

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0132-05

一种光子相关器动态范围自适应调整方法与实现

成艳亭 申 晋 刘 伟 王雅静

(山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049)

摘要 目前广泛应用的光子相关光谱(PCS)颗粒测量系统中,光子相关器动态范围的设置需要与实际待测颗粒的光强自相关函数曲线衰减区间相匹配,这样,相关器才能给出具有最佳分辨率的自相关函数曲线。然而,在实际测量过程中,待测颗粒体系的粒度分布范围通常是未知的,因此需要对参数进行多次修正才能得到最佳分辨率效果。对此,提出一种可根据被测颗粒体系的粒度分布范围变化,自适应修正测量参数进行光子相关器动态范围调整的方法。该方法通过初始采样时间的选择和通道采样时间的再分配,实现测量过程中的相关器动态范围调整,使其与待测颗粒体系的光强自相关函数曲线衰减区间相匹配,从而保证在任意颗粒系的测量中都能得到分辨率最佳的自相关函数曲线。

关键词 测量;光子相关器;光强自相关函数;动态范围

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200835s2.0132

Adaptive Adjust for Dynamic Range of Photon Correlator

Cheng Yanting Shen Jin Liu Wei Wang Yajing

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China)

Abstract In photon correlation spectroscopy particle sizing techniques, only when the setting of the dynamic range of photon correlator matches the decay range of target scattered light intensity autocorrelation function can the autocorrelation function produced by the photon correlator reach optimum resolution. In practice, parameter modification is indispensable in repetitive measurements. To solve the problem, an adaptive adjust method for dynamic range of photon correlator was presented in this paper. Through the selection of original sample time and redistribution of correlator channel sample times, photon correlator dynamic range can be adaptively adjusted to match the decay range of autocorrelation function in measurements of random particle systems.

Key words measurement; photon correlator; scattered light intensity autocorrelation function; dynamic range

1 引 言

光子相关光谱(PCS)颗粒测量技术始于 20 世纪 60 年代^[1],现已广泛应用于医学、材料学、化学以及生物化学等领域^[2~7]。光子相关器作为对信号进行高速实时相关运算的电路,是 PCS 颗粒测量系统的核心装置。相关函数曲线的动态范围与时间分辨率是衡量相关器性能的重要参数,在相关器通道资源一定的情况下,对于线性相关结构,相关函数的动态范围与时间分辨率矛盾,即动态范围的增

大会导致分辨率的降低,而提高分辨率又会导致动态范围的减小^[8]。1984 年 Klaus Schaztel 提出多 tau 相关结构,使有限硬件资源条件下动态范围与时间分辨率的兼顾成为可能^[9,10]。由于不同颗粒系散射光强自相关函数衰减特性的多样性,对相关器动态范围有不同的要求,因此,在测量时,需要根据被测对象的不同设定通道数量、延迟时间等参数以实现相关器动态范围的调整。本文提出通过初始采样时间自动选择与通道采样时间的动态分配机制相结

基金项目: 国家自然科学基金(60877050)资助课题。

作者简介: 成艳亭(1983—),女,硕士研究生,主要从事光电精密测试技术方面的研究。E-mail: shenjin@sdut.edu.cn

导师简介: 申 晋(1962—),男,教授,主要从事光电精密测试、微弱信号检测和动态光散射测量技术等方面的研究。
E-mail: shenjin@sdut.edu.cn

合的相关器动态范围自适应调节方法，实现光子相关器动态范围与待测颗粒系的自适应动态匹配。

2 光子相关理论与相关器结构

在 PCS 颗粒测量技术中，相关函数曲线衰减特性用以表征散射光波动特征，获取高分辨率的相关函数曲线是实现准确测量的基础。对于单分散颗粒系，其散射光强自相关函数为单指数衰减曲线

$$G(\tau) = A[1 + \beta \exp(-2\Gamma\tau)] \quad (1)$$

其中 β 为实验常数， A 为基线， Γ 为衰减线宽，包含颗粒信息。

多分散颗粒系散射光强自相关函数是单指数加权之和

$$G(\tau) = \sum_{i=1}^M G(\Gamma_i)[A_i + \beta \exp(-2\Gamma_i\tau)] \quad (2)$$

在激光源照射下，待测样品颗粒溶液的散射光信号经光电探测器转换成等幅的标准 TTL 电平脉冲信号，单位时间内的脉冲数量表征颗粒散射光的强度。光子相关器对该信号进行实时自相关运算，得到(1)式或(2)式表示的光强自相关函数曲线，然后采用合适的粒度反演算法，通过对自相关函数曲线的反演，得到颗粒粒径信息。由于颗粒粒径反演需要求解第一类 Fredholm 积分方程，该方程的求解属于病态问题，其对相关函数曲线质量有严格的要求，因此光子相关器成为决定 PCS 颗粒测量系统性能的关键装置。(1)式和(2)式均为单调衰减的曲线，为充分反映其衰减特性，一方面，要求相关器有足够大的动态范围，保证相关函数曲线衰减区间在相关通道内的实现，另一方面应提高相关函数曲线分辨率。多 tau 光子相关器结构如图 1 所示。

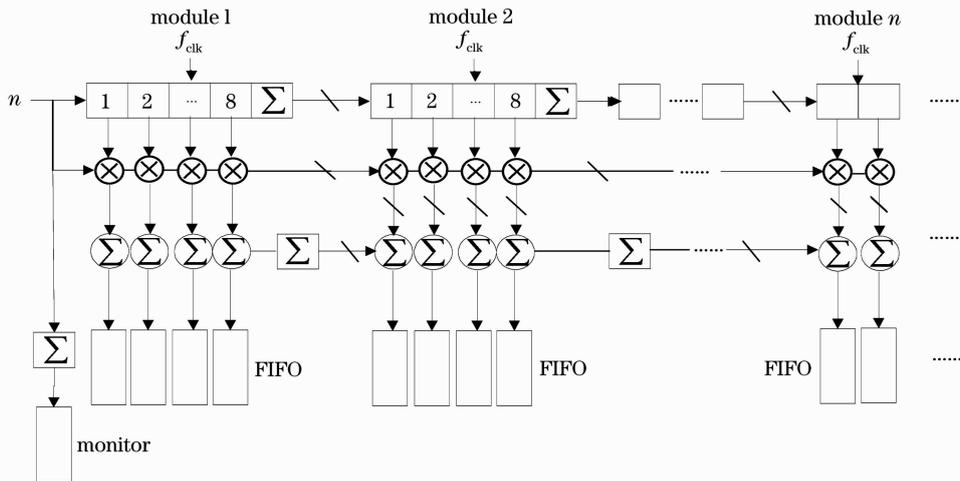


图 1 多 tau 光子相关器结构图

Fig. 1 Architecture of multiple tau correlator

在 PCS 颗粒测量系统中，对应不同的待测颗粒体系，其散射光强自相关函数有不同的衰减特征。理想的光子相关器应能动态调整其动态范围，调整各通道延时时间在延时时间域内的分布，以使相关函数曲线分辨率在任意颗粒系测量中均达到最佳。

3 相关器动态范围的自适应调整

相关器动态范围的调整包括初始采样时间选择和通道采样时间分配，通过计算机软件控制配合相关器的参数自调整来实现，光子相关器动态范围调整系统结构框图如图 2 所示。

初始采样时间的选择使相关器动态范围与待测相关函数曲线衰减区间粗略匹配，而通道采样时间

的再分配保证了动态范围与曲线衰减区间的精确匹配。在第一阶段，相关器对散射光强自相关函数进行短时间的预估算，计算机读取最大延时通道累加值并判断相关器动态范围与相关函数曲线衰减区间大小，并进行比较，根据比较结果向相关器发出控制信号，使初始采样时间加倍，该过程被循环执行，直到寻找到最佳初始采样时间。第二阶段首先由计算机计算出各通道最佳采样时间，然后根据计算结果发出控制信号触发相关器不同线性相关通道组间的采样时间加倍/保持模块，使相关器当前信号和延时信号在进入下一个线性相关模块前完成两个采样周期的累加，从而使采样时间加倍，或者直接进入下一个模块，保持采样时间不变。

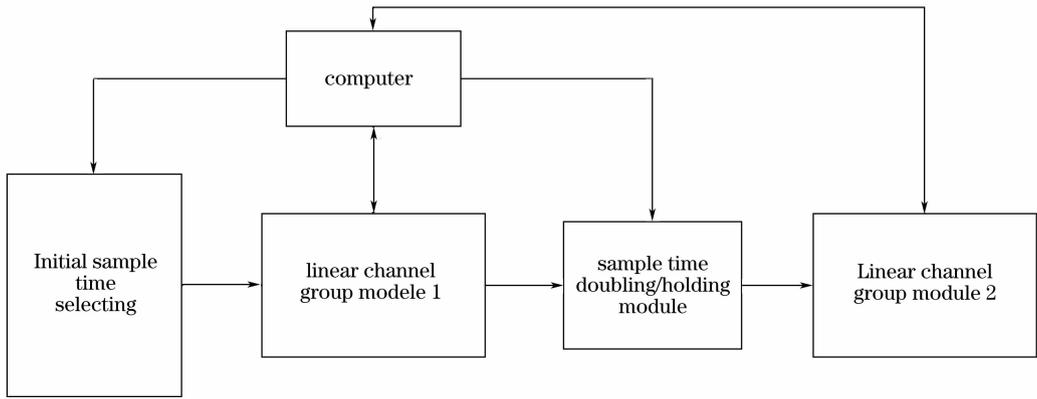


图 2 相关器动态范围调整系统结构框图

Fig. 2 Schematic diagram of dynamic range adaptive adjust system of correlator

3.1 初始采样时间选择

相关函数曲线衰减范围指相关函数曲线衰减到基线所对应的延迟时间域。随着相关函数曲线衰减，延迟信号与即时信号间相关性减小，曲线衰减趋于基线时有

$$\langle n(t)n(t+\tau) \rangle \approx \langle n(t) \rangle^2 \quad (3)$$

在初始化阶段，计算机复位信号送入相关器初始采样时间控制模块，使相关器处于最小动态范围，并在该动态范围下对散射光强自相关函数进行短时间预估算。记

$$|\langle n(t)n(t+\tau) \rangle - \langle n(t) \rangle^2| = \varphi \quad (4)$$

预估算结束后，计算机读取相关器最大延时通道累加值，并计算(4)式。根据计算结果的不同，计算机产生不同控制信号相关器在控制下做出不同的硬件动作，讨论为

1) $\varphi \leq \Phi$

相关器动态范围小于等于相关函数衰减区间，计算机向相关器发出倍频信号，相关器初始采样时间加倍，使动态范围增大。相关器各通道累加寄存器清零，并在新的初始采样时间 $T_1 = 2T_0$ 下重新估算相关函数曲线，估算结束后计算机再次读取最大延时通道累加值，并计算(4)式，计算结果记为 φ_1 ，若 $\varphi_1 > \Phi$ ，说明初始采样时间加倍后相关器通道延时时间域大于相关函数曲线衰减区间，则该采样时间 $T_1 = 2T_0$ 即为最佳初始采样时间。若 $\varphi_1 \leq \Phi$ ，则继续将初始采样时间加倍，直到 i 次循环后计算得到 φ_i 满足 $\varphi_i > \Phi$ ，则采样时间 $T_i = 2^i T_0$ 为最佳初始采样时间。

2) $\varphi > \Phi$

相关器动态范围大于相关函数衰减区间，此时

相关器已处于最小动态范围，该动态范围最接近待测相关函数曲线衰减区间， T_0 可被认为最佳初始采样时间。初始采样时间选择流程如图 3 所示。

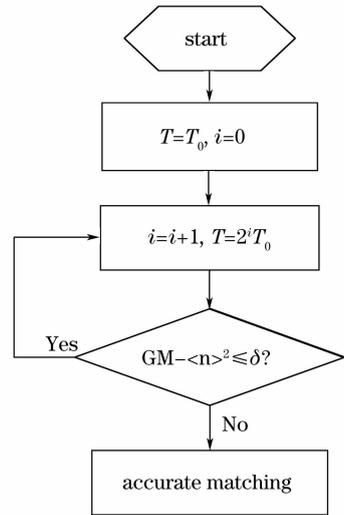


图 3 初始采样时间选择流程

Fig. 3 Flowchart of initial sample time selecting

3.2 通道采样时间分配

初始采样时间的选择使相关器动态范围与相关函数曲线衰减区间粗略匹配，而其精确匹配最终通过通道采样时间的再分配完成。通道采样时间再分配的依据是最佳初始采样时间下待测相关函数曲线衰减区间的精确判定，根据判定结果由计算机计算出通道采样时间，并向相关器各线性相关通道组采样控制模块发出控制信号启动通道采样时间的再分配。设相关器通道数量为 M ，以 p_0 为步长，取第 $M - p_0$ 通道累加值，并计算(4)式，结果记为 $\varphi(M - p_0)$ ，若 $\varphi(M - p) < \Phi$ ，再取第 $M - 2p$ 通道累加值并计算 $\varphi(M - 2p_0)$ ，以此类推，直到得到 $\varphi(M - kp_0) \geq \Phi$ ，其中 k 为大于等于 1 的整数。则可判断相

关函数衰减区间下限在第 $M - kp_0$ 通道与第 $M - (k - 1)p_0$ 通道延迟时间之间。此时，若要进一步精确确定衰减区间，可将步长减小为 p_1 ，从第 $M - (k - 1)p_0$ 通道开始重新进行比较判断，依据情况，可进行多个步长下的比较，直到找到足够精确的相关函数衰减下限。最佳初始采样时间下相关函数衰减区间判定流程如图 4 所示。

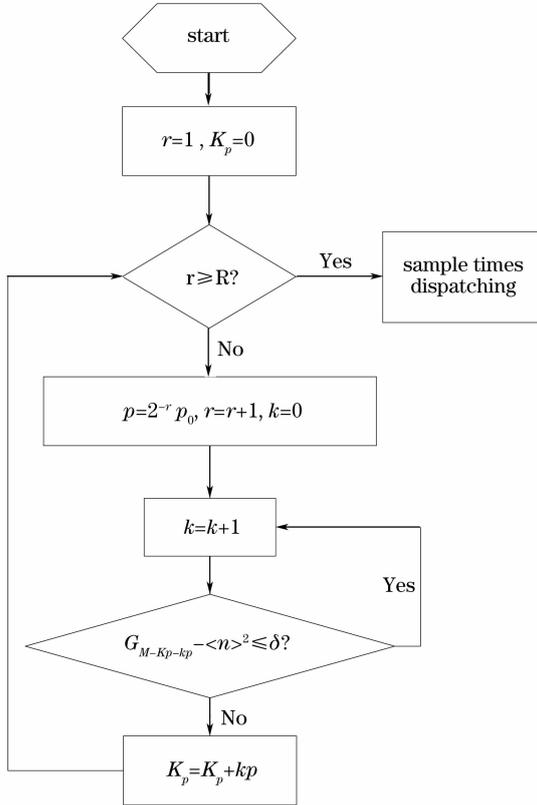


图 4 最佳初始采样时间下相关函数衰减区间判定流程
Fig. 4 flowchart of delay time judge under optimum initial sample time

计算机完成对相关函数衰减区间的判断后，按照图 5 所示流程计算通道采样时间。相关器通道采样时间的再分配通过不同线性相关通道组间的采样时间加倍/保持模块来完成。计算机按照通道采样时间计算结果，产生控制信号，通过采样时间加倍/保持模块内部多通道选择开关，使信号通过累加器完成采样时间的加倍，或者不通过累加器直接进入下一线性相关通道组，保持采样时间不变。通过计算机与相关器间的串行通讯，依次发出控制信号控制不同线性相关通道组间的采样时间加倍/保持模块，顺序完成所有通道采样时间的分配。设多 τ 相关器共分 Y 个线性相关通道组，每组 m 个通道。令 $i = \text{int}(j/m)$ ，即第 j 通道属于第 i 线性相关模块，通道采样时间分配最终满足关系为

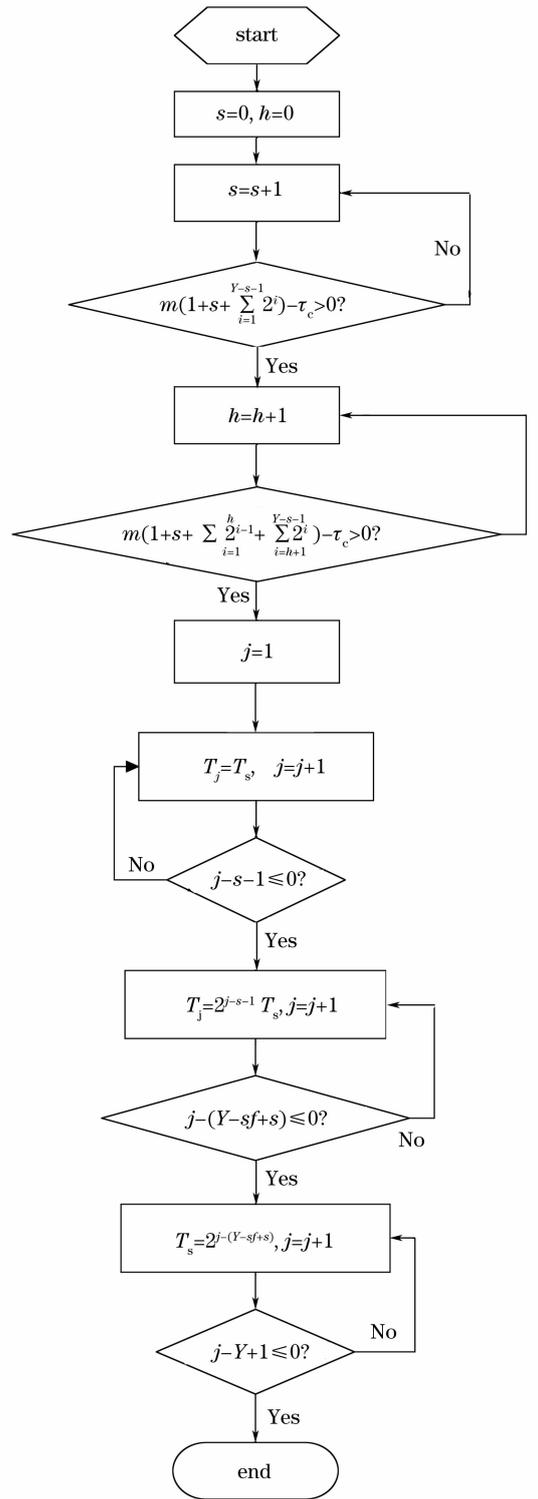


图 5 通道采样时间分配流程图
Fig. 5 Flowchart of channel sample times dispatching

$$T_j = \begin{cases} T_s, & 1 \leq j \leq ms \\ 2^i T_s, & ms + 1 \leq j \leq m(Y - f) \\ 2^{i+1} T_s, & m(Y - f) + 1 \leq j \leq mY \end{cases} \quad (5)$$

其中 $0 < s + f \leq Y$ 且满足

$$m(s + \sum_{i=1}^{Y-s-f} 2^{i-1} + \sum_{i=1}^f 2^i) = 2^k (M - K_p - kp_R) \quad (6)$$

采样时间分配流程的关键是找到合适的 s 和 y 值, 并最终根据(4)式为各通道分配采样时间。

4 结 论

对于在线式测量系统中, 由于待测颗粒体系的任意性, 要求光子相关器能够根据被测对象的变化自动调整动态范围, 实现通道延时时间域与相关函数曲线衰减区间的动态匹配。提出的相关器动态范围自适应系统能够根据待测颗粒系的不同, 通过初始采样时间选择及通道采样时间再分配机制调节相关器动态范围, 可在任意颗粒系的测量中实现相关器动态范围与相关函数曲线衰减区间的自适应匹配, 充分利用有限通道资源使相关函数曲线分辨率达到最佳, 从而提高光子相关器性能。

参 考 文 献

- 1 Provder T. Challenges in particle size distribution measurement past, present and for the 21st century[J]. *Progress in Organic Coalings*, 1997, **32**(1): 143~153
- 2 R. Foord, E. Jakeman, C. Oliver *et al.*. Determination of diffusion coefficients of haemocyanin at low concentration by intensity fluctuation spectroscopy of scattered laser light [J]. *Nature*, 1970, **227**: 242~245
- 3 S. P. Lee, W. Tscharnuter, B. Chu. Calibration of an optical self-beating spectrometer by polystyrene latex spheres and confirmation of the Stokes-Einstein formula[J]. *J. Polym. Sci. Phys.*, 1972, **10**: 2453~2459
- 4 Shen Jin, Zheng Gang, Li Mengchao *et al.*. The study on the estimation of autocorrelation function in PCS particle sizing technique[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2003, **24**(6): 585~588
申 晋, 郑 刚, 李孟超等. PCS 颗粒测量技术中软件相关方法的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2003, **24**(6): 585~588
- 5 Li Shaoxin. Experimental study of protein interactions by photon correlation spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2003, **22**(3): 467~469
李绍新. 利用光子相关光谱研究蛋白分子相互作用[J]. *光谱实验室*, 2003, **22**(3): 467~469
- 6 Ding Qiang, Shen Jin, Li Tianze *et al.*. Extraction of the fractal characteristic of dynamic light scattering and the influence of temperature[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1996, **34**(7): 22~25
丁 强, 申 晋, 李田泽等. 颗粒动态散射光分形特征的提取及温度影响[J]. *光电工程*, 1996, **34**(7): 22~25
- 7 Xia Hui, Huang Shengxiang, Li Hongjian. Measuring the quality of milk using low-coherence dynamic light scattering[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 102~105
夏 辉, 黄生祥, 李宏建. 应用低相干动态光散射检测乳制品品质[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 102~105
- 8 K. Schätzel, E. O. Schulz-DuBois. Improvements of photon correlation Techniques[J]. *Infrared Phys.*, 1991, **32**: 409~416
- 9 M. Engels, B. Hoppe, H. Meuth *et al.*. Fast digital photon correlation system with high dynamic range[M]. Proceedings of the Annual IEEE International ASIC Conference and Exhibit, 2000, 18~22
- 10 C. Jakob, A. Th. Schwarzbacher, B. Hoppe *et al.*. The development of a digital multichannel correlator system for light scattering experiments[C]. Irish Signal and Systems Conference, 2006, 28~30