止迭代。仿真和实测数据验证了所提方法的有效性。

关键词: 外辐射源雷达; 微动杂波抑制; 稀疏度自适应匹配追踪算法

中图分类号: TN958.97

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021061

Micro-Doppler clutter suppression based on sparsity adaptive matching pursuit algorithm

CHEN Mei, WAN Xianrong*, ZHAN Weijie, ZHANG Xun, LIU Yuqi

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan Hubei 430072, China)

Abstract: The mechanical vibration or rotation of the target or its components produces the micro-Doppler effect, which plays an important role in target classification and recognition. However, the micro-Doppler effect of many objects in the environment (such as wind turbines, air conditioners, etc.) is like time-varying clutter to the radar system, leading to false alarms. In this paper, aiming at the problem that micro-Doppler clutter may interfere with passive radar target detection, a micro-Doppler clutter suppression method based on the improved Sparsity of Adaptive Matching Pursuit (SAMP) is proposed. Considering the sparse characteristics of the micro-Doppler clutter, this problem can be transformed into a sparse signal representation problem, and the purpose of suppressing the micro-Doppler clutter is achieved by separating the signal. Compared with the original SAMP algorithm, the improved SAMP algorithm can quickly stop iteration after the residual reaches the adaptive threshold. Simulation and measured data verify the effectiveness of the proposed method.

Keywords: passive radar; micro-Doppler clutter suppression; Sparsity of Adaptive Matching Pursuit

当目标或目标上的任何结构除了其整体平移之外还具有机械振动或旋转时, 可能会在目标回波上引起频率调制, 从而在目标主体回波多普勒频率附近产生边带, 即微多普勒效应^[1-2]。微多普勒效应在目标分类和识别等领域中发挥着重要作用^[3-7], 其中文献[5]利用形态成分分析法分析海上目标的微多普勒特征并抑制海杂波。但是, 环境中许多物体(如风力涡轮机、空调等)产生的微多普勒效应对雷达系统而言如同时变的杂波, 这将导致雷达性能大幅下降。特别地, 由于风力涡轮机的长叶片、大体积, 导致其雷达横截面(Radar-Cross Section, RCS)比典型的空中目标大, 给雷达的目标探测性能带来了一系列影响, 甚至造成受影响区域跟踪能力的丧失。简而言

收稿日期: 2021-02-06; 修回日期: 2021-03-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61931015, 61701350); 国家重点研发资助项目(2016YFB0502403); 博士后创新人才支持计划资助项目(BX201600117); 湖北省技术创新重大专项资助项目(2019AAA061)

*通信作者: 万显荣 email: xrwan@whu.edu.cn

之,环境中无处不在的微动杂波干扰对雷达系统构成了严重威胁,如何找到有效的方法来抑制微动杂波成为雷达信号处理方向的一项重要研究内容^[8-13]。

针对微动杂波抑制问题,文献[9]利用风轮机杂波与目标谱宽在方位向和距离向上的差异实现了风轮机杂波的检测,然而,谱宽的估计性能受制于雷达相干脉冲个数,长时间脉冲积累会导致数据量过大,处理时间长;文献[10]利用风电场的谱宽特征,在现有航管雷达动目标检测前端设置风电场杂波抑制器抑制微动杂波,该方法可适用于多分量复杂信号,但当微动杂波与目标在同一距离元时,目标会被一并剔除;文献[11]利用Hough变换估计旋转叶片多普勒频率并与目标多普勒频率匹配,通过两者的匹配结果检测微动杂波,该方法能正确定位杂波方位且适用性较强,但匹配过程涉及较多判断,当目标与微动杂波频率相近时判断准确度受限。文献[12]则将发射波形的某些参数随机化,设计出可抑制微动杂波和地杂波的滤波器,波形分类方法是一种新颖而有效的方法,但难以应用在外辐射源雷达上^[13]。近年来,压缩感知^[14]常被用作信号获取、表示和处理的方法。其中稀疏重构算法更因其能解决从稀疏的低维信号中获得对高维原始信号的重构问题,而在雷达信号处理中发挥了重要作用。考虑到对微动杂波可采用先重构后抑制的方法,而稀疏度自适应匹配追踪算法(SAMP)作为稀疏重构算法的一种,具有无需预知信号稀疏度的特点,适用于对稀疏度未知的微动杂波抑制^[15]。但该算法中固定的原子更新步长大小与阈值,将导致过估计或重构精确度不足的缺陷^[16-17],即存在估计精确度与效率的矛盾。因此,本文针对外辐射源雷达微动杂波抑制问题,提出了一种基于改进的稀疏度自适应匹配追踪(SAMP)的微动杂波抑制方法,相对于原SAMP算法,改进算法可自动调整步长或停止迭代,在提高计算效率的同时兼顾精确度。

本文首先介绍了外辐射源雷达旋转叶片微动信号模型,接着研究了如何利用改进的稀疏度自适应匹配追踪算法对微动杂波信号进行估计并将其抑制,最后分析微动杂波抑制后的目标信息。仿真和实测证明了本文方法的有效性。

1 微动目标的微多普勒回波信号模型

微动目标旋转现象会对雷达产生微多普勒效应,上文提到,风力涡轮机、空调柜机等旋转叶片的微动效应作为杂波回波时给雷达目标探测造成的影响较大,本文主要讨论微动目标为旋转叶片的微动杂波抑制问题。考虑到外辐射源雷达的收发分置空间结构影响,建立如图1的基于外辐射源雷达的微动杂波旋转叶片模型^[18]。

不失一般性,假设旋转叶片所在旋转平面为 yz 面, y 轴垂直于发射站与接收站所在直线,以风力发电机旋转叶片的中心点为原点 o ,建立空间坐标系 (x,y,z) 。以发射站和接收站所在直线为 X 轴,建立一个以 O 为中心原点的与 (x,y,z) 坐标系平行的空间坐标系 (X,Y,Z) 。发射站与接收站距离为 L ,风力发电机相对发射站和接收站距离为 R_t, R_r ,其中 T, t 与 R, r 分别为2个坐标系中的目标位置和雷达位置,仰角分别为 β_t, β_r ($\cos \beta_t \approx \cos \beta_r = \cos \beta$),方位角分别为 α, γ 。叶片上某一散射点 p 到原点 o 的距离为 l_p ,方位角为 φ_p 。

将叶片看作线模型,外辐射源雷达微动目标叶片回波可表示为:

$$s(t) = L_b \exp \left\{ -j2\lambda (R_r + R_t) \right\} \cdot \sum_{k=1}^N \text{sinc} \{ \phi_k(t) \} \cdot \exp \{ j\phi_k(t) \} \quad (1)$$

其中

$$\phi_k(t) = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{L_b}{2} \cos \beta \cos \left(\frac{\alpha - \gamma}{2} \right) \cos(\varphi_k(t)) \quad (2)$$

$$\varphi_k(t) = 2\pi f_r(t) + \varphi_0 + (k-1)2\pi/N - \frac{\alpha + \gamma}{2} \quad (3)$$

式中: f_r 为叶片转速; L_b 为叶片长度; N 为叶片个数,整数 $k(0 < k \leq N)$ 表示第 k 个叶片; φ_0 为叶片初相; λ 为照射源信号波长。由式(2)得第 k 个叶片引起的瞬时多普勒频移为:

$$f_k(t) = \frac{2\pi f_r L_p}{\lambda} \cos \beta \cos \left(\frac{\alpha - \gamma}{2} \right) \sin(\varphi_k(t)) \quad (4)$$

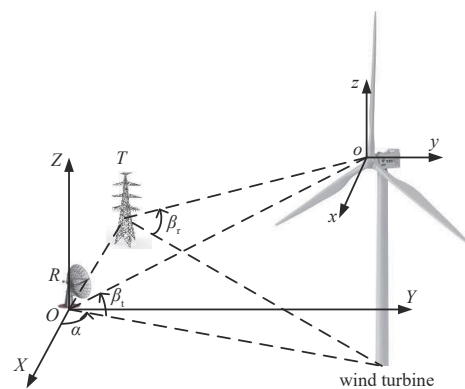


Fig.1 Model of wind turbine for passive radar
图1 外辐射源雷达示意图

由上式可知最大多普勒频偏

$$f_{k, \max} = \frac{2\pi f_r L_p}{\lambda} \cos \beta \cos \left(\frac{\alpha - \gamma}{2} \right) \quad (5)$$

对式(1)作傅里叶变换可得旋转叶片的回波谱, 由文献[19]可知, 调制谱是由一系列谱线间隔为 $\Delta f = (N_f f_r)/2\pi$ 的谱线组成, 且谱线条数 N_f 为

$$N_f = \frac{4\pi}{N} \frac{L_p}{\lambda} \cos(\beta/2) \cos(\delta) \quad (6)$$

由此可得调制信号带宽

$$B = N_f \cdot \Delta f \quad (7)$$

可以看出, 由微动目标叶片旋转引起的微多普勒频移特征与旋转部件参数 (L_p, Ω, φ_n) 密切相关 (L_p, Ω, φ_n 分别为叶片长度、转速、相位角)。

2 基于改进 SAMP 的微动杂波抑制

2.1 微动杂波抑制原理

关于 SAMP 算法的优缺点以及改进思想已在上文简单说明。本文抑制微动杂波具体流程见图 2。首先, 利用微动杂波的稀疏特性, 对距离维数据进行快速傅里叶逆变换 (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT) 得其距离向; 再利用改进的 SAMP 算法估计杂波参数, 进行匹配滤波, 匹配滤波后残差即为包含目标的距离像数据; 最后, 对距离像沿慢时间维做 FFT 即可获得杂波抑制后的距离多普勒谱 (Range Doppler, RD)。

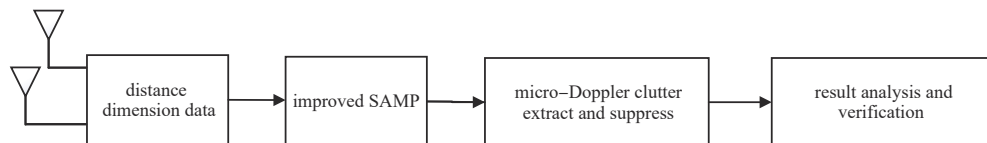


Fig.2 Flow chart of micro-Doppler clutter suppression

图 2 微动杂波抑制流程图

2.2 微动杂波抑制流程

利用改进的 SAMP 算法估计微动目标相关参数并将其抑制的具体算法步骤如下:

步骤 1: 对微动杂波距离维数据进行快速傅里叶逆变换 (IFFT), 得距离维数据

$$s_l(\tau_0) = \sum_{n=0}^M \text{sinc} \left[-\Phi_n(lT_e) \right] \exp[j\Phi_n(lT_e)] \quad (8)$$

$$\Phi_n(lT_e) = -\frac{2\pi}{\lambda} \frac{L_p}{2} \cos \left(\varphi_n + \Omega lT_e \right) \cos \left(\frac{\beta}{2} \right) \cos(\delta) \quad (9)$$

由式(8)、式(9)可知目标函数回波信号可分解为:

$$\mathbf{s} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \mathbf{c}_m \mathbf{g}_m(t; \mathbf{A}) = \mathbf{A}(\Omega_q) \boldsymbol{\theta}(\Omega_q) \quad (10)$$

步骤 2: 参数选择与离散化过程如下, 首先根据微动回波确定待估参数及范围、数量、相应字典矩阵等^[20]。

残差 $\mathbf{r} = \mathbf{s} - \mathbf{A}(\Omega_q) \boldsymbol{\theta}(\Omega_q)$, 其中 $\mathbf{s}$ 为输入信号, $\mathbf{A}$ 为由微动信号相关参数决定的字典矩阵, $\mathbf{g}_m$ 代表第 m 个原子, 字典矩阵 $\mathbf{A} = [\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, \dots, \mathbf{g}_M] \in \mathbb{C}^{N_t \times M}$, M 为原子个数, N_t 为时间 t 离散后的取值个数, $\mathbf{A}$ 为要估计的参量, $\mathbf{C}_m$ 为原子系数, $\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{C}^M$ 为系数矢量, 是稀疏的。可转化最优 l_0 范数问题进行稀疏向量求解。

由式(1)可知微动杂波回波由 (f_r, L_p, φ_n, N) 决定, 结合式(2)、式(3)、式(4)可将时域回波转化为由叶片长度、叶片转速、叶片相位角, 即 (L_p, Ω, φ_n) 表示。由微动杂波的回波特性确定其带估参数范围并取值离散化, $L_p \in (L_{p1}, L_{p2}, \dots, L_{pr})$, $\Omega \in (\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_s)$, $\varphi_n \in (\varphi_{n1}, \varphi_{n2}, \dots, \varphi_{nt})$, 因为旋转部件各叶片转速相同, 假定 $\Omega = \Omega_q$, 待估计的变量数由 3 减为 2。

步骤 3：核心算法流程如下

接下来利用改进的 SAMP 算法进行微动杂波抑制：

输入与初始化：微动杂波的特性由 $(L_p, \Omega_q, \varphi_n)$ 组成的 $M \times N$ 维字典矩阵 $\mathbf{A}$ 确定；观测向量 $\mathbf{s}$ ，即微动回波信号；步长 L ，阈值 T_1, T_2 ，区别于原 SAMP 算法中仅一个固定阈值 T 且迭代步长 S 固定，本文根据需求自定义两个阈值 T_1, T_2 ，作为分别为判断减小步长和停止迭代的残差门限值，其中减小步长阈值 T_1 为 $\|\mathbf{r}_{t, \text{new}}\|_2 \geq \|\mathbf{r}_{t-1}\|_2$ 时的 $\|\mathbf{r}_{t-1}\|_2$ 的值，而停止阈值 T_2 取值依据 $\exp(-(\frac{S/N-c_1}{c_2}))\|\mathbf{s}\|_2$ (其中 c_1, c_2 为常数)，即由输入信号目标信噪比决定，其中 $T_1 > T_2$ 。初始化：残差 $\mathbf{r}_0 = \mathbf{s}$ ，原子集 $\mathbf{A}_0 = \emptyset$ ，索引集 $\mathbf{A}_0 = \emptyset$ ，步长 $L = S (S > 1)$ 。

1) 将 $\mathbf{r}_k$ 与 $\mathbf{A}(\Omega_q)$ 的每个原子作内积，找出内积最大值对应的原子下标，即计算 $\mathbf{u} = \text{abs}[\mathbf{A}_t \mathbf{r}_{t-1}]$ 。

2) 利用 $\mathbf{S} = \mathbf{A}_t \theta_t$ 的最小二乘得出新系数矢量 $\hat{\theta}_t = \arg(\min \|\mathbf{s} - \mathbf{A}_t \theta_t\|) = (\mathbf{A}_t^T \mathbf{A}_t)^{-1} \mathbf{A}_t^T \mathbf{S}$ 。

3) 从 $\hat{\theta}_t$ 选出绝对值最大 L 项，记为 $\hat{\theta}_{tL}$ ，对应 $\mathbf{A}_t$ 中的 L 列记为 $\mathbf{A}_{tL}$ ，更新残差 $\mathbf{r}_{t, \text{new}} = \mathbf{s} - (\mathbf{A}_{tL}^T \mathbf{A}_{tL})^{-1} \mathbf{A}_{tL}^T \mathbf{S}$ ，若 $\|\mathbf{r}_{t, \text{new}}\| > \|\mathbf{r}_{t-1}\|$ ，更新残差，按原步长返回 1) 迭代；若证明可能存在过迭代风险，更新残差，阈值变为 T_1 并将大步长变换为小步长 $S=1$ ，返回 1) 迭代；若 $\|\mathbf{r}_{t, \text{new}}\| - T_2 \leq \varepsilon$ ，更新残差，迭代停止，进入 4)。

4) 重构所得 $\hat{\theta}$ 在 $\mathbf{A}_{tM}$ 处有非零项，其值分别为最后一次迭代所得 $\hat{\theta}_{tM}$ 。

迭代终止后，更新旋转速度 Ω_q 的值继续执行上述抑制过程。当 Ω_q 值遍历完后，比较不同 Ω_q 值下残差的能量 $\mathbf{r}_k$ ，其中能量最小的 $\mathbf{r}_k$ 即为微动杂波抑制后的距离像数据，对应的角速度 Ω_q 即为旋转叶片的转速。

步骤 4：提取更新的能量最小信号 $\mathbf{r}_k$ ，此时的 $\mathbf{r}_k$ 为杂波抑制后包含目标的回波信号，对其进行距离多普勒维计算，分析并验证结果。

2.3 算法复杂度分析

改进的 SAMP 算法应用在本文中时，通过给残差设定阈值，回避对原信号稀疏度的过估计，步长自动更新，解决了传统算法恢复速度和恢复精确度的矛盾。本文所提 SAMP 算法对每个距离元的计算量与迭代次数 k 、待估参数 (L_p, Ω, φ_n) 的量化次数 M_{L_p}, M_{φ_n} 有关。微动杂波的叶片长度一般在 100 m 以下， M_{L_p}, M_{φ_n} 的量化范围在 10^2 以下，每次抑制的 SAMP 乘法次数约为 $k \cdot M_{L_p} \cdot M_{\varphi_n}$ 。因此当抑制整个范围内的微动杂波时，需根据计算的方位信息进行 N 个不同距离范围内的抑制，则总的乘法次数为 $N \cdot k \cdot M_{L_p} \cdot M_{\varphi_n}$ 。

3 仿真与实测验证

考虑到三叶片风扇的转动回波模型、造成的微动干扰均与风力涡轮机、空调柜机等微动杂波一致，本文利用三叶片风扇作为微动目标进行实验分析。下文通过分别对仿真模型和三叶片风扇实测数据进行分析，验证了本文所提微动杂波抑制算法能在微动杂波方位信息大致范围已知^[21]的情况下对微动杂波进行参数估计、模型重建并有效抑制微动杂波。其中仿真的原始信号为经参考信号重构后的中国移动多媒体广播 (China Mobile Multimedia Broadcasting, CMMB) 信号，载频为 658 MHz。仿真微动回波信号的具体参数如表 1 所示。

表 1 外辐射源雷达微动杂波仿真参数

Table 1 Simulation parameters of micro-Doppler clutter based on passive radar

signal carrier frequency	number of blades	rotation rate	blade length	bistatic angle	pitch angle
658 MHz	3	300 rpm	0.75 m	30°	22°

3.1 仿真模型正确性验证

图 3 为风扇叶片仿真结果，图 3(a) 为回波频谱图，谱线条数为 6 条，调制带宽为 89.5 Hz，由式 (6)、式 (7) 可计算出仿真模型理论谱线条数为 $N_f = \frac{4\pi}{N} \frac{L_p}{\lambda} \cos(\beta/2) \cos(\delta) = 6$ ，谱线间隔为 $\Delta f = (N_f) / 2\pi = 15$ Hz，带宽 $B = N_f \cdot \Delta f = 90$ Hz，与理论结果吻合；图 4(b) 为连续两个闪烁之间的时间间隔，连续两个闪烁之间的间隔为 33.3 ms，由公式可知，闪烁间隔理论值为 33.4 ms；图 4(c) 为仿真信号的时频特性，可看出最大微多普勒扩展为 90 Hz。微动目标的微多普勒呈非线性变化，通过对目标回波信号进行时频分析能够揭示信号频率的时变特性，图中闪烁交替出现可判断出旋转目标叶片为奇数^[19]。由图 3 可知本次仿真模型结果与理论值十分接近，故能较大程度地吻合微动杂波回波状态。

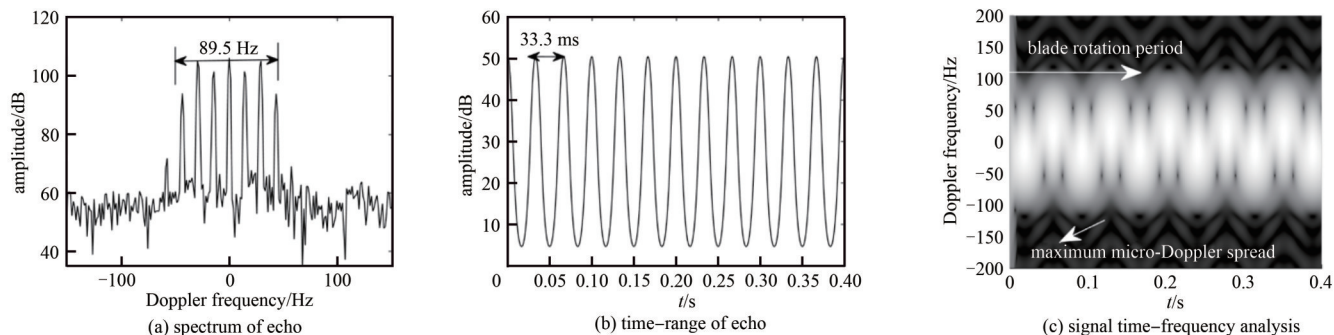


Fig.3 Simulation results of fan blades

图3 风扇叶片仿真结果

3.2 仿真信号微动杂波抑制

上文验证了本文所建外辐射源雷达-旋转叶片微动模型能较好吻合旋转叶片微动状态。现在模拟微动杂波信号中加入一仿真目标回波与噪声，其中微动杂波信号参数信息如表1所示，仿真目标与微动杂波信号同在一个距离元，信噪比为-40 dB，信号积累增益为67 dB，多普勒频为-40 Hz。用上文中所示方法对微动信号进行抑制，观察仿真目标，验证本文所提算法的有效性。图4为仿真数据杂波抑制结果，图4(a)为杂波抑制前距离多普勒谱，从图4(a)可看出，由于目标回波与微动杂波处于同一距离元，并与微动杂波多普勒扩展点频率相近，因此经过恒虚警检测后，目标仍可能出现漏检。

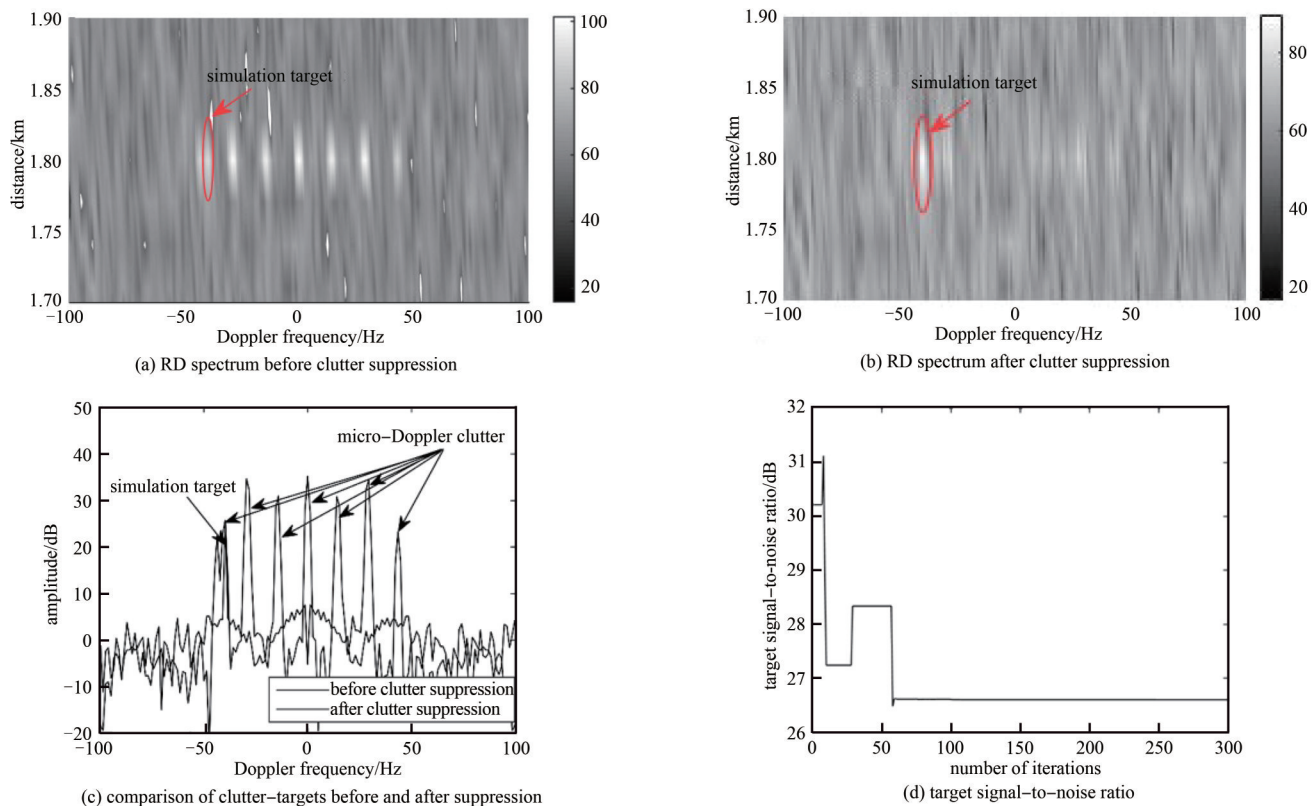


Fig.4 Simulation of signal clutter suppression

图4 仿真结果

图4(b)为利用SAMP算法抑制微动杂波后的距离多普勒谱(RD)，在同一距离元，微动杂波被有效抑制，仅存在目标回波信号，有利于快速定位到探测目标。图4(c)为抑制前后目标所在距离元处的多普勒截面对比图，杂波抑制前微动杂波各谱线峰值明显；经处理后，仿真目标所在距离元处微动杂波各峰值被有效抑制，仅目标峰值存在，目标信噪比约为26 dB左右(目标信噪比理论值为27 dB)，与理论值接近。表明本文所提SAMP算法能够有效抑制微动杂波，减小微动杂波回波对仿真目标的干扰。图4(d)为杂波抑制后的目标信噪比，大约迭代50次之后，目标信噪比趋于稳定且为26.5 dB，与理论值接近。所以用本文方法进行杂波抑制能够在抑制微动杂波的同时，几乎不损伤目标信噪比，帮助有效识别出目标。

3.3 风扇模拟风力发电机信号杂波抑制

考虑到三叶片转动的风扇与一般旋转微动杂波旋转叶片的转动场景、对雷达的微动干扰相似,武汉大学无线电探测研究中心实验室利用三叶片的风扇进行了微多普勒效应探究外场实验。实验所用风扇3叶片,叶片长度0.75 m,额定转速290~300 rpm。

在本次风扇微动杂波探测实验中,武汉数字电视采用单频网结构(各个发射站同时以相同频率发送相同节目内容,以实现一定服务区的可靠覆盖),信号中心频率658 MHz,带宽8 MHz,发射功率1 kW,采用垂直极化,接收站位于武汉大学无线电探测研究中心实验室楼顶。为验证微动杂波抑制效果,在实测数据中注入两个多普勒频移的仿真目标回波,其双基距离、多普勒频率和信噪比分别为0.54 km,-20 Hz,-30 dB和0.54 km,15 Hz,-40 dB。经过计算可知本次实测数据中,双基地角为28~30°,俯仰角20~22°,相干积累时间5 s,可近似认为目标在这段时间位置不变,风扇叶片转速为常量。

图5(a)为实测数据距离谱图,沿多普勒轴与零频对称呈周期出现多次谐波副峰,且沿距离轴仍存在扩展,这是因为风扇主体固定,旋转的风扇叶片在雷达回波中产生额外频率调制,表现在频谱上的特征就是在目标主体周围产生谐波谱线(图中色柱表示信号功率,单位是dB)。其次,在单频网结构下,单个目标被多个照射源同时照射,产生多个同时的微多普勒特征将分布于不同距离单元。其中位于0.54 km,-20 Hz处的仿真目标一可以被观测到但难以被检测,位于15 Hz处的仿真目标二由于正好与微动杂波的多普勒扩展处于重叠,难以检测。由于SAMP算法对双基地角、俯仰角等方位信息较为敏感,为了充分抑制微动杂波,在双基地角和俯仰角范围内计算寻找残差最小值,并将其代入模型,利用SAMP算法将其充分抑制。同时对多个距离维上微多普勒谱进行抑制,更能验证本文所提方法的鲁棒性。图5(b)为实测数据杂波抑制后距离谱,对所有距离元上微动杂波进行抑制,可见微动杂波的多普勒扩展得到了有效抑制,同时与仿真目标同一距离元的0.54 km处已无完整的微动目标多普勒扩展,此时仿真目标一、二都可被观察到,便于对目标进行探测。

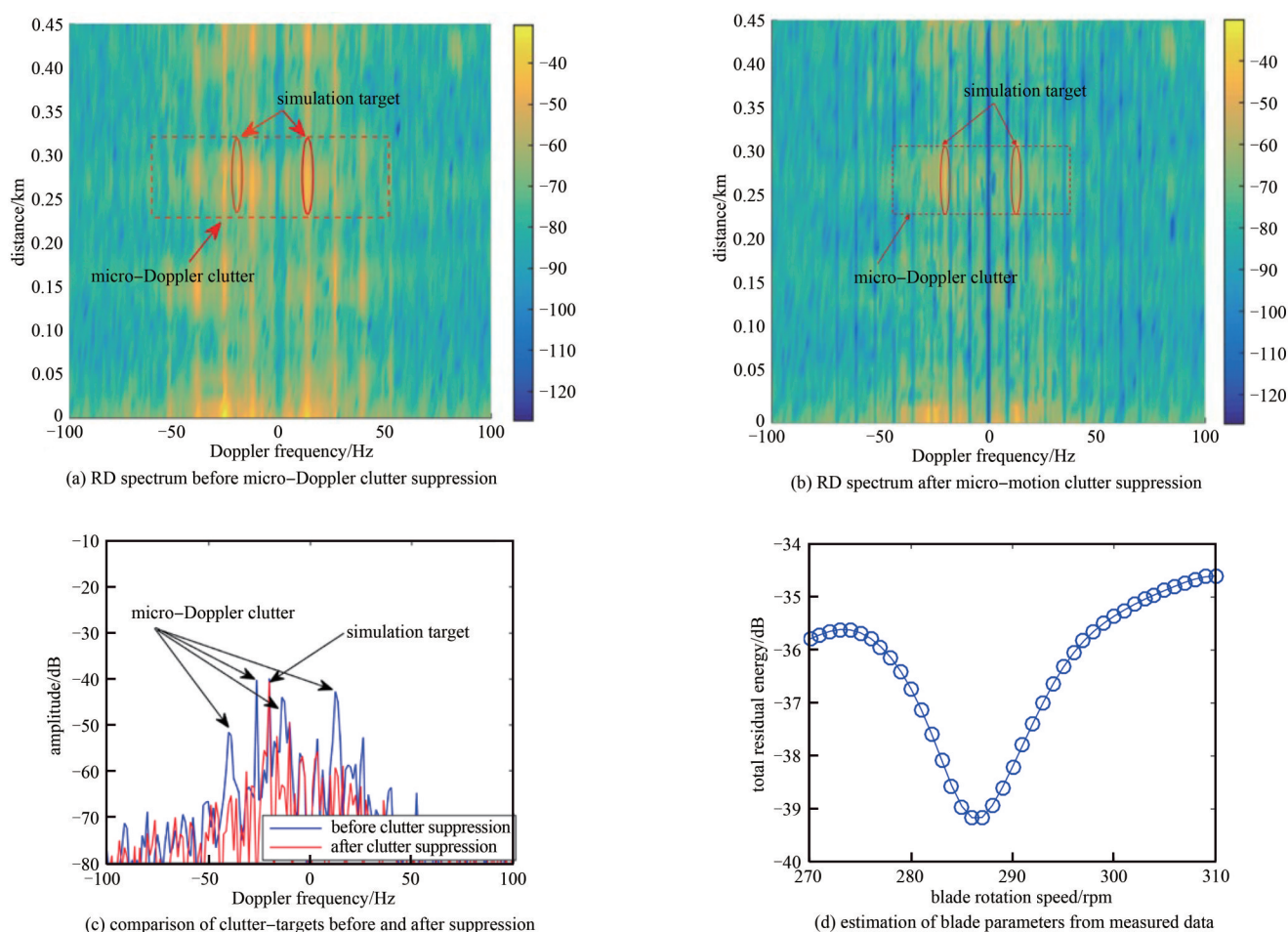


Fig.5 Measured signal clutter suppression

图5 实测信号杂波抑制

图 5(c)为抑制前后目标所在距离元即双基距离 0.54 km 处的多普勒截面对比图,从图中可明显看出,经 SAMP 算法处理后,目标所在距离元处微动杂波各峰值被有效抑制,仅目标一、二峰值存在,表明本文所提 SAMP 算法能够有效抑制微动杂波,减小微动杂波回波对仿真目标的干扰。图 5(d)为用 SAMP 对微动目标转速估计图,由图可知,当转速为 288 rpm 时,残差总能量达到最小,即 SAMP 算法估计的微动目标转速与微动目标实际转速 290~300 rpm 较为接近,证明 SAMP 算法能在稀疏度 K 值未知时有效对微动目标进行重构并抑制,有效提升外源雷达目标识别的准确性。

在本文配置环境下,利用 Matlab 仿真平台,原 SAMP 算法对实测数据进行处理时运行总时长为 350 s,而改进后算法则为 186 s,效率提升近一倍。改进的 SAMP 算法应用在外辐射源雷达微动杂波抑制中,具有参数选取简单、计算量小等特点。

4 结论

本文根据外辐射源雷达旋转叶片微动信号模型,提出一种基于改进的稀疏度自适应匹配追踪算法(SAMP)的微动目标杂波抑制方法。详细阐述了算法原理及处理流程,利用三叶片风扇得到实测数据。基于实测数据分析结果进一步证实了本文方法能在已知微动杂波方位信息大致范围的前提下,有效抑制微动杂波从而提高外辐射源雷达目标检测的准确性。后续工作将进一步对真实环境下风力发电机、空调柜机等开展实测实验,采集实测数据,着重研究如何在复杂野外环境下有效确定微动杂波方位信息范围并将其抑制,进一步提升算法性能。

参考文献:

- [1] CHEN V C, LI F, HO S S, et al. Micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model, and simulation study[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(1): 2-21.
- [2] LI T, WEN B, TIAN Y, et al. Numerical simulation and experimental analysis of small drone rotor blade polarimetry based on RCS and micro-Doppler signature[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(1): 187-191.
- [3] OH B-S, GUO X, WAN F, et al. Micro-Doppler mini-UAV classification using empirical-mode decomposition features[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 15(2): 227-231.
- [4] CHEN Xiaolong, GUAN Jian, DONG Yunlong. Detection and extraction of target with micromotion in spiky sea clutter via short-time fractional Fourier transform[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(2): 1002-1018.
- [5] 陈小龙, 关键, 董云龙, 等. 稀疏域海杂波抑制与微动目标检测方法[J]. 电子学报, 2016, 44(4): 860-867. (CHEN Xiaolong, GUAN Jian, DONG Yunlong, et al. Sea clutter suppression and micro motion target detection in sparse domain[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(4): 860-867.)
- [6] 罗迎, 张群, 封同安. 强杂波下含旋转部件的目标成像及微多普勒提取[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(2): 261-264. (LUO Ying, ZHANG Qun, FENG Tongan. Imaging and micro-Doppler extraction of targets with rotating parts in strong ground clutter[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(2): 261-264.)
- [7] 毕严先, 杜瑞, 焦栋, 等. 太赫兹雷达的人体微多普勒特征[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019, 17(5): 760-764. (BI Yanxian, DU Rui, JIAO Dong, et al. Human micro-Doppler characteristics of terahertz radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019, 17(5): 760-764.)
- [8] LIU Yongxiang, ZHU Dekang, LI Xiang, et al. Micromotion characteristic acquisition based on wideband radar phase[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(6): 3650-3657. doi: 10.1109/TGRS.2013.2274478.
- [9] GALLARDO B, PEREZ F, AGUADO F. Wind turbine clutter detection in scanning weather radar tasks[C]// Proceedings of the 6th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology. Sibiu, Romania: National Meteorological Administration Romania, 2010: 6-10.
- [10] 吴仁彪, 毛建, 王晓亮, 等. 航管一次雷达抗风电场干扰目标检测方法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(3): 754-758. (WU Renbiao, MAO Jian, WANG Xiaoliang, et al. Target detection of primary surveillance radar in wind farm clutter[J]. Electronics and Information Technology, 2013, 35(3): 754-758.)
- [11] 何炜琨, 窄秋苹, 郭双双, 等. 基于微多普勒特征的风轮机雷达杂波检测[J]. 信号处理, 2017, 33(4): 496-504. (HE Weikun, ZHAI Qiuping, GUO Shuangshuang, et al. Wind turbine radar clutter detection method based on micro-Doppler characteristics of wind turbine[J]. Journal of Signal Processing, 2017, 33(4): 496-504.)
- [12] KRICH S I, MONTANARI M, AMENDOLARE V, et al. Wind turbine interference mitigation using a waveform diversity radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 53(2): 805-815.
- [13] GRIFFITHS H D, BAKER C J. Passive coherent location radar systems[J]. IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 2005,

- 152(3):153–159.
- [14] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006,52(4):1289–1306.
- [15] DO T T,GAN L,NGUYEN N,et al. Sparsity adaptive matching pursuit algorithm for practical compressed sensing[C]// The 42nd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Pacific Grove,CA,USA:IEEE, 2008:581–587.
- [16] 张虞健,周良将. 基于改进SAMP的MIMO雷达STAP稀疏恢复算法[J]. 电子测量技术, 2020,43(14):154–159. (ZHANG Yujian,ZHOU Liangjiang. Improved SAMP-based MIMO radar STAP sparse recovery algorithm[J]. Electronic Measurement Technology, 2020,43(14):154–159.)
- [17] GAO G,ZHOU C,CUI Z,et al. Improved sparsity adaptive matching pursuit algorithm[C]// 2017 3rd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC). Chengdu,China:IEEE, 2017:1761–1766.
- [18] 陈小龙,董云龙,李秀友,等. 海面刚体目标微动特征建模及特性分析[J]. 雷达学报, 2015,4(6):630–638. (CHEN Xiaolong,DONG Yunlong,LI Xiuyou,et al. Modeling of micromotion and analysis of properties of rigid marine targets[J]. Journal of Radars, 2015,4(6):630–638.)
- [19] 陈永彬,李少东,杨军,等. 旋翼叶片回波建模与闪烁现象机理分析[J]. 物理学报, 2016,65(13):138401-1–138401-11. (CHEN Yongbin,LI Shaodong,YANG Jun,et al. Rotor blade echo modeling and scintillation mechanism analysis[J]. Journal of Physics, 2016,65(13):138401-1–138401-11.)
- [20] WU H,WANG S. Adaptive sparsity matching pursuit algorithm for sparse reconstruction[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2012,19(8):471–474.
- [21] ZHAN Weijie,YI Jianxin,WAN Xianrong. Recognition and mitigation of micro-Doppler clutter in radar systems via support vector machine[J]. IEEE Sensors Journal, 2020,20(2):918–930.

作者简介：

陈 梅(1996–)，女，在读硕士研究生，主要研究方向为外辐射源雷达微动杂波抑制。email: 1063714329@qq.com.

占伟杰(1993–)，男，博士，主要研究方向为外辐射源雷达信号处理、实时信号并行处理和微多普勒效应。

刘玉琪(1990–)，男，博士，主要研究方向为雷达系统、雷达信号处理。

万显荣(1975–)，男，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为新体制雷达设计，外辐射源雷达、高频雷达系统及信号处理。

张 勋(1989–)，男，博士，主要研究方向为雷达信号处理、实时信号并行处理。