LFM 信号, 某个特定角度的 FRFT 对其有最好的聚集性. 利用这一性质, 对于接收到的多分量 LFM 信号, 可以用 FRFT 对其各分量进行参数估计. 本文采取了滑动窗取最值的方法(如图 1 所示), 逐一获得每个峰值点的坐标和峰值大小. 搜索峰值并估计接收到的 LFM 信号分量各参数的具体算法如下

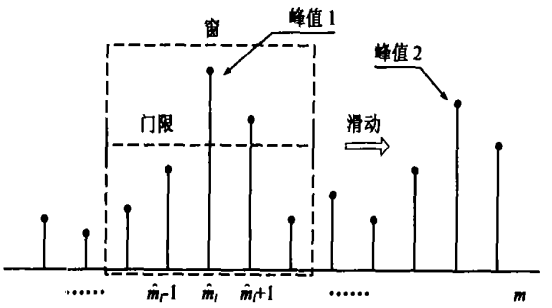


图 1 峰值搜索过程

对接收信号做阶数为 $_1 = 2\mathrm{arccot} - _1$ % 的 DFRFT 并取绝对值

2 将得到的序列加窗 窗宽与采样间隔有关 并在窗内加一门限值 门限选取和白噪声功率有关

将窗从序列左端向右端滑动 考察在窗的中心的点如果该点的值大于给定门限 并且大于窗中其它点的值 则认为该点为峰值点 记下该点的坐标和对应的值0否则继续滑动窗

$ 根据峰值点的坐标和值 用如下公式估计峰值点对应各LFM 信号分量的中心频率、初相和幅值等参数

$$1^1 = 1 \cdot \cos _1 \qquad 22$$

$$1^1 = \arg\left[\frac{3_1 1}{+_1 \cdot e^{\cdot 1^2 \omega t _1 \%}}\right] \qquad 23$$

$$1^1 = \frac{|3_1 1|}{4 \cdot |+_1|} \qquad 24$$

其中 4 为分数阶傅立叶域采样点数 1 和 $3_1 1$ 为峰值点坐标和值

对接收信号做另一阶数 $_2 = 2\mathrm{arccot} - _2$ % 的 DFRFT 重复 2 ~ $ 的过程 得到具有另一调频率的各 LFM 信号分量的参数估计

这样 由各 LFM 信号分量的参数估计值 代入式 18 ~ 21 便可以得到信道每条多径的多普勒频移、时延、衰落相位和幅度的估计

估计性能分析

观察式 18 还可以发现 适当调整发射多分量 LFM 信号的调频率的相互关系 可以使信道多普勒频移的估计方差减小 由式 18 如果 1^1 和 1^2 的估计相互独立 并且有相同的估计方差 $^2_{1^1} = ^2_{1^2} = ^2_1$ 该假设在通常情况下都是成立的 那么信道多普勒频移 $1_\$$ 的估计方差 $^2_{1_\$}$ 为

$$^2_{1_\$} = \frac{^2_2 + ^2_1}{2 - _1^2} ^2_1 \qquad 25$$

上式求对某一调频率的偏导数可得

$$\frac{^2_{1_\$}}{1} = \frac{2 _2 _2 + _1}{2 - _1^3} ^2_1 \qquad 26$$

显然 在 1^1 和 1^2 的估计方法一定的情况下 若要使估计方差 $^2_{1_\$}$ 最小 需满足 $\frac{^2_{1_\$}}{1} = 0$ 即取 $_2 = - _1 =$ 这时 $1_\$$ 的估计方差为

$$^2_{1_\$} = \frac{1}{2} ^2_1 \qquad 27$$

同理 时延 1 和衰落相位1 及幅度1 的估计方差在此时分别为

$$1^2_1 = \frac{1}{2^2} ^2_1 \qquad 28$$

$$1^2_1 = \frac{1}{2} ^2_1 \qquad 29$$

$$^2_1 = \frac{1}{2} ^2_{1^1} \qquad 30$$

进一步 由已知的 LFM 信号参数估计的克拉美罗界 (Cram r Rao lower bound , CRLB) [12 13] 可以得到 $_2 = - _1$ 时信道各参数估计的 CRLB

$$\mathrm{CRLB}_{1_\$} = \frac{1}{2}\mathrm{CRLB}_1 = \frac{3 \cdot 2\%^2}{4^{2 \cdot ' 3 \cdot} \mathrm{SNR}} \qquad 31$$

$$\mathrm{CRLB}_1 = \frac{1}{2^2}\mathrm{CRLB}_1 = \frac{3 \cdot 2\%^2}{^{2 \cdot} 4^{2 \cdot ' 3 \cdot} \mathrm{SNR}} \qquad 32$$

$$\mathrm{CRLB}_1 = \frac{1}{2}\mathrm{CRLB}_1 = \frac{1}{4' \cdot \mathrm{SNR}} \qquad 33$$

$$\mathrm{CRLB}_1 = \frac{^2}{4'} \qquad 34$$

其中 是采样间隔 ' = 2) + 1 为采样点数 SNR 为第 条路径的输入信噪比

仿真实例

为了验证算法的有效性 本文给出了算法的 Monte Carlo 仿真结果 仿真中 假设信道由 4 条多径组成 每条多径复振幅的幅值 为独立同分布的高斯随机变量 相位 为 0 2 内均匀分布的随机变量 即符合瑞利信道模型 信道的最大多径时延和最大多普勒频移分别为 40 s 和 50Hz 发射端发射的用于探测信道的多分量 LFM 信号调频率为 ±2MHz/ s 接收端的采样点数为 501 点 由于假设有 4 条多径存在 因此可以取各条多径某个参数估计的均方误差的平均值 作为评价该参数估计的标准 即信道各参数的平均参数估计误差定义为

$$\overline{\mathrm{MSE}_1} = \frac{1}{/} \sum_{,1}^{/} \mathrm{MSE}_1 \qquad 35$$

其中 1 代表$1_\$$、1、1 或1 等估计参数

图 2、图 3 给出了输入信噪比从- 10dB 到 22dB 变化时, 运行 500 次Monte Carlo 仿真的信道多普勒频移和时延估计的平均误差结果 从图中可以看出 在输入信噪比较大的情况下 多普勒频移和时延的平均估计误差和其各自的 CRLB 十分接近 图 4 和图 5 则分别给出了同样情况下信道衰落幅值和相位的平均估计误差性能曲线 由图中可以看出 衰落幅值和相位的平均估计误差也十分接近其 CRLB 从而说明了估计算法的有效性

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

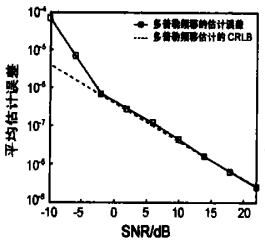


图 2 不同输入信噪比下多普勒频移参数估计的误差

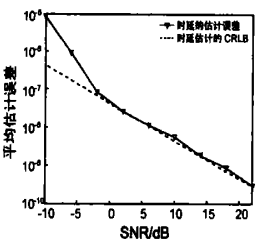


图 3 不同输入信噪比下时延参数估计的误差

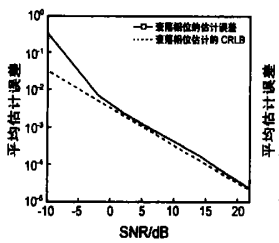


图 4 不同输入信噪比下衰落相位参数估计的误差

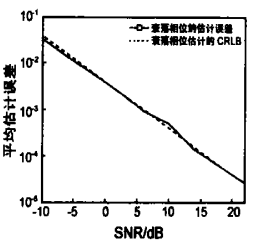


图 5 不同输入信噪比下衰落幅值参数估计的误差

结论

本文根据时变信道的参数模型,提出了一种发射多分量线性调频信号用于探测信道,并在接收端应用分数阶傅立叶变换对接收信号进行参数估计,从而获取信道参数的方法.在此基础上,还进一步给出了减小估计方差的方法,并且同参数估计 CRLB 进行了比较.理论分析和仿真表明,该方法具有运算量小,估计精度高的优点.

参考文献:

[1] B Porat, et al. Blind equalization of digital communication channels using higher order statistics[J]. IEEE Trans, 1991, 39(2): 522- 526.

[2] E Moulines, et al. Subspace methods for the blind identification of multichannel FIR filters[J]. IEEE Trans, 1995, 43(2): 516- 525.

[3] Y (G.) Li, L J Cimini Jr, N R Sollenberger. Robust channel estimation for OFDM systems with rapid dispersive fading channels[J]. IEEE Trans, 1998, 46(7): 902- 914.

[4] Q Dai, E Shwedyk. Detection of bandlimited signals over frequency selective Rayleigh fading channels[J]. IEEE Trans, 1994, 42(2/3/4): 941- 950.

[5] Ki Young Han, et al. Channel estimation for OFDM with fast fading channels by modified Kalman filter[J]. IEEE Trans, 2004, 50(2): 443- 449.

[6] V Namias. The fractional order Fourier transform and its application to quantum mechanics[J]. J of Appl Math, 1980, 25: 241- 265.

[7] L B Almeida. The fractional Fourier transform and time frequency representations[J]. IEEE Trans, 1994, 42(11): 3084- 3091.

[8] H M Ozaktas, et al. Digital computation of the fractional Fourier transform[J]. IEEE Trans, 1996, 44(9): 2141- 2150.

[9] Soo Chang Pei, Jian Jiun Ding. Closed Form Discrete Fractional and Affine Fourier Transforms[J]. IEEE Trans, 2000, 48(5): 1338- 1353.

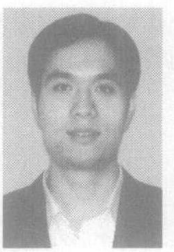
[10] P A Bello. Characterization of randomly time variant linear channels[J]. IEEE Trans, 1963, 11: 360- 393.

[11] G B Giannakis, et al. Signal Processing Advances in Wireless and Mobile Communications Trends in Single and Multi User Systems[M]. NJ: Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, 2001.

[12] B Ristic, B Boashash. Comments on The Cramer Rao Lower Bounds for Signals with Constant Amplitude and Polynomial Phase[J]. IEEE Trans, 1998, 46(6): 1708- 1709.

[13] S Peleg, B Porat. The Cramer Rao lower bounds for signals with constant amplitude and polynomial phase[J]. IEEE Trans, 1991, 39(5): 749- 752.

作者简介:



陈恩庆 男,1977 年 8 月生于天津市,2000 年毕业于郑州大学电子系通信工程专业,获学士学位,2003 年获郑州大学信息工程学院通信与信息系硕士学位,现为北京理工大学博士研究生,目前主要从事通信信号处理,时频分析理论,以及 3G、OFDM、WLAN 等系统关键技术的研究.
E mail: enqingchen@tom.com.

陶 然 男,1964 年 11 月出生于安徽南陵,1993 年于哈尔滨工业大学获博士学位,1996 年于北京理工大学电子学与通信学科博士后出站,2001 年 3 月~2002 年 4 月在美国安娜堡密西根大学访问研究一年,现任北京理工大学电子工程系副主任、信息安全与对抗研究中心主任、信息安全与对抗学科首席教授、博士生导师,获“高校青年教师奖”,“中国兵工青年科技奖”,另获部级二等奖 2 项、部级三等奖 4 项、海军优秀教材一等奖 1 项.已申报国防发明专利 5 项,被 3 大检索收录论文 90 余篇,在 IEEE Trans、Fuzzy Sets and Systems、中国科学(中、英文版)、电子学报(中、英文版)、兵工学报(中、英文版)发表论文 40 余篇,以第一作者出版著作、教材 4 部,完成和承担多项国家自然科学基金重点项目、部委重点项目和产业化项目,研究方向:信息安全与对抗、通信与信息系统.兼任中国雷达行业协会副理事长,中国电子学会青年工作委员会副主任,中国兵工学会信息安全与对抗专业委员会总干事、《兵工学报》常务编委,总装备部综合电子战专家组特邀专家,北京市科学技术奖评审委员会评委,IEEE 高级会员.
E mail: rantao@bit.edu.cn.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net