

基于谱图预处理的卫星通信信号盲检测

彭 耿 黄知涛 王丰华 姜文利
(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘 要: 传统功率谱检测是建立在噪声谱的均值和方差满足不随频率变化假设基础上的, 而实际非协作卫星通信中的噪声谱一般并不满足此假设, 导致该方法的检测性能受限。该文用滑动窗最小二乘法对接收信号进行预处理, 使噪声谱趋近满足上述假设, 由此提出了一种卫星通信信号的盲检测方法, 并推导了相对于传统功率谱检测方法的性能改善因子。仿真结果表明: 该方法在相同条件下检测性能一般明显优于传统的功率谱检测方法, 且具有计算量小、易于实现等优点。

关键词: 信息处理技术; 盲检测; 最小二乘; 卫星通信信号

中图分类号: TN927

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)12-2843-05

Blind Detection of Satellite Communication Signals Based on Spectrum Preprocessing

Peng Geng Huang Zhi-tao Wang Feng-hua Jiang Wen-li

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Traditional power spectrum detector is based on the assumption that mean and variance of background noise spectrum do not vary with frequency. However, actual noise spectrums generally do not meet the hypothesis in non-cooperative satellite communication environment, so the detector performance is restricted. In this problem, received signals are preprocessed by sliding widow least square to make noise spectrums satisfy the presumption. Consequently, a blind detection algorithm of satellite communication signals is presented, and improving factor of detection performance relative to power spectrum detector is also deduced. Simulation results indicate that under same conditions, the algorithm generally has better performance than power spectrum detector, which is a classical traditional blind detection method. The proposed algorithm is also easy to implement with low computation complexity.

Key words: Information processing technology; Blind detection; Least square; Satellite communication signals

1 引言

非协作卫星通信就是对非合作方的卫星通信链路进行截获处理, 而进行此处理的前提是检测到信号, 从而为后续信息处理奠定坚实的基础。因此, 进行卫星通信信号的盲检测研究具有十分重要的意义。

针对通信信号的盲检测, 国内外相关人员已提出了许多算法^[1-8], 归结起来主要有功率谱检测方法^[1-3]、平方法^[4]、谱相关法^[5]、循环谱^[6]、高阶累积量^[7]、子空间分析^[8]等。功率谱检测方法由于计算简单, 检测性能对信号调制方式不敏感, 通过非相参积累可实现低信噪比下的盲信号检测, 因此在工程实践中得到了广泛的应用和深入的研究。这些研究一般是建立在噪声谱的均值和方差满足不随频率变

化假设基础上的^[1-3], 而在实际的非协作卫星通信环境中, 由于多径衰落、阴影遮蔽、多普勒频移、接收机滤波器和功率放大器产生的失真等各种因素的影响^[9], 噪声谱一般并不满足上述假设, 这就使得该方法的检测性能受限。若已获得噪声谱的频率响应, 则可通过白化滤波的方法使接收信号的噪声谱满足上述假设, 但对于非协作通信来说, 获得纯噪声的频率响应比较困难, 且进行白化滤波会在一定程度上增加算法的计算复杂度。

针对上述问题, 本文通过滑动窗最小二乘法对接收信号进行预处理, 使噪声谱趋近满足功率谱检测所需的均值和方差不随频率变化的假设, 从而提出了一种卫星通信信号的盲检测方法。文章的安排如下: 第 2 节建立接收信号模型, 分析了非协作卫星通信中的噪声谱及其对传统功率谱检测方法的影响; 第 3 节基于谱图预处理的思路, 提出了卫星通信信号盲检测方法并推导了相对于传统功率谱检测

2008-08-27 收到, 2009-09-21 改回

湖南省优秀博士论文基金, 国防科技大学优秀研究生创新项目和
国家部委基金资助课题

方法的检测性能改善因子；第4节为算法仿真，并对计算复杂度和算法性能进行了分析；第5节为全文总结。

2 非协作卫星通信中的噪声谱及其对传统功率谱检测方法的影响

本节先建立接收信号模型，然后分析非协作卫星通信环境下的噪声谱及其对传统功率谱检测方法的影响。

2.1 接收信号模型

接收信号由期望信号和噪声两部分组成，其数学表达式为

$$r(t) = s(t) + n(t) \quad (1)$$

式中 $s(t)$ 为数字调制卫星通信信号， $n(t)$ 为加性噪声，且信号与噪声不相关，于是根据 Wiener-Khinchine 定理，可得 $r(t)$ 的功率谱 $R(k)$ 与 $s(t)$ 的功率谱 $S(k)$ ， $n(t)$ 的功率谱 $N(k)$ 之间的关系为

$$R(k) = S(k) + N(k) \quad (2)$$

2.2 非协作卫星通信中的噪声谱及其对传统功率谱检测方法的影响

在实际的非协作卫星通信环境中，由于多径衰落、阴影遮蔽、多普勒频移、接收机滤波器和功率放大器产生的失真等各种因素的影响^[9]，使接收信号中的噪声谱均值和方差并不满足传统功率谱检测所需的不随频率变化的假设。本文通过某试验场地的 S, X 频段卫星通信接收机，获取了大量的实测噪声数据，并将这些数据分成 50 段分别计算功率谱后叠加，得图 1 所示的叠加噪声谱图。

对图 1(b) 的叠加噪声谱，在每个频率点上分别计算其均值和方差，得图 2 所示的噪声谱的均值和方差。

从图 1，图 2 可以看出，实测噪声谱的均值和方差的确并不是随频率不变化的，即验证了非协作卫星通信环境中的噪声谱确实不满足均值和方差不随频率变化的假设这个结论。

当将传统功率谱检测应用到非协作卫星通信中的盲信号检测时，由于该方法是建立在噪声谱的均值和方差不随频率变化假设基础上的，而实测噪声谱并不满足此假设，导致检测性能受限。

3 基于谱图预处理的卫星通信信号盲检测

本节先推导基于谱图预处理的卫星通信信号盲检测方法的基本原理，然后给出具体的实现步骤，最后推导了相对于传统功率谱检测方法的检测性能改善因子。

3.1 盲检测的基本原理

针对非协作通信中噪声谱因不满足传统功率谱

检测的假设前提而导致该方法性能受限的问题，本文提出基于谱图预处理的解决思路：即在进行盲检测之前，对接收信号进行预处理，使噪声谱满足(或趋近满足)传统功率谱检测所需的均值和方差不随频率变化的假设。

从图 2 的统计结果可以看出，实测噪声谱可看作是统计均值组成的形状基本不变的谱包络 $N_1(k)$ 和随机变化的谱线 $N_2(k)$ 的叠加：

$$N(k) = N_1(k) + N_2(k) \quad (3)$$

式中的 $N_1(k)$ 对于具体的接收机和非协作卫星通信环境来说形状是基本不变的。

假设通过盲采集获得多组谱图，然后对谱图滤波并在每个频率点上用直方图法统计谱图变化趋势，基于数量最多的原则得到一个谱包络样本 $N_{\text{samp}}(k)$ ，则 $N_1(k) \approx r \cdot N_{\text{samp}}(k)$ ， $r > 0$ 。对于 r 的求解，最直观的方法就是最小二乘，但由于信号的存在，实际上并不能得到 r_{opt} ，从而有效地逼近(或拟合)噪声谱。为此，本文提出基于滑动窗的最小二乘法，即参照 Welch 法的思想对 W 点 DFT 获得的谱图 $R(k)$ 进行分段：

$$R_X^i(k) = R(iY + k), \quad i = 0, 1, \dots, Z-1, \\ k = 0, 1, \dots, X-1 \quad (4)$$

式中 X, Y, Z 均为整数， Z 表示段数， X 为每段长度，段与段之间的重叠为 $X-Y$ ，且满足

$$(Z-1)Y + X \leq W \quad (5)$$

分段之后，用最小二乘的方法对每段进行系数估计，然后用直方图法对这 Z 个系数 r_i 进行统计，基于数量最多的原则得到 r_{opt} ，最后用式(3)减去 r 与 $N_{\text{samp}}(k)$ 的乘积得

$$N(k) - r \cdot N_{\text{samp}}(k) = N_1(k) + N_2(k) - r \cdot N_{\text{samp}}(k) \\ \approx N_2(k) \quad (6)$$

上述谱图预处理过程的一个实例如图 3 所示。

从图 3 可以看出，通过对实测噪声谱图进行预处理，可以使噪声谱满足(或趋近满足)传统功率谱检测所需的噪声谱均值和方差不随频率变化的假设，从而使该方法在实际的非协作卫星通信条件下的检测性能不会受限。

3.2 盲检测的基本步骤

在 3.1 节基本原理推导的基础上，本节将详细阐述算法的具体实现。为方便阐述，假定 $N_2(k)$ 近似服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ ，则算法步骤为

(1) 基于 Bartlett 平均周期图法计算功率谱，公式为

$$R(k) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |R_i(k)|^2 \quad (7)$$

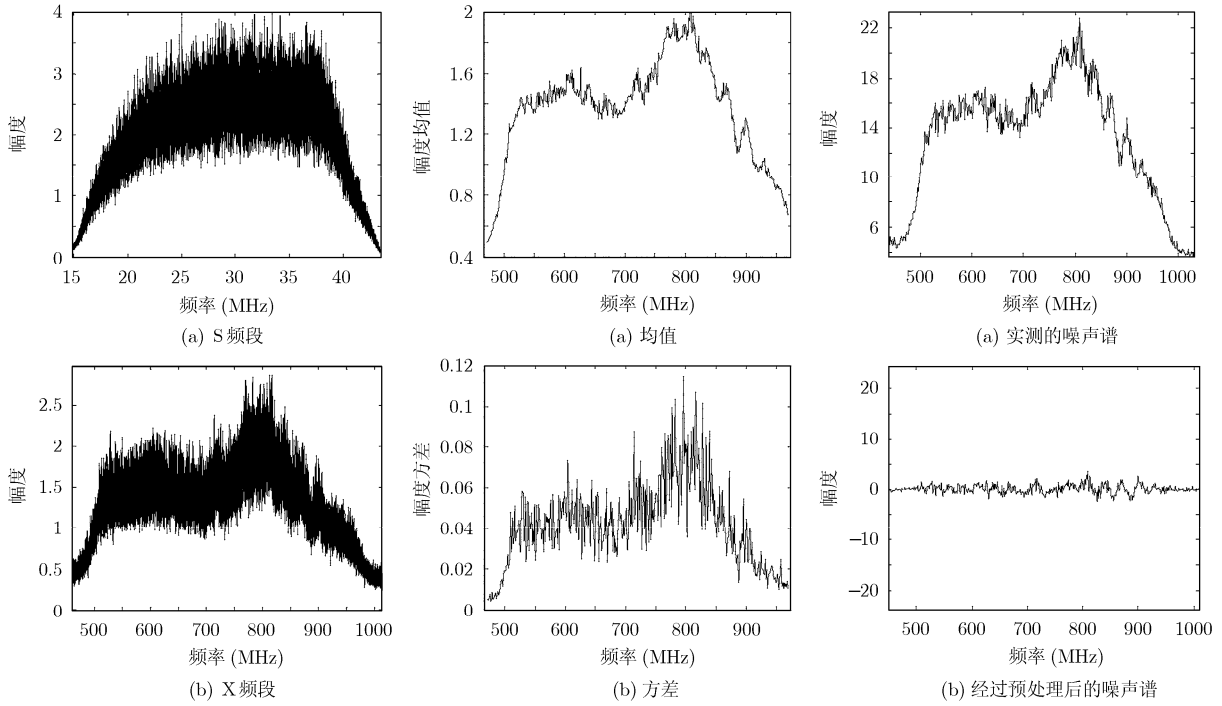


图 1 多段实测噪声谱的叠加 图 2 图 1(b)中叠加实测噪声谱的统计分析结果 图 3 对实测噪声谱图进行预处理的过程

式(7)中表示将 L 点采样数据分为 M 段, 每段长度为 DFT 点数 W , 第 i 段的 DFT 记为 $R_i(k)$, 可通过 FFT 计算得到;

(2)根据式(4), 式(5)对 $R(k)$ 和 $N_{\text{samp}}(k)$ 分段;

(3)对每段用最小二乘法估计得到比例系数 $r_i(i=1,2,\dots,Z)$;

(4)用直方图法统计 r_i , 基于数量最多的原则获得 r_{opt} ;

(5)将 $R(k)$ 减去 $N_{\text{samp}}(k)$ 与 r_{opt} 的乘积, 得 $R(k)-r_{\text{opt}} \cdot N_{\text{samp}}(k)=X(k)$, 实现噪声谱图的预处理;

(6)用直方图法统计 $X(k)$, 得其均值 μ 和标准差 σ ;

(7)根据虚警概率 P_{fa} 与门限 g_T 的关系:

$$P_{\text{fa}} = \int_{g_T}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-g^2/2} dg = 1 - \varphi(g_T) \quad (8)$$

查正态分布表得 g_T , 从而求出绝对检测门限 $T = \mu + g_T \cdot \sigma$;

(8)若 $X(k) > T (k \in [1, W/2])$, 则认为检测到信号, 否则就没有。

从上述步骤也可以看出, $N_2(k)$ 的不同分布假设仅会使式(8)的表达不同而已, 但不影响本文算法的具体步骤。

3.3 检测性能改善因子的推导

对于 $R(k)$ 的可检测性, 一般采用式(9)所示的标准^[10]:

$$D = \frac{\overline{A^2}}{\text{Var}(\text{Noise})} \quad (9)$$

式(9)中右边的分子表示信号谱幅度平方的均值, 分母表示噪声谱的方差。从式(9)可见, D 越大, 则可检测性越好, 即更易检测到信号。

下面推导谱图经过预处理后的检测性能改善因子: 因为经预处理后的信号谱幅度基本不变, 而仅是噪声谱方差的变化, 于是检测性能改善因子为

$$\begin{aligned} I &= \frac{D_2}{D_1} = \frac{\overline{A^2}}{\text{Var}(\text{Noise}_2)} \bigg/ \frac{\overline{A^2}}{\text{Var}(\text{Noise}_1)} \\ &= \frac{\text{Var}(\text{Noise}_1)}{\text{Var}(\text{Noise}_2)} \approx \frac{\text{Var}(N_1) + \text{Var}(N_2)}{\text{Var}(N_2)} \\ &\approx 1 + \frac{\text{Var}(N_1)}{\text{Var}(N_2)} \end{aligned} \quad (10)$$

从式(10)可以看出, 经预处理后的检测性能改善因子 $I > 1$, 若对图 3(a)预处理后得图 3(b), 其中的噪声谱方差从 $\text{Var}(\text{Noise}_1)=244.54$ 变化到 $\text{Var}(\text{Noise}_2)=2.14$, 则检测性能改善因子 $I = 114.27$, 远大于 1。

4 仿真实验

本节对第 3 节提出的基于谱图预处理的盲信号检测方法进行仿真实验, 进而分析计算复杂度和算法性能。

4.1 盲信号检测仿真

仿真产生 DS-BPSK、QPSK 和 16 QAM 信号, 滤波器中心频率 720 MHz, 带宽 450 MHz, 采样频率 2500 MHz, 信号中心频率 720 MHz, 码元速率

50 MHz, 码长 10 bit, 噪声为具有图 3(a)所示谱包络的随机噪声, 数据样点数 1 M, 在虚警概率为 10^{-3} 的情况下, 分别用本文方法和传统功率谱检测方法进行 Monte Carlo 仿真 10000 次, 得图 4 所示的盲检测性能曲线。

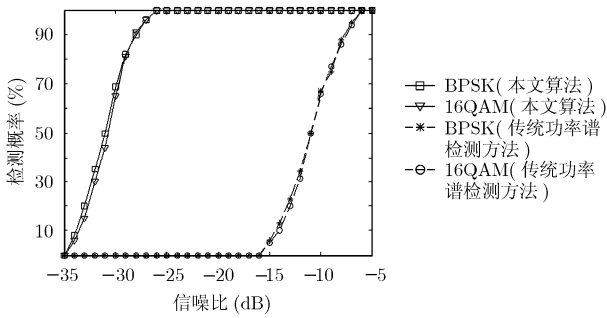


图 4 盲信号检测性能曲线

图 4 中的信噪比定义为滤波器通带范围内的信号能量与噪声能量比值的分贝数。由于本文算法是对传统功率谱检测方法的改进, 并且该方法是一种计算简单、应用广泛的传统盲信号检测方法, 因此选择它作为本文算法的比对算法。

从图 4 可以看出, 在图 3(a)所示的噪声环境下, 本文算法较传统功率谱检测方法的信噪比适应能力提高了 16 dB 以上, 这与 3.3 节推导的检测性能改善因子 I 的分贝数($10\lg 114.27=20.58$ dB)是基本吻合的, 存在一定的差距是基于下面两个因素:

(1)3.3 节中的 M 是一次仿真计算的结果, 而图 4 是 10000 次 Monte Carlo 仿真的结果;

(2)3.3 节的推导中认为信号谱幅度不变, 但实际的谱图预处理会使信号谱幅度有一定程度的损失。

4.2 计算复杂度分析

设搜索最佳比例系数的次数为 E , 直方图统计

段数为 F , 按 1 次减法相当 2 次加法, 1 次除法相当 2 次乘法的原则, 得算法的计算复杂度如表 1 所示。

选取一组典型数值: $L=1024 \times 1024$, $W=2048$, $M=L/W=512$, $X=24$, $Y=20$, $Z=51$, $E=50$, $F=30$, 代入表 1 可得: 加法次数 9561716, 乘法次数 9561665, 比较次数 38943, 总次数 $<19L$, 即算法的计算复杂度为 $O(L)$ 。

4.3 算法性能分析

针对图 4 的仿真结果和表 1 的计算复杂度分析, 可对算法性能作如下总结:

(1)本文算法在处理具有非平坦噪声谱包络的信号时, 比传统的功率谱检测方法在性能上有较大的提高, 并且也能适应一般的高斯白噪声, 只是此时的性能改善并不明显, 但算法的计算复杂度基本没有增加;

(2)本文算法的计算复杂度低, 可实现卫星通信信号的快速盲检测;

(3)噪声谱包络的形状在一定程度上影响着检测性能的改善: 一般而言, 包络越光滑、形状越不对称、起伏度越大, 本文算法的检测性能改善因子 I 就越大。

5 结束语

针对实际非协作卫星通信环境中的噪声谱不满足传统功率谱检测所需的均值和方差不随频率变化的假设, 本文基于谱图预处理的思想, 使噪声谱满足(或趋近满足)此假设, 由此提出了一种卫星通信信号盲检测方法。仿真实验表明, 该算法较传统的功率谱检测方法在性能上一般较大的提高, 且计算量小、易于实现、具有较强的鲁棒性, 能较好地满足非协作卫星通信的需要, 具有一定的军事意义和实用价值。

表 1 本文算法的计算复杂度

计算内容	加法次数	乘法次数	比较次数
FFT	$M \cdot (W \log_2 W - 3W + 4)$	$M \cdot (W \log_2 W - 3W + 4)$	0
计算功率谱	$(2M-1) \cdot W/2$	$2M \cdot W/2$	0
获取最佳比例系数	$Z \cdot (E \cdot 2X) + Z$	$Z \cdot (E \cdot 2X)$	$Z \cdot E + Z \cdot Z$
直方图统计 $X(k)$	$W/2 + F + 2$	$F + 2$	$(F+2) \cdot W/2$
信号检测	1	1	$W/2$
总运算量	$M \cdot (W \log_2 W - 2W + 4) + 2EZ X + Z + F + 3$	$M \cdot (W \log_2 W - 2W + 4) + 2EZ X + F + 3$	$(F+3) \cdot W/2 + ZE + ZZ$

参 考 文 献

- [1] Barkat M. Signal Detection and Estimation(second edition)[M]. Norwood, MA, USA: Artech House, 2005: 20-30.
- [2] 高宪军, 李德鑫, 李娜, 等. 基于功率谱对消的跳频信号检测算法[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2008, 26(3): 238-243.
Gao Xian-jun, Li De-xin, and Li Na, *et al.*. Algorithm for frequency-hopping signals detection based on suppressing power spectrum[J]. *Journal of Jilin University(Information Science Edition)*, 2008, 26(3): 238-243.
- [3] Wan Chun Ru, Goh Joo Thiam, and Chee Hong Tat. Optimal tonal detectors based on the power spectrum[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2000, 25(4): 540-552.
- [4] Hill D A and Bodie J B. Carrier detection of PSK signals[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2001, 49(3): 487-496.
- [5] 董占奇, 胡捍英, 于宏毅. 基于延迟相乘-相关及谱分析的直扩信号检测与符号周期、码片时宽估计分析[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(4): 840-842.
Dong Zhan-qi, Hu Han-ying, and Yu Hong-yi. The detection, symbol period and chip width estimation of DSSS signals based on delay-multiply, correlation and spectrum analysis[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(4): 840-842.
- [6] Sutton P D, Nolan K E, and Doyle L E. Cyclostationary signatures in practical cognitive radio applications[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, 26(1): 13-14.
- [7] 赵知劲, 邬佳, 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 Zhi-jin, Wu Jia, and Xu Chun-yun, *et al.*. The study on the detection methods of DSSS/QPSK signal based on the fourth-order cumulants[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(6): 1046-1049.
- [8] Guan Jian, Zhang Yan fei, and Huang Yong. Adaptive subspace detection of range-distributed target in compound-Gaussian clutter[J]. *Digital Signal Processing*, 2009, 19(1): 66-78.
- [9] 吴诗其, 吴廷勇, 卓宁兴. 卫星通信导论(第二版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 50-60.
Wu Shi-qi, Wu Ting-yong, and Zhuo Ning-xing. *Satellite Communications(second edition)*[M]. Beijing: Publing House of Electronics Industry, 2006: 50-60.
- [10] Kay S M 著, 罗鹏飞, 张文明, 刘忠等译. 统计信号处理基础, 第一卷: 估计理论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 88-89.
- 彭 耿: 男, 1980 年生, 博士生, 研究方向为通信侦察、空间信息对抗和电子战仿真等.
- 黄知涛: 男, 1976 年生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为循环平稳信号处理理论及应用、阵列信号处理、通信信号侦察处理等.
- 王丰华: 男, 1981 年生, 讲师, 研究方向为综合电子战系统与技术、通信信号侦察处理等.
- 姜文利: 男, 1967 年生, 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.