

# LCL-FRESH 滤波器实现单通道盲源分离

何继爱 刘琳芝 李英堂

(兰州理工大学计算机与通信学院, 兰州 730050)

**摘要:** 在无线频谱检测及军事侦察的接收机中存在时频重叠信号, 利用时频域滤波及常规盲源分离方法很难实现该信号的分离和信息提取。针对此问题, 本文根据单通道时频重叠调制信号在循环谱域具有独立性和稀疏性的特点, 提出了一种通过循环谱域滤波器来实现两路源信号分离的方法: 采用周期图法对一调制信号进行循环谱估计, 得到该调制信号具有最强谱相关特性的循环频率点  $\theta$ ; 再将  $\theta$  作为 LCL-FRESH 滤波器的频移量从单通道时频重叠信号中提取出具有该循环频率的调制信号。最后, 在 MATLAB 环境下对混有白噪声的 QPSK 和 BPSK 两路时频重叠信号进行仿真验证, 结果表明该方法可有效分离出两路源信号。

**关键词:** 线性共轭线性频移滤波器; 周期图; 盲源分离

**中图分类号:** TN911.7    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1003-0530(2014)02-0236-07

## Single-channel Blind Source Separation Achieved by the LCL-FRESH Filter

HE Ji-ai LIU Lin-zhi LI Ying-tang

(School of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050)

**Abstract:** Time-frequency overlapped signals existing in the wireless spectrum detection and military reconnaissance receiver, which are difficult to be separated and extracted information by using the time-frequency domain filter and conventional blind source separation method. According to the independence and sparsity of single-channel time-frequency overlapped modulation signal in cyclic spectral domain, a new method is proposed to achieve two source signals separation through the cyclic spectrum domain filter in this paper. This method can be stated as follows: Firstly, the cyclic frequency  $\theta$  is found through the cyclic frequency estimation by the periodogram, where the modulated signal has the maximum spectral correlation, using  $\theta$  as frequency shift of the LCL-FRESH filter, the modulated signals with the cyclic frequency  $\theta$  are extracted from single-channel time-frequency overlapped signal by a filter. Then, time-frequency overlapped QPSK/ BPSK signal adding white noise is simulated in the MATLAB environment. The result indicates that the two source signals can be separated effectively with this method.

**Key words:** Linear-Conjugate-Linear frequency Shift filter; Periodogram; Blind source separation

### 1 引言

在非协作通信信号接收机中, 由于多种因素, 使得单通道时频重叠信号在短波、超短波及卫星信

道等环境中广泛存在<sup>[1-3]</sup>。该类信号在时域和频域均发生混叠, 采用传统的时域或频域滤波方法难以实现混合信号中源信号的有效分离, 给信号分析和信息提取工作造成影响。针对此种问题 Hopgood 提

出了广义谱域,指出若源信号在一个广义谱域具有独立性和稀疏性,可通过构造该域上的滤波器实现两路源信号的分离<sup>[5-9]</sup>。因此,单通道时频重叠信号的分离可以通过构造一个新变换域上的滤波器来实现。

大多数通信信号在时频重叠环境下,其循环频率族会因码元速率或载波等因素不发生完全重叠。例如 BPSK 信号,在循环频率  $\theta = \{\pm 2f_0, 2f_0 \pm k/T_c\}$  处存在谱相关性,而 QPSK 信号,在循环频率  $\theta = \{\pm k/T_c\}$  处存在谱相关性<sup>[2]</sup>(其中,  $k=1, 2, 3, \dots, f_0$  为载频,  $T_c$  为码源间隔)。由此可见,一般情况下 BPSK 信号与 QPSK 信号在循环谱域不完全重叠。白噪声的能量都集中在零循环频率处,所以可由非零循环频率处循环谱特征来估计调制信号参数减少噪声影响,从而很好地估计出循环谱域滤波器的参数,提高分离精度。本文假设单通道时频重叠信号是由 BPSK 信号、QPSK 信号和白噪声混合而成,首先通过传统周期图法对 BPSK 信号进行循环谱估计,再利用循环谱线搜索<sup>[3]</sup>得出其载频和码速率估计,进一步得到其具有最强谱相关特性的循环频率点  $\theta$ ,将  $\theta$  作为 LCL-FRESH 滤波器的频移量,实现 BPSK 信号在单通道混合信号中的提取,进而获得 QPSK 信号实现单通道盲源分离。

## 2 循环平稳信号谱估计

数学上一般把均值和自相关函数为周期或者近似周期的信号称为循环平稳信号,假设信号  $x(t)$  的均值和自相关函数  $R_x(t, \tau)$  是时间  $t$  的周期函数,在循环平稳理论<sup>[4]</sup>的基础上采用传统周期图法<sup>[1]</sup>对信号进行循环谱估计,定义循环周期图为:

$$R_{x\tau}^{\theta}(t, \tau) = \frac{1}{T} \int_{t-(T-1)\tau/2}^{t+(T-1)\tau/2} x(u + \frac{1}{2}\tau)x(u - \frac{1}{2}\tau)e^{-i2\pi\theta u} du \quad (1)$$

对循环周期图进行时间平均可得循环谱密度函数为:

$$S_x^{\theta}(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} S_{x1/\Delta f}^{\theta}(t, f)_{\Delta t} \quad (2)$$

对循环周期图进行频域平滑可得循环谱密度为:

$$S_x^{\theta}(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} S_{x\Delta f}^{\theta}(t, f)_{\Delta f} \quad (3)$$

由于循环谱密度函数体现了信号的潜周期性,谱图的尖峰处刚好反应信号载频  $f_0$  和码源间隔  $T_c$  等信息,因此本文采用循环谱线搜索的方法,即在调制信号循环谱域搜索谱峰得到载频和码元速率估计值,同时确定其具有最强谱相关特性的循环频率点  $\theta$ 。

由文献[5]可知 BPSK 信号谱相关函数取频率轴  $f=0$  处的包络为:

$$|S_x^{\theta}(f=0)| = \begin{cases} \left| \frac{1}{2T_c} \left| Q\left(f_0 + \frac{\theta}{2}\right) Q^*\left(f_0 - \frac{\theta}{2}\right) \right| \right|, & \theta = \frac{n}{T_c} \\ \left| \frac{1}{4T_c} \left| Q\left(\frac{\theta \pm f_0}{2}\right) \right|^2 \right|, & \theta = \pm 2f_0 + \frac{n}{T_c} \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $\theta$  为循环频率,  $T_c$  为码元间隔,  $Q(\cdot)$  为 sinc 函数,  $f_0$  为载波频率。

从上式可以看出当  $\theta = \pm 2f_0$  时出现最大值,只考虑  $\theta = 2f_0$  时,上式变为:

$$|S_x^{\theta}(f=0)| = \frac{1}{4T_c} \left| Q\left(\frac{2f_0}{2} - f_0\right) \right|^2 = \frac{1}{4T_c} \quad (5)$$

通过式(4)和式(5)可以在 BPSK 信号的非零循环频率上搜索谱相关函数的最大值,当找到最大值后,固定其位置  $\theta_0$  便可估计出二倍载频  $f_0$ 。对于码元速率的估计,首先利用周期图平滑算法计算 N 点序列零频率处的循环谱,记录相关函数最大值的位置  $\theta_0$  后,在  $\theta > \theta_0$  的范围内搜索次谱峰信息,并记录其位置  $\theta_1$ ,最后计算码元速率为:  $f_b = (\theta_1 - \theta_0) \frac{f_0}{N}$ ,由于码元间隔的倒数为码元速率,从而得出码元间隔  $T_c$ 。通过对 BPSK 信号循环谱在非零循环频率处的谱线搜索以及参数估计,得到其具有最高谱相关特性的循环频率值为  $\theta = \{\pm 1/T_c, 2f_0, 2f_0 \pm 1/T_c\}$ ,这样便确定了 LCL-FRESH 滤波器的频移量,为单通道盲源分离打下基础。

## 3 线性共轭线性频移滤波器

线性共轭线性频移滤波器(Linear-Conjugate-Linear FREquency SHift Filter)又称为 LCL-FRESH 滤波

器<sup>[9]</sup>,是 Gardner 在频移滤波器的基础上提出利用信号循环平稳特性实现滤波的改进型频移滤波器。当输入信号为  $x(t)$  时,频移滤波器输出为  $y(t)$ :

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t, \tau) x(\tau) d\tau \quad (6)$$

其中:  $h(t, \tau) = \sum_{m=1}^M h_m(t-\tau) e^{j2\pi\theta_m\tau}$  为时不变滤波器的冲激响应,  $\theta_m$  是期望信号的循环频率,  $M$  为 FRESH 滤波器的分支数。所以  $y(t)$  的频域表达式为:

$$Y(f) = \sum_{m=1}^M H_m(f) X(f - \theta_m) \quad (7)$$

其中:  $Y(f)$ ,  $H_m(f)$  和  $X(f)$  为  $y(t)$ ,  $h_m(t)$  和  $x(t)$  频域表示,基于训练信号的频移滤波器的结构如图 1 所示:

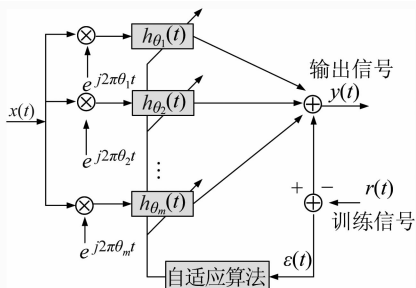


图 1 频移滤波器结构图

Fig. 1 Frequency shift filter structure

图中  $r(t)$  为训练信号,  $\epsilon(t) = y(t) - r(t)$  为误差函数,利用最小均方误差准则 (MMSE) 可以得出最优的 FRESH 滤波器的设计公式为:

$$S_{sx}^\theta(f) = S_{xx}^\theta(f) H(f) \quad (8)$$

其中:  $S_{xx}^\theta(f)$  是输入信号的谱相关密度矩阵,  $S_{sx}^\theta(f)$  是期望信号  $s(t)$  与输入之间  $x(t)$  的循环互相关密度函数矢量。从(8)式可以得出,要想确定最优滤波器的  $H(f)$ ,就得已知期望信号  $s(t)$  与输入信号  $x(t)$ ,而在通信环境中,一般无法准确获知  $s(t)$  信号,所以对期望信号的训练便成为了必需,这种方法浪费大量带宽资源,不易实现。为此, Gardner 提出 LCL-FRESH 滤波器,其频移分支的输入信号既有接收信号形式也有接收信号的共轭形式,将其不同频率搬移成分的滤波结果进行加权,以增强感兴趣的频移成分分量同时减弱干扰部分频移成分分量,其结构如图 2 中所示。

## 4 基于 LCL-FRESH 滤波器的单通道盲源分离

通过第一节对 BPSK 信号做循环谱估计,得到其具有最强谱相关特性的循环频率点  $\theta$ ,便可确定 LCL-FRESH 滤波器频移操作部分的频移量。假设滤波器的输入信号为单通道混合信号:

$$y_h(n) = x(n) + u(n) + v(n) \quad (9)$$

其中:  $x(n)$  为 BPSK 信号、 $u(n)$  为 QPSK 信号和白噪声  $v(n)$ ,三个信号分量彼此独立。由于采用非零循环频率处的循环谱特征来估计调制信号参数,可排除白噪声影响,式(9)可变为:

$$y(n) = x(n) + u(n) \quad (10)$$

将  $y(n)$  分成多路进行移频操作后作为滤波器的输入,通过一个滤波器组响应后得到输出信号  $\hat{x}(n)$ ,将  $\hat{x}(n)$  与输入信号  $y(n)$  相减得到误差函数  $\epsilon(n)$ 。

通过归一化 LMS 算法使得  $\epsilon(n)$  的均方值达到最小,得到最优的滤波器参数,从而分离出 BPSK 信号  $\hat{x}(n)$ ,误差函数  $\epsilon(n)$  则是 QPSK 信号。基于 LCL-FRESH 滤波器单通道盲源分离系统框图如图 2:

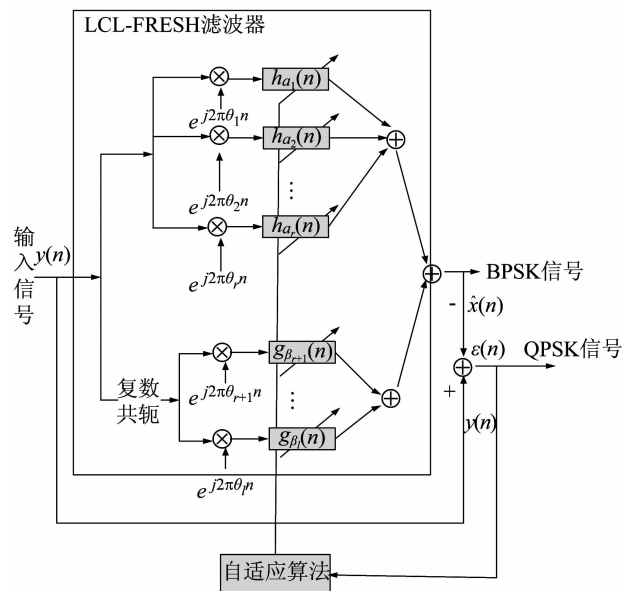


图 2 基于 LCL-FRESH 滤波器单通道盲源分离系统框图

Fig. 2 System block diagram of single-channel blind source separation based on LCL-FRESH filter

设 BPSK 信号频率族为  $\Psi_s = \{\theta_1, \theta_2 \cdots \theta_r, \theta_{r+1}, \theta_{r+2} \cdots \theta_l\}$ , 通过滤波器的输出信号为:

$$\hat{x}(n) = \sum_{\nu=1}^r h_{\theta_\nu}(n) \otimes y_{\theta_\nu}(n) + \sum_{w=r+1}^l g_{\theta_w}(n) \otimes y_{\theta_w}^*(n) \quad (11)$$

其中,  $y_{\theta_\nu}(n) = y(n)e^{j2\pi\theta_\nu n}$ ,  $y_{\theta_w}^*(n) = y^*(n)e^{j2\pi\theta_w n}$ ,  $\theta_\nu$  和  $\theta_w$  分别为输入  $y(n)$  和  $y(n)^*$  的频移, 前  $r$  个循环频率对应  $h_{\theta_\nu}(n)$ , 后面  $(l-r)$  个循环频率对应  $g_{\theta_w}(n)$ 。

$Y(f)$ ,  $X(f)$  和  $E(f)$  分别为  $y(n)$ ,  $x(n)$  和  $\varepsilon(n)$  的频域表示。

设  $W(f) = [H_{\theta_1}(f) H_{\theta_2}(f) G_{\theta_3}(f) G_{\theta_4}(f) G_{\theta_5}(f)]$ ,  $Y^\theta(f) = Y(f - \theta_\nu)$ ,  $Y^\theta(f) = Y^*(f + \theta_w)$ , 则输出信号的频谱形式为:  $\hat{X}(f) = W(f)Y^\theta(f)$ 。误差函数为  $\varepsilon(n) = \hat{x}(n) - y(n)$ , 通过自适应算法使得误差函数的均方值达到最小, 权值迭代公式选取归一化 LMS 算法如下<sup>[1]</sup>:

$$W(m+1, f) = W(m, f) + \frac{u}{\|x\|^2} Y^{\theta*}(f) E(f) \quad (12)$$

其中:  $m$  为迭代次数。

在 LCL-FRESH 自适应算法中,  $W(n, f)$  收敛满足  $Y^{\theta*}(f)E(f) \rightarrow 0$  的正交定理。

设  $S_{yx}^\theta(f) = \frac{1}{2T} Y(f + \frac{\theta}{2}) \hat{X}^*(f - \frac{\theta}{2})$ , 由  $Y^{\theta*}(f)E(f) \rightarrow 0$  可以得出:

$$S_{yy}^{\theta_\nu}(f) - S_{yx}^{\theta_\nu}(f) \rightarrow 0, S_{yy^*}^{\theta_w}(f) - S_{yx^*}^{\theta_w}(f) \rightarrow 0, \quad \nu = 1, 2, w = 1, 2, 3 \quad (13)$$

因输入信号  $y(n)$  由 BPSK 信号(期望信号)  $x(n)$  和 QPSK 信号(干扰信号)  $u(n)$  组成,  $u(n)$  与  $x(n)$  的循环频率族不重叠或重叠程度较低, 保证频移量不是干扰信号的循环频率族。则有:  $S_{yy}^{\theta_\nu}(f) = S_{yx}^{\theta_\nu}(f)$ ,  $S_{yy^*}^{\theta_w}(f) = S_{yx^*}^{\theta_w}(f)$ , 这样便证明了该算法的正确性, 再通过传统均方误差最小准则得到最优抽头系数<sup>[9]</sup>为:

$$h_{opt} = \hat{R}_{xx}^{-1}(N) \hat{R}_{xr}(N) = \langle \tilde{x}(n) \tilde{x}(n)^H \rangle_N^{-1} \langle \tilde{x}(n) r^*(n) \rangle_N \quad (14)$$

从而提取出 BPSK 信号进而获得 QPSK 信号, 实现单通道时频重叠信号的盲源分离。

### 5 仿真验证

(1) 利用循环周期图法加矩形窗对 BPSK 信号做

循环谱估计, 采样点为 1024 个点, BPSK 信号码速率为 656, 载波频率 1820, 其中  $f$  为频率,  $\theta$  为循环频率。

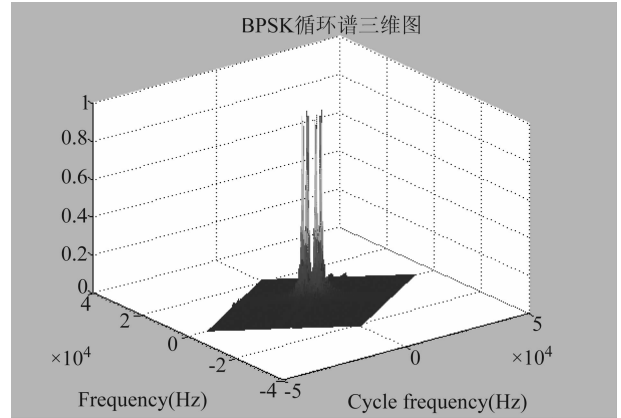


图 3 BPSK 信号的三维循环谱图

Fig. 3 The three-dimensional circulation spectrum of BPSK signals

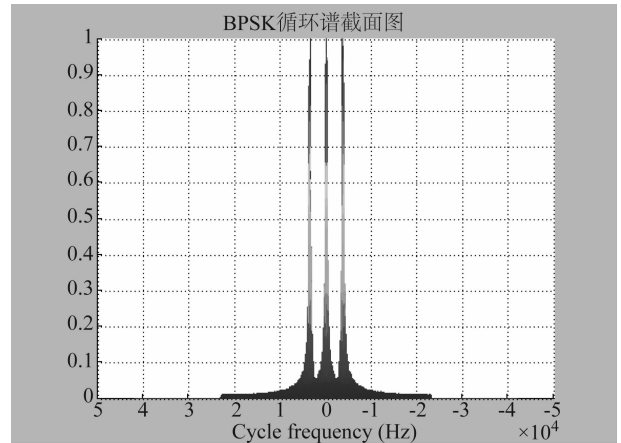


图 4 循环谱在  $f=0$  的截面图

Fig. 4 A cross-sectional view of cyclic spectrum when  $f=0$

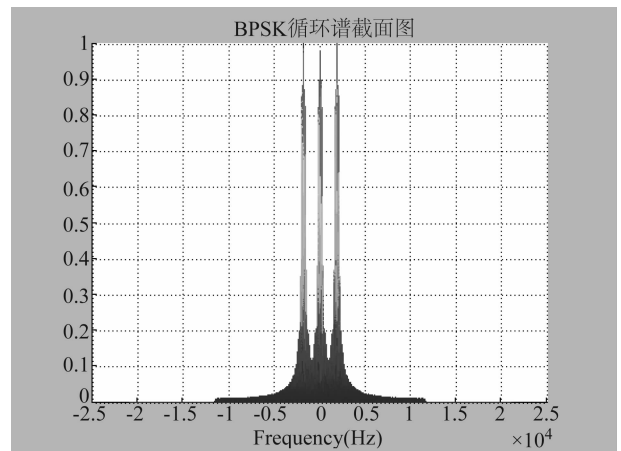


图 5 循环谱在  $\theta=0$  的截面图

Fig. 5 A cross-sectional view of cyclic spectrum when  $\theta=0$

上图所示与文中理论分析相吻合<sup>[9]</sup>,在 $\theta=0, \theta = \pm 2f_0$ 处出现最大的相关峰(其中 $f_0$ 为载波频率);当 $\theta=0$ 时,循环谱密度函数就是常规意义的功率谱密度函数。

(2) 根据文中所提到的循环谱理论分析以及仿真验证得到 LCL-FRESH 滤波器的频移量为:  $\theta_v = \{\pm 1/T_c\}$  频移值对应  $h_{\theta_v}(n)$ ,  $\theta_w = \{2f_0, 2f_0 \pm 1/T_c\}$  频移值对应  $g_{\theta_w}(n)$ ,  $\theta_v$  和  $\theta_w$  为期望信号(BPSK)具有最高谱相关特性的五个循环频率值( $f_0$ 为载波频率,  $T_c$ 为码元间隔),仿真测试中 LCL-FRESH 滤波器频移量的具体数值如下表:

表1 LCL-FRESH 滤波器的频移量

Tab. 1 The frequency shift of the LCL-FRESH filter

LCL-FRESH 滤波器的频移量	$2f_0 - 1/T_c$	$-1/T_c$	$2f_0$	$+1/T_c$	$2f_0 + 1/T_c$
	-2985.16	-656.32	3638.79	655.83	4295.16

在 LCL-FRESH 滤波器中每个 FIR 滤波器的阶数设为 6, LMS 算法采用快速块算法,每次对 1024 个采样点进行频移操作并对 FIR 滤波器求最优系数值,滤波器的抽头长度也应与采样点数相对应。

图4和图6为 BPSK 和 QPSK 的参考信号(未混合的两路源信号)在  $f=0$  的循环谱截面图,其中:  $f$  为频率, QPSK 信号的码速率为 512, 载波频率为 1208。图7为单通道混合信号在  $f=0$  的循环谱截面图:

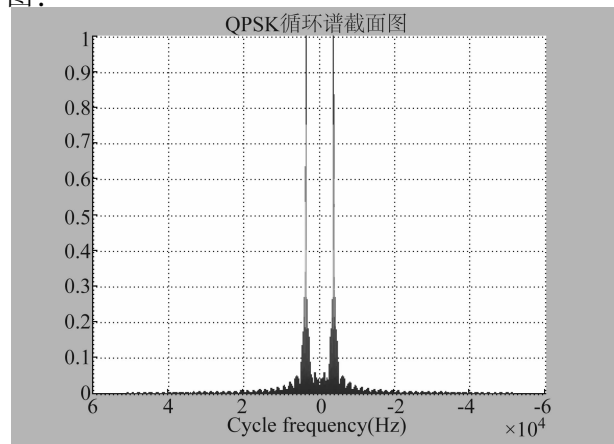


图6 QPSK 循环谱在  $f=0$  截面图

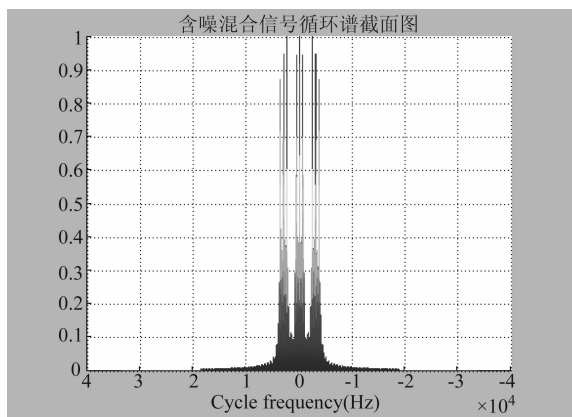


图7 含噪声混合信号循环谱在  $f=0$  截面图  
Fig. 7 A cross-sectional view of Noisy mixed-signal cyclic spectrum when  $f=0$

经过 LCL-FRESH 滤波器滤波后,输出信号  $\hat{x}(n)$  (滤波后的 BPSK 信号),以及误差函数 QPSK 信号在  $f=0$  的循环谱截面图为:

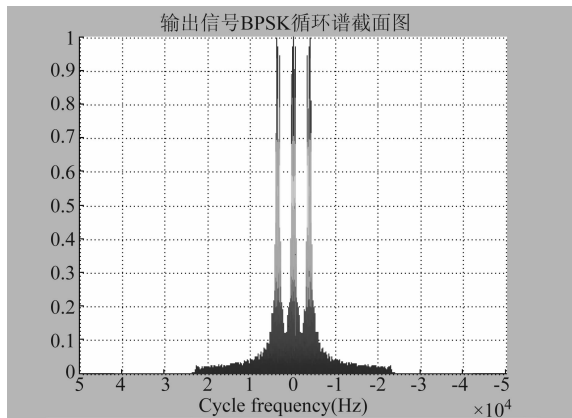


图8 滤波器输出 BPSK 信号循环谱在  $f=0$  的截面图  
Fig. 8 A cross-sectional view of Filter Output BPSK signal Cyclic spectrum when  $f=0$

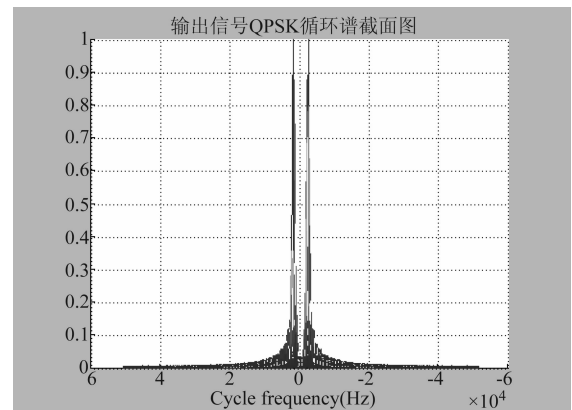


图9 输出 QPSK 信号循环谱在  $f=0$  截面图  
Fig. 9 A cross-sectional view of Output QPSK signal Cyclic spectrum when  $f=0$

通过对以上图形的观察可以看出,最后输出的 BPSK 信号和 QPSK 信号的循环谱接近于原参考信号的循环谱,本文运用相关系数来评估分离效果,分离信号与源信号相关系数为<sup>[13]</sup>:

$$\xi_{ij} = \frac{\left| \sum_{t=1}^M y_i(t) s_j(t) \right|}{\sqrt{\sum_{t=1}^M y_i^2(t) \sum_{t=1}^M s_j^2(t)}} \quad (15)$$

其中:  $y$  为分离后的输出信号,  $s$  为源信号。

相关系数可以消除单通道盲源分离结果在幅度上的差异,减小了幅度不确定性对分离系统的影响。由(15)式可以看出,如果分离效果良好,分离后的输出信号与对应的源信号之间的相关系数接近 1;如果分离效果很差,相关系数接近 0。本文关于 BPSK 信号与 QPSK 信号分离效果以及与采用虚拟通道的单通道盲源分离方法作对比的数值表示如下表所示:

表 2 分离前后相关系数

Tab. 2 Correlation coefficient of before and after separation

	分离前 相关系数	分离后 相关系数	虚拟通道方法 分离后相关系数
BPSK 信号	0.6821	0.9610	0.9312
QPSK 信号	0.7016	0.9358	0.9268

分离前相关系数分别为单通道时频混叠信号与两个源信号的相关系数,其数值都在 0.7 左右,分离后两信号与源信号的相关系数都在 0.9 以上,表明分离后的输出信号与源信号具有较好的波形相似度,并且与传统虚拟通道盲源分离方法对比相关系数得到了明显的提高,证明了利用 LCL-FRESH 滤波器进行单通道盲源分离的有效性。

## 6 结论

单通道盲源分离技术是近几年国际上兴起的一个热门研究课题,有着广阔的理论价值和前景。本文首先通过周期图法对调制信号进行循环谱估计,采用非零循环频率处循环谱特征来估计调制信号参数获得 LCL-FRESH 滤波器的频移量,消除了白噪声影响,提高分离精度;利用 LCL-FRESH 滤波器解决单通道盲源分离问题,避免了对信号的训练,具有算法复杂度低和系统简单等优点。采用

MATLAB 对两路 QPSK 和 BPSK 信号在白噪声环境下的时频重叠信号进行仿真验证,结果表明该方法可有效分离出两路源信号。

## 参考文献

- [1] 付海涛. 基于循环平稳的单信道时频重叠信号分析 [D]. 成都:电子科技大学通信与信息工程学院,2009. Fu Haitao. Single Channel Time-frequency Overlapped Signal Analysis based on Cyclostationarity [D]. Cheng Du: University of Electronic Science and Technology of china, College of Communication and Information Engineering, 2009. (in Chinese)
- [2] 赵晓迪. 基于谱分析的通信信号调制识与参数估计研究 [D]. 成都:西南交通大学信息科学与技术学院,2007. Zhao Xiaodi. Modulation Recognition and Estimation of Communication Signal based on Spectral Analysis [D]. Cheng Du: Southwest Jiaotong University, Institute of Information and Technology, 2007. (in Chinese)
- [3] 张仔兵,李立萍,肖先赐. MPSK 信号的循环谱检测及码元速率估计 [J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27 (5). Zhang Zibing, Li Liping, Xiao Xianci. Detection and chip rate estimation of MPSK signals based on cyclic spectral density [J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(5). (in Chinese)
- [4] 周福昌. 基于循环平稳信号处理的滚动轴承故障诊断方法研究 [D]. 上海:上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室,2006. Zhou Fuchang. Bearing Fault Diagnosis Method based on Cyclostationary Signal Processing [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, 2006. (in Chinese)
- [5] 杨旭涛. 直接序列扩频信号的检测和参数估计 [D]. 西安:西安电子科技大学通信工程学院,2006. Xiang Xutao. Detection and Parameters Estimation of Direct Spread Sequence Signal [D]. College of Communication Engineering, Xi'an Electronic and Science University, 2006. (in Chinese)
- [6] Kevin T. S., Tomas E. W., Sean F. M. Artifact Removal in Physiological Signals-Practices and Possibilities [J]. IEEE Transactions on information technology in biomedicine, 2012, 16(3):488-500.
- [7] Kevin T. S., Hasan A. A Methodology for Validating Ar-

- tifact Removal Techniques for Physiological Signals[J]. IEEE Transactions on information technology in biomedicine, 2012, 16(5):918-926.
- [8] Liu Ming, Matthieu C. A Novel Data-Aided Channel Estimation with Reduced Complexity for TDS-OFDM Systems[J]. IEEE Transactions on broadcasting, 2012, 58(2):247-260.
- [9] Gardner W. A. Cyclic Wiener Filtering: Theory and Method [J]. IEEE Trans. On Communication VOL, 1993, 41(1): 151-163.
- [10] 邱天爽, 毕晓辉. 稀疏分量分析在欠定盲源分离问题中的研究进展及应用[J]. 信号处理, 2008, 24(6): 966-970.  
Qiu Tianshuang, Bi Xiaohui. Sparse Component Analysis and Application for Underdetermined Blind Source Separation[J]. Signal processing, 2008, 24(6): 966-970. (in Chinese)
- [11] 张丽辉, 邱天爽, 李景春, 谭海峰. 一种基于四阶循环累积量的盲源分离方法[J]. 信号处理, 2011, 27(9): 1412-1415.  
Zhang Lihui, Qiu Tianshuang, Li Jingchun, Tan Haifeng. A Blind Source Separation Method based on the Fourth-order Cyclic Cumulant [J]. Signal processing, 2011, 27(9): 1412-1415. (in Chinese)
- [12] 蔡权伟, 魏平, 肖先赐. 单通道多信号分量分离[J]. 通信学报, 2006, 27(6): 49-56.  
Cai Quanwei, Wei Ping, Xiao Xianci. Single Channel Multicomponents Separating [J]. Journal of communication, 2006, 27(6): 49-56. (in Chinese)
- [13] 刘佳. 单通道盲源分离及其在水声信号处理中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学水声工程学院, 2011.  
Liu Jia. Research on Single Channel Blind Source Separation and Its Application in Underwater Acoustic Signal Processing [D]. Harbin: Harbin Engineering University, College of Underwater Acoustic Engineering, 2011. (in Chinese)

#### 作者简介



**何继爱** 男, 1969年12月生, 甘肃靖远人。毕业于兰州大学, 获硕士学位, 现为兰州理工大学计算机与通信学院副教授, 硕士生导师, 研究方向为盲信号处理。  
E-mail: hejiaai@lut.cn

**刘琳芝** 女, 1989年3月生, 陕西渭南人, 兰州理工大学硕士研究生, 研究方向为盲信号处理。

E-mail: fudimelingzhi@163.com

**李英堂** 男, 1973年12月生, 河南安阳人, 毕业于中国科学院研究生院, 获工学博士学位, 现为兰州理工大学计算机与通信学院副教授, 研究方向为盲信号处理。

E-mail: liyingtang2008@gmail.com