

文章编号 1004-924X(2009)10-2535-07

双通道卫星通信信号快速盲检测

彭 耿, 黄知涛, 陆凤波, 姜文利

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:为适应复杂时变、低信噪比的非协作卫星通信环境,提出了基于能量谱和双谱切片的双通道卫星通信信号快速盲检测方法。首先,计算信号的能量谱进行能量检测;然后,利用能量谱快速计算双谱切片实行双谱检测;最后,综合两类方法的检测结果。该方法同时利用了信号的二阶和三阶统计信息,增加了检测可利用的信息量,有利于检测性能的提高。仿真实验表明,在相同的低信噪比条件下,该方法的检测概率比单独用其中一种检测方法提高了约10%,而计算量相对于能量检测则基本没有增加,基本满足了非协作卫星通信的快速实时、低信噪比等要求。

关键词:信息处理技术;盲检测;能量谱;双谱切片;卫星通信;信号检测

中图分类号:TN911.7 文献标识码:A

Double-channel fast blind detection of satellite communication signals

PENG Geng, HUANG Zhi-tao, LU Feng-bo, JIANG Wen-li

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Aiming at complex time-varying non-cooperative satellite communication environments with a lower Signal-to-noise Ratio(SNR), a double-channel blind detection algorithm of satellite communication signals based on an energy spectrum and a bispectrum slice is presented. Firstly, the power spectrum is calculated to detect the energy; then, the bispectrum slice is fastly computed by the power spectrum to implement bispectrum detection; finally, the two results are combined. By making use of the second and the third order statistics synchronously, the method increases available information and is favorable to improving the detection performance. Simulation results indicate that detection probability of the method is 10% higher than that of any of the above two in the same lower SNR conditions without adding computational complexity relative to that of energy detection. The presented algorithm can satisfy non-cooperative satellite communication requirements of high speeds, real-time and lower SNRs.

Key words: information processing technology; blind detection; power spectrum; bispectrum slice; satellite communication; signal detection

收稿日期:2008-11-26;修订日期:2008-12-23.

基金项目:湖南省优秀博士论文基金资助项目;国防科技大学创新研究资助项目(No. CX06-01-02);国防科技大学优秀研究生创新资助项目

1 引言

卫星通信是一个多手段、多层次、远距离、大容量的综合通信体系,能适应大纵深、全方位、高机动、立体化和战场信息密集等作战特点,为多军种、兵种协同作战提供通信保障,因而该技术发展迅速,已成为数字化战场重要的通信手段。战场上各种情报信息的交换、战场指挥控制指令的传送、战场态势的播发以及精确制导武器的控制等无一不通过卫星链路来传输。所以,研究非协作卫星通信在现在和将来都具有十分重要的意义。

信号盲检测是非协作卫星通信的前提和基础,现有的方法大多是建立在观测噪声满足高斯分布特性的理想假设基础上的^[1-8],而实际的卫星通信侦察环境并不都满足这样的假设。同时,由于通信侦察的非协作性和扩频通信等隐蔽性强的新通信体制的广泛应用,观测信号的信噪比较低,导致上述检测方法的检测性能急剧恶化。因此,研究低信噪比复杂时变非协作卫星通信环境下的盲信号检测方法非常有必要。

非协作卫星通信中的观测信号中包含来自目标星的信号和噪声等干扰,它们是经过具有时变、空变、多径等特点的复杂卫星通信信道畸变及各种环境干扰综合后的结果,具有非高斯性。能量谱检测在信噪比较高时具有很强的鲁棒性^[1-2],在信噪比较低时检测性能将随着信噪比的降低而急剧下降;而双谱检测的检测性能仅与非高斯噪声和信号的双谱信息有关,在信噪比较低时也可能获得较高的检测概率。为适应低信噪比复杂时变的非协作卫星通信环境并满足实时性要求^[9],基于上述两种方法的互补性,本文提出了一种基于能量谱和双谱切片的双通道卫星通信信号快速盲检测方法。它综合了观测信号的二阶和三阶统计信息,增加了检测信息量,且利用了能量谱检测和双谱检测的性能互补,从而构成了一种性能更稳定、适应性更强的快速卫星通信信号盲检测方法。

2 信号模型和检测依据

本节先建立接收信号模型,然后推导基于能量谱和双谱的双通道卫星通信信号快速盲检测方法的检测依据。

2.1 信号模型

现代空间电磁环境下,通信侦察接收机的输入有可能是多个辐射源交织在一起的信号流,可表示为:

$$s(t) = \sum_{i=1}^I s_i(t), \quad (1)$$

式中 $I(I \geq 1)$ 为辐射源数目, $s_i(t)$ 表示第 i 个辐射源信号。由于 $s_i(t) (i=1, 2, \dots, I)$ 是来自不同辐射源的信号,一般可认为它们之间是相互独立的。

信号在传输过程中引入噪声 $n(t)$,则接收信号可表示为:

$$r(t) = s(t) + n(t). \quad (2)$$

对接收信号进行无失真 A/D 采样,可得到其离散形式为:

$$r(k) = s(k) + n(k) = s(k) + n_1(k) + n_2(k), \quad (3)$$

式中 $r(k)$ 为接收(或观测)信号, $s(k)$ 表示卫星通信信号, $n(k)$ 为观测噪声, $n_1(k)$ 表示加性高斯噪声, $n_2(k)$ 表示加性非高斯噪声,且假定信号与噪声是不相关的。

定义信噪比(Signal-to-noise Ratio, SNR)为^[2]:

$$\text{SNR} = 10 \lg \frac{P_s}{P_n}, \quad (4)$$

式中 P_s 表示信号能量(谱), P_n 表示噪声能量(谱)。

2.2 检测依据

信号检测过程可以描述为一个二元假设检验:

$$\begin{cases} H_0: r(k) = n(k) \\ H_1: r(k) = s(k) + n(k) \end{cases}. \quad (5)$$

若采用能量谱检测,则可表述为:

$$\begin{cases} H_0: P_r(\omega) = P_n(\omega) \leq T_1 \\ H_1: P_r(\omega) = P_s(\omega) + P_n(\omega) > T_1 \end{cases}. \quad (6)$$

式中 T_1 为根据观测噪声 $n(k)$ 设置的能量谱检测门限。从式(4)、式(6)可见,能量谱检测与 SNR 密切相关:当 SNR 较大时,检测性能具有很强的鲁棒性,且与噪声的具体形式无关;当 SNR 下降到 0 dB 附近时,噪声能量 P_n 和信号能量 P_s 将相差不多,导致检测概率将随着 SNR 的降低而急剧下降。

若采用双谱检测,则可表述为:

$$\begin{cases} H_0: B_r(\omega_i, \omega_k) = B_{n_2}(\omega_i, \omega_k) \leq T_2 \\ H_1: B_r(\omega_i, \omega_k) = B_s(\omega_i, \omega_k) + B_{n_2}(\omega_i, \omega_k) > T_2 \end{cases}, \quad (7)$$

式中 T_2 为根据加性非高斯噪声 $n_2(k)$ 设置的双谱检测门限。从式(4)、式(7)可以看出:双谱检测的检测性能仅与 $n_2(k)$ 和信号 $s(k)$ 的双谱信息有关,即使在 SNR 很小的情况下,只要作为揭示信号非高斯性的双谱值 B_s 足够大,就有望获得较高的检测概率。

可见,本文提出基于能量谱和双谱的盲信号检测方法是有充分理论依据的,它同时利用了观测信号的二阶和三阶统计信息,增加了检测可利用的信息量,有利于检测性能的提高。

3 双通道卫星通信信号盲检测

本节先阐述能量谱检测和双谱切片检测,并给出双谱切片的快速计算方法,进而设计基于能量谱和双谱切片的双通道卫星通信信号快速盲检测方法,最后分析算法的计算复杂度。

3.1 能量谱检测

若 H_0 成立,即 $r(k) = n(k)$ 。假定观测噪声 $n(k)$ 是服从高斯分布 $N(0, \sigma_2^2)$ 的,则将多段噪声数据进行 FFT 变换并取模后累加平均,可得到满足高斯分布 $N(\mu, \sigma_2^2)$ 的噪声能量谱^[10]。将长度为 N 的数据以 L 为周期分为 K 段,根据平均周期图法计算能量谱:

$$S_r^k(\omega_l) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L r^k(i) a(i) \exp(-j\omega_l i),$$

$$\omega_l = l \left(\frac{2\pi}{L} \right), \quad (8)$$

$$P_r(\omega_l) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |S_r^k(\omega_l)|^2 \quad (l = 1, 2, \dots, L), \quad (9)$$

式中 $a(i)$ 为数据窗,本文选用矩形窗。

对满足高斯分布的能量谱进行检测,其虚警概率 P_{fa} 与相对门限 g_T 满足如下关系:

$$P_{fa} = \int_{g_T}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{g^2}{2}} dg = 1 - \varphi(g_T). \quad (10)$$

若设定虚警概率 P_{fa} ,则可查正态分布表得 g_T ,进而求出绝对门限 $T_1 = \mu + g_T \cdot \sigma_2$,其中均值

μ 和均方根差 σ_2 可用直方图等方法估计。只要 $P_r(\omega) > T_1$,就认为在虚警概率 P_{fa} 下检测到信号,即否定 H_0 ,检测结果为 H_1 。

3.2 双谱切片检测

双谱是信号三阶相关的傅里叶变换,对高斯信号不敏感,具有很好的抗高斯噪声的能力。在卫星通信中使用的数字调制信号基本都是非高斯信号(准确地说是亚高斯信号),双谱能定量地描述这些信号的非高斯性^[11]。

假设观测序列的双谱为 $B(\omega_i, \omega_k)$,用直接法估计 N 点观测数据的双谱为 $B_r(\omega_i, \omega_k)$,为减少双谱估计误差,采用时域和频域双重平滑:频域平滑窗宽为 W ,时域样本采用 K 段平均。对于较大的 N ($N > 256$),可选取如下的检测统计量^[12-15]:

$$\beta = \frac{B_r(\omega_i, \omega_k) - B(\omega_i, \omega_k)}{\left[\frac{B}{KW^2} P_r(\omega_i) P_r(\omega_k) P_r(\omega_i + \omega_k) \right]^{1/2}}, \quad (11)$$

式中的 $P_r(\omega)$ 可通过式(9)得到。

可以证明, β 近似服从复高斯分布 $N_c(0, 1)$ 。当 H_0 成立时,可进一步证明:

$$\beta_n = \frac{B_r(\omega_i, \omega_k)}{\left[\frac{N}{KW^2} P_r(\omega_i) P_r(\omega_k) P_r(\omega_i + \omega_k) \right]^{1/2}} \quad (12)$$

服从复高斯分布 $N_n(B_{n_2}(\omega_i, \omega_k), 1)$,于是修改检测统计量为:

$$TCH = \sum_m \frac{2 |B_r(\omega_i, \omega_k) - B_{n_2}(\omega_i, \omega_k)|^2}{\frac{N}{KW^2} P_r(\omega_i) P_r(\omega_k) P_r(\omega_i + \omega_k)}, \quad (13)$$

式中 m 为主值域中选取的离散双谱点数。

从式(13)可知 TCH 需预先知道纯背景噪声的双谱估计和功率谱估计,在通常情况下这一点难以满足,则据 TCH 进一步修改检测统计量为:

$$T = \frac{2KW^2}{N} \cdot \sum_m \frac{|B_r(\omega_i, \omega_k)|^2}{P_r(\omega_i) P_r(\omega_k) P_r(\omega_i + \omega_k)}. \quad (14)$$

因 TCH 服从自由度为 $2m$ 的 χ^2 分布,则当 $2m > 30$ 时,可知 T 近似服从高斯分布 $N(\sqrt{4m-1}, 1)$,本文就利用它作为双谱检测统计量。

若设定虚警概率 P_{fa} ,即查正态分布表可求出

相对门限 g_T , 进而求出绝对门限 $T_2 = \sqrt{4m-1} + g_T$ 。只要 $T > T_2$, 就认为在虚警概率 P_{fa} 下检测到信号, 即检测结果为 H_1 , 否则就未检测到信号。

3.3 双谱切片计算的快速实现

为解决双谱切片计算中的巨大运算量, 结合对角切片能反映双谱主要特征信息的特点^[13], 本文取双谱对角切片上的 m 个点, 即使主值域中选取的离散双谱的 m 个点满足 $\omega_i = \omega_k$, 于是式(14)中的 $B_r(\omega_i, \omega_i)$ 可通过下式计算得到:

$$B_r^k = \sum_{k_1=-L_1}^{L_1} \sum_{k_2=-L_1}^{L_1} S_r^k(\omega_{i+k_1}) S_r^k(\omega_{i+k_2}) [S_r^k(\omega_{2i+k_1+k_2})]^* \quad (15)$$

$$B_r(\omega_i, \omega_i) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{\Delta_0} B_r^k(\omega_i, \omega_i) \quad (16)$$

式中 $2L_1+1=W$, $N_0W=L$ (即 N 点数据分成 K 段, 每段 L 个观测样本), f_s 为采样频率, $\Delta_0 = f_s/N_0$, $*$ 表示取共轭。当频域平滑窗宽 $W=1$ 时, 式(15)可简化为:

$$B_r^k(\omega_i, \omega_i) = \left(\frac{L}{f_s}\right)^2 \cdot [S_r^k(\omega_i)]^2 \cdot [S_r^k(\omega_{2i})]^* \quad (17)$$

由于 3.1 节的能量谱检测中已计算出了 $S_r^k(\omega_i)$, 则本文可通过式(17)、式(16)以近似平方和的方式快速求出切片 $B_r(\omega_i, \omega_i)$, 从而使计算量基本不增加。

3.4 双通道卫星通信信号快速盲检测

能量谱检测在 SNR 较大时具有很强的鲁棒性, 而与噪声的具体形式无关; 当 SNR 下降到 0 dB 附近时, 噪声能量谱和信号能量谱将相差不大, 导致检测概率随着 SNR 的降低急剧下降。双谱检测的检测性能仅与非高斯噪声和信号的双谱信息有关, 即使在 SNR 很小的情况下, 只要作为揭示信号非高斯性的双谱值 B_s 足够大, 就有望获得较高的检测概率。基于这两种检测方法的互补性, 本文设计了基于能量谱和双谱切片的双通道卫星通信信号快速盲检测方法, 原理结构如图 1 所示。

图 1 中的“能量谱”用于快速计算“双谱切片检测”中的双谱对角切片, “综合判决”的逻辑为:

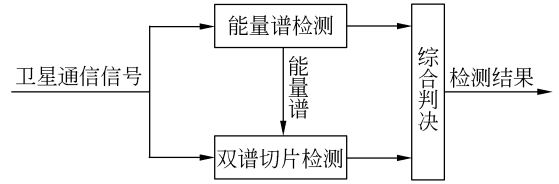


图 1 卫星通信信号盲检测方法的原理结构图

Fig. 1 Frame of blind satellite communication signal detection

(1) 当 SNR 较大时, 若无非高斯噪声或非高斯噪声的双谱值相对于信号的双谱值很小, 两种方法均能检测到信号, 则判决为有信号;

(2) 当 SNR 较大时, 能量谱法能检测到信号, 若非高斯噪声的双谱值相对于信号的双谱值较大而使双谱切片法不能检测到信号, 则判决为有信号;

(3) 当 SNR 较小时, 若能量谱法未能检测到信号, 同时非高斯噪声或非高斯噪声的双谱值相对于信号的双谱值很小使得双谱切片法能检测到信号, 则判决为有信号;

(4) 当 SNR 较小时, 若能量谱法未能检测到信号, 同时非高斯噪声的双谱值相对于信号的双谱值较大而使双谱切片法未能检测到信号, 则判决为无信号。

根据上述逻辑, 则在虚警概率为 P_{fa} 时, 算法的盲检测概率为:

$$P_D = 1 - [1 - P_D^{(E)}] \cdot [1 - P_D^{(B)}] \quad (18)$$

式中的 $P_D^{(E)}$ 、 $P_D^{(B)}$ 分别为能量谱检测、双谱切片检测的检测概率, P_D 为本文算法的检测概率。

显然, 用基于能量谱和双谱切片的方法来检测非协作卫星通信信号能适应很广的非协作卫星通信环境。

3.5 计算复杂度分析

选用经典的分裂基 FFT 算法 (SRFFT), 数据长度为 N , FFT 点数为 L , 段数为 K , 按 1 次减法相当 2 次加法、1 次共轭相当于 1 次乘法、1 次除法相当 2 次乘法、1 次开方相当 4 次乘法的原则, 则本文算法的计算复杂度如表 1 所示。

将典型数值 $N=20\ 480$ 、 $L=2\ 048$ 、 $K=10$ 代入表 1, 可得加法次数 201 755, 乘法次数 228 408, 比较次数为 2 049, 总次数 $\approx 21N$, 即算法的计算复杂度为 $O(N)$ 。

表 1 本文算法的计算复杂度

Tab. 1 Calculation complexity of presented method

计算内容	加法次数	乘法次数	比较次数
能量谱计算	$K \cdot (L \log_2 L - 2L + 4) - (L/2)$	$K \cdot (L \log_2 L - 2L + 4)$	0
能量谱检测	$2L - 2$	$(L/2) + 7$	$L/2$
双谱计算	$K \cdot (L/2 - 1)$	$4K \cdot (L/2) + (L/2) + 2$	0
双谱检测	$2L - 2$	$(L/2) + 7$	$L/2$
综合判决	1	0	1
总运算量	$K \cdot (L \log_2 L + 3) - (3K - 7) \cdot (L/2) - 3$	$K \cdot (L \log_2 L + 4) + 3 \cdot (L/2) + 16$	$L + 1$

若算法通过硬件实现^[16],计算量集中于FFT;设FPGA的工作时钟为50 MHz,并且FFT模块采用串行模式,每次运算时间为L个时钟,K段数据串行处理,则所需时间约为 $L \times (K + 1) \times 0.02 \text{ ms} \approx 0.45 \text{ ms}$,整个算法的时间 $< 0.5 \text{ ms}$ 。

4 算法仿真

本节先讨论卫星通信信道模型,进而选择模型进行算法仿真,并与能量谱检测、双谱切片检测的检测性能进行比较,最后对仿真结果进行总结分析。

4.1 卫星通信信道模型

在卫星通信系统中,用户相对于卫星在通信过程中一般是不断移动的,使得信号电波不可避免地受到山川、植被、建筑物等的遮挡而引起信号的反射、衍射和散射,从而使信号产生多径衰落、阴影遮蔽衰落和多普勒频移等现象。尽管卫星通信信道中所传播的信号是随机变化、无法预知的,但研究表明信号的统计特性可以用一定的概率分布函数来描述,目前主要有3种概率分布函数:Rician分布函数、Rayleigh分布函数和Lognormal,本文选用较常用的Rayleigh分布函数作为信道衰落模型^[9]。

4.2 仿真实验

仿真产生的DS-QPSK信号采样频率为100 MHz,中心频率为25 MHz,信息速率为10 MHz,码长为10 bit。信号分别经过两种仿真环境:(1)高斯白噪声信道;(2)Rayleigh衰落信道(最大多普勒频移设为200 kHz),数据样点为2 048,分段计算FFT的长度为2 048,SNR从-15 dB变化到-3 dB(即带内信噪比 E_b/N_0 从-8 dB到4 dB),虚警概率 $P_{fa} = 10^{-2}$,得到的能量谱法、双谱

切片法及本文算法在这两种噪声仿真环境下的检测性能曲线,如图2、3所示。

为测试数据样点数(或FFT点数固定时的段数)对本文算法检测性能的影响,进行如下仿真:产生的DS-QPSK信号参数不变,将数据样点从2 048变化到10 240、20 480,即段数分别为1、5、10,SNR从-15 dB变化到-3 dB,虚警概率 $P_{fa} = 10^{-2}$,得到数据长度对本文算法检测性能影响的曲线如图4所示。

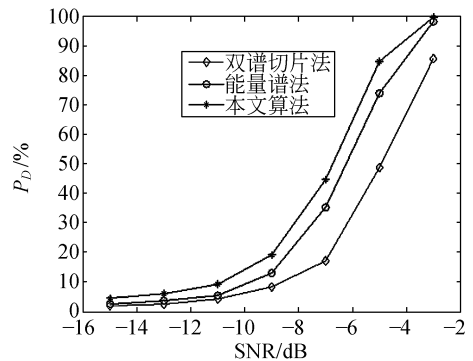


图 2 在高斯白噪声信道下各种算法的检测性能
Fig. 2 Detection performance in AWGN channel

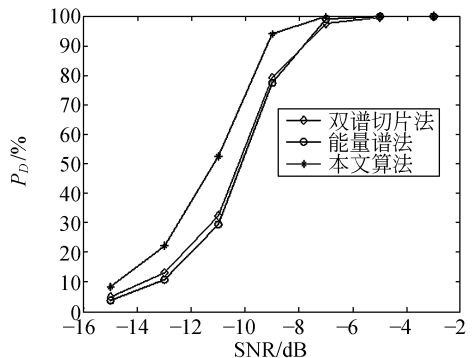


图 3 在 Rayleigh 衰落信道下各种算法的检测性能
Fig. 3 Detection performance in Rayleigh fading channel

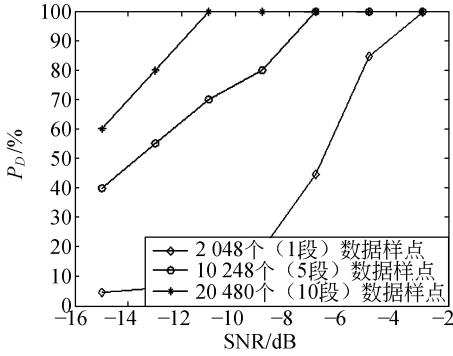


图 4 数据长度对本文算法检测性能的影响

Fig. 4 Influence of data length on algorithm performance

4.3 仿真结果分析

对图 2~4 的仿真结果进行分析,可对本文提出的检测算法做如下总结:

(1)不管是在加性高斯白噪声信道下还是在 Rayleigh 衰落信道等环境下,本文算法的检测性能均优于能量谱法和双谱切片法,具有更好的环境适应能力,且第 3 节的算法实现过程表明它与此两种方法的计算复杂度相当;

(2)数据长度对算法的检测性能有影响,数据越长,分段数越多,检测性能越好,这是因为它是一种基于能量谱和双谱切片的联合检测方法,而

参考文献:

- [1] URKOWITZ H. Energy detection of unknown deterministic signals[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1967,55(4):523-531.
- [2] 李志华. 功率谱估计在微弱信号检测中的应用[J]. 大连海事大学学报, 1998,24(1):102-104.
LI ZH H. The application of spectral analysis to detection of minute signals[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 1988, 24 (1): 102-104. (in Chinese)
- [3] 赖作镁,王敬儒,张启衡. 背景运动补偿和假设检验的目标检测算法[J]. 光学精密工程, 2007,15(1):112-116.
LAI Z M, WANG J R, ZHANG Q H. Object detection algorithm based on background motion compensation and hypothesis test[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(1):112-116. (in Chinese)
- [4] 田海亭,张春熹,金靖,等. 调制频率抖动对相干检测的影响及消除算法[J]. 光学精密工程, 2007,15(4):604-610.

数据长度对这两种方法本来就存在这样的影响;

(3)在数据长度为 20 480、SNR 为 -15 dB (即带内信噪比 E_b/N_0 为 -8 dB)时,检测概率超过了 50%,而 3.5 节的计算复杂度分析表明这样的盲检测过程仅需 0.5 ms.

由此可见,本文的检测算法既能适应很低的信噪比,也具有很好的实时性和环境适应能力,能较好地满足非协作卫星通信的要求。

5 结 论

针对复杂时变的低信噪比卫星通信侦察环境,利用能量谱检测和双谱检测的互补性,提出了基于能量谱和双谱切片的双通道卫星通信信号快速盲检测方法。它同时利用了观测信号的二阶和三阶统计量信息,增加了检测所能利用的信息量。算法的计算复杂度分析表明了它的快速实时性,仿真实验结果证明了它的有效性。与已有方法相比,本文方法能在更大程度上适应实际的非协作卫星通信环境,在相同的低信噪比环境下检测概率提高了 10%左右,且具有较强的稳健性,对无线电管理和未来信息作战中夺取制信息权具有一定的意义。

TIAN H T, ZHANG CH X, JIN J, *et al.*. Effect of modulation frequency jitter on coherent detection and its elimination algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(4):604-610. (in Chinese)

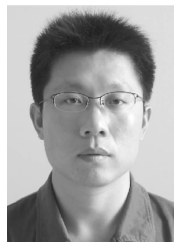
- [5] 王广平,许廷发,倪国强,等. 多 ADSP-TS201 红外弱小目标实时检测跟踪系统的硬件设计[J]. 光学精密工程, 2007,15(6):941-944.
WANG G P, XU T F, NI G Q, *et al.*. Hardware design of infrared dim target real time detection and tracking system based on multiple ADSP-TS201[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15 (6): 941-944. (in Chinese)
- [6] HILL D A, BODIE J B. Carrier detection of PSK signals[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2001,49(3):487-496.
- [7] 黄春琳,柳征,姜文利,等. 基于循环谱包络的扩频直序信号的码片时宽、载频、幅度估计[J]. 电子学报, 2002,30(9):1353-1356.
HUANG CH L, LIU ZH, JIANG W L, *et al.*. Chip width, carrier frequency and amplitude estimation of DS signal based on cyclic spectrum amplitude

- [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2002, 30(9):1353-1356. (in Chinese)
- [8] 赵知劲, 邹佳, 徐春云, 等. 基于四阶累积量的 DSSS/QPSK 信号检测方法研究[J]. *电子学报*, 2007, 35(6):1046-1049.
ZHAO ZH J, WU J, XU CH Y, *et al.*. The study on the detection methods of DSS/QPSK signal based on the fourth-order cumulants[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(6):1046-1049. (in Chinese)
- [9] MOHAMED I, QUAZI M R, AHMED I S, *et al.*. High-speed satellite mobile communications: technologies and challenges [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2004, 92(2):312-339.
- [10] 白剑, 杨亚飞, 徐迎晖, 等. 基于恒虚警的信号检测迭代算法[J]. *北京邮电大学学报*, 2005, 28(2):87-90.
BAI J, YANG Y F, XU Y H, *et al.*. An iterative algorithm of signal detection based on CFAR[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2005, 28(2):87-90. (in Chinese)
- [11] 张贤达. 现代信号处理[M]. 2版. 北京:清华大学出版社, 2002.
ZHANG X D. *Modern Signal Processing* [M]. Second Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. (in Chinese)
- [12] MELVIN J H, GARY R W. Detection of non-Gaussian signals in non-Gaussian noise using the bispectrum[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1990, 38(7):1126-1131.
- [13] KAI M H. Narrowband weak signal detection by higher order spectrum[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1996, 44(4):874-879.
- [14] 周越, 杨杰, 胡英. 基于高阶累积量的水声噪声检测与识别[J]. *兵工学报*, 2002, 23(1):72-78.
ZHOU Y, YANG J, HU Y. Detection and recognition of ship noise based on higher-order cumulant [J]. *Acta Armamentarii*, 2002, 23(1):72-78. (in Chinese)
- [15] MARIANO G, JOSE A M. A lattice structure for the detection of a non-Gaussian signal in Gaussian AR noise[C]. *Proceeding of the 1994 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Adelaide, Australia: IC-ASSP*, 1994:421-424.
- [16] AMOS R O, JAGATH C R. *FPGA Implementations of Neural Networks* [M]. Netherlands: Springer, 2006.

作者简介:



彭耿(1980—),男,湖南平江人,工程师,博士研究生,主要研究方向为通信侦察、空间信息对抗和电子战仿真等。E-mail: hjhy-penggeng@163.com



黄知涛(1976—),男,湖北荆门人,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为雷达/通信侦察信号处理、循环平稳信号处理理论及应用、综合电子战系统与技术等。E-mail: taldcn@yahoo.com.cn



陆凤波(1982—),男,江苏盐城人,博士研究生,研究方向为综合电子战系统与技术、通信信号侦察处理等。E-mail: lufengbo2001@163.com

导师简介:



姜文利(1967—),男,山东烟台人,博士,教授,博士生导师,研究方向为综合电子战技术、无源定位和空间信息处理等。E-mail: iamliujun2000@126.com