

基于稳健性时间延迟估计的激光测距算法

刘文红

(上海电机学院电子信息学院, 上海 201306)

摘要 实际中激光测距回波信号常常含有脉冲性噪声,且具有较低的信噪比,这使得传统的激光测距算法性能衰退,甚至无法使用。提出了一种稳健性时间延迟估计算法用于激光调制信号测距,该算法用 Alpha 稳定分布建模信号噪声,首先采用分数低阶统计量——分数低阶协方差函数抑制脉冲噪声提高信噪比,再利用相关函数求取回波信号与发射信号之间的时间延迟信息,从而得到距离信息。理论分析和计算机仿真实验结果表明,该算法既可以用于回波信号含有高斯噪声的情况,也可以用于含有脉冲性噪声的情况,具有较宽的使用范围和较好的实际应用价值。

关键词 信号处理;激光测距;稳健性时间延迟估计;Alpha 稳定分布;分数低阶统计量

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201239.s208005

Laser Ranging Algorithm Based on Robust Time Delay Estimation

Liu Wenhong

(School of Electronic and Information Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China)

Abstract The laser ranging echo signals often contain impulsive noises, and have low signal-to-noise ratio, which make the traditional laser ranging algorithm performance decline, even if useless. This paper addresses a robust time delay estimation algorithm to laser modulation signal ranging. Signals with noises are modeled by using Alpha stable distribution. First, impulsive noises are suppressed and signal-to-noise ratio is improved by fractional lower-order covariance function. Then, the time delay information between echo signals and transmitting signals is obtained by using correlation function, so as to obtain the information of distance. Theoretical analysis and computer simulation results show that, the algorithm can be used for both echo signal containing Gaussian noises and impulsive noises. It has wide range of application and good practical value.

Key words signal processing; laser ranging; robust time delay estimation; Alpha stable distribution; fractional lower-order statistics

OCIS codes

1 引言

利用激光来进行距离的测量是激光的重要实际应用之一,激光雷达就是基于激光来探测和测距的。激光测距的信号可以是脉冲状态,也可以工作在连续波状态,通常前者被称为脉冲激光测距,后者被称为相位激光测距。脉冲激光测距是由激光发射机向目标发射一个脉冲激光信号,该信号反射后被接收

机接收,通过测量系统的计数器来测量发射激光脉冲与接收回波脉冲之间的时间间隔,从而确定目标距离。激光发射角小,能量在空间相对集中;激光脉冲持续时间很短,能量在时间上相对集中,瞬时功率很大,因此,较适用于远程测距,如人造卫星测距、地球到月球的距离测量等^[2~5]。对于精度要求很高的测距,多采用相位激光测距,它是用连续调制的激光

收稿日期: 2012-05-20; **收到修改稿日期:** 2012-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(61172108),中国博士后科学基金(20070420602),上海市教育委员会科研创新项目(12AZ10,12AZ05),上海电机学院重点培育项目(10C104),上海电机学院重点学科项目(10XKF01)和上海电机学院科研启动项目(10C403)资助课题。

作者简介: 刘文红(1967—),女,博士,教授,主要从事非高斯信号处理、时间延迟估计理论技术及应用等方面的研究。

E-mail: liuwenhong@sdju.edu.cn(通信联系人)

光束照射被测目标,通过测量光束往返中产生的相位差,得到时间差信息,再换算出被测目标的距离^[6,7]。

激光测距的核心问题就是如何得到回波信号与发射信号之间的时间差,脉冲法是直接计时、相位法是通过相位差得到时间差。脉冲激光测距的精度主要依赖于计时测量系统的精度,尽管通过滤波、小波变换等信号处理的手段可以提高回波脉冲检测能力^[2~4],但测量精度的提高仍受制于计时测量系统的精度。相位激光测距提高精度的方法^[6,7],常常对回波信号的信噪比要求较高,若回波信号淹没在噪声中,则较难得到相位延迟信息。本文对连续调制激光信号,采用时间延迟估计技术直接得到信噪比较低的回波信号相对于发射信号的时间延迟。考虑到实际中激光测距回波信号常常含有脉冲性噪声,会使传统的基于高斯噪声模型的算法性能衰退,甚至无法使用。本文基于一种稳健的时间延迟估计算法进行激光测距,该算法用 Alpha 稳定分布建模信号噪声,采用分数低阶协方差函数(FLOC)及相关函数求取回波信号与发射信号之间的时间延迟。理论分析和计算机仿真实验表明,该算法不仅可以用于含有高斯噪声的回波情况,也可以用于含有脉冲性噪声的回波环境,尤其对于低信噪比的回波信号效果优良,有较好的实际应用价值。

2 时延估计技术及 Alpha 分布理论

时间延迟是指同源信号之间由于传输距离不同和/或传输信道差异而引起的到达时间差。时间延迟估计(TDE)是利用参数估计及信号处理的理论和方法,对上述时间延迟进行估计,并由此进一步确定其他有关参数,例如,信源目标的距离。时间延迟估计理论和技术在许多领域得到应用^[8,9]。噪声是进行 TDE 时需要考虑的主要问题之一。在传统的 TDE 算法中,例如相关法和最小均方误差 TDE 方法等,常常对噪声采用高斯模型的假设,基于二阶统计量进行时间延迟的估计。在高斯噪声环境下,这些算法可以有效地工作,然而,在脉冲噪声环境下,这些算法的性能显著退化,甚至不能正常工作^[10]。在许多实际的 TDE 应用中,如无线电射频信号源的监测定位等,脉冲性噪声是常常会遇到的,Alpha 稳定分布模型是一种比高斯模型更合适的脉冲噪声模型。

Alpha 稳定分布的概念最先是由 Levy 于 1925 年在研究广义中心极限定理时给出的^[11],其概率密度函数(PDF)存在且连续,但除了很少的几个之外,

没有解析表达式。因而,通常用其特征函数 $\phi(t) = \exp\{j\mu t - \gamma |t|^\alpha [1 + j\beta \text{sign}(t)\omega(t,\alpha)]\}$ 来描述,其中 $\omega(t,\alpha) = \tan(\alpha\pi/2), \alpha \neq 1; \omega(t,\alpha) = (2/\pi) \times \lg |t|, \alpha = 1. \alpha (0 < \alpha \leq 2)$ 为特征指数,决定 PDF 拖尾的厚度, α 值越小,PDF 的拖尾越厚; $\beta(-1 < \beta < 1)$ 为对称参数,确定 PDF 的偏斜程度,当 $\beta = 0$ 时,称为对称 Alpha 稳定分布,记为 $S_\alpha S; \gamma (\gamma > 0)$ 为分散系数,度量样本的分散程度; $\mu (-\infty < \mu < +\infty)$ 为位置参数,对于 $S_\alpha S$ 分布, μ 表示分布的均值或中值。Alpha 稳定分布特征函数的 4 个参数中,最重要的是特征指数 α ,其值越小,统计分布上远离均值或中值的样本数越多,其时域波形的脉冲性越显著。当 $\alpha = 2$ 时,Alpha 稳定分布与高斯分布完全相同,因此,认为高斯分布是 Alpha 稳定分布的一个特例;当 $0 < \alpha < 2$ 时,称为分数低阶 Alpha 稳定分布(FLOA),FLOA 不具有二阶及以上的统计量,只存在小于 α 的分数低阶统计量(FLOS),所以 FLOS 及其相应的优化准则成为 FLOA 条件下信号分析处理的重要工具。因此,研究噪声基于 Alpha 稳定分布模型的新型 TDE 方法比噪声基于高斯模型的传统 TDE 算法具有更好的适用性^[11]。

3 稳健性时间延迟估计激光测距算法

在研究相位激光测距的 TDE 算法时,针对较低信噪比和脉冲噪声的条件,依据 FLOS 提出了基于分数低阶协方差序列的稳健性时延估计算法,称为分数低阶协方差-相关算法。

3.1 信号噪声模型

采用相位激光测距的调制信号,含有噪声的发射信号和回波信号模型为

$$\begin{cases} x_1(n) = s(n) + v_1(n) \\ x_2(n) = gs(n-D) + v_2(n) \end{cases}, \quad (1)$$

式中 n 为离散时间变量, $x_1(n)$ 表示发射的带噪激光调制信号、 $s(n)$ 表示纯净发射的激光调制信号, $v_2(n)$ 表示回波信号中的噪声,用高斯分布来描述; $x_2(n)$ 表示接收的带噪回波信号, $s(n-D)$ 表示纯净的回波信号, D 是需要估计的回波延迟, $v_2(n)$ 表示回波信号中的噪声,用 Alpha 稳定分布来描述。 g 为衰减系数通常取 1。

3.2 提出的分数低阶协方差-相关时延估计算法

两个联合 $S_\alpha S$ 随机过程 $x_1(n)$ 和 $x_2(n)$ 的互协方差函数定义^[8]为

$$\begin{aligned} R_c(m) &= E[x_1(n)x_2(n+m)^{(\rho-1)}] = \\ &E\{x_1(n)x_2(n+m)^{(\rho-1)} \text{sign}[x_2(n+m)]\}, \end{aligned}$$

$$1 \leq p < \alpha. \quad (2)$$

当信号 $x_1(n)$ 、 $x_2(n)$ 为白随机过程且 $x_2(n) = x_1(n - D)$ 时，有如下关系^[8]：

$$E[\hat{R}_c(m)] = C_c \delta(m + D), \quad (3)$$

式中 C_c 是一个非负常数。

提出的分数低阶协方差-相关算法估计激光调制信号的时延，首先，计算发射信号 $x_1(n)$ 的自分数低阶协方差函数 $R_{c11}(m) = E\{x_1(n)[x_1(n + m)]\}^{(p-1)}$ 、发射信号 $x_1(n)$ 和回波信号 $x_2(n)$ 的互分数低阶协方差函数 $R_{c12}(m) = E\{x_1(n)[x_2(n + m)]\}^{(p-1)}$ ，这样可以降低脉冲噪声的影响；接着，计算 $R_{c11}(m)$ 信号和 $R_{c12}(m)$ 信号的互相关函数 $R(\tau) = E\{R_{c11}(m)R_{c12}(m + \tau)\}$ 。激光调制回波信号时延的估计值由互相关函数 $R(\tau)$ 的峰值位置得到

$$\hat{D} = \arg \max_{\tau} R(\tau). \quad (4)$$

3.3 分数低阶协方差序列保留原信号时延信息的分析

互分数低阶协方差 $[x_1(n), x_2(n)]_{p-1}$ 、自分数低阶协方差 $[x_1(n), x_1(n)]_{p-1}$ 可以写为

$$\begin{aligned} [x_1(n), x_2(n)]_{p-1} &= \\ [s(n) + v_1(n), s(n - D) + v_2(n)]_{p-1} &= \\ [s(n), s(n - D)]_{p-1} + [s(n), v_1(n)]_{p-1} + \\ [v_1(n), s(n - D)]_{p-1} + [v_1(n), v_2(n)]_{p-1}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} [x_1(n), x_1(n)]_{p-1} &= \\ [s(n) + v_1(n), s(n) + v_1(n)]_{p-1} &= \\ [s(n), s(n)]_{p-1} + [s(n), v_1(n)]_{p-1} + \\ [v_1(n), s(n)]_{p-1} + [v_1(n), v_1(n)]_{p-1}. \end{aligned} \quad (6)$$

通常信号 $s(n)$ ，噪声 $v_1(n)$ 、 $v_2(n)$ 是统计独立的，(5)、(6)式可简化为

$$[x_1(n), x_2(n)]_{p-1} = [s(n), s(n - D)]_{p-1}, \quad (7)$$

$$[x_1(n), x_1(n)]_{p-1} = [s(n), s(n)]_{p-1} + C_c \delta(n), \quad (8)$$

因此， $x_1(n)$ 与 $x_2(n)$ 的互分数低阶协方差 $R_{c12}(m)$ 、 $x_1(n)$ 的自分数低阶协方差 $R_{c11}(m)$ 分别为

$$\begin{aligned} R_{c12}(m) &= E\{x_1(n)[x_2(n + m)]\}^{(p-1)} = \\ E\{s(n)[s(n - D + m)]\}^{(p-1)} &= R_{\text{css}}(m + D), \quad (9) \\ R_{c11}(m) &= E\{x_1(n)[x_1(n + m)]\}^{(p-1)} = \\ E\{s(n)[s(n + m)]\}^{(p-1)} + \\ v_1(n)[v_1(n + m)]\}^{(p-1)} &= R_{\text{css}}(m) + C_c \delta(m). \end{aligned} \quad (10)$$

由(9)、(10)式可看出 $R_{c12}(m)$ 、 $R_{c11}(m)$ 是两个相关的序列，序列 $R_{c11}(m)$ 延迟序列 $R_{c12}(m)$ 的时间为 D ，这正是回波信号 $x_2(n)$ 延迟发射信号 $x_1(n)$ 的

时间，因此，分数低阶协方差序列去除了观测序列中的脉冲噪声，保留了原信号的时延信息。

4 计算机仿真结果

利用计算机仿真来验证分数低阶协方差-相关算法对激光调制信号的时延估计性能的有效性，并与相关、分数低阶协方差算法的估计性能进行比较，说明该算法的先进性。根据(1)式构造信号和噪声：激光调制信号 $s(n)$ 为正弦信号；发送信号 $x_1(n)$ 通常信噪比较高且噪声特性符合高斯分布，下面的仿真实验中设定 $s(n)$ 与高斯噪声的最大化信噪比 (R_{MSN}) 为 10 dB^[11]；回波信号 $x_2(n)$ 由 $s(n)$ 延迟 $D = 20$ Ts 采样间隔得到的信号 $s(n - D)$ 叠加特征指数 $\alpha = 1.6$ 的 Alpha 稳定分布噪声构成。图 1 给出了理想的激光调制测距信号时域波形。图 2 给出了实际中含有噪声的激光调制测距信号的时域波形。

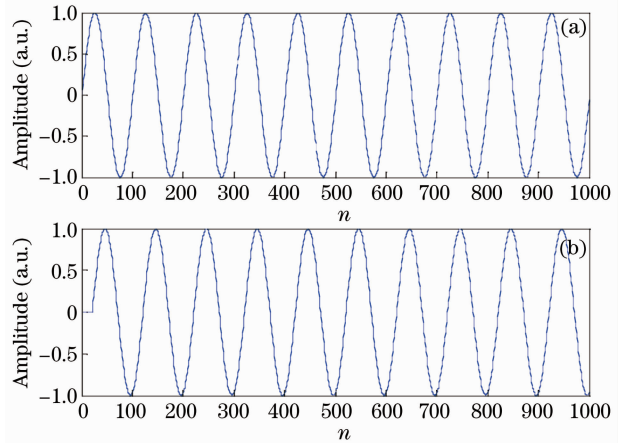


图 1 理想的激光调制测距信号。(a)纯净发射信号；(b)时延 $D = 20$ Ts 的纯净回波信号

Fig. 1 Ideal laser modulation ranging signals. (a) Pure transmitted signal; (b) pure received signal with time delay $D = 20$ Ts

下面，在回波信号噪声符合高斯分布的条件下，比较相关、分数低阶协方差以及分数低阶协方差-相关 3 种算法对激光调制测距信号的估计性能。 R_{MSN} 以 1 dB 的间隔从 -10 dB 变化到 10 dB。三种算法的估计性能用估计的均方根误差来衡量。图 3 是三种算法估计的均方根误差与 R_{MSN} 的关系。下面的仿真结果是对 50 次独立实验的统计。

由图 3 可以看出，分数低阶协方差-相关算法在 $R_{\text{MSN}} = -10$ dB 时，估计的均方根误差仍然接近于零，而其他两种算法在 $R_{\text{MSN}} = -5$ dB 时估计性能明显衰退。

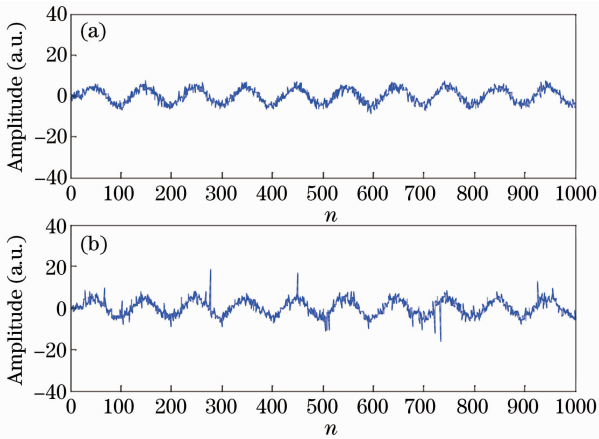


图 2 $R_{MSN} = 10$ dB 时激光调制测距信号。(a)含有高斯噪声的发射信号;(b)时延 $D = 20$ Ts 含有 $S_{\alpha}S(\alpha = 1.6)$ 噪声的回波信号

Fig. 2 Laser modulation ranging signals when $R_{MSN} = 10$ dB. (a) Transmitted signal with Gaussian noise; (b) received signal with $S_{\alpha}S(\alpha = 1.6)$ noise when time delay $D = 20$ Ts

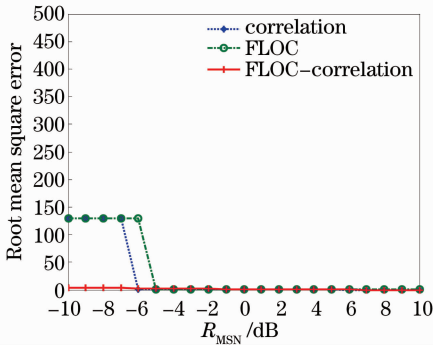


图 3 高斯噪声环境中相关、分数低阶协方差以及分数低阶协方差-相关三种算法在不同 R_{MSN} 下估计的均方根误差

Fig. 3 Estimated root mean square error of correlation, FLOC and FLOC-correlation algorithms under different R_{MSN} with Gaussian noises

接着,在回波信号含有 $\alpha = 1.6$ 的脉冲噪声条件下,再比较相关、分数低阶协方差以及分数低阶协方差-相关三种算法对激光调制测距信号的估计性能。图 4 是三种算法估计的均方根误差与 R_{MSN} 的关系。下面的仿真结果是对 50 次独立实验的统计。

由图 4 可以看出,分数低阶协方差-相关算法在 $R_{MSN} = -10$ dB 时,估计的均方根误差仍然接近于零,而分数低阶协方差算法在 $R_{MSN} = -7$ dB 以上时,估计性能优良,相关算法在 $R_{MSN} = 0$ dB 以上时,估计的均方根误差才接近于零。

通过上述实验,可以知道分数低阶协方差-相关算法的估计性能优于其他两种算法,尤其在脉冲噪

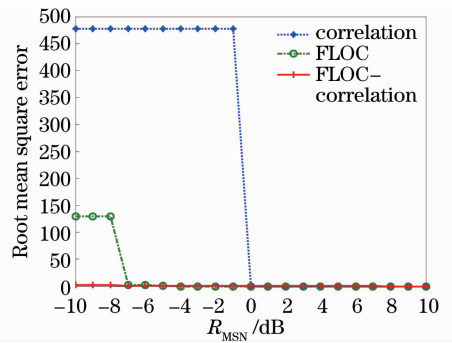


图 4 $S_{\alpha}S(\alpha = 1.6)$ 环境中相关、分数低阶协方差以及分数低阶协方差-相关三种算法在不同 R_{MSN} 下估计的均方根误差

Fig. 4 Estimated root mean square error of correlation, FLOC and FLOC-correlation algorithms under different R_{MSN} with $S_{\alpha}S(\alpha = 1.6)$ noises

声和较低信噪比的条件下。

5 结 论

实际的激光调制回波信号中常常含有脉冲性噪声,基于分数低阶统计量提出的分数低阶协方差-相关时间延迟估计算法,不但对脉冲噪声具有稳健性,而且也适合回波信号信噪比较低的情况。将分数低阶协方差-相关算法用于激光测距时,通过计算激光调制信号分数低阶协方差序列的互相关函数,并检测其峰值位置就可以得到回波信号相对于发送信号的时延值。计算机仿真实验的结果验证了在脉冲噪声和较低信噪比的情况下,分数低阶协方差-相关算法比相关、分数低阶协方差算法具有更好的估计性能。

参 考 文 献

- Zhang Guizhong, Shi Shunxiang, Liu Jifang. *Eletro-Optic Technology and Application*[M]. Beijing: Science Press, 2010. 233~286
张贵忠,石顺祥,刘继芳. 光电子技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010. 233~286
- Jiang Haijiao, Lai Jiancheng, Wang Chunyong *et al.*. Research on ranging property of laser radar and its range accuracy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0514001
姜海娇, 来建成, 王春勇等. 激光雷达的测距特性及其测距精度研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(5): 0514001
- Ma Pengge, Liu Yi, Qi Lin *et al.*. Wavelet filter algorithm for echo signal of pulsed lidar at low SNR[J]. *Electronics Optics & Control*, 2011, **18**(4): 26~30
马鹏阁, 柳毅, 齐林等. 低信噪比下脉冲激光雷达回波信号小波域滤波算法[J]. 光电与控制, 2011, **18**(4): 26~30
- Zhang Yikun, Ma Xiaochang, Hua Dengxin *et al.*. The Mie scattering lidar return signal denoising research based on EMD-DISPO[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, **31**(10): 2996~3000
张毅坤, 麻晓畅, 华灯鑫等. 基于 EMD-DISPO 的 Mie 散射激光雷达回波信号去噪方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2011,

- 31(10): 2996~3000
- 5 Zhu Fu, Lin Yanan. Method to improve accuracy of pulse laser ranging[J]. *Eletro-Optic Technology Application*, 2011, **26**(2): 42~45
朱 福, 林一楠. 一种提高脉冲激光测距精度的方法[J]. 光电技术应用, 2011, **33**(3): 6~10
- 6 Jia Fangxiu, Ding Zhenliang, Yuan Feng *et al.*. Real time laser range finding system for moving target based on all phase Fourier transform spectrum analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2928~2934
贾方秀, 丁振良, 袁 峰 等. 基于全相位快速傅里叶变换谱分析的激光动态目标实时测距系统[J]. 光学学报, 2010, **30**(10): 2928~2934
- 7 Liu Miao, Yang Xueyou, Liu Changjie. Phase shift laser range finding with a novel quadrature modulation method and system implementation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0208004
刘 邈, 杨学友, 刘常杰. 正交混频相位式激光测距方法与系统实现[J]. 中国激光, 2012, **39**(2): 0208004
- 8 Liu Wenhong. Robust Time Delay Estimation and Application in Evoked Potential Latency Delay Detection[D]. Shanghai: Fudan University, 2009
刘文红. 韧性时延估计及其在诱发电位潜伏期延长检测中的应用[D]. 上海: 复旦大学, 2009
- 9 Xu Wei, Chen Qian, Gu Guohua *et al.*. Laser fuze long-distance ranging based on cross-correlation time delay estimation [J]. *Journal of Detection & Control*, 2011, **33**(3): 6~10
徐 伟, 陈 钱, 顾国华 等. 基于互相关时延估计的激光引信远距离定距[J]. 探测与控制学报, 2011, **33**(3): 6~10
- 10 Tang Hong, Li Ting, Qiu Tianshuang *et al.*. Constant modulus algorithm for cochannel signal separation in non-Gaussian impulsive noise environments [J]. *Wireless Personal Communications*, 2010, **54**(4): 591~604
- 11 Nikias C. L., Shao M.. *Signal Processing with Alpha-Stable Distributions*[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1995

栏目编辑: 宋梅梅