

# 基于小波包变换和 BP 神经网络的 DSSS 系统干扰抑制算法\*

史阳春, 吴龙胜, 刘佑宝  
(西安微电子技术研究所, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 提出功率分布优势小波包变换 (PDP-WPT) 和扩展 BP 神经网络 (EBPNN), 并基于两者提出针对直扩系统 (DSSS) 的变换域信息信号提取 (TISI) 干扰抑制算法。首先采用 PDP-WPT 高效跟踪直扩系统中的敌意干扰, 提高算法收敛速度; 然后通过 EBPNN 对变换系数进行信息信号的自适应识别达到干扰抑制的目的, 具有复杂度低、鲁棒性好的特点。理论分析得到采用 TISI 后的扰信比 (ISR) 抑制量、信噪比 (SNR) 损失量和误码率 (BER) 的数学表达式。仿真结果表明: 在相同干扰信号的情况下, 与两种传统算法相比较, 本算法的扰信比抑制量分别提高了 43.8% 和 20.8%, 信噪比损失量分别降低了 62.5% 和 34.8%。

**关键词:** 小波包变换; BP 神经网络; 直扩系统; 干扰抑制

**中图分类号:** TN914.42 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2011) 05-0015-06

## Interference Suppression Based on Wavelet Packets Transform and BP Neural Network for DSSS System

SHI Yangchun, WU Longsheng, LIU Youbao  
(Xi'an Microelectronics Technology Institute, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** To suppress the interference in a DSSS system, a transform domain information signal identify (TISI) algorithm is proposed, based on two improved algorithms: Power distributing predominance wavelet packets transform (PDP-WPT) and extend BP neural network (EBPNN). Firstly, PDP-WPT is proposed to track the interference signal effectively, improving the convergence rate of this algorithm. Secondly, the information signal can be identified from transform domain coefficients by self-adaptive EBPNN, which has simple structure and enhanced numerical robustness. Based on the math model of the TISL, the formulas for ISR suppression, SNR loss and BER are deduced. Results show that TISI can improve the ISR suppression by 43.8% and 20.8%, reduce the SNR loss by 62.5% and 34.8% separately compared with traditional algorithms in the condition of same interference input.

**Key words:** wavelet packets transform; BP neural network; DSSS; interference suppression

直扩系统 (DSSS) 具有隐蔽性高、抗干扰、抗多径及可实现码分多址等优点, 被广泛应用于卫星通信系统、全球定位系统及航天飞机通信系统中。由于数据信号发射功率低, 易被干扰淹没, 所以用干扰抑制技术增强系统的抗干扰能力是极其必要的<sup>[1-2]</sup>。干扰抑制技术主要分为两类: 变换域干扰消除技术<sup>[3-4]</sup>与基于干扰预测的抑制技术<sup>[5]</sup>。自

适应时频干扰抑制算法 (ATFE) 通过子带分解在变换域对干扰系数进行处理, 子带分解效率低、对数据信号损伤较大。基于 AKF 算法的递归神经网络干扰预测器 (RNNP), 利用窄带干扰的强相关性对干扰信号进行预测, 其系统复杂度高、收敛速度慢。

干扰抑制的目的是存在干扰信号的情况下, 在

\* 收稿日期: 2010-11-16

基金项目: 总装备部预研基金资助项目 (51308010512, 513160703); 国家核高基计划资助项目 (20092X01023)

作者简介: 史阳春 (1983 年生), 男, 博士生; E-mail: syncnzl@163.com

接收端尽量降低其对信息信号的影响。到目前为止,大部分关于干扰抑制算法的研究都是基于对干扰信号进行处理<sup>[6-10]</sup>,而通过直接提取信息信号来降低误码率的研究很少。鉴于此,笔者提出了在变换域对接收信号进行信息信号自适应识别的思想:使用 PDP-WPT 实现接收信号的变换域映射;再采用 EBPNN 识别信息信号,减小干扰抑制过程中对信息信号的损伤。将两种算法结合得到 TISI 干扰抑制算法,同现有干扰抑制算法相比,它不仅可降低算法复杂度,还提高了干扰抑制性能。

## 1 系统模型

TISI 干扰抑制系统模型如图 1 所示。发射端的信息比特经过频谱扩展处理后,再受到环境噪声和敌意干扰的影响到达接收端。接收端干扰抑制过程分为两步:①将开关 K1 和 K2 置于 P 处,训练序列在线性最小均方(LMS)准则下更新 EBPNN 的权值,达到预期值后,EBPNN 训练结束。②开关 K1 和 K2 由 P 处切换到 Q 处,对接收信号进行干扰抑制。PDP-WPT 完成接收信号的映射,映射后干扰表现为类似冲激,数据信号与环境噪声则较为平坦,从而实现干扰信号与数据信号的分离;EBPNN 对映射域系数进行自适应加权处理,通过对干扰系数施以相对较小的权值,从而抑制接收信号中的干扰系数。利用 EBPNN 的识别功能<sup>[11-12]</sup>,可以从加权处理后的映射系数中直接提取出期望的数据信息比特。

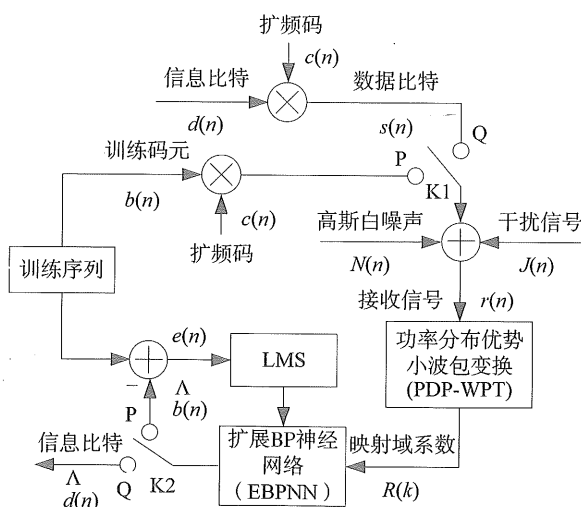


图 1 TISI 干扰抑制系统

Fig. 1 TISI interference suppression system

## 2 TISI 算法

TISI 首先搜索最佳小波包基,对接收信号进行

映射处理,以提高算法的收敛速度;再从映射域系数中识别信息信号。因此本文分别基于小波包变换和 BP 神经网络提出了 PDP-WPT 和 EBPNN。

### 2.1 功率分布优势小波包变换

通过 PDP-WPT 实现对输入信号的映射,达到跟踪干扰信号的目的。由于直扩信号功率谱为  $\text{sinc}^2$  分布,总功率的 90% 包含在 2 倍数据比特速率带宽内。限制射频带宽等效于限制了调制伪码的上升和下降沿,使伪随机码尖锐相关函数顶峰变圆,影响系统的干扰抑制性能。针对这种特点提出 PDP 小波包基,其分解过程分为两阶段:

Step 1 针对直扩信号的全局小波包基分解。

由于直扩信号的功率谱集中在中心频带附近,当干扰出现在中心频带附近时,干扰抑制过程会对直扩信号造成较大损伤;反之,损伤较小,因此直扩信号各频带对干扰抑制过程的敏感度不同。

根据上述情况在小波包基二叉树分解过程中,对应中心频带的节点进行多层次分解,而对应旁瓣频带的节点只进行低层次分解,即功率较大的节点具有小波包基二叉树分解优势。通过限定小波包基二叉树的分解方向,每个节点对应不同的分解层数,避免了低功率节点处的深层分解。因此 PDP 小波包基二叉树具有“倒金字塔”的结构特点。

Step 2 针对干扰信号的局部小波包基分解。

利用子带编码增益 SCG (sub-band code gain) 对第一阶段生成的小波包基结构进行细分,即根据干扰信号的位置对节点进行前向分解,目的是保证干扰集中在尽量少的子带上。

子带编码增益定义如下

$$\text{SCG} = \sigma_x^2 / \left[ \prod_{i=1}^M \sigma_i^2 \right]^{\frac{1}{M}} \quad (1)$$

其中  $\sigma_x^2$  是输入信号方差;  $\sigma_i^2$  为第  $i$  个子带的输出方差。SCG 越大,表明输出信号的频谱越不平坦,信号能量越集中在某些子带上。

$$\text{SCG} = \frac{\sigma_k^2}{(\sigma_{2k}^2 \times \sigma_{2k+1}^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

具体来说,假设需要对第  $k$  个节点进行前向分解为  $2k$  和  $2k+1$  这两个子带,  $\sigma_k^2$  是第  $k$  个节点的方差,  $\sigma_{2k}^2$ 、 $\sigma_{2k+1}^2$  为第  $2k$  和  $2k+1$  节点的输出方差。若  $\text{SCG} \geq T$ , 其中  $T$  为判决阈值,则将  $k$  节点前向分解为两个子节点,否则停止在  $k$  节点。

第一阶段产生的小波包基结构是针对直扩信号功率分布的,给出了小波包基的分解方向。通过第二阶段的细化最终实现 PDP 小波包基结构。PDP-WPT 可高效跟踪直扩系统中的干扰信号,使 EB-

PNN 快速准确识别信息信号。

从图 2 可以得到，为达到相同的干扰抑制效果，底层小波包基分解次数最多，产生均匀分布的子带；ATFE 小波包基经过十六次分解产生九个非均匀分布的子带；PDP 小波包基经过十四次分解产生八个非均匀分布的子带，所以 PDP 小波包基的分解效率更高。

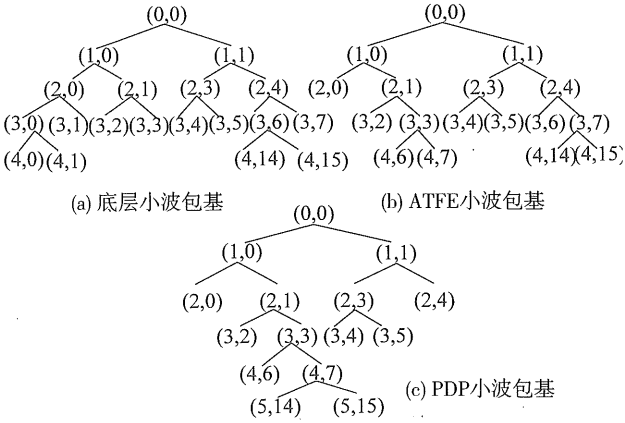


图 2 小波包基

Fig. 2 Wavelet packets basis

2.2 扩展 BP 神经网络

EBPNN 相对于传统 BP 神经网络干扰预测算法 (RNNP) 结构更为简化。并通过对 EBPNN 的权系数进行预处理，进一步提高干扰抑制系统的收敛速度。

直扩系统的基带接收信号可表示为

$$r(n) = S(n) + N(n) + J(n) \quad (3)$$

其中,  $S(n)$  为数据信号, 且  $S(n) = \sum_{i=1}^m A_i \cdot d_i(n) \cdot c(n)$ ,  $d_i(n)$  为信息信号,  $c(n)$  为扩频序列;  $N(n)$ 、 $J(n)$  分别为高斯白噪声与敌意干扰信号。  $S(n)$ 、 $N(n)$ 、 $J(n)$  三者相互独立。

图 3 所示,  $H$  与  $G$  分别表示任意  $n$  点正映射和逆映射, 对接收信号进行正映射后  $R(k) = Hr(n)$ 。权矢量  $\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]^T$  的作用是对接收信号的变换域系数做加权处理, 使

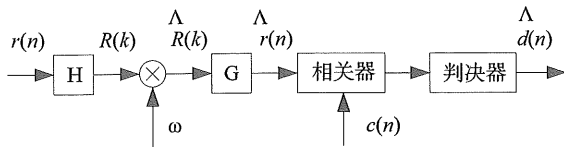


图 3 变换域干扰抑制

Fig. 3 Interference suppression in transforms domain

$\hat{R}(k) = [\omega_1 R_1, \omega_2 R_2, \dots, \omega_n R_n]$ 。最简单的谱加权是基于直接取舍处理, 令  $\omega_i$  取 0 或 1, 缺点在于会对数据信号造成较大损伤, 使输出信噪比降低。同简单谱加权相比, 可采用基于自适应的谱加权处理, 加权系数不再被局限, 减小了对数据信号的损伤, 提高输出信噪比。经过谱修正的信号  $\hat{R}(k)$  逆映射为  $\hat{r}(n)$ , 解扩产生的判决量  $\hat{d}(n)$  为

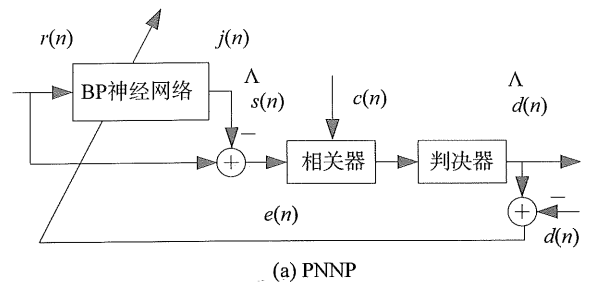
$$\hat{d}(n) = \hat{R}^T G^T c(n) = \hat{r}^T c(n) \quad (4)$$

由于  $H$  和  $G$  是完全重构的, 将  $H = G^T$  代入式 (4) 得到

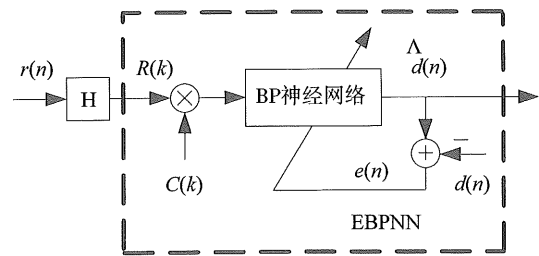
$$\hat{d}(n) = \hat{R}^T H c(n) \quad (5)$$

$Hc(n)$  是扩展序列  $c(n)$  的正映射, 因此判决输出可表示为  $\hat{d}(n) = \hat{R}(k)^T C(k)$ 。

根据上面的推导可得采用 BP 神经网络实现信息比特的直接提取, 如图 4 (b) 所示。EBPNN 的输出为  $\hat{d}(n) = f(\omega_1 R_1 C_1 + \omega_2 R_2 C_2 + \dots + \omega_n R_n C_n)$ 。图 4 中的  $H$  为 PDP-WPT。EBPNN 的输入为经过 PDP-WPT 后的映射域系数, 在映射域中干扰表现为类似冲激, 数据信号与环境噪声则较为平坦, 所以 EBPNN 的收敛速度较 RNNP 有明显的提高。



(a) PNNP



(b) TISI

图 4 基于干扰预测和 EBPNN 的干扰抑制算法

Fig. 4 Interference suppression based on predict and EBPNN

从图 4 中可以看出, 传统的 RNNP 算法由三部分构成, 分别为 BP 神经网络、相关器与判决器。而 TISI 所采用的 EBPNN 利用了 BP 神经网络以及 PDP-WPT 两部分就可实现干扰抑制功能。因此

EBPNN 简化了传统干扰抑制算法的结构。

为进一步提高算法的收敛速度, EBPNN 依据 PDP-WPT 产生的变换域系数对权值进行预处理,  $\sigma_i^2$  大于阈值的子带分量施以较小的权重因子, 因为该子带中集中相对较多的干扰能量, 反之权重因子取 1。

### 3 数学模型与性能仿真

为比较 TISI 与 ATFE 算法、RNNP 算法的干扰抑制性能, 通过建立数学模型得到干扰抑制系统的误码率、扰信比抑制量与信噪比损失量的公式, 并进行仿真分析。

#### 3.1 数学模型

将式 (3) 代入式 (4) 后判决输出可以表示为

$$A = \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{i=1}^M \sum_{l=0}^{2N-2} \left\{ t_i(l) \left[ c(k-l) + n(k-l) + j(k-l) \right] \right\} \times c(k) = \underbrace{\sum_{k=0}^{L-1} \sum_{i=1}^M t_i(0) c^2(k) + \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{i=1}^M \sum_{l=0}^{2N-2} t_i(l) j(k-l) c(k)}_{\Lambda_1} + \underbrace{\sum_{k=0}^{L-1} \sum_{i=1}^M \sum_{l=0}^{2N-2} t_i(l) n(k-l) c(k)}_{\Lambda_2} + \underbrace{\sum_{k=0}^{L-1} \sum_{i=1}^M \sum_{l=0}^{2N-2} t_i(l) j(k-l) c(k)}_{\Lambda_3} \quad (6)$$

其中  $t_i(k) = \omega_i(k) * h_i(k) * g_i(k)$ 。

判决输出的均值与方差分别为

$$E[A] = L \sum_{i=1}^M t_i(0) - \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{i=1}^M \sum_{l=1}^{2N-2} t_i(l) \quad (7)$$

$$\text{var}[A] = E[(\Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3)^2] - E^2[A] \quad (8)$$

因为  $\Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_3$  互不相关, 式 (8) 可以写为  $\text{var}[A] = \text{var}[\Lambda_1] + \text{var}[\Lambda_2] + \text{var}[\Lambda_3]$ ,  $\text{var}[\Lambda_1]$ 、 $\text{var}[\Lambda_2]$ 、 $\text{var}[\Lambda_3]$  分别为信息信号、环境噪声和干扰信号的方差。其中

$$\begin{aligned} \text{var}[\Lambda_1] &= L^2 \sum_{i=1}^M \sum_{r=1}^M \sum_{l=0}^{2N-2} t_i(l) t_r(l) - \left[ L \sum_{i=1}^M t_i(0) - \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{i=1}^M \sum_{l=1}^{2N-2} t_i(l) \right]^2 \quad (9) \\ \text{var}[\Lambda_2] &= L \delta_n^2 \sum_{i=1}^M \sum_{r=1}^M \sum_{l=0}^{2N-2} t_i(l) t_r(l) - \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{g=0}^{L-1} \sum_{i=1}^M \sum_{r=1}^M \sum_{l=0}^{2N-2} \sum_{s=0}^{2N-2} t_i(l) t_r(s) \times \end{aligned}$$

$$\sigma_n^2 \delta(k-l-g+s) \quad (10)$$

$$\text{var}[\Lambda_3] = L \sum_{i=1}^M \sum_{r=1}^M \sum_{l=0}^{2N-2} \sum_{s=0}^{2N-2} t_i(l) t_r(s) R_j(s-l) - \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{g=0}^{L-1} \sum_{i=1}^M \sum_{r=1}^M \sum_{l=0}^{2N-2} \sum_{s=0}^{2N-2} t_i(l) t_r(s) \times R_j(k-l-g+s) \quad (11)$$

此文主要参考三个指标来比较各算法的干扰抑制性能: 扰信比抑制量、信噪比损失量和误码率。其表达式分别为

$$\text{ISR}_{\text{抑制量}} = \text{ISR}_{\text{in}} - \text{ISR}_{\text{out}} \quad (12)$$

$$\text{SNR}_{\text{损失量}} = \text{SNR}_{\text{out}} - \text{SNR}_{\text{in}} \quad (13)$$

$$P_e = Q(\sqrt{\text{SNR}}) \quad (14)$$

其中  $\text{ISR} = \frac{\text{var}[A_3]}{\text{var}[A_1]}$ ,  $\text{SNR} = \frac{\text{var}[A_1]}{\text{var}[A_2]}$ ,  $Q(x) =$

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{y^2}{2}} dy。$$

#### 3.2 仿真结果与性能分析

仿真中的数据信号采用 10 级 gold 序列, 环境噪声是方差为 1 的加性高斯白噪声, 干扰信号包括两种形式: ①  $J_1(n)$  为双频连续载波干扰, 表达式为:  $J_1(n) = 7\sin(4 \cdot \pi \cdot 10^6 \cdot n) + 2\sin(6 \cdot \pi \cdot 10^6 \cdot n)$ ; ②  $J_2(n)$  为自回归干扰, 由高斯白噪声递推产生, 表达式为:  $J_2(n) = 1.76j(n-1) - 0.76j(n-2) + n_0(n)$ 。见图 5 图 6 所示。

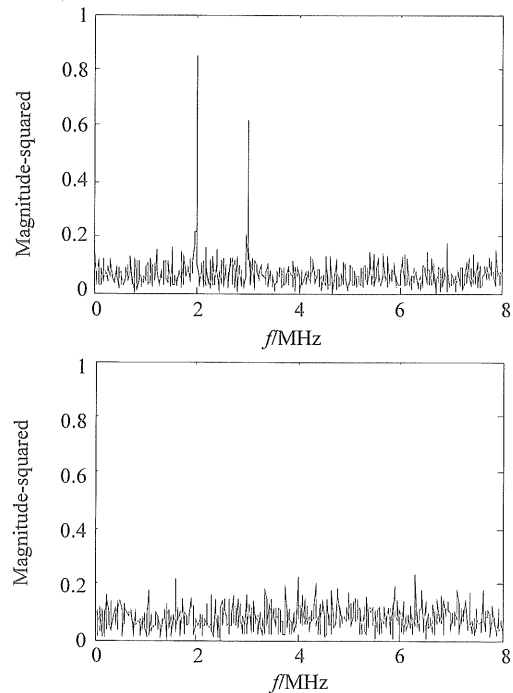


图 5 TISI 抑制双频干扰前后的信号频谱

Fig. 5 Spectrum before and after DCWI suppression with TISI

图 5 和图 6 分别给出干扰信号为 2 MHz、3 MHz 的双频连续载波干扰和自回归干扰时，采用 TISI 进行干扰抑制前后的信号频谱图。在图 5 中，归一化表示干扰信号与有用信号的幅度比例关系。抑制前在 2 MHz 处连续载波干扰的幅度为 0.8，3 MHz 处连续载波干扰的幅度为 0.6，因此通过 TISI 后强干扰信号得到了明显地抑制。在图 6 中，低频段处平均 10 dB 的自回归干扰通过 TISI 后也被明显消除。

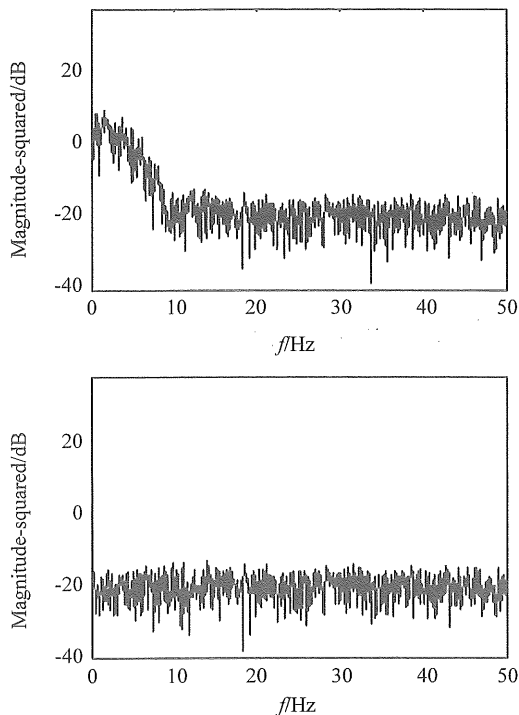


图 6 TISI 抑制自回归干扰前后的信号频谱

Fig. 6 Spectrum before and after ARI suppression with TISI

从图 7 可以看出，两种强干扰信号同时存在时，伪码的相关峰值不明显，不满足接收机的要求，将导致接收机无法正常工作。而 TISI 算法能消除干扰信号的影响，并且对有用信号的损伤较小。通过 TISI 对干扰信号进行抑制后，在码片延迟为 495chip 时有明显的相关峰值，从而使接收机可以在强干扰环境下正常捕获、跟踪数据信号，达到了干扰抑制的目的。

图 8 给出了 TISI 和 RNNP 训练过程中的均方误差曲线。可以看到：①TISI 的均方误差更小，说明其干扰抑制精度更高；② TISI 的收敛速度更快，可以实时的抑制干扰信号，改善了 RNNP 实时性差与收敛速度慢的缺点，可在快时变干扰信道中得到更好的应用。图 9 给出扰信比为 25 dB 的情况下，

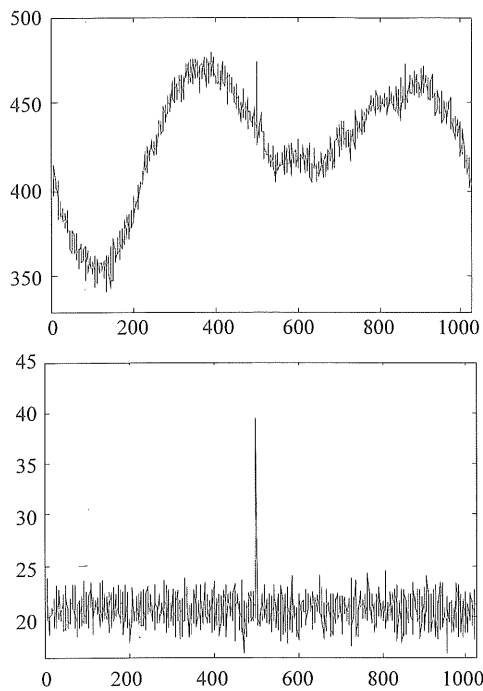


图 7 TISI 抑制干扰前后的伪码相关特性

Fig. 7 Correlation of gold sequence through TISI

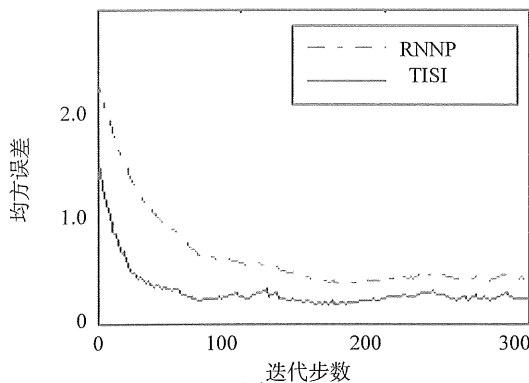


图 8 TISI 与 RNNP 的均方误差曲线

Fig. 8 MSE curve of TISI and RNNP

三种算法对干扰信号进行抑制后接收机的误码率曲线。从图 9 中可以得到，在输入信噪比相同的情况下，TISI 的误码率最低。

表 1 给出双频连续载波干扰与自回归干扰同时存在时，ATFE、RNNP 和 TISI 三种干扰抑制技术的性能比较。可以看出 (TISI 与 ATFE 频带分解次数相同)：①三种算法的扰信比抑制量平均为 35.6 dB、42.4 dB 和 51.2 dB，其中 TISI 的扰信比抑制量较前两种算法分别提高了 43.8% 和 20.8%；②三种算法的信噪比损失量平均为 4 dB、2.3 dB 和 1.5 dB，其中 TISI 的信噪比损失量较前两种算法分别降低了 62.5% 和 34.8%；③三种算法的输入

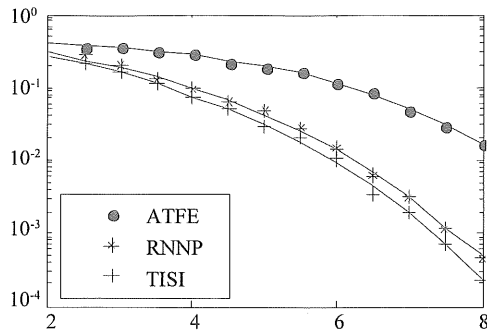


图 9 干扰抑制后接收机误码率性能

Fig. 9 Receiver performance in the presence of interference

信号扰信比越大, 输出扰信比的抑制量越大, 对扩频信号的损伤就越大。

表 1 扰信比抑制量和信噪比损失量

Table 1 ISR suppress and SNR loss dB

输入信号 ISR	扰信比抑制量			信噪比损失量		
	ATFE	RNNP	TISI	ATFE	RNNP	TISI
11	12.6	21.5	31.4	3.9	1.4	0.6
19	30.9	38.1	47.8	3.7	2.1	0.9
24	44.5	49.8	57.0	4.1	2.7	1.8
31	54.2	60.1	68.5	4.3	3.1	2.5

## 4 结 论

针对现有干扰抑制算法结构复杂、收敛速度慢的问题, 提出了基于 PDP-WPT 和 EBPNN 的变换域信息信号提取算法实现干扰抑制, 并提高了干扰抑制的性能。建立 TISI 的数学模型, 得到用来衡量干扰抑制性能的计算公式, 并进行仿真。通过与 ATFE 算法和 PNNP 算法相比较, 可以得到 TISI 的干扰抑制性能较现有算法有显著提高, 更适用于直扩系统的干扰抑制。

### 参考文献:

[1] GONG M, LIN T. Research of narrow-band interference suppression technologies in DSSS communication systems [J]. 5th International Conference on Wireless Communications, 2009: 1-5.

- [2] PEREZ-SOLANO J J, FELICI-CASTELL S, PODRIGUEZ-HERNANDEZ M A. Narrowband interference suppression in frequency-hopping spread spectrum using undecimated wavelet packet transform [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57 (3): 1620-1629.
- [3] TAZEBAY M V, AKANSU A N, SHERMAN M J. A novel adaptive time-frequency excision technique for direct sequence spread spectrum communications [J]. Proceedings of the IEEE-SP International Symposium on Time-Frequency and Time-Scale Analysis, 1994: 492-495.
- [4] TAZEBAY M V, AKANSU A N. A performance analysis of interference excision techniques in direct sequence spread spectrum communications [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1998: 2530-2535.
- [5] XU D J, ZHAO P J, SHEN F, et al. Narrowband interference suppression using RKF-based recurrent neural network in spread spectrum system [C] // 4th International Conference on Wireless Communications, 2008: 1-5.
- [6] 孙永军, 易克初. 利用核方法的直扩系统多个窄带干扰抑制 [J]. 西安电子科技大学学报, 2007, 34 (4): 554-557.
- [7] 李仲泥. 扩频通信系统中的变换域抗干扰技术 [D]. 上海: 上海交通大学, 2000.
- [8] PROAKIS J G, MANOLAKIS D G. Digital signal processing: principles, algorithm and applications [M]. Publishing House of Electronics Industry, 2007.
- [9] PARISI R, DI CLAUDIO E D, ORLANDI G, et al. Fast adaptive digital equalization by recurrent neural networks [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997, 45 (11): 2731-2739.
- [10] MAO W L. Novel SREKF-based recurrent neural predictor for narrowband/FM interference rejection in GPS [J]. International Journal of Electronics and Communications, 2008, 62(3): 216-222.
- [11] 胡德文, 王正志, 王耀南, 等. 神经网络自适应控制 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2005.
- [12] CHANG P R, HU J T. Narrow-band interference suppression in spread-spectrum CDMA communications using pipelined recurrent neural networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1999, 48 (2): 467-477.