

## 反加窗算法及其在扩频系统窄带干扰抑制中的应用

孟东 缪玲娟\* 张希  
(北京理工大学自动化学院 北京 100081)

**摘要:** 为了证明反加窗算法是一种完全重构算法, 将完全不同的反加窗算法和重叠加窗算法合并为相同的信噪比数学模型, 分析了反加窗算法; 通过建立等效模型, 用信号重构理论推导出等效模型的信噪比损失, 证明了反加窗算法是一种完全重构算法, 提出了反加窗算法只有在信号不完全重构的条件下才需要使用的观点。在直接序列扩频系统中, 通过对布莱克曼窗和汉宁窗的对比, 在窄带噪声干扰下仿真误码率, 证明了该文结论的正确性, 并提出了干扰抑制方案。

**关键词:** 卫星导航; 直接序列扩频系统; 反加窗算法; 信号重构; 重叠加窗

中图分类号: TN967.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)10-2349-07

DOI: 10.11999/JEIT150200

## Inverse Windowing Algorithm and Its Application to Narrow-band Interference Suppression in Direct Sequence Spectrum System

Meng Dong Miao Ling-juan Zhang Xi

(School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to prove the inverse windowing algorithm is a complete reconstruction algorithm, the inverse windowing algorithm is analyzed, through the method that the completely different inverse windowing algorithm and overlapping windowing algorithm are combined into the same mathematical model of SNR; equivalent model is established, the SNR loss of equivalent model is deduced by signal reconstruction theory, which demonstrates that inverse windowing algorithm is a kind of perfect reconstruction algorithm, so the idea is proposed that it is necessary for inverse windowing algorithm to use under conditions of incomplete reconstruction. Compared windowing effects between Hanning window and Blackman window in DSSS which contains narrow-band interference, error rate is simulated, which proves the correctness of this article conclusion. Interference suppression scheme is proposed.

**Key words:** Satellite navigation; Direct Sequence Spectrum System (DSSS); Inverse windowing algorithm; Signal reconstruction; Over lapping windowing

### 1 引言

在卫星导航领域的直接序列扩频系统中, 为消除信号中的窄带干扰, 导航系统需要对信号进行干扰抑制。常用方法有: 傅里叶变换(FFT)技术、重叠变换技术<sup>[1]</sup>(lapped transform)、完全可重构滤波器组技术<sup>[2]</sup>等。其中, 基于傅里叶变换的时-频变换技术需对信号加窗处理, 使无限长信号变成分段的有限长信号。加窗会造成频谱泄露, 普通矩形窗的旁瓣抑制力只有约 13 dB<sup>[3]</sup>, 必须选取特定的、旁瓣抑制力强的窗函数加窗, 以减小频谱泄露; 而特定的窗函数依然会造成信号失真, 增大导航信号的误

码率。

为了克服上述问题, 文献[4]对加窗 FFT 的信噪比损耗进行了研究, 提出了重叠变换加窗的思想; 文献[5]对重叠变换加窗算法的损耗进行了理论推导, 分析了加窗引起的信噪比损失为零的条件; 文献[6]总结了该算法参数最优的选择方案; 文献[7]研究了重叠加窗技术的完全重构条件, 提出了完全重构理论, 并给出了可选的窗函数类型。文献[8]在文献[4~7]的基础之上, 提出了反加窗算法, 证明了该方法能有效提高信号的信噪比, 但是没有理论分析该算法的信噪比损失; 文献[9]应用了文献[8]中的反加窗算法, 讨论了该算法的计算量, 找到了一种快速滤波的计算量小的干扰抑制设计方案, 但同样未讨论该算法关于信噪比损失的理论分析; 文献[10]提出在反加窗算法前提下, 不用考虑加窗引起的信噪比损失的观点, 但是缺乏理论证明。

本文研究了反加窗算法的信噪比损失; 建立等效模型, 用信号重构理论推导出等效模型的信噪比

收稿日期: 2015-02-03; 改回日期: 2015-05-08; 网络出版: 2015-07-17

\*通信作者: 缪玲娟 miaolingjuan@bit.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61153002)和总装备部预先研究基金(51309030104)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61153002); The Advanced Project of PLA General Equipment Department Foundation of China (51309030104)

损失，证明了反加窗算法是一种完全重构算法，提出了反加窗算法只有在信号不完全重构的条件下才需要使用的观点；得出了完全重构的重叠加窗可以完全替代反加窗的结论；仿真反加窗算法，统计了直接扩频系统中的误码率，证明了理论分析的正确性，找到了正确使用反加窗算法的理论依据。

## 2 时-频变换域干扰抑制原理

### 2.1 干扰抑制方案

卫星扩频通信系统在接收到外部信号后，常用基于时-频变换的干扰抑制技术，对信号进行干扰抑制的处理，用以消除窄带干扰<sup>[11-13]</sup>。在时-频变换的干扰抑制技术中，发展了重叠加窗和反加窗算法，减少加窗带来的信噪比损失。本文根据文献[8]和文献[14]，采用了如图 1 所示的基于时-频变换的干扰抑制方案。

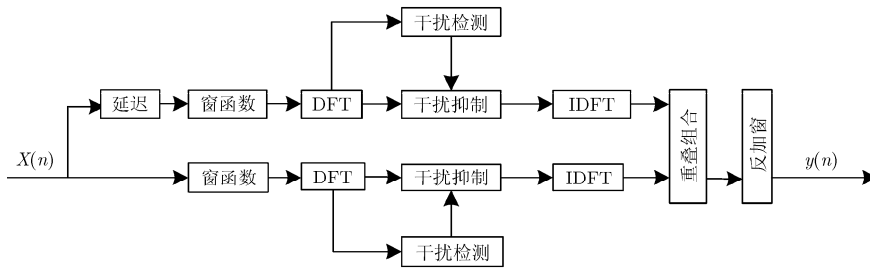


图 1 干扰抑制结构示意图

### 2.2 重叠加窗算法

为了应用傅里叶变换技术，连续信号必须在变换之前进行加窗处理，采用矩形窗的窗函数，就会产生严重的频谱泄漏现象。

频谱泄漏的产生是因为在矩形窗的边缘，信号从零值突变到满值，幅值变化剧烈，丢失了某频段的信号，产生了类似噪声的高频信号，造成处于中心频率的能量谱向附近的频带发散的现象，这种发散出的能量谱叫做旁瓣。窗函数的旁瓣越小，频谱泄漏的程度越小，矩形窗旁瓣的旁瓣抑制力只有约 13 dB<sup>[3,15]</sup>，频谱泄漏严重。所以，选择窗函数时，应尽量选择旁瓣抑制能力强的窗函数，如汉宁窗、汉明窗、布莱克曼窗等。但也不能完全消除频谱泄漏和信号失真。因此，发展了重叠变换加窗技术<sup>[6]</sup>。

重叠加窗技术是通过多路信号的延时加窗，再将多路信号相加或者选择的方法，得到接近完全重构(信噪比损失为零)的信号。重叠加窗技术可以重构信号，有效补偿因频谱泄漏造成的信号失真。多路数据可以采用重叠相加方式处理，或者采用重叠选择方式处理。由于重叠相加方式的处理精度高，

令重叠变换加窗算法中的延迟为  $T$ ，该方案选择了重叠变换加窗算法中延迟  $T=1/2$  周期的设计方案。输入信号  $x(n)$  被分成两条通路，一条通路直接输入窗函数，顺次进行傅里叶变换、干扰抑制、傅里叶反变换；另一条通路比前者多了延迟环节，其它步骤相同。两条通路进入重叠组合部分后，再进行反加窗算法的处理。

信号中干扰的剔除，主要发生在图 1 中的两个环节：窗函数和干扰抑制环节。由于窗函数可以等效为低通滤波器，加窗过程可以剔除高频干扰；频域内的干扰抑制环节可以通过检测信号的频域信息，剔除干扰；而重叠加窗、反加窗等重构方法是在窗函数抑制干扰等步骤之后，最大限度地减少加窗带来的损失，复现原始信号，降低干扰在总信号中的比重，从而达到抑制干扰的效果。

本文主要介绍基于重叠相加的反加窗技术。重叠加窗示意图，如图 2 所示。

图 2 中显示的是重叠加窗的一般过程。窗函数 1、窗函数 2、窗函数 3 代表不同延时下的加窗函数  $w(n)$ 。3 个加窗函数中，共有两次重叠相加的计算，相加部分为  $(a+b)$  段和  $(d+e)$  段数据。窗函数长度为  $N$ ，延迟时间为  $N - k_0$ ， $c$  段为未叠加部分。窗函数 2 分别与前后两个窗函数加窗求和后，形成输出序列。加窗都会伴随信噪比损失，重叠加窗会补偿信噪比损失，重构信号。 $c$  段为未叠加部分，未补偿加窗损失。

从时域来看，窗函数从中间向两端逐渐衰减，越靠近两端，衰减越严重，引起的信号畸变也越大，从而带来的信噪比损耗越大。因此，在实际应用重

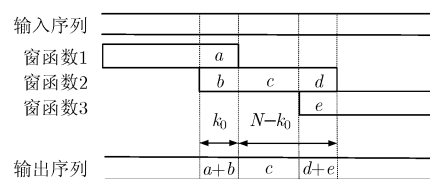


图 2 重叠加窗示意图

叠加窗的过程中，一般把延迟  $N - k_0$  设为窗函数长度  $N$  的  $1/2$  或  $1/4$ ，即当  $k_0=N/2$  时， $a+b=d+e=N/2$ ， $c=0$ <sup>[6]</sup>。文献[5]根据图 2，推导出了重叠加窗过程中的信噪比损失。

### 2.3 完全重构理论

**2.3.1 完全重构理论描述**<sup>[6]</sup> 信号的完全重构方法就是指使加窗引起的信噪比损失为零的信号重构方法。加窗函数会带来导航信号的信噪比损失，但重叠加窗算法在特定条件下可以使该信噪比损失为零，即实现信号的完全重构。下面讨论重叠加窗算法的信噪比损失。

在图 2 中，重叠相加前的干扰抑制支路的输出噪声功率为<sup>[5]</sup>

$$\sigma^2 = \sigma_W^2 + \sigma_E^2 + \sigma_{SL}^2 \quad (1)$$

其中， $\sigma_W^2, \sigma_E^2, \sigma_{SL}^2$  分别表示加窗后的白噪声功率，干扰抑制引入的噪声功率和旁瓣泄漏引入的噪声功率。

图 2 作为重叠加窗过程的时序图，延迟为  $N - k_0$ 。令  $c = 0$ ，根据文献[5]，窗函数 2 所覆盖的数据段中，该算法总的信噪比损失如下：

$$L_T = L_W \left( 1 + \frac{\sigma_E^2}{\sigma_W^2} + \frac{\sigma_{SL}^2}{\sigma_W^2} \right) = L_W \left( L_E + \frac{\sigma_{SL}^2}{\sigma_W^2} \right) \quad (2)$$

其中， $L_T$  为总信噪比损失， $L_W$  为加窗引入的信噪比损失， $L_E$  为干扰抑制引入的信噪比损失。当信噪比损失为零时， $L_W=1$ 。因加窗引入的信噪比损失  $L_W$  为

$$L_W = \frac{(N - k_0)(v_{NO} + v_O)}{(m_{NO} + m_O)^2} \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} m_{NO} &= \sum_{n=k_0}^{N-k_0-1} w(n) \\ m_O &= \sum_{n=N-k_0}^{N-1} [w(n) + w(n - N + k_0)] \\ v_{NO} &= \sum_{n=k_0}^{N-k_0-1} w^2(n) \\ v_O &= \sum_{n=N-k_0}^{N-1} [w(n) + w(n - N + k_0)]^2 \end{aligned}$$

其中， $w(n)$  为窗函数中第  $n$  个值； $m_{NO}, v_{NO}$  为第 1 次重叠相加部分，是前  $k_0$  个值产生的参数，代表第 1 次重叠加窗对  $(a + b)$  段数据的影响； $m_O, v_O$  为第 2 次重叠相加部分，是后  $N - k_0$  个值产生的参数，代表第 2 次重叠加窗对  $(d + e)$  段数据的影响。从式(1)看出，加窗算法的完全重构条件就是指使  $L_W = 1$  的窗函数  $w(n)$  的取值条件。经研究发现，加窗算法的完全重构条件是指窗函数  $w(n)$  同时满足重复性和偶对称性<sup>[6]</sup>。

### 2.3.2 不同延迟下的完全重构条件及其信噪比损失<sup>[6]</sup>

根据文献[6]，当窗函数  $w(n)$  同时满足重复性和偶对称性时，满足完全重构条件，使加窗引起的信噪比损失为零。

当延迟  $T=1/2$  和  $T=1/4$  周期时，窗函数  $w(n)$  可完全重构信号的条件分别为

$$\left. \begin{aligned} \left\{ \begin{aligned} \sum_{i=0}^1 w\left(n + \frac{iN}{2}\right) &= C_1, \quad 0 \leq n \leq \left(\frac{N}{2} - 1\right) \\ w(n) &= w(N - 1 - n), \quad 0 \leq n \leq \left(\frac{N}{2} - 1\right) \end{aligned} \right\}, \quad T = \frac{N}{2} \\ \left\{ \begin{aligned} \sum_{i=0}^1 w\left(n + \frac{iN}{4}\right) &= C_2, \quad 0 \leq n \leq \left(\frac{N}{4} - 1\right) \\ w(n) &= w(N - 1 - n), \quad 0 \leq n \leq \left(\frac{N}{4} - 1\right) \end{aligned} \right\}, \quad T = \frac{N}{4} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中  $C_1, C_2$  表示某个常数，满足式(4)的窗函数，如表 1 所示。

表1 满足完全重构的窗函数

窗函数	$T=N/2$	$T=N/4$
1	巴特莱特窗	布莱克曼窗 (-58 dB)
2	汉宁窗	精布莱克曼窗(-58 dB)
3	汉明窗	$\cos^4 x$ 窗
4	$\cos^2 x$ 窗	$\cos^6 x$ 窗
5		布莱克曼-哈瑞斯窗(4 采样)
6		布莱克曼-哈瑞斯窗(3 采样)

注：布莱克曼窗 (-58 dB) 代表布莱克曼窗的旁瓣抑制能力最大为 58 dB，外部信号的干信比值最低 -58 dB，当干信比低于 -58 dB 时，窗函数性能开始恶化。

分析不同延时下的信噪比损失，将式(4)分别代入式(3)中，可得

$$m_O = v_O = 0 \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} m_{NO} &= \left\{ \begin{aligned} \sum_{n=0}^{N/2-1} \sum_{i=0}^1 w\left(n + \frac{iN}{2}\right), \quad T = N/2 \\ \sum_{n=0}^{N/4-1} \sum_{i=0}^3 w\left(n + \frac{iN}{4}\right), \quad T = N/4 \end{aligned} \right. \\ v_{NO} &= \left\{ \begin{aligned} \sum_{n=0}^{N/2-1} \left[ \sum_{i=0}^1 w\left(n + \frac{iN}{2}\right) \right]^2, \quad T = N/2 \\ \sum_{n=0}^{N/4-1} \left[ \sum_{i=0}^3 w\left(n + \frac{iN}{4}\right) \right]^2, \quad T = N/4 \end{aligned} \right. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

则有

$$L_W = \begin{cases} 1, & T = N/2 \\ 1, & T = N/4 \end{cases} \quad (7)$$

即证明了式(4)中的条件使信噪比损耗为零，是完全重构条件。

对于不同的完全重构方法, 在相同窗函数和频域内抗干扰方法的前提下, 其在干扰抑制方面的效果是相同的。因为完全重构在理论上已经证明, 其使加窗引起的信噪比损失为零, 可以完全复现原始信号。

### 3 反加窗算法

#### 3.1 反加窗算法的描述<sup>[8]</sup>

反加窗方法是为了提高信号的信噪比, 在重叠变换加窗的基础上进一步补偿幅值损耗而产生的。反加窗算法是对经过傅里叶变换、干扰检测、干扰抑制、IFFT、重叠组合后的信号, 乘以窗函数权值倒数, 以恢复时域信号的方法。假设混有窄带干扰的导航信号序  $x(k)$  为

$$x(k) = s(k) + n(k) + i(k) \quad (8)$$

其中  $s(k)$  为导航信号序列,  $n(k)$  为加性白噪声序列,  $i(k)$  为窄带干扰序列。

导航信号序列  $x(k)$  经频域干扰检测、干扰抑制、IFFT 以及重叠组合过程, 滤去窄带干扰, 得到信号  $x'(k)$  为

$$x'(k) = s(k)w'(k) + n(k)w'(k) \quad (9)$$

其中,  $x'(k)$  是与重叠组合方式对应的窗函数, 对于重叠相加的方式有

$$w'(k) = w(k) + w(k + N/2) \quad (10)$$

其中,  $1 \leq k \leq N/2$ 。对信号  $x'(k)$  进行反加窗操作, 即乘以窗函数  $x'(k)$  的倒数, 可得反加窗后的信号  $y(k)$  为

$$y(k) = x'(k) \frac{1}{w'(k)} = s(k) + n(k) \quad (11)$$

式(11)中  $w'(k)$  为完整窗函数  $w(k)$  的中间部分, 避免了  $w(k)$  取 0。

#### 3.2 反加窗算法在信号重构中的理论分析

由 3.1 节得, 反加窗算法可以减小加窗对导航信号的损耗, 改善信号的信噪比。本文结合重叠加窗算法, 通过建立等效模型, 提出定理 1。

**定理 1** 反加窗算法可以使加窗引起的信噪比损失降为零, 可以等效为完全重构算法。

**证明** 将反加窗算法等效为一种重叠加窗算法, 分析其信噪比损失。参照图 2, 令  $w(n - N + k_0)$  是重叠加窗算法中的加窗函数, 是窗函数  $w(n)$  的  $N - k_0$  个延迟, 则重叠加窗算法的简化过程表示为

$$y = x[w(n) + w(n - N + k_0)] \quad (12)$$

反加窗算法的简化过程可表示为

$$y = x[w(n)][1/w(n)] \quad (13)$$

对式(13)变形

$$\begin{aligned} y &= x[w(n)] \left[ \frac{1}{w(n)} \right] = x[w(n)] \left[ 1 + \frac{1}{w(n)} - 1 \right] \\ &= x \left[ w(n) + w(n) \left( \frac{1}{w(n)} - 1 \right) \right] = x[w(n) + (1 - w(n))] \end{aligned}$$

即

$$y = x[w(n) + (1 - w(n))] \quad (14)$$

式(14)就是反加窗算法的等效模型。对比式(12)和式(14), 将反加窗算法等效为延迟为  $N$ 、加窗函数  $w(n - N + k_0) = 1 - w(n)$  的重叠加窗算法, 此时  $k_0 = 0$ 。将等效模型式(14)代入式(3)得

$$L_W = \frac{N(v_{NO} + v_O)}{(m_{NO} + m_O)^2} \quad (15)$$

对照图 2, 式(3)中包括了两次重叠加窗的过程, 等效模型(15)代表式(3)中的第 2 次重叠加窗的过程, 研究了  $(d + e)$  段数据的信噪比损失。显然,  $(d + e)$  段数据未涉及第 1 次重叠加窗的过程, 即有

$$m_{NO} = v_{NO} = 0 \quad (16)$$

加窗函数  $w(n - N + k_0)$  用  $1 - w(n)$  等效表示, 则有

$$\begin{aligned} m_O &= \sum_{n=N-k_0}^{N-1} [w(n) + w(n - N + k_0)] \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} [w(n) + 1 - w(n)] = \sum_{n=0}^{N-1} 1 = N \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} v_O &= \sum_{n=N-k_0}^{N-1} [w(n) + w(n - N + k_0)]^2 \\ &= \sum_{n=N-k_0}^{N-1} [w(n) + 1 - w(n)]^2 = \sum_{n=0}^{N-1} 1 = N \end{aligned} \quad (18)$$

将式(16), 式(17), 式(18)代入式(15)中, 化简得

$$L_W = \frac{N(0 + N)}{(0 + N)^2} = 1 \quad (19)$$

从而证明  $(d + e)$  段数据的信噪比损失为零; 同理, 当  $(a + b)$  段数据使用反加窗算法再次等效为第 1 次重叠相加部分时, 信噪比损失也为零。式(19)证明了反加窗算法可以使加窗引起的信噪比损失降为零, 它等效为完全重构算法。证毕

由此, 本文提出, 在干扰抑制算法中, 若窗函数  $w(n)$  满足完全重构的条件, 就不必使用反加窗算法, 以免浪费计算而又不能进一步改善性能; 若  $w(n)$  不满足完全重构的条件, 则需要使用反加窗算法, 以减小信噪比损失, 减小信号误码率。

## 4 仿真

#### 4.1 反加窗算法的理论仿真

在不同的重构条件下, 且没有窄带干扰的情况下, 使用反加窗算法, 仿真证明 3.2 节的理论分析。实验中, 窗函数长度为 400 个点, 依次使用布莱克

曼窗、汉宁窗，分别构造出信号不完全重构和完全重构的环境，对比分析重叠加窗和反加窗后信号的大小。仿真结果如图 3，图 4 所示。

图 3 显示了在不完全重构条件下，导航信号经加窗、重叠加窗以及反加窗的时域波形。窗函数采用布莱克曼窗，重叠比例为 1/2。从图 3 中可以看到，直接加窗造成了严重的时域信号畸变，经窗函数重叠加窗后的时域信号仍存在一定程度的信号失真。经反加窗后，信号得到了完全恢复，消除了因

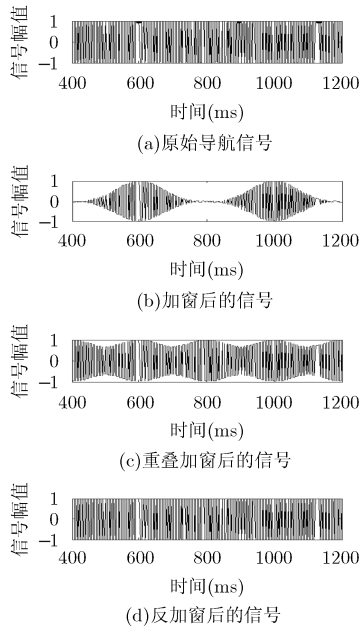


图 3 不完全重构条件下反加窗算法示意图

加窗引入的信号失真。因此，在不完全重构条件下，通过反加窗算法，可以消除因加窗带来的信噪比损失，恢复原来的时域导航信号。这一结果同 3.2 节的理论推导是一致的，证明了反加窗算法是一种完全重构算法。

图 4 中显示了在完全重构条件下，导航信号经加窗、重叠加窗以及反加窗的时域波形。窗函数采用汉宁窗，重叠比例为 1/2。信号经加窗和重叠加窗后，信号得到完全重构，没有明显的畸变；再经反加窗算法后，产生二次重构，信号没有变化。此时，反加窗算法在第 2 次重构中不起作用，还增加了程序计算量。

结合实际应用，在不同重构条件且有窄带干扰的情况下，使用反加窗算法，观察反加窗算法在有窄带干扰情形下的效果。窄带干扰为中心频率为 50 Hz，带宽为 100 Hz，其余条件与图 3，图 4 相同，仿真结果如图 5，图 6 所示。

对比图 3，图 4，从图 5 和图 6 中看到，增加窄带干扰后，干扰信号增多，信号信噪比下降；不论在何种重构条件下，每个图中图(a)与图(d)都是一致的。从而证明了反加窗算法在有窄带干扰情形下，也能重构原始信号，使加窗引起的信噪比为零。

本节的仿真，证明了 3.2 节的理论分析的正确性，并测试了其在加入窄带干扰下的效果。

### 4.2 窄带干扰抑制的应用研究

结合图 1 给出的基于重叠组合算法和反加窗算法的频域窄带干扰抑制方案，使用 MATLAB 进行

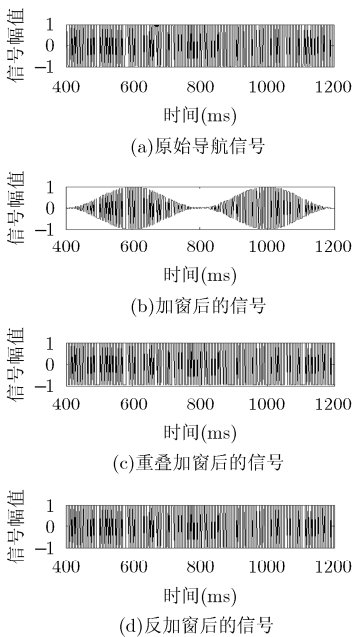


图 4 完全重构条件下反加窗算法示意图

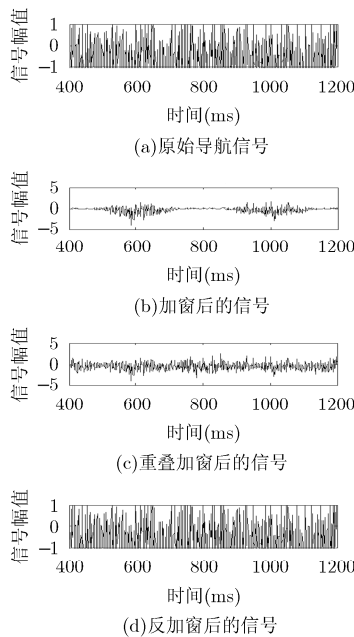


图 5 不完全重构条件下加入窄带干扰的反加窗算法示意图

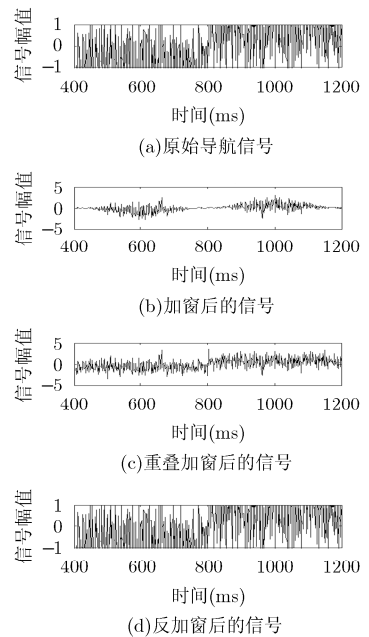


图 6 完全重构条件下加入窄带干扰的反加窗算法示意图

了性能仿真,研究反加窗算法在干扰抑制中的应用,统计了在扩频系统中导航信号在噪声干扰下的误码率。

误码率就是指在导航信号解扩后得到的 C/A 码中,错误接收的码元数在总码元数中所占的比例。导航信号中,信噪比越高,误码率越低。通过误码率的变化,反应信噪比的变化,进而考察在频域系统的实际应用中,不同算法的作用。

仿真条件如下<sup>[17,18]</sup>:选用 1024 点窗函数和 FFT 计算模块;延迟 512 个点,窗函数重叠比例为 1/2;采用反加窗算法和重叠加窗方式;干扰信号是信噪比为 0~30 dB 的随机窄带干扰,随机窄带干扰由基于瑞利分布的单音干扰和高斯窄带干扰组成,其中单音干扰的中心频率为 1 Hz,幅值为基于瑞利分布的随机分布;高斯窄带干扰带宽为 0~100 Hz;窗函数分别选取布莱克曼窗和汉宁窗,仿真结果如图 7 和图 8 所示。

由图 7 知,布莱克曼窗在 1/2 重叠比例下,为不完全重构条件。反加窗算法的误码率始终比不使用反加窗算法的误码率低,反加窗算法起到了重构导航信号、改善信号信噪比的作用。证明了反加窗算法是一种完全重构算法。

由图 8 知,汉宁窗在 1/2 重叠比例下,为完全重构条件。两误码率曲线完全重合,反加窗算法的误码率始终和不使用反加窗算法时的误码率相等。

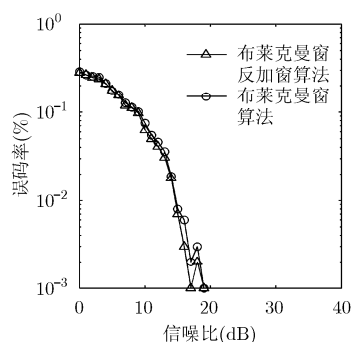


图7 布莱克曼窗下的误码率统计

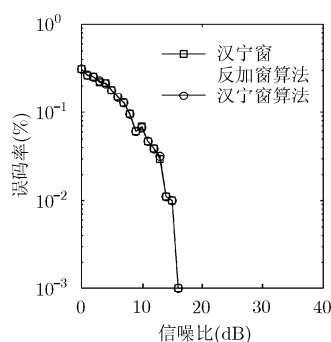


图8 汉宁窗下的误码率统计

反加窗算法没有起到重构导航信号、改善信噪比的作用。

在图 7 中所示,当信噪比在 15 dB 左右时,出现误码率的波动现象。当仿真条件中剔除掉窄带干扰中的单音干扰时,这种波动就消失了,且仍满足 3.2 节的结论,证明了这种波动是由于窄带干扰中的单音干扰引起的,再次验证了反加窗算法在干扰环境下的应用价值。对比图 7 和图 8 可知,反加窗算法只适用于信号不完全重构的情况,在完全重构条件下没有必要再进行反加窗运算,进一步证明了本文 3.2 节结论的正确性。

## 5 总结

本文对反加窗算法进行了理论创新,将原本并列的反加窗算法和重叠加窗算法合并为同一信噪比模型,用重叠加窗算法的信噪比数学模型分析了反加窗算法;通过建立等效模型、理论推导及实验,证明了:(1)反加窗算法是一种完全重构算法。它可以使加窗引入的信噪比损失为零。(2)反加窗算法只适用于信号不完全重构,在信号完全重构的条件下,反加窗算法没有改善信号信噪比的作用,如若使用,会带来二次重构,增加算法的计算量。完全重构的重叠加窗可完全替代反加窗算法。因此,本文为正确使用反加窗算法提供了理论依据,进行了理论创新,并提出了抗干扰应用方案。

## 参考文献

- [1] Medlay M J, Saulnier G J, Das P K, et al. Narrow-band interference excision in spread spectrum systems using lapped transform[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1997, 45(11): 1444-1455.
- [2] Stitz T H and Renfors M. Filter bank based narrow-band interference detection and suppression in spread spectrum system[J]. *IEEE Symposium on Circuits and Systems*, 2002, 2(11): 516-519.
- [3] 黄国胜, 易峥嵘, 朱振才, 等. 卫星扩频通信中一种窄带干扰抑制的组合方案[J]. *中国科学院研究生院学报*, 2010, 27(5): 657-663.  
Huang Guo-sheng, Yi Zheng-rong, Zhu Zhen-cai, et al. A combined scheme of narrow band interference suppression for satellite spread- spectrum communication system[J]. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2010, 27(5): 657-663
- [4] 曾祥华, 李峥嵘, 王飞雪, 等. 扩频系统频域窄带干扰抑制算法加窗损耗研究[J]. *电子与信息学报*, 2004, 26(8): 1276-1281.

- Zeng Xiang-hua, Li Zheng-rong, Wang Fei-xue, *et al.*. Study on windowing degradation of frequency-domain narrowband interference suppression algorithms in spread spectrum system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2004, 26(8): 1276-1281.
- [5] Young J A and Lehnert J S. Performance Metrics for windows used in real-time DFT-based multiple-tone frequency excision [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1999, 47(3): 800-812.
- [6] 杨凯, 邹耘, 尹路明, 等. 重叠加窗 FFT 频域抗干扰算法设计[J]. *测绘科学技术学报*, 2013, 30(3): 228-231.
- Yang Kai, Zou Yun, Yin Lu-ming, *et al.*. Design of frequency domain anti-jamming algorithm based on overlap windowed FFT[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2013, 30(3): 228-231.
- [7] 罗武, 王伟平, 董明科, 等. 重叠 FFT 频域窄带干扰抑制的改进方法[J]. *高技术通讯*, 2007, 17(2): 120-123.
- Luo Wu, Wang Wei-ping, Dong Ming-ke, *et al.*. An improved narrow-band interference suppression algorithm for spread spectrum systems using lapped FFT[J]. *Chinese High Technology Letters*, 2007, 17(2): 120-123.
- [8] 杨晓波, 王薇. 一种扩频系统频域干扰抑制稳健加窗方法研究[J]. *传输与接收*, 2011, 35(7): 128-131.
- Yang Xiao-bo and Wang Wei. Study on robust windowing technology of frequency domain interference suppression in spread spectrum system[J]. *Transmitting & Receiving*, 2011, 35(7): 128-131.
- [9] 孟博, 龚文飞, 孙昕, 等. 基于反加窗和重叠选择的窄带干扰抑制方法[J]. *导航定位学报*, 2014, 2(2): 94-96.
- Meng Bo, Gong Wen-fei, Sun Xin, *et al.*. Narrowband interference suppression method based on inverse windowing and overlap-select[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2014, 2(2): 94-96.
- [10] 马刘海, 张天桥, 刘芹丽, 等. GNSS 频域抗干扰中重叠加窗处理的优化设计[J]. *电子世界*, 2014, 3(3): 139-140.
- Ma Liu-hai, Zhang Tian-qiao, Liu Qin-li, *et al.*. A optimization design in overlapping windowing process for GNSS[J]. *Electronics World*, 2014, 3(3): 139-140.
- [11] Li K and Hou C P. New cooperative frequency domain differential modulation and demodulation[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronic*, 2011, 6(6): 892-896.
- [12] Amin G M. Interference mitigation in spread spectrum communication systems using time-frequency distributions[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1997, 45(1): 90-101.
- [13] 龚文飞, 孙昕. 卫星导航接收机时域窄带干扰抑制滤波器设计与性能分析[J]. *信号处理*, 2011, 27(11): 1774-1779.
- Gong W F and Sun X. Research on the performance of filters narrowband interference suppression in satellite navigation receivers[J]. *Signal Processing*, 2011, 27(11): 1774-1779.
- [14] 姜恩光, 张福洪. 直扩通信系统抗窄带干扰技术与仿真[J]. *电子器件*, 2014, 36(1): 73-75.
- Jiang En-guang and Zhang Fu-hong. Analysis of narrow-band interference suppression in DSSS[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2014, 36(1): 73-75.
- [15] 万永革. 数字信号处理的 MATLAB 实现[M]. 第 2 版, 北京: 科学出版社, 2012: 270-277.
- Wan Y G. Digital Signal Processing in MATLAB[M]. 2nd Ed, Beijing: Science Press, 2012: 270-277.
- [16] 张春海. 直接序列扩频通信系统抗干扰技术研究[D]. [博士论文], 国防科学技术大学, 2006: 78-80.
- Zhang C H. The research of interference suppression technologies in DSSS communication systems[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2006: 78-80.
- [17] 刘艳良, 孔军辉, 刘海见, 等. 基于 Simulink 的直扩系统频域窄带干扰抑制研究[J]. *信息系统与网络*, 2013, 43(12): 61-64.
- Liu Y L, Kong J H, Liu H J, *et al.*. Analysis of frequency domain narrow-band interference suppression in DSSS based on simulink[J]. *Information Systems and Networks*, 2013, 43(12): 61-64.
- [18] 李健伟, 李志强, 朱文明, 等. 基于误码率准则的窄带干扰抑制算法性能分析[J]. *飞行器测控学报*, 2014, 33(5): 435-440.
- Li Jian-wei, Li Zhi-qiang, Zhu Wen-ming, *et al.*. Analysis of the performance of narrow-band interference suppression algorithm based on BER criteria[J]. *Journal of Spacecraft TT & C Technology*, 2014, 33(5): 435-440.
- 孟 东: 男, 1985 年生, 博士生, 研究方向为 GPS 导航和滤波理论.
- 缪玲娟: 女, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为 GPS 导航和惯性导航.
- 张 希: 男, 1989 年生, 博士生, 研究方向为 GPS 导航定位.