

# 应用形态学滤波的卫星通信窄带干扰检测新方法

胡 婧 边东明 谢智东 李永强

(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)

**摘 要** 针对频分多路(FDMA)卫星通信系统中转发器的信号数量、模式多变,利用单一阈值难以实现多个同频窄带干扰同时检测的问题,提出了一种基于形态学处理的窄带干扰检测方法。该方法将信号的频谱视为一维灰度图像,结合改进的图形图像处理领域的形态学梯度滤波算法,通过检测干扰的边缘梯度跳变值来实现干扰信号的定位。仿真结果表明,当监测频宽内多个不同参数的信号都存在窄带干扰时,所提方法不受噪声基底变化的影响,运算量小,复杂度低,适用于卫星通信系统的实时频谱监测。

**关键词** 卫星通信,形态学,梯度值,窄带干扰检测,噪声基底

**中图分类号** TN927 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.10.022

## New Approach for Narrow Band Interference Detection in Satellite Communication Using Morphological Filter

HU Jing BIAN Dong-ming XIE Zhi-dong LI Yong-qiang

(Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

**Abstract** How to precisely detect co-channel narrow band interferences using single threshold is a challenge in frequency division multiple access (FDMA) satellite communication system, especially in the condition of many signals which parameters are different. A new method for narrow band interference detection in satellite communication was proposed based on mathematical morphology. The method uses an improved morphological gradient filter which belongs to image and graphics filed to deal with the spectrum data that is viewed as one-dimensional gray-scale image, and then searches the gradient of interference edges to detect the position of it. Simulation results show that the proposed method can detect the narrow band interference at one time when there are different signals with interference. It is not affected by the non-flat noise floor and has low computational complexity. It is suitable for real spectrum monitoring in satellite communication system.

**Keywords** Satellite communication, Morphology, Gradient, Narrow band interference detection, Noise floor

由于卫星转发器工作在公开、透明的环境中,在频分多址(FDMA)卫星通信系统中来自地面的无线通信系统以及其他的卫星通信系统的同信道信号都会形成同频干扰;同时,一些不确定的共信道干扰(例如雷达信号干扰)也会时常发生,因此如何有效地检测干扰、实现干扰源定位以及消除干扰从而提高系统的效能,是卫星通信研究领域的一个重要课题<sup>[1-5]</sup>。

目前,国内外许多学者对各类通信系统中的窄带干扰检测和抑制做了深入的研究<sup>[1-8]</sup>,文献[7]提出一种新的门限选择方法,利用接收信号频谱包络的差分值得到非干扰信号频谱分段,将其最大幅度模值作为门限,降低了运算复杂度。文献[1]针对 DSSS 卫星通信系统提出了基于滑动窗最小二乘的干扰盲检测方法。在 FDMA 卫星通信系统中,通常结合频谱仪对信号的窄带干扰进行检测,当信号功率超过门限便报警。在多信号存在的全转发器监测中,这种干扰监测方式需要有各个信号的先验信息,需确定不同的门限值才能实现干扰监测。文献[3,4]针对 FDMA 卫星通信系统中单一门限对

干扰检测的漏检和误检问题,利用一种类似理想信号频谱波形的能量门限,可以更有效地实现窄带干扰检测,其仿真是在单一信号存在干扰且已知信号调制方式等先验信息的条件下进行的,难以适应卫星通信中转发器频谱监测存在多个不同类型的信号同时工作且在全盲条件完成干扰检测的实际情况。本文结合前人的研究结果,将数字形态学引入频分多址(FDMA)卫星通信信号的同频干扰检测中,对频谱数据做形态学运算处理,在监测带宽内利用单一门限可以实现多信号存在多个干扰的检测,为下一步的干扰源定位、干扰消除奠定基础,具有一定的实用价值。

本文第 1 节介绍形态学的基本原理;第 2 节详细阐述了利用形态学滤波实现窄带干扰检测的方法;最后用仿真验证了所提方法的可行性和有效性。

### 1 形态学基本原理

数学形态学主要以几何积分、集合代数、拓扑论为理论基

到稿日期:2015-09-15 返修日期:2016-02-01 本文受 863 国家基金项目(2012AA121605),国家自然科学基金项目(91338201,91438109,61401507)资助。

胡 婧(1981—),女,硕士,讲师,主要研究方向为卫星通信、信号处理等,E-mail:106001318@qq.com;边东明(1975—),男,博士,副教授,主要研究方向为卫星通信等;谢智东(1984—),男,博士,讲师,主要研究方向为卫星通信等;李永强(1973—),男,硕士,讲师,主要研究方向为卫星通信、计算机网络。

础,是一门建立在严格数学基础上的方法。它以图像的形态特征作为研究对象,通过变换和算法,描述图像的基本特征和结构。形态学最初的应用领域是图像处理<sup>[9-13]</sup>,后来在通信信号处理领域的应用也被人们广泛关注<sup>[14-16]</sup>。

形态学的基本操作称为膨胀( $\oplus$ )和腐蚀( $\ominus$ ),其定义如下所示,其中 $X$ 和 $B$ 是两个集合, $B$ 称为结构元素(Structuring Element)集合。

$$X \oplus B = \bigcup_{b \in B} X + b = \{x + b, x \in X, b \in B\} \quad (1)$$

$$X \ominus B = \bigcap_{b \in B} X - b = \{z, B + z \in X\} \quad (2)$$

膨胀运算从几何意义描述,就是在空间中滑动结构元素,使得结构元素与信号的一部分完全重叠,然后找到被结构元素覆盖的区域内对应信号与结构元素和的最大值并将其作为输出;同理,腐蚀运算则是找到重叠区域内两者差值的最小值作为输出。滤波结果表明,膨胀滤波可以减小信号的峰值,加宽谷值;相反,腐蚀滤波则可增大信号的谷值,扩展峰域。

在利用形态学理论处理通信信号的过程中,通常选择扁平型结构元素和几何形状比较简单的结构元素。本文旨在利用形态学的方法判定出窄带干扰的位置,实现对窄带干扰的分析。因此在滤波的过程中重点关注横向(频谱点数)处理后各个点的变化趋势,且后续仿真都选择扁平型结构元素<sup>[17,18]</sup>。

## 2 基于形态学滤波的窄带干扰检测方法

### 2.1 窄带干扰信号模型

FDMA 卫星通信系统中,同频窄带干扰是造成通信质量下降的重要原因之一。对于此类干扰,可以根据占用传输带宽的多少将其分为窄带干扰和宽带干扰,其中,窄带干扰更容易产生也更普遍;窄带干扰分为人为故意和自然无意两种情况,它们的特点是功率大、频带窄。假设检测信号 $y(t)$ 为:

$$y(t) = \sum_{i=1}^{N_s} s_i(t) + n(t) + \sum_{k=1}^{N_j} j_k(t) \quad (3)$$

其中, $s_i$ 是窄带信号, $N_s$ 是信号中包含的窄带信号的个数, $j_k$ 是窄带干扰信号, $N_j$ 是窄带干扰的个数, $n(t)$ 为白噪声。则信号 $y(t)$ 的频谱为 $Y(f)$ 为:

$$\begin{aligned} Y(f) &= \int y(t) \cdot e^{-jft} dt \\ &= \int \left[ \sum_{i=1}^{N_s} s_i(t) + n(t) + \sum_{k=1}^{N_j} j_k(t) \right] e^{-jft} dt \\ &= \sum_{i=1}^{N_s} S_i(f) + N(f) + \sum_{k=1}^{N_j} J_k(f) \end{aligned} \quad (4)$$

其功率谱 $P_Y(f)$ 为:

$$\begin{aligned} P_Y(f) &= Y(f) \cdot Y^*(f) \\ &= \left[ \sum_{i=1}^{N_s} S_i(f) + N(f) + \sum_{k=1}^{N_j} J_k(f) \right] \cdot \left[ \sum_{i=1}^{N_s} S_i^*(f) + N^*(f) + \sum_{k=1}^{N_j} J_k^*(f) \right] \\ &= \sum_{i=1}^{N_s} P_{S_i}(f) + P_N(f) + \sum_{k=1}^{N_j} P_{J_k}(f) + \sum_{i=1}^{N_s} S_i(f) \cdot [N^*(f) + \sum_{k=1}^{N_j} J_k^*(f)] + \sum_{j=1, j \neq i}^{N_s} S_i(f) S_j^*(f) + \sum_{k=1}^{N_j} J_k(f) \cdot [\sum_{i=1}^{N_s} S_i^*(f) + N^*(f)] + \sum_{n=1, n \neq k}^{N_j} J_n(f) J_k^*(f) + N(f) \cdot [\sum_{i=1}^{N_s} S_i^*(f) + \sum_{k=1}^{N_j} J_k^*(f)] \end{aligned} \quad (5)$$

由于窄带信号、干扰信号和噪声之间是互不相关的,即 $E[S_i(f) \cdot S_j^*(f)] = E[S_i(f) \cdot N^*(f)] = E[S_i(f) \cdot J_k^*(f)] = E[J_n(f) \cdot J_k^*(f)] = E[J_k(f) \cdot S_i^*(f)] =$

$$E[J_k(f) \cdot N^*(f)] = E[N(f) \cdot S_i^*(f)] = E[N(f) \cdot J_k^*(f)] = 0 \quad (6)$$

因此信号的功率谱是各个窄带信号、干扰信号和噪声功率谱的叠加,如图1所示,本文主要研究该类窄带干扰的实时检测算法。对窄带干扰的检测应包含两部分的内容:1)检测是否有窄带干扰存在;2)如果存在,估计其个数以及对应的干扰频带位置。本方法通过数字形态学处理频谱数据,可以一次性实现以上两部分的检测内容。

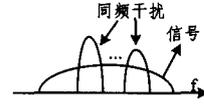


图1 窄带干扰频谱示意图

### 2.2 基于形态学滤波的窄带干扰检测原理

运用数学形态学的基本变换及其级联组合对信号提取有用信息的方法称为形态学滤波,它是一种局部修正多维信号的几何特征的非线性信号处理过程<sup>[11]</sup>。

形态学梯度就是一种利用形态学基本变化组合起来的滤波方法,定义为:

$$\begin{aligned} G(X) &= (X \oplus B) - (X \ominus B) \\ &= \bigcup_{b \in B} X + b - \bigcap_{b \in B} X - b \\ &= \{x + b, x \in X, b \in B\} + \{z, B + z \in X\} \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $X$ 为待分析的信号, $B$ 为结构元素集合。

干扰信号的模型如图2(a)左侧图所示,利用图2(a)右侧 $1 \times 3$ 的扁平型结构元素 $b$ 对其做式(7)所示的形态学滤波梯度滤波处理。图2(b)给出了干扰信号模型 $X$ 左、右边界做滤波处理的变化过程。

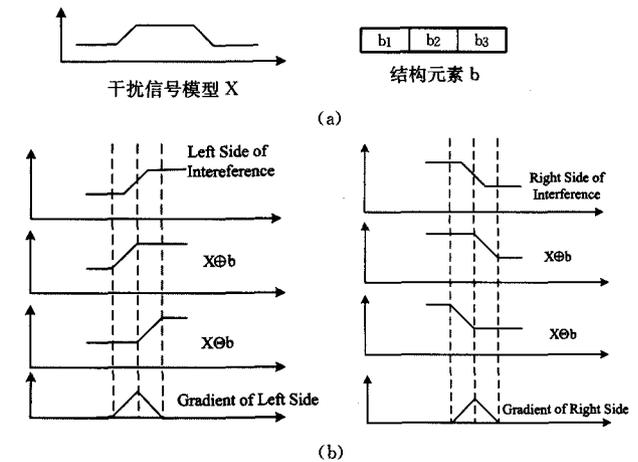


图2 干扰信号左、右边界的形态学梯度

从图2(b)可以看出,经形态学滤波后对应于左、右边界的位置会出现峰点,其余周围的点的幅度为0。通过选择合适的阈值门限,可以确定峰值的位置,从而确定干扰信号 $X$ 的位置,实现窄带干扰的检测与定位。

### 2.3 基于形态学滤波的干扰检测方法

根据2.2节的描述可知,利用形态学滤波计算窄带干扰信号的各个点梯度值,可以实现对干扰的出现频率的位置的确定,是进行干扰分析与消除的基础。本文提出的利用形态学滤波实现窄带干扰检测的主要步骤如图3所示,主要包含4个模块:频谱平滑处理、梯度值计算、梯度值局部极大值判定和窄带干扰起止位置判定。通常,为了提高基于瞬时功率谱特征进行干扰分析的准确度,可以对多次分析结果进行统计后得出干扰检测的结论。

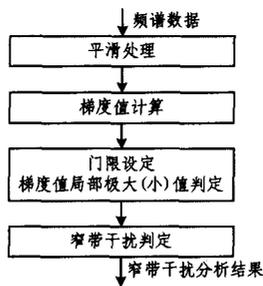


图3 窄带干扰检测步骤

下面对4个主要模块进行详细介绍。

#### (1) 平滑处理

对接收到的频谱数据进行平滑滤波处理的目的在于减小随机噪声起伏抖动对形态学滤波后峰值搜索判定的影响。对平滑处理后的频谱信号进行形态学滤波,得到的窄带干扰信号边缘变化的梯度值幅度会远远高于噪声部分梯度值,从而便于选择合适的门限进行分离。本文先对信号进行形态学中的膨胀处理,消除尖锐的毛刺,再对信号做均值滤波,以更好地达到频谱信号平滑处理的目的。

#### (2) 梯度值计算

从式(7)可以看出,信号的梯度值是通过计算信号对应点在膨胀和腐蚀之后的差值得到的。对信号做膨胀和腐蚀的具体步骤如下:

Step1 选择长度为 $L$ 的扁平型结构元素 $b(b \in B)$ :

$$b = b_0, b_1, \dots, b_{L-1}$$

其中, $L$ 为小于频谱数据长度的自然数, $b_i$ 是其中某一点的取值, $i$ 是从0到 $(L-1)$ 的整数, $b_i$ 取值是任意实数。

结构元素的长度 $L$ 越大,去除噪声的能力越强且运算量小,但是对于干扰信号的边缘检测比较粗糙;反之, $L$ 越小,去除噪声的能力越弱且运算量越大,但是能更好地检测到干扰信号边缘变化的细节。这里,结构元素 $b$ 选择了线性的扁平型结构元素,可以做进一步的简化,即 $b_i$ 的取值为0,因此利用此类扁平型结构元素在频率轴对信号做腐蚀运算相当于对信号做最小值滤波,膨胀运算等价于对信号做最大值滤波。

Step2 从待分析数据中选择目标点,即在当前分析的位置,从目标点开始,获取与结构元素长度 $L$ 相同个数的待分析数据。

Step3 利用式(2),将当前分析数据与结构元素做腐蚀运算,得到当前目标点的腐蚀滤波结果,同理,将当前的分析数据与结构元素参照式(1)做膨胀运算,得到该点的膨胀滤波结果。选择线性的扁平结构元素,且结构元素的各个值 $b_i$ 为0。

Step4 将腐蚀运算的结果和膨胀运算的结果对应相减,得到信号的梯度值 $Gradient$ ,简称 $G$ 。

Step5 结合干扰信号的变化趋势调整梯度值,对于位于上升沿的点,其梯度值 $G$ 记为正值;反之,对位于下降沿的点,则将其对应的梯度值 $G$ 置为负值。

#### (3) 门限设定,梯度值的局部极大(小)值位置判定

对平滑后的频谱进行梯度运算后,具有上升趋势的点和具有下降趋势的点都会有非零的梯度值,但干扰信号边缘的梯度值会高于噪声部分的梯度值,本文方法正是利用这种差异确定干扰信号的位置,为下一步的干扰消除以及干扰源定位奠定基础。图4示出随扰信比(Jam Signal Ratio, JSR)的变化,不同比特速率的干扰其梯度峰值的变化以及噪声部分梯

度最大值的变化情况。其中,实线代表干扰信号的梯度值,虚线代表噪声部分梯度最大值,可以看出随着扰信比的变大,干扰和噪声的梯度值的差异也随之增大,因此选择合适的阈值可以实现干扰信号的判定。

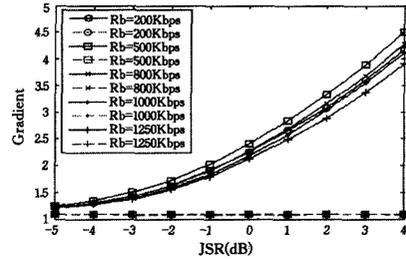
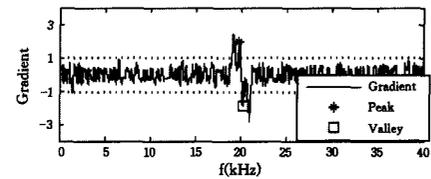
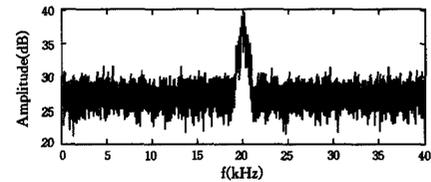


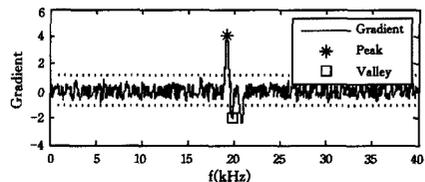
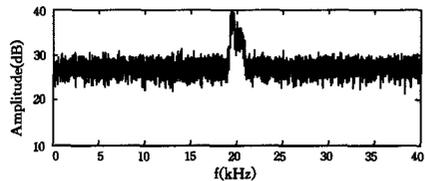
图4 不同扰信比和比特速率下干扰梯度值的变化

#### (4) 窄带干扰判定

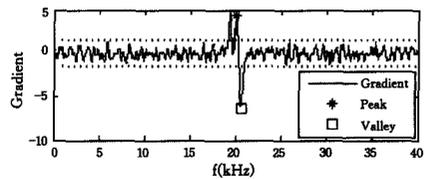
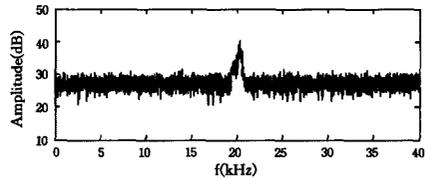
窄带干扰的左、右边界在对应的梯度值处会出现正、负两个局部的峰、谷值点,因此在判定窄带干扰时采用峰值和谷值配对的思想。本文以最基本的单个信号上干扰数目不大于1的情况做阐述。



(a)



(b)



(c)

图5 一个信号存在单个窄带干扰的频谱及对应的梯度值

首先,依据窄带干扰与信号的位置不同,可以分为两大类:1)窄带干扰与信号的边缘不重叠,如图5(a)的第一幅图所示;2)窄带干扰与信号的边缘重叠,如图5(b)、(c)的第一幅图所示。对于前者,窄带干扰的边缘梯度值如图5(a)的第二幅图中星号和正方形所标注的位置,即在信号内部存在一对峰、谷点,通过确定这两个点的位置就可判定干扰的位置;而对于后一种情况,由于干扰信号与信号的左侧边缘或者右侧边缘重合,因此通常干扰信号的左(右)边缘对应梯度值会与信号左(右)边缘的梯度值重合,即当干扰与信号左边缘重合时,该信号区域干扰的梯度值表现为一个谷值,如图5(b)中正方形符号所示,此时干扰的位置判定为信号的起点到该点的位置;反之如果干扰信号与信号的右边界重叠时,在信号区域内,干扰的信号表现为一个峰值,如图5(c)中星号所示,而干扰的位置判定为该点到信号的右边点。

### 3 性能仿真及分析

实验仿真仅在低频段进行,载波频率  $f_c = 20\text{kHz}$ ,对于 C 波段或者其他更高的频段,可以采用二次调制。本方法主要解决传统卫星通信中的干扰检测问题,而卫星通信固有的特点决定了其发送信号基本都使用 PSK 类的调制方式,本方法是通过搜索干扰的边缘梯度变化来达到对其检测的目的,不受信号调制方式的影响,所以下面的仿真不失一般性地都使用 QPSK 调制。

本文仿真了 40kHz 的监测带宽内,存在 4 个调制信号,信号的比特速率  $R_b$  依次是 2kbps, 1kbps, 4kbps 和 0.5kbps, 信噪比  $\frac{E_b}{n_0}$  分别为 9dB, 7dB, 3dB 和 5dB 的情况。选择其中第 2, 3, 4 个信号加入同频窄带干扰,其中第 3 个信号加入 2 个窄带干扰,扰噪比依次为 7dB, 6dB, 6dB 和 9dB, 得到的频谱图如图 6(a)所示,图中频谱的噪声基底平坦。利用本文算法处理后,干扰的位置会出现较噪声更高(低)的局部峰(谷)值,如图 6(b)的虚线区域所示,对于第 3 个加入了 2 个不同带宽的同频窄带干扰信号的情况,也出现了两对峰(谷)值。因此利用门限值找到这些局部峰(谷)值之后,依次将信号内部峰、谷值配对,可以一次性检测出该段监测频谱中存在的所有干扰信号。

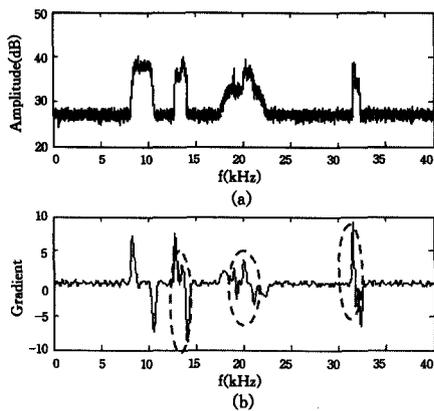


图 6 噪声基底平坦的受干扰信号频谱及其对应梯度值

(Jam Noise Ratio, JNR)以及比特速率( $R_b$ )如表 1 所列。

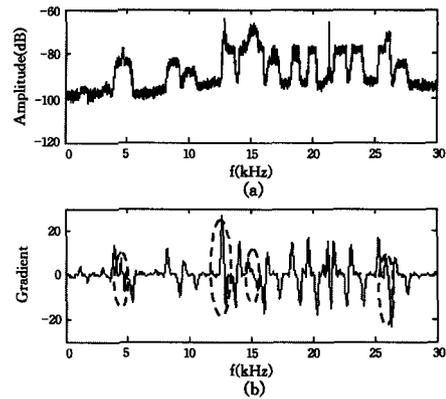


图 7 噪声基底起伏的受干扰信号频谱及其对应梯度值

表 1 加入干扰信号参数表

序号	中心频率 $F_c$ (MHz)	干扰比 JNR (dB)	比特速率 $R_b$ (kbps)
1	4.62	3	0.2
2	12.78	10	0.25
3	15.13	5	0.4
4	26.10	4	0.8

利用本文的方法对加入窄带干扰的频谱数据处理后,得到如图 7(b)所示的梯度值。可以看出,窄带干扰的位置都可以找到对应的非零的梯度值,即虚线圈内的部分。通过对各个信号内部梯度值峰、谷配对的方法,可以一次性确定监测频谱内是否有干扰以及各个干扰的位置。经过对连续多帧频谱的分析,可以提高干扰判定的准确度和精确度。结合图 6 和图 7 的仿真结果可以看出,该方法不会受噪声基底起伏的影响,可以在多信号存在多个干扰的情况下实现干扰的检测,适用于实际卫星通信中的频谱监测。

图 8 给出了一个监测信号,当其比特速率分别为  $R_b = 4\text{kbps}$  以及  $R_b = 2\text{kbps}$  时,加入不同比特速率、干信比的同频窄带干扰后,利用本文方法进行检测得到检测概率。信号采样频率  $f_s = 80\text{kHz}$ ,以  $\frac{E_b}{n_0} = 3\text{dB}$  对监测信号加入噪声,进行 8192 点的傅立叶变换。

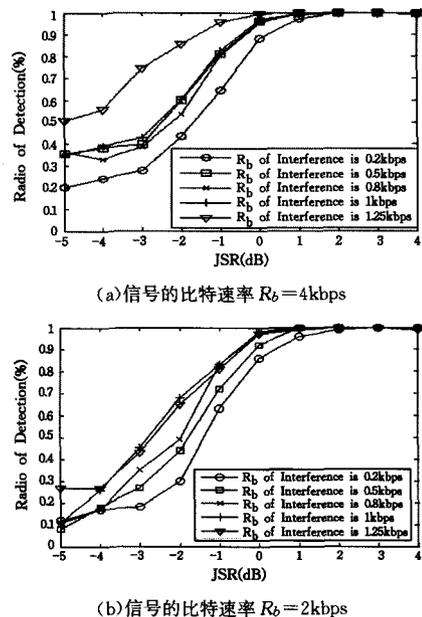


图 8 不同干信比的干扰检测概率

图 7(a)示出某卫星 Ku 频段 30MHz 带宽的监测频谱数据加入干扰之后的频谱。由图可知,该段监测频谱噪声基底存在起伏,带内共有 13 个通信信号,且各信号的信噪比、带宽、调制方式都不相同,现将该段监测频谱中的第 1, 4, 5, 12 个信号加入窄带干扰信号,干扰信号的中心频率  $F_c$ 、干扰比

从图 8 可以看出,对于相同比特速率的窄带干扰,随着干信比的增大,检测概率逐步增大;而在相同干信比的条件下,比特速率大的干扰信号的识别概率较比特速率小的干扰信号更高。另外,图 8(a)和(b)中监测信号的比特速率不同,即监测信号的带宽不同,但对相同的同频干扰,检测概率趋势相同。当干信比为 1dB 时,检测概率都超过 90%。

**结束语** 本文通过基于形态学的干扰梯度检测算法,可以对底噪起伏的卫星转发器在多个不同类型的信号存在同频干扰的情况一次性完成多干扰的检测。

所提方法中的处理流程均为线性运算,且运算量与数据长度成正比,复杂度为  $O(N)$ ,适合硬件实现,适合卫星通信转发器频谱监测的实际应用环境。

## 参 考 文 献

- [1] Peng Geng, Huang Zhi-tao, Lu Feng-bo, et al. Research on blind detection and rejection of narrowband interference in DSSS satellite communication[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(6): 1955-1958(in Chinese)  
彭耿, 黄知涛, 陆风波, 等. DSSS 卫星通信系统中窄带干扰的盲检测与消除研究[J]. 宇航学报, 2008, 29(6): 1955-1958
- [2] Sugiyama T, Kubora S, Morikura M, et al. A coded VSB-QPBK transmission scheme for digital satellite communications in co-channel interference environments[J]. IEEE Transaction Aerosp & Electron Syst, 1996, 7(3): 1174-1181
- [3] Sun Li-ping, Hu Guang-rui, Wu Jun. A New Transform Domain Method for Narrow Band Interference Detection in DQPSK Satellite Communication Systems[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2003, 18(2): 132-135(in Chinese)  
孙丽萍, 胡光锐, 吴珺. 一种用于 DQPSK 卫星通信系统中窄带干扰检测的新方法[J]. 数据采集与处理, 2003, 18(2): 132-135
- [4] Wu Jun, Hu Guang-rui, Sun Li-ping. An FFT Narrow-Band Interference Detection Scheme in Digital Satellite Communication Systems[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2003, 37(10): 1600-1602(in Chinese)  
吴珺, 胡光锐, 孙丽萍. 数字卫星通信系统中窄带干扰检测的 FFT 方法[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(10): 1600-1602
- [5] Ho K C, Lu Xiao-ning, Mehta V. Adaptive blind narrowband interference cancellation for multi-user detection[J]. IEEE Transaction, on Wireless Communication, 2007, 6(3): 1024-1033
- [6] Buzzi S, Antonio D M. Code-aided blind detection of the transmission rate for multirate direct-sequence CDMA systems[J]. IEEE Trans. on Signal, 2005, 53(6): 2182-2192
- [7] Fu Wei-hong, Song Chang-jiang, Huang Kun. Narrow-band Interference Suppression in Transform Domain Based on Difference-cluster-threshold Algorithm[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(12): 2960-2965(in Chinese)  
付卫红, 宋长江, 黄坤. 基于差分求门限的变换域窄带干扰抑制[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(12): 2960-2965
- [8] Yin Fu-lian, Guo Li-li, Lu Man-hong. Research on common interference detection techniques of spread spectrum TT&C systems[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(9): 2195-2199(in Chinese)  
殷复莲, 郭黎利, 卢满宏. 扩频测控系统常见干扰检测技术研究[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(9): 2195-2199
- [9] Gao Heng-zhen, Wan Jian-wei, Nian Yong-jian, et al. Hyper-spectral Image Classification Algorithm Based on Spectral-spatial Hybrid Features and SVM [J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(4): 917-921(in Chinese)  
高恒振, 万建伟, 粘永健, 等. 一种基于谱域-空域组合特征支持向量机的高光谱图像分类算法[J]. 宇航学报, 2011, 32(4): 917-921
- [10] Shao Wei, Cui Ping-yuan, Cui Hu-tao. An algorithm of site decision for spacecraft safe landing based on morphology[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(2): 659-664(in Chinese)  
邵巍, 崔平远, 崔枯涛. 一种基于形态学的探测器安全着陆点选择方法[J]. 宇航学报, 2008, 29(2): 659-664
- [11] Kong Ying-ying, Zhou Jian-hong, Zhang Miao. SAR Image Restoration Based on GAbbis Markov Random Field Model and Connected Clustering[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(2): 310-317(in Chinese)  
孔莹莹, 周建红, 张淼. 基于 Gibbs-Markov 随机场与连通聚类的 SAR 图像恢复[J]. 航空学报, 2010, 31(2): 310-317
- [12] Cheng De-jie, Li Xiao-feng, Li Zai-ming. A New Method for Contour-chasing Aircraft Video Detection Based on Motion Analysis and Mathematical Morphology[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(1): 151-155(in Chinese)  
程德杰, 李晓峰, 李在铭. 基于运动形态学的掠地飞行器视频检测方法[J]. 航空学报, 2007, 28(1): 151-155
- [13] Wang Zhen-yu, Zhou Ning. A Post Processing Method in Dim Target Detection Based on Reconstruction[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(5): 1137-1141(in Chinese)  
王震宇, 周宁. 基于重构算法的一种微弱目标检测后处理方法[J]. 航空学报, 2007, 28(5): 1137-1141
- [14] Wang Yong-ming, Zhang Er-yang, Zhao Jin-li. Signal detection in broadband reconnaissance receiver based on morphological filter [J]. Journal of Applied Sciences, 2009, 27(4): 343-347 (in Chinese)  
王永明, 张尔扬, 赵津丽. 应用形态学滤波的宽带侦察接收机信号检测新方法[J]. 应用科学学报, 2009, 27(4): 343-347
- [15] Maragos P, Schafer R W. Morphological systems for multidimensional signal processing[J]. Proceedings of the IEEE, 1990, 78(4): 690-710
- [16] Chen Han-xin, Cui Wei-liang, Jang Hua. Morphology pre-processing algorithm in short wave signal detection [J]. Computer Engineering, 2010, 36(24): 84-86(in Chinese)  
陈含欣, 崔伟亮, 江桦. 短波信号检测中的形态学预处理算法[J]. 计算机工程, 2010, 36(24): 84-86
- [17] Zhang Jian-cheng, Wu Xin-jie. Research on application of morphological filtering in real-time signal processing [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(4): 828-831(in Chinese)  
张建成, 吴新杰. 形态滤波在实时信号处理中应用的研究[J]. 传感技术学报, 2007, 20(4): 828-831
- [18] Guo Xiao-xin, Liu Li, Feng Zhi-peng. Mathematical morphology review and its applications in signal processing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(10): 187-192 (in Chinese)  
郭晓鑫, 刘立, 冯志鹏. 数学形态学在信号处理中的应用综述[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(10): 187-192