

# 利用Teager-Kaiser算子的多径信号抑制

周 非<sup>1</sup>, 黄顺吉<sup>2</sup>

(1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 南岸区 400039; 2. 电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

**【摘要】**为了解决多径干扰对无线定位精度的影响,该文在传统的窄带相关技术的基础上,利用TK算子对其进行改进。改进后的技术在不过多地增加计算负担的情况下,不仅保持了窄带相关技术对于长时延多径信号抑制的功能,而且还改善了其对短时延多径信号抑制效果不佳的缺陷。仿真结果证明,该算法对于无线信道的多径信号抑制起到了一定的改善作用,从而提高了无线定位精度。所以,该研究对于无线定位技术的工程应用和理论研究具有一定的参考价值。

**关键词** 多径; 窄带相关; TK算子; 无线定位

中图分类号 TN911

文献标识码 A

## Multi-Path Mitigation Based on Teager-Kaiser Operator

ZHOU Fei<sup>1</sup>, HUANG Shun-ji<sup>2</sup>

(1. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications Nan'an Chongqing 400039;

2. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** To solve the accuracy degradation of wireless location that results from multi-path fading, the paper improves the traditional narrow correlation technology using Teager-Kaiser (TK) operator. The improved technology not only retains the merit of narrow correlator, but also mitigates the short-time delay multi-path fading better. The simulation result shows that the technology proposed in this paper can mitigate the multi-path fading better and improve the accuracy of location.

**Key words** multi-path; narrow correlation; Teager-Kaiser operator; wireless location

随着无线通信技术的快速发展和E911条例的颁布,无线定位技术已经成为研究应用热点。目前,基于TOA/TDOA的无线定位技术是最具研究潜力的。然而,任何定位技术都面临着一个共有的问题:无线传播环境中的多径信号的干扰,它可直接导致定位精度的恶化。所以,许多抑制多径的技术被提出。它们大体分为两种:(1)改进跟踪环的鉴别器,使其能够鉴别更小的多径误差信号,最成功的技术为窄带相关器<sup>[1-2]</sup>。(2)依靠对含有多径成分的信号进行直达信号的参数估计,包括幅度、时延和相位(如MEDLL技术),然而它们都有一个共同的缺陷,无法对相对于直达信号的短时延多径干扰进行有效的抑制。这些对于无线定位技术而言无疑是极大的问题。针对CDMA系统,所谓的短时延是小于一个码元的时延,而一个码元导致的定位误差为100 m左右,这对于定位技术来说是不能容忍的。所以对于无线定位,无线传输环境中的多径信号抑制是非常重要的。本文主要是在窄带相关技术的基础上,利

用Teager-Kaiser(TK)算子对其进行改进,从而达到对长短时延的多径信号进行有效抑制的目的。

### 1 Teager-Kaiser算子

非线性二次TK算子本来是应用在语音信号处理中进行能量测定的,其输出中包含了幅度信息和频率信息。它本身结构简单、有效,又能够很好地跟踪信号的瞬时变化,这为多径信号的鉴别提供了很好的理论基础<sup>[3]</sup>。

若 $x(t)$ 是复信号,则连续的TK能量算子的表达式为:

$$\Psi_c(t) = \frac{d^2x(t)}{dt^2} \frac{d^2x^*(t)}{dt^2} - \frac{1}{2} \left[ \frac{d^2x(t)}{dt^2} x^*(t) + x(t) \frac{d^2x^*(t)}{dt^2} \right] \quad (1)$$

由式(1)可得到TK算子的离散形式:

$$\Psi_d[x(n)] = x(n-1)x^*(n-1) - \frac{1}{2} [x(n-2)x^*(n) + x(n)x^*(n-2)] \quad (2)$$

## 2 窄带相关技术

窄带相关技术是以延迟锁相环<sup>[4]</sup>为基础的。设接收信号为:

$$x(t) = \sum_{i=0}^M a_i(t)d(t)\text{PN}[t - \tau_i(t)]\cos[\omega_c t + \theta_i(t)] \quad (3)$$

式中  $\text{PN}(t)$ 、 $d(t)$  分别为伪随机码和数据信息;  $i=0$  代表直达信号, 其他  $M$  个为多径信号;  $a_i$ 、 $\tau_i$  和  $\theta_i$  分别表示幅度、时延和相位延迟。经本地参考信号调制后的早发码和迟发码信号分别为:

$$x_L\left(T + \frac{d}{2}\right) = \text{PN}\left(t - \hat{\tau}_0 + \frac{d}{2}\right)\cos[(\omega_c - \omega_{\text{IF}})t] \quad (4)$$

$$x_E\left(T - \frac{d}{2}\right) = \text{PN}\left(t - \hat{\tau}_0 - \frac{d}{2}\right)\cos[(\omega_c - \omega_{\text{IF}})t] \quad (5)$$

式中  $\omega_{\text{IF}}$  为中频角频率。输入信号与早发码和迟发码信号分别进行相关并经过中频带通滤波器滤波后得到:

$$R_E(\hat{\tau}_0) = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^M a_i d(t) R\left(\hat{\tau}_0 - \tau_i + \frac{d}{2}\right)\cos(\omega_{\text{IF}}t + \theta_i) \quad (6)$$

$$R_L(\hat{\tau}_0) = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^M a_i d(t) R\left(\hat{\tau}_0 - \tau_i - \frac{d}{2}\right)\cos(\omega_{\text{IF}}t + \theta_i) \quad (7)$$

将上面两个信号分别平方, 用低频滤波器滤除  $\omega = 2\omega_{\text{IF}}$  的倍频分量后相减, 得到鉴相器的输出  $S$  控制曲线为<sup>[5-7]</sup>:

$$\begin{aligned} S(\zeta) = & \frac{1}{8} \sum_{i=0}^M a_i^2 \left[ R\left(\zeta - \tau_{di} + \frac{d}{2}\right) \right]^2 + \\ & \frac{1}{4} \sum_{i < j} a_i a_j R\left(\zeta - \tau_{di} + \frac{d}{2}\right) R\left(\zeta - \tau_{dj} + \frac{d}{2}\right) \cos(\theta_j - \theta_i) - \\ & \frac{1}{8} \sum_{i=0}^M a_i^2 \left[ R\left(\zeta - \tau_{di} - \frac{d}{2}\right) \right]^2 + \\ & \frac{1}{4} \sum_{i < j} a_i a_j R\left(\zeta - \tau_{di} - \frac{d}{2}\right) R\left(\zeta - \tau_{dj} - \frac{d}{2}\right) \cos(\theta_j - \theta_i) \end{aligned} \quad (8)$$

考虑只有一个多径的情况, PN码的自相关函数为:

$$R_{\text{PN}}(\zeta) = \begin{cases} 0 & |\zeta| > T_c \\ 1 - \frac{1}{T_c} |\zeta| & |\zeta| < T_c \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} S(\zeta) = & \frac{1}{8} \left\{ \left[ \sum_{i=0}^1 a_i \cos(\theta_i - \theta_0) R_{\text{PN}}\left(\zeta - \tau_{di} + \frac{d}{2}\right) \right]^2 + \right. \\ & \left. \left[ \sum_{i=0}^1 a_i \cos(\theta_i - \theta_0) R_{\text{PN}}\left(\zeta - \tau_{di} - \frac{d}{2}\right) \right]^2 \right\} \times \\ & \left\{ \left[ \sum_{i=0}^1 a_i \cos(\theta_i - \theta_0) R_{\text{PN}}\left(\zeta - \tau_{di} + \frac{d}{2}\right) \right] - \right. \end{aligned}$$

$$\left. \left[ \sum_{i=0}^1 a_i \cos(\theta_i - \theta_0) R_{\text{PN}}\left(\zeta - \tau_{di} - \frac{d}{2}\right) \right] \right\} \quad (10)$$

由于延时锁定环跟踪的是  $S$  控制曲线在斜率为负的线性区域的零点, 式(10)中的第一个花括弧内因子在线性区域内恒大于零, 考虑第二个花括弧内因子, 即  $S(\zeta_0) = 0$ , 通过简单的计算可得:

$$\zeta_0 = \begin{cases} \frac{\tau_{d1} a_1 \cos(\theta_1 - \hat{\theta}_0)}{a_0 + a_1 \cos(\theta_1 - \hat{\theta}_0)} & 0 < \tau_{d1} \leq \tau_p \\ \frac{a_1 d \cos(\theta_1 - \hat{\theta}_0)}{2a_0} & \tau_p < \tau_{d1} \leq \tau_q \\ \frac{a_1 \cos(\theta_1 - \hat{\theta}_0)}{2a_0 - a_1 \cos(\theta_1 - \hat{\theta}_0)} \left( T_c + \frac{d}{2} - \tau_{d1} \right) & \tau_q < \tau_{d1} \leq T_c + \frac{d}{2} \\ 0 & \tau_{d1} > T_c + \frac{d}{2} \end{cases} \quad (11)$$

式中  $\tau_p = \frac{[a_0 + a_1 \cos(\theta_1 - \hat{\theta}_0)]d}{2a_0}$ ;  $\tau_q = T_c - \frac{d}{2} + \frac{a_1 d \cos(\theta_1 - \hat{\theta}_0)}{2a_0}$ 。

$\zeta_0$  就是多径效应造成的时延误差, 当  $\theta_1 - \hat{\theta}_0 = 0$  或  $\pi$  时,  $\zeta_0$  达到最大值  $\zeta_{0m} = \pm a_1 d / 2a_0$ 。在有多径信号存在的情况下, 难以获得式(11)中的多径误差解析表达式, 但只要多径信号的幅度比较小, 仍可类似得到多径误差的最大值为:

$$\zeta_{0m} = (d/2a_0) \max \left[ \sum a_i \cos(\theta_i - \hat{\theta}_0) \right]$$

由式(11)可知, 窄带相关器能够有效地鉴别多径信号, 然而也仅仅局限于长时延的多径信号。对于短时延的多径信号, 由于分辨力较低, 并不具备多径抑制的能力。因此, 本文利用TK算子对窄带相关器进行改进, 而且并不过多地增加计算负担, 适合于工程实现<sup>[8]</sup>。

## 3 基于TK算子的窄带相关改进型技术方法

TK算子对于信号的瞬时变化非常敏感, 其中就包含了信号的幅值变化。同时, 多径信号的存在往往能够使信号的幅值发生变化, 但这种变化大都干扰信号所“淹没”, 很难被检测。本文给出一种新的方法来检测多径信号, 它主要是利用了TK算子对信号幅值变化敏感的特性。

假设  $C(t)$  是遍历的平稳信号, 相对于有限的时间  $T_d$  内, 式(12)理论上是成立的:

$$R_{T_d}(\tau) = \begin{cases} \frac{1}{T_d} \int_{T_d} C(t)C(t-\tau)dt & |\tau| < T_d \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

式(12)的期望值为:

$$E(R_{T_d}) = R(\tau) \left(1 - \frac{|\tau|}{T_d}\right) = R(\tau) \Lambda(\tau, T_d) \quad (13)$$

式中  $\Lambda(\tau, T_d)$  为三角方程。将  $\Lambda(t, T_d)$  代入TK算子  $\Psi(\bullet)$  可以得到:

$$\Psi_c[\Lambda(t)] = \frac{\prod(t, T_c)}{T_c^2} + \frac{\Lambda(t, T_c)\delta(t)}{T_c} \quad (14)$$

$$\prod(t, T_c) = \begin{cases} 1 & |t| \leq T_c \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

式中  $\delta(t)$  为单位脉冲函数。分析式(14), 从它的第二项可以看出, 仅仅在  $t$  时刻, TK算子的输出极为“突出”, 其他时刻的输出都非常的微小。换句话说, 它的分辨力是非常好的。

理论上, 多径信号的相关方程可用式(16)表示:

$$R(t) = \sum_{i=0}^M a_i \Lambda(t - t_i, T_c) e^{j\theta_i} \quad (16)$$

代入TK算子, 可以得到:

$$\begin{aligned} \Psi_c[R(t)] = & \frac{1}{T_c^2} \left[ \left( \sum_{i=0}^M a_i \text{sign}(t - t_i) \prod(t - t_i, T_c) \cos \theta_i \right)^2 + \right. \\ & \left. \left( \sum_{i=0}^M a_i \text{sign}(t - t_i) \prod(t - t_i, T_c) \sin \theta_i \right)^2 \right] + \\ & \frac{1}{2T_c} \left[ R^*(t) \left( \sum_{i=0}^M a_i \delta(t - t_i) e^{j\theta_i} \right) + \right. \\ & \left. R(t) \left( \sum_{i=0}^M a_i \delta(t - t_i) e^{-j\theta_i} \right) \right] \end{aligned} \quad (17)$$

式中  $\text{sign}(t)$  为符号函数。从式(16)可以看到, 其各个时延的多径信号都能够很明显的被鉴别出来, 从而达到抑制多径的作用。

由于TK算子对于短时延的多径信号的敏感, 所以可以利用它的特性对传统的窄带相关进行改进, 从而达到很好地抑制多径的效果。图1是在传统的窄带相关的基础上, 利用TK算子进行改进, 可以看出, 所有的改进仅仅限于算法上, 不存在硬件上的改动, 所以是非常易于实现的。

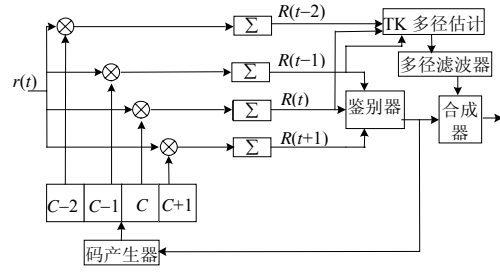


图1 基于TK算子的窄带相关改进型

## 4 仿真及测试结果

首先, 验证TK算子对于多径信号的抑制作用。根据式(16)设计含多个路径的多径信号  $S$ , 除直达信号外, 另含4路多径信号, 时延分别为1、2、4、8(采样间隔为单位), 其  $a_i$  分别为0.2、0.5、0.3和0.9,  $\theta_i$  值依次为  $0.3\pi$ 、 $0.5\pi$ 、 $0.7\pi$  和  $0.23\pi$ , 如图2所示。

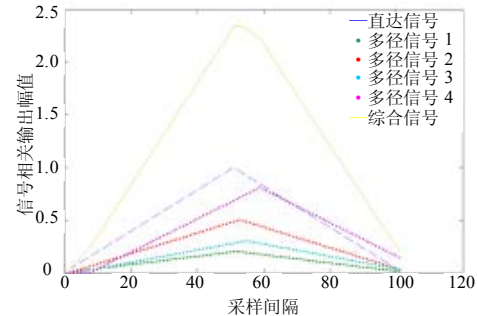


图2 多径仿真信号

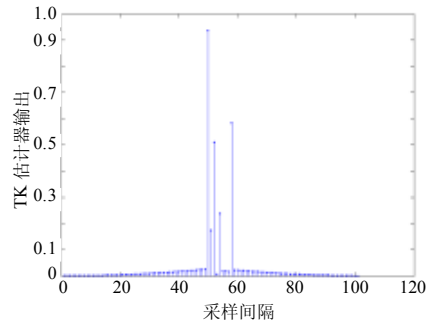


图3 仿真多径信号TK估计结果

图3所示是多径信号通过式(2)的TK多径估计器所得到的估计结果, 从图中可以看出, TK算子对于信号的幅值瞬时变化非常敏感, 没有变化的则被很好地抑制。图4中所采用的数据是CDMA- IS95的接入信道的数据, 信号速率为1.228 8Mc/s, 双通道。本文采用了4倍采样, 将信号与同步的PN序列直接相关可得到如图4所示的结果。

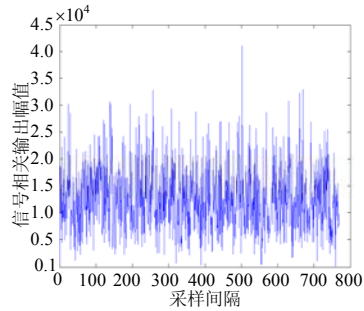


图4 信号直接相关结果

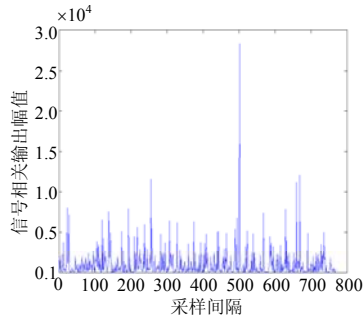


图5 实际信号TK估计结果

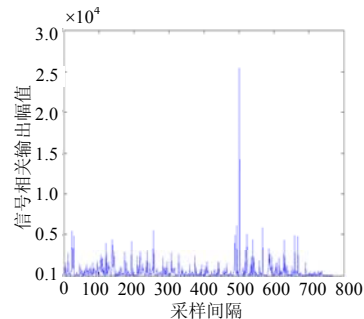


图6 改进型窄带相关多径估计

从结果可以看出, 多径信号对信号检测的影响很严重, 很容易造成信号检测错误。图5则是实际信号通过TK算子多径估计器的输出, 相比之下, 很明显该方法对直达信号和多径信号的检测效果要好得多, 噪声信号得到了很好的抑制。图6则是利用图1所示方法, 将TK算子和窄带相关技术进行结合, 对

实际信号进行处理。可见, 将窄带相关技术和TK算子相结合能够有效地抑制长时延的多径信号, 同时并不降低小区域的短时延多径信号的检测。

## 5 结束语

综上所述, 利用TK算子改进窄带相关技术能够很好地抑制无线信道中的长短时延多径, 但前提是能够以更高的采样率对数据进行采样。所以, 该技术对定位精度的提高起到了很好的促进作用。

## 参考文献

- [1] HAMIL A R, LOHAN S, RENFORS M. Nonlinear operator for multipath channel estimation in GPS receivers[C]//In the 7th IEEE International Conference on Electronic, Circuits & systems. Jounie Lebanon: IEEE Press, 2000: 352-356.
- [2] DIERENDONCK A. J. VAN, System AJ, Theory an performace of narrow correlator spacing in a GPS receiver[C]//Proceeding of ION GPS-92. Los Altos: IEEE Press, 1992: 216-222.
- [3] KAISER J F. On teager's energy algorithm and its generalization to continuous signals[C]//Proc, 4th IEEE Digital Signal Processing Symposium(Norsig'2000). Kolmarden: IEEE Press, 2000: 125-128.
- [4] VAKMAN D. On the analytic signal, the Teager-Kaiser energy algorithm, and other methods for defining amplitude and frequency[J]. IEEE Trans, 1996, 44: 791-797.
- [5] LAXTON M C, DEVILBISS S L. GPS multipath mitigation during code tracking[C]//Processing of the American Control Conference Albuquerque: [s. n. ], 1997: 1429-1433.
- [6] HAN, PIZOS C. GPS network design and error mitigation for real time continuous array monitoring Systems. Proc. ION. [C]//GPS-96,9th Int. Tech Meeting of The Satellite Division of The U .S. Institute of Navigation. Kansas City: [s. n. ] 1996; 17-20; 182-183.
- [7] PARKINSON B W. Global positioning system: the theory and application[M].[s. l. ] american Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 2001: 1054-1160.
- [8] DAIL W, WANGJ L, RIZOS C, et al. Pseudo-satellite applications in deformation monitoring[J]. GPS Solutions, 2002, 5(3): 80-87.

编辑 张俊