DOI: 10.11999/JEIT161399

基于时频修正与波形变换的 MFSK 信号调制参数盲估计

邱钊洋* 黄 焱 欧阳喜 (解放军信息工程大学信息系统工程学院 郑州 450001)

摘要:多进制频移键控(MFSK)信号被广泛应用于各种军用、民用通信系统中。针对其调制参数估计,现有的方法大多基于小波变换,但其存在抗噪性能差,参数不易选取等问题。通过对语图不确定原理的研究,该文提出一种语图逻辑"与"运算方法,并引入波形变换理论改善时频变换波形占空比,提高了估计算法的信噪比门限,完成低信噪比下 MFSK 信号调制参数的自适应盲估计。仿真表明,所提算法在抗噪声、频偏性能及参数选取鲁棒性上均优于现有常用算法,适合工程实践。
 关键词:多进制频移键控;时频修正;波形变换;参数估计中图分类号: TN911.6
 文章编号: 1009-5896(2017)10-2536-05

Blind Estimation of Modulation Parameters of MFSK Signal Based on Time-frequency Modifying and Waveform Transforming

QIU Zhaoyang HUANG Yan OUYANG Xi

(Institute of Information System Engineering, Information Engineering University of PLA, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: MFSK signal is widely used in military and civil communication systems. For the issues of its modulation parameters' estimation, wavelet transform theory is mostly adopted in current algorithms. However, the anti-noise performance is poor and parameters are difficult to choose. On the research of indeterminacy theory of spectrogram, a strategy for spectrograms modifying is proposed and the waveform transforming theory is drawn into to upgrade the duty cycle. As the result, the anti-noise performance is improved and the self adaption blind parameter estimation is achieved. The simulation results indicate a better performance of proposed algorithm than current algorithms in anti-noise and frequency offset performance and robustness of parameters which makes it a better choice for engineering practice.

Key words: M-ary Frequency Shift Keying (MFSK); Time-frequency modification; Waveform transform; Parameter estimation

1 引言

多进制频移键控(MFSK)由于其良好的抗多径 时延特性被广泛应用于短波、超短波,以及水声通 信信道。对此类信号进行精确的调制参数盲估计是 非合作接收方完成信号匹配识别,盲解调的必要环 节,也是频谱监测,通信对抗中的一个重要内容^[1,2]。 目前对通信信号调制参数估计的研究大多集中于单 载波线性调制信号^[3-5],而对于频率调制信号则涉 及较少,对此类信号参数的盲估计有着迫切的现实 需求。

小波变换常被用于提取信号中的局部频率变化

基金项目: 国家自然科学基金(61072046)

从而获得码速率及跳变时刻等, 文献[6]中采用两次 Haar 小波变换提取了符号跳变时刻,进而采用傅里 叶变换得到了码元速率,但低信噪比下性能较差, 参数鲁棒性较差。文献[7]采用 Morlet 小波提取脊 线,求取短时方差,从而获得符号跳变曲线,一定 程度上提高了算法的抗噪性能,但仍然存在参数选 取的问题。语图常用于语音信号处理,其基于短时 傅里叶变换,是一种十分有效的时频分析工具之一, 对于 FSK 类频率调制信号, 不同时刻的符号信息被 调制于不同的频率之上,具有明显的时频分布特征, 故对非合作接收方,语图常被用来观测其信号参数, 甚至信息还原。但由于测不准原理的限制,语图常 存在着时间和频率分辨率之间的矛盾,导致参数估 计精度十分有限。本文通过对语图做逻辑"与"运 算,提出一种时频分辨率平衡方案,并据此提取了 时频变化波形,针对时频变化波形(单极性不归零波

收稿日期: 2016-12-29; 改回日期: 2017-05-11; 网络出版: 2017-06-23 *通信作者: 邱钊洋 qiuzhaoyang2010100@163.com

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61072046)

形)设计了波形变换滤波器,提高了 FSK 信号调制 参数盲估计算法的性能。

2 语图及测不准原理

短时傅里叶变换(Short-Time Fourier Transform, STFT)是获取信号语图的常用方法。设x(n)为原始接收信号,离散STFT表达式为

$$\mathrm{STFT}(mT, nF) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)w(kT - mT)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi(nF)k} \quad (1)$$

其中, T > 0和F > 0分别是时间和频率的采样间 隔, w(n)为离散分析窗,常选用汉明窗、汉宁窗、 布莱克曼窗等。语图定义为

$$SPEC(t, w) = |STFT(t, w)|^2$$
(2)

其中, t 对应时间轴, w 对应频率轴, SPEC 为幅度 值。窗长的大小决定了语图的时间分辨率和频率分 辨率。当窗长较小时,时间分辨率较高,频率分辨 率较低;窗长较大时,频率分辨率较高,但时间分 辨率较低,此即 Heisenberg 测不准原理^[8]。对于 MFSK 信号,测不准原理导致的问题是显而易见的: 频率分辨率低导致瞬时频率测算不准确,如图 1(a) 高 时 间 分 辨 率 语 图 (High Time Resolution Spectrogram, HTRS)所示;时间分辨率低导致跳变 时刻测算不准确,如图 1(b)高频率分辨率语图(High Frequency Resolution Spectrogram, HFRS)所示, 这都将大大影响参数估计的准确率。

下文将针对 Heisenberg 测不准原理,提出一种 语图修正方案,结合波形变换思想,完成了 MFSK 信号的调制参数精确估计问题,这种方法在抗噪性 能大大提高的同时,对参数选取具有很好的鲁棒性, 十分适合于工程实践。

3 算法设计

3.1 语图修正策略

针对两种语图各自的优劣特性,从图像处理的 角度,我们可做类逻辑"与"运算,增强二者中同 步能量较高值,减弱不同步的弱值,此时,可以获 取在时间和频率上分辨率都较高的语图。

合并过程中,有以下问题需要解决:(1)两种语 图分辨率不同,即数据矩阵维数不同;(2)由于两幅





(a)高时间分辨率语图(HTP)

图 1 某实际含噪 2FSK 信号语图

语图中采用的窗长不同,导致像素点数量级不同; (3)合并策略,即如何增强同步大值,减弱非同步大 值。

对此,我们可分别采用插值,标准化,对应位 置乘积操作来解决。首先对 HTRS 语图进行列插值, 使其像素点维数与 HFRS 语图保持相同。三次样条 插值可以保证插值曲线的平滑性,在此可采用三次 样条插值对列短时频率曲线进行插值,使列维数与 HFRS 列维数保持一致。

进行数量级标准化,用 *p_k*(*i*, *j*)表示第*k*(1或2) 幅语图中第*i*行第*j*列的像素点,则可采用式(3)进行 Min-max 标准化方法,以保证数值在同一量级:

$$p_{k}(i,j) = N \times \frac{p_{k}(i,j) - \min_{i,j}(p_{k}(i,j))}{\max_{i,j}(p_{k}(i,j)) - \min_{i,j}(p_{k}(i,j))}$$
(3)

其中, N表示标准化后的最大值。标准化之后,语 图中像素点的能量均表示为 0~N中的数值。为将 同步大值进行增强,减弱非同步大值。选取同位置 像素点进行乘积操作的合并策略,即逻辑"与"运 算:

$$p(i,j) = [p_1(i,j) \times p_2(i,j)]^m$$
(4)

其中, m为幂因子,控制调整的幅度。经过上述步 骤修正的语图,其噪声背景得到了抑制,同时保留 了高时间和高频率分辨率,适合进行后续的参数估 计工作。获得修正语图后,保留同一时刻频率轴最 大值,可获得时频变化波形。如图2所示,由HTRS 语图得到的时频变化曲线,由于窗长较小,频率分 辨率低,导致瞬时频率不稳定,但符号跳变位置明 显;由HFRS语图得到的时频变化曲线瞬时频率稳 定且准确,但符号跳变信息损失较大;修正后语图 的时频变化序列在时间和频率上都与原始序列较为 接近。

语图经过修正,时间及频率分辨率得以兼顾, 这使得 MFSK 信号的跳变时刻测算更为准确,同时 减弱了频率抖动,对符号速率估计十分有益。同时 修正后语图的时频变换序列与原序列最大程度上保 持了一致,可直接为盲解调提供简单易易操作的基 带波形,简化解调端的计算量。

3.2 波形变换以提取定时分量

时频变化波形是单极性不归零波形,不含定时 分量,必须进行波形变换以提取定时分量,事实上 定时分量仅存在于单极性归零波形^[9]。矩形波(对应 修正语图得到的时频变换波形)占空比的不同影响 着定时分量的显著程度,在占空比的取值区间[0,1], 存在最优值τ使定时分量谱线最为显著,下文对此 进行分析。





图 2 修正后语图效果示意图

时频变化波形进行差分、取模操作,在信号的 跳变时刻将形成脉冲,脉冲序列 *s*(*t*) 可表示为

$$s(t) = \sum_{k} a_k \delta(t - kT_s) \tag{5}$$

其中,

$$a_{k} = \begin{cases} 0, & 以概率P出现\\ 1, & 以概率(1-P)出现 \end{cases}$$
(6)

其中, P = 1/M。

P表示当前符号与上一个符号相同的概率, T_s 为符号周期。假设符号完全随机且等概,则P随FSK 信号调制阶数不同而不同, M 为调制阶数。

符号速率信息存在于 *s*(*t*) 的周期性变化中,而 *s*(*t*) 频谱不易通过傅里叶变换求得,不能直观看出 定时分量的有无与位置。对此,可将其建模为单极 性归零波形。令:

$$\begin{array}{c} g_1(t) = 0\\ g_2(t) = \delta(t) \end{array}$$

$$(7)$$

g₂(t)相当于占空比极小的矩形窗,窗长为符号周期。此时,

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s_n(t) \tag{8}$$

$$s_n(t) = \begin{cases} g_1(t - nT_s), & \bigcup \, \mathbb{K} \, \mathbb{X} \, \mathbb{P} \, \mathbb{H} \, \mathbb{H} \\ g_2(t - nT_s), & \bigcup \, \mathbb{K} \, \mathbb{X} \, \mathbb{H} \, \mathbb{H} \, \mathbb{H} \\ \end{cases} \tag{9}$$

s(*t*) 可分解为稳态波部分*v*(*t*) 和交变波部分 *u*(*t*),其中稳态波是随机序列*s*(*t*)的统计平均分量, 可以表示为

$$v(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[Pg_1 \left(t - nT_s \right) + (1 - P)g_2 \left(t - nT_s \right) \right]$$
(10)

进行傅里叶变换得

$$P_{v}(f) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left| f_{s} \left[PG_{1} \left(mf_{s} \right) + (1-P)G_{2} \left(mf_{s} \right) \right] \right|^{2} \cdot \delta \left(f - mf_{s} \right)$$
(11)

其中, $G_1(f)$ 和 $G_2(f)$ 分别表示 $g_1(t)$ 和 $g_2(t)$ 的功率 谱。可见, 稳态波 v(t) 是一个以 T_s 为周期的周期信 号,构成 s(t) 功率谱中的离散谱。交变波 u(t) 是 s(t)与 v(t)之差:

$$u(t) = s(t) - v(t)$$

= $\sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n \left[g_1 \left(t - nT_s \right) - g_2 \left(t - nT_s \right) \right]$ (12)

其中,

$$c_n = \begin{cases} 1 - P, & 以概率P\\ P, & 以概率1 - P \end{cases}$$
(13)

故
$$u(t)$$
功率谱为
 $P_u(f) = f_s P(1-P) |G_1(f) - G_2(f)|^2$ (14)
可见交变波构成连续谱。则

$$P_{s}(f) = P_{u}(f) + P_{v}(f) = f_{s}P(1-P) |G_{1}(f) - G_{2}(f)|^{2} + \sum_{m=-\infty}^{\infty} |f_{s}[PG_{1}(mf_{s}) + (1-P)G_{2}(mf_{s})]|^{2} \cdot \delta(f - mf_{s})$$
(15)

又已知 $g_1(t)$, $g_2(t)$ 表达式,在此将 $g_2(t)$ 视为占 空比为 τ 的矩形脉冲,设 $\tau = T_s/n (n \ge 1)$,则

$$G_2(f) = \frac{T_s}{n} Sa\left(\frac{\pi f T_s}{n}\right) \tag{16}$$

$$P_{s}(f) = f_{s}P(1-P)|G_{2}(f)|^{2} + \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left|f_{s}\left[(1-P)G_{2}\left(mf_{s}\right)\right]^{2}\delta(f-mf_{s})$$
(17)

$$G_2(mf_s) = \frac{T_s}{n} Sa\left(\frac{m}{n}\pi\right) \tag{18}$$

当n = 1时, $G_2(mf_s) = 0$,此时相当于原始 FSK 的时频变化波形,无定时分量;当n较大时,存在 定时分量及各高次谐波,且幅度逐渐递减,此时相 当于差分取模后的时频脉冲波形s(t),高信噪比下 可实现符号速率处单频谱线的检测,但低信噪比下, 将被连续谱及噪声淹没。为了单频离散谱线检测的 准确性,可通过调节占空比 τ ,进而调整 $G_2(f)$ 的能 量分布,使低频段信号能量会聚,提升该频段的信 噪比,进而实现符号速率处离散谱线的增强。下面 讨论占空比 τ 与 $G_2(f)$ 的关系。

$$G_2(f,\tau) = \tau Sa(\pi f\tau) \tag{19}$$

由式(19)可见, 主瓣宽度随占空比 τ 的减小而增 大, 要使定时分量基频显著, 需要考虑离散谱分量 与连续谱分量在符号速率处的比值, 设该值为 β , 则

$$\beta(\tau) = \frac{P_s(f_s)}{P_u(f_s) + n_0} = \frac{f_s^2 (1 - P)^2 G_2^2(f_s, \tau)}{f_s P (1 - P) G_2^2(f_s, \tau) + n_0} \quad (20)$$

其中, n_0 表示噪声功功率谱密度(此处假设为高斯白噪声,密度恒定)。由式(20)分析可得, $\beta(\tau)$ 取极值,等价于 $G_2(f_s,\tau)$ 取极值。由图 3 可见, $G_2(f_s,\tau)$ 与 τ 的关系呈抛物线型,当 $\tau = 0.5$ 时, $G_2(f_s,\tau)$ 取得极值,此时统计量 β 也相应达到最大。

故对本文问题而言,应尽可能对 s(t) 进行波形 变换,保证变换后 g₂(t) 波形的占空比在 0.5 左右。 问题转化为寻找符合条件的滤波器系数 h,将差分 取模后波形 s(t) 过滤波器 h,实现波形变换。

3.3 波形变换滤波器的确定与离散频率检测

实际中,由于符号速率未知,过采因子也是未 知的,且范围较大,不能采用固定滤波器进行波形 变换,否则效果将大大降低。未知符号速率的情况 下,过采因子并不能直接获得,所以在此设计了动 态寻优的流程,即对所有可能的过采因子进行遍历, 构造统计量对其处理结果中单频分量的凸显程度进 行评价,选取统计量的极值对应的波形变换滤波器 作为最佳滤波器,凸显的单频位置即为信号的码元 速率。



图 3 G₂(f_s, τ) 与 τ 的关系曲线

3.3.1 统计量构造 波形幅度谱中的色噪声是影响单频检测的主要因素。对波形幅度谱进行式(21)所示的非线性变换可克服色噪声对单频分量的影响^[10],分子部分是频点幅度的实际值,分母是连续谱幅度和噪声幅度的叠加,在此用该频点附近频点幅度的统计平均来近似。设X(n)为当前波形的离散幅度谱,其中 $1 \le n \le N$ 。

$$X'(n) = \frac{X(n)}{\frac{1}{2M} \left(\sum_{i=n-M}^{n-1} X(i) + \sum_{i=n+1}^{n+M} X(i) \right)}$$
(21)

经过此非线性变换后的频谱,离散频率将不受 色噪声的影响,更好地反映单频分量的位置。其凸 显程度可用 X'(n) 最大值与次大值之比来衡量,即

$$\chi(r) = \frac{\max\left(X'_r(n)\right)}{\max_2\left(X'_r(n)\right)} \tag{22}$$

其中, *r* 为遍历的过采因子, $X'_r(n)$ 表示以*r* 为过采 因子时对原始波形变换后的单边幅度谱, $\max_2(X'_r(n))$ 表示 $X'_r(n)$ 的次大值。随着*r* 的遍历, χ 统计量将形成类似图 3 的变化。

3.3.2 波形变换滤波器设计 定时信息的凸显程度 与占空比有着明确的关系,设真实的过采因子为R, 当占空比 $\tau = 0.5$ 时,离散谱线处的信噪比最高,定 时信息最为凸显。设当次遍历的过采因子为r,则 对应与 $\tau = 0.5$ 的变换滤波器为

$$h = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \cdots 1 & 1 \end{bmatrix} \tag{23}$$

对可能的 r 进行遍历,依式(23)构造对应滤波器,将差分波形过此滤波器,对变换后波形取模, 作幅度谱,即得 $X_r(n)$ 。用式(21)对 $X_r(n)$ 做非线性 变换,即得 $X'_r(n)$,对其计算 χ 统计量。选取最大的 χ 对应的 r 作为 \hat{R} ,此时滤波器长度为 $\hat{R}/2$,最大 的 χ 对应的 $X'_r(n)$ 中最大离散频率位置即为码元速 率。

3.4 基于修正语图的 MFSK 信号调制参数估计流程 根据上述讨论,设计参数估计流程示于表 1。

4 仿真实验

实验信号采用 2FSK 和 4FSK,实信号,符号 个数为100,采样率为10 kHz,信噪比范围为-10~10 dB,符号速率100 Baud/s,频率间隔500 Hz,中 频1 kHz,设置不同的调制指数*h*,进行500 次蒙特 卡罗仿真。

由图 4(a)实验结果可以看出,对于 2FSK 信号, 本文算法在抗噪性能上比现有的基于小波变化的算 法表现更加优异,信噪比为-6 dB 时比 morlet 小波 算法正确估计概率提高约 20%。对比图 4(b)实验结 果,由于 4FSK 信号的频率变化更为丰富,在频间



图 4 算法抗噪声性能对比

表1 基于修正语图的 MFSK 信号调制参数估计流程

步骤 1 对过采信号进行 STFT,分别选短时窗和长时窗,得 到 HTRS 语图和 HFRS 语图,对 HTRS 语图列像素进行三次样条 插值,对行像素进行截取,使其与 HFRS 语图维数保持一致;

步骤 2 将 HTRS 语图与 HFRS 语图按照式(4)进行"与"运算,获得高时频分辨率语图;

步骤 3 对修正语图的列(频率轴)取最大值,获得时频变化波 形,对该波形进行直方图统计,对应的极大值的个数及位置即为频 移键控的阶数及相应频点;

步骤 4 对时频变化波形作差分,取模,获得符号跳变时刻脉 冲,对应跳变时刻;

步骤 5 采用 3.3.2 节中动态寻优方式,确定波形变换滤波器, 对差分取模后波形进行波形变换,以凸显定时信息;

步骤 6 对变换后波形进行离散傅里叶变换(DFT),剔除零频 附近干扰,然后进行 3.3.1 节中非线性变换凸显单频线谱,对变换后 的频谱检测正频率部分的离散分量最大值,即对应符号速率位置。

隔固定的情况下,符号间平均差异更大,基于小波 变换的算法针对 4FSK 信号抗噪性能有所提升,但 本文算法在保持稳定的基础上仍优于另外两种算 法,说明了其优势。

5 结束语

本文提出一种基于时频修正与波形变换的 MFSK 信号调制参数估计方案,克服传统语图时频 分辨率矛盾的同时,通过波形变换增强了抗噪声性 能,同时避免了传统方法参数不易选取,估计范围 受限等缺陷,实现了 MFSK 信号载波频率、符号速 率及跳变时刻等参数的盲估计,重点讨论了算法对 符号速率估计的优势所在,同时算法的中间结果可 以为后续的盲解调直接提供基带波形,大大简化了 解调端复杂度。该算法思想在跳频(HF)信号参数估 计^[11],振幅键控(ASK)、相位键控(PSK)等信号的符 号率估计方面有一定借鉴意义。

参考文献

- WANG H, DOBRE O A, LI C, et al. Joint classification and parameter estimation of M-FSK signals for cognitive radio[C]. IEEE International Conference on Communications, Ottawa, Canada, 2012: 1732–1736.
- [2] WANG H, DOBRE O, LI C, et al. Blind cyclostationaritybased symbol period estimation for FSK signals[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(7): 1149–1152. doi: 10. 1109/LCOMM.2015.2436915.

[3] 汪伟,张效义,滕晓云,等.一种MASK信号码元速率估计方法[J].信息工程大学学报,2015,16(1):35-40.doi:10.3969/ j.issn.1671-0673.2015.01.007.

WANG W, ZHANG X Y, TENG X Y, et al. Symbol rate estimation of M-ASK modulated signals[J]. Journal of Information Engineering University, 2015, 16(1): 35–40. doi: 10.3969/j.issn.1671-0673.2015. 01.007.

- [4] WANG Q, HUANG B, and XU Z. Non-data-aided timing recovery algorithm for MIL-STD SOQPSK[J]. *Electronics Letters*, 2015, 51(5): 423–425. doi: 10.1049/el.2014.4016.
- [5] SUDHAN Majhi and TING Seeho. Blind symbol-rate estimation and test bed implementation of linearly modulated signals[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(3): 954–963.
- [6] 纪勇, 徐佩霞. 基于小波变换的数字信号符号率估计[J]. 电路 与系统学报, 2003, 8(1): 12-15.
 JI Yong and XU Peixia. The estimation of symbol rate of digital signals based on wavelet transform[J]. Journal of Circuits and Systems, 2003, 8(1): 12-15.
- [7] GAO Y, WAN Y, LI L, et al. Baud rate estimation of fsk signals based on wavelet transform[C]. Second International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application, Sanya, China, 2012: 181–184.
- [8] 王鹏,李建平.信号测不准原理的量子诠释[J].电子科技大学 学报,2008,37(1):14-16.
 WANG Peng and LI Jianping. Quantum interpretation of signal's uncertainty principle[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2008, 37(1): 14-16.
- [9] 樊昌信,曹丽娜. 通信原理[M]. 第6版,北京:电子工业出版 社,2012:134-140.
 FAN Changxin and CAO Lina. Communication Theories[M].
 Sixth Edition, Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012: 134-140.
- [10] 刘双平,闻翔,金梁. 一种抑制符号速率估计背景色噪声的非 线性滤波算法[J]. 电子学报, 2007, 35(1): 95-99. LIU Shuangping, WEN Xiang, and JIN Liang. A new nonlinear filtering algorithm for colored background self-noise suppressing of symbol rate estimation[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(1): 95-99.
- [11] 王青媛, 张更新, 胡婧, 等. 一种基于时频分析的信号检测算 法[J]. 无线电通信技术, 2016(1): 38-42.
 WANG Qingyuan, ZHANG Gengxin, HU Jing, et al. A signal detection algorithm based on time-frequency analysis[J]. *Radio Communications Technology*, 2016(1): 38-42.
- 邱钊洋: 男, 1991 年生, 博士生, 研究方向为通信信号分析与软 件无线电.
- 黄 焱: 男, 1964年生, 教授, 研究方向为通信信号分析与处理.
- 欧阳喜: 男,1973年生,教授,研究方向为通信信号分析与软件 无线电.