

一种自适应跳频中的干扰检测算法

彭任斌, 金力军

(西安电子科技大学综合业务网理论与关键技术国家重点实验室 西安 710071)

【摘要】为提高跳频通信系统的可靠性和稳定性,根据线性数字调制信号的特点,对信号进行非线性变换,应用变换后信号的功率谱密度中所包含的信号特征信息,提出了一种适合于自适应跳频的干扰检测算法。该算法基于贝叶斯决策理论,属于盲信干(信噪)比检测。仿真结果表明,该算法满足跳频通信系统的要求。

关键词 自适应跳频; 功率谱密度; 多元正态概率型; 贝叶斯决策
中图分类号 TN914.4 文献标识码 A

An Algorithm for Detecting Interferences Applied to Adaptive Frequency Hopping (AFH) Systems

PENG Ren-bin, JIN Li-jun

(State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University of China Xi'an 710071)

Abstract To improve the reliability and stability of FH communications, nonlinear transforms are used according to the properties of linear modulated digital signals. Based on the information included in the PSD of the transformed signals, an algorithm for detecting interferences applied to adaptive FH is proposed. The algorithm is based on Bayesian decision-making, which belongs to blind detection of signal-to-interference ratio (SIR) and signal-to-noise ratio (SNR). The simulation results show that the algorithm meets the requirements of FH communication systems.

Key words adaptive frequency hopping; power spectral densities; multivariate normalized probability type; bayesian decision-making

自适应跳频有信道自适应跳频和干扰自适应跳频两种。信道自适应跳频基于对信道参数的探测,自动适应通信质量的变化,在最佳频率上进行跳频。干扰自适应跳频建立在对受干扰信道实时估值的技术上,即对信道遭受的干扰性质和干扰程度进行分析,并做出判断是否要跳变到另一个频率点上。常用的干扰识别方法是系统误码特性或信干(信噪)比的判别与检测。通常,误码率的测量是根据跳频频帧中预知的特殊信号来确定的,但这些信号降低了通信效率。本文提出的算法属于干扰自适应跳频,不需要预知信号,它能有效地解决干扰为复合信号的情况。

1 信号特征提取

1.1 信号预处理

1.1.1 调制信号复包络

$r(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n g(t - nT_s)$, 其中, a_n 为一个随机过程,在值和时间上是离散的; $g(t)$ 为单脉冲信号; T_s 为码元宽度。调制信号: $s(t) = r(t)e^{j(2\pi f_c t + \phi_c)}$; 其中,载波频率为 f_c ; 相位为 ϕ_c 。

1.1.2 接收信号的模型

$x(t) = s(t) + z(t)$, 其中, $z(t)$ 为干扰或噪声。跳频系统工作环境中常见的干扰和噪声为ST(单音信号)、高斯频移键控(Gaussian Frequency Shift Keying, GFSK)和加性高斯白噪声(Additional White Gaussian Noise, AWGN)等。

收稿日期: 2003-09-03

作者简介: 彭任斌(1980-),男,硕士生,主要从事自适应跳频,信号检测方面的研究。

1.1.3 信号变换

线性数字调制信号的一个重要特性是,在相隔 T_s 的采样点上,复包络 $r(t)$ 会取数目有限的不同状态(对应信息 a_n 的不同值)。 $r(t)$ 的特性取决于实际采用的键控方式。若可以找到一种变换,使所有的状态归于一种状态,则在变换的信号中就会出现直流分量。这样,高阶周期性就转换到一阶的情况^[1]。如图1所示。非线性变换具有两个重要性质:

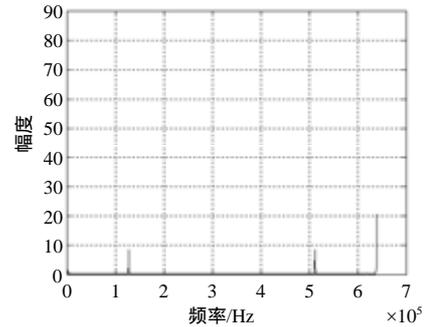


图1 $\pi/4$ DQPSK经非线性变换后的功率谱

(1) 由于发射端波形形成器的影响,某些信号经非线性变换后的功率谱会在 nf_s 位置出现强谱线($n=1$,幅值较大),其周围对应于码元速率“宽度”的“窗口”内幅值较大(即“窗口”的宽度值等于码元速率值,“窗口”中心位于 f_s 处)。

(2) 与信号不相关的噪声,其非线性变换后的功率谱中不会出现表征信号特征的谱线。

其他性质可参见文献[2]。本文讨论非线性变换为 $s(t) \cdot \times s^*(t)$ 的情况,其他变换方式如表1所示。表中 $s^*(t)$ 表示 $s(t)$ 的共轭,“ $\cdot \times$ ”表示自乘(同一时刻的信号自乘),**为谱线几乎与波形形成器无关,*为谱线与波形形成器关系紧密,-在此频率无谱线出现, n 为整数。

表1 对不同复信号实施非线性变换后的谱线出现情况

非线性变换	调制方式				
	频率	2PSK	$\pi/4$ DQPSK	ST	GFSK
无	f_c	-	-	**	-
	$fc+nf_s(n \neq 0)$	-	-	-	-
	$2f_c$	**	-	**	**
$s(t) \cdot \times s(t)$	$2f_c + (n+1/2)f_s$	-	-	-	**
	$2f_c + nf_s(n \neq 0)$	*	-	-	*
$s(t) \cdot \times s(t) \cdot \times s(t) \cdot \times s(t)$	$4f_c$	**	-	**	**
	$4f_c + nf_s(n \neq 0)$	*	-	-	*
$s(t) \cdot \times s^*(t)$ (基带差分调制)	$nf_s(n \neq 0)$	*	*	-	-

1.2 特征提取

对于差分分解调后的 $\pi/4$ DQPSK信号,

$$s(t) \cdot \times s^*(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |a_n|^2 |g(t - nT_s)|^2 = C \sum_{n=-\infty}^{\infty} |g(t - nT_s)|^2$$

式中 C 为常数。由性质(1),功率谱密度中零频和 f_s 处幅值较大, $\pi/4$ DQPSK经非线性变换后的功率谱如图1。图中参数见后面的仿真。本文称由功率谱密度计算出的“信干(信噪)比”为试探性的比。计算方法如下:用非线性变换的功率谱密度中 f_s 对应谱线的幅度值比以 f_s 为中心的“窗口”内其他频率分量的幅度值的平均。

1.3 特征分析

1.3.1 信号+干扰(任意频率干扰)

先不考虑波形形成器的影响。干扰ST、GFSK可以记为: $A' \cos[2\pi f_g t + \beta(t)]$,对于ST, $\beta(t) = \text{const}$ 。设接收到的受干扰信号为 $\hat{s}(t)$,经非线性变换后得:

$$\begin{aligned} \hat{s}(t) \cdot \times \hat{s}^*(t) = & 1 + 2A^2 + A^4 + 2A \cos[2\pi \Delta f k + \beta(k) - \phi_k] + 2A \cos[2\pi \Delta f (k-1) + \beta(k-1) - \phi_{k-1}] + \\ & 2A^2 \cos[2\pi \Delta f k + \beta(k) + \beta(k-1) - \phi_k - \phi_{k-1}] + 2A^2 \cos[2\pi \Delta f k + \beta(k) - \beta(k-1) - \phi_k + \phi_{k-1}] + \\ & 2A^3 \cos[2\pi \Delta f k + \beta(k) - \phi_k] + 2A^3 \cos[2\pi \Delta f (k-1) + \beta(k-1) - \phi_{k-1}] \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $\Delta f = f_g - f_c$; f_g 是干扰频率; f_c 是有用信号载波频率; A' 和 A 分别为混频、滤波和采样前后干扰

之振幅。式(1)的功率谱密度之幅度在0频和 $|\Delta f|$ 附近较大,因此,当 $f_s - \text{“窗口”}/2 \leq |\Delta f| \leq f_s + \text{“窗口”}/2$ 时,“窗口”中谱分量幅度的均值大,故试探性的比小。

1.3.2 信号+AWGN

先不考虑波形形成器的影响,接收信号经基带差分检测及非线性变换,得 $\hat{s}(t) \cdot \times \hat{s}^*(t)$ 的时域表达式为常数项及若干噪声项的线性叠加,由于噪声的功率谱密度在0到 $1/T_s$ 上均匀分布,故 $\hat{s}(t) \cdot \times \hat{s}^*(t)$ 的功率谱密度(除直流分量外)幅度大小分布比较均匀,在信号能量不变的情况下,均值随信噪比的增大而减小。由于发端波形形成器的影响,在 f_s 处会出现较强的谱线。信号+GFSK+ST、信号+AWGN+ST、信号+AWGN+GFSK及信号+AWGN+ST+GFSK具有类似结果。

1.3.3 试探性的比的分布规律

本文以干扰是GFSK为例进行讨论,干扰为ST的情况与其类似。分别如图2和图3所示。两图中的曲线是对每种信干(信噪)比下的500个试探性比的样本点取平均所得。图2为干扰与有用信号的载波频差为零的情况。图中,最上边一条曲线为不加AWGN的试探性的比,其余的由上到下是在信噪比依次固定为20、15、10和5 dB情况下,试探性的比随信干比变化的情况。最下边的曲线对应信号+AWGN。考虑干扰GFSK的频率为任意值的情况,如图3所示。图中,上边三条曲线从上到下依次为干扰与有用信号载波的频差为0 Hz、30 kHz、50 kHz的试探性的比,倒数第二条对应信号+AWGN,最下边一条是频差为65 kHz的情况。

综上所述,信号+AWGN、ST和GFSK或其组合的试探性的比大都介于信号+ST(ST的频率等于信号频率)或信号+GFSK(GFSK的载波频率等于信号频率)与信号+AWGN之间。

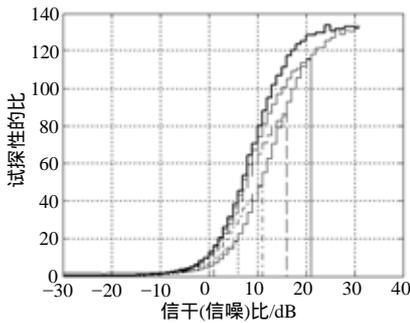


图2 信号+干扰+噪声及信号+噪声的试探性的比

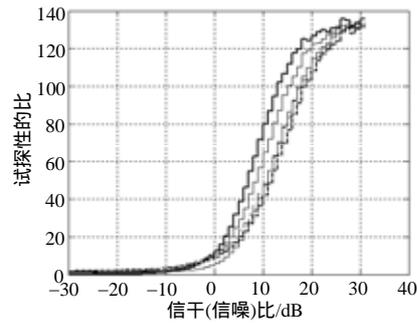


图3 信号+不同频率干扰及信号+噪声的试探性的比

2 自适应检测方案

设最低通信要求为误码率 $<1/10$ 。当干扰和噪声分别为ST、GFSK、AWGN或其组合时,保证误码率 $<1/10$ 的最低信干(信噪)比约5 dB。准则:信干(信噪)比大于等于6 dB可正常通信;否则,不行。其方案如下:

- (1) 若知道干扰(噪声)的类型,直接利用对应的试探性的比的曲线,建立检测器;
- (2) 若不知干扰(噪声)的类型,可用信号+ST(ST频率等于信号频率)和信号+GFSK(GFSK载波频率等于信号频率)建立联合检测器,分别记为J1和J2。规则:若两个检测器都检测信道“合格”,则判决信道可正常通信;否则,不行。

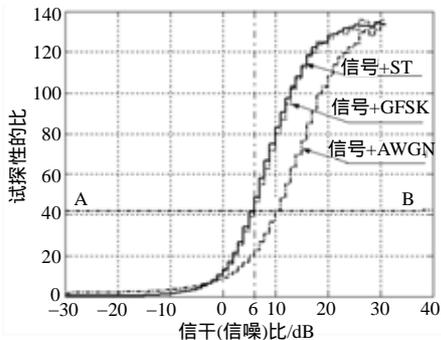


图4 三种试探性的比

3 自适应检测器

3.1 最小错误率贝叶斯决策自适应检测器

由W和D准则可证得^[3],每一种信干(信噪)比下的试探性的比近似服从正态分布。从-30到30 dB,类别数为61。多元正态概率型下的最小错误率贝叶斯判别函数见文献[4]。更新算法

为:

$$c_i(k) = \frac{c_i(k-1)n}{n+d} + \sum_{l=1}^d \frac{x_l}{n+d}, \quad \sigma_i(k) = \frac{\sigma_i(k-1)n}{n+d} + \sum_{l=1}^d \frac{[x_l - c_i(k-1)]^2}{n+d} \quad (2)$$

式中 $c_i(k)$ 和 $\sigma_i(k)$ 表示 k 时刻, 当判决试探性的比(x)落入 i dB 信干(信噪)比(即第 i 类)时, 检测器对应的第 i 类的均值和方差; n 表示最初训练该检测器的每一类别的参数时所用的训练样本数; d 表示输入试探性的比(x)的维数; x_l 表示 x 的第 l 个分量, $l = 1, 2, \dots, d$ 。

3.2 仿真结果

每跳中有用数据为 125 个 $\pi/4$ DQPSK 码元, 采样率 640 kHz, 码元速率 128 kB/s, FFT: 1 024 点。求出每跳数据的试探性的比(对应一维), 检测结果如表 2 所示。表中结果分别用 J1、J2, 检测对应的干扰的情况。表中还列出了用信号+AWGN 建立的检测器(J3)检测高斯白噪声的情况。

表2 检测器检测正确率

维数		4				6				8			
		3	4	6	7	3	4	6	7	3	4	6	7
信干(信噪)比/dB		正确率/(%)											
干扰(噪声)	ST(J1)	98	89	93	99	100	94	96	100	100	95	98	100
	GFSK(J2)	98	91	95	99	100	95	97	100	100	96	98	100
	AWGN(J3)	98	89	94	99	100	92	95	100	100	94	96	100

4 结 论

本文提出了一种适用于自适应跳频的干扰检测算法, 它基于贝叶斯决策理论, 利用了信号非线性变换的功率谱密度中包含的信号特征信息。理论和仿真表明: 该算法具有所需数据少、计算速度快和存储量小等特点, 满足跳频系统的要求。

参 考 文 献

- [1] Gardner W A. Statistical spectral analysis: a nonprobabilistic Theory[M]. Prentice Hall: Englewood Cliffs, N. J, 1987.
- [2] Juergen R. Automatic classification of communication signals using higher order statistics[C]// Proceedings. ICASS'92, San Francisco, 1992.
- [3] 梁小筠. 正态性检测[M]. 北京: 中国统计出版社, 1997.
- [4] 边肇祺, 张学工. 模式识别(第2版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.

编 辑 刘文珍