

文章编号: 1001-893X(2012)03-0338-04

基于延时相乘及其改进算法的 DS/FH 信号率线检测^{*}

张磊¹, 孟凡计¹, 胡建平², 王玉文¹

(1. 电子科技大学 空天科学技术研究院, 成都 611731; 2. 中国西南电子技术研究所, 成都 610036)

摘要:针对 DS/FH(直扩/跳频)混合扩频信号截获和参数估计问题,提出了一种基于延时相乘结合自适应滤波和分段自相关的新方法。该算法首先将输入信号进行自适应滤波以提高信噪比,滤波后送入延时相乘器,最后将乘积后数据分段进行自相关,通过分析谱图即可检测 DS/FH 混合扩频信号的码速率谱线。计算机仿真显示,改进的算法不但能适应低信噪比(-20 dB)条件下 DS/FH 混合扩频信号的检测,而且同时能够实现对码速率的估计。该方法所用算法简单,适合采用硬件设计实现,且如果是合作目标信号,搜索时间短,实时性强。

关键词:DS/FH 混合扩频;信号检测;延时相乘;分段自相关;自适应 LMS 滤波器

中图分类号:TN911.23 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1001-893x.2012.03.017

Detection and Chip Rate Estimation of DS/FH Hybrid Signals Based on Delay-multiply and its Improved Algorithm

ZHANG Lei¹, MENG Fan-ji¹, HU Jian-ping², WANG Yu-wen¹

(1. Institute of Astronautics & Aeronautics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China; 2. Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: To deal with the issue of DS/FH(direct sequence spread spectrum /frequency hopping) hybrid signal interception and parameter estimation, a novel algorithm based on delay-multiply, sectional auto-correlation and adaptive filter is proposed. In this algorithm, the input signal is processed by adaptive filter to improve signal-to-noise ratio(SNR) first. Secondly, the filtered signal is sent to delay-multiply and sectional auto-correlation is performed. Finally, the chip rate can be detected by analysing the power spectrum. The computer simulations show that it can not only fit the need of the low SNR(about -20 dB) which is quite common in the detection of DS/FH signals, but also can give the estimations of the chip rate in a simple way. This algorithm has little calculating demand so it is suitable for hardware implementation. If the input signal is cooperative signal, the search time will be shorter, and the algorithm has good capability in real-time processing.

Key words: DS/FH hybrid spread spectrum; signal detection; delay-multiply; sectional auto-correlation; LMS adaptive filter

1 引言

随着各种信号检测算法的完善和硬件的飞速发展,单一扩频体制已经变得不那么“安全”,所以一些重要通信领域更趋向于混合扩频体制。目前使用比较普遍的是将直接序列扩频(DS-SS)与跳频扩频(FH-SS)混合在一起即构成 DS/FH 混合扩频体制。

混合扩频体制继承了单一扩频体制各自的优点,其抗干扰、抗截获性能更强。目前的一些扩频检测理论算法主要集中在 DS-SS 和 FH-SS 信号检测上,而对 DS/FH 混合扩频信号的检测很少有文献涉及^[1]。

DS/FH 混合扩频信号亦具有伪随机码周期调制特性,本文以直扩信号率线检测的延时相乘法^[2-3]为基础,分析其在检测混合扩频信号的可行性,为满足实际需要加入了自适应滤波、分段自相

^{*} 收稿日期:2011-11-22;修回日期:2012-01-04

关算法。

2 算法分析

扩频信号检测方法有辐射仪(全频带或者部分频带)、平方倍频载波检测和延时相乘,考虑到信号检测的鲁棒性和低信噪比,延时相乘性能更好一些^[4]。直扩信号的扩频码速率检测通常采用延迟相乘算法,其特点是在检测率线方面简单易行,在此可以用来尝试检测 DS/FH 混合扩频信号。延时相乘可以看作是相关函数的变形,而一般的高斯白噪声与信号的相关函数很小,可以看作为零,所以这里为讨论方便只关注信号。假设接收到的 DS/FH 混合

$$d(t) = s(t) \times s(t - \tau) = \frac{S}{2} \left\{ \sum_{n=0}^k \text{rect} \left[\frac{T_c}{T_c - \tau} (t - nT_c - \tau) \right] + \sum_{n=0}^k d_n d_{n-1} \text{rect} \left[\frac{T_c}{\tau} (t - nT_c - \tau) \right] \right\} \times \begin{cases} \cos(\omega_k + \tau) + \cos(2\omega_k t - \omega_k \tau), & kT_c \leq t < kT_c + \tau \\ \cos((\omega_{k+1} - \omega_k)t + \omega_k \tau) + \cos[(\omega_{k+1} + \omega_k)t - \omega_k \tau], & kT_c + \tau \leq t < (k+1)T_c \end{cases} \quad (2)$$

把式(2)分成离散部分(乘号之前)和连续部分(乘号之后)分别进行讨论。

离散部分: $\sum_{n=0}^k \text{rect} \left[\frac{T_c}{T_c - \tau} (t - nT_c - \tau) \right]$ 可以看作是一周期为 T_c 矩形波,对其变形:

$$\sum_{n=0}^k \text{rect} \left[\frac{T_c}{T_c - \tau} (t - nT_c - \tau) \right] = \left[\text{rect} \left(\frac{T_c}{T_c - \tau} t \right) \right] \otimes \sum_{n=0}^k \delta(t - nT_c - \tau) \quad (3)$$

求式(3)的 FFT 得到:

$$\left\{ \omega_c (T_c - \tau) \times Sa \left[\frac{(T_c - \tau) \omega}{T_c} \right] \right\} \sum_{n=0}^k (\omega - n\omega_c) \quad (4)$$

由式(4)可以看出,DS/FH 信号的延时相乘频谱在码速率 nT_c ($n \in [1, 2, 3, \dots, k]$) 处出现谱线,这可以作为检测码速率的参数,而

$$\sum_{n=0}^k d_n d_{n-1} \text{rect} \left[\frac{T_c}{\tau} (t - nT_c - \tau) \right]$$

可以看作是一双极性脉冲串,将其变换到频域化为 $\frac{\tau}{2} Sa \frac{\omega \tau}{2}$ 。

需要说明的是,应用延时相乘率线检测时,必须满足过采样($f_s = nR_c$, n 为大于 2 的整数)条件,即首先载波必须大于伪码速率(带宽),如果 $f_s \leq R_c$,则相当于信号带宽小于载波,这与采样定理相悖;其次,延时时间 τ 也决定了这种关系, R_c 最佳检测的延时在

扩频信号为^[5]

$$s(t) = \sqrt{2S} \sum_{k=0}^{+\infty} d_k(t) \text{rect}(t - kT_c) \cos \left(\sum_{m=0}^{+\infty} \omega_m t + \theta_m \right) \quad (1)$$

式中, S 为信号功率, $d_k(t) \in [-1, 1]$ 是信息码被扩频码调制后的序列,

$$\text{rect}(t - kT_c) = \begin{cases} 1, & |t| < T_c/2 \\ 0, & \text{other} \end{cases},$$

T_c 为码元宽度, $\cos(\sum_{m=0}^{+\infty} \omega_m t + \theta_m)$ 是载波, ω_m 是跳频序列控制的载波的频率, θ_m 为对应的载波相位。

假设 θ_m 为零,则把接收到的信号与其延迟一段时间 τ 后的信号相乘为

$\tau = T_c/2$ 处,如果 $f_s \leq R_c$,则采样点取不到半个码片。实际中采样速率至少是码速率的 10 倍以上。

连续部分:连续部分主要与载频相关,之所以会出现两种形式主要由于延时时间和跳频速率的关系,有可能数据段内只有一个频率也可能有多个频率。进行频域变换可得

$$\begin{cases} \frac{\pi}{2} [\delta(\omega + 2\omega_k) + \delta(\omega - 2\omega_k)] \\ \frac{\pi}{2} [\delta(\omega + \omega_{k+1} - \omega_k) + \delta(\omega - \omega_{k+1} + \omega_k) + \delta(\omega + \omega_{k+1} + \omega_k) + \delta(\omega - \omega_{k+1} - \omega_k)] \end{cases} \quad (5)$$

式(5)只包含一个频率,它是直接扩频延时相乘载波检测的原理,式(5)下边一个式子是考虑跳频系统包含两个频率的接收信号,从式(5)可以看出连续部分将在 2 倍载频处或者和频、差频处出现谱线,有可能干扰对码速率谱线的检测,即由于干扰谱线的存在有可能使得率线搜索到载频谱线上。这可以从以下 3 个方面考虑:

(1)跳频系统因载频高速跳变,出现很多谐波,各个载波谱线所分得的能量被大大削弱;

(2)码速率检测的最佳延时量为 $T_c/2$,载频的最优延时量为 NT_c (即整数倍码宽)或者 1 个采样点(相当于平方倍频),延时量不同将导致谱线幅度受很大削弱,而所要的谱线将会最强;

(3)码速率和载频一般不在一个数量级上,2 倍后差异更大,可能超出 FFT 检测的最大频率,也可以考虑加入滤波器。

单独的延时相乘法在低信噪比条件下使用并不理想,需要和其他一些信号检测方法结合使用,而自相关方法是弱信号检测的一种经典方法,且其不会导致噪声失去加性高斯白噪声的特性,提高了输入信号的信噪比^[6]。将延时相乘后的信号分段进行自相关处理,自相关过程保持移位后相乘累加的两段数据长度始终一样,最后将相关结果进行累加平均。改进后的延时相乘分段相关检测器框图如图 1 所示。

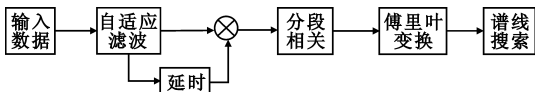


图 1 改进的延时相乘分段相关检测器框图
Fig.1 Block diagram of improved detector with delay-multiply and sectional auto-correlation

为适应低信噪比条件下对弱信号检测,可通过对输入信号进行滤波实现。但如果噪声幅度比信号幅度大,或信号和噪声存在频谱重叠,需采用自适应干扰对消器,它根据环境对滤波器特性做出相应变化。自适应滤波器可以看作是在一般滤波器里加入了自适应算法,根据算法的不同,分为最小均方滤波器(LMS)、递归最小平方(RLS)和卡尔曼滤波器。考虑到计算量和存储需求,LMS 算法最有效。另外,它还会遇到其他两种算法固有的数值不稳定问题^[7]。这里使用自适应滤波器主要是为提高识别准确度,虽不能完全滤除噪声,但可改善信噪比。自适应 LMS 噪声抵消框图如图 2 所示。

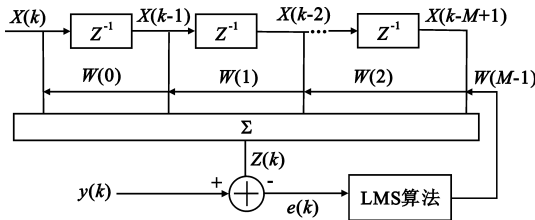


图 2 自适应横向 FIR 滤波器结构
Fig.2 Adaptive FIR filter transversal structure

图 2 中 $X(k)$ 为建模噪声, $y(k)$ 为被污染的信号, W 为权值系数,自适应算法根据误差对权值进行动态更新。

3 计算机仿真

DS/FH 混合扩频信号源的仿真模型在 MATLAB 7.11.0 仿真环境下实现,对算法的实现用 m 语言搭建。主要参数:载波调制使用最为普遍的 BPSK 调制,每位信息数据被 255 bit 的 Gold 码调制,码速率为 1 kchip/s,载波跳变范围为 1 ~ 10 kHz,跳频频点采用 127 bit 的 m 码控制,频点个数选择 (20, 25, 30…),

信息速率设置为 4 bit/s,跳速设置为 4 bit/s 的整数倍,采样速率设置为伪码速率的 10 倍,延时点数为 5 个采样点即半个码片时间。不失一般性,仿真参数也可以设置高一些,而结果是一样的。仿真结果如图 3 ~ 5 所示。

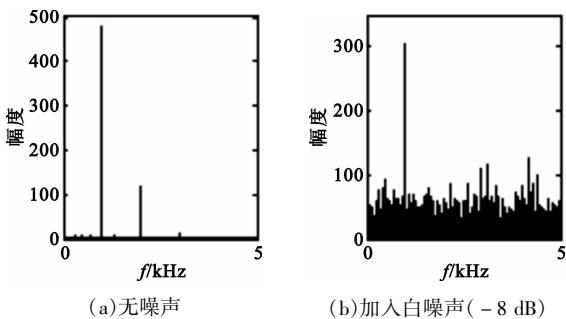


图 3 经延时相乘后码速率检测结果
Fig.3 Chip rate estimated result after being processed by delay-multiply

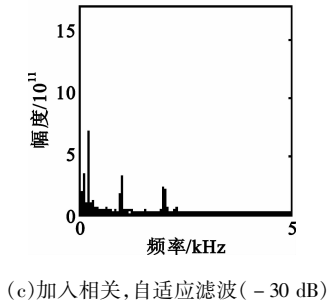
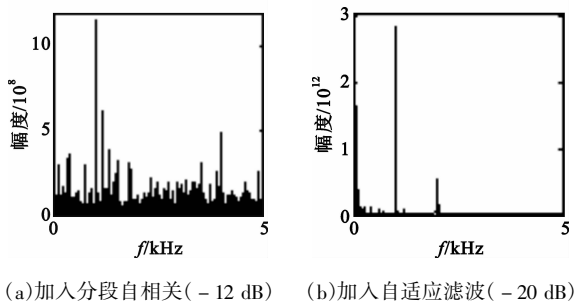


图 4 延时相乘自相关率线检测结果
Fig.4 Chip rate estimated result after being processed by delay-multiply and auto-correlation

图 3(a)是 DS/FH 信号只做延时相乘在理想无噪声条件下的码速率谱线仿真图,图 3(b)是在(a)图基础上加入高斯白噪声下的仿真,由图可以看出虽然在信噪比等于 -8 dB 条件下码速率 1 kHz 处谱线仍是最高,但干扰谱线已经明显增加,在信噪比小于 -10 dB 后已经很难保证检测概率。图 4(a)是在延时相乘基础上加入了分段自相关,可以根据实时要求增加或减少数据分段数,这里只分了两段数

据做自相关。然而自相关也只能提高几分贝的信噪比容限,当信噪比小于 -15 dB 后算法失效。所以图 4(b) 在前面的基础上加入自适应滤波先对输入信号进行预处理,其目的是用于改善输入到检测器中信号的信噪比。由仿真结果可以看出,在信噪比为 -20 dB 时码速率谱线依然明显,这就说明了算法改进的有效性。但要让自适应滤波器达到较好的性能必须对接收信号有很好的认识以建立最优的系数更新算法。图 4(c) 是其他条件不变信噪比为 -30 dB 的仿真图,由图可以看出在零频附近及其他地方干扰谱线增多,搜索谱线将定位在错误谱线上。由图 5 的概率统计也可以看出,算法在信噪比为 -25 dB 左右时性能恶化,不再具有实际意义。

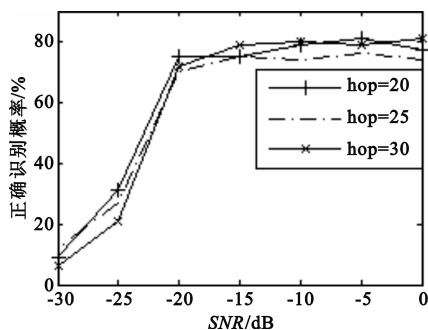


图 5 检测概率与信噪比和跳速的关系

Fig.5 Probability of detection vs SNR and hopping speed

由图 5 的统计结果可以看出,只要输入信号周期完整,跳频速率对检测效果影响不大,但是跳频图案的选定,即跳频频点的选择对检测效果有一定影响。正如前面算法分析里提到的延时相乘将导致载波 2 倍频谱线干扰检测,这也是检测器无法达到 100% 检测概率的一个原因。

4 结束语

目前,学术界对 DS/FH 混合扩频信号进行有效检测和侦察的研究文献较少,但是在工程实践中无论是合作通信的多模式接收机还是非合作的侦察接收这项工作都具有重大意义。本文以延时相乘的率线检测为基础,通过引入分段自相关,并且在前端加入自适应滤波器模块对检测算法进行改进。Matlab 仿真表明,改进的延时相乘算法对信噪比在 -20 dB 的 DS/FH 混合扩频信号的检测依然有效,但是当信噪比小于 -25 dB 时算法就失效。同时,该算法虽然降低了对信噪比的要求,但由于跳频频点的影响,偶尔会出现其谱线高于码速率谱线的情况,这也是影响检测准确率的一个主要因素,因此可针对这一问题再做进一步的研究。

参考文献:

- [1] 薛乐,叶伟.扩频信号检测方法[C]//第十三届全国青年通信学术会议论文集.北京:国防工业出版社,2008:1288-1292.
XUE Le, YE Wei. The method of detection spread spectrum signals[C]//Proceedings of the Thirteenth National Conference on Youth Communication. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 1288-1292. (in Chinese)
- [2] 陶雷,武传华.直扩信号侦收技术研究[J].现代防御技术,2007,35(3):104-108.
TAO Lei, WU Chuan-hua. Review of the Technologies for the Interception of Direct-Sequence Spread-Spectrum Signal[J]. Modern Defence Technology, 2007, 35(3): 104-108. (in Chinese)
- [3] 陈强,马媛,牛景昌.直扩信号特征提取技术[J].无线电工程,2010,40(8):10-12.
CHEN Qiang, MA Yuan, NIU Jing-chang. A Feature Extraction Technique for DS Signals[J]. Radio Engineering, 2010, 40(8): 10-12. (in Chinese)
- [4] Hill D A, Felstead E B. Laboratory performance of spread spectrum Detectors[J]. IEE Proceedings of Communications, 1995, 142(4): 243-249.
- [5] 朱攀.直接序列/跳频混合扩频信号检测与参数估计方法研究[D].成都:电子科技大学,2007.
ZHU Pan. Research on DS/FH hybrid spread spectrum signal detection and parameter estimation[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2007. (in Chinese)
- [6] 张伟,张健,周勃.基于过采样的 DS-SS/BPSK 信号延迟相乘多重相关检测[J].信息与电子工程,2006,5(4):351-355.
ZHANG Wei, ZHANG Jian, ZHOU Jie. DS-SS/BPSK Signal Detection With Delay Multiplication Multi-correlation Based on Over-sampling [J]. Information and Electronic Engineering, 2006, 5(4): 351-355. (in Chinese)
- [7] Iffachor E C, Jervis B W. Digital Signal Processing: a practical approach[M]. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education/Prentice Hall, 2002.

作者简介:

张磊(1984—),男,河南信阳人,硕士研究生,主要研究方向为航天器测控通信技术;

ZHANG Lei was born in Xinyang, Henan Province, in 1984. He is now a graduate student. His research direction is spacecraft TT&C.

Email: zhanglei_a3@163.com

孟凡计(1980—),男,四川成都人,工程师、讲师,主要研究方向为测控通信技术、频谱管理技术;

MENG Fan - ji was born in Chengdu, Sichuan Province, in 1980. He is now an engineer and also a lecturer. His research interests include TT&C communication and spectrum management.

胡建平(1963—),男,四川成都人,研究员,长期从事航天外测及飞行器测控通信系统研究和设备研制;

HU Jian - ping was born in Chengdu, Sichuan Province, in 1963. He is now a senior engineer of professor. His research concerns the development of aerospace and spacecraft TT&C system.

王玉文(1962—),男,四川成都人,现为电子科技大学副教授、高级工程师,主要研究方向为微波与通信导航测试、自动测试与测试系统集成、空间复杂电子系统可测性设计。

WANG Yu - wen was born in Chengdu, Sichuan Province, in 1962. He is now a senior engineer and also an associate professor. His research concerns microwave and test of navigation communication, automatic testing and test system integration and space complexity of electronic system design for test.