

A Novel Co-Frequency Resisting Radar Reconnaissance Receiver Based on Independent Component Analysis

MA Ming, LIU Ying, ZHNAG Qing-hai, ZHAO Zhi-ming

The First Aeronautic Institute of Air Force, Xinyang, 464000, China;

Abstract: Because of the coexistence of radar and wireless communication signal, radar reconnaissance receiver frequently receives the mixture of them affecting the performance of reconnaissance. As a usually communication signal analog amplitude modulation (AM) signal often interferes the reconnaissance of radar when they occupy same frequency band. To resist the interference of AM signal, the separability of linear frequency modulation radar signal and AM signal is analysed from the view of statistics and mutual information and the result shows that the two signals can be separated. Based on the result, a novel co-frequency resisting radar reconnaissance receiver for AM Interference is proposed. In this receiver two antennas are used to receive the mixtures of radar signals and AM signals, then the mixture signals are down to intermediate frequency and are separated by independent component analysis algorithm to gain a clean radar signal. Computer simulations show that the proposed receiver can resist the co-frequency AM interference in radar reconnaissance.

Keywords: independent component analysis; co-channel interference; amplitude modulation communications

一种基于独立分量分析的抗同频干扰雷达侦察接收机

马明, 刘鹰, 张庆海, 赵智明

空军第一航空学院, 河南 信阳, 中国, 464000

brightma@126.com

【摘要】 由于雷达信号与通信信号的共存, 导致雷达侦察接收机经常同时接收到同频的雷达与通信信号的混合, 影响了雷达侦察的性能。模拟调幅信号作为一种常见的通信信号, 经常会干扰雷达信号的侦察。为了抑制模拟调幅通信信号的干扰, 从统计量、互信息两个方面分析了线性调频雷达信号与模拟调幅通信信号的可分离性, 结果表明同频的线性调频雷达信号与模拟调幅信号是可以分离的。在此基础上, 提出了一种可以抑制同频调幅干扰的雷达侦察接收机, 该接收机首先利用多天线接收通信与雷达信号的混合, 然后将两路混合信号变到中频, 在中频采用独立分量分析算法将同频的雷达与通信信号分离开, 获得较为纯净的雷达信号。计算机仿真表明, 提出的分选方法可以有效地抑制雷达信号侦察时的同频调幅干扰。

【关键词】 独立分量分析; 同频干扰; 模拟调幅通信

1 引言

将独立分量分析用于分离同频的无线信号是目前研究的热点之一^{[1][2]}。如文献[3]采用3天线阵列接收, 利用盲源分离实现了3路同频PAM信号的分离, 文献[4]采用相干解调的方式实现了多路BPSK信号的分离。文献[5]采用基于盲源分离的多步处理抗干扰方法进行雷达抗干扰信号处理, 可使雷达在复杂背景下具有更强的抗干扰能力。文献[6]、[7]提出了将独立分量分析用于雷达信号分选的方法。

在雷达信号侦察中, 由于在米波段存在大量的通信信号, 导致接收到的雷达信号受到同频通信信号的干

扰。提出了一种可以抑制同频调幅干扰的雷达侦察接收机, 该接收机首先利用多天线接收通信与雷达信号的混合, 然后将该混合信号变到固定的中频, 在中频采用独立分量分析算法将同频的雷达与通信信号分离开, 获得较为纯净的雷达信号。计算机仿真表明, 提出的分选方法可以有效地抑制雷达信号侦察下的同频调幅干扰。

2 独立分量分析的数学模型

独立分量分析与盲源分离具有类似的数学模型。下面首先介绍盲源分离, 盲源分离中的“盲”指的当传输信道的特性未知时, 从接收信号的阵列中估计出源信号

的波形。理论和试验已经证明，当源信号之间是统计独立时，可以通过使分离后信号之间的互信息最小的方法，将源信号和混合矩阵估计出来。

盲源分离的基本模型如下，假设有 n 个信源，通过线性混合后，由 n 个探测器（传感器）接收，整个系统用矩阵表示如下：

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{S} + \mathbf{n} \quad (1)$$

式 (1) 中， $\mathbf{S}$ 为未知的 n 个源信号， $\mathbf{A}$ 为 $n \times n$ 的混合矩阵， $\mathbf{n}$ 为噪声， $\mathbf{X}$ 为传感器接收到的信号。当 $\mathbf{S}$ 之间是统计独立时，此时独立分量分析与盲源分离是等价的。一般情况下，假设源信号与观测信号维数相同，在噪声不存在或者可以忽略不计的情况下，这时独立分量分析的模型如下：

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{S} \quad (2)$$

独立分量分析的目标是在一定准则下，寻找矩阵 $\mathbf{A}$ 的逆矩阵的估计值 $\hat{\mathbf{A}}^{-1}$ ，得到对信源 $\mathbf{S}$ 的估计：

$$\hat{\mathbf{S}} = \mathbf{Y} = \hat{\mathbf{A}}^{-1}\mathbf{X} = \hat{\mathbf{A}}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{S} \quad (3)$$

如果 $\hat{\mathbf{A}}^{-1}\mathbf{A} = \mathbf{I}$ ，则 $\mathbf{Y} = \mathbf{S}$ ，实现了对源信号的估计。

3 FastICA 算法

20 世纪 90 年代末，Hyvarinen 等人提出基于峭度和负熵的固定点算法^[8]。FastICA 算法将非高斯极大化算法和定点迭代结合起来，具有三阶收敛速度。衡量非高斯的目标函数有两种：峭度和负熵。因此，FastICA 有两种形式：基于峭度最大化和负熵最大化的 FastICA 算法。下面分别推导基于两种代价函数的 FastICA 算法。

考虑如下关于标准峭度的梯度函数：

$$-\beta \frac{\partial \text{kurt}(\mathbf{W}^T \mathbf{z})}{\partial \mathbf{W}} = -\text{sign}(\text{kurt}(\mathbf{W}^T \mathbf{z})) [E\{\mathbf{z}(\mathbf{W}^T \mathbf{z})^3\} - 3\mathbf{W}\|\mathbf{W}\|^2] \quad (4)$$

β 是输出信号峭度的符号。当对混合信号白化后，信号的能量归一化，所以 $\|\mathbf{W}\|^2 = 1$ 。这样，每次迭代后可以将分离向量 $\mathbf{W}$ 归一化

这样，当盲源分离算法到达平衡点时：

$$\mathbf{W} = E\{\mathbf{z}(\mathbf{W}^T \mathbf{z})^3\} \quad (5)$$

由此得到两步迭代快速算法：

$$\begin{cases} \mathbf{W}(k+1) = E\{\mathbf{z}(\mathbf{W}^T(k)\mathbf{z})^3\} \\ \mathbf{W}(k+1) = \frac{\mathbf{W}(k+1)}{\|\mathbf{W}(k+1)\|^2} \end{cases} \quad (6)$$

总之，基于峭度的 FastICA 总结如下：

- 对观测数据 $\mathbf{x}$ 中心化；
- 白化中心化后的观测数据，得到信号 $\mathbf{z}$ ；
- 选择一个正交阵作为初始迭代点；
- 计算 $\mathbf{W}(k+1) = E\{\mathbf{z}(\mathbf{W}^T(k)\mathbf{z})^3\}$ ；
- 将分离向量归一化，即 $\mathbf{W}(k+1) = \frac{\mathbf{W}(k+1)}{\|\mathbf{W}(k+1)\|^2}$ ；
- 如果迭代前的分离向量与迭代后的分离向量指向同一方向，即 $|\mathbf{W}^T(k+1)\mathbf{W}(k)| = 1$ 时，终止迭代；
- 提取出一个源信号： $y(k) = \mathbf{W}(k)\mathbf{z}$ 。

4 雷达与通信信号的可分离性

雷达信号与通信信号是两种不同类型的无线电信号，采用独立分量分析分离雷达信号和通信信号的前提是这两种信号是可分离的。下面首先给出两种信号的数学形式，然后讨论两种信号的可分离性。雷达信号和通信信号的种类相当多，本文仅对脉冲压缩雷达信号和模拟调幅通信信号进行分析，这两种信号是雷达与通信中比较典型形式。

4.1 脉冲压缩雷达信号

脉冲压缩雷达能同时提高雷达的作用距离和距离分辨率。这种体制采用宽脉冲发射以提高发射的平均功率，保证足够大的作用距离；而接收时采用相应的脉冲压缩算法获得窄脉冲，以提高距离分辨率，较好的解决雷达作用距离与距离分辨率之间的矛盾。

脉冲压缩雷达最常见的调制信号是线性调频 (Linear Frequency Modulation) 信号，接收时采用匹配滤波器 (Matched Filter) 压缩脉冲。

LFM 信号(也称 Chirp 信号)的数学表达式为：

$$s_R(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) e^{j2\pi(f_c t \pm \frac{K}{2}t^2)} \quad (7)$$

式中 f_c 为载波频率， $\text{rect}(\frac{t}{T})$ 为矩形信号，

$$\text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) = \begin{cases} 1, & \left|\frac{t}{T}\right| \leq 1 \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (8)$$

$K = \frac{B}{T}$ ，是调频斜率，于是，信号的瞬时频率为

$$f_c \pm Kt \quad (-T/2 \leq t \leq T/2)。$$

4.2 调幅通信信号

模拟调幅是无线通信中比较典型的通信方式，其数学表达式如式（9）所示：

$$S_{AM}(t) = (1 + \mu_s)s(t)\cos(2\pi f_c t) \quad (9)$$

在这里， f_c 为载波频率， $s(t)$ 为携带信息的信源。模拟调幅大量用于无线通信系统中，它具有实现简单、可靠性高的特点。

4.3 雷达信号与调频信号的可分离性分析

根据独立分量分析的假设，若雷达信号与通信信号是可以分离的，它们之间应保持统计独立，并且最多有一个信号是高斯的。目前统计独立的度量主要采用互信息，高斯性的度量主要采用峭度。下面采用互信息和峭度分析雷达信号与通信信号的可分离性。雷达信号与模拟调幅信号都是超高斯信号，它们的峭度都大于零。所以满足独立分量分析的假设条件：源信号中最多有一个高斯信号。图 1 给出了雷达信号与模拟调幅信号的概率分布图。从图中可以看出，两信号的分布均为超高斯分布。雷达信号的峭度约为 15，模拟调幅信号的峭度约为 7。

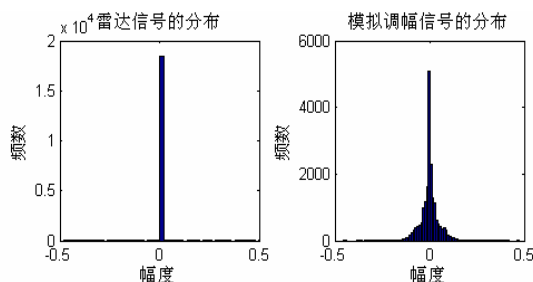


图 1 雷达信号与模拟调幅信号的概率分布示意图
Figure 1 PDF of radar signal and amplitude modulation signal

另外，由于雷达信号与调幅通信信号是由雷达和调幅发射机发射的信号，它们的互信息约为零，所以它们之间是独立的。以上两点说明，雷达信号与调幅通信信号之间是可以分离的。

以上分析了雷达信号与模拟调幅信号之间的可分离性，但是采用独立分量分析的方法分离雷达与调幅通信信号还需要利用两者之间的空间独立性，所以需要采用双天线接收。若在射频直接分离雷达信号与模拟调幅信号，所需的计算量巨大，所以先将射频信号通过混频器将接收信号的频率降低，然后在较低的中频进行分离。这里采用 FastICA 算法分离下变频之后的雷达信号与模拟调幅信号。提出的接收机结构图如图 2 所示。

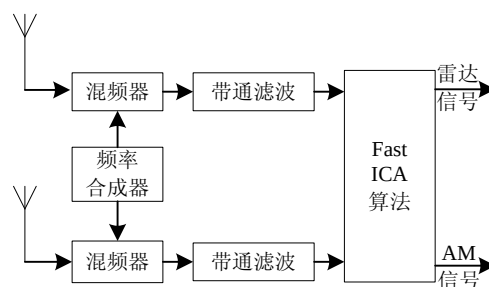


图 2 提出的接收机结构图
Figure 2 Proposed receiver scheme

5 计算机仿真

为了验证图 2 所示的接收机性能，采用 Matlab 产生雷达信号和通信信号，雷达信号的频率为 160kHz 到 250kHz，模拟调幅通信信号的载频为 180kHz，图 3 给出了单个线性调频脉冲的时域波形图和频谱图。

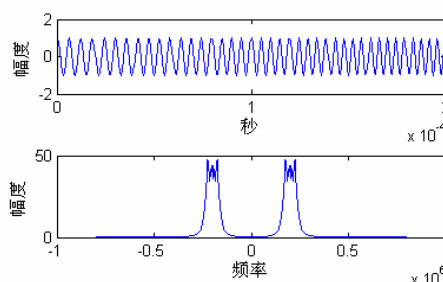


图 3 雷达脉内信号的时域波形图（上）与频谱图（下）
Figure 3 Temporal wave and frequency spectrum of radar pulse

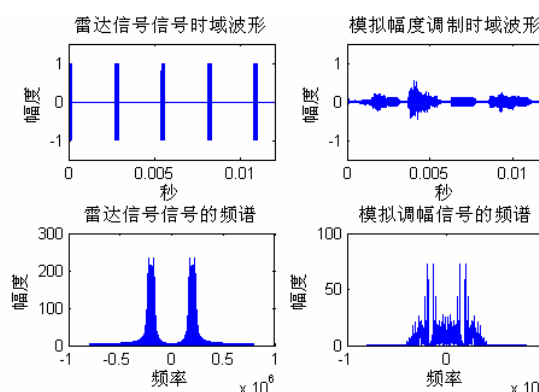


图 4 雷达信号与模拟调幅信号的波形图与频谱图
Figure 4 Temporal wave and frequency spectrum of radar signal and amplitude modulation signal

从图 3 的时域波形图可以看出，该信号的频率随着时间逐渐增大，且其频谱为一宽带信号。多个雷达信号的时域波形图及频谱图如图 4 中左边两图所示，右边两图给出了采用一中文语音对 160kHz 的载波进行幅度调制得到的调幅信号及其频谱图。比较图 4 中

的两个频谱图,可以看出雷达信号与模拟调幅信号的频谱是重合的,因此在频域是不能将两信号分离开的。

混合矩阵随机产生,这里采用 $A=[-0.783 \ 2.3093; 0.8892 \ 0.5246]$ 。天线所接收到的信号为雷达信号与模拟调幅信号的线性混合,将图4所示雷达信号与模拟调幅信号采用矩阵A混合,得到混合信号的波形及频谱图如图5所示。

图5中上两图是天线1和天线2接收到信号的时域波形图,从图中可以看出,二者是图4所示的雷达信号与模拟调幅信号的叠加,它们在频域也是叠加在一起的,不能从利用滤波器等将其分离开。

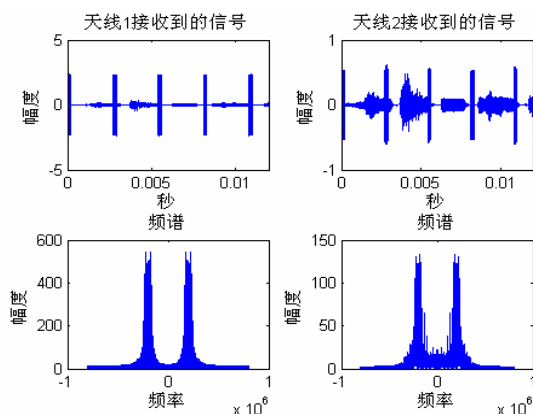


图5 两天线接收到的信号波形与频谱图

Figure 5 Temporal wave and frequency spectrum of the received signals by two antennas

采用如图2所示的接收机,分离图5给出的两信号,得到的雷达信号和调幅信号的波形图及频谱图如图6所示。比较图6与图4,可以看出,分离得到的雷达信号与调幅信号与源信号基本一致。这说明,本文提出的接收机结构可以有效地分离同频雷达信号和模拟调幅通信信号。

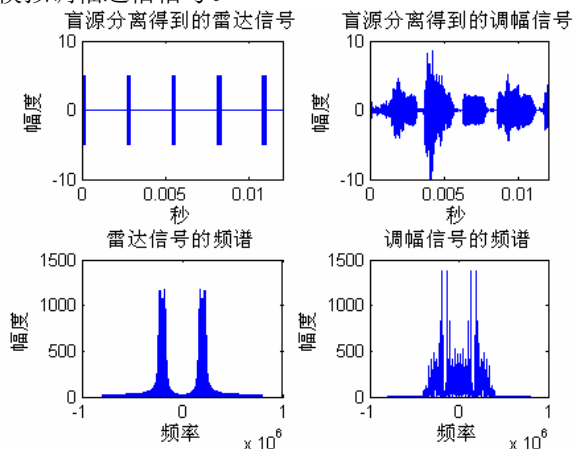


Figure 6 Temporal wave and frequency spectrum of radar signal and amplitude modulation by blind source separation
图6 盲源分离得到的雷达信号与调幅信号波形与频谱图

6 结束语

为了抑制在雷达侦察中模拟调幅通信信号对侦察接收机的影响,分析了雷达信号与模拟调幅信号的可分离性,采用独立分量分析算法构建了一种可以分离雷达信号与模拟调幅信号的接收机,用以实现同频干扰下的雷达侦察,计算机仿真表明了提出的接收机可以在同频模拟调幅干扰的条件下有效地分离出雷达信号。

由于通信信号的调制方式有多种,模拟调频、频移键控、相移键控、正交幅度调制等调制方式大量应用于现代无线通信系统,它们也可能与雷达信号处于同一频段内,如何有效地抑制上述通信信号的干扰,提高雷达侦察的性能,尚有待探讨。

References (参考文献)

- [1] Aapo Hyvärinen, Juha Karhunen, Erkki Oja. Independent Component Analysis [M]. Chichester, England: John Wiley. 2001. Chap1-3.
- [2] Cichocki A, Amari S. Adaptive blind signal and image processing: learning and applications [M]. John Wiley, Sons, Ltd, 2002. P11-23.
- [3] 张昕, 胡波, 凌曼亭, 盲信号分离在数字无线通信中的一种应用[J], 通信学报, 2000, Vol.21 (2), P73-77.
ZHANG Xi, Hu Bo, LING Hong-ting, An application of blind signal separation in wireless digital communication[J], *Journal of Communications*, 2000. 02, Vol. 21 (2), P73-77.
- [4] I. Kostanic and W. Mikhae, Blind source separation technique for reduction of co-channel interference [J], *ELECTRONICS LETTERS*, 26th September 2002, Vol. 38(20), P 1210-1211.
- [5] 黄高明, 杨绿溪, 何振亚, 一种基于盲源分离的雷达抗干扰技术[J], 电路与系统学报, 2004, 9(6), P94-99.
HUANG Gao-ming, YANG Lv-xi, HE Zhen-ya. A radar anti-jamming technology based on blind source separation [J]. *Journal of Circuits and Systems*, 2004, 9 (6), P 94-99.
- [6] 李广彪, 张剑云, 毛云祥, 一种新的雷达信号分选方法[J]. 电子对抗技术, 2005(5), P3-5.
LI Guang-biao, ZHANG Jian-yun, MAO Yun-xiang, A New Method of Radar Signal Sorting[J], *Electronic Warfare Technology*, 2005 (5), P3-5.
- [7] 李广彪, 张剑云, 基于负熵最大化 FastICA 算法的雷达信号分选[J], 舰船电子对抗, 2005(6), P22-28.
LI Guang-biao, ZHANG Jian-yun, Radar Signal Sorting Based on Negentropy-maximization Fast ICA Algorithm [J], *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2005(6), P22-28.
- [8] A. Hyvärinen et al, Fast and robust fixed-point algorithm for independent component analysis [J]. *IEEE Trans. On Neural Network*, 1999, 10 (3), P626-634.