



·电磁频谱作战与电磁安全·

基于 VMD 自适应模态重组的光学下变频信号分离方法

孙世腾, 谢树果, 宋雨杭, 濮晗春

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘要: 光学下变频技术可将宽频带内全部电磁信号同时下变频到低频区间进行接收, 是一种新型宽频带电磁环境快速接收技术。但是, 获取的光学下变频信号中包含源个数未知、带宽不同的多种信号, 现有信号分离方法需要获知源信号的个数, 且无法同时分离窄带信号和宽带信号。为实现对光学下变频信号的自动分离, 提出了一种基于变分模态分解(VMD)自适应模态重组的光学下变频信号分离方法。通过频谱分割因子和频谱包络检测, 对光学下变频信号的 VMD 过分解模态进行自动重组和信号重组模态提取, 实现光学下变频信号分离。对于包含普通脉冲信号、宽带码分多址(WCDMA)信号和线性调频脉冲信号的光学下变频信号, 可自动实现对三种信号的分离, 且与原信号的相似系数均高于 0.97。实验结果表明, 所提方法在分离光学下变频信号时无需获知源信号的个数, 并能同时分离具有不同带宽的多种源信号。

关键词: 变分模态分解; 光学下变频; 单通道信号分离; 频谱分割因子; 频谱包络检测

中图分类号: TN97

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202436.230302

Optical down-conversion signal separation method based on VMD adaptive modal recombination

Sun Shiteng, Xie Shuguo, Song Yuhang, Pu Hanchun

(School of Electronic Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Optical down-conversion technology can simultaneously down-convert all electromagnetic signals within a wide frequency band to the low-frequency range for reception, and is a new type of fast reception technology for broadband electromagnetic environments. However, the obtained optical down-conversion signal contains multiple signals with unknown number of sources and different bandwidths. Existing signal separation methods need to know the number of source signals and cannot simultaneously separate narrowband and broadband signals. To achieve automatic separation of optical down-conversion signals, a method for optical down-conversion signal separation based on VMD adaptive mode recombination is proposed. By using spectral segmentation factors and spectral envelope detection, the VMD over decomposition modes of optical down-conversion signals are automatically recombined and signal recombination modes are extracted, achieving the separation of optical down-conversion signals. For optical down-conversion signals containing ordinary pulse signals, WCDMA signals, and linear frequency modulation pulse signals, this method can automatically separate the three types of signals, and the similarity coefficients with the original signal are all higher than 0.97. The experimental results show that the method proposed in this paper does not need to know the number of source signals when separating optical down-conversion signals, and can simultaneously separate multiple source signals with different bandwidths.

Key words: variational mode decomposition, optical down-conversion, single channel signal separation, spectrum segmentation factor, spectrum envelope detection

随着电信技术的迅速发展, 电磁信号覆盖的频段越来越宽。在对电磁环境进行检测时, 传统电磁环境检测方法多采用扫频的方式。通过该方式进行宽频带电磁信号检测时, 扫描时间长, 无法捕获时频猝发信号。采用光学

* 收稿日期: 2023-09-08; 修订日期: 2024-03-19

联系方式: 孙世腾, sunshiteng@buaa.edu.cn.

通信作者: 谢树果, xieshuguo@buaa.edu.cn.

下变频技术的电磁环境探测方式^[1-2],将宽频带范围内的全部电磁信号同时下变频到低频区间内进行接收,使宽频带内信号的接收不再受接收机带宽和扫频速度的限制,是电磁环境探测技术的新方向。

由于采用了光学下变频的接收方式,输出信号中包含了源个数未知、带宽不同的多种信号;同时,通过电光调制的方式对电磁信号进行接收时,电磁信号经历了电-光-电的过程,输出信号的低频区间内存在光噪声的干扰。因此,如何在源个数未知、源信号带宽未知和光噪声干扰的情况下,实现对光学下变频单通道数据中源信号的分离,是需要解决的技术问题。

对于单通道信号分离的问题,目前应用最多的是虚拟多通道技术,该方法通过将单通道信号进行分离,使用分离信号和原信号构造多维信号,将单通道信号分离转化为正定或超正定的多通道信号分离,并通过独立成分分析(ICA)等传统多通道信号分离方法实现信号的分离。文献[3-6]先后研究了基于经验模态分解(EMD)的单通道信号分离方法,并在信号降噪、语音信号分离和损伤识别等领域进行了应用。文献[7-14]先后研究了基于变分模态分解(VMD)的单通道信号分离方法,并在通信信号分离、震动信号检测、侵入过载信号检测等领域,实现了单通道中多个源信号的分离。通过设置合适的源个数和VMD本征模态带宽,基于VMD的单通道信号分离方法,可在低信噪比下实现对单通道信号的准确分离。

然而,在对光学下变频单通道信号进行分离时,受低频带范围内光噪声的影响,基于EMD的单通道信号分离方法在分离光学下变频信号时效果较差。使用基于VMD的单通道信号分离方法进行光学下变频信号分离时,受VMD本征模态带宽的限制,在混合信号中同时存在窄带信号和宽带信号时分离效果较差;同时,受光噪声的干扰,现有源个数设置方法失效。

针对光学下变频信号中源个数的估计和带宽不同源信号的分离问题,本文提出了一种基于VMD自适应模态重组的光学下变频信号分离方法。该方法首先对光学下变频信号进行VMD过分解,再使用频谱分割因子对过分解模态进行重组,最后通过频谱包络检测实现对光学下变频信号中源个数的自动估计和不同带宽源信号的分离。实验结果表明,本文方法在分离光学下变频信号时无需获知源信号的个数,并能同时分离带宽不同的多种信号。

1 算法及原理

VMD算法可在低信噪比下实现对单通道信号的准确分离,但受二次惩罚因数的限制,该算法不能同时适用于窄带信号和宽带信号的分离,使用时还需要预先获知分离信号中包含源信号的个数。本文方法对VMD算法进行了改进,通过频谱分割因子对VMD过分解模态进行重组,并根据底噪包络检测的方法对源信号重组模态进行提取,实现了光学下变频信号中源信号个数的自动估计和具有不同带宽的多个源信号的同时分离。

1.1 变分模态分解

变分模态分解(VMD)是一种基于维纳滤波和希尔伯特变换的新的自适应分解方法^[15]。

设待分解的信号为 $f(t)$,即

$$f(t) = \sum_{k=1}^K u_k(t) + \eta \quad (1)$$

式中: $u_k(t)$ 表示分解后信号的各个模态分量; K 表示预设的分解模态的个数; η 表示待分解信号 $f(t)$ 与分解后各模态分量的残差。

对于给定的待分解信号 $f(t)$,需要找到 K 个窄带模态分量,并且使每个窄带模态分量的带宽估计之和达到最小,同时应该满足待分解信号 $f(t)$ 与各个窄带本征模态的和相等。将实信号 $f(t)$ 转化为复信号,并进行混频后,其带有约束条件的最优化问题可表示为

$$\begin{cases} \min_{\{u_k, \omega_k\}} \left\{ \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi \cdot t} \right) * u_k(t) \right] \cdot e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \\ s.t. \quad \sum_{k=1}^K u_k(t) = f(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中: ω_k 为第 k 个模态的中心频率; ∂ 为梯度算子; $\delta(t) + \frac{j}{\pi \cdot t}$ 为希尔伯特变换算子; $\left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi \cdot t} \right) * u_k(t) \right] \cdot e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2$ 为计算时间梯度 L_2 范数的平方值,用于估计模态分量的带宽。通过引入拉格朗日算子 λ 和二次惩罚因数 α ,将上述约

束性变分问题转化为无约束问题, 其表达式为

$$\Gamma(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) = \alpha \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi \cdot t} \right) * u_k(t) \right] \cdot e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_{k=1}^K u_k(t) \right\| + \left\langle \lambda(t), f(t) - \sum_{k=1}^K u_k(t) \right\rangle \quad (3)$$

通过乘法算子交替方向法 (ADMM) 更新 $\{u_k\}$ 、 $\{\omega_k\}$ 、 λ 的值, 直至满足约束条件。其中, $\{u_k\}$ 、 $\{\omega_k\}$ 、 λ 的更新方式为

$$\hat{U}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{l \neq k}^K \hat{u}_l(\omega) - \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (4)$$

式中: $\hat{f}(\omega)$ 表示待分解信号 $f(t)$ 的功率谱; $\hat{u}_k(\omega)$ 表示第 k 个模态分量 $u_k(t)$ 的功率谱。

$$\omega_k^{n+1}(\omega) = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega} \quad (5)$$

$$\lambda(\omega) \leftarrow \lambda^n(\omega) + \tau(\hat{f}(\omega) - \sum_{l \neq k}^K \hat{u}_l(\omega)) \quad (6)$$

VMD 算法迭代的终止判断条件为

$$\sum_k \frac{\|u_k^{n+1} - u_k^n\|_2^2}{\|u_k^n\|_2^2} < \varepsilon \quad (7)$$

式中: ε 为 VMD 算法的输入参数之一, 用于判断迭代是否收敛。

1.2 VMD 过分解设置方法

VMD 过分解是指通过设置合适的变分模态分解层数, 使得变分模态分解后所得的模态分量能覆盖待分解信号频谱的全部范围。对于正品率区间内的待分离信号, 设信号的频谱宽度为 BW , 在进行变分模态过分解后, 为确保不丢失频谱上的有效信息, 要求 VMD 各个分解子模态 (IMF) 在复频谱上至少能覆盖待分离信号的频谱宽度, 如图 1 所示。因此, 在进行变分模态过分解前, 需要对二次惩罚因子 α 和分解模态数 K 的数值进行设置。

由上文可知, VMD 算法的分离效果受预设的二次惩罚因子 α 和分解模态数 K 的影响^[15]。其中, 二次惩罚因子 α 影响变分模态分解后模态分量的带宽, 分解模态数 K 影响能分解出的模态的个数。由式 (4) 可知, 对 $\hat{U}_k^{n+1}(\omega)$ 更新是通过维纳滤波器对 $\hat{U}_k^n(\omega)$ 进行带通滤波实现的, 其中, 频率归一化后的维纳滤波器 $F(\omega) = \frac{1}{1 + \alpha\omega^2}$ 。通过仿真, 在进行变分模态过分解时, 两个相邻的模态分量相交位置的幅度在 0.3~0.4 之间, 取幅度上界 0.4 对变分模态过分解时每个本征模态所能覆盖的最小带宽 BW_k 进行估计

$$\frac{1}{1 + \alpha \left(\frac{BW_k}{2} \right)^2} = 0.4 \quad (8)$$

由式 (8) 可知, 对于复频谱宽度为 BW 的待分离信号, VMD 过分解时每个本征模态所能覆盖的最小带宽 BW_k 为

$$BW_k = 4 \sqrt{\frac{1.5}{\alpha}} \cdot BW \quad (9)$$

因此, 要使 VMD 各个分解模态在频谱上至少能覆盖待分离信号的频谱宽度, 则必须满足

$$\sum_{k=1}^K BW_k \geq BW \quad (10)$$

根据式 (9) 和式 (10) 可知, 为不丢失频谱上的有效信息, 进行变分模态过分解时分解模态数 K 的值需满足

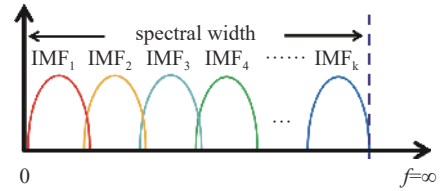


Fig. 1 VMD IMF spectrum during over-decomposition

图 1 过分解时的 VMD 模态频谱图

$$K \geq \left\lceil \frac{BW}{BW_k} \right\rceil = \left\lceil \frac{1}{4 \sqrt{\frac{1.5}{\alpha}}} \right\rceil \quad (11)$$

式中: $\left\lceil \frac{BW}{BW_k} \right\rceil$ 表示对 $\frac{BW}{BW_k}$ 的结果向上取整。

因此,在对频谱宽度为 BW 的光学下变频信号进行变分模态过分解时,根据本章的方法,在确定了变分模态分解时的二次惩罚因子 α 后,即可确定所需的最少模态数 K 。例如,对于频谱宽度为 100 MHz 的待分离信号,当惩罚因子 α 设置为 6000 时,每个模态分量能覆盖的最大频谱宽度为 6.32 MHz,实现 VMD 过分解所需的最少模态数 $K=16$ 。同时可知,对于待分离信号中包含源信号的个数小于过分解模态数 K 时,无需重新设置过分解模态数 K 。

1.3 频谱分割因子构造方法

通过 VMD 过分解设置方法对单通道信号进行 VMD 过分解,过分解后产生 K 个过分解模态分量。在 K 个过分解模态分量中,一部分为噪声模态分量,另一部分是被过分解的源信号模态分量。本文根据相邻过分解模态间的互相关系数构造频谱分割因子,对过分解模态分量进行重组,合并属于同一个源信号的过分解模态分量,区分不属于同一个源的模态分量。具体步骤如下。

首先,计算相邻模态分量之间的互相关系数 r_i ,即

$$r_i = \frac{\sum (x_i(t) - \overline{x_i(t)}) \cdot \sum (x_{i+1}(t) - \overline{x_{i+1}(t)})}{\sigma_i \cdot \sigma_{i+1}}, \quad i = 1, 2, \dots, K-1 \quad (12)$$

式中: r_i 表示第 i 个模态和第 $i+1$ 个模态间的互相关系数; $x_i(t)$ 表示第 i 个过分解模态分量; $\overline{x_i(t)}$ 表示第 i 个过分解模态分量的均值; σ_i 为第 i 个模态分量的标准差; K 为过分解模态数。

然后,计算相邻模态分量之间的频谱分割因子 η_i ,即

$$\eta_i = \frac{r_i - \bar{r}}{\max(r_i - \bar{r}) - \min(r_i - \bar{r})}, \quad i = 1, 2, \dots, K-1 \quad (13)$$

式中: η_i 表示第 i 个模态和第 $i+1$ 个模态间的频谱分割因子; \bar{r} 表示互相关系数 r_i 的均值; $\max(r_i - \bar{r})$ 表示 $r_i - \bar{r}$ 的最大值; $\min(r_i - \bar{r})$ 表示 $r_i - \bar{r}$ 的最小值。

最终,将两个相邻过分解模态的频谱分割因子 η_i 与频谱分割阈值进行比较,若频谱分割因子 η_i 大于阈值(本文设置的阈值为 0),则认为相邻两个过分解模态属于同一信号;否则,认为相邻两个过分解模态属于不同信号。

由式(1)可知,VMD 分离的信号模态间满足加性原则,将属于同一源信号的过分解模态分量相加,就可将待分离信号的频谱划分为多个源信号区间和噪声区间。

同时,对于带宽大于 VMD 模态分量带宽的源信号,传统 VMD 信号分离方法受模态分量带宽的限制,分离所得信号会产生失真。本文方法使用频谱分割因子对属于该源信号的多个过分解模态进行重组后,可准确重构出该源信号。因此,本文方法适用于对不同带宽源信号分离。

1.4 频谱底噪包络检测方法

通过频谱分割因子将 VMD 过分解模态进行重组后,重组模态中包含噪声模态和源信号模态。本文通过频谱底噪包络检测的方式,实现对重组模态中源信号模态的提取。具体步骤如下:

(1) 获取无信号时的系统底噪数据 $N(t)$ 作为先验。

(2) 计算先验底噪数据 $N(t)$ 的复频谱 $N(\omega)$, 即

$$N(\omega) = 10 \lg(\text{FFT}(\tilde{N}(t))) \quad (14)$$

式中, $\tilde{N}(t)$ 为先验底噪数据 $N(t)$ 的复表示; $\text{FFT}(\tilde{N}(t))$ 表示对复信号 $\tilde{N}(t)$ 进行傅里叶变换; $\lg()$ 表示对结果取以 e 为底的对数。

(3) 通过线性插值的方式提取先验底噪复频谱 $N(\omega)$ 的包络 $N_{\max}(\omega)$ 。

(4) 计算重构模态分量 $S(t)$ 的复频谱 $S(\omega)$, 即

$$S(\omega) = 10 \lg(\text{FFT}(\tilde{S}(t))) \quad (15)$$

(5) 对重构模态分量的复频谱 $S(\omega)$ 进行频谱包络检测, 即

$$\Delta S(\omega) = \max(S(\omega) - N_{\max}(\omega)) \quad (16)$$

式中: $\Delta S(\omega)$ 为重构模态分量的复频谱 $S(\omega)$ 与先验底噪复频谱包络 $N_{\max}(\omega)$ 差值中的最大值。

若 $\Delta S(\omega)$ 大于检测阈值, 则认为该重构模态分量为信号模态, 否则, 认为是噪声模态。检测阈值可根据虚警阈值的要求进行设置, 在本文中, 检测阈值设置为 6 dB, 重构模态分量的复频谱 $S(\omega)$ 与先验底噪复频谱包络 $N_{\max}(\omega)$ 差值中的最大值大于 6 dB 时, 该重构模态分量为信号模态。

对于光学下变频信号中的光噪声干扰, 通过频谱底噪包络检测的方式, 输出信号中将不再包含光噪声模态, 从而消除了光噪声对算法分离效果的影响。同时, 本方法同样适用于电磁频谱感知系统的底噪中存在其他噪声情况时的单通道信号的分离。

1.5 算法流程图

对于获取的单通道光学下变频信号, 本文所述基于 VMD 自适应模态重组光学下变频信号分离方法流程图如图 2 所示。

2 实验验证

2.1 光学下变频信号获取实验

为验证本文方法对光学下变频信号的分离效果, 搭建了如图 3 所示的光学下变频电磁信号接收系统。通过三个信号源分别生成宽带码分多址(WCDMA)调制的通信信号、带宽为 20 MHz 的线性调频信号和普通脉冲调制信号, 并使用三个连接信号源的喇叭天线向外发射电磁信号。通过光学下变频电磁环境探测系统对喇叭天线发射的电磁信号进行接收, 光学下变频系统中采集卡的采样率设置为 200 MHz, 采集的信号长度设置为 4096 点。

未接收到信号时, 光学下变频电磁环境探测系统的输出信号如图 4 所示。图 4(a) 为输出信号的时域波形图, 可见输出信号中存在较大的光噪声; 图 4(b) 为输出信号的频谱图, 从图中可知实验所使用的光学下变频系统在 0~5 MHz 和 90~95 MHz 范围内存在较大的光噪声; 图 4(c) 为输出信号的时频图, 从图中可见在 1~100 MHz 范围内也存在较弱的光噪声干扰。

当三个信号源均发射信号时, 光学下变频电磁环境探测系统的输出信号如图 5 所示。图 5(a) 为输出信号的时域波形图, 受光噪声影响, 无法看到接收到的信号; 图 5(b) 为输出信号的频谱图, 频谱图中除了光噪声峰外, 可以看到三个光学下变频信号; 图 5(c) 为输出信号的时频图, 从图中可以辨认出三个信号分别为 WCDMA 信号、普通脉冲信号(NP)和线性调频信号(LFM)。

2.2 光学下变频信号分离实验

使用本文算法对光学下变频单通道信号分离进行分离, 二次惩罚因数 α 设置为 6000, 分解模态数 K 设置为 20, 频谱分割阈值设置为 0。经过 VMD 过分解后, 光学下变频信号被分解为 20 个模态分量, 每个模态分量在频谱上的位置如图 6 所示。图中的红色数字 1 至 20 表示变分模态过分解后的 20 个模态分量。从图中可知, 过分解模态

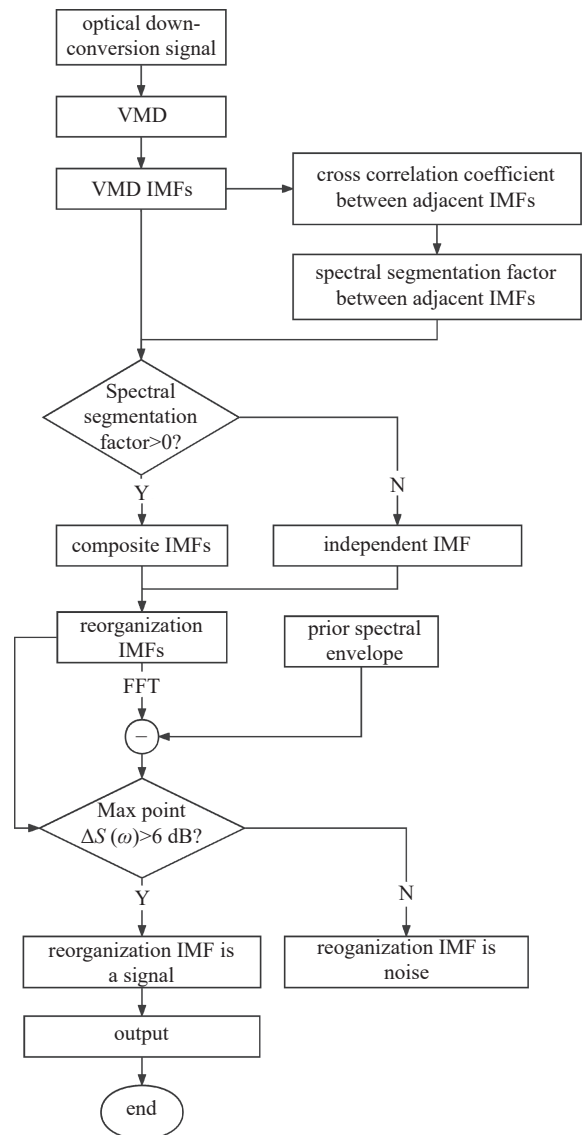


Fig. 2 Algorithm flow chart

图 2 算法流程图

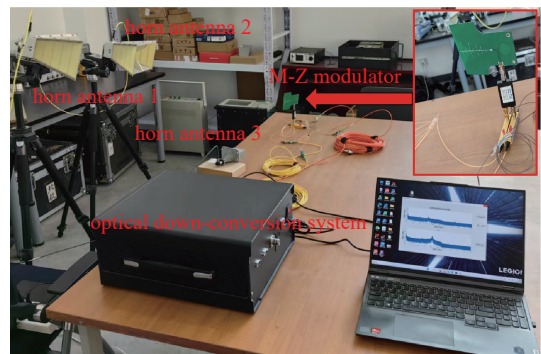


Fig. 3 Construction of optical down-conversion system

图 3 光学下变频系统搭建图

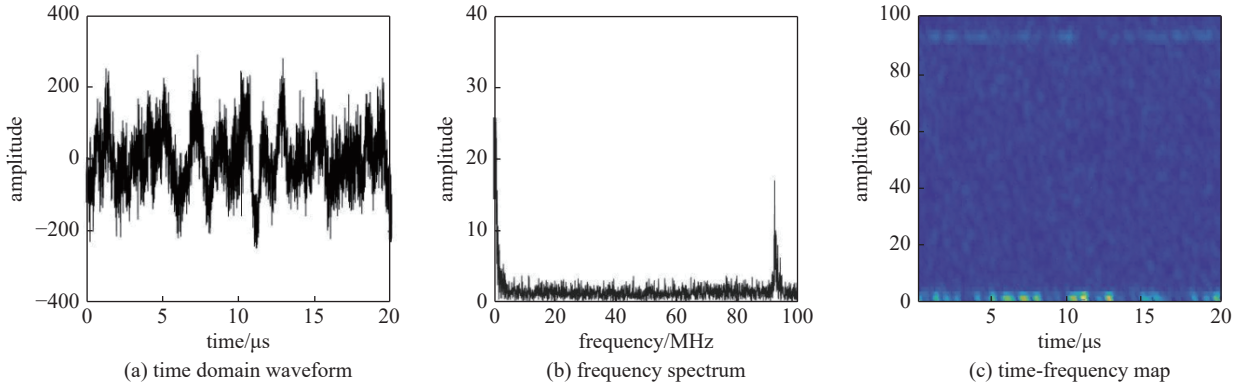


Fig. 4 Optical down-conversion system output when no signal is detected

图 4 无信号时的光学下变频系统输出

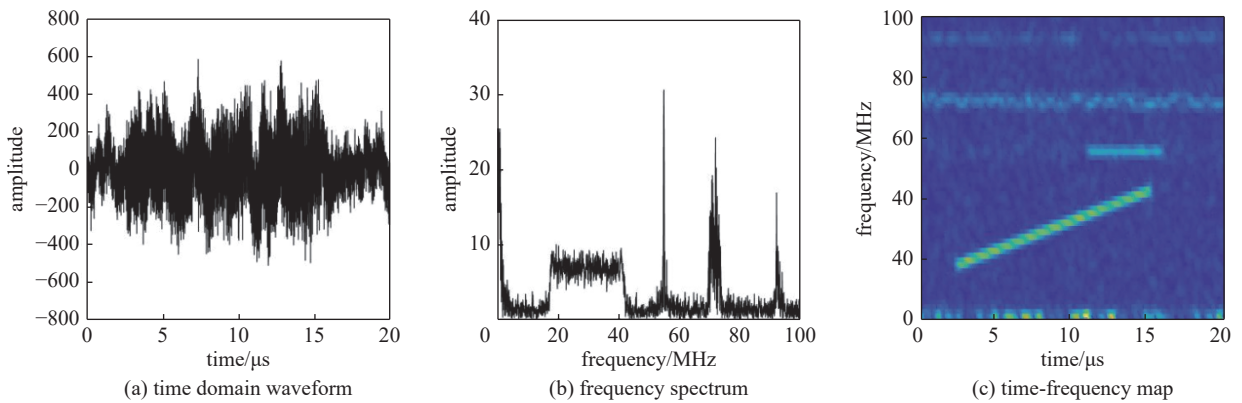


Fig. 5 Optical down-conversion system output when three types of signals are detected

图 5 探测到 3 种信号时的光学下变频系统输出

5 至过分解模态 7 构成了 WCDMA 信号; 过分解模态 9 构成了普通脉冲信号; 过分解模态 10 至过分解模态 18 构成了线性调频信号。

使用频谱分割因子对 20 个过分解模态分量进行重组, 20 个模态分量间的频谱分割因子如图 7 所示。图中的红线表示频谱分割阈值, 若频谱分割因子大于分割阈值, 则两个相邻模态分量合并; 反之, 则两个相邻模态分量不合并。从图中可以看出, 根据频谱分割因子, 过分解模态 1 至过分解模态 2 被重组在一起; 过分解模态 5 至过分解模态 7 被重组在一起; 过分解模态 10 至过分解模态 18 被重组在一起, 其余的重组模态为单独模态分量构成。对于光学下变频的三个信号, 通过频谱分割因子重组的过分解模态与三个信号过分解所得的模态相同。

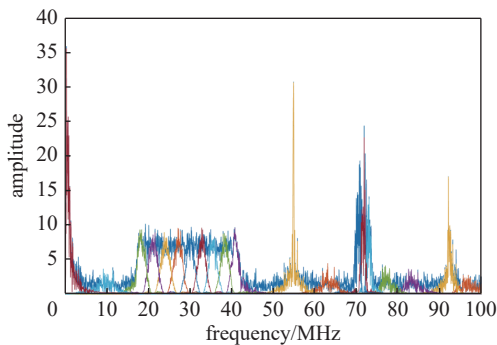


Fig. 6 Spectrum of all over decomposed IMFs

图 6 全部过分解模态的频谱

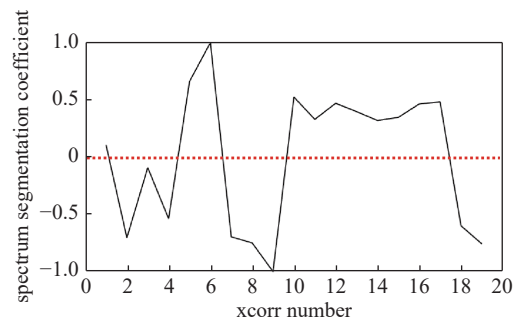


Fig. 7 Spectral segmentation factor between over decomposed IMFs

图 7 过分解模态间的频谱分割因子

使用频谱底噪包络检测的方法, 对重组模态进行底噪包络检测, 经过检测, 分离出的信号的时域波形如图 8 所示。其中, 图 8(a)为光学下变频后的 WCDMA 信号; 图 8(b)为光学下变频后的普通脉冲信号; 图 8(c)为光学下变频后的普通脉冲信号。分离信号和源信号的相关系数如表 1 所示, 本文算法分离出的三种信号与源信号的相关系数均高于 0.97, 说明本文方法在光噪声干扰下较为完整地分离出了三种带宽不同的光学下变频信号。

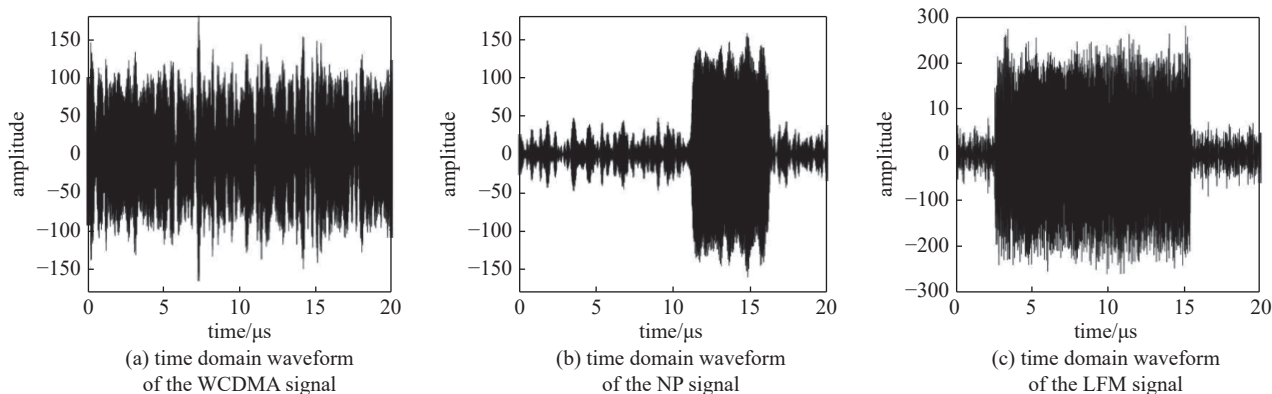


Fig. 8 Optical down-conversion signal separated by the method proposed in this article

图 8 本文方法分离后的光学下变频信号

表 1 分离后光学下变频信号与原信号的相关系数

Table 1 Correlation coefficient between the separated optical down-conversion signal and the original signal

correlation coefficient (LFM)	correlation coefficient (NP)	correlation coefficient (WCDMA)
0.972 1	0.972 1	0.975 4

3 结 论

本文中,通过光学下变频电磁环境探测系统获取了包含三种不同类型源信号的光学下变频信号,并使用获取的单通道光学下变频信号对本文的 VMD 自适应模态重组的信号分离方法进行了实验验证。经过对试验结果的分析,可以得到以下结论:

(1)分离出的三种信号与原信号的相关性均大于 0.97,说明本文方法准确地分离出了单通道光学下变频信号中的源信号。

(2)实验验证时选择的三种源信号中同时包含宽带信号和窄带信号,分离结果表明本文所述方法同时适用于窄带信号和宽带信号的分离,解决了传统 VMD 分离方法受模态分量带宽限制,无法分离宽带信号的问题。

(3)本文通过 VMD 过分解模态重组的方式,在源信号的个数小于过分解模态数 K 的情况下,分离单通道信号时无需获知待分离信号中源信号个数。例如:当 $\alpha=6000$ 时, $K \geq 16$,源信号个数小于 16 时均无需获知具体的源个数,就能实现对源信号的分离。

(4)针对光学下变频系统中的光噪声干扰,本文通过提取先验光噪声频谱包络,并进行频谱噪底包络检测的方式,消除了光噪声对算法分离效果的干扰。

本文方法适用于分离没有发生频谱混叠的光学下变频信号。下一步将研究用于光学下变频系统的多通道信号分离方法,实现频谱混叠光学下变频信号的分离。

参考文献:

- [1] Xie Shuguo, Wang Tianheng, Hao Xuchun, et al. Localization and frequency identification of large-range wide-band electromagnetic interference sources in electromagnetic imaging system[J]. *Electronics*, 2019, 8: 499.
- [2] Yang Yan, Xie Shuguo, Wang Tianheng, et al. Multi-frequency electric field measurement method for optical under-sampling system[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(20): 23024-23036.
- [3] 毋文峰, 陈小虎, 苏勋家. 基于经验模式分解的单通道机械信号盲分离[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(4): 12-16. (Wu Wenfeng, Chen Xiaohu, Su Xunjia. Blind source separation of single-channel mechanical signal based on empirical mode decomposition[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(4): 12-16)
- [4] 张袁元, 李舜酩, 胡伊贤, 等. LMS 方法的改进及联合 EEMD 在振动信号去噪中的应用[J]. *振动与冲击*, 2013, 32(20): 61-66. (Zhang Yuanyuan, Li Shunming, Hu Yixian, et al. Improvement of LMS method and its application combined with EEMD in vehicle vibration signal denoising[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(20): 61-66)
- [5] 姜绍飞, 陈志刚, 沈清华, 等. 基于 EEMD 与 FastICA 的损伤异常识别与定位[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(1): 203-209. (Jiang Shaofei, Chen Zhigang, Shen Qinghua, et al. Damage detection and location based on EEMD-Fast ICA algorithm[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(1): 203-209)
- [6] 王小伟. 经验模态分解在单通道语音盲分离中的应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014. (Wang Xiaowei. The application of EMD in the single channel speech blind separation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014)

- [7] 马增强, 柳晓云, 张俊甲, 等. VMD 和 ICA 联合降噪方法在轴承故障诊断中的应用[J]. 振动与冲击, 2017, 36(13): 201-207. (Ma Zengqiang, Liu Xiaoyun, Zhang Junjia, et al. Application of VMD-ICA combined method in fault diagnosis of rolling bearings[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(13): 201-207)
- [8] Dey P, Satija U, Ramkumar B. Single channel blind source separation based on variational mode decomposition and PCA[C]//2015 Annual IEEE: India Conference[C], . 2015: 1-5.
- [9] Zhang Ya'nan, Qi Shengbo, Zhou Lin. Single channel blind source separation for wind turbine aeroacoustics signals based on variational mode decomposition[J]. IEEE Access, 2018, 6: 73952-73964.
- [10] 赵知劲, 黄艳波, 强芳芳, 等. 基于反馈变分模式分解的单通道盲源分离算法[J]. 振动与冲击, 2019, 38(13): 268-273. (Zhao Zhijin, Huang Yanbo, Qiang Fangfang, et al. Single channel blind source separation algorithm based on feedback variational mode decomposition[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(13): 268-273)
- [11] 王康, 程浩, 张坤. 基于变分模态分解的单通道信号盲源分离方法[J]. 科技通报, 2019, 35(2): 138-143,149. (Wang Kang, Cheng Hao, Zhang Kun. Blind source separation of single-channel signal based on variation mode decomposition[J]. Bulletin of Science and Technology, 2019, 35(2): 138-143,149)
- [12] 程秋冰. 雷达信号分离与干扰识别技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021. (Cheng Qiubing. Research on radar signal separation and interference signal recognition technology[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021)
- [13] 张晨阳, 张亚, 李世中. 基于变分模态分解的侵彻过载信号盲分离[J]. 振动与冲击, 2022, 41(5): 280-286. (Zhang Chenyang, Zhang Ya, Li Shizhong. Blind separation of penetration overload signals based on VMD[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(5): 280-286)
- [14] 甄龙信, 任良, 董前程. 基于单通道盲源分离的结构模态参数识别[J]. 振动与冲击, 2023, 42(11): 252-261,294. (Zhen Longxin, Ren Liang, Dong Qiancheng. Structural modal parameter identification based on single channel blind source separation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(11): 252-261,294)
- [15] Dragomiretskiy K, Zosso D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.