

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.08.010

基于时域分割的 DS/FH 信号参数估计*

席有猷**,程乃平,郝建华,刘茂国

(解放军装备学院,北京 101416)

摘要:针对时频分析方法在直扩/跳频(DS/FH)混合扩频信号参数估计中存在时频分辨率受限、交叉项干扰、实时性差等缺点,通过分析 DS/FH 信号的时频特性,提出了一种新的 DS/FH 信号参数估计方法。该方法从待测信号的时域分析出发,利用不同跳频点对应的周期数不相等的性质,完成了对 DS/FH 信号的时域分割,最后结合 DS/FH 信号性质完成了对待测信号跳频周期、驻留时间、跳频频率的估计。仿真结果表明,该方法针对 DS/FH 信号参数估计精度高,运算速度较快,且没有干扰频率。

关键词:直扩/跳频混合扩频信号;参数估计;时域分割

中图分类号:TN911.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)08-1023-05

Parameter Estimation of DS/FH Signals Based on Temporal Segmentation

XI You-you, CHENG Nai-ping, HAO Jian-hua, LIU Mao-guo

(The Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: In order to avoid the shortcomings such as the limited time-frequency resolution, redundant cross terms and poor real-time in using the time-frequency distribution to estimate the DS/FH (Direct Sequence/Frequency Hopping) signal parameters, a new parameter estimation method that takes the time domain analysis as a starting point is presented through analyzing the time-frequency characteristics of DS/FH signal. Based on time domain analysis of the test signal, the method divides the DS/FH signal in the time domain because the different frequency signals have different number of cycles. Then, it completes estimation of the parameters such as hopping period, dwell time, and hopping frequency. The experimental results show that the method is extremely effective for DS/FH signal. Apart from that, it features high estimation accuracy, fast operation and no interference frequency.

Key words: DS/FH hybrid spread spectrum signal; parameter estimation; temporal segmentation

1 引言

直扩/跳频(DS/FH)混合扩频信号是目前应用十分广泛的一种抗干扰信号,结合了扩频和跳频的优点,具有较好的抗干扰效果和优异的隐蔽性能^[1]。目前,针对 DS/FH 混合扩频信号参数估计的研究十分有限,主要采用循环谱^[2-3]和时频分析技术^[4-10],文献[11]综合时频分析方法和循环谱方法

估计混扩信号参数。然而,循环谱方法和时频分析算法运算量较大,无法满足通信对抗过程中的实时性要求,且循环谱方法无法提供 DS/FH 信号的时变信息;采用窗函数的时频分析方法中频率分辨率和时间分辨率受不确定原理制约,无法同时达到较高的精度,维纳-威利分布则受交叉项的影响。并且在获得 DS/FH 信号的时频分布后,准确获得 DS/FH 信号的时频脊线及跳频参数也比较困难。本文通过

* 收稿日期:2013-03-18;修回日期:2013-06-18 Received date:2013-03-18;Revised date:2013-06-18

** 通讯作者:yyxi0226@126.com Corresponding author:yyxi0226@126.com

分析 DS/FH 信号的特性,从时域角度出发分析问题,通过对 DS/FH 信号的预处理,利用载波信号的单调性规律将 DS/FH 信号在时域根据跳频时刻进行分割,然后再提取 DS/FH 信号的时变信息及频率变化规律等参数。

2 DS/FH 混合扩频系统

2.1 系统模型

DS/FH 扩频系统原理如图 1 所示^[1]。

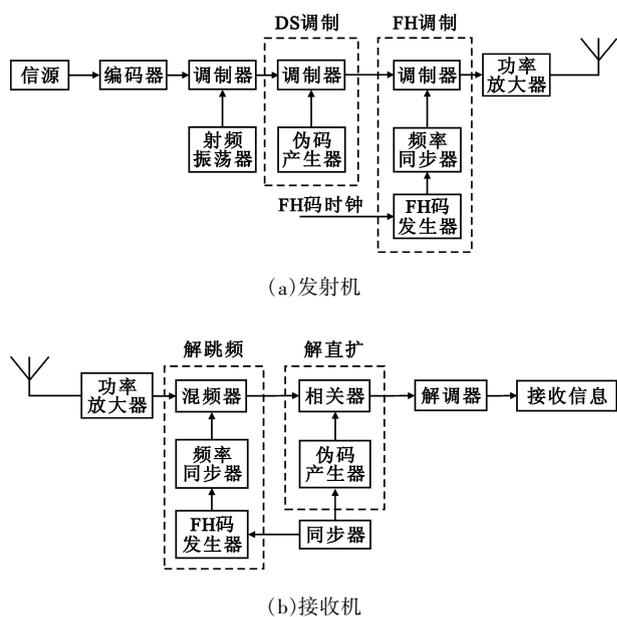


图 1 DS/FH 混合扩频系统原理图

Fig.1 The schematic diagram of the DS/FH hybrid spread spectrum system

2.2 数学模型

混合扩频信号的数学模型为

$$s(t) = \sqrt{2P}c(t) \cos(2\pi(f_0 + f_k(t))t + \varphi_k(t)) \quad (1)$$

其中, $c(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k \text{rect}(t - kT_c)$ 为 BPSK 信息序列与扩频码序列的乘积, $f_k(t) \in \{f_1, f_2, \dots, f_N\}$ 为跳频图案, $\varphi_k(t)$ 为每跳引入的相位。

3 算法原理

3.1 DS/FH 信号的时域特征

针对 DS/FH 信号序列中跳频频率不同的任意两段长度相同的序列,序列中的采样点数是相等的,不同频率信号在时域表现为相邻采样点之间的幅值间

隔不同,即在相等的采样时间内信号的周期数不同。

DS/FH 信号中由于扩频码调制作用,信号的周期性不明显,待测信号的绝对值能够消除扩频调制的影响,并且不影响 DS/FH 信号的时域特征,可以作为 DS/FH 时域分析的参考信号。图 2 是 DS/FH 参考信号的时域特征,从图中可以看到,在 DS/FH 信号中,不同跳频频率信号的驻留时间相等,不同频率的信号在相同的时间内其周期数亦不相等。

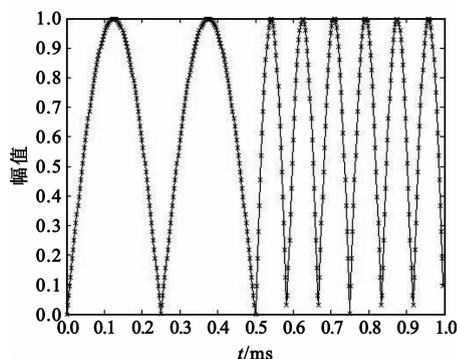


图 2 不同跳频频率的时域特征

Fig.2 The time domain features of different hops

3.2 基于时域分割的 DS/FH 信号参数分析

DS/FH 参考信号在一个完整的跳频周期内表现为两个递增序列,两个递减序列。根据不同频率时 DS/FH 参考信号时域特征的区别,本文提出通过统计某一周期内采样点数的个数来区分不同跳频频率的时域分割点。若信号载波频率相同,则在一个周期内其采样点数相同;若载波频率发生跳变,则在一个周期内其采样点数亦发生变化。具体的算法步骤为:

(1)对待测 DS/FH 信号求绝对值,得到其参考信号;为保证分析信号是整周期序列,从参考信号起始位置开始单调性分析,以序列首次递增数据点作为新的起始点,建立新的待测数据序列;

(2)根据 DS/FH 参考信号时域特征,一个完整的载波周期其单调性依次表现为一个递增序列、一个递减序列、一个递增序列、一个递减序列;利用单调性分析方法统计一个周期内采样数据长度;

(3)剔除已经分析过的数据,建立新的数据序列,重复步骤 2,分析获得第二个载波周期的采样数据长度;

(4)重复步骤 3,获得待测数据序列剩余每个跳频周期对应的采样数据长度,生成每个周期对应的采样数据长度序列;

(5)判断每个周期对应的数据长度,相同数据长度表明其属于同一个跳频频率,否则属于不同的跳频频率,从而实现 DS/FH 信号按跳频频率不同实现时域分割;

(6)结合采样频率、待测序列采样点数综合分析 DS/FH 信号时频参数,具体为:为避免待测序列第一跳以及最后一跳可能并非完整跳频周期对待测 DS/FH 信号跳频周期测试的影响,剔除第一个载波频率以及最后一个载波频率对应的序列长度,对剩余跳频点对应的序列长度求平均值得到 DS/FH 信号的跳频周期;结合采样频率及某一分割序列的周期数,可以获得跳频频率;

(7)针对分割后的 DS/FH 信号,每一段是一个直扩序列,选择某一分割序列,其功率谱密度的主瓣宽度可以认为是直扩伪码速率的 2 倍;

(8)结合采样频率及序列长度,综合上述参数,获得 DS/FH 信号的跳频图案及时频参数。

算法的流程如图 3 所示。

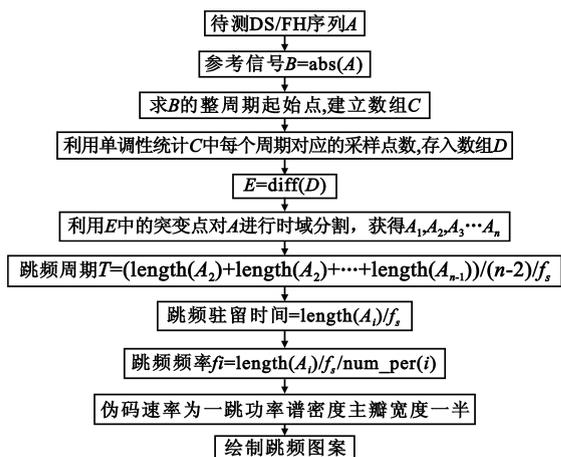


图 3 DS/FH 时域分割算法流程图

Fig.3 The flow chart of DS/FH signal based on temporal segmentation algorithm

时域分割算法的误差主要是分割时对跳变点的估计误差,当噪声带来的幅度抖动误差大于相邻采样点之间的幅值差时,分割则出现误差。若某一跳的采样频率 f_s ,准确长度为 N 点,一跳内标准周期数为 M ,时域分割算法的估计长度为 N_1 点,估计周期数为 M_1 ,则驻留时间估计差为 $(N - N_1)/f_s$,载波频率估计误差为 $f_s/(N/M - N_1/M_1)$ 。

针对时频分布中运算量较小的谱图分布,一个 N 点序列需要进行 N 次长度为 N 的傅里叶变换。若 N 为 2 的整数次幂,则可以采用 FFT 快速运算,共需要 $2N^2 \lg N$ 实数乘和 $3N^2 \lg N$ 实数加;否则,共

需要 $4N^3$ 实数乘和 $2N^2(2N - 1)$ 实数加,而时域分割算法则只需 N 次实数加法,其运算量明显小于时频分布算法。

4 仿真验证

为了验证算法的性能,进行如下仿真实验,仿真信号为 BPSK 调制的 DS/FH 信号,其基本参数如下:信源符号速率 10 kHz,扩频码采用周期为 1 023 的 m 序列,扩频因子 32,直扩伪码速率 320 kchip/s,采样频率 200 MHz,跳频速率 10 khop/s,跳频频率 {500; 4 000; 1 500; 3 500; 2 500; 2 000; 3 000; 1 000} kHz。待测信号并非从跳频信号的第一跳起始位置开始采样,而是从第一跳的中间位置开始采样,最后一跳的信号长度也仅有跳频周期的一半,即采样信号长度为 140 000 个采样点。为了增加算法的普适性,在参数设置中,在某些跳频点,采样频率是信号频率的整数倍,即某些跳频驻留时刻包含整数倍信号周期;然而在有些跳频点,该跳驻留时间内的信号并非整周期倍数。

利用时域分割法的跳频图案估计结果如图 4 所示,其余时频参数的估计结果如表 1 所示,仿真用时 2.33 s。

表 1 DS/FH 信号时域分割算法参数估计结果
Table 1 The estimation results of DS/FH signal based on temporal segmentation algorithm

跳频周期 /ms	跳频点数	跳频频率 /kHz	驻留时间 /ms
0.1	8	500; 4 000; 1 500; 3 500; 2 500; 2 000; 3 000; 1 000	0.05; 0.1; 0.1; 0.1; 0.1; 0.1; 0.1; 0.05

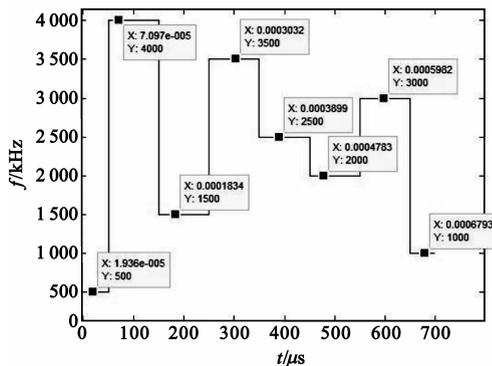


图 4 DS/FH 信号跳频图案时域分割算法估计结果
Fig.4 The frequency hopping pattern of DS/FH signal based on temporal segmentation algorithm

采用时频分布算法进行参数估计时,采用谱图

分布,窗函数采用汉明窗,窗长为 $N/4 - 1$ 。仿真时,使用时域分割法采用的普通台式计算机提示内存溢出,换用高性能服务器仿真用时129.23 s。通过时频图提取时频脊线时存在设置阈值的问题,本文通过多次实验,采用经验最佳值作为最终阈值,提取的时频脊线如图5所示,跳频图案估计结果如图6所示,时频参数估计结果如表2所示。

表2 DS/FH信号谱图分布参数估计结果
Table 2 The estimation results of DS/FH signal based on spectra distribution

跳频周期 /ms	跳频 点数	跳频频率 /kHz	驻留时间 /ms
0.100 04	8	689.5;3 912.2;	0.049 9;0.100 2; 0.1;0.1;0.1; 0.1;0.1;0.049 9
		1 578.4;3 454.1;	
		2 508.9;2 022.0;	
		2 952.3;1 145.5	

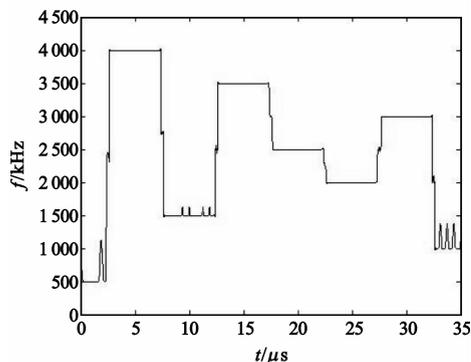


图5 DS/FH信号谱图分布时频脊线估计结果
Fig.5 The time-frequency ridge of DS/FH signal based on spectra distribution

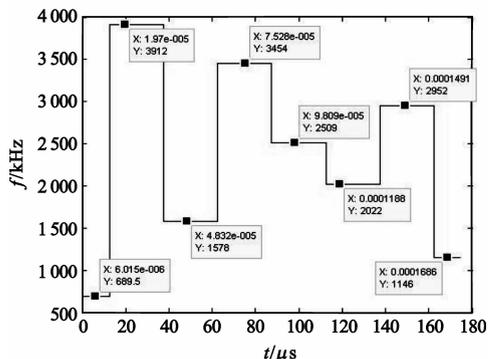


图6 DS/FH信号谱图分布跳频图案估计结果
Fig.6 The frequency hopping pattern of DS/FH signal based on spectra distribution

从仿真结果可以看出,时域分割法能够准确估计信号时频参数,参数估计精度明显优于时频分布算法,更重要的是具有时频分布算法无法比拟的低运算量,是针对大数据以及实时性要求较高情况下

时频参数估计的有力工具。

5 结论

DS/FH混合扩频信号的优良特性使其在军事通信中取得广泛应用,研究DS/FH信号的参数估计可以获得敌方通信系统参数,从而有目的地设置干扰信号,达到灵巧干扰的目的;也可以通过对方设备的参数进行分析,完成对设备的验收测试。本文通过分析DS/FH信号的时频特性,从信号时域分析入手,利用不同跳频频率的采样序列的周期性不同的原理,结合DS/FH参考信号的单调性规律,搜索不同跳频频率对应的时域跳变时刻,将DS/FH信号在时域分割为多个直扩子序列,最后结合DS/FH信号特征完成了信号的时频参数估计。该方法与时频分析算法相比,不存在交叉项频率,不受时频分辨率的限制,且运算速度在仿真时提升约60倍,可以实现大数据的实时参数估计。

参考文献:

- [1] 朱明哲.混合扩频信号的时频检测与参数估计方法研究[D].西安:西安电子科技大学,2010.
ZHU Ming-zhe. Time-Frequency Analysis Based Detection and Parameter Estimation for Hybrid Spread Spectrum Signals [D]. Xi'an: Xidian University, 2010. (in Chinese)
- [2] Gardner W A, Brown W A. Fraction-of-time probability for time-series that exhibit cyclostationarity[J]. Signal Processing, 1991, 23(3): 273 - 292.
- [3] 朱明哲,姬红兵.基于S变换的混合DS/FH扩频信号参数估计[J].西安电子科技大学学报(自然科学版), 2010, 37(4): 710 - 715.
ZHU Ming-zhe, JI Hong-bing. Parameter estimation of hybrid DS/FH spread spectrum signals based on the S transform[J]. Journal of Xidian University (Natural Science Edition), 2010, 37(4): 710 - 715. (in Chinese)
- [4] 朱明哲,姬红兵,金艳.基于信道化谱增强的混合DS/FH扩频信号跳速估计[J].电子与信息学报, 2010(2): 329 - 334.
ZHU Ming-zhe, JI Hong-bing, JIN Yan. Hop Rate Estimation of Hybrid DS/FH Spread Spectrum Signals Based on a Channelized Spectral Enhancement Strategy [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010(2): 329 - 334. (in Chinese)
- [5] 朱明哲,姬红兵,金艳.基于自适应抽取STFT的混合DS/FH扩频信号参数估计[J].系统工程与电子技术, 2010, 32(2): 454 - 462.
ZHU Ming-zhe, JI Hong-bing, JIN Yan. Parameter estimation of hybrid DS/FH spread spectrum signals based on adaptive decimating STFT[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(2): 454 - 462. (in Chinese)
- [6] Shui P L, Bao Z, Su H T. Nonparametric Detection of FM

- Signals Using Time-frequency Ridge Energy[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(5): 1749 – 1760.
- [7] Zhu Ming-zhe, Ji Hong-bing, Gao Rui-tao. Parameter Estimation of Hybrid DS/FH Spread Spectrum Signals Using S Transform with an Asymmetrical Window[C]//Proceedings of 2010 International Conference on Communications and Mobile Computing. Shenzhen: IEEE, 2007: 329 – 332.
- [8] 杨文革, 文贻军, 孟生云, 等. 直扩/跳频混合扩频信号测量性能分析[J]. 电讯技术, 2009, 49(1): 13 – 17.
YANG Wen-ge, WEN Yi-jun, MENG Sheng-yun, et al. Telemetry Performance Analysis of DS/FH Hybrid Spread Spectrum Signal[J]. Telecommunication Engineering, 2009, 49(1): 13 – 17. (in Chinese)
- [9] 郑文秀, 赵国庆, 罗明, 等. 混合 SFH/ DS 扩频信号的跳频频率估计[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(7): 1852 – 1855.
ZHENG Wen-xiu, ZHAO Guo-qing, LUO Ming, et al. Hopping Frequencies Estimation of Hybrid SFH and DS Spread Spectrum Signals[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(7): 1852 – 1855. (In Chinese)
- [10] 张佳芬, 牟飞燕, 雷翔. 混合扩频信号快速参数估计与识别算法[J]. 电讯技术 2011, 51(9): 69 – 72.
ZHANG Jia-fen, MOU Fei-yan, LEI Xiang. Fast Parameter Estimation and Recognition Approach for Hybrid Spread Spectrum Signals [J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(9): 69 – 72. (in Chinese)
- [11] 雷雪梅, 杨万麟, 吕镜清. FH/PSK 混合调制扩频信号参数估计[J]. 火控雷达技术, 2008, 38(4): 40 – 44.
LEI Xue-mei, YANG Wan-lin, LV Jing-qing. Parameter Estimation for FH/PSK Hybrid Modulated Spread Spectrum Signals[J]. Fire Control Radar Technology, 2008, 38(4): 40 – 44. (in Chinese)

作者简介:



席有猷(1986—),男,甘肃庆阳人,2007年于西安交通大学获学士学位,2009年于装备指挥技术学院获硕士学位,现为博士研究生,主要研究方向为通信与信息系统;

XI You-you was born in Qingyang, Gansu Province, in 1986. He received the B. S. degree from Xi'an Jiaotong University and the M. S. degree from Academy of Equipment Command & Technology in 2007 and 2009, respectively. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns communication and signal systems.

Email: yyxi0226@126.com

程乃平(1962—),男,陕西扶风人,1996年于北京航空航天大学获博士学位,现为教授、博士生导师,主要研究方向为空间信息传输技术;

CHENG Nai-ping was born in Fufeng, Shaanxi Province, in 1962. He received the Ph. D. degree from Beijing University of Aeronautics and Astronautics in 1996. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns space information transmission.

郝建华(1973—),男,陕西延安人,副教授,主要研究方向为空间信息传输技术;

HAO Jian-hua was born in Yan'an, Shaanxi Province, in 1973. He is now an associate professor. His research concerns space information transmission.

刘茂国(1979—),男,山东济南人,讲师,研究方向为空间信息传输技术。

LIU Mao-guo was born in Jinan, Shandong Province, in 1979. He is now a lecturer. His research concerns space information transmission.