



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 109889231 B

(45) 授权公告日 2021.03.02

(21) 申请号 201910105414.3

H04L 25/03 (2006.01)

(22) 申请日 2019.02.01

审查员 倪亚萍

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 109889231 A

(43) 申请公布日 2019.06.14

(73) 专利权人 哈尔滨工业大学

地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区西
大直街92号

(72) 发明人 付宁 黄国兴 乔立岩

(74) 专利代理机构 哈尔滨市松花江专利商标事

务所 23109

代理人 刘冰

(51) Int. Cl.

H03M 1/12 (2006.01)

H04B 1/7163 (2011.01)

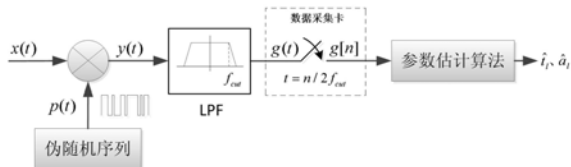
权利要求书3页 说明书6页 附图1页

(54) 发明名称

基于随机解调和有限新息率的脉冲串信号
欠采样方法

(57) 摘要

本发明提供基于随机解调和有限新息率的脉冲串信号欠采样方法,信号处理技术领域。本发明首先生成被测脉冲串信号和伪随机序列;然后对被测脉冲串信号和伪随机序列进行随机解调:采用乘法器将被测脉冲串信号和伪随机序列进行混频,得到混频后的信号;采用低通滤波器对混频后的信号进行滤波,得到滤波后的信号;采用数据采集卡对滤波后的信号均匀采样得到样本;最后进行参数估计:利用获得的样本估计被测脉冲串信号中的幅值参数和时延参数。本发明解决了现有脉冲串信号欠采样技术需要根据具体的输入信号单独设计采样结构,导致系统的通用性较差的问题。本发明可用于脉冲串信号欠采样。



1. 基于随机解调和有限新息率的脉冲串信号欠采样方法, 其特征在于, 具体包括以下步骤:

步骤一、生成被测脉冲串信号 $x(t)$ 和伪随机序列 $p(t)$;

步骤二、对被测脉冲串信号 $x(t)$ 和伪随机序列 $p(t)$ 进行随机解调: 首先, 采用乘法器将被测脉冲串信号 $x(t)$ 和伪随机序列 $p(t)$ 进行混频, 得到混频后的信号 $y(t)$; 然后, 采用低通滤波器对混频后的信号 $y(t)$ 进行滤波, 得到滤波后的信号 $g(t)$; 最后, 采用数据采集卡对滤波后的信号 $g(t)$ 均匀采样得到样本 $g(n)$;

步骤三、参数估计: 利用步骤二中获得的样本 $g(n)$ 估计被测脉冲串信号 $x(t)$ 中的幅值参数和时延参数;

步骤一中所述的伪随机序列 $p(t)$ 中随机 ± 1 的跳变频率 f_p 需要满足 $f_p \geq \max\{f_{\min}, f_{\text{cut}} - f_{\max}\}$, 其中 f_{\min} 和 f_{\max} 分别表示被测脉冲串信号 $x(t)$ 的最小频率和最大频率, f_{cut} 为低通滤波器的截止频率;

$$p(t) = \alpha_n, \frac{T}{Q}n \leq t \leq \frac{T}{Q}(n+1), 0 \leq n \leq Q-1$$

其中, $\alpha_n \in \{+1, -1\}$ 为随机 ± 1 序列, $n \in \mathbb{Z}$, Q 为时域区间 $t \in [0, T)$ 内伪随机序列 $p(t)$ 的分隔段数。

2. 根据权利要求1所述基于随机解调和有限新息率的脉冲串信号欠采样方法, 其特征在于, 步骤一中所述脉冲串信号 $x(t)$ 具体为:

$$x(t) = \sum_{l=1}^L a_l h(t-t_l) \quad (1)$$

其中, $h(t)$ 是脉冲, 也称之为基函数; $t \in [0, T)$ 为观测时间, T 为 $x(t)$ 的持续时间长度; a_l 为幅值参数, t_l 为时延参数, $t_l \in [0, T)$; $l=1, 2, \dots, L$; L 为脉冲的数目。

3. 根据权利要求1所述基于随机解调和有限新息率的脉冲串信号欠采样方法, 其特征在于, 步骤二中所述混频后的信号 $y(t)$ 的具体时域形式为:

$$y(t) = x(t) \cdot p(t) \quad (5)$$

其中, $t \in [0, T)$ 为观测时间, T 为 $x(t)$ 的持续时间长度。

4. 根据权利要求3所述基于随机解调和有限新息率的脉冲串信号欠采样方法, 其特征在于, 步骤二中所述采用低通滤波器对混频后的信号 $y(t)$ 进行滤波, 得到滤波后的信号 $g(t)$ 的具体过程包括:

求得 $y(t)$ 的傅里叶系数:

$$\begin{aligned} Y[k] &= \int_{-\infty}^{\infty} y(t) e^{-j2\pi kt/T} dt \\ &= \sum_{m=-M}^M X[m] P[k-m] \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $M = \lceil Tf_{\max} \rceil$, f_{\max} 是被测脉冲串信号 $x(t)$ 的最大频率, $\lceil \cdot \rceil$ 表示对数值向下取整; $X[m]$ 为被测脉冲串信号 $x(t)$ 的傅里叶系数; $P[k-m]$ 为伪随机序列 $p(t)$ 的傅里叶系数; j 表示虚数单位; $m = -M, \dots, M$; $k \in \mathbb{Z}$, \mathbb{Z} 表示整数;

所述滤波后的信号 $g(t)$ 对应的傅里叶系数为:

$$G[k] = \begin{cases} Y[k], & k = -K, 1-K, \dots, K \\ 0 & , k < -K \\ 0 & , k > K \end{cases} \quad (7)$$

其中, $K = \lceil Tf_{cut} \rceil$, f_{cut} 为低通滤波器的截止频率。

5. 根据权利要求1所述基于随机解调和有限新息率的脉冲串信号欠采样方法, 其特征在于, 步骤二中所述均匀采样得到样本 $g(n)$ 的具体操作为:

以 $f_s \geq 2f_{cut}$ 为采样率对滤波后的信号 $g(t)$ 均匀采样, 得到样本 $g[n] = g(t)|_{t=n/f_s}$; 其中, $n = 0, 1, \dots, \lceil Tf_s \rceil$ 。

6. 根据权利要求4或5所述基于随机解调和有限新息率的脉冲串信号欠采样方法, 其特征在于, 步骤三中所述参数估计具体包括以下步骤:

步骤三一、构建观测向量: 对样本 $g[n]$ 求离散时间傅里叶变换, 得到傅里叶系数 $G[k]$, 然后构建观测向量:

$$g = [G[-K], G[1-K], \dots, G[K]]^T \quad (8)$$

步骤三二、观测时域区间离散化: 将观测时间 $[0, T)$ 平均划分为 N 个均匀的网格, $N = \lceil Tf_s \rceil + 1$, 即量化间隔为 $\Delta = T/N$; 那么, 任意时间变量能够近似为 $t \approx n\Delta$, $n = 0, 1, \dots, N-1$; 任意被测脉冲串信号的时延参数能够近似为 $t_1 \approx n_1\Delta$, n_1 为幅值向量 s 中的非零项, $n_1 \in \mathbb{Z}$;

步骤三三、构建观测矩阵: 按照以下公式, 构建观测矩阵 Φ :

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P[-K+M] & \dots & P[-K-M] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P[K+M] & \dots & P[K-M] \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} H[-M] & & \\ & \ddots & \\ & & H[M] \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{\Psi} = \begin{bmatrix} 1 & e^{j\frac{2\pi}{T}M\Delta} & \dots & e^{j\frac{2\pi}{T}M(N-1)\Delta} \\ 1 & e^{j\frac{2\pi}{T}(M-1)\Delta} & \dots & e^{j\frac{2\pi}{T}(M-1)(N-1)\Delta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & e^{-j\frac{2\pi}{T}M\Delta} & \dots & e^{-j\frac{2\pi}{T}M(N-1)\Delta} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\Phi = \mathbf{P}\mathbf{H}\mathbf{\Psi} \quad (12)$$

其中, $H[m]$ 为基函数 $h(t)$ 的傅里叶系数;

步骤三四、求幅值参数向量的解: 幅值参数向量 s 的求解能够转换为求解一个最小 L_0 范数下的优化问题:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{s}} = \arg \min \|\mathbf{s}\|_0 \\ s.t., \mathbf{g} = \Phi\mathbf{s} \end{cases} \quad (13)$$

利用正交匹配追踪算法对公式(13)进行求解,得到幅值参数向量的估计值 $\hat{\mathbf{s}}$,并从 $\hat{\mathbf{s}}$ 中找出非零项 $\hat{n}_l; l=1, \dots, L; L$ 为脉冲的数目;

步骤三五、估计时延和幅值参数:被测脉冲串信号中的幅值参数 a_l 和时延参数 t_l 能够估计为:

$$\begin{cases} \hat{t}_l = \hat{n}_l \Delta \\ \hat{a}_l = \hat{\mathbf{s}}[\hat{n}_l] \end{cases} \quad (14)$$

其中, \hat{a}_l 为幅值参数的估计值, \hat{t}_l 为时延参数的估计值。

7.根据权利要求6所述基于随机解调和有限新息率的脉冲串信号欠采样方法,其特征在于,步骤三四中所述幅值参数向量 \mathbf{s} 具体为:

$$\mathbf{s} = [s[0], s[1], \dots, s[N-1]]^T \quad (15)$$

$$\text{其中, } s[n] = \begin{cases} a_l, & n = n_l \\ 0, & n \neq n_l \end{cases} \circ$$

基于随机解调和有限新息率的脉冲串信号欠采样方法

技术领域

[0001] 本发明涉及脉冲串信号欠采样方法,属于信号处理技术领域。

背景技术

[0002] 脉冲串信号广泛存在于雷达、通信和生物医学等领域。对于该类信号,现有的采样设备大多是基于经典的奈奎斯特采样定理,也就是要求采样率大于或等于信号带宽的两倍。然而,随着现代技术的发展,脉冲串信号中脉冲的时宽越来越窄,对应的信号带宽越来越宽,导致奈奎斯特采样率也越来越高,这无疑给基于奈奎斯特采样定理的采样系统设计带来了严峻的挑战。较高的采样频率要求ADC (Analog-to-Digital Converter模数转换器) 器件具有较宽的模拟带宽及采样率,同时,高采样率将产生大量的采样数据,这给系统的存储及传输资源也增加了额外的负担。因而,奈奎斯特采样定理逐渐成为脉冲串信号采样系统设计的瓶颈,制约着信号处理技术的发展。

[0003] 早在2002年,瑞士联邦理工学院的Vetterli研究团队提出了一种利用信号参数化特性的欠采样理论——有限新息率 (Finite Rate of Innovation,简称FRI) 采样理论。该理论不同于奈奎斯特采样定理,它指出:对于某些可以由有限数目的自由参量完全表示的参数稀疏信号,如脉冲串信号,只要选用合适的采样核对其滤波后,并以高于或等于信号新息率的速率进行均匀采样,就可以利用采集到的样本完全重构出未知参数。FRI采样理论的采样速率仅由信号的新息率,即单位时间内的自由参数数目决定,一般情况下,信号的新息率要远小于信号的带宽,这样就能大大降低系统采样速率。

[0004] 考虑如下形式的脉冲串信号:

$$[0005] \quad x(t) = \sum_{l=1}^L a_l h(t-t_l) \quad (1)$$

[0006] 其中, $h(t)$ 是波形已知的脉冲,又可称之为基函数; $a_l (l=1,2,\dots,L)$ 为幅值参数, $t_l (l=1,2,\dots,L)$ 为时延参数, $t_l \in [0,T)$ 。显然,信号 $x(t)$ 中的未知参数为 $2L$ 个幅值和时延参数 $\{a_l, t_l\}_{l=1}^L$ 。对公式(1)所示的脉冲串信号进行FRI采样,一般的手段是通过获取其傅里叶系数来实现的。求该信号 $x(t)$ 的连续时间傅里叶变换可得:

$$[0007] \quad X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt = H(\omega) \sum_{l=1}^L a_l e^{-j\omega t_l} \quad (2)$$

[0008] 其中, $H(\omega)$ 是基函数 $h(t)$ 的连续时间傅里叶变换。将频谱进行离散化处理,即令 $\omega = \frac{2\pi}{T}k$,公式(2)可以表示为:

$$[0009] \quad X\left(\frac{2\pi}{T}k\right) = H\left(\frac{2\pi}{T}k\right) \sum_{l=1}^L a_l e^{-j\frac{2\pi}{T}kt_l} \quad (3)$$

[0010] 显然,未知参数 $\{a_l, t_l\}_{l=1}^L$ 可以通过获取 $K \geq 2L$ 个非零傅里叶系数

$X(\frac{2\pi}{T}k), k=0,1,\dots,K-1$ 得到。

[0011] 获取傅里叶系数最简单的方法是采用Sinc采样核(即理想低通滤波器),然而,该方法只能获取一段连续的傅里叶系数子集,重构效果较差;Tur等人引入一种单通道预采样滤波过程来获取任意离散的傅里叶系数,但是这种滤波器的频响特性在实际应用中是难以实现的;Gedalyahu等人利用多通道混频积分结构直接采集输入信号的傅里叶系数,这种结构中每个通道只能采集一个傅里叶系数,硬件系统规模庞大,而且各通道之间的同步是一个很大的问题;为了获取离散分布的傅里叶系数,以色列理工学院的Eldar等人设计了一种多通道欠采样雷达接收机。然而,由于不同脉冲串信号频谱的差异性,以上的FRI采样方法需要根据具体的输入信号单独设计采样结构,效率较低,且系统的通用性较差。综上所述,研究适用于各种类型的脉冲串信号的有限新息率采样方法,是非常有意义的。

发明内容

[0012] 本发明为解决现有脉冲串信号欠采样技术需要根据具体的输入信号单独设计采样结构,导致系统的通用性较差的问题,提供了基于随机解调和有限新息率的脉冲串信号欠采样方法。

[0013] 本发明所述基于随机解调和有限新息率的脉冲串信号欠采样方法,通过以下技术方案实现:

[0014] 步骤一、生成被测脉冲串信号 $x(t)$ 和伪随机序列 $p(t)$;

[0015] 步骤二、对被测脉冲串信号 $x(t)$ 和伪随机序列 $p(t)$ 进行随机解调:首先,采用乘法器将被测脉冲串信号 $x(t)$ 和伪随机序列 $p(t)$ 进行混频,得到混频后的信号 $y(t)$;然后,采用低通滤波器对混频后的信号 $y(t)$ 进行滤波,得到滤波后的信号 $g(t)$;最后,采用数据采集卡对滤波后的信号 $g(t)$ 均匀采样得到样本 $g(n)$;

[0016] 步骤三、参数估计:利用步骤二中获得的样本 $g(n)$ 估计被测脉冲串信号 $x(t)$ 中的幅值参数和时延参数。

[0017] 本发明最为突出的特点和显著的有益效果是:

[0018] 本发明所涉及的基于随机解调和有限新息率的脉冲串信号欠采样方法,利用随机解调中的扩频技术来获取任意类型脉冲串信号的频谱信息。在模拟预处理阶段,采用伪随机序列对被测脉冲串信号进行混频,从而将任意频带的频谱信息扩展到基带,采用低通滤波器即可获取一组傅里叶系数。解决了由于不同脉冲串信号频谱的差异性导致现有FRI采样方法通用性差的问题。且本发明方法精度较高;仿真实验结果表明,在无噪声环境下,参数估计精确接近100%;在不同信噪比的高斯白噪声环境下,参数估计精度平均高于LPF-FRI方法和滤波器组-FRI方法约5%。

附图说明

[0019] 图1为脉冲串信号欠采样系统结构框图;

[0020] 图2为实施例中不同方法在噪声情况下重构效果对比曲线图。

具体实施方式

[0021] 具体实施方式一：结合图1对本实施方式进行说明，本实施方式给出的基于随机解调和有限新息率的脉冲串信号欠采样方法，具体包括以下步骤：

[0022] 步骤一、生成被测脉冲串信号 $x(t)$ 和伪随机序列 $p(t)$ ；

[0023] 步骤二、对被测脉冲串信号 $x(t)$ 和伪随机序列 $p(t)$ 进行随机解调：首先，采用乘法器将被测脉冲串信号 $x(t)$ 和伪随机序列 $p(t)$ 进行混频，得到混频后的信号 $y(t)$ ；然后，采用低通滤波器对混频后的信号 $y(t)$ 进行滤波，得到滤波后的信号 $g(t)$ ；最后，采用数据采集卡对滤波后的信号 $g(t)$ 均匀采样得到样本 $g(n)$ ；

[0024] 步骤三、参数估计：利用步骤二中获得的时域样本 $g(n)$ 估计被测脉冲串信号 $x(t)$ 中的未知幅值参数和时延参数。

[0025] 具体实施方式二：本实施方式与具体实施方式一不同的是，步骤一中所述的伪随机序列 $p(t)$ 中随机 ± 1 的跳变频率 f_p 需要满足 $f_p \geq \max\{f_{\min}, f_{\text{cut}} - f_{\max}\}$ ，其中 f_{\min} 和 f_{\max} 分别表示被测脉冲串信号 $x(t)$ 的最小频率和最大频率， f_{cut} 为低通滤波器的截止频率。

[0026] 伪随机序列 $p(t)$ 按照以下公式生成：

$$[0027] \quad p(t) = \alpha_n, \frac{T}{Q}n \leq t \leq \frac{T}{Q}(n+1), 0 \leq n \leq Q-1 \quad (4)$$

[0028] 其中， $\alpha_n \in \{+1, -1\}$ ($n \in Z$) 为随机 ± 1 序列， Q 为时域区间 $t \in [0, T)$ 内伪随机序列 $p(t)$ 的分隔段数。

[0029] 其他步骤及参数与具体实施方式一相同。

[0030] 具体实施方式三：本实施方式与具体实施方式一不同的是，步骤一中所述脉冲串信号 $x(t)$ 具体为：

$$[0031] \quad x(t) = \sum_{l=1}^L a_l h(t-t_l) \quad (1)$$

[0032] 其中， $h(t)$ 是波形已知的脉冲，也称之为基函数； $t \in [0, T)$ 为观测时间， T 为 $x(t)$ 的持续时间长度； a_l 为幅值参数， t_l 为时延参数， $t_l \in [0, T)$ ； $l=1, 2, \dots, L$ ； L 为脉冲的数目，则幅值参数与时延参数的数目均为 L 。

[0033] 其他步骤及参数与具体实施方式一或二相同。

[0034] 具体实施方式四：本实施方式与具体实施方式二不同的是，步骤二中所述混频后的信号 $y(t)$ 的具体时域形式为：

$$[0035] \quad y(t) = x(t) \cdot p(t) \quad (5)$$

[0036] 其中， $t \in [0, T)$ 为观测时间， T 为 $x(t)$ 的持续时间长度；

[0037] 其他步骤及参数与具体实施方式二相同。

[0038] 具体实施方式五：本实施方式与具体实施方式四不同的是，步骤二中所述采用低通滤波器对混频后的信号 $y(t)$ 进行滤波，得到滤波后的信号 $g(t)$ 的具体过程包括：

[0039] 求得 $y(t)$ 的傅里叶系数：

$$[0040] \quad \begin{aligned} Y[k] &= \int_{-\infty}^{\infty} y(t) e^{-j2\pi kt/T} dt = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) p(t) e^{-j2\pi kt/T} dt \\ &= \sum_{m=-M}^M X[m] P[k-m] \end{aligned} \quad (6)$$

[0041] 其中, $M = \lceil Tf_{\max} \rceil$, f_{\max} 是被测脉冲串信号 $x(t)$ 的最大频率, $\lceil \cdot \rceil$ 表示对数值向下取整; $X[m]$ 为被测脉冲串信号 $x(t)$ 的傅里叶系数; $P[k-m]$ 为伪随机序列 $p(t)$ 的傅里叶系数; j 表示虚数单位; $m = -M, \dots, M$; $k \in \mathbb{Z}$, \mathbb{Z} 表示整数;

[0042] 所述滤波后的信号 $g(t)$ 对应的傅里叶系数为:

$$[0043] \quad G[k] = \begin{cases} Y[k], & k = -K, 1-K, \dots, K \\ 0, & k < -K \\ 0, & k > K \end{cases} \quad (7)$$

[0044] 其中, $K = \lceil Tf_{\text{cut}} \rceil$, f_{cut} 为低通滤波器的截止频率。

[0045] 其他步骤及参数与具体实施方式四相同。

[0046] 具体实施方式六: 本实施方式与具体实施方式二不同的是, 步骤二中所述均匀采样得到样本 $g(n)$ 的具体操作为:

[0047] 以 $f_s \geq 2f_{\text{cut}}$ 为采样率对滤波后的信号 $g(t)$ 均匀采样, 得到样本 $g[n] = g(t)|_{t=n/f_s}$; 其中, $n = 0, 1, \dots, \lceil Tf_s \rceil$ 。

[0048] 其他步骤及参数与具体实施方式二至五相同。

[0049] 具体实施方式七: 本实施方式与具体实施方式五或六不同的是, 步骤三中所述参数估计具体包括以下步骤:

[0050] 步骤三一、构建观测向量: 对样本 $g[n]$ 求离散时间傅里叶变换, 得到傅里叶系数 $G[k]$, 然后构建观测向量:

$$[0051] \quad \mathbf{g} = [G[-K], G[1-K], \dots, G[K]]^T \quad (8)$$

[0052] 步骤三二、观测时域区间离散化: 将观测时间 $[0, T)$ 平均划分为 N 个均匀的网格, $N = \lceil Tf_s \rceil + 1$, 即量化间隔为 $\Delta = T/N$; 那么, 任意时间变量能够近似为 $t \approx n\Delta$, $n = 0, 1, \dots, N-1$; 任意被测脉冲串信号的时延参数能够近似为 $t_1 \approx n_1\Delta$, n_1 为幅值向量 \mathbf{s} 中的非零项, $n_1 \in \mathbb{Z}$;

[0053] 步骤三三、构建观测矩阵: 按照以下公式, 构建观测矩阵 Φ :

$$[0054] \quad \mathbf{P} = \begin{bmatrix} P[-K+M] & \dots & P[-K-M] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P[K+M] & \dots & P[K-M] \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[0055] \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} H[-M] & & & \\ & \ddots & & \\ & & & H[M] \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$[0056] \quad \mathbf{\Psi} = \begin{bmatrix} 1 & e^{j\frac{2\pi}{T}M\Delta} & \dots & e^{j\frac{2\pi}{T}M(N-1)\Delta} \\ 1 & e^{j\frac{2\pi}{T}(M-1)\Delta} & \dots & e^{j\frac{2\pi}{T}(M-1)(N-1)\Delta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & e^{-j\frac{2\pi}{T}M\Delta} & \dots & e^{-j\frac{2\pi}{T}M(N-1)\Delta} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$[0057] \quad \Phi = PH\Psi \quad (12)$$

[0058] 其中, $M = \lceil Tf_{\max} \rceil$, f_{\max} 是被测脉冲串信号 $x(t)$ 的最大频率, $\lceil \cdot \rceil$ 表示对数值向下取整; $X[m]$ 为被测脉冲串信号 $x(t)$ 的傅里叶系数; $K = \lceil Tf_{\text{cut}} \rceil$, f_{cut} 为低通滤波器的截止频率; $P[m]$ 为伪随机序列 $p(t)$ 的傅里叶系数; $H[m]$ 为基函数 $h(t)$ 的傅里叶系数, P 、 H 、 Ψ 为中间矩阵;

[0059] 步骤三四、求幅值参数向量的解: 幅值参数向量 s 的求解能够转换为求解一个最小 L_0 范数 (L_0 范数指向量中非零元素的个数) 下的优化问题:

$$[0060] \quad \begin{cases} \hat{\mathbf{s}} = \arg \min \|\mathbf{s}\|_0 \\ s.t., \mathbf{g} = \Phi \mathbf{s} \end{cases} \quad (13)$$

[0061] 利用正交匹配追踪算法对公式 (13) 进行求解, 得到幅值参数向量的估计值 $\hat{\mathbf{s}}$, 并从 $\hat{\mathbf{s}}$ 中找出非零项 \hat{n}_l ; $l=1, \dots, L$; L 为脉冲的数目;

[0062] 步骤三五、估计时延和幅值参数: 被测脉冲串信号中的幅值参数 a_l 和时延参数 t_l 能够估计为:

$$[0063] \quad \begin{cases} \hat{t}_l = \hat{n}_l \Delta \\ \hat{a}_l = \hat{\mathbf{s}}[\hat{n}_l] \end{cases} \quad (14)$$

[0064] 其中, \hat{a}_l 为幅值参数的估计值, \hat{t}_l 为时延参数的估计值。

[0065] 其他步骤及参数与具体实施方式五或六相同。

[0066] 具体实施方式八: 本实施方式与具体实施方式七不同的是, 步骤三四中所述幅值参数向量 s 具体为:

$$[0067] \quad s = [s[0], s[1], \dots, s[N-1]]^T \quad (15)$$

$$[0068] \quad \text{其中, } s[n] = \begin{cases} a_l, n = n_l \\ 0, n \neq n_l \end{cases} \circ$$

[0069] 其他步骤及参数与具体实施方式一至七相同。

[0070] 实施例

[0071] 采用以下实施例验证本发明的有益效果:

[0072] 本实施例按照如图1所示脉冲串信号欠采样系统进行, 被测脉冲串信号参数设置如下: 基函数采用高斯脉冲的频移形式, $h(t) = \cos(2\pi f_c t) e^{-t^2/2\alpha^2}$, 其中 $\alpha = 3e-4$, 载频 $f_c = 2\text{kHz}$; 脉冲个数 $L = 4$; 信号持续时间长度 $T = 0.1$ 秒, 时延参数在区间 $[0, 0.1)$ 秒内随机选取; 幅值参数在 $[0.5, 1.5]$ 内随机选取。伪随机序列 $p(t)$ 的在时域区间 $[0, 0.1)$ 秒内的分段个数为 $Q = 1000$ 。在采样阶段, 低通滤波器的截止频率设置为 $f_{\text{cut}} = 500\text{Hz}$, 数据采集卡的采样率设置为 $f_s = 2f_{\text{cut}} = 1\text{kHz}$; 在参数估计阶段, 模拟时间轴的最小量化单位为 $\Delta = 0.1$ 毫秒, 因此划分的网格数为 $N = T/\Delta = 1000$ 。

[0073] 为了从数值上评估该方法的性能, 采用均方误差作为评价指标, 为了方便比较对均方误差取对数:

$$[0074] \quad MSE[dB] = 10 \times \log_{10} \left(\frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} (t_l - \hat{t}_l)^2 \right) \quad (16)$$

[0075] 其中, MSE表示均方误差; L是脉冲的数量, t_1 是真实的时延参数, \hat{t}_l 是估计的时延参数。由于幅值参数的误差与时延参数的误差成正比, 因此只需要用时延参数的均方误差来衡量该方法的性能。

[0076] (一) 在无噪声环境下, 验证本发明方法的有效性, 实验结果如表1所示。从表中可以看出, 对于L=4个脉冲的脉冲串信号, 本发明方法能够实现时延参数的精确估计, 准确率接近100%。

[0077] 表1 无噪声情况下时延参数的估计值(秒)

方法	t_1	t_2	t_3	t_4
真实值	0.02	0.05	0.07	0.09
本发明方法	0.02	0.05	0.07	0.09

[0079] (二) 在不同信噪比的高斯白噪声环境下(信噪比SNR由-20dB增加到80dB), 采用本发明方法和最近提出的低通滤波器-有限新息率LPF-FRI方法、滤波器组-FRI方法(基于4路多通道系统)进行比较, 重复实验100次后取平均结果, 仿真实验结果如图2所示。从图2中可以看出, 本发明所述基于随机解调和有限新息率的脉冲串信号欠采样方法在噪声情况下有很好的表现, 参数估计精度要优于LPF-FRI方法和滤波器组-FRI方法, 平均约高出5%。

[0080] 本发明还可有其它多种实施例, 在不背离本发明精神及其实质的情况下, 本领域技术人员当可根据本发明作出各种相应的改变和变形, 但这些相应的改变和变形都应属于本发明所附的权利要求的保护范围。

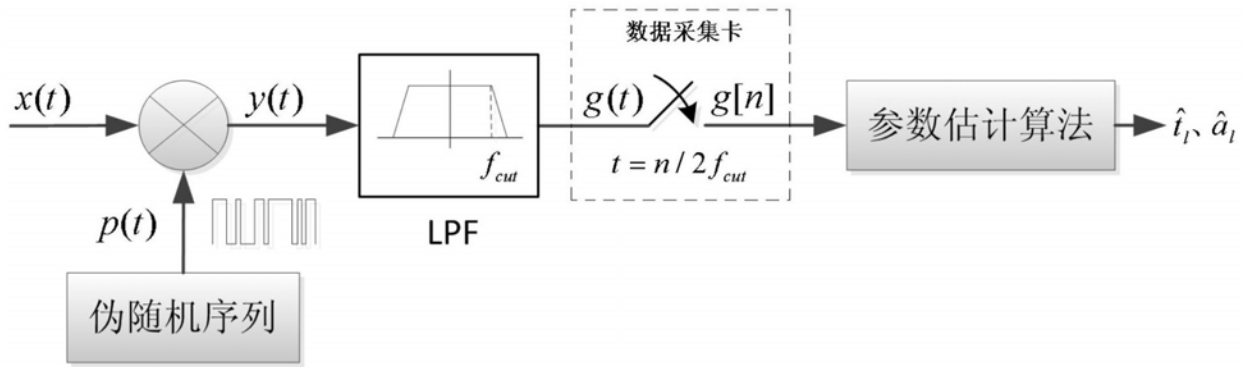


图1

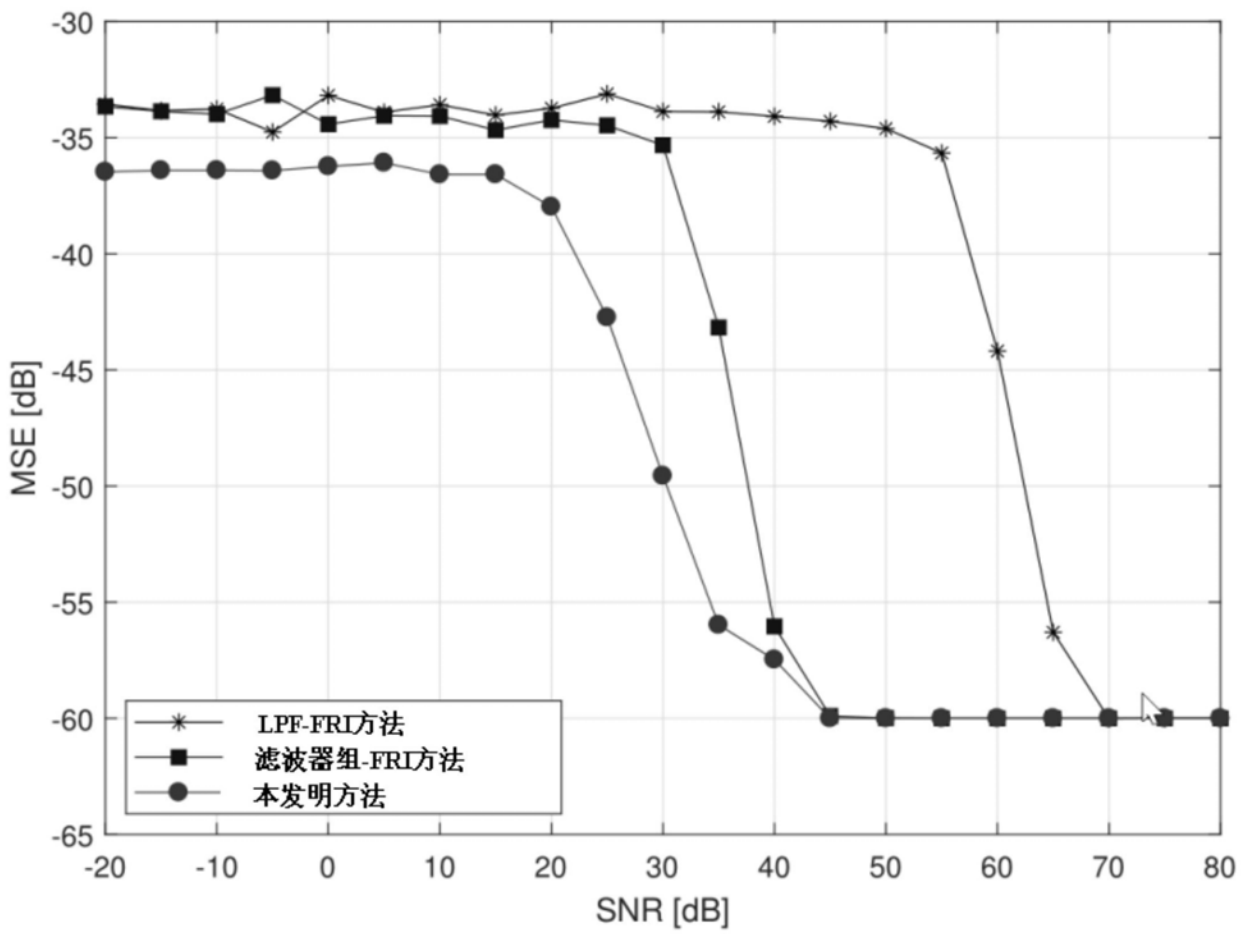


图2