

一种基于相位补偿的匹配变换算法

郭欣, 孙泓波, 顾红, 刘国岁

(南京理工大学电子工程技术研究中心, 江苏南京 210094)

摘要: 本文提出一种基于相位补偿的匹配变换算法, 通过构造匹配函数使信号能量在变换域内达到聚集, 从而有效地检测信号并估计出相应参数. 本文以线性调频信号为例作了具体分析, 并和其它方法进行比较, 说明该方法具有更好的稳健性, 较低的信号检测旁瓣以及良好的信号分辨能力. 针对具有多个参数的复杂信号的检测及估计问题, 本文将匹配变换和遗传算法相结合, 有效估计出信号参数同时提高了运算速度. 仿真结果验证了该算法的有效性.

关键词: 匹配变换; 相位补偿; 线性调频信号; 遗传算法

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 02-0318-03

Matched Transform Algorithm Based on Phase Compensation

GUO Xin, SUN Hong-bo, GU Hong, LIU Guo-sui

(Research Center of Electronic Engineering Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract: In this paper, a new Matched Transform based on phase compensation is proposed. By constructing the matched function, this new transform can make the signal energy concentrate in the transform domain. And as the result, the good performance of signal detection and parameters estimation can be obtained. The chirp signal is analyzed in detail as an example. The comparison with other methods shows that the new algorithm is more robust and can obtain the lower sidelobes and better resolution. In addition, the Matched Transform combined with Genetic Algorithm is also studied to detect and estimate the complex signal. The effective parameters estimation and high convergent speed can be achieved. The simulation results prove the validity of the whole algorithm.

Key words: matched transform; phase compensation; chirp signal; genetic algorithm

1 引言

目前非平稳信号的分析与处理已经成为人们感兴趣的研究课题之一. 联合时频分析^[1]通过将一维时域信号映射到二维时频域中, 从而在二维空间中更为准确地反映信号的特征, 成为非平稳信号分析与处理的一种有效手段. 匹配傅立叶变换^[2]是最近提出的一种分析非平稳信号的新方法, 它是变采样率处理技术^[3]的推广, 通过改变积分路径, 使得当信号参数达到完全匹配时, 可以将其转化为单频信号的 Fourier 变换的形式. 文献[4]针对一类典型的非平稳信号——线性调频信号, 提出了离散 chirp-Fourier 变换的概念. 它能够同时对离散 chirp 信号的中心频率和调制率达到匹配. 但不足的是, 该算法要求总的采样点数为质数, 并且经过采样变换后的信号参数必须是整数, 这些近乎苛刻的约束条件极大地限制了该算法的工程应用. 在文献[4]算法的基础上, 本文提出一种基于相位补偿的匹配变换算法 (Matched Transform based on Phase Compensation: MTPC). 它通过构造匹配函数, 使信号能量在各参数维上聚集, 从而有效地检测信号并估计出相应的参数.

2 基于相位补偿的匹配变换算法

设信号 $s(t) = ae^{j\varphi(t)}$, 其中 a 为常数, 相位项 $\varphi(t)$ 包含 m 个未知参数 $k_{10}, k_{20}, \dots, k_{m0}$. 定义 $s(t)$ 的 MTPC 变换为

$$M(k_1, k_2, \dots, k_m) = \int s(t) e^{-jrt} dt \quad (1)$$

其中 $r(t)$ 具有和信号 $s(t)$ 的相位项相同的形式, k_1, k_2, \dots, k_m 为 $r(t)$ 的各个参数. 显然, 当信号 $s(t)$ 的相位被完全补偿时, $|M(k_1, k_2, \dots, k_m)|$ 达到峰值, 据此就可以检测信号 $s(t)$, 根据峰值点的位置即可估计相应参数 $k_{10}, k_{20}, \dots, k_{m0}$. 相应的离散 MTPC 可以定义为

$$M(k_1, k_2, \dots, k_m) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) e^{-jrn} \quad (2)$$

本质而言, 上面定义的变换是基于相位补偿意义上的一种变换. 它需要依据信号自身特征, 通过构造匹配函数, 使当信号相位达到完全补偿时, 可根据变换域中的峰值检测信号并估计参数. 因此称这种变换为基于相位补偿的匹配变换.

3 基于 MTPC 的线性调频信号检测及估计

以下我们将利用 MTPC 对一类典型的非平稳信号——线性调频信号进行检测和估计. 设

$$s(t) = a \exp[j2(\omega_0 t + \omega_1 t^2)] \quad (3)$$

根据式(1), $s(t)$ 的 MTPC 变换为

$$M(\omega, \omega_1) = \int s(t) \exp[-j2(\omega t + \omega_1 t^2)] dt \quad (4)$$

显然当 $\omega = \omega_0, \omega_1 = \omega_1$ 时, $|M(\omega, \omega_1)|$ 达到最大值, 据此可以检

测信号 $s(t)$ 并直接估计出参数 ω_0, θ_0 . 另外, 对于每一个固定的 ω_0 , 信号 $s(t)$ 的 MIPC 变换可由 FFT 算法快速实现.

特别地, 对于离散形式的线性调频信号, 其离散 MIPC 为
$$M(\omega, \theta) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) W_N^{(n+\frac{1}{2}n^2)\theta}, \quad 0 \leq \omega, \theta \leq N-1 \quad (5)$$

其中 $W_N = \exp(-j2\pi/N)$. 和文献[5]定义的离散 chirp-Fourier 变换不同的是, 上式中所定义的离散 MIPC 变换对线性调频信号的采样点数和信号参数不附带任何约束条件, 因此在工程应用中有着很大的实用价值.

4 具有多个参数的复杂信号的检测及参数估计

一般而言, MIPC 算法需要在各个参数维上进行搜索, 获得信号在变换域中的峰值. 当信号参数较少时, 直接采用穷举法就可以获得较好的性能. 但是当信号参数较多时, 穷举法会极大地延长处理时间. 为了解决这个问题, 我们将 MIPC 与遗传算法相结合, 利用遗传算法[5]的全局优化特性以及解决多参数、非线性问题的良好性能, 在有效估计信号参数的同时大大提高了运算速度.

根据前面的分析, 已知对于离散信号 $s(n)$, 当其相位达到完全补偿, 即 $k_1 = k_{10}, k_2 = k_{20}, \dots, k_m = k_{m0}$ 时, $|M(k_1, k_2, \dots, k_m)|$ 达到最大值. 因此可以将 $|M(k_1, k_2, \dots, k_m)|$ 作为目标函数, 此时对各个参数的估计即为求最优化问题 $\max_{k_1, k_2, \dots, k_m} |M(k_1, k_2, \dots, k_m)|$ 的解. 应用遗传算法进行参数估计的步骤如下:

- (1) 首先在解空间范围内任意产生 P 组群体, 每一组中包含 m 个初始参数 k_1, k_2, \dots, k_m .
- (2) 将每组的参数值代入, 求出目标函数 $|M(k_1, k_2, \dots, k_m)|$, 并采用期望值模型选择机制复制使目标函数值较高的那些组, 淘汰使目标函数值较低的组, 并将选择后的参数进行二进制编码.
- (3) 依据交叉概率配对需要交叉的两组二进制串, 采用一点交叉策略进行交叉.
- (4) 根据变异概率, 对交叉后的二进制串的某一位取反.
- (5) 将每一组二进制串转化为真实的参数, 并在各参数的

邻域范围内利用模拟退火法作局部搜索. 随着退火温度的不断降低, 设置的邻域半径也不断缩小, 最后在遗传算法所得参数的邻域内得到使目标函数达到最大的一组参数并记录.

(6) 将局部搜索所得的结果作为遗传算法下一次进化的初始参数, 转到步骤(2)再次进行全局搜索.

(7) 如果达到遗传算法的中止进化代数, 则种群进化中止, 否则重复步骤(2)~(6).

(8) 根据所记录的使目标函数值达到最大的一组参数计算 $|M(k_1, k_2, \dots, k_m)|$, 若其超过事先定义的门限, 则判定有信号存在, 信号参数即为所记录的参数.

遗传算法具有很强的全局搜索能力但局部搜索能力不足, 通常情况下, 它可以以极快的速度达到最优解的附近, 但是要达到真正的最优解则要花费很长的时间. 因此在上述步骤中, 我们增加了模拟退火的局部搜索过程. 虽然模拟退火本身的运算效率不高, 但由于遗传算法已给出了解的大致范围, 因此极大地加快了搜索速度. 在进行单个信号的检测和估计时, 可以直接利用上述方法. 当有多个信号存在时, 会在 MIPC 变换域中产生多个峰, 此时需要利用遗传算法的小生境技术, 对所有峰的参数进行估计. 限于篇幅, 这里不再详述.

5 仿真实验结果

5.1 线性调频信号的检测及参数估计

以下我们将从稳健性、信号的检测旁瓣以及分辨能力这几方面考察本文提出的 MIPC 算法相对于文献[2]、[4]中提出的匹配傅立叶变换 (MFT) 和离散 chirp-Fourier 变换 (DCFT) 对线性调频信号的检测和估计性能.

(1) 稳健性

DCFT 的检测: 不考虑噪声的影响, 图 1(a) 为对信号 $s(n) = W^{-(40n+30n^2)}$ 作 DCFT 变换的结果. 其中采样总点数 N 为质数 257. 图 1(b) 中信号 $s(n)$ 保持不变, 只是采样点数 $N = 256$, 不再为质数; 图 1(c) 中采样点数 N 仍为 257, 但是信号 $s(n)$ 的离散调制率参数变为 30.03, 不再为整数. 由图 1 可见, 在理想情况下, DCFT 具有十分优越的检测性能. 但当信号采样点数或参数稍微偏离理想情况, DCFT 的性能就急剧下降. 因此, DCFT 很难应用于工程实际.

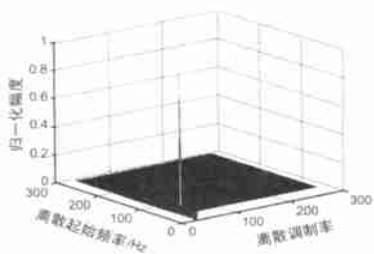


图 1(a) 理想条件下的 DCFT

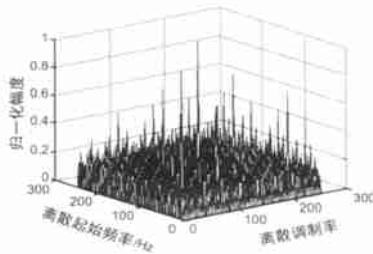


图 1(b) N 为非质数时的 DCFT

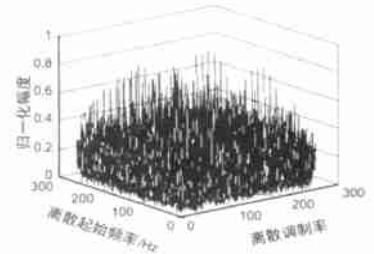


图 1(c) s(n) 的参数为非整数时的 DCFT

与此相对应, 图 2(a) 给出了对信号 $s(n) = W_N^{-(100+50n^2)}$ 作 MIPC 变换的结果, 其中采样点数 N 为 256. 图 2(b) 中信号 $s(n)$ 的离散参数变为 100.2 和 50.2. 由图可见检测性能没有明显下降, 因此 MIPC 算法具有较好的稳健性和实用性.

(2) 信号的检测旁瓣及分辨能力

在文献[2]中, 针对线性调频信号, 作者给出了二步匹配傅立叶变换的定义 (二步 MFT), 形式如下:

$$F(\omega, \theta) = \int f(t) e^{-j2\pi(\omega t + \theta t^2)} dt \quad (6)$$

虽然其形式与本文提出的 MIPC 有些相近, 但它们的本

质是不同的.

考虑和图 2(a) 完全相同的线性调频信号, 经过二步 MFT 变换后, 其检测结果如图 3 所示. 显然, 和图 2(a) 中的 MTPC

变换相比, 二步 MFT 的检测旁瓣较高. 当有多个线性调频信号存在时, 在二步 MFT 中, 弱信号的峰值更容易被强信号的旁瓣所掩盖, 导致信号分辨能力下降.

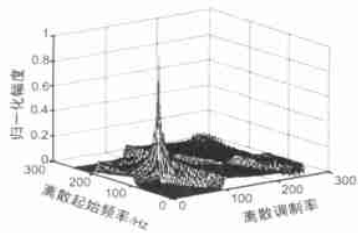


图 2(a) MTPC 的检测结果

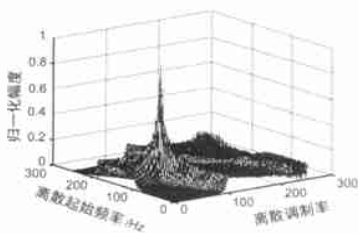


图 2(b) MTPC 的检测结果

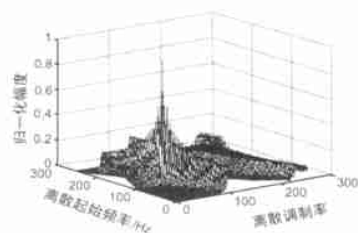


图 3 信号参数与图 2(a) 相同时, 二步 MFT 的检测结果

5.2 复杂信号的检测和参数估计

首先考虑单个信号的情况. 假设需要检测的信号为 5 阶多项式相位信号, 各参数的取值范围如下: $s(t) = \exp[j2(k_1 t + k_2 t^2 + k_3 t^3 + k_4 t^4 + k_5 t^5)]$, $k_1, k_2: 0 \sim 50$, $k_3, k_4, k_5: 0 \sim 30$. 我们将 MTPC 和遗传算法相结合, 采用前文所述步骤对此信号进行估计. 设遗传算法的初始群体大小为 80, 交叉概率和变异概率分别为 0.65 和 0.01, 进化代数设为 8 (加入局部搜索后, 进化代数可以减少许多), 信号 $s(t)$ 的采样点数 $N = 512$. 表 1 给出了信号的真实参数和估计参数. 在赛扬 700 微机上, 上述计算时间为 152 秒, 但若直接采用穷举法搜索, 计算时间大约为 2062 分钟. 显然将 MTPC 和遗传算法相结合, 可以有效地提高信号检测和参数估计的速度.

下面考虑多信号存在的情况. 设需要估计的信号 $s(t) = \sum_{i=0}^I a_i \exp[j2(k_{1i} t + k_{2i} t^2 + k_{3i} t^3 + k_{4i} t^4)]$, 各参数的取值范围为: $k_{1i}, k_{2i}: 0 \sim 100$, $k_{3i}, k_{4i}: 0 \sim 50$. 表 2 给出了有两个信号存在时 (幅度相同), 利用小生境方法进行参数估计所得的结果, 其中小生境采用限定群体中两个个体海明距离的方式进行. 参数估计结果比较令人满意, 且运算速度较快.

表 1 单个信号参数估计结果

	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
信号的真实参数	40	40	20	20	20
估计参数 (无噪声)	40.101	39.686	20.253	19.632	20.421
估计参数 ($SNR = 5\text{dB}$)	39.893	39.788	20.802	18.934	20.534

表 2 两个信号参数估计结果

	信号 1				信号 2			
	k_{11}	k_{21}	k_{31}	k_{41}	k_{12}	k_{22}	k_{32}	k_{42}
信号的真实参数	60	40	10	10	20	80	40	30
估计参数 (无噪声)	59.925	39.941	10.592	9.497	20.490	78.699	41.106	39.721

6 结论

本文提出了一种基于相位补偿的匹配变换算法 (MTPC). 相对于单纯的时域和频域来说, MTPC 能将一些在低维空间中难以区分的信号加以分离, 同时提高信号的抗噪性能. 仿真试验表明 MTPC 具有较好的稳健性、较低检测旁瓣. 另外针对

具有多个参数的复杂信号的检测及估计, 本文将 MTPC 和遗传算法相结合, 利用遗传算法全局优化特性在有效估计出信号参数的同时大大提高了运算速度.

参考文献:

[1] L. Cohen. Time-frequency distributions: a review [J]. Proc. of IEEE, 1989, 77(7): 941 - 981.

[2] 王盛利, 李士国, 倪晋麟, 张光义. 一种新的变换——匹配傅立叶变换 [J]. 电子学报, 2001, 29(3): 403 - 405.

[3] Wang Shengli, Zhu Li. Changeable sampling processing for chirp signals in the SAR [A]. Proc. of the Fourth International Conference on Signal Processing [C]. Beijing: IEEE Press, 1998. 1473 - 1476.

[4] Xiang-Gen Xia. Discrete chirp-Fourier transform and its application to chirp rate estimation [J]. IEEE Trans. Signal Processing, 2000, 48(11): 3122 - 3133.

[5] 陈国良, 王煦法, 庄镇泉, 王东生. 遗传算法及其应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1999.

作者简介:



郭欣宇, 1977 年 4 月生于江苏淮安, 1999 年获南京理工大学电子工程专业学士学位, 同年免试直接攻读通讯与信息系统学科博士学位, 现为南京理工大学电子工程与光电技术学院博士研究生, 主要研究方向为天波超视距雷达信号处理和海杂波环境中的弱目标检测等. email: rceet@mail.njust.deu.cn.



郭泓波, 男, 1975 年 4 月生于河南郑州, 1997 年获南京理工大学电子工程专业学士学位, 2002 年获南京理工大学通信与信息系统专业博士学位, 主要研究方向为雷达成像、空时二维信号处理、机载雷达运动目标检测和非平稳信号处理等.