

一种基于独立分量分析的变速跳频信号盲分离方法

王 淼, 蔡晓霞, 雷迎科

(国防科技大学电子对抗学院, 合肥, 230037)

摘要 针对当前跳频信号盲分离算法计算量大, 精确度不高的问题, 结合变速跳频信号采用不断加快的跳速和“跳速多变”的策略, 提出了一种利用信源间的独立性解决变速跳频信号盲分离问题的方法。同时, 采用负熵最大化寻优算法加快了传统独立分量分离算法运算速度。通过仿真实验与处理实际数据结果表明: 与其他方法相比, 该方法在不需要任何先验信息的条件下, 可以在低信噪比的情况下较好地分离出各个变速跳频信号, 同时能够精确恢复出变速跳频信号的跳频图案, 在 20 dB 信噪比的情况下, 分离后相似系数可以达到 99%。该研究为变速跳频信号盲分离问题提供一个新的解决途径。

关键词 变速跳频信号; 盲分离; 独立分量分析

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.05.010

中图分类号 TN911 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)05-0058-06

A Blind Separation of Variable Frequency Hopping Signals Based on Independent Component Analysis

WANG Miao, CAI Xiaoxia, LEI Yingke

(Electronic Countermeasure Institute of National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: Aimed at the problems that in the face of the increasingly complex electromagnetic environment, the feature recognition algorithm for the blind source separation of multi-frequency hopping signals is heavy in computation, and the separation result is inaccurate, in combination with the variable speed frequency hopping signal, a strategy of accelerating the hopping speed and varying the hopping speed is adopted. Simultaneously the independent component analysis method is utilized for dealing with the blind separation problem of variable speed frequency hopping signals, and the negative entropy maximization algorithm is used to accelerate the separation speed of traditional independent components. The simulation results and actual frequency hopping data show that compared with other methods this algorithm can effectively separate the multiple variable speed frequency hopping signals without any prior information and low SNR. At the same time, the time domain waveform of the variable frequency hopping signal and the corresponding frequency hopping pattern can be accurately recovered, in the case of 20 dB SNR, the separation similarity coefficient can reach 99%. The analysis mentioned above provides a new solution for the blind separation problem of the variable frequency hopping signal.

Key words: variable speed frequency hopping signal; blind separation; independent component analysis

收稿日期: 2018-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(61272333)

作者简介: 王 淼(1994—), 女, 新疆乌鲁木齐人, 硕士生, 主要从事智能信息处理研究。E-mail: wangmiao18@163.com

引用格式: 王淼, 蔡晓霞, 雷迎科. 一种基于独立分量分析的变速跳频信号盲分离方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(5): 58-63. WANG Miao, CAI Xiaoxia, LEI Yingke. A Blind Separation of Variable Frequency Hopping Signals Based on Independent Component Analysis[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(5): 58-63.

变速跳频信号采用不断加快的跳速和“跳速多变”的策略有效的弥补了常规跳频信号的不足^[1-2]。目前国内外文献涉及变速跳频信号领域的很少。独立分量分析方法(Independent Component Analysis, ICA)是盲信号分离的核心算法^[3-6],在处理常规跳频信号盲分离问题中效果良好,但速率不断变化的变速跳频信号加大了信号分离的难度^[7],当前还未见解决变速跳频信号盲分离问题的有效措施。

本论文将独立分量分析算法应用于变速跳频信号的盲分离问题,在研究变速跳频信号实现方案的基础上,使用该算法分离混合变速跳频信号。

1 信号模型

假设存在 M 个源信号:

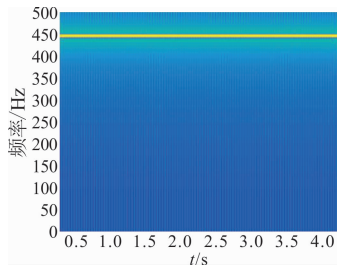
$$s(t) = \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_M(t) \end{bmatrix} = [b_1, b_2, \dots, b_m]$$

$$\begin{bmatrix} \cos(2\pi f_1 t_1 + \varphi_2) \\ \cos(2\pi f_2 t_2 + \varphi_2) \\ \vdots \\ \cos(2\pi f_m t_m + \varphi_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_T(t_1 - T) \\ g_T(t_2 - 2T) \\ \vdots \\ g_T(t_m - MT) \end{bmatrix} \quad (1)$$

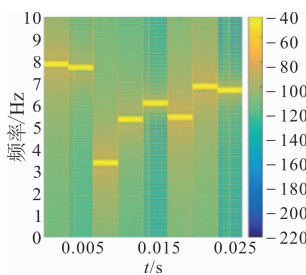
式中: b_m 为信号幅度, $m=1, 2, \dots, M$; f_m 为第 m 个信号频率; t_m 为第 m 个信号在指定频率上的持续时间; φ_m 为所对应相位; $g_T(t_m - mT)$ 为门函数, 满足:

$$g_T(t_m) = \begin{cases} 1, & |t| \leq T/2 \\ 0, & |t| \geq T/2 \end{cases} \quad (2)$$

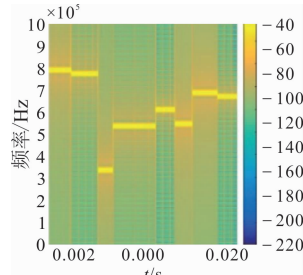
当 f_m 为定值时, 信号 $s_i(t)$ 为定频信号; 当 f_m 为变量, t_m 为定值时, $s_m(t)$ 代表定速跳频信号; 当 f_m, t_m 同时为变量时, $s_m(t)$ 代表变速跳频信号。设置不同参数值, 得到图 1 中不同信号。



(a) 定频信号时刻图



(b) 跳频信号时频图



(c) 变速跳频信号时记得图

图 1 信号时频图

图 2 为信号阵列接收图。

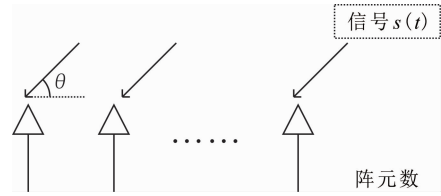


图 2 信号阵列接收图

用含有 N 个阵元的均匀阵列接收 M 个信号^[8], 第 m 个信号 ($m=1, 2, \dots, M$) 的方位参数为 θ_m , 第 n 个阵元 ($n=1, 2, \dots, N$) 接收到的信号为:

$$r_n(t) = \sum_{m=1}^M s_m(t) \exp(jn\theta_m) + n_n(t)$$

$$n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3)$$

写成矩阵形式, 记:

$$r(t) = \begin{bmatrix} r_1(t) \\ r_2(t) \\ \vdots \\ r_n(t) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \exp(j\theta_1) & \exp(j\theta_2) & \dots & \exp(j\theta_M) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \exp(j(N-1)\theta_1) & \exp(j(N-1)\theta_2) & \dots & \exp(j(N-1)\theta_M) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_M(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \\ \vdots \\ n_N(t) \end{bmatrix} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (4)$$

式中: 定义 \mathbf{A} 是 $N \times M$ 维混合矩阵; $\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t)]^T$ 是 $M \times 1$ 维信号矩阵; $n_N(t)$ 为所含噪声。

如下图所示, 盲信号分离是指针对混合信号 $r(t)$ 的混合矩阵 \mathbf{A} 未知时, 设计分离矩阵(或称解混合矩阵) \mathbf{B} , 使得其输出为:

$$y(t) = \mathbf{B}r(t) = \mathbf{B}\mathbf{A}\mathbf{s}(t) = \hat{\mathbf{s}}(t)m \quad (5)$$

式中: $\hat{\mathbf{s}}(t)$ 为信号向量 $\mathbf{s}(t)$ 的一个估计。

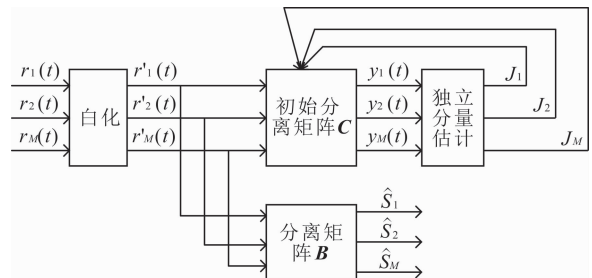


图 3 信号原理图

2 变速跳频信号分离算法

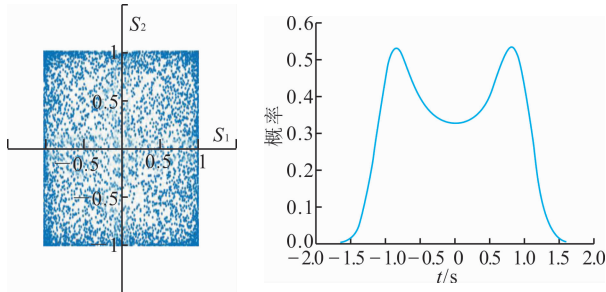
2.1 算法可行性分析

针对变速跳频信号, 本文分别从信号的独立性

方面与概率分布方面分析变速跳频信号采用 ICA 算法分离信号的可行性。

1) 独立性分析: 假设存在 2 个变速跳频信号 $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$, 源信号矩阵为 $\mathbf{S}=[s_1(t), s_2(t)]^T$, 图 4(a) 为 \mathbf{S} 的 2 个分量散点图, 可以看出当各分量之间分布呈现方形, 此时 2 个分量相互独立, 满足独立性条件, 可以采用独立分量分析方法进行信号分离。

2) 概率分布分析: 假设变速跳频信号 $s_i(t)$ 的概率密度为 $p_s(s_i)$, 任选一源信号 $s_i(t)$, 其概率密度分布如图 4(b) 所示。



(a) 变速跳频信号散点图

(b) 变速跳频信号 $s(t)$ 概率分布

图 4 算法可行性分析

理论证明, 变速跳频信号满足 ICA 分离的基本前提条件。

2.2 变速跳频信号预白化处理

因变速跳频信号是非平稳信号, 应用独立分量分析方面直接处理原始非平稳信号效果不佳, 为此将原始变速跳频信号预白化处理^[11-12]。

假定接收到 2 个变速跳频信号, 经过混合得到 2 个观测信号, 混合信号模型为:

$$r_1(t) = a_{11}s_1(t) + a_{12}s_2(t) \quad (6)$$

$$r_2(t) = a_{21}s_1(t) + a_{22}s_2(t) \quad (7)$$

对长度为 M 的观测信号求均值:

$$\bar{r}_1 = \frac{\sum_{t=0}^{M-1} x_1(t)}{M-1} \quad (8)$$

$$\bar{r}_2 = \frac{\sum_{t=0}^{M-1} x_2(t)}{M-1} \quad (9)$$

混合信号的协方差矩阵 \mathbf{C} 表示为:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中:

$$C_{11} = \frac{\sum_{t=0}^{M-1} (r_1(t) - \bar{r}_1(t))(r_1(t) - \bar{r}_1(t))}{M-1} \quad (11)$$

$$C_{12} = C_{21} = \frac{\sum_{t=0}^{M-1} (r_1(t) - \bar{r}_1(t))(r_2(t) - \bar{r}_2(t))}{M-1} \quad (12)$$

$$C_{22} = \frac{\sum_{t=0}^{M-1} (r_2(t) - \bar{r}_2(t))(r_2(t) - \bar{r}_2(t))}{M-1} \quad (13)$$

协方差矩阵的特征值为 λ_1 和 λ_2 , 满足方程:

$$\lambda^2 - \lambda(C_{11} + C_{22}) + C_{11}C_{22} - C_{12}C_{21} = 0 \quad (14)$$

可知, $\lambda_1, \lambda_2 = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$, 本文中 $a = 1, b = -(C_{11} + C_{22}), c = C_{11}C_{22} - C_{12}C_{21}$ 。

假设 $\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix}$, 可以得到该特征值对应的特征

矢量为:

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_1 \\ \mathbf{E}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} \\ E_{21} & E_{22} \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中: $\mathbf{E}_1 = \begin{bmatrix} -C_{12} \\ C_{11} - \lambda_1 \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{E}_2 = \begin{bmatrix} -C_{12} \\ C_{11} - \lambda_2 \\ 1 \end{bmatrix}$, 对特征矢量

矩阵进行归一化处理, 得: $\mathbf{E}' = \begin{bmatrix} E'_{11} & E'_{12} \\ E'_{21} & E'_{22} \end{bmatrix}, E'_{11} =$

$\frac{E_{11}}{\sqrt{E_{11}^2 + E_{12}^2}}$, 依此类推得 $E'_{12}, E'_{21}, E'_{22}$ 。

最后, 利用公式 $X_w = (\mathbf{E}'\mathbf{D}^{-0.5} \cdot \mathbf{E}'^T) \cdot r(t)$, 完成对变速跳频信号的白化过程, 处理后的数据满足均值等效为 0, 方差等效为 1。

2.3 最优化算法

变速跳频信号经过白化处理后, 选取评价信号独立性的测度。基于信息论准则^[13-14], 互信息可以用作判断随机变量是否独立的测度。引入负熵定量分析互信息, 负熵表达式如下:

$$J(\mathbf{y}) = H(y_{\text{gauss}}, \mathbf{B}) - H(\mathbf{y}, \mathbf{B}) \quad (16)$$

式中: y_{gauss} 是矩阵 \mathbf{B} 中高斯信号的输出; $J(\mathbf{y})$ 是将 \mathbf{B} 矩阵作为自变量的对比函数。

将互信息用负熵表示:

$$I(\mathbf{y}) = J(\mathbf{y}) - \sum_{i=1}^n J(y_i) \quad (17)$$

式(17)揭示了利用独立分量分析求解矩阵 \mathbf{B} 的精髓: 输出向量 \mathbf{y} 的互信息 $I(\mathbf{y})$ 最小化等价于输出各分量 y_i 的负熵 $\sum_{i=1}^n J(y_i)$ 最大化, 从而达到输出分量之间尽可能相互独立的目标。

为了算法运算速度提高, 分离结果稳定, 在满足条件 $E\{(\mathbf{b}^T \mathbf{r}(t))^2\} = 1$ 的情况下, 固定点算法规定负熵最大化对比函数如下:

$$J_G(\mathbf{b}) = [E\{G(\mathbf{b}^T \mathbf{r}(t))\}] - E\{G(\mathbf{v})\}^2 \quad (18)$$

式中: $G(\cdot)$ 是任意的非二次型函数; \mathbf{v} 是零均值方差为

1 的高斯随机向量,其中 $G(\cdot)$ 有 3 种选择^[15]:

$$G_1(u) = \frac{1}{a_1} \log \cos(a_1 u) \quad (19)$$

$$G_2(u) = -\frac{1}{a_2} \exp(-a_2 u/2) \quad (20)$$

$$G_3(u) = \frac{1}{4} u^4 \quad (21)$$

式中: u 为混合信号。

对 M 个源信号约束子优化问题的求解:

$$\mathbf{b}_i = \arg \min \sum_{i=1}^n J_G(\mathbf{b}_i) \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (22)$$

约束条件为满足正交性原则 $E\{(\mathbf{b}_i^T \mathbf{r}(t))(\mathbf{b}_j^T \mathbf{r}(t))\} = \delta_{ij}$ 。

对 ω 进行迭代寻优:

$$\mathbf{b}_{p+1} \leftarrow \mathbf{b}_{p+1} - \sum_{j=1}^p \mathbf{b}_{p+1}^T \mathbf{C} \mathbf{b}_j \mathbf{b}_j \quad (23)$$

$$\mathbf{b}_{p+1} \leftarrow \frac{\mathbf{b}_{p+1}}{\sqrt{\mathbf{b}_{p+1}^T \mathbf{C} \mathbf{b}_{p+1}}} \quad (24)$$

最终得到最优 \mathbf{B} 取值,使得对比函数 $J_G(\mathbf{b})$ 最大,输出信号间独立性最强,达到分离效果。优化算法处理步骤如下:

步骤 1 选择一初始化的随机阵, $\mathbf{B}_{\text{start}} = [b_1, b_2, \dots, b_m]^T$;

步骤 2 令 $p = 1$, 计算对比函数 $J_G(\mathbf{b}) = [E\{G(\mathbf{b}^T \mathbf{r})\} - E\{G(\mathbf{v})\}]^2$ 取得最大值时 ω 值, 利用 $\mathbf{b}_p(k+1) = E\{rG'(\mathbf{b}_p^T(k)r)\} - E\{G''(\mathbf{b}_p^T(k)r)\} \mathbf{b}_p^T(k)$, 计算 $\mathbf{b}_p(k+1)$;

步骤 3 当 $|\mathbf{b}_p(k+1) - \mathbf{b}_p(k)| < \xi$ 时, 令 $p = p + 1$, 转至步骤 2, 直至 $p = n$, n 为信号数目;

步骤 4 最终得到分离矩阵 \mathbf{B} 。

上述算法是基于 ICA 准则的固定点算法,即采用选择初始分离矩阵,对一个固定的矩阵分量利用对比函数,进行负熵最大化迭代寻最优解计算,而其他的 ICA 算法,例如自然梯度算法,为了找到负熵最大点,除了利用输出分量之间的二阶统计量,必须利用高阶统计量,算法复杂度高,所以相对于其他 ICA 来说,本文的方法是一种快速的 ICA 算法。

3 信号分析实验

采用分离信号和源信号的相似系数 ξ_{ij} 作为分离性能指标:

$$\xi_{ij} = \xi(y_i, s_j) = \frac{|\sum_{l=1}^L y_i(l) s_j(l)|}{\sqrt{\sum_{l=1}^L y_i^2(l) \sum_{k=1}^n s_k^2(l)}} \quad (25)$$

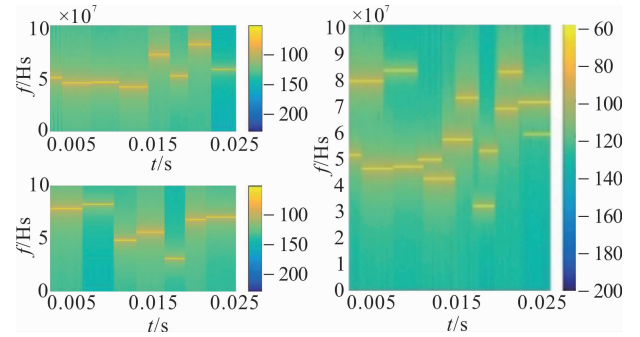
式中: $i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, M$ 。如果 $\xi_{ij} = 1$, 说明分离信号与源信号完全一样,但误差总是存在, ξ_{ij}

越接近 1, 2 个信号相似性越好;若 $\xi_{ij} = 0$, 则说明它们完全不一样。

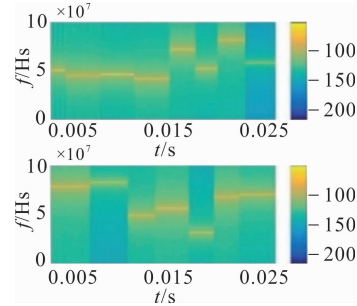
3.1 仿真实验

源信号包括 2 个异步,变速跳频信号,接收信号采样率 $f_s = 2$ MHz,采用点数为 1 024 点,分析窗长为 512。

利用分离矩阵分离信号,图 5(a)为原始信号时频图,图 5(b)为混合变速跳频信号时频图,图 5(c)为经过 ICA 算法分离的变速跳频信号时频图。



(a)原始信号时频图 (b)混合信号时频图



(c)分离信号时频图

图 5 算法结果图

由图 5 可知,ICA 算法分离性能非常好。上述仿真实验分离结果与源信号混合顺序也相同,但要清楚的知道,ICA 算法分离结果是对源信号的复制,即 $y(t)$ 相对于 $s(t)$ 只改变了幅度和各分量的排列顺序,由于信息是承载在信号波形上的,因此幅度与排列次序的不确定性不会影响信息恢复。

3.2 算法性能评估

1) 固定信噪比。

为检验算法输出信号与输入信号间的分离性能,设置快拍数为 100,信噪比固定为 20 dB,其余仿真条件不变,进行 100 次蒙特卡洛仿真,仿真后的算法分离性能见图 6。

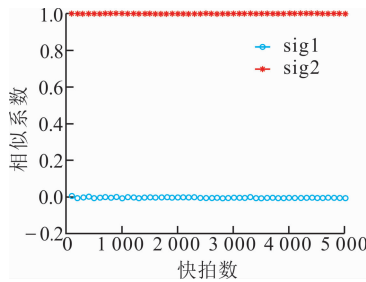
图 6 结果证明 2 个混合变速跳频信号经过 ICA 处理,各个分离信号与对应源信号之间的相似系数近似为 1,分离效果理想。

2) 不同信噪比。

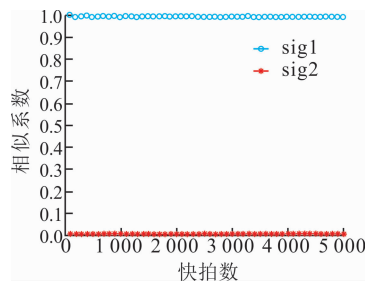
检验在不同信噪比情况下算法性能,设置信噪比从 -20 dB 到 20 dB,其余条件不变,计算不同信

噪比下信号的相似系数,得到结果见图7。

在信噪比为-20 dB时,2个输出信号与源信号之间相似系数之差不大,在0 dB之后可以清楚地看到一个输出信号与源信号相似系数趋向于0,证明两信号达到预期的分离效果。

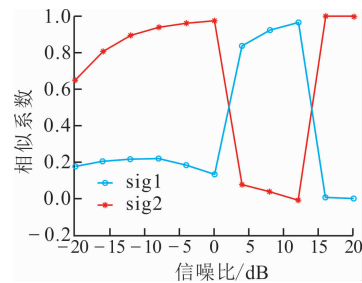


(a) 信号与源信号 1 相似系数

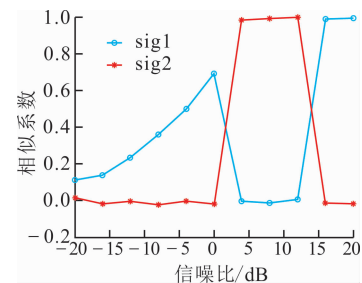


(b) 信号与源信号 2 相似系数

图6 算法相似系数评估图



(a) 信号与源信号 1 相似系数



(b) 信号与源信号 2 相似系数

图7 不同信噪比情况下相似系数

3.3 采样数据处理及算法实现

下面结合某型变速跳频电台组成的2个变速跳频正交同步网台的数据对独立分量分析分离算法进行分析验证。每个网台的变速跳频信号工作带宽为175 MHz,2个实际信号的采样率均为 $f_s = 500$ MHz。针对500 M/s的采样数据点,考虑到实际的计算量,分析数据是分别从第2.3 G采样点,第2.4 G采样点,第3.5 G采样点进行采样,截取出3段混

合最为明显得数据段进行分离。

根据本文提出的盲分离算法,采用STFT进行时频变换,得到图8~10所示等高线图和不同采样点的分离结果图。

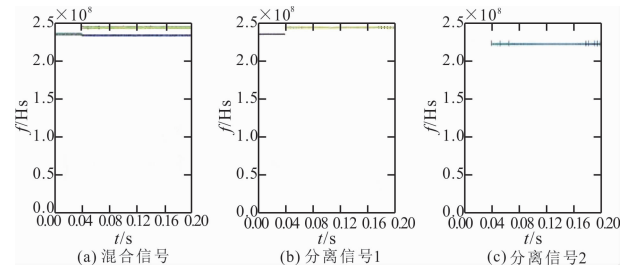


图8 2.3 G 采样点实际数据分离结果

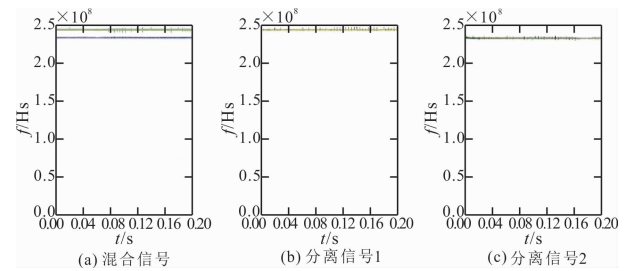


图9 2.4 G 采样点实际数据分离结果

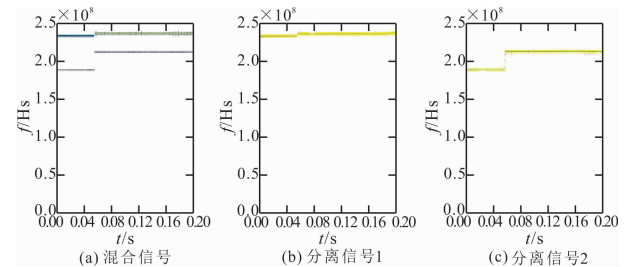


图10 3.5 G 采样点实际数据分离结果

在3个采样点处,尽管有些频率点存在混叠,有毛刺产生和信号能量发生改变,但总体上分离结果良好,尤其在2.4 G采样点处,由于信号频率在此时间段内没有发生跳变,分离效果显著。上述实验结果再一次验证了本论文将独立分量分析方法应用于变速跳频信号的盲分离问题效果显著,该算法具有很好的可行性。

4 结语

本文通过建立混合变速跳频信号模型,突破性地独立分量分析算法与变速跳频信号盲分离问题相结合,验证了算法的可行性。通过分析分离信号与原始信号之间的相似系数,说明上述算法分离效果比较理想;最后,将算法应用于实际数据分离,效果良好。在以后的工作中,一方面接着进行对独立分量分析算法的改进,另一方面,将尝试着处理变速跳频信号的欠定盲源分离问题。

参考文献(References):

- [1] 梅文华. 跳频通信[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
MEI W H. Frequency Hopping Communication[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [2] 赵维康. 变速跳频通信模块的设计与研究[D]. 长春: 长春理工大学,2011:25-28.
ZHAO W K. Design and Research of Variable Speed Frequency Hopping Communication Module [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011: 25-28. (in Chinese)
- [3] 冯平兴. 盲信号处理与分离技术研究[D]. 成都: 电子科技大学,2016.
FENG X P. Research on Blind Signal Processing and Separation Technology [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology,2016. (in Chinese)
- [4] 杨俊美,余华,韦岗. 独立分量分析及其在信号处理中的应用[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2012,40(11):1-12.
YANG J M, YU H, WEI G. Independent Component Analysis and Its Application in Signal Processing [J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition),2012,40(11):1-12. (in Chinese)
- [5] COMON P, JUTTEN C. Hand Book of Blind Sources Separate Independent Component Analysis[M]. Burlington, MA: Academic Press,2011.
- [6] KERSCHEN G. Physical Interpretation of Independent Component Analysis in Structural Dynamics [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(4):1561-1575.
- [7] CARDOSO J F. Equivariant Adaptive Independent Component Analysis Algorithm[J]. Neural Computation,1998,10(8):2013-2014.
- [8] 翟海莹,杨小牛,王文勇. 基于盲源分离的跳频网台分选[J]. 中国电子科学研究院学报,2008(4):398-402.
ZHAI H Y, YANG X N, WANG W Y. The Hopping Network Platform Sorting Based on Blind Source Separation[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2008 (4): 398-402. (in Chinese)
- [9] MATSUMOTO D, KUWAHARA Y. Heartbeat and Respiratory Monitoring Using Standing Wave Radar and Independent Component Analysis[C]// 2016 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). Okinawa:[s. n.], 2016:766-767.
- [10] 王毅,牛奕龙,陈海洋. 独立分量分析的基本问题与研究进展[J]. 计算机工程与应用,2005,41(27):28-42,82.
WANG Y, NIU X L, CHEN H Y. Basic Problems and Research Progress of Independent Component Analysis[J]. Computer Engineering and Applications, 2005,41(27):38-42,82. (in Chinese)
- [11] PIERRE C, CHRISTIAN J. Handbook of Blind Source Separation: Independent Component Analysis and Applications [M]. Burlington MA: Academic Press, 2010.
- [12] 于淼,王曰海,汪国富. 基于独立分量分析的跳频通信抗梳状阻塞干扰方法[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2012,13(6):593-598.
YU M, WANG Y H, WANG G F. Anti-Comb Jamming Method for Frequency-Hopping Communication Based on Independent Component Analysis [J]. Journal of PLA University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2012, 13(6): 593-598. (in Chinese)
- [13] BINGHAM E, HYVARINEN A. A Fast Fixed-Point Algorithm for Independent Component Analysis of Complex Valued Signals[J]. International Journal of Neural System, 2000,10(1):1-8.
- [14] PETER T. Performance Analysis of the FastICA Algorithm and Cramer-Rao Bounds for Linear Independent Component Analysis[J]. IEEE Transactions,2006,54(4):1189-1203.
- [15] BEHERAS K. Fast ICA for Blind Source Separation and its Implementation[D]. [S. l.]: National Institute of Technology,2009.

(编辑:徐楠楠)