

文章编号: 2095-4980(2021)05-0858-06

基于小波包变换及 TRLMS 抑制脉冲干扰的方法

王晓君, 薛琳博*, 王彦朋

(河北科技大学 信息科学与工程学院, 河北 石家庄 050000)

摘要: 为了解决航空无线电导航服务频段附近的脉冲干扰影响接收机工作的问题, 并进一步提高全球导航卫星系统(GNSS)中的脉冲干扰抑制能力, 提出了基于小波包变换及变换域最小均方根算法(TRLMS)来抑制脉冲干扰。通过最佳小波函数分解, 跟踪定位脉冲干扰所处频带, 并采用 TRLMS 自适应滤波技术取代常规小波包固定阈值方法对干扰进行抑制。仿真实验结果表明, 所提方法相比其他的干扰抑制均方根误差更小, 解决了有用信号丢失的问题, 具有更好的干扰抑制性能。

关键词: 小波包变换; 脉冲干扰抑制; 接收机; 干扰定位; 变换域最小均方根算法(TRLMS)

中图分类号: TN914

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020341

Adaptive suppression of pulse interference based on wavelet packet transform and TRLMS

WANG Xiaojun, XUE Linbo*, WANG Yanpeng

(School of Information Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei 050000, China)

Abstract: An adaptive method based on wavelet packet transform and TRansform domain Least Mean Square(TRLMS) is proposed in order to solve the problem that the pulse interference near the service frequency band of aeronautical radio navigation affects the receiver, and further improve the ability of pulse interference suppression in the Global Navigation Satellite System(GNSS). By using the best wavelet function decomposition to track the frequency band of the positioning pulse interference, and adopting TRLMS adaptive filtering instead of the conventional fixed threshold method of wavelet packet, the interference is suppressed. The simulation results show that the mean square error of the proposed method is smaller than that of other methods. It solves the problem of useful signal loss and has better interference suppression performance.

Keywords: wavelet packet transform; pulse interference suppression; receiver; jamming location; TRansform domain Least Mean Square(TRLMS)

现如今全球导航卫星系统(GNSS)在各个领域应用都非常广泛, 与我们的生活息息相关。伽利略 E5、北斗 B2 和 GPS L5 等这些不同频点的卫星信号都是 GNSS 的重要组成部分, 它们的中心频率和现有的航空无线电导航服务(Aeronautical Radio Navigation Services, ARNS)频段会发生重叠。ARNS 频段附近工作的设备主要有测距仪(Distance Measuring Equipment, DME)系统和战术空中导航系统(Tactical Air Navigation System, TACAN), 这些设备工作时都会不可避免地产生脉冲干扰信号。研究调查表明, 其中 DME 系统发射的大功率脉冲信号是影响 GNSS 信号的主要因素^[1], 这些干扰随着 GNSS 有用信号一同进入机载接收机中, 大大降低了 GNSS 信号的信噪比, 严重情况下甚至会导致接收机无法正常运行, 所以必须采取有效的干扰抑制手段来避免脉冲干扰影响卫星导航系统正常工作的问题。有关脉冲干扰抑制方法的研究, 国内外学者提出了各种各样的抗干扰技术。文献[2]提出了时域脉冲消隐法, 该方法首先检测输入信号的幅度, 然后把超过所设置门限阈值的信号置零, 以此来抑制干扰信号, 其缺点是会滤除在脉冲干扰较为集中地方的有用卫星信号, 损失较为严重; 文献[3]提出了频

收稿日期: 2020-07-21; 修回日期: 2020-08-30

基金项目: 国防科技重点实验室资助项目(6142205190401)

*通信作者: 薛琳博 email:2434290841@qq.com

域陷波滤波法，该方法在频域对脉冲干扰进行抑制，再通过陷波滤波法剔除干扰，这种方法的干扰抑制效果好于时域消除法，但会滤除掉脉冲同频率处的一些有用信号；文献[4]提出了小波包抑制脉冲干扰的方法，该方法是将接收信号通过小波包变换转变到小波包系数域中，通过比较系数的绝对值和阈值的大小来界定干扰，但该方法如果阈值选取不当，在一定程度上也会丢失有用卫星信号。

本文从小波包分析入手，提出一种基于小波包变换及 TRLMS 脉冲干扰抑制方法。该方法通过最佳小波包分解锁定脉冲干扰信号所在的子带，并结合 TRLMS 自适应滤波方法抑制脉冲干扰，解决了阈值难以确定的问题，相比直接对干扰子带进行置零处理保留了更多的卫星信号，提高了抗干扰能力。本文还将频域陷波滤波法和小波包固定阈值方法与本文所提方法进行了对比。

1 系统模型

本文以全球定位系统(Global Positioning System, GPS)接收机为依托，把包含噪声和脉冲干扰的卫星信号，采样到中频进行处理，此时接收信号的模型可以表示为：

$$x(t) = s(t)e^{j2\pi f_c t} + J(t) + N(t) \tag{1}$$

式中： $s(t)$ 是调制前的卫星信号； $J(t)$ 为脉冲干扰； $N(t)$ 是高斯白噪声； f_c 是 GPS 信号的载波频率。

通常情况飞机到地面基站测距仪的距离一般是通过飞机自带的 DME 来测量的，这些测距仪一般工作频带上会与 GPS L5 信号的频带产生频率混叠，导致频带内产生 DME 脉冲干扰。该脉冲干扰信号有一定带宽，在时域中这种信号是具有一定拖尾现象的高斯型脉冲对^[5]。一个基带的脉冲信号由间隔为 Δt 的高斯脉冲对组成，可以表示为：

$$J_0(t) = \exp\left[-\frac{\beta}{2}t^2\right] + \exp\left[-\frac{\beta}{2}(t - \Delta t)^2\right] \tag{2}$$

式中： $\beta = 4.5 \times 10^{11} \text{ s}^{-2}$ ，高斯脉冲的半幅度宽度 $3.5 \mu\text{s}$ ； Δt 为高斯脉冲的间隔，本文的时间间隔 Δt 为 $12 \mu\text{s}$ 。

DME 脉冲信号经过调制后的数学模型可以表示为：

$$J(t) = \left[\exp\left[-\frac{\beta}{2}t^2\right] + \exp\left[-\frac{\beta}{2}(t - \Delta t)^2\right] \right] \exp[j(2\pi f_j t + \theta_j)] \tag{3}$$

式中 f_j 和 θ_j 为载波频率和载波相位。基带和调制后的 DME 脉冲信号的时域波形图如图 1 所示。

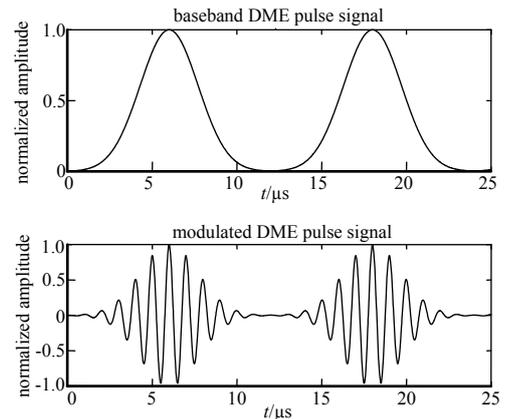


Fig.1 Time domain diagram of baseband and modulated DME pulse signal

图 1 基带和调制后的 DME 脉冲信号时域图

2 基于小波包变换及 TRLMS 的干扰抑制算法

小波包变换主要将信号频带实现多重层次的划分，分解过程中实时变化的脉冲干扰能够被迅速有效地定位在一定频率的子带中，并用相应的算法对干扰进行抑制。本文所需处理的脉冲干扰具有非平稳特性，持续时间很短，采用小波包变换能较好地分析出它的局部化特征。

2.1 小波包变换算法原理

通常小波包可以定义为^[6-7]：

$$\begin{cases} u_{2n} = \sqrt{2} \sum_k h_k u_n(2t - k) \\ u_{2n+1} = \sqrt{2} \sum_k g_k u_n(2t - k) \end{cases} \tag{4}$$

式中： $n, k \in \mathbf{Z}$ ， \mathbf{Z} 表示全体整数的集合；尺度函数 $u_0(t) = \Phi(t)$ ($\Phi(t)$ 为尺度空间的基函数，为低通频谱函数)，小波函数 $u_1(t) = \psi(t)$ ($\psi(t)$ 为 Haar 等小波基函数)， $\{u_n(t), n \in \mathbf{Z}\}$ 是 $u_0(t)$ 产生的小波包族； h_k 是相应的低通滤波器系数； g_k 是相应的高通滤波器系数。小波包分解实际是把信号的频谱划分成多层上的不同子带，这些子带来自上一层子带的分解，它分解的递推公式有：

$$\begin{cases} d_k^{j+1, 2n} = \sum_l h_k(2l - k) d_l^{j, n} \\ d_k^{j+1, 2n+1} = \sum_l g_k(2l - k) d_l^{j, n} \end{cases} \tag{5}$$

小波包重构递推公式为:

$$d_l^{j,n} = \sum_k g_0(l-2k)d_k^{j+1,2n} + \sum_k g_1(l-2k)d_k^{j+1,2n+1} \quad (6)$$

式中: j 表示小波包分解层数; n 表示相应层数中横向节点的位置; $d_l^{j,n}$ 表示在第 j 层第 n 个节点的分解序列。

2.2 基于小波包变换及 TRLMS 自适应脉冲干扰抑制算法

在小波包变换的基础上, 结合 TRLMS 自适应滤波技术对脉冲干扰进行抑制, 其基本思想如下: 在处理 GPS 信号的 DME 脉冲干扰过程中, 先对接收到的含有脉冲干扰的 GPS 信号进行最佳小波包分解; 然后根据能量聚集度和子带功率比与给定门限之间的关系判断 DME 脉冲干扰所在的子带位置; 通过 TRLMS 算法对干扰所在的位置进行自适应滤波处理; 最后通过小波包重构还原抑制掉脉冲干扰后的原始信号。算法流程如图 2 所示。

2.2.1 脉冲干扰定位

小波包分解结束后, 在判断脉冲干扰位置的过程中, 其主要思想是计算衡量各个子带的能量聚集度(Energy Compaction Measure, ECM)和子带功率比(Sub-Band Power Ratio, SBPR)^[8]。能量聚集度实际上是对父节点和左右的子节点能量分布不同的反映, 将信号通过滤波器分解分成高通和低通子带, 设信号的功率谱密度为 $P_x(w)$, 均方差值为 σ_p^2 , 相应能量聚集度 $G = \sigma_p^2 / \sigma_l \sigma_r$ 。其中 σ_p 是父节点的均方差, σ_l 是左子节点的均方差, σ_r 是右子节点的均方差, 其中, $\sigma_l^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} P_x(w)dw$, $\sigma_r^2 = \frac{1}{\pi} \int_{\pi/2}^{\pi} P_x(w)dw$ 。子带功率判决变量可以确定脉冲干扰所在子带的位置, η 表示两个子带的功率比, 即是左节点和右节点的均方差的比值, 定义为 $\eta = \sigma_l^2 / \sigma_r^2$, 给定最大频率分辨力为 $B_w = \pi / 2^M$ (M 是分解的最大层数)^[9]。

通过比较各个子带中的高频部分和低频部分的方差, 当两部分的方差差距比较大时, 能判断受到干扰是方差大的子带。结合参照子带功率比的大小和方差之比, 可以有效判断出 DME 脉冲干扰所在的位置。

2.2.2 TRLMS 自适应滤波技术

在受 DME 脉冲干扰子带进行干扰抑制的过程中, 其中自适应算法采用比较熟悉的 LMS 的改进算法^[10]——TRLMS 算法, 对输入信号进行了酉变换, 通过不断迭代更新滤波器的抽头系数, 求解最优权值对干扰进行自适应抑制。设 S 是一个 $M \times M$ 酉变换矩阵, 即

$$SS^H = \beta I \quad (7)$$

$\beta > 0$ 是一个标量, 用酉矩阵 S 对输入信号向量 $x(k)$ 进行酉变换, 可以得到:

$$u(k) = Sx(k) \quad (8)$$

式中 $u(k)$ 表示变换后的信号向量。酉变换后的抽头权向量 $w(k-1)$ 变为:

$$\hat{w}(k-1) = \frac{1}{\beta} S w(k-1) \quad (9)$$

通常设 $e(k)$ 为预测误差, $d(k)$ 为期望响应, $\mu(k)$ 为迭代的更新步长, $y(k)$ 为输出信号。

- 1) 权向量初始化: $\hat{w} = 0$;
- 2) 给定一酉变换矩阵 S , 更新: $n = 1, 2, \dots$

$$u(k) = Sx(k) \quad (10)$$

$$e(k) = d(k) - \hat{w}^H(k-1)u(k) \quad (11)$$

$$\hat{w}(k) = \hat{w}(k-1) + \mu(k)u(k)e(k) \quad (12)$$

$$y(k) = \hat{w}^H(k-1)u(k) \quad (13)$$

对于滤波器来说, 经过酉变换后原来的单信道 M 阶 FIR 滤波器变成了同等的多信道滤波器, 即在变换域完

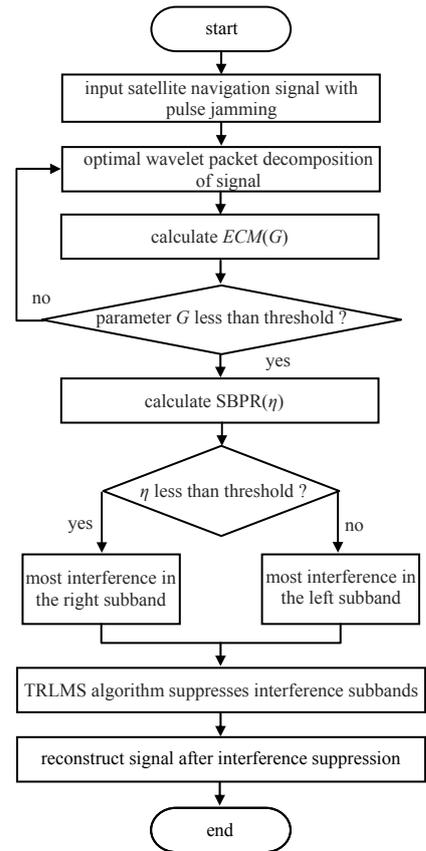


Fig.2 Flow chart of interference suppression algorithm based on wavelet packet and TRLMS

图 2 基于小波包及 TRLMS 干扰抑制算法流程图

成一定程度的解相关。

将以上各部分总结，可得到小波包变换 TRLMS 抑制脉冲干扰的算法具体步骤如下^[11-12]：

- 1) 计算输入接收信号的均方差值 σ_p^2 。
- 2) 对接收信号进行小波包分解，首先算出高频部分的方差 σ_r 和低频部分的方差 σ_l ，再进行能量聚集度 G 的计算。将 G 与预设阈值门限 T 进行比较，如果 $G \geq T$ ，继续分解当前节点，如果 $G < T$ ，则停止分解该节点。
- 3) 获取下一层叶子节点，对下一层的每一个叶子节点同样进行能量聚集度和门限的比较。重复上述的步骤 b) 和步骤 c) 直到定位 DME 脉冲干扰确定在子带里为止。
- 4) 小波包分解后，得到一个小波包树结构，先算出各层中的每个节点的均方差值，然后算出左节点和右节点的均方差的比值。若 $\eta < T$ ，可以表明右子带能量大，脉冲干扰此时位于右子带；若 $\eta > T$ ，可以表明左子带能量大，脉冲干扰此时位于左子带。
- 5) 对存在干扰的节点通过上述的自适应 TRLMS 算法进行自适应滤波处理抑制 DME 脉冲干扰。
- 6) 进行小波包重构后获得去除脉冲干扰后的有用信号。

3 实验结果和分析

本仿真实验生成的 GPS 信号采用的信噪比为 -18 dB，采样频率为 10 MHz，数据的中频频率为 6.25 MHz，仿真实验中的观测时间为 1 ms。根据本文系统模型建模，含有 DME 脉冲干扰的接收信号时域波形如图 3 所示。实验仿真先分别对频域滤波法和本文所提方法与理想无干扰信号进行对比，再将频率滤波法和小波包固定阈值方法与本文所提方法进行对比和分析。从图 4 可以看出与理想无干扰信号相比，频域陷波法不仅会导致信号幅度的衰减，还存在抑制不充分的问题，损失了大量的有用信号。而小波包及 TRLMS 自适应抑制算法去除干扰后极大程度上还原了理想无干扰情况下的信号。从图 5 可以看出小波包及 TRLMS 自适应方法对干扰的抑制效果要好于频域陷波法，可以保留更多的有用信号，且 DME 脉冲干扰基本被滤除掉。

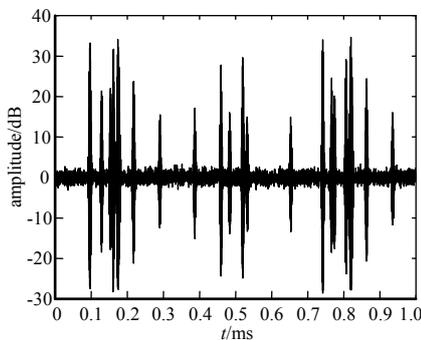


Fig.3 Time domain waveform of received signal
图 3 接收信号的时域波形图

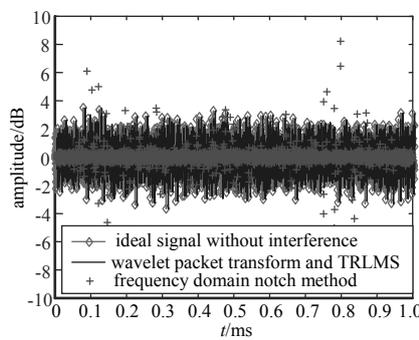


Fig.4 Comparison between interference free and interference suppressed
图 4 无干扰和干扰抑制后的对比图

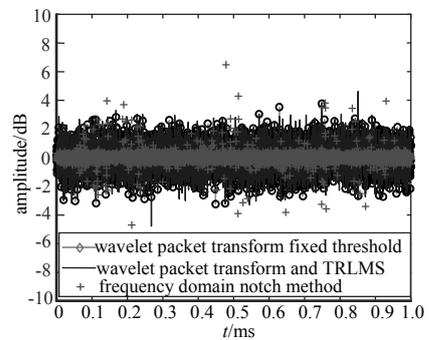


Fig.5 Comparison of three methods
图 5 三种方法对比图

在本文应用小波包变换的 TRLMS 自适应脉冲干扰抑制过程中，由于选择不同的小波函数也会不同程度地影响脉冲干扰的抑制效果，为了得到更好的干扰抑制效果，对不同小波函数进行比较，从小波函数的正交性、对称性和紧支撑性这三个性质进行讨论。本文分别对如下小波基函数族的性质和特点以及干扰抑制性能进行了分析：Symlet 系列小波函数(sym N , $N=2,3,\dots,15$)；Coiflet 系列小波函数(coif N , $N=1,2,\dots,5$)；反向的双正交系列小波函数(rbio)；bior 双正交系列小波函数；Daubechies 系列小波函数(db N , $N=1,2,\dots,15$ ，其中 db1=Haar 类小波)和 dmey 离散 Meyer 小波函数。这些不同的小波函数的性质如表 1 所示。

表 1 不同小波函数的性质
Table 1 Properties of different wavelet functions

function properties	sym	coif	bior/rbio	db $N(N \neq 1)$	Haar	dmey
compactly supported orthogonal	yes	yes	biorthogonal	yes	yes	yes
Symmetry	approximate symmetry	approximate symmetry	yes	no	yes	yes
discrete transform	yes	yes	yes	yes	yes	yes
fast algorithm	yes	yes	yes	yes	yes	yes

由于理想的小波函数是不存在的, 只能通过实验仿真来确定最佳小波函数。本文根据抑制 DME 干扰后的均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)来比较不同种类的小波基函数对脉冲干扰信号的抑制效果, 并根据比较结果选择出干扰抑制性能最好的小波函数。

不同类型的小波函数的干扰抑制性能比较如图 6 所示, 可以看出采用 dmey 小波重构后的均方根误差最小, 干扰抑制效果最佳。在确定最佳小波函数的基础上, 将三种算法的干扰抑制性能进行对比, 仿真结果如图 7 所示, 相比频率陷波法和小波包固定阈值法可以看出所提方法抑制性能进一步提高。

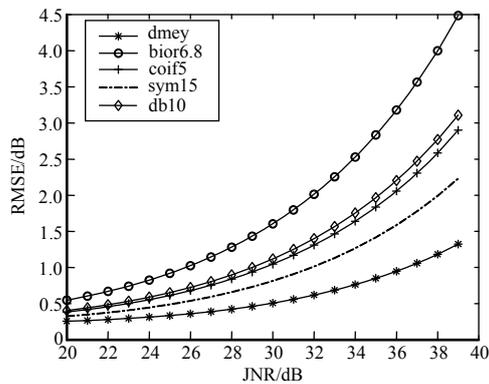


Fig.6 Interference suppression of different types of wavelet packet transform
图 6 不同小波类型的小波包变换的干扰抑制

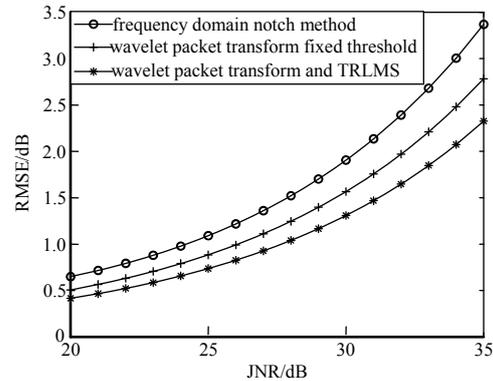


Fig.7 Comparison of interference suppression performance of different algorithms
图 7 不同算法处理干扰抑制性能对比

4 结论

对 GNSS 中的脉冲抗干扰算法进行研究, 提出一种基于小波包变换及 TRLMS 脉冲干扰抑制的方法。通过能量聚集度和子带功率比判断脉冲干扰所在子带, 对小波包分解后的信号进行 TRLMS 自适应滤波, 并迭代更新自适应滤波器的抽头系数, 最后求解 TRLMS 方法的最优权值以此实现干扰抑制。与频域滤波法和小波包分解后采用固定阈值抑制干扰的方法做了对比, 本文的自适应方法保留了更多的 GNSS 信号。除此之外, 本文还对不同小波函数的性质和干扰抑制性能进行仿真实验探讨, 分析出干扰抑制性能最佳的小波函数。

参考文献:

- [1] ONRUBIA R, QUEROL J, PASCUAL D, et al. Assessment of DME/TACAN RFI mitigation techniques in GNSS-R[C]// Geoscience & Remote Sensing Symposium. Beijing: IEEE, 2016: 1811-1814.
- [2] DOVIS F, MUSUMECI L, SAMSON J. Performance assessment of pulse blanking mitigation in presence of multiple distance measuring equipment/tactical air navigation interference on global navigation satellite systems signals[J]. IET Radar Sonar & Navigation, 2014, 8(6): 647-657.
- [3] DENKS H, HORNBOSTEL A, CHOPARD V. GNSS receiver testing by hardware simulation in an standardized pulsed and CW interference environment[C]// ENC-GNSS 2009. Naples, Italy: DLR, 2009.
- [4] 李流丽. 基于小波变换的 GNSS 中 DME 脉冲干扰抑制方法[D]. 天津: 中国民航大学, 2015: 38-51. (LI Liuli. DME pulsed interference suppression method based on wavelet transformation for GNSS[D]. Tianjin, China: Civil Aviation University of China, 2015: 38-51.)
- [5] 高贝贝. 基于小波分析的 OFDM 接收机脉冲干扰抑制研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2015: 14-17. (GAO Beibei. Impulse interference mitigation research for OFDM receiver based on wavelet analysis[D]. Tianjin, China: Civil Aviation University of China, 2015: 14-17.)
- [6] 吕楠楠, 苏淑靖, 翟成瑞. 改进小波包阈值算法在振动信号去噪中的应用[J]. 探测与控制学报, 2018, 40(1): 119-124. (LYU Nannan, SU Shujing, ZHAI Chengrui. Application of improved wavelet packet threshold algorithm in vibration signal denoising[J]. Journal of Detection & Control, 2018, 40(1): 119-124.)
- [7] WU R, WANG W, LI L, et al. Distance measuring equipment interference suppression based on parametric estimation and wavelet-packet transformation for global navigation satellite systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2016, 52(4): 1607-1617.

- [8] 王桁,吕智勇,杨龙. DSSS 卫星通信中基于小波包变换的干扰抑制方法[J]. 系统工程与电子技术, 2016,38(6):1417-1422. (WANG Heng,LYU Zhiyong,YANG Long. Method for interference suppression based on wavelet packet transform in satellite DSSS communication system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016,38(6):1417-1422.)
- [9] 李玉广. 导航接收机时频抗干扰技术的研究和性能分析[D]. 成都:电子科技大学, 2011. (LI Yuguang. Research and performance analysis of time-frequency anti-jamming technology for navigation receiver[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2011.)
- [10] 宋妍,王洪,汪学刚,等. 基于 LMS 算法的 FOD 雷达射频泄露对消技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(1):34-39. (SONG Yan,WANG Hong,WANG Xuegang,et al. Cancellation technology of RF leakage on FOD radar based on LMS algorithm[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(1):34-39.)
- [11] 张贤达. 现代信号处理[M]. 2 版. 北京:清华大学出版社, 2002. (ZHANG Xianda. Modern signal processing[M]. 2nd ed. Beijing:Tsinghua University Press, 2002.)
- [12] 朱立为,蒋品群. 基于小波包变换的自适应阈值抑制窄带干扰[J]. 数据采集与处理, 2013(6):843-847. (ZHU Liwei,JIANG Pinqun. Adaptive threshold suppression of narrowband interference based on wavelet packet transform[J]. Data Acquisition and Processing, 2013(6):843-847.)

作者简介:

王晓君(1973-), 男, 河北省张家口人, 博士, 教授, 主要研究方向为卫星导航通信、雷达电子战和卫星导航接收机技术.email:183515462@qq.com.

薛琳博(1995-), 女, 河北省邯郸市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为卫星导航通信和信号处理.

王彦朋(1969-), 男, 河北省石家庄市人, 本科, 教授, 主要研究方向为信号处理和深度学习.

(上接第 850 页)

- [9] 李早社,禹卫东,汪亮. 基于 SDRAM 的星载 SAR 星上实时成像转置存储器[J]. 信号处理, 2007,23(3):433-436. (LI Zaoshe,YU Weidong,WANG Liang. Corner turning memory based on SDRAM for spaceborne SAR onboard real-time imaging[J]. Signal Processing, 2007,23(3):433-436.)
- [10] 卢世祥,韩松,王岩飞. 合成孔径雷达实时成像转置存储器的两页式结构与实现[J]. 电子与信息学报, 2005,27(8):1226-1228. (LU Shixiang,HAN Song,WANG Yanfei. The structure and implementation of the two-frame Corner Turn Memory(CTM) in real time imaging of SAR[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2005,27(8):1226-1228.)

作者简介:

王 威(1995-), 男, 安徽省宿州市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为实时数字信号处理技术 .email:wangwei174@ mails.ucas.ac.cn.

曹 越(1986-), 男, 河北省唐山市人, 助理研究员, 主要研究方向为雷达实时成像处理技术.

喻忠军(1980-), 男, 成都市人, 研究员, 主要研究方向为微波组件与微波单片集成电路.