

快速测定激光波长的算法研究*

程玉宝^{1,2} 刘上乾¹ 王炳健¹

(1 西安电子科技大学 503 室,西安 710071)(2 合肥电子工程学院,合肥 230031)

摘要 为了满足激光侦察的快速反应需要,应尽可能地缩短从激光入射到波长显示的时间间隔.在保证频谱分辨率不变的情况下,通过减少参与 FFT 运算的点数来缩短运算时间,提高激光波长测量装置的反应速度.分析了这种改进算法的原理,并给出了实验结果.实验结果表明:在本系统中此方法切实可行.

关键词 激光测量;激光波长;傅里叶变换

中图分类号 TM930.12 **文献标识码** A

0 引言

随着激光技术在军事上的广泛应用,对敌方激光源进行探测并及时告警变得愈加重要,为此,我们设计了一种简易、轻巧而且比较实用的激光探测与波长测定装置^[1].当激光来临时,该装置既能进行激光探测,又能快速测定激光波长.其基本原理是:当一束激光垂直照射到该装置的光学劈尖表面时,激光在劈尖的表面上会产生明暗相间的干涉条纹,用线阵电荷耦合器件(CCD)将这种有着梯度变化的空间周期信号转换为一种类似于正弦波的时域周期信号,再经过线性放大和模数转换后,运用离散傅里叶变换(DFT),可求出信号的时域周期,进而得到入射激光的波长^[2-4].

从激光入射到显示激光波长有一定的时间间隔,为了满足激光侦察的快速反应需要,应将这段时间差尽可能地减小.通过研究和实验发现这段时间差的减小可通过两个方面来实现:一方面在硬件上实行并行处理,将模数转换和快速傅里叶变换(FFT)的运算同时进行,A/D 转换的是下一帧数据,而 FFT 运算的是上一帧数据;另一方面在软件上改进算法,尽量缩短运算时间.因为 FFT 运算时间与参与 FFT 运算的点数有关,参与运算的点数越多,则运算时间越长.如果能做到减少参与 FFT 运算的点数,而不改变运算准确度,就能够有效提高该测量装置的反应速度.

1 测量装置的信号分析

当激光垂直入射时,劈尖表面会产生明暗相间的干涉条纹,它是频率较低的空域周期信号,经线阵 CCD 转换为一种类似于正弦波的时域周期信号.在理论上,平行激光在劈尖上产生的干涉条纹是均匀的且

平行于劈棱,但经过线性放大的 CCD 输出信号并不是理想的正弦波,如图 1 所示.这主要是由于空气中的尘埃对光束的影响引起干涉条纹的畸变和电路噪声所致.采用 FFT 算法,可有效地消除这些影响,而能准确地求出信号的空间频率^[3].

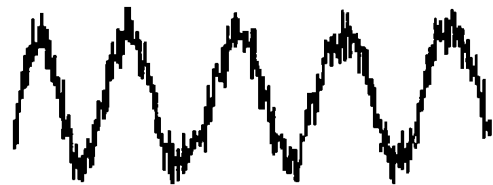


图 1 由 CCD 输出经过线性放大后的电信号
Fig. 1 Linear amplified CCD output signal

因此,线性放大后的 CCD 输出信号可表示为

$$x(t) = A \sin(2\pi f_0 t + \phi) + B \quad (1)$$

式中 f_0 是干涉条纹的空间频率, A 、 B 由入射激光的光强和背景光决定, f_0 、 ϕ 由入射激光的波长决定.

测量装置的线阵 CCD 有 2048 个像元,每个像元输出的电信号经过线性放大后,进行 A/D 转换.模数转换的采样时钟来自 CCD 像元的移位输出脉冲,无论 f_0 式大,经过采样, $x(t)$ 均变为长度为 2048 点的离散周期序列 $x(n)$.

2 频谱分辨率与 DFT 参数选择

测量装置的采样频率是固定不变的,它由 CCD 最高移位输出速率决定.因此,入射激光的波长无论长短,离散周期序列 $x(n)$ 均含有 2048 个数据点.用数字信号处理器(DSP)对 $x(n)$ 进行 2048 点的 FFT,可准确求出 $x(n)$ 的周期.

要缩短 FFT 的运算时间,只有减少参与 FFT 运算的点数,但前提是不能以牺牲频谱分辨率为代价.这涉及到频谱分辨率与 DFT 参数选择的问题.

频谱分辨率是指使用 DFT 时,在频率轴上所能得到的最小频率间隔 Δf .若对 $x(t)$ 以频率为 f ,采样 N 个点,则最小频率间隔为

$$\Delta f = f_s / N \quad (2)$$

*国防预研计划项目

Tel: 029-88209224 Email: ybcheng@163.com

收稿日期:2003-10-19

上式反映频谱的分辨能力 Δf 反比于信号的长度 N . 但由于

$$\Delta f = f_s / N = 1 / NT_s = 1 / T \tag{3}$$

$T = NT_s$ 是原模拟信号 $x(t)$ 的长度. 所以, 严格地说, Δf 反比于信号的长度 T . 对该测量装置来说, 线阵 CCD 的像元数 N 和移位输出间隔 T_s 是固定不变的, 系统获取原始信号 $x(t)$ 的长度 T 是不变的, 与入射激光的波长无关, 那么, 测量装置的频谱的分辨能力 Δf 也就固定不变.

若从 $x(n)$ 中以每隔 m 个采样点选取一个采样点组成 $y(n)$, 则 $y(n)$ 的采样速率为

$$f_{sy} = f_s / m \tag{4}$$

对 $y(n)$ 进行 DFT, 其频谱分辨率为

$$\Delta f_y = \frac{f_{sy}}{N/m} = \frac{f_s/m}{N/m} = f_s / N \tag{5}$$

由式(2)和式(5)可知: 对于本系统成倍地减小参与 FFT 运算的点数, 系统的频谱分辨率不变. 因此, 可以用这种方法来提高测量装置的反应速度.

3 新序列的构成

3.1 正弦信号的正确抽样

不同波长的人射激光, 产生的正弦信号 $x(t)$ 的周期也不同, 如何选择合适的 m , 使得 $x(n)$ 变为 $y(n)$, 是研究快速算法的关键. 这涉及到正弦信号的抽样问题, 也就是在正弦信号的一个周期内至少应抽样几个点.

抽样定理指出: 对带限信号, 抽样频率只要大于或等于信号最高频率的两倍即可. 根据参考文献[5]可知: 在 $x(t)$ 的初始相位 ϕ 为未知的情况下, 为了 FFT 的准确起见, 在 $x(n)$ 的一个周期内至少应抽三个点以上.

3.2 新序列采样点的抽取

在测量系统中, 对存储在存储器 (RAM) 中的 $x(n)$ 先进行简单地数值比较扫描, 得出 $x(n)$ 的大致周期数, 然后按照正弦信号的抽样要求, 以每个周期采样 5 个点的原则来组成 $y(n)$.

事实上, $x(n)$ 的周期因干涉条纹的疏密不均而大小不等. 设周期数为 r , 则在 $x(n)$ 中取样的间隔 m 为

$$m = \text{int} \left(\frac{2048}{5 \times r} \right) \tag{6}$$

从 $x(n)$ 中每隔 m 个点取一个样值来组成 $y(n)$, $y(n)$ 的长度为 $N_y = 5 \times r$.

若能做到抽样频率 f_{sy} 是 f_0 的整数倍, 则长度为 N_y 的 $y(n)$ 包括 $x(n)$ 的多个整周期. 那么, 对这 N_y 点 $y(n)$ 做 FFT, 所得的 $Y(k)$ 将无频谱泄漏, 即 $Y(k)$ 是在 $\pm f_0$ 处的线谱^[6,7], 这对测量准确的提高

非常有益. 但由于 f_0 是干涉条纹的空间频率, 由入射激光的波长决定, 一般来说很难做到.

3.3 补零与 FFT pruning

抽样生成的 $y(n)$ 的点数 N_y 不一定是 2 的整次幂, 为了便于使用基 2 的 FFT 算法, 可采用补零的方法使得 $y(n)$ 的点数为 2 的整次幂.

在有效数据后面补一些零, 并不能提高频谱分辨率, 因为原始信号的长度 T 不变, 但补零可以起到对 $Y(k)$ 做插值的作用^[5].

在 $y(n)$ 后补零, 可采用 DIF FFT 算法^[8,9] 来缩短 FFT 的运算时间, DIF FFT 算法是 FFT pruning 的一种. 它主要是利用零参加蝶形运算的特殊性质, 来节省运算时间的. 因为参加蝶形运算的一个元数是零, 则此蝶形单元变为如图 2 所示的半蝶形单元. 计算一个完整的蝶形单元需四次实数乘六次实数加, 而计算一个半蝶形单元只需要四次实数乘两次实数加.

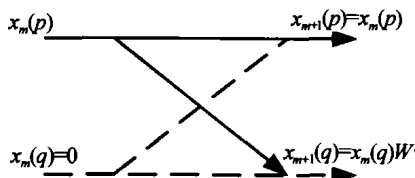


图 2 半蝶形单元
Fig. 2 Half-butterfly unit

4 快速算法的运用

4.1 快速算法的编程

用 DSP 实现 FFT, 可采用高级的 C 编译方式, 也可采用低级的汇编语言编程. 但 C 编译代码长, 效率比较低, 为了提高运算速度, 本系统采用汇编语言编程.

采用哈佛结构和流水线操作方式的 DSP, 可以用完全重叠的方式来独立处理取指、译码和执行等操作. 程序执行时一旦遇到循环或跳转就会破坏这种并行操作, 增加运算时间. 而 FFT 的编程通常采用循环调用基 2 蝶形运算子程序的简便方法. 对于 2048 点的 FFT 有 11 级运算, 每级有 1024 个蝶形运算单元. 大量的循环调用破坏了 DSP 的流水线操作, 增加了运算时间. 若采用宏汇编顺序编程的方法, 可去除循环提高运算速度^[10,11].

另外, 考虑到 FFT 的第一级蝶形运算所用旋转因子是 1, 第二级蝶形运算所用旋转因子是 1 和 -j. 对这两级运算可以不必采用蝶形运算方式, 使用加法就能快速计算. 为了运算速度更快, 在编程中将这两级运算结合起来, 直接计算以四点为一组的 FFT 的第二级输出.

4.2 实验结果及分析

实验中用波长为 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ 的激光垂直照

射本系统的光学劈尖,产生的干涉条纹经线阵 CCD 采样放大后输出,为2048点的 $x(n)$. 在系统时钟 30 MHz 的工作频率下,进行 2048 点 FFT 运算时,系统整体运算时间为 $t_0 = 6.58$ ms. 采用上述算法,对 $x(n)$ 扫描,发现 $x(n)$ 大致包含 85 个周期. 根据式(6)可得取样间隔 $m = 5$,在 $x(n)$ 中按每隔 5 个点选取一个点组成 $y(n)$. $y(n)$ 只有 409 个数,不符合 FFT 运算所需要的 2 的幂次,对 $y(n)$ 补 103 个零.

采用循环调用基 2 蝶形运算子程序的思路,内含 DIF FFT 算法的半蝶形运算方法,编程后进行 512 点的 FFT 运算,测得改进后系统所需总的运算时间为 $t_f = 1.81$ ms,是原来的 27.5%.

在同样的实验条件下,在采用宏汇编顺序编程和前两级运算结合起来的方法,编程后进行 512 点的 FFT 运算,测得系统所需总的运算时间是 $t_f = 1.65$ ms,仅为原来的 25.1%,系统的运算速度得到了进一步的提高.

本系统的反应时间 t 取决于两个方面:CCD 信号积分与转移输出时间 t_c 和运算时间 t_f . 在系统中信号采集和数据处理是并行工作的,哪一方面所需的时间长,系统的反应时间就由哪一方面决定. 本系统的 CCD 器件采用 1 MHz 双路输出,其信号积分与转移输出时间为 $t_c = 1.2$ ms,是固定不变的. 所以,在入射激光波长 $\lambda = 0.6328$ μm 时,系统的反应速度提高了

$$\eta = \frac{t_0 - t_f}{t_0} \times 100\% = 74.9\% \quad (7)$$

入射激光波长越长,干涉条纹间距越大,在 CCD 上感应的干涉条纹数越少,空间频率 f_0 就越小,根据前面所述的快速算法原理,参与 FFT 运算的点数就越少,则系统的运算时间 t_f 越短;反之,波长越短,则运算时间越长. 当 $t_f \leq t_c$ 时,系统的反应时间为 $t = t_c$,是固定不变的,与运算时间 t_f 无关. 快速算法使系统反应速度的提高达到了极限

$$\eta = \frac{t_0 - t_c}{t_0} \times 100\% = 81.8\% \quad (8)$$

5 结论

本文所述的快速改进算法及其编程是建立在周

期信号进行 DFT 所具有的特点上. 它在本系统中的应用,能有效地节省 FFT 的运算时间,提高激光告警的反应速度,具有一定的应用价值. 同样,这种方法也适用于其他与该测量装置类似的周期信号抽样后进行 FFT 的运算中.

参考文献

- 程玉宝,周慧鑫,刘上乾. 一种激光探测与波长测定装置的研究. 光电工程, 2002, 29(6): 25 ~ 27
Cheng Y B, Zhou H X, Liu S Q. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, 29(6): 25 ~ 27
- 程玉宝,王炳健,刘上乾. 一种提高激光波长测量准确的改进算法. 光子学报, 2003, 32(9): 1041 ~ 1044
Cheng Y B, Wang B J, Liu S Q. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(9): 1041 ~ 1044
- 程玉宝,何宗平,刘瀚. 用快速傅里叶变换精确测定激光波长. 红外与激光工程, 1998, 27(5): 52 ~ 54
Cheng Y B, He Z P, Liu H. *Infrared and Laser Engineering*, 1998, 27(5): 52 ~ 54
- 郑君理,杨为理,应启珩. 信号与系统. 北京:高等教育出版社, 1997. 156 ~ 186
Zheng J L, Yang W L, Ying Q H. *Signal and System*. Beijing: Higher Education Press, 1997. 156 ~ 186
- 胡广书. 数字信号处理. 北京:清华大学出版社, 1998. 55 ~ 94
Hu G S. *Digital Signal Processing*. Beijing: Tsinghua University Press, 1998. 55 ~ 94
- Girgis A A, Ham F. A qualitative study of pitfalls in FFT. *IEEE Trans Aerosp Electron Systems*, 1980, 16(4): 434 ~ 439
- Jain V K, Collins W L, Davis D C. High-accuracy analog measurements via interpolated FFT. *IEEE Trans Instrum Meas*, 1979, 28: 113 ~ 122
- Markel J D. FFT pruning. *IEEE Trans Audio Electroacoust*, 1971, 19(4): 305 ~ 311
- Skinner D P. Pruning the decimation-in-time FFT algorithm. *IEEE Trans On ASSP*, 1976, 24(Apr): 193 ~ 194
- 程玉宝,刘瀚. 用 DSP 汇编语言实现 FFT 的编程技巧. 电子工程学院学报, 2002, 21(1): 43 ~ 45
Cheng Y B, Liu H. *Journal of Electronic Engineering Institute*, 2002, 21(1): 43 ~ 45
- Texas Instruments. TMS320C5X User's Guide. 1991, 7-45 ~ 54

Study on the Algorithm for Quick Measuring Laser Wavelength

Cheng Yubao^{1,2}, Liu Shangqian¹, Wang Bingjian¹

1 *Lab. 503, Xidian University, Xi'an 710071*

2 *Hefei Electronic Engineering Institute, Hefei 230031*

Received date: 2003-10-19

Abstract To satisfy the desire of quick responses to the laser signal in the reconnaissance, it is necessary to shorten the latency from the incidence of the laser to the display of the laser wavelength on an instrument as much as possible. Under the condition of unchanging the spectrum resolution, the latency of the laser wavelength measurement system is improved by reducing the samples of FFT operation. The principle of the algorithm is presented and the results are given. The experiment results indicate that the algorithm is practical in the system.

Keywords Laser measurement; Laser wavelength; Fourier Transform



Cheng Yubao was born in 1966 and worked as an associate professor. He graduated from Xidian University with master degree in March, 1991, and now studies for doctor degree in Xidian University. Up to now he has published 18 papers.