

引用格式:刘梅,杨威,高勋章,等:基于多PRI脉压回波的单通道雷达干扰分离方法[J]. 信息对抗技术, 2024, 3(1):70-80. [LIU Mei, YANG Wei, GAO Xunzhang, et al. Interference separation method of single-channel radar based on multi-PRI pulse compression echoes [J]. Information Countermeasure Technology, 2024, 3(1):70-80. (in Chinese)]

基于多PRI脉压回波的单通道雷达干扰分离方法

刘梅, 杨威*, 高勋章, 刘永祥

(国防科技大学电子科学学院, 湖南长沙 410073)

摘要 研究了一种基于盲源分离的单通道雷达有源相干干扰抑制方法。针对伴随式干扰场景,在间歇采样转发干扰、部分脉冲密集转发干扰等有源相干干扰并存的条件下,建立了基于脉冲压缩的多脉冲重复间隔采样抗主瓣有源相干干扰模型并对其可行性进行了证明。针对现有单通道盲源分离方法在时域进行分离效果有限的问题,提出对脉压后的距离维数据进行盲源分离的思想,可在一定程度上抑制噪声对盲源分离的影响。同时,由于目标信号和干扰信号在脉冲压缩后重合度较低,可获得更好的分离效果。仿真和实测结果表明,在多个干扰源存在的条件下,本方法可有效分离真实目标回波和干扰回波。当信噪比大于5 dB时,目标脉压回波相似系数接近100%;选取虚拟通道数越多,分离效果越好。

关键词 单通道盲分离;多PRI采样;抗主瓣有源干扰;最小描述长度准则

中图分类号 TN 95

文章编号 2097-163X(2024)01-0070-11

文献标志码 A

DOI 10.12399/j.issn.2097-163x.2024.01.007

Interference separation method of single-channel radar based on multi-PRI pulse compression echoes

LIU Mei, YANG Wei*, GAO Xunzhang, LIU Yongxiang

(College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract This paper investigated a single-channel radar coherent interference suppression method based on blind source separation. For companion interference scenarios, under the co-existence of active coherent interference (such as interrupted sampling and repeater jamming and partial dense false target interference), an anti-main-lobe active interference model based on multiple pulse compression was established with feasibility demonstration. Considering that most existing single-channel blind source separation methods are operated in the time domain with limited separation effectiveness, the idea of utilizing distance-domain pulse compression data for blind source separation was proposed, which can suppress the influence of noise on blind source separation to a certain extent. At the same time, the target signal and the interfering signal have a low degree of coincidence in the distance dimension, which can achieve a better separation performance. The simulation and measured data results have shown that the proposed method has a significant suppression performance against multiple active interferences, and when SNR is greater than 5 dB, the target pulse pressure echo simi-

larity coefficient is close to 100%. Moreover, the increase of virtual channels would improve the performance of the method.

Keywords single-channel blind separation; multi-PRI sampling; anti-main lobe active interference; minimum description length(MDL) principle

0 引言

近年来,随着信息技术的迅猛发展,雷达生存环境日趋复杂。现有抗干扰技术大多针对旁瓣干扰,而对于主瓣干扰、旁瓣抗干扰方法难以发挥效能。20 世纪 80 年代, JUTTEN 和 HERAULT 首次提出盲源分离^[1-3]方法,该方法根据观测得到的混合数据向量分离出源信号,在无线通信、雷达信号处理、语音信号处理等领域得到广泛应用。在雷达抗干扰领域,可运用盲源分离方法对目标回波信号和干扰信号进行分离,以达到抗干扰效果。目前雷达抗主瓣干扰研究大多针对阵列信号处理基础上的多通道模型^[4-6]。然而随着通道数目增加,系统复杂度及成本会随之增大,且独立通道间差异引起的误差也会增大。单通道雷达只有一个接收通道,系统简单且成本较低,适用范围较广,因此对单通道雷达抗干扰的研究有一定的实用价值。

对于单通道干扰抑制问题,目前研究者主要从变换域滤波^[7-8]、信号稀疏性^[9]和一路变多路^[10-11]等方面进行研究。由于有源干扰与目标回波在时域、频域、空间域等维度高度重合,且不满足稀疏性,难以从变换域和稀疏性角度进行干扰抑制。从一路变多路角度,文献[10]提出从相邻脉冲重复间隔(pulse repetition interval, PRI)中进行盲分离的抗有源干扰方法,由于仅利用了 2 个 PRI 的回波信息,分离效果有限。文献[11]提出多 PRI 采样代替空间上多通道的虚拟通道法,在雷达受到距离密集假目标干扰情况下有一定效果,但针对的干扰类型单一、受噪声影响较大,且对信噪比要求较高。综上,现有单通道盲源分离技术大多针对线性调频信号,在干扰和目标回波重合度较高的时域上进行分离,分离效果有待提高。

本文主要针对单通道雷达在面临多样式有源相干干扰的情况下,利用雷达脉冲回波的特点,以多个 PRI 采样代替空间上多通道采样建立虚拟通道。针对现有方法存在目标信号和干扰

重合度较高,难以有效分离的问题,对多通道信号进行脉冲压缩处理,将盲源分离从时域转移到距离维进行。具体而言,首先建立多通道脉压信号数据模型,然后对信号源数目进行估计。借助盲源分离算法,分离目标脉压信号与干扰脉压信号,以达到抗干扰效果。

1 信号分离模型

1.1 单通道雷达信号接收模型

当仅有单个通道对信号进行接收时,盲源分离问题属于超欠定问题。观测通道的数量为 1,信号源的数量未知。假设信号源发射信号为:

$$s_t(t) = a_0 e^{j2\pi f_0 t} \sum_{n=0}^{N-1} u(t - nT) \quad (1)$$

式中, $u(t)$ ($t \in [0, T]$) 为雷达在 1 个脉冲重复周期内的发射波形, a_0 为发射信号的幅度, f_0 为雷达载频, T 为脉冲重复周期, N 为发射脉冲数。

设某目标与雷达的距离为 $R(t) = R_0 - v_r t$, 目标参考距离为 R_0 , 径向速度为 v_r , 则该目标产生的雷达回波为:

$$\begin{aligned} s_r(t) &= s_t(t - t_d) \\ &= a_0 \exp \left[j2\pi f_0 \left(t - \frac{2R(t)}{c} \right) \right] \\ &\quad \cdot \sum_{n=0}^{N-1} u \left(t - nT - \frac{2R(t)}{c} \right) \exp(j2\pi f_d t) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, f_d 为目标多普勒频率, $f_d = 2v_r/\lambda$; λ 为雷达波长, c 为光速。

经过相干检波后,中频信号为:

$$s_{IF}(t) = \alpha \sum_{n=0}^{N-1} u \left(t - nT - \frac{2R(t)}{c} \right) \exp(j2\pi f_d t) \quad (3)$$

式中, $\alpha \approx a_0 \exp(-j2\pi f_0 \frac{2R_0}{c})$ 。

将信号按照 PRI 进行重排,即进行分段表示,令 $\hat{t} = t - nT$:

$$\begin{aligned} s_R(t) &= \alpha \sum_{n=0}^{N-1} u \left(\hat{t} - \frac{2R(t)}{c} \right) \\ &\quad \cdot \exp [j2\pi f_d \hat{t}] \exp(j2\pi f_d nT) \end{aligned} \quad (4)$$

由于相对于光速,目标速度带来的影响可忽略,因此近似得到:

$$s_R(t) \approx \alpha \sum_{n=0}^{N-1} r_R(\hat{t}) \exp(j2\pi f_d nT) \quad (5)$$

$$r_R(\hat{t}) = u\left(\hat{t} - \frac{2R_0}{c}\right) \exp[j2\pi f_d \hat{t}] \quad (6)$$

由式(5)可见,不同 PRI 内回波的差异仅由 $\exp(j2\pi f_d nT)$ 项产生,即相邻 2 个脉冲之间相差 $\exp(j2\pi f_d T)$ 。

针对部分脉冲密集转发干扰 (partial-pulse dense transmit jamming, PDTJ) 和间歇采样转发干扰 (interrupted sampling and repeater jamming, ISRJ) 等相干干扰,由于干扰信号是在对雷达信号进行截获后形成的,通常具有与雷达发射信号相同的载频和脉冲重复频率。以密集转发干扰为例,干扰信号可表示为:

$$s_J(t) = a_J e^{j2\pi f_0 t} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{K-1} \text{rect}\left(\frac{t - kT_s - nT}{T_s}\right) \cdot u(t - kT_s - nT) \quad (7)$$

式中, a_J 为干扰信号幅度, K 为转发次数, T_s 为干扰转发周期。

假设干扰机多普勒频率为 $f_{d,J}$, 雷达接收到的干扰信号经相干检波后可表示为:

$$s_{r,J}(t) = \alpha_J \sum_{n=0}^{N-1} r_J(\hat{t}) \exp(j2\pi f_{d,J} nT) \quad (8)$$

$$r_J(\hat{t}) = \sum_{k=0}^{K-1} \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - kT_s - \tau_J}{T_s}\right) \cdot u(\hat{t} - kT_s - \tau_J) \exp(j2\pi f_{d,J} \hat{t}) \quad (9)$$

$$\alpha_J \approx a_J \exp\left(-j2\pi f_0 \frac{2R_J}{c}\right) \quad (10)$$

式中, $\tau_J = 2R_J/c$ 为干扰延时, $\hat{t} = t - nT$ 为快时间。

由此可见,对于相干干扰,经相干检波后干扰信号与真实目标回波具有类似的结构,即可写成 $\sum_{n=0}^{N-1} r(\hat{t}) \exp(j2\pi f_{d,J} nT)$ 的形式,其中 $r(\hat{t})$ 为包含时延信息的回波。因此,可通过以 PRI 为周期对回波信号进行重排,以 $\alpha_J \exp(j2\pi f_{d,J} nT)$ 项构造混合矩阵,得到多虚拟通道模型,从而实现不同信号源回波信号的盲源分离。

1.2 多 PRI 虚拟通道接收信号模型

假设干扰机和真实目标具有不同速度,在时域、频域存在混叠,雷达接收机只有 1 个接收通道。若空间中共有 M 个信号源(包括目标信号源

和干扰源),设一个 PRI 内各信号源回波信号为 $r_i(\hat{t}), i=1,2,\dots,M, r_i(\hat{t})$ 的定义见 1.1 节式(6)或式(9)。

设接收 N 个 PRI 的信号 ($N > M$), 第 l 个 PRI 内接收信号可表示为:

$$X_l(\hat{t}) = \sum_{i=1}^M r_i(\hat{t}) e^{j2\pi f_i (l-1)T} + n_l(\hat{t}) \quad (11)$$

式中, $f_i = 2v_i/\lambda$ 为第 i 个信号源的多普勒频移, $n_l(\hat{t})$ 为噪声信号, $r_i(\hat{t})$ 是待分离的信号。将 N 个 PRI 内的接收混合信号写成混合方程为:

$$\mathbf{X}_l(\hat{t}) = \mathbf{A}\mathbf{R}(\hat{t}) + \mathbf{N}(\hat{t}) \quad (12)$$

式中,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ e^{j2\pi f_1 T} & e^{j2\pi f_2 T} & \cdots & e^{j2\pi f_M T} \\ e^{j2\pi f_1 2T} & e^{j2\pi f_2 2T} & \cdots & e^{j2\pi f_M 2T} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{j2\pi f_1 (N-1)T} & e^{j2\pi f_2 (N-1)T} & \cdots & e^{j2\pi f_M (N-1)T} \end{bmatrix}_{N \times M} \quad (13)$$

$$\mathbf{R}(\hat{t}) = [r_1(\hat{t}), r_2(\hat{t}), \dots, r_M(\hat{t})]^T \quad (14)$$

$$\mathbf{N}(\hat{t}) = [n_1(\hat{t}), n_2(\hat{t}), \dots, n_N(\hat{t})]^T \quad (15)$$

考虑到单通道接收信号在时域混叠严重,对其进行脉压后再进行分离,可一定程度上改善分离效果。对各虚拟通道接收信号进行脉冲压缩,获得脉压后的信号为 $\mathbf{Y}_l(t)$ 。因此,多 PRI 虚拟通道接收信号脉压后的混合方程可表示为:

$$\mathbf{Y}(\hat{t}) = \mathbf{A}\mathbf{P}(\hat{t}) + \mathbf{N}_h(\hat{t}) \quad (16)$$

$$\mathbf{P}(\hat{t}) = [P_1(\hat{t}), P_2(\hat{t}), \dots, P_M(\hat{t})]^T \quad (17)$$

式中, $P_1(\hat{t}) = r_1(\hat{t}) * h(\hat{t}), P_2(\hat{t}) = r_2(\hat{t}) * h(\hat{t}), \dots, P_M(\hat{t}) = r_M(\hat{t}) * h(\hat{t})$ 。

$$\mathbf{N}_h(\hat{t}) = [N_{h1}(\hat{t}), N_{h2}(\hat{t}), \dots, N_{hN}(\hat{t})]^T \quad (18)$$

式中, $N_{h1}(\hat{t}) = n_1(\hat{t}) * h(\hat{t}), N_{h2}(\hat{t}) = n_2(\hat{t}) * h(\hat{t}), \dots, N_{hN}(\hat{t}) = n_N(\hat{t}) * h(\hat{t})$ 。其中, $h(\hat{t})$ 表示参考信号共轭转置, $*$ 为卷积符号。

多 PRI 通道接收脉压信号模型的导向矩阵 \mathbf{A} 具有范德蒙矩阵特性,因此 \mathbf{A} 为列满秩矩阵,其秩为 M ,可进行特征分解估计出信号源个数,并利用盲源分离等方法进行有效分离。

针对实际雷达信号接收过程,单通道雷达接收观测信号后,从通道扩展的角度出发,对单通道信号进行采样,以将单通道欠定问题转换为多通道超定盲源分离问题。假设单通道雷达的接收中频信号为 $x(t)$,以 Δ 为采样周期对其进行采样,获得

$x(t)$ 的离散形式为 $x(k\Delta)$ 。对离散信号 $x(k\Delta)$ 进行周期为 PRI 的采样,令 $L=T/\Delta$,可得:

$$\mathbf{x}^l(k) = \mathbf{x}[\{(l-1)L+k\}\Delta] \quad (19)$$

式中, $k=1,2,\dots,L$ 。将 PRI 采样信号进行重排可得,多 PRI 通道采样信号矩阵为:

$$\mathbf{X}(k) = [\mathbf{x}^1(k) \quad \mathbf{x}^2(k) \quad \cdots \quad \mathbf{x}^N(k)]^T$$

$$= \begin{bmatrix} x(\Delta) & x(2\Delta) & \cdots & x(L\Delta) \\ x(L\Delta+\Delta) & x(L\Delta+2\Delta) & \cdots & x(L\Delta+L\Delta) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x((N-1)L\Delta+\Delta) & x((N-1)L\Delta+2\Delta) & \cdots & x((N-1)L\Delta+L\Delta) \end{bmatrix} \quad (20)$$

对多 PRI 通道采样信号进行脉冲压缩,获得多 PRI 虚拟通道脉压信号 $\mathbf{Y}(k)$,即式(16)中 $\mathbf{Y}(\hat{t})$ 的离散形式。

2 基于多 PRI 回波的单通道雷达主瓣干扰分离方法

2.1 信号源数目估计

对单通道接收信号进行通道拓展后,可应用现有多通道信号源个数估计算法对信号源个数进行估计^[12-15]。由第 1.2 节得到多 PRI 虚拟通道脉压信号 $\mathbf{Y}(k)$,计算其协方差矩阵,可得:

$$\mathbf{R}_Y = \mathbf{Y}\mathbf{Y}^H/L \quad (21)$$

对式(21)中协方差矩阵进行特征值分解:

$$f_{\text{EVD}}(\mathbf{R}_Y) = \mathbf{D}\mathbf{A}\mathbf{D}^H \quad (22)$$

式中, $\mathbf{A} = \text{diag}([\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N])$ 为 \mathbf{R}_Y 的特征值, $\mathbf{D} = [d_1, d_2, \dots, d_N]$ 为对应特征向量。

本文采用基于信息论准则的 MDL^[16-18] 方法,对信号源数目作估计。信息论准则是为了解决模式识别问题而提出的,目的是给定一组观测数据在一系列参数化的概率模型中选择与观测数据最匹配的模式。将式(22)得到的特征值向量 \mathbf{A} 从大到小排列,得到:

$$\mathbf{A}_s = \text{sort}(\mathbf{A}) = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N\} \quad (23)$$

基于信息论的 MDL 方法,易得 M 的估计为:

$$f_{\text{MDL}}(M) = \min_M \left\{ -2L(N-M) \lg \frac{\left(\prod_{i=M+1}^N \lambda_i \right)^{(N-M)^{-1}}}{(N-M)^{-1} \sum_{i=M+1}^N \lambda_i} + \frac{M}{2} (2N-M) \lg L \right\} \quad (24)$$

2.2 基于 JADE 的盲源分离算法

在经过单通道拓展和信号源个数估计后,接收信号模型符合盲源分离的条件,可利用 JADE^[19-22] 盲源分离方法对目标回波进行分离。首先利用白化矩阵 \mathbf{W} 对接收信号 $\mathbf{Y}(k)$ 进行预白化,求取白化信号 \mathbf{z} 的四阶累积量矩阵,并将其对角化,进而得到酉矩阵 $\hat{\mathbf{U}}^H$,将该酉矩阵与白化信号相乘,得到分离后的信号,原理如图 1 所示。

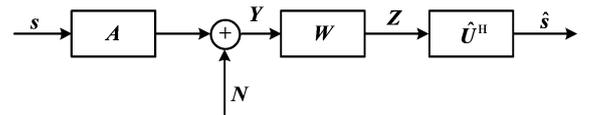


图 1 JADE 原理

Fig. 1 The principle of JADE

2.3 单通道雷达主瓣干扰分离方法

本文提出基于多 PRI 回波的单通道雷达主瓣干扰分离方法,首先通过单通道接收雷达信号,而后以 PRI 为周期对单通道进行重排,拓展成多通道信号。对重排后每个通道的信号进行脉冲压缩,利用 MDL 算法进行信号源数量估计,并以此为先验通过 JADE 盲源分离算法对混合信号进行分离。具体方法如图 2 所示。

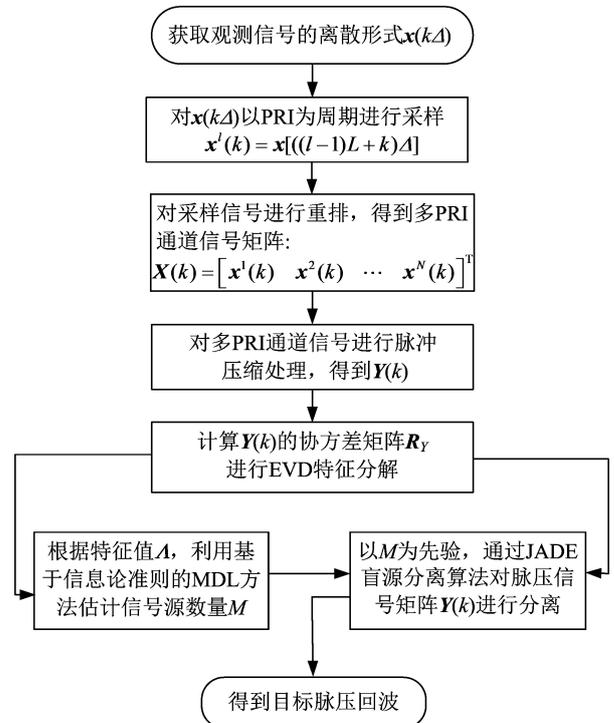


图 2 基于多 PRI 回波的单通道雷达主瓣干扰分离方法流程图

Fig. 2 Flow chart of single-channel radar main lobe jamming separation method based on multi-PRI pulse compression echoes

2.4 分离效果评价标准

单通道盲源分离算法从接收到的单路混合信号中恢复出各个源信号,通常用源信号估计值与真实值对比来评价算法的性能。常用的评价准则为波形相似系数。

设 $\mathbf{y}_m = [y_m(1), y_m(2), \dots, y_m(T)]^T$ 为分离出的信号且对应第 m 路源信号的一个估计, $t=1, 2, \dots, T$ 表示不同的采样时刻。设实际的源信号 $\mathbf{s}_m = [s_m(1), s_m(2), \dots, s_m(T)]^T$, 则估计信号与实际信号间的相似系数可作为分离性能的一个度量。其中,波形相似系数^[10]定义为:

$$\rho = \sum_{m=1}^M \frac{\left| \sum_{t=1}^T y_m(t) s_m(t) \right|}{\sqrt{\sum_{t=1}^T y_m^2(t) \sum_{t=1}^T s_m^2(t)}} \quad (25)$$

式中, M 为源信号个数,且 $0 < \rho < 1$ 。 ρ 越大意味着估计的源信号的波形越接近实际源信号,即分离算法的分离效果越好;反之,算法的分离效果越差。

3 实验验证

为验证本文方法的可行性和有效性,在仿真场景中模拟多种干扰信号进行实验。假设场景中共有 3 个信号源,分别为线性调频信号目标源、间歇采样直接转发干扰源、密集转发干扰源。发射 LFM 信号脉宽为 $20 \mu\text{s}$,带宽为 10 MHz,采样频率 20 MHz, PRI 为 $100 \mu\text{s}$,发射脉冲数为 32。间歇采样直接转发干扰采样周期为 $10 \mu\text{s}$,占空比为 0.5,转发时延为 $5 \mu\text{s}$ 。密集转发干扰采样时长为 $5 \mu\text{s}$,转发时延为 $5 \mu\text{s}$,每隔 $7.5 \mu\text{s}$ 转发 1 次,共转发 5 次。各信号源速度设置见表 1 所列。

表 1 信号源参数设置

Tab. 1 Signal source parameter settings

信号类型	速度/(m/s)	距离/km
目标信号源	30	3.0
间歇采样直接转发干扰	100	3.5
密集转发干扰	200	4.0

3.1 多类型有源干扰下信号分离效果

本文方法对信号进行单通道接收后以 PRI 为周期进行重排,并进行脉冲压缩。2 个干扰源的干信比(JSR)均设置为 20 dB,噪声为白噪声,

信噪比(SNR)为 10 dB,图 3 为第一个 PRI 脉冲压缩数据的距离维结果。多种信号经脉压后重叠,目标信号被湮没在干扰中,且干扰信号幅值较大,严重干扰后续目标识别。

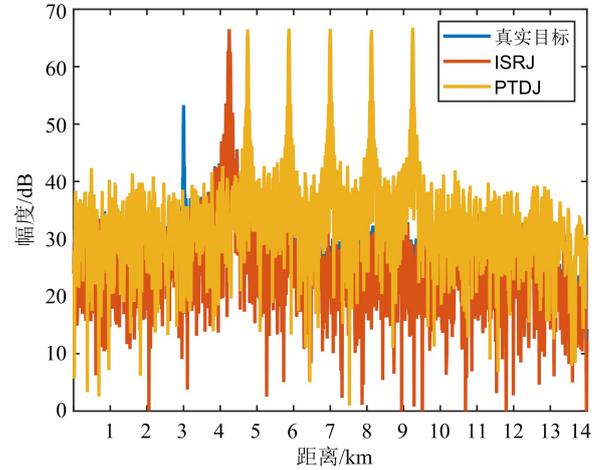


图 3 分离前脉压数据

Fig. 3 Compression data before separation

将重排的 32 个 PRI 脉压数据矩阵作为输入,进行信号源个数估计和 JADE 盲源分离,得到 3 个通道的信号结果如图 4 所示。利用峰值点 IIS 序列^[23]可以判断,图 4(a)为真实目标,图 4(b)为间歇采样直接转发干扰,可见由于转发延迟,其假目标尖峰滞后于干扰源真实距离。图 4(c)为分离后的第 3 个通道信号波形,通过峰值点个数判断,该通道信号为密集转发干扰信号,且距离维结果与干扰源真实位置一致,5 个假目标尖峰代表进行了 5 次转发。综上所述,在有多种有源干扰存在时,本文所提多 PRI 模拟虚拟通道接收信号并在脉压后进行盲源分离的方法具有较好的分离效果,真实目标脉压信号与干扰脉压信号能够被有效抑制。

3.2 与传统方法分离效果对比

对比本文方法和文献[11]的分离效果,由于文献[11]只针对密集转发干扰,因此假设环境中仅有一个目标信号源和一个密集转发干扰源。目标信号源参数不变,干扰机距离雷达 2 000 m,采样时长为 $5 \mu\text{s}$,转发 15 次。假设 SNR 为 10 dB,分别在 JSR 为 0 dB 和 20 dB 时进行盲源分离效果比较。图 5 为分离前混合信号脉压结果,密集转发干扰形成的假目标对目标信号识别造成干扰。

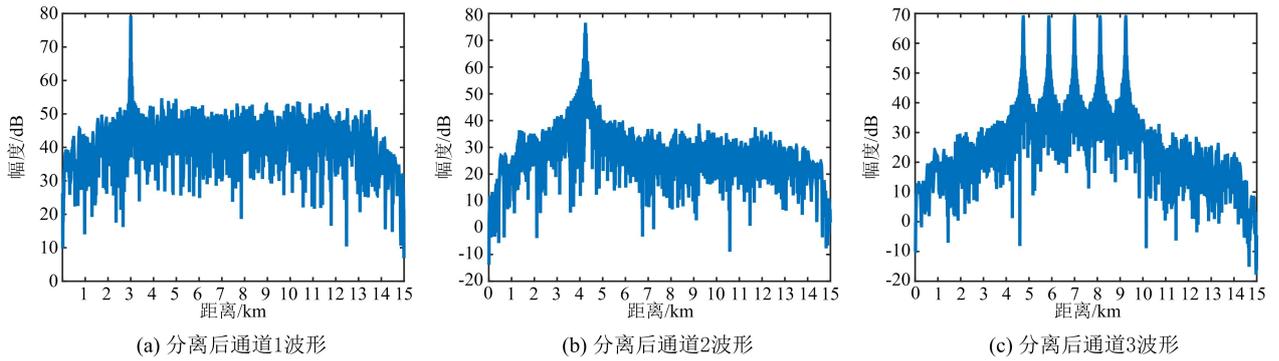


图 4 本文方法分离后各信号源脉压波形

Fig. 4 Different pulse compression waveform separated by the proposed method

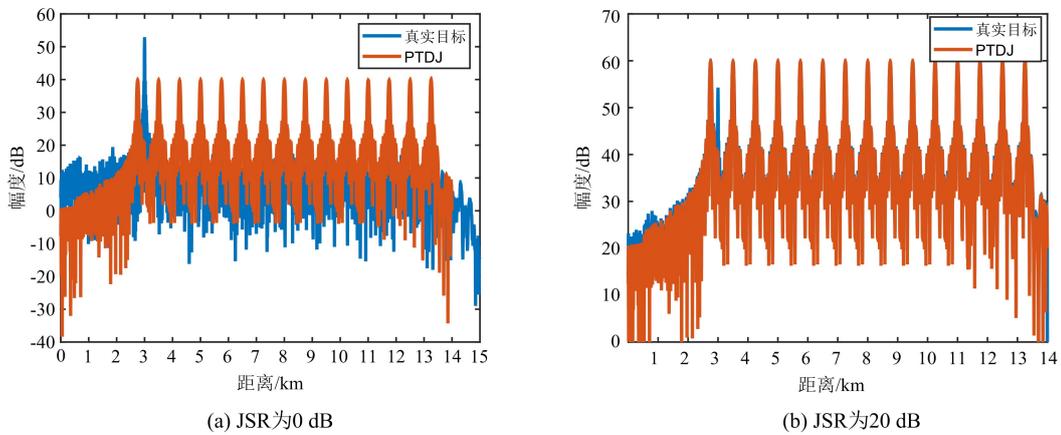


图 5 分离前脉压波形

Fig. 5 Compression data before separation

利用本文所提方法和文献[11]所提方法分别对混合信号进行单通道盲源分离,得到的结果如图 6 和图 7 所示。图 6(a)为 JSR 为 0 dB 时,采用文献[11]方法进行盲源分离后 2 个通道信号的波形,分离后通道 1 为真实目标信号,可见存在小

幅度假目标峰值;通道 2 为密集假目标信号,分离后的假目标群中包含真实目标。图 6(b)为采用本文方法进行分离后 2 个通道信号的波形,分离后通道 1 和通道 2 分别为真实目标和假目标脉压信号,可见无相互混叠情况。

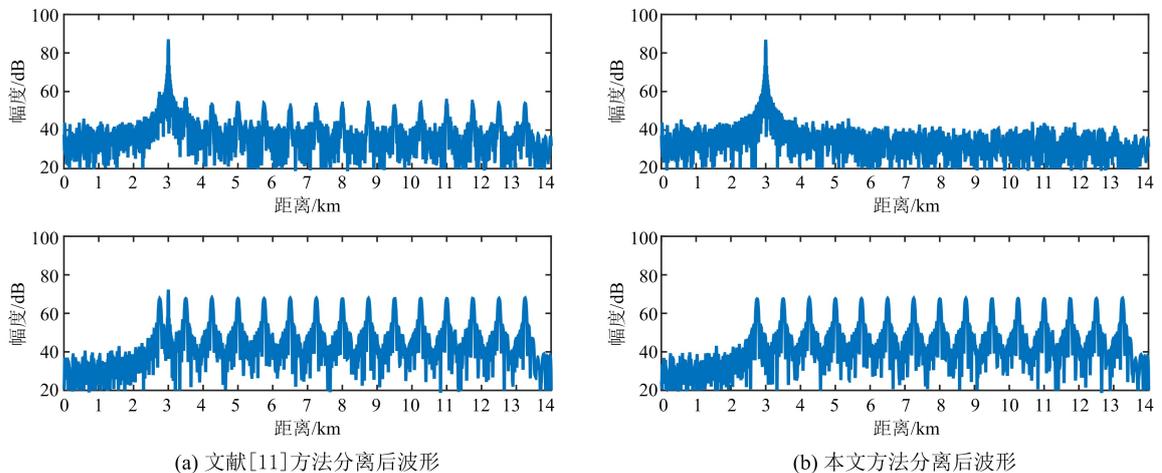


图 6 JSR 为 0 dB 时分离后结果

Fig. 6 JSR=0 dB, results after separation

当 JSR 增加到 20 dB 后,2 种方法得到的分离结果如图 7 所示。在干扰功率增大后,采用文献[11]方法分离得到的结果中目标信号通道包含的假目标干扰峰值幅度增大,通道 2 中假目标和目标信号仍然混叠。而本文所提方法在大干扰功率下仍有较好的分离效果,通过峰值检测容

易判断真实目标位于 3 km 处。综上所述,文献[11]所提方法对密集假目标干扰信号有一定的抑制作用,但在干信比较大时难以有效抑制干扰。本文方法在干扰功率较大时仍具有较好的信号分离效果和干扰抑制效果,有利于后续目标识别和参数提取。

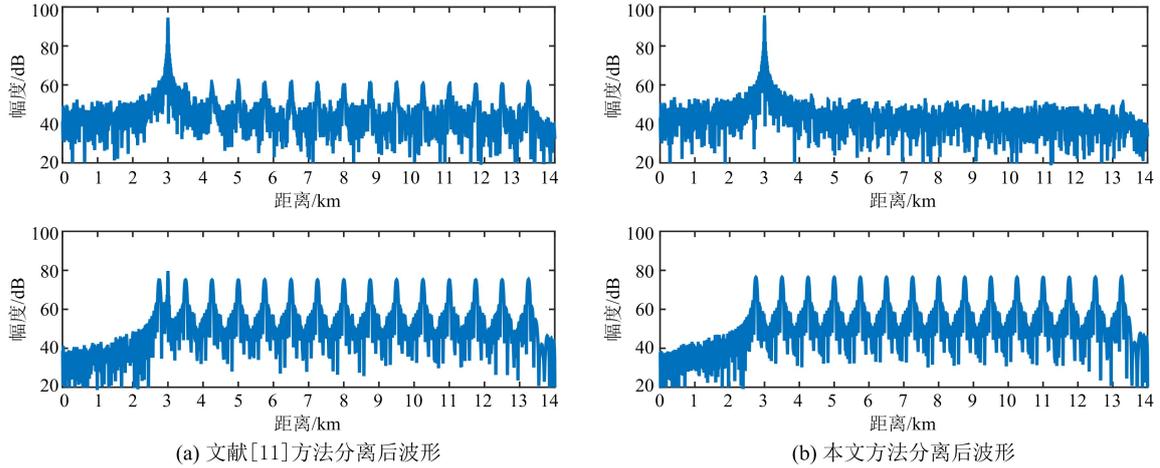


图 7 JSR 为 20 dB 时分离后结果

Fig. 7 JSR=20 dB, results after separation

3.3 实测数据分离效果

本文利用暗室实测数据对所提方法进行实验验证,场景中设置 1 台雷达样机,并利用目标模拟器模拟点目标,干扰机模拟器发射密集假目标干扰。雷达发射线性调频信号,信号脉宽为 128 μs ,带宽为 64 MHz,采样频率 600 MHz, PRI 为 500 μs ,发射脉冲数为 64。目标和干扰参数设置见表 2 所列,干扰采样后转发 5 次。

图 8(a)为干扰分离前对回波信号进行脉冲压缩后的结果图,可见除目标外还存在 5 个假目

标。图 8(b)为利用本文方法进行干扰分离后的结果,对比图 8(a),分离后脉压图仅有目标峰值点,假目标干扰被有效抑制。

表 2 目标和干扰参数设置

Tab. 2 Target and jamming parameter settings

信号类型	功率/dB	速度/(m/s)	距离/km
目标信号	-10	5	20
密集转发干扰	-10	20	33

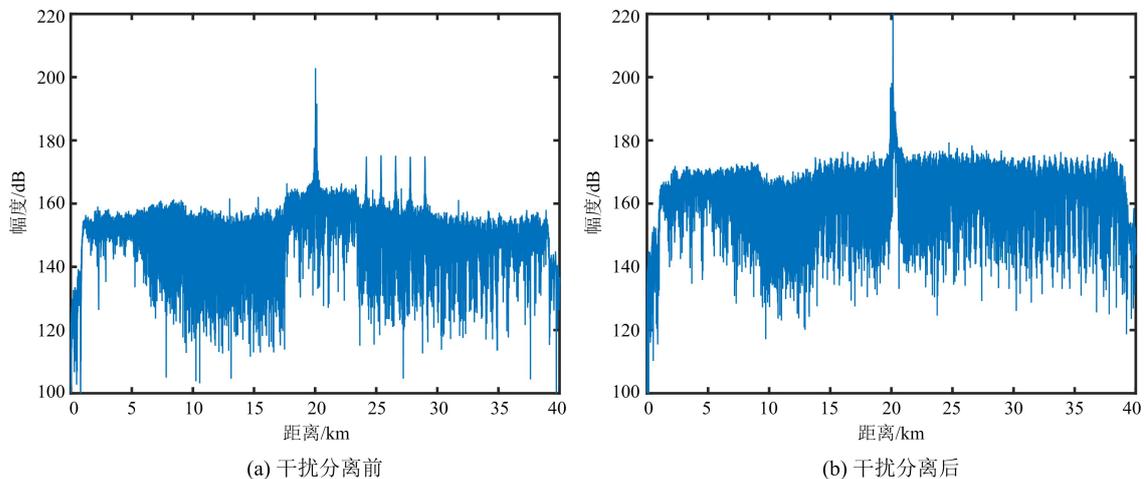


图 8 实测数据处理结果

Fig. 8 Results of measured data

3.4 方法性能分析

为分析本文方法的性能,干扰场景假设与 3.2 节相同,以波形相似度为指标,分别研究信噪比、干信比、通道数选取、干扰参数、速度对分离效果的影响。为避免结果的偶然性,进行 400 次蒙特卡洛仿真。

3.4.1 分析 SNR 对本文方法分离效果的影响

固定虚拟通道数为发射脉冲数 32,JSR 为 14 dB 不变,SNR 取 $-5 \sim 20$ dB 变化时,采用本文方法和文献[11]方法进行盲源分离后得到的波形相似度结果如图 9 所示。可以看出,随着 SNR 的提高,2 种分离方法的效果均越来越好,本文方法分离信号的波形相似度高于一文献[11]方法。在 SNR 为 -5 dB 时,本文方法分离后目标脉压信号波形相似度高于一 90%。

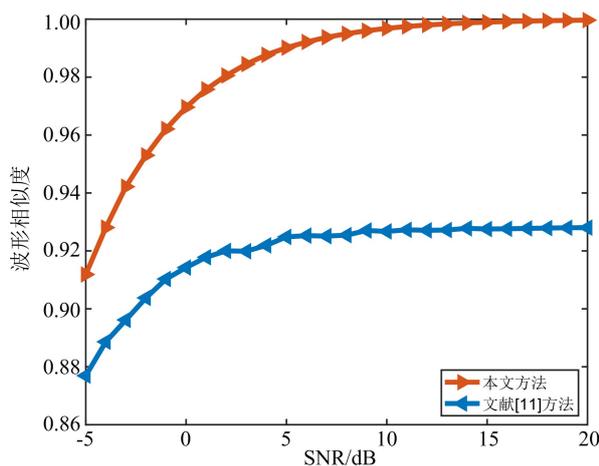


图 9 不同 SNR 下本文方法与文献[11]方法性能比较

Fig. 9 Comparison of the performance between the proposed method and the reference [11] method under different SNRs

3.4.2 分析 JSR 对本文方法分离效果的影响

由于 SNR 大于 10 dB 时 2 种方法波形相似度趋于稳定,选取 SNR 为 10 dB。JSR 为 $-10 \sim 20$ dB 时,得到的波形相似度如图 10 所示。在不同 JSR 下,2 种方法的波形相似度几乎不变,对干信比不敏感,且本文方法相似度始终高于文献方法。

3.4.3 分析虚拟通道数对方法性能的影响

固定 JSR 为 10 dB,SNR 分别为 10 dB 和 -5 dB,研究虚拟通道数对方法性能的影响,得到的结果如图 11 和图 12 所示。在不同通道数下,本文方法分离信号的波形相似度始终高于文献[11]方法。同时,随着选取的虚拟通道数(PRI 个

数)增多,分离时取用的数据量增大,2 种方法的分离效果越好。这是由于虚拟通道数越多,信号的有效信息量越大,盲源分离模型由欠定转化为正定,方法分离性能提升。对比图 11 和图 12,SNR 对分离效果有一定程度的影响,SNR 减小时波形相似度也随之减小,与图 9 得到的结论一致。

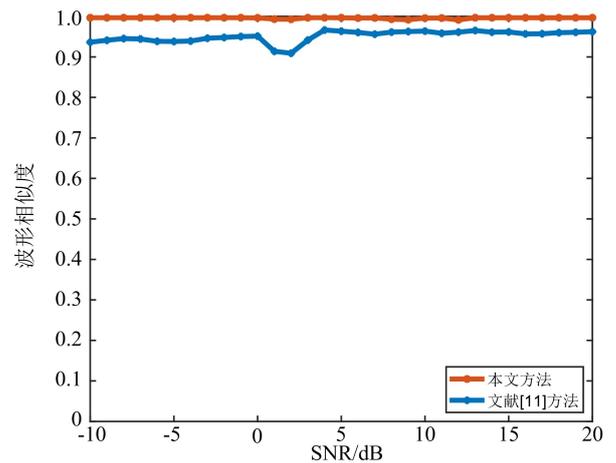


图 10 SNR 为 10 dB 时不同 JSR 下本文方法与文献[11]方法性能比较

Fig. 10 Comparison of the performance between the proposed method and the reference [11] method under different JSRs with SNR being 10 dB

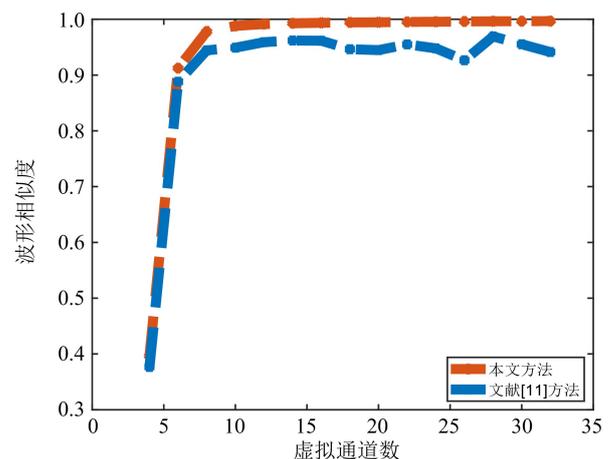


图 11 SNR 为 10 dB 时不同通道数下本文方法与文献[11]方法性能比较

Fig. 11 Comparison of the performance between the proposed method and reference [11] method under different channel numbers with SNR being 10 dB

3.4.4 分析干扰参数设置对本方法分离效果的影响

固定 JSR 为 20 dB,SNR 为 5 dB。设置不同

干扰采样时长,不同干扰转发次数,即不同假目标个数,波形相似度如图 13 所示。在保证一定速度差的情况下,干扰转发次数和干扰采样周期对分离效果影响不大,分离后目标信号波形相似度稳定在 99.7%左右。因此,在具备一定分离条件的情况下,本文所提方法对干扰参数不敏感。

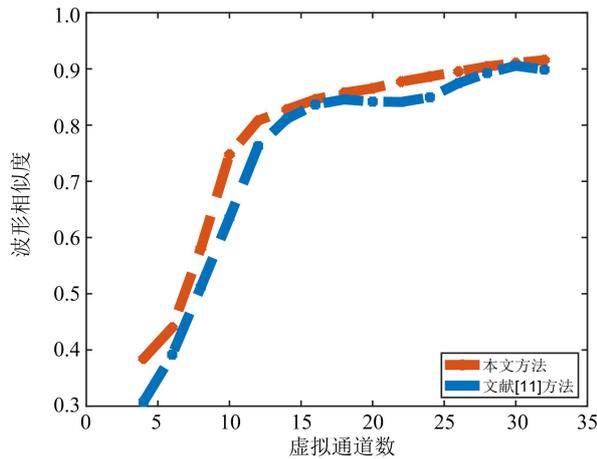


图 12 SNR 为 -5 dB 时不同通道数下本文方法与文献[11]方法性能比较

Fig. 12 Comparison of the performance between the proposed and reference [11] method under different channel numbers with SNR being -5 dB

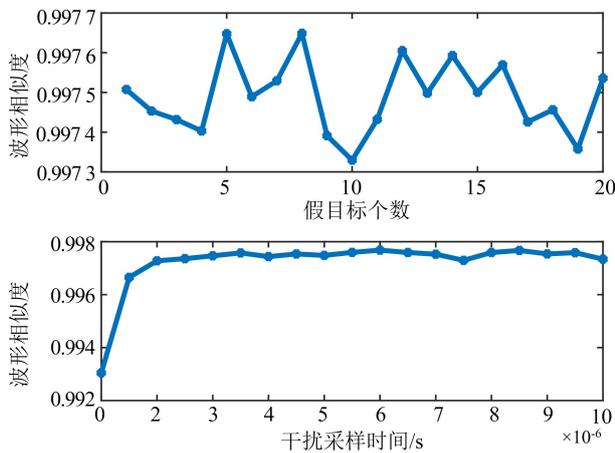


图 13 不同干扰参数下本文方法分离效果

Fig. 13 Performance of the proposed method under different jamming parameters

3.4.5 分析信号源的速度差对本文方法分离效果的影响

固定 JSR 为 20 dB, SNR 为 5 dB, 设置真实目标速度为 0(为静止目标), 干扰机速度变化, 得到的估计信号源数目和波形相似度如图 14 所示。由图 14 可见, 信号源数目估计正确后信号才能有效分离, 且分离后目标信号波形相似度可超过

90%。因此, 速度主要通过影响信号源数目估计结果从而影响盲源分离效果。为进一步研究其影响机理, 在不同 SNR 下, 获取使得信号源数目估计正确的最小速度差, 即图 14 中的跳变点, 得到的结果如图 15 所示。SNR 越小, 需要信号源之间的速度差越大。因此, 本文所提方法需要各信号源之间有一定速度差, 才能实现对信号源数目的准确估计, 从而有效分离混合信号。

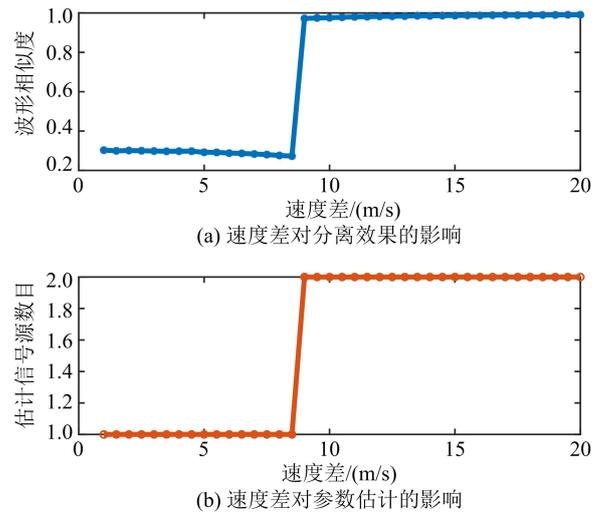


图 14 不同速度差对本文方法性能的影响

Fig. 14 Performance of the proposed method under different velocity difference

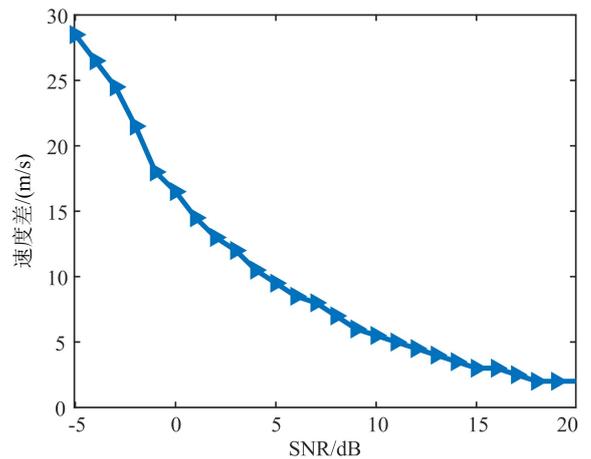


图 15 不同 SNR 下有效分离需要的速度差

Fig. 15 Velocity difference required for effective separation under different SNRs

4 结束语

本文在单通道情况下, 针对多样式主瓣有源相干干扰问题, 创新性地提出利用不同信号源多普勒频率的差异构建混合接收矩阵的思想, 以

PRI 为周期将单通道接收信号拓展为多虚拟通道接收信号,有效解决了单通道欠定问题。针对时域或频域目标信号与干扰信号重合度较高,难以进行有效分离的问题,提出对其进行脉冲压缩处理后在距离维进行分离的方法。从理论上对多 PRI 通道接收脉压信号模型进行了推导与分析,并通过仿真实验和实测数据对分离效果进行了验证。结果表明,本文方法在多样式主瓣有源干扰情况下可对目标信号进行有效分离,且分离效果优于传统方法。但本文方法的分离条件是各信号源具有一定的速度差,对目标和干扰源速度相同情况的分离还需进一步研究。

参 考 文 献

- [1] JUTTEN C, HERAULT J. Blind separation of sources, part I: an adaptive algorithm based on neuro-mimetic architecture[J]. *Signal Processing*, 1991, 24(1): 1-10.
- [2] 赵佳,杨景曙,金家保. 基于 JADE 算法的盲 DOA 估计[J]. *通信学报*, 2010, 31(8): 91-97.
ZHAO Jia, YANG Jingshu, JIN Jiabao. DOA estimation based on JADE algorithm[J]. *Journal on Communications*, 2010, 31(8): 91-97. (in Chinese)
- [3] HYVARINEN A, OJA E. Independent component analysis: algorithms and applications[J]. *Neural Networks*, 2000, 13: 411-430.
- [4] 王文涛,张剑云,李小波,等. Fast ICA 应用于雷达抗主瓣干扰算法研究[J]. *信号处理*, 2015, 31(4): 497-503.
WANG Wentao, ZHANG Jianyun, LI Xiaobo, et al. A study on radar main lobe jamming suppression algorithm based on fast ICA[J]. *Journal of Signal Processing*, 2015, 31(4): 497-503. (in Chinese)
- [5] 冶继民,张贤达,朱孝龙. 信源数目未知和动态变化时的盲信号分离[J]. *中国科学: E 辑*, 2005, 35(12): 1277-1287.
YE Jimin, ZHANG Xianda, ZHU Xiaolong. Blind signal separation with unknown number of sources and dynamic change[J]. *Science in China: Series E*, 2005, 35(12): 1277-1287. (in Chinese)
- [6] 骆鹿,王庆. JADE 算法在盲信号分离中的应用[J]. *中国新技术新产品*, 2010(4): 25-26.
LUO Lu, WANG Qing. Application of JADE algorithm in blind signal separation [J]. *China New Technologies and Products*, 2010(4): 25-26. (in Chinese)
- [7] HOPGOOD J R, RAYNER P J W. Single channel non-stationary stochastic signal separation using linear time-varying filters [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, 51(7): 1739-1752.
- [8] GRECO M, GINI F, FARINA A. Radar detection and classification of jamming signals belonging to a cone class[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(5): 1984-1993.
- [9] FEVOTTE C, GODSILL S J. A Bayesian approach for blind separation of sparse sources [J]. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 2006, 14(6): 2174-2188.
- [10] 罗双才,唐斌. 一种基于盲分离的欺骗干扰抑制算法[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(12): 2801-2806.
LUO Shuangcai, TANG Bin. An algorithm of deception jamming suppression based on blind signal separation [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(12): 2801-2806. (in Chinese)
- [11] 董玮,李小波,单凉,等. 一种雷达主瓣欺骗干扰抑制算法[J]. *现代防御技术*, 2017, 45(2): 209-216.
DONG Wei, LI Xiaobo, SHAN Liang, et al. An algorithm of radar main lobe deception jamming suppression[J]. *Modern Defence Technology*, 2017, 45(2): 209-216. (in Chinese)
- [12] MINKA T P. Automatic choice of dimensionality for PCA[C]//*Proceedings of the 14th International Conference on Neural Information Processing Systems*. [S. l. : s. n.], 2001: 598-604.
- [13] 陈松. 信号源个数估计方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
CHEN Song. A dissertation submitted for the degree of master[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008. (in Chinese)
- [14] 张洪渊,贾鹏,史习智. 确定盲分离中未知信号源个数的奇异值分解法[J]. *上海交通大学学报*, 2001, 35(8): 1155-1158.
ZHANG Hongyuan, JIA Peng, SHI Xizhi. Determination of the number of source signals in blind source separation by singular value decomposition[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2001, 35(8): 1155-1158. (in Chinese)
- [15] HUANG D S, MI J X. A new constrained independent component analysis method [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2007, 18(5): 1532-1535.
- [16] RISSANEN J. Stochastic complexity and the MDL principle[J]. *Econometric Review*, 1987, 6(1): 85-102.
- [17] FISHLER E, GROSMANN M, MESSER H. Detection of signals by information theoretic criteria: general asymptotic performance analysis[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002, 50(5): 1027-1036.

- [18] 丁健伦. 弹载相控阵雷达阵列信号处理关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.

DING Jianlun. Research on key technology of signal processing of missile phased array radar[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020. (in Chinese)

- [19] 徐小红, 高隽, 范之国. 盲信号分离中信号源数目估计方法研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2008, 31(1): 1-4.

XU Xiaohong, GAO Jun, FAN Zhiguo. Methods for estimation of the number of sources in blind source separation[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2008, 31(1): 1-4. (in Chinese)

- [20] 王瑜, 李小波, 毛云翔, 等. 基于 JADE 盲源分离算法的雷达信号研究[J]. 现代防御技术, 2017, 45(1): 147-152.

WANG Yu, LI Xiaobo, MAO Yunxiang, et al. Radar signal research based on JADE blind source separation algorithm[J]. Modern Defense Technology, 2017, 45(1): 147-152. (in Chinese)

- [21] 钱国栋. 基于 JADE 盲源分离算法的雷达抗主瓣压制干扰技术研究[J]. 科技创新与应用, 2014(17): 45-46.

QIAN Guodong. Research on radar main lobe suppression jamming based on JADE blind source separation method [J]. Technology Innovation and Application, 2014(17): 45-46. (in Chinese)

- [22] 付卫红, 周新彪, 农斌. 单通道盲源分离的研究现状与展望[J]. 北京邮电大学学报, 2017, 40(5): 1-11.

FU Weihong, ZHOU Xinbiao, NONG Bin. The research of SCBSS technology: survey and prospect[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017, 40(5): 1-11. (in Chinese)

- [23] WU W Z, ZOU J W, CHEN J, et al. False-target recognition against interrupted-sampling repeater jamming based on integration decomposition [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2021, 57(5): 2979-2991.

作者简介

刘梅

女, 1999 年生, 硕士研究生, 研究方向为智能感知与处理

E-mail: liumei18@nudt.edu.cn



杨威

男, 1985 年生, 博士, 副教授, 研究方向为智能感知与处理

E-mail: yw850716@sina.com



高勋章

男, 1972 年生, 博士, 研究员, 研究方向为自动目标识别、雷达信号处理

E-mail: gaoxunzhang@nudt.edu.cn



刘永祥

男, 1976 年生, 博士, 研究员, 研究方向为多目标检测、跟踪与分类

E-mail: lyx_bible@sina.com



责任编辑 安蓓