

近距离慢速目标检测杂波抑制方法

郑霖^{*①②} 姚伟伟^① 杨超^① 仇洪冰^①

^①(桂林电子科技大学无线宽带通信与信号处理广西重点实验室 桂林 541004)

^②(通信网信息传输与分发技术重点实验室 石家庄 050081)

摘要: 针对强杂波环境下近距离慢速运动目标检测问题, 该文提出一种基于相位编码及子空间投影的杂波抑制方法。主要对周期探测信号调制Chirp相位编码, 通过回波慢时间维解码使杂波近似白化, 降低杂波与目标回波相关性, 再依据白化后杂波及有用信号成分自相关性差异分离出信号和杂波干扰子空间; 最后将接收信号投影至正交于杂波子空间的信号子空间来抑制杂波。由于该方法中杂波空间的构建不需要假设杂波模型, 避免了模型假设与实际环境不匹配的问题。仿真结果和实测数据处理结果证明该方法在低信杂比条件下性能明显优于传统方法。

关键词: 杂波抑制; 慢速运动目标; 相位编码; 子空间投影

中图分类号: TN953

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)10-2506-07

DOI: 10.11999/JEIT180031

Clutter Suppression Method for Short Range Slow Moving Target Detection

ZHENG Lin^{①②} YAO Weiwei^① YANG Chao^① QIU Hongbing^①

^①(Guangxi Key Laboratory of Wireless Communication & Signal Processing, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

^②(Science & Technology on Information Transmission & Dissemination in Communication Networks Laboratory, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: This paper proposes a method of clutter suppression based on phase encoding and subspace projection for close slow-moving target detection in strong clutter environment. In the framework, the periodic detection signal is modulated with phase encoding, and the clutter is whitened through echo decoding of the slow-time dimension to reduce the correlation between clutter and target echo. Furthermore interference subspace is constructed on the basis of the autocorrelation differences between whitened clutter and useful signal components. The receiving signal is projected to the signal subspace orthogonal to the clutter subspace for clutter suppression. Since the construction of clutter space does not need to assume the clutter model, it avoids the problem of mismatch between the model hypothesis and the actual environment. Simulation results and real data processing results show that this method has better performance than conventional methods under low signal-to-clutter ratio.

Key words: Clutter suppression; Slow-moving target; Phase encoding; Subspace projection

1 引言

慢速运动目标检测与跟踪是短距雷达的重要目标之一^[1]。实际近距离探测环境中, 如果强杂波干扰, 目标回波强度远小于杂波, 使得运动目标信号

往往被淹没在杂波之中; 此外, 由于目标的慢速特性, 低频杂波的多普勒旁瓣也会掩盖目标的多普勒信息。因此杂波的充分抑制对于提高雷达的目标检测能力有着至关重要的意义^[2,3]。为此, 基于运动

收稿日期: 2018-01-09; 改回日期: 2018-05-02; 网络出版: 2018-07-30

*通信作者: 郑霖 gwzheng@gmail.com

基金项目: 国家自然科学基金(61571143, 61371107); 广西无线宽带通信与信号处理重点实验室基金(GXKL061501); 通信网信息传输与分发技术重点实验室开发课题(KX172600033)

Foundation Items: The National Natural Science Foundations of China (61571143, 61371107), The Wideband Wireless Communications & Signal Processing Key Laboratory, Foundation of Guangxi (GXKL061501), The Science and Technology on Communication Networks Laboratory Foundation (KX172600033)

目标显示(Moving Target Indication, MTI)和相参积累的传统杂波抑制方法被广泛应用于雷达系统。MTI是依据杂波与目标回波多普勒的差异来滤除零频附近的杂波, 保留远离零频的运动目标^[4]。但MTI滤波器对处在零频附近的目标多普勒成分衰减过大, 使得对慢动目标的检测性能下降^[3]。国内外学者基于大量研究提出了许多更加有效的杂波抑制算法, 这主要包括自适应目标显示, 卡尔曼滤波, 时频变换类, 杂波图, 恒虚警率等手段^[5-9]。但对于被强杂波淹没的慢速运动目标检测问题, 上述系列方法的检测能力有限。

近年来, 基于子空间的杂波抑制方法在穿墙雷达成像, 无源雷达, 探地雷达等领域有广泛应用^[10-13], 其核心是从接收信号特征出发分离杂波并突显目标信号。针对强墙体杂波环境下目标成像问题, 文献^[10]综合比较了主成分分析(Principal Component Analysis, PCA), 独立成分分析(Independent Component Analysis, ICA), 奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)等子空间类方法在墙体杂波抑制方面的应用, 并通过实测数据分析了各个方法的有效性。文献^[11]针对无源雷达所面临的直达波及多径杂波问题, 通过将接收信号投影至正交于干扰子空间的信号子空间来抑制干扰, 提高了目标的检测性能。文献^[13]给出了探地雷达场景下基于SVD的杂波抑制方法。但是, 目前大多数基于子空间的杂波抑制方法存在如下问题: (1)假定环境杂波模型^[3,11,12]。如果待测目标所处环境与假设不匹配, 必然影响目标检测结果。(2)假定杂波子空间维数^[10,13]及信号子空间同杂波子空间的独立性^[14]。现有方法大多将回波协方差矩阵特征分解的最大一个或几个特征值所对应特征向量来表征杂波基, 构建杂波子空间, 而实际场景中, 杂波和信号子空间常常呈现多维度特性, 并且信号子空间与杂波子空间存在一定的相关性, 也即交织特性^[15,16], 交织性会使得部分信号基被分离为杂波基, 最终导致目标检测性能不足。

本文考虑到回波特征子空间多维度及交织特性, 提出先运用Chirp相位编码调制周期探测信号, 由于相位编码的扩频效应, 回波慢时间维解码会使得杂波干扰成分近似白化, 减弱杂波与目标回波成分的互相关性, 从而降低信号子空间与杂波子空间之间的关联性, 再考虑有用信号成分与白化后杂波成分自相关性差异来分离出信号子空间及杂波干扰子空间, 最后基于最小二乘法, 将接收信号投影至正交于杂波子空间的信号子空间, 从而来抑制杂波, 提高目标检测性能。仿真结果和实测数据处

理结果证明了该方法在强杂波环境, 短距慢速运动目标检测场景下, 较传统子空间方法有更好的性能表现。

2 信号及相位编解码

2.1 信号与相位编码模型

考虑一个单基地脉冲多普勒雷达, 其发射信号的复包络为

$$s(t) = \sum_{h=0}^{H-1} m_2(h) m_1(t - h T_r) \quad (1)$$

其中, 线性调频(Linear Frequency Modulated, LFM)信号 $m_1(t) = e^{j\pi\mu t^2}$, $0 \leq t \leq T_c$, 慢时间维相位编码 $m_2(h) = e^{j\pi\eta T_r^2 h^2}$, μ , η 分别为 $m_1(t)$, $m_2(k)$ 的调频斜率, T_r 是脉冲重复周期, T_c 是Chirp信号扫频时长, H 为脉冲积累数目。设 $\eta = 1/H T_r^2$, 因为 $m_2(h)$ 也是LFM序列, 因此具有很好的自相关特性, 且频率范围是 $[-1/2 T_r, 1/2 T_r]$ Hz。

回波信号矢量可表示为^[3]

$$\mathbf{x}(n) = \mathbf{a}_s s(n) + \mathbf{c}(n) + \mathbf{n}(n) \quad (2)$$

其中, $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$, 表示距离门个数, $\mathbf{a}_s = [1, \dots, e^{j2\pi f_d(h-1)T_r}, \dots, e^{j2\pi f_d(H-1)T_r}]^T$ 表示目标的多普勒矢量, $\mathbf{n}(n) = [n_1(n), \dots, n_h(n), \dots, n_H(n)]^T$, $\mathbf{c}(n) = [c_1(n), \dots, c_h(n), \dots, c_H(n)]^T$, 分别表示距离门 n 上的杂波信号矢量及噪声矢量。

2.2 解码抑制杂波

对式(2)所代表的回波采样数据表示成距离-脉冲2维矩阵形式, 得到

$$\mathbf{X}_m = \begin{bmatrix} x_0(0) & x_0(1) & \cdots & x_0(N-1) \\ x_1(0) & x_1(1) & \cdots & x_1(N-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{H-1}(0) & x_{H-1}(1) & \cdots & x_{H-1}(N-1) \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $x_h(n)$ 表示第 h 个接收脉冲的第 n 个采样点, $h = 0, 1, 2, \dots, H-1$, $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。

在慢时间维度, 也就是对 \mathbf{X}_m 列向量作解码处理:

$$\mathbf{X} = \mathbf{M}_2 \mathbf{X}_m \quad (4)$$

其中, 解码矩阵 $\mathbf{M}_2 = \text{diag}[m_1^*(1), m_1^*(2), \dots, m_1^*(H-1)]$ 。

如前所述, 慢动目标信号的极低频多普勒频率很容易被地杂波所‘淹没’, 地杂波相‘当于在目标多普勒范围上存在较高的窄带干扰, 此窄带干扰与目标信号的相关性小。因为相位编码 \mathbf{M}_2 序列具有很好的自相关特性, 且频带覆盖整个 $[-1/2 T_r, 1/2 T_r]$, 因此解码过程能够使得主要分布在零频附近的窄带

杂波成分被“扩频”，零频杂波分量被“打散”，近似均匀分布在 $[-1/2T_r, 1/2T_r]$ 频带内；而目标信号在慢时间维上与 M_2 序列相乘的解码过程相当于“解扩”，不论是时延和多普勒信息均得以保留，

$$\mathbf{P}_c = \begin{bmatrix} p_0(0) & p_0(1) & \cdots & p_0(N-1) \\ p_1(0)e^{j\omega_a T_r} & p_1(1)e^{j\omega_a T_r} & \cdots & p_1(N-1)e^{j\omega_a T_r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{H-1}(0)e^{j\omega_a(H-1)T_r} & p_{H-1}(1)e^{j\omega_a(H-1)T_r} & \cdots & p_{H-1}(N-1)e^{j\omega_a(H-1)T_r} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中，脉冲压缩结果 $p_h(n)e^{j\omega_a h T_r} = \mathbf{h} * \mathbf{x}$, $\mathbf{h} = [1, \dots, e^{-j\pi\mu T_s^2}, \dots, e^{-j\pi\mu((N-1)T_s)^2}]$, T_s 是距离维采样周期。 \mathbf{x} 为矩阵 \mathbf{X} 的行向量。

3 基于子空间投影的杂波抑制方法

3.1 基本理论

假设杂波信号具有空间平稳性，则回波信号的自相关矩阵估计式为

$$\mathbf{R}_{xx} = \frac{1}{N} \mathbf{P}_c \mathbf{P}_c^H \quad (6)$$

其中， N 是单个Chirp脉冲内的采样点数。对 \mathbf{R}_{xx} 进行特征值分解：

$$\mathbf{R}_{xx} = \sum_{k=1}^N d_k \mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^H = \mathbf{V} \mathbf{D} \mathbf{V}^H \quad (7)$$

其中， $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_H]$, $\mathbf{D} = \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_H)$, d_n 是第 n 个特征值并且按降序排列， \mathbf{v}_n 是第 n 个特征值 d_n 所对应的特征向量。考虑在 \mathbf{V} 中选取 K 个能够表征杂波主成分的特征向量，构成 K 维杂波空间 \mathbf{V}_c 。而后基于最小二乘法构建正交于杂波空间的投影矩阵 \mathbf{P}_n ，从而抑制杂波。其中投影矩阵为

$$\mathbf{P}_n = \mathbf{I} - \sum_{k=1}^K \mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^H, \quad \mathbf{v}_k \in \mathbf{V}_c \quad (8)$$

其中， \mathbf{I} 是单位矩阵，如何选取表征杂波成分的特征向量是核心问题。现有文献大多选取最大特征值对应的特征向量来构建杂波空间，这会使杂波成分出现较大残余^[10,13]；另外，由于杂波与有用信号成分互相关性可能会出现特征向量交织问题，即信号子空间与杂波子空间可能存在交集，可能会导致将包含目标信号主成分的特征向量分离为杂波基^[16]，致使杂波抑制效果并不理想。由于相位编解码的作用，杂波成分被近似白化，相关性发生改变，本文利用这一特性来进一步分离杂波基。

3.2 回波成分相关性差异

由于相位编码的扩频作用，白化后的杂波成分在所有特征向量之间的分布变得更分散，并减弱了与有用信号之间的互相关性，再结合两者自相关性

未发生变化，从而此解码过程能够在极低频范围有效抑制杂波，提高输出目标的信杂比。且杂波干扰被近似白化，这有利于后续将有用信号成分从杂波中剥离。对式(4)按距离维脉冲压缩后得到

的差异，我们设计如下算法对以杂波为主成分的特征向量进行分离，因为 $\mathbf{v}_k = [v_{k,1}, v_{k,2}, \dots, v_{k,N}]$ $k=1, 2, \dots, H$ ，每个特征向量可以重排成如式(9)行数为2的矩阵：

$$\begin{bmatrix} v_{k,1} & v_{k,2} & \cdots & v_{k,N-1} \\ v_{k,2} & v_{k,3} & \cdots & v_{k,N} \end{bmatrix} \triangleq \mathbf{V}_k \quad (9)$$

$\mathbf{V}_k \in \mathbf{R}^{2 \times (N-1)}$ ，对该矩阵进行SVD处理：

$$\mathbf{V}_k = \sigma_{1,k} \mathbf{e}_{1,k} \mathbf{u}_{1,k}^T + \sigma_{2,k} \mathbf{e}_{2,k} \mathbf{u}_{2,k}^T \quad (10)$$

式中， $\sigma_{1,k}, \sigma_{2,k}$ 分别为矩阵 \mathbf{V}_k 经特征值分解后得到的两个特征值，由于 \mathbf{V}_k 的特点是第2行只比第1行滞后一个数据，若特征向量 \mathbf{v}_k 中包含的主成分为目标信号，则矩阵 \mathbf{V}_k 两行将高度相关。经SVD后 $\sigma_{1,k}/\sigma_{2,k}$ 值会比较大。相反，如果特征向量 \mathbf{v}_k 中包含的主成分为白化后的杂波或噪声，则矩阵 \mathbf{V}_k 两行相关度很低，对应的 $\sigma_{1,k}/\sigma_{2,k}$ 值会比较小。基于此特征分离杂波子空间，进而满足表征杂波成分的特征向量构成的集合：

$$\mathbf{V}_c = \left\{ \mathbf{v}_k \mid \frac{\sigma_{1,k}}{\sigma_{2,k}} < \gamma \right\}, \quad \mathbf{v}_k \in \mathbf{V} \quad (11)$$

其中， γ 为奇异值阈值。

结合式(9)–式(11)，对 \mathbf{V} 中特征向量按顺序遍历，找到满足条件的 \mathbf{v}_k 集。一般只需遍历 N 个特征向量，满足 $\sum_{i=1}^N d_i / \sum_{i=1}^H d_i \geq 95\%$, $N \geq K$ 即可取得较好的杂波抑制效果^[14]。

得到相应的杂波基后，可得到式(9)，进而对输入信号的杂波抑制过程可表示为

$$\mathbf{Y}_n = \mathbf{P}_n \mathbf{P}_c = \left(\mathbf{I} - \sum_{k=1}^K \mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^H \right) \mathbf{P}_c, \quad \mathbf{v}_k \in \mathbf{V}_c \quad (12)$$

最后对式(12)按慢时间维相参积累得到

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}^H \mathbf{Y}_n \quad (13)$$

其中，傅里叶变换矩阵 $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_s^{(1)}, \mathbf{a}_s^{(2)}, \dots, \mathbf{a}_s^{(H)}]$, $\mathbf{a}_s^{(h)} = [1, \dots, e^{j2\pi f_s^h (h-1)T_r}, \dots, e^{j2\pi f_s^h (H-1)T_r}]^T$, $f_s^{(h)} = \frac{h-1}{HT_r}$ 。

接收端整个处理的功能框图如图1所示。

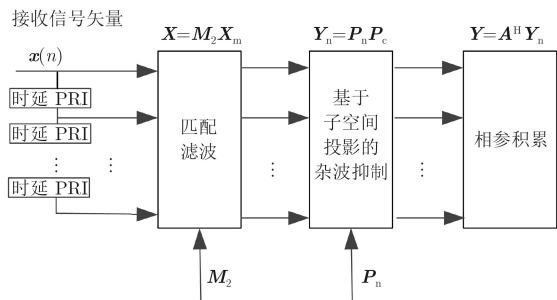


图1 接收端数据处理框图

4 计算机仿真与实测数据结果

本文结合仿真数据分别验证了相位编码白化杂波，降低慢时间维杂波成分相关性的有效性以及本文算法在强杂波环境下有效抑制杂波，检测微弱目标的能力。此外，结合自研雷达数据采集平台采集的实测数据，验证本文算法的有效性。

4.1 仿真实验1

为验证相位编解码能够近似白化杂波，减弱其相关性的有效性，按照表1雷达系统参数进行仿真。式(1)中相位编码因子 $m_2(h) = e^{j\pi\eta T_r^2 h^2}$ 中 η 取 $1/HT_r^2$ 。杂波信号由瑞利杂波模型产生，杂波速度谱的均方根设为1.3 m/s，表征杂波多普勒的扩展程度，并且在场景中注入一个距离40 m，速度2 m/s的运动目标。图2(a)给出了杂波成分近似白化前后

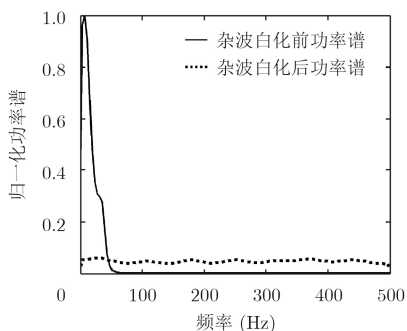
的归一化功率谱曲线。从中可以看出解码前，杂波成分保持较高的相关性，由于解码的扩频作用，杂波成分接近白化，所以杂波功率谱曲线几乎变成直线，意味着相关杂波变换为独立杂波。图2(b)给出了杂波近似白化前后与目标信号成分的互相关性曲线(其中每条曲线分别2000次仿真取平均得到)。从中可以看到白化后杂波成分与目标信号互相关度减弱，接近于零值，从而能够减弱信号子空间与杂波子空间之间的相关性。

4.2 仿真实验2

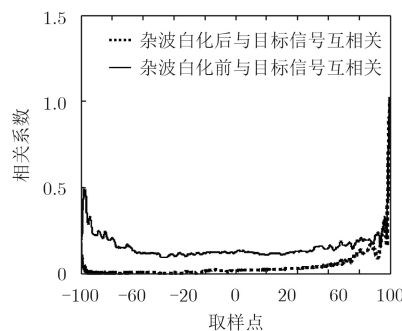
按照表1所给出的雷达系统参数验证算法杂波抑制性能。目标及杂波相关参数同仿真1，奇异值比阈值设为2。其中为了体现本文算法相对于传统算法在强杂波环境下检测微弱慢动目标的优势，设置信杂噪比为-20 dB。

表1 雷达系统仿真参数取值表

参数	数值
信号带宽	60 MHz
载波频率	2.45 GHz
Chirp时长	2 μ s
脉冲积累数目	200
IQ采样频率	60 MHz
脉冲重复周期	2 ms



(a) 杂波白化前后功率谱



(b) 杂波白化前后互相关系数

图2 杂波白化前后对比

图3为回波信号的特征值分布图，虽然只截取了其中的前40个，但却可以清楚地反映出特征值分布的多维度特性，也就是说代表杂波成分的特征向量并不止有1个或几个。图4的4幅图从左至右所用的算法依次是2阶MTI算法，传统子空间法，本文无编码的子空间法以及本文含编码的子空间法。需要指出的是，图4的结果最后都使用了相参积累。由于MTI的本质是在零多普勒附近产生凹陷来抑制杂波，所以也会抑制同样处于零频附近的慢动目标。特别当目标淹没在杂波中时，MTI无法起任何

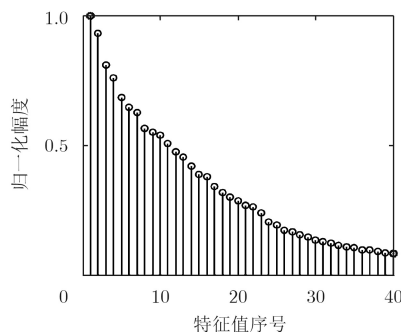


图3 回波信号特征值分布

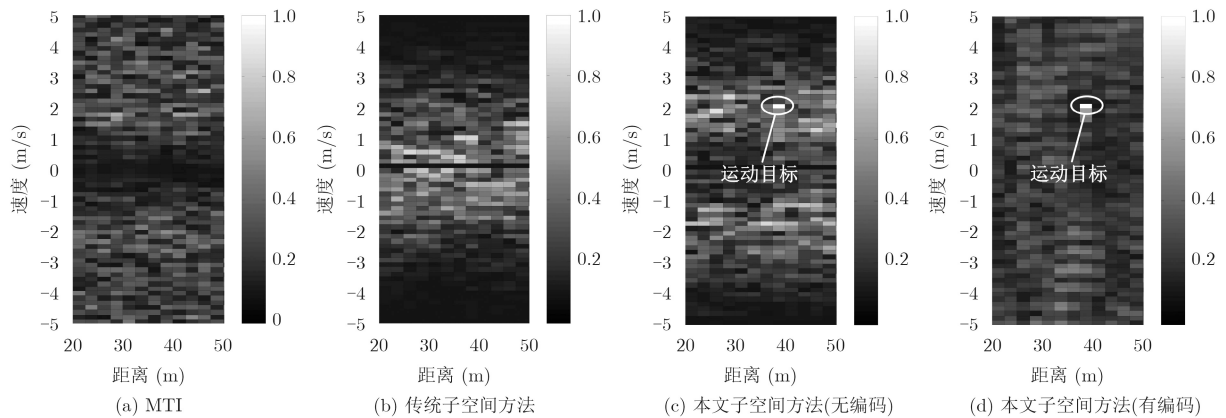


图4 杂波抑制后的距离-多普勒图

作用,因此从图4(a)可以看到,杂波和目标被同时抑制。传统子空间方法只采用最大的1个或几个特征值对应的特征向量来构建杂波子空间,而杂波子空间常常呈现多维度及交织特性,所以如图4(b)所示,该法对杂波的抑制效果并不理想,杂波成分还存在较大残留。

图4(c),图4(d)采用的是本文的子空间方法,利用特征向量中有用信号成分与白化后杂波自相关性差异分离出杂波基。如图4(d)所示,杂波得到充分抑制的同时保留了目标信息,而图4(c)在一定程度上保留目标信息,但却没有充分抑制杂波,原因在于图4(d)在信号预处理阶段对回波慢时间维相位编码进行了解码,等价于将杂波成分在慢时间维进行扩频,杂波被近似白化。一方面,白化后杂波特征成分与有用信号的互相关性被减弱,相对地使得目标成分在特征向量中的分布变得更集中,减弱了信号子空间与杂波子空间之间的相关性,这有利于本文算法分离出杂波基的同时过滤目标信号为主成分的特征向量;另一方面,白化后的杂波自相关性降低,有利于根据杂波及有用信号成分自相关性差异分离出信号及杂波干扰子空间;而图4(c)没有相应编码,所以杂波自相关性会干扰信号子空间的分离,并且由于特征子空间交织问题,以有用信号为

主的特征向量可能被算法分离为杂波子空间,所以目标信息会得到一定抑制。

4.3 实测数据

为了验证本文算法在实际地面场景中慢动目标检测的有效性,利用LabVIEW软件结合通用软件无线电外设(Universal Software Radio Peripheral, USRP)硬件搭建NI USRP-2942R数据采集平台。该USRP的ADC及DAC采样速率分别达到了200 MS/s及800 MS/s,分辨率分别为14 bit及16 bit,其FPGA处理速率达到200 MS/s,射频前端频率范围覆盖1.2~6.0 GHz;板状天线增益为20 dBi。

如图5(a),数据采集装置由USRP上位机,USRP,板状天线等构成,通过上位机编程结合硬件实现雷达波形数据发送与接收,其中编程中采用的波形参数及硬件射频参数配置与仿真相同,USRP发射功率设为2 dBm;另外,实验测试场景设置在过道(如图5(b)),其中过道长约50 m,过道尽头是一扇铁门,墙壁与地面反射可以带来丰富的杂波成分,在离装置40 m处有一来回走动的目标。需要指出的是,由于USRP发射功率限制,天线定向能力较弱以及人体目标反射能力差导致目标回波会完全被杂波所淹没。

值得注意的是,实际数据采集过程中会受收发

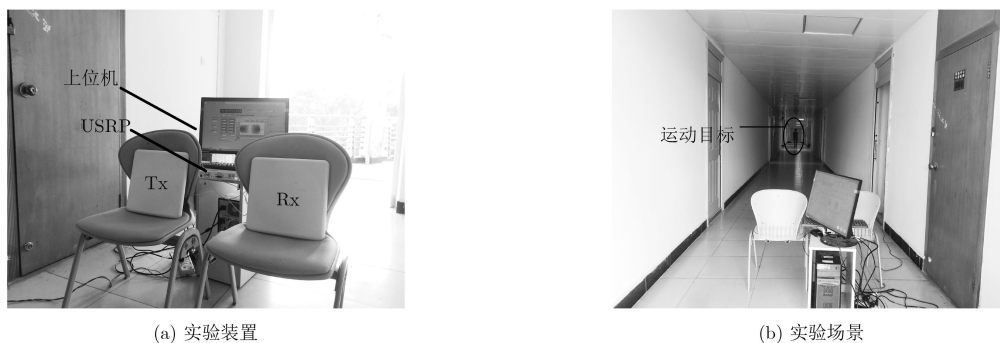


图5 实测装置及场景设置

天线之间直达波的影响, 所以式(2)需要修正为 $\mathbf{x}(n) = \mathbf{d}(n) + \mathbf{a}_s s(n) + \mathbf{c}(n) + \mathbf{n}(n)$, 其中 $\mathbf{d}(n)$ 代表直达波成分, 由于直达波能量要远远强于其他信号成分, 所以可以通过去除最大特征值对应的特征向量的方法来抑制直达波成分。之后再采用后续的杂波抑制算法。图6给出了滤波后的距离-多普勒图, 其中从左到右依次是MTI算法, 传统子空间法, 本文无编码的子空间法以及本文含编码的子空间法。可以看到, 图6(d)中杂波被有效抑制且有两个目标被检测到, 其中运动人体目标距离大概在43 m, 速度1.8 m/s左右。而位于运动目标附近, 多普勒为0的静态目标是反射能力较强的铁门, 距离在50 m位置处, 所计算的数据与实际场景相符。此外, 文献[1]中采用5.8 GHz频率的短距雷达所测试的目标距离近且相对多普勒较大, 杂波影响小, 信杂噪

比较高。而本文算法不仅可以在较强杂波环境下实现更远距离的微弱慢动目标检测, 而且还具有去除直达波, 检测静态目标的能力, 扩展了室内外慢动目标检测与跟踪应用场景, 更具实用价值。

图6(a)所用传统2阶MTI滤波器, 在抑制了杂波成分的同时, 也同时抑制了代表慢速运动目标的多普勒成分。图6(b)采用传统子空间方法, 杂波抑制效果较差, 无法检测出目标。图6(c)由于未在预处理阶段加入慢时间维相位编码, 杂波还保持较强相关性, 一方面不利于根据信号与杂波自相关性差异分离信号与干扰子空间, 杂波得到较强保留。另一方面, 由于存在交织问题, 即杂波特征成分与慢动目标多普勒特征成分存在互相关性, 使得杂波基与信号基难以得到有效分离, 最终杂波并没有得到有效抑制。

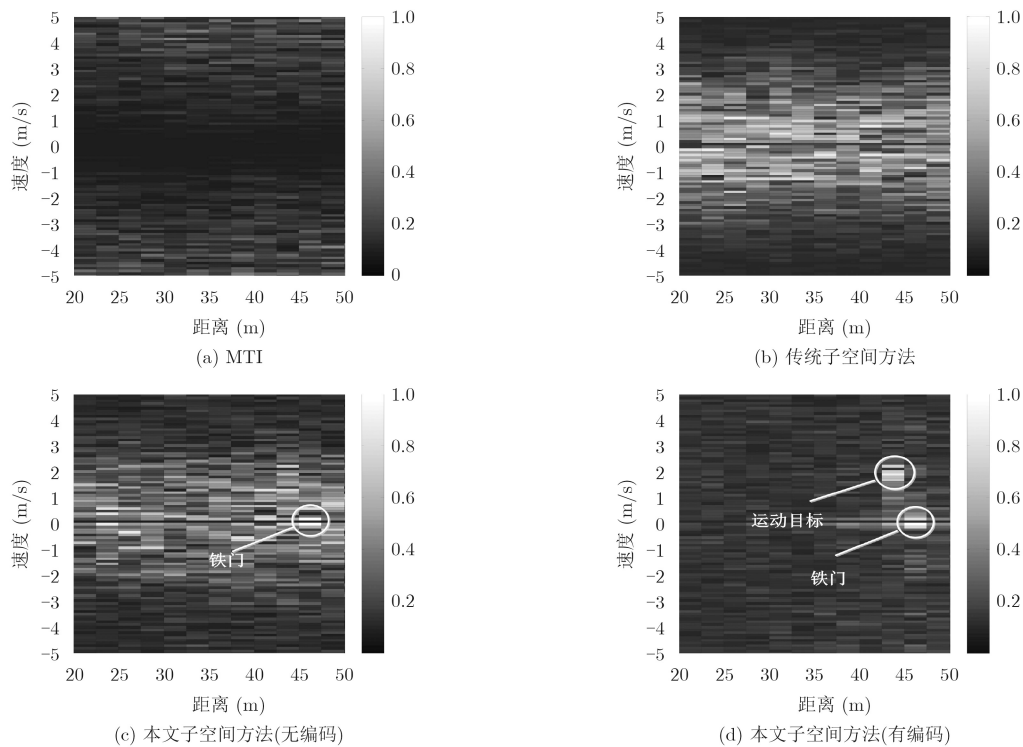


图6 杂波抑制后的距离-多普勒图

5 结束语

本文针对强杂波环境下短距慢速运动目标检测问题, 提出一种基于相位编码及子空间投影的杂波抑制方法。该方法不需要假设杂波模型, 避免了模型与实际环境不匹配的问题, 并且慢时间维Chirp相位编解码的引入, 一方面近似白化杂波, 从而能够基于杂波成分与目标信号成分自相关性差异, 构造行数为2的矩阵, 在奇异值分解后, 进行奇异值比值判决, 进而分离杂波与信号子空间, 解决杂波子空间多维度问题; 另外, 白化后杂波子

空间与信号子空间相关性被减弱, 有利于减弱其交织性, 改善杂波抑制效果。实验仿真及平台实测验证了该算法的有效性及其较传统方法更好的性能表现。

参考文献

- [1] LI C Z, PENG Z Y, HUANG T Y, *et al.* A review on recent progress of portable short-range noncontact microwave radar systems[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2017, 65(5): 1692–1706. doi: 10.1109/TMTT.2017.2650911.

- [2] HYUN E, JIN Y S, and LEE J H. A pedestrian detection scheme using a coherent phase difference method based on 2D range-Doppler FMCW radar[J]. *Sensors*, 2016, 16(1): 124–137. doi: [10.3390/s16010124](https://doi.org/10.3390/s16010124).
- [3] TAKAHASHI R, HIRATA K, HARA T, *et al.* Coherent integration with null constraint on clutter spectrum for pulse Doppler radar[C]. IEEE Radar Conference, Atlanta, USA, 2012: 0068–0073.
- [4] MARK J W and WOODS H A. A recursive digital MTI radar filter[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1972, 60(6): 728–729. doi: [10.1109/PROC.1972.8736](https://doi.org/10.1109/PROC.1972.8736).
- [5] XIE Wenchong, ZHAO Guolin, SHAO Yinbo, *et al.* Ground moving target detection technique for airborne fire-control radar[C]. International Congress on Image and Signal Processing, Hangzhou, China, 2014: 1588–1592.
- [6] ROY A and MITRA D. Multi-target trackers using cubature Kalman filter for Doppler radar tracking in clutter[J]. *IET Signal Processing*, 2016, 10(8): 888–901. doi: [10.1049/iet-spr.2015.0540](https://doi.org/10.1049/iet-spr.2015.0540).
- [7] 陈小龙, 关键, 于晓涵, 等. 基于短时稀疏时频分布的雷达目标微动特征提取及检测方法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(5): 1017–1023. doi: [10.11999/JEIT161040](https://doi.org/10.11999/JEIT161040).
CHEN Xiaolong, GUAN Jian, YU Xiaohan, *et al.* Radar micro-Doppler signature extraction and detection via short-time sparse time-frequency distribution[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(5): 1017–1023. doi: [10.11999/JEIT161040](https://doi.org/10.11999/JEIT161040).
- [8] 罗兴旺, 张伯彦, 刘嘉, 等. 雷达数据处理中的杂波抑制方法[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(1): 37–44. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2016.01.07](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2016.01.07).
LUO Xingwang, ZHANG Boyan, LIU Jia, *et al.* Researches on the method of clutter suppression in radar data processing[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2016, 38(1): 37–44. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2016.01.07](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2016.01.07).
- [9] LIM H S, JEONG S H, and LEE K H. Rejection of road clutter using mean-variance method with OS-CFAR for automotive applications[C]. International Conference on Electrical and Control Engineering, Yichang, China, 2011: 4886–4889.
- [10] VERMA P K, GAIKWAD A N, SINGH D, *et al.* Analysis of clutter reduction techniques for through wall imaging in UWB range[J]. *Progress in Electromagnetics Research B*, 2009, 17: 29–48. doi: [10.2528/PIERB09060903](https://doi.org/10.2528/PIERB09060903).
- [11] COLONE F, O'HAGAN D W, LOMBARDO P, *et al.* A multistage processing algorithm for disturbance removal and target detection in passive bistatic radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, 2009, 45(2): 698–722. doi: [10.1109/TAES.2009.5089551](https://doi.org/10.1109/TAES.2009.5089551).
- [12] CARDINALI R, COLONE F, FERRETTI C, *et al.* Comparison of clutter and multipath cancellation techniques for passive radar[C]. IEEE Radar Conference, Boston, USA, 2007: 469–474.
- [13] ABUJARAD F, NADIM G, and OMAR A. Clutter reduction and detection of landmine objects in ground penetrating radar data using singular value decomposition (SVD)[C]. International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, Delft, 2005: 37–42.
- [14] HOU Shujie, QIU R, BROWNING J P, *et al.* Target detection with linear and kernel subspaces matching in the presence of strong clutter[C]. IEEE Radar Conference, Atlanta, USA, 2012: 0372–0376.
- [15] TIVIVE F H C, BOUZERDOUM A, and AMIN M G. A subspace projection approach for wall clutter mitigation in through-the-wall radar imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 53(4): 2108–2122. doi: [10.1109/TGRS.2014.2355211](https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2355211).
- [16] TANG Hui, WAN Xianrong, and KE Hengyu. Signal detection in clutter and noise using well-characterized subspace[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2017, 24(9): 1343–1347. doi: [10.1109/LSP.2017.2731782](https://doi.org/10.1109/LSP.2017.2731782).
- 郑霖: 男, 1973年生, 教授, 主要研究方向为无线宽带通信与定位、自适应信号处理、无线传感网络。
- 姚伟伟: 男, 1992年生, 硕士生, 研究方向为通信雷达一体化。
- 杨超: 男, 1988年生, 博士生, 研究方向为无线通信、通信雷达一体化。
- 仇洪冰: 男, 1963年生, 教授, 主要研究方向为无线通信、超宽带通信、无线传感网络。