

一种用于FMCW绝对距离测量技术中改进的高速色散失配校正方法

申请号：[201610560748.6](#)

申请日：2016-07-15

申请(专利权)人 [哈尔滨工业大学](#)
地址 [150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区西大直街92号](#)
发明(设计)人 [刘国栋](#) [甘雨](#) [刘炳国](#) [路程](#) [陈凤东](#) [许新科](#)
主分类号 [G01S7/497\(2006.01\)I](#)
分类号 [G01S7/497\(2006.01\)I](#) [G01S17/36\(2006.01\)I](#)
公开(公告)号 [105954735A](#)
公开(公告)日 [2016-09-21](#)
专利代理机构 [哈尔滨市松花江专利商标事务所 23109](#)
代理人 [岳昕](#)



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 105954735 A
(43)申请公布日 2016.09.21

(21)申请号 201610560748.6

(22)申请日 2016.07.15

(71)申请人 哈尔滨工业大学

地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区西
大直街92号

(72)发明人 刘国栋 甘雨 刘炳国 路程
陈凤东 许新科

(74)专利代理机构 哈尔滨市松花江专利商标事
务所 23109

代理人 岳昕

(51)Int.Cl.

G01S 7/497(2006.01)

G01S 17/36(2006.01)

权利要求书1页 说明书6页 附图3页

(54)发明名称

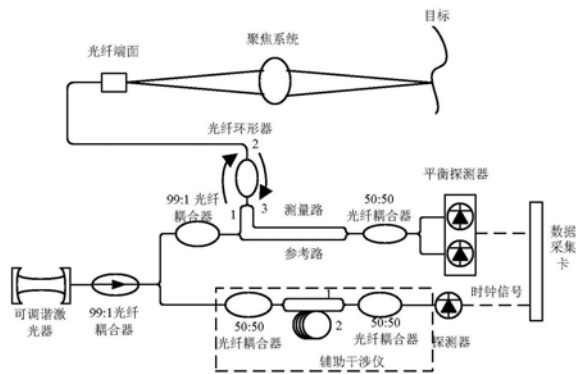
一种用于FMCW绝对距离测量技术中改进的
高速色散失配校正方法

(57)摘要

一种用于FMCW绝对距离测量技术中改进的
高速色散失配校正方法,属于绝对距离测量领
域。为了解决现有绝对距离测量高速色散失配
校正方法测量效率低的问题。所述方法包括:采
用光纤搭建辅助干涉仪,得到存在色散的辅助干
涉仪信号,并将该信号作为数据采集卡采样时钟
对测量路的信号进行采样,获得距离测量信号
 $I_m(m)$;对距离测量信号 $I_m(m)$ 进行处理后,
获得测量信号的距离谱;对测量信号 $I_m(m)$ 进
行倍数为d的降采样,得到的测量信号 DI_m ,距
离谱为:

$$P(k) = \sum_{m=0}^{N-1} \{DI_m(m) \exp[-j2\pi \frac{R_m dm}{R_c} - j2\pi(-\frac{cdm}{n_g R_c} + \frac{d_r c^2 d^2 m^2}{2n_g^2 R_c^2})2(\frac{R_c - R_r}{cM}k + \frac{R_r}{c})]\}$$
 当 P

(k)最大时,从 $I_m(m)$ 中获得对应的高速色散失
配校正后的距离。



1. 一种用于FMCW绝对距离测量技术中改进的高速色散失配校正方法,所述方法包括:
采用光纤搭建辅助干涉仪,得到存在色散的辅助干涉仪信号,并将该信号作为数据采集卡采样时钟对测量路的信号进行采样,获得距离测量信号 $I_m(m)$;
对距离测量信号 $I_m(m)$ 进行处理后,获得测量信号的距离谱:

$$P(k) = \sum_{m=0}^{N-1} I_m(m) \exp \left[-j2\pi \frac{R_{end}m}{R_0} - j2\pi \left(\frac{cm}{n_{g0}R_0} - \frac{d_f c^2 m^2}{2n_{g0}^3 R_0^2} \right) \left(\frac{R_2 - R_1}{M} k + R_1 \right) \right], k = 1, 2, \dots, M \quad \text{公式一};$$

其中, n_{g0} 为初始频率时辅助干涉仪光纤的群折射率, R_0 为辅助干涉仪两路长度差, d_f 为光纤系数, c 为光速; $m=0, 2 \cdots N-1$, N 为采样点数, R_{end} 为辅助干涉仪测量光的光纤端面反射光与参考路的光之间的光程差; j 表示虚部, M 为变换点数, R_2 表示目标距离的上限, R_1 表示目标距离的下限;

其特征在于,

对测量信号 $I_m(m)$ 进行倍数为 d 的降采样,得到的测量信号 DI_m ,公式一变化为:

$$P(k) = \sum_{m=0}^{N-1} \{ DI_m(m) \exp [-j2\pi \frac{R_{end}dm}{R_0} - j2\pi (-\frac{cdm}{n_{g0}R_0} + \frac{d_f c^2 d^2 m^2}{2n_{g0}^3 R_0^2}) 2 (\frac{R_2 - R_1}{cM} k + \frac{R_1}{c})] \} \quad \text{公式二};$$

当 $P(k)$ 最大时,从 $I_m(m)$ 中获得对应的高速色散失配校正后的距离。

2. 根据权利要求1所述的一种用于FMCW绝对距离测量技术中改进的高速色散失配校正方法,其特征在于,

$$P(k) = \sum_{m=0}^{N-1} \{ DI_m(m) \exp [-j2\pi \frac{R_{end}dm}{R_0} - j2\pi (-\frac{cdm}{n_{g0}R_0} + \frac{d_f c^2 d^2 m^2}{2n_{g0}^3 R_0^2}) 2 (\frac{R_2 - R_1}{cM} k + \frac{R_1}{c})] \};$$

$$\frac{DF_s c}{2} = \frac{n_{g0} R_0}{2d} > \frac{10d_f c N R_m}{n_{g0}^2 R_0};$$

其中, DF_s 表示降采样后的等效采样率。

3. 根据权利要求1所述的一种用于FMCW绝对距离测量技术中改进的高速色散失配校正方法,其特征在于,距离测量信号 $I_m(m)$ 为:

$$I_m(m) = A_m \cos \left[2\pi \frac{R_{end}m}{R_0} + 2\pi \left(\frac{cm}{n_{g0}R_0} - \frac{d_f c^2 m^2}{2n_{g0}^3 R_0^2} \right) \frac{R_m}{c} \right];$$

A_m 为测量信号振幅, R_m 为激光在自由空间中走过的光程,即:待测距离。

一种用于FMCW绝对距离测量技术中改进的高速色散失配校正方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种改进的高速色散失配校正方法,属于绝对距离测量领域。

背景技术

[0002] 激光线性调频连续波技术借助可调谐激光器大范围连续可调的特点进行测量。通常激光器无法做到绝对的线性调频,为了克服非线性调频带来的影响,目前常用的手段是频率采样法。

[0003] 公开号为105259548A的发明专利《一种用于FMCW绝对距离测量技术中高速色散失配校正方法》提出了一种用于频率调制连续波FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave)绝对距离测量技术中色散失配校正的算法。由于色散导致测量结果变为一个啁啾信号,并且啁啾量随目标距离变化而变化。为了克服这一影响,该发明专利提出了将信号分解为一系列啁啾信号的和,以各啁啾分量的系数作为信号的距离谱,即可消除色散的影响,求出目标距离值,并进行一次行傅里叶变换,完成色散失配校正:

$$[0004] \quad P(k) = \sum_{m=0}^{N-1} I_m(m) \exp \left[-j2\pi \frac{R_{\text{end}}m}{R_0} - j2\pi \left(\frac{cm}{n_{g0}R_0} - \frac{d_f c^2 m^2}{2n_{g0}^3 R_0^2} \right) \left(\frac{R_2 - R_1}{M} k + R_1 \right) \right], k = 1, 2, \dots, M;$$

[0005] 虽然进行了一次傅里叶变换,减少了计算量,但是在测量时,当扫频范围达到4.26THz时,测量精度达到最高值,此时采样点数N为 3.2×10^6 。根据啁啾分解算法公式,上式需要进行 $M(N+N^2)$ 次复数乘法。因此当N较大时,需要的运算量是非常庞大的,这严重影响了测量的效率。

发明内容

[0006] 本发明为了解决上述问题,提供一种降低运算数据量的用于FMCW绝对距离测量技术中改进的高速色散失配校正方法。

[0007] 本发明的一种用于FMCW绝对距离测量技术中改进的高速色散失配校正方法,所述方法包括:采用光纤搭建辅助干涉仪,得到存在色散的辅助干涉仪信号,并将该信号作为数据采集卡采样时钟对测量路的信号进行采样,获得距离测量信号 $I_m(m)$;

[0008] 对距离测量信号 $I_m(m)$ 进行处理后,获得测量信号的距离谱:

$$[0009] \quad P(k) = \sum_{m=0}^{N-1} I_m(m) \exp \left[-j2\pi \frac{R_{\text{end}}m}{R_0} - j2\pi \left(\frac{cm}{n_{g0}R_0} - \frac{d_f c^2 m^2}{2n_{g0}^3 R_0^2} \right) \left(\frac{R_2 - R_1}{M} k + R_1 \right) \right], k = 1, 2, \dots, M \quad \text{公式}$$

—;

[0010] 其中, n_{g0} 为初始频率时辅助干涉仪光纤的群折射率, R_0 为辅助干涉仪两路长度差, d_f 为光纤系数, c 为光速; $m=0, 2 \cdots N-1$, N 为采样点数, R_{end} 为辅助干涉仪测量光的光纤端面反射光与参考路的光之间的光程差; j 表示虚部, M 为变换点数, R_2 表示目标距离的上限, R_1 表示目标距离的下限;

[0011] 对测量信号 $I_m(m)$ 进行倍数为 d 的降采样,得到的测量信号 DI_m ,公式一变化为:

$$[0012] \quad P(k) = \sum_{m=0}^{N-1} \{DI_m(m) \exp[-j2\pi \frac{R_{end} dm}{R_0} - j2\pi(-\frac{cdm}{n_{g0}R_0} + \frac{d_f c^2 d^2 m^2}{2n_{g0}^3 R_0^2})2(\frac{R_2 - R_1}{cM}k + \frac{R_1}{c})]\} \text{ 公式二};$$

[0013] 当 $P(k)$ 最大时,从 $I_m(m)$ 中获得对应的高速色散失配校正后的距离。

$$[0014] \quad P(k) = \sum_{m=0}^{N-1} \{DI_m(m) \exp[-j2\pi \frac{R_{end} dm}{R_0} - j2\pi(-\frac{cdm}{n_{g0}R_0} + \frac{d_f c^2 d^2 m^2}{2n_{g0}^3 R_0^2})2(\frac{R_2 - R_1}{cM}k + \frac{R_1}{c})]\};$$

$$[0015] \quad \frac{DF_s c}{2} = \frac{n_{g0} R_0}{2d} > \frac{10d_f c N R_m}{n_{g0}^2 R_0^2} \quad \text{其中, } DF_s \text{ 表示降采样后的等效采样率。};$$

[0016] 距离测量信号 $I_m(m)$ 为:

$$[0017] \quad I_m(m) = A_m \cos \left[2\pi \frac{R_{end} m}{R_0} + 2\pi \left(\frac{cm}{n_{g0} R_0} - \frac{d_f c^2 m^2}{2n_{g0}^3 R_0^2} \right) \frac{R_m}{c} \right];$$

[0018] A_m 为测量信号振幅, R_m 为激光在自由空间中走过的光程,即:待测距离。

[0019] 本发明的有益效果在于,本实施方式提出了结合欠采样的啁啾分解算法,不仅可以消除色散带来的影响,还降低了运算量,并且对降采样倍数 d 进行限定,防止降采样倍数 d 过大,信号的距离谱出现混叠现象,实验验证,在不同扫频范围进行对比,本发明结合欠采样的啁啾分解算法可以在达到同样精度的前提下极大的提高距离测量速度。

附图说明

[0020] 图1为具体实施方式中用于FMCW绝对距离测量的光路原理示意图。

[0021] 图2为具体方式中在不同扫频范围时不进行色散校正和利用公式十进行色散校正后的距离谱。

[0022] 图3为降采样倍数 d 过大,出现混叠的距离谱。

[0023] 图4为降采样倍数为7020时,对应的距离谱。

[0024] 图5为降采样倍数为7000时,对应的距离谱。

具体实施方式

[0025] 为了消除调频非线性带来的影响,本实施方式中采样频率采样法对信号进行采样;图1为现有的一种用于FMCW绝对距离测量的光路原理示意图,本实施方式中利用图1中的辅助干涉仪的信号作为数据采集卡采样时钟对测量路的信号进行采样,该方法可以有效的消除调频非线性带来的影响。

[0026] 本实施方式的改进的高速色散失配校正方法的具体过程:

[0027] 由于光路通常采用光纤进行搭建,则辅助干涉仪得到的信号 $I(f)$ 表示为:

$$[0028] \quad I(f) \approx A_0 \cos \left(2\pi \int_0^f \frac{n_g R_0}{c} df' \right) = A_0 \cos \left(2\pi \frac{R_0}{c} \int_0^f (d_f f' + n_{g0}) df' \right) \text{ 公式一};$$

$$= A_0 \cos \left[2\pi \left(\frac{0.5d_f R_0 f^2 + n_{g0} R_0 f}{c} \right) \right]$$

[0029] 其中, f 为激光瞬时频率, A_0 为干涉信号振幅, n_g 为辅助干涉仪光纤群折射率, n_{g0} 为

初始频率时辅助干涉仪光纤的群折射率, R_0 为辅助干涉仪两路长度差, d_f 为光纤系数, c 为光速;

[0030] 若以存在色散的信号 $I(f)$ 作为采样时钟, 则每一个采样点满足:

$$[0031] \quad 2\pi \left(\frac{0.5d_f R_0 f^2 + n_{g0} R_0 f}{c} \right) = 2\pi m, \quad m = 0, 2 \dots N-1 \quad \text{公式二};$$

[0032] 其中, m 为采样点序列, N 为采样点数; 因此每一个采样点对应的激光器频率变化量

$$f(m) \text{ 为: } f(m) = \frac{-n_{g0} R_0 \pm \sqrt{n_{g0}^2 R_0^2 + 2d_f R_0 c m}}{d_f R_0} \quad \text{公式三};$$

[0033] 其中, 加法代表频率增加, 减法代表频率减小。

[0034] 图1所示的用于FMCW绝对距离测量的光路原理示意图中, 测量辅助干涉仪测量光分为两个部分, 一部分经光纤端面反射与参考路的光干涉, 另一部分由端面出射, 经目标反射后回到光路中与参考路的光干涉。端面反射光与参考路的光干涉信号同样存在色散, 可以表示为

$$[0035] \quad I_{end}(f) = A_{end} \cos \left[2\pi \left(\frac{0.5d_f R_{end} f^2 + n_{g0} R_{end} f}{c} \right) \right] \quad \text{公式四};$$

[0036] A_{end} 为辅助干涉仪测量光的光纤端面反射光与参考路的光的干涉信号振幅;

[0037] R_{end} 为辅助干涉仪测量光的光纤端面反射光与参考路的光之间的光程差;

[0038] 将公式三带入公式四, 则端面反射光与参考路的干涉信号经辅助干涉仪采用后变为:

$$[0039] \quad I_{end}(m) = A_{end} \cos \left(2\pi \frac{R_{end} m}{R_0} \right) \quad \text{公式五};$$

[0040] 经目标反射回到光路中的信号光光程分为两段, 一段在光纤内部, 一段在自由空间中。自由空间中光的色散很小, 可以忽略, 则目标反射光与参考路的光的干涉信号表示为:

$$[0041] \quad \begin{aligned} I_m(f) &= A_m \cos \left[2\pi \int_0^f \left(\frac{n_g R_{end} + R_m}{c} \right) df' \right] \\ &= A_m \cos \left[2\pi \left(\frac{0.5d_f R_{end} f^2 + n_{g0} R_{end} f}{c} \right) + 2\pi f \frac{R_m}{c} \right] \end{aligned} \quad \text{公式六};$$

[0042] A_m 为测量信号振幅, R_m 为激光在自由空间中走过的光程; f' 为 f 的导数;

[0043] 将公式三带入公式六可得目标反射光与参考路的光的干涉信号经辅助干涉仪采用后的数值信号, 即: 距离测量信号为:

$$[0044] \quad I_m(m) = A_m \cos \left(2\pi \frac{R_{end} m}{R_0} + 2\pi \frac{-n_{g0} R_0 + \sqrt{n_{g0}^2 R_0^2 + 2d_f R_0 c m}}{d_f R_0} \frac{R_m}{c} \right) \quad \text{公式七};$$

[0045] 为了对上式进行简化, 可对 $\sqrt{n_{g0}^2 R_0^2 + 2d_f R_0 c m}$ 进行泰勒展开并省略高阶项可得:

[0046]
$$\sqrt{n_{g0}^2 R_0^2 + 2d_f R_0 cm} \approx n_{g0} R_0 + \frac{d_f cm}{n_{g0}} - \frac{d_f^2 c^2 m^2}{2n_{g0}^3 R_0}$$
 公式八;

[0047] 将公式八带入公式七可得

[0048]
$$I_m(m) = A_m \cos \left[2\pi \frac{R_{end} m}{R_0} + 2\pi \left(\frac{cm}{n_{g0} R_0} - \frac{d_f c^2 m^2}{2n_{g0}^3 R_0^2} \right) \frac{R_m}{c} \right]$$
 公式九;

[0049] 为了降低运算量,可以先对信号进行一次傅里叶变换,判断目标距离范围 $R_1 \sim R_2$,然后在该范围内对信号进行分解。同时可以对距离谱的分辨率进行优化,通常有效的分辨率与信号的信噪比有关系。此时公式九变化为:

[0050]
$$P(k) = \sum_{m=0}^{N-1} I_m(m) \exp \left[-j2\pi \frac{R_{end} m}{R_0} - j2\pi \left(\frac{cm}{n_{g0} R_0} - \frac{d_f c^2 m^2}{2n_{g0}^3 R_0^2} \right) \left(\frac{R_2 - R_1}{M} k + R_1 \right) \right], k = 1, 2 \dots M$$
 公式十;

[0051] 其中 $\frac{R_2 - R_1}{M}$ 为距离谱的分辨率, M 为变换点数, R_2 表示目标距离的上限, R_1 表示目标距离的下限, j 表示虚部。该分辨率与系统固有精度之间的比值与信号信噪比有关。

[0052] 对公式十进行实验,实验中发现该方法可以有效的消除色散带来的影响,图2为不同扫频范围时不进行色散校正和利用公式十进行色散校正后的距离谱,其中实线为不进行色散校正时得到的距离谱,虚线为利用公式十进行色散校正得到的距离谱。从结果中发现该方法在不同扫频范围均可以得到良好的效果。

[0053] 在FMCW中,图1的固有精度与扫频带宽成反比,因此为了得到更高的精度,扫频带宽越大越好。当扫频范围达到4.26THz时,测量精度达到最高值,此时系统采样点数 N 为 3.2×10^6 。根据啁啾分解算法公式,该算法需要进行 $M(N+N^2)$ 次复数乘法。因此当 N 较大时,需要的运算量是非常庞大的,这严重影响了测量的效率。

[0054] 为了克服计算量过大的问题,本实施方式提出了结合欠采样的啁啾分解算法。该算法先对测量信号 $I_m(m)$ 进行倍数为 d 的降采样,得到的测量信号表示为 DI_m ,则公式十的啁啾分解算法更改为:

[0055]
$$P(k) = \sum_{m=0}^{N-1} \{ DI_m(m) \exp [-j2\pi \frac{R_{end} dm}{R_0} - j2\pi (-\frac{cdm}{n_{g0} R_0} + \frac{d_f c^2 d^2 m^2}{2n_{g0}^3 R_0^2}) 2 (\frac{R_2 - R_1}{cM} k + \frac{R_1}{c})] \}$$
 公式十一;

[0056] 则此时算法需要的运算量减少为 $M(N/d+N^2/d^2)$, $k=1, 2 \dots M$ 。

[0057] 当降采样倍数过大时,降采样后采样频率将不满足奈奎斯特采样定理,此时信号的距离谱会出现混叠现象,如图3所示。但由于啁啾信号不同于正余弦信号,其频率是变化的,这导致在负频率处的峰值出现泄露,其展宽量约为色散引入最大误差的5倍,因此当对该欠采样的信号进行啁啾分解时,在距离谱上以 $n_{g0} R_0 / (2d)$ 为周期出现峰值。

[0058] 为了防止负频率处的泄露的峰值对有用的峰产生影响,应选择合适的降采样倍数 d ,使降采样后的采样率是展宽峰值的两倍以上,即

[0059]
$$P(k) = \sum_{m=0}^{N-1} \left\{ DI_m(m) \exp \left[-j2\pi \frac{R_{end} dm}{R_0} - j2\pi \left(-\frac{cdm}{n_{g0} R_0} + \frac{d_f c^2 d^2 m^2}{2n_{g0}^3 R_0^2} \right) 2 \left(\frac{R_2 - R_1}{cM} k + \frac{R_1}{c} \right) \right] \right\}$$
 公

式十二;

[0060]
$$\frac{DF_s c}{2} = \frac{n_{g0} R_0}{2d} > \frac{10d_f c N R_m}{n_{g0}^2 R_0};$$

[0061] DF_s 表示降采样后的等效采样率;

[0062] 根据公式十二和公式七, 当 $P(k)$ 最大时, 从 $I_m(m)$ 中获得对应的高速色散失配校正后的待测距离 R_m 。

[0063] 因此若测量距离为20m, 则有 $d < 7308$, 本实施方式中 d 取7000, 即对采样得到的信号进行7000倍的降采样。此时参与啁啾分解的数据量为 $N/d = 457$, 这极大的降低了运算的数据量。但该值的选择应避免两个峰值过于靠近, 这可以通过微调降采样倍数 d 进行调整, 如图4和图5所示, 其中图4表示降采样倍数为7020时, 此时的测量标准差为2.54 μm , 图5表示降采样倍数为7000, 此时测量标准差为0.72 μm 。表1对比了传统色散补偿算法与啁啾分解的测量精度, 以及结合欠采样与不结合欠采样的算法耗时。其中分别在不同扫频范围进行对比, 对比后发现结合欠采样的啁啾分解算法可以在达到同样精度的前提下极大的提高测量速度。其中当扫频范围达到4.26THz时, 啁啾分解算法精度可以达到0.72 μm , 若使用传统的基于相位补偿的色散校正算法精度为2.16 μm 。当不结合欠采样技术时, 需要的运算时间为269.8s, 当结合欠采样技术后, 需要的运算时间仅有1.9s。

[0064] 表1

[0065]

扫频范围 (THz)	传统色散 校正方法	没有欠采样的色散校正方法		本实施方式采用欠采样的色散校正改进方法	
	STD (μm)	STD (μm)	Time cost(s)	STD (μm)	Time cost(s)
1.07	4.38	4.30	25.9	4.57	0.7
1.33	4.18	3.62	25.8	3.60	0.8
1.60	4.09	3.35	25.8	3.47	0.9
1.86	3.82	3.42	32.5	3.44	1.0
2.13	3.53	3.22	42.8	3.37	1.0
2.40	2.16	2.96	53.9	2.96	1.1
2.66	2.86	2.71	66.4	2.75	1.2
2.93	2.58	2.35	80.2	2.38	1.3
3.19	2.36	2.04	106.8	1.94	1.4
3.46	2.21	1.57	145.4	1.44	1.5
3.72	2.19	1.23	188.9	1.22	1.7
3.99	2.11	0.90	236.7	0.86	1.7
4.26	2.16	0.72	269.8	0.72	1.9

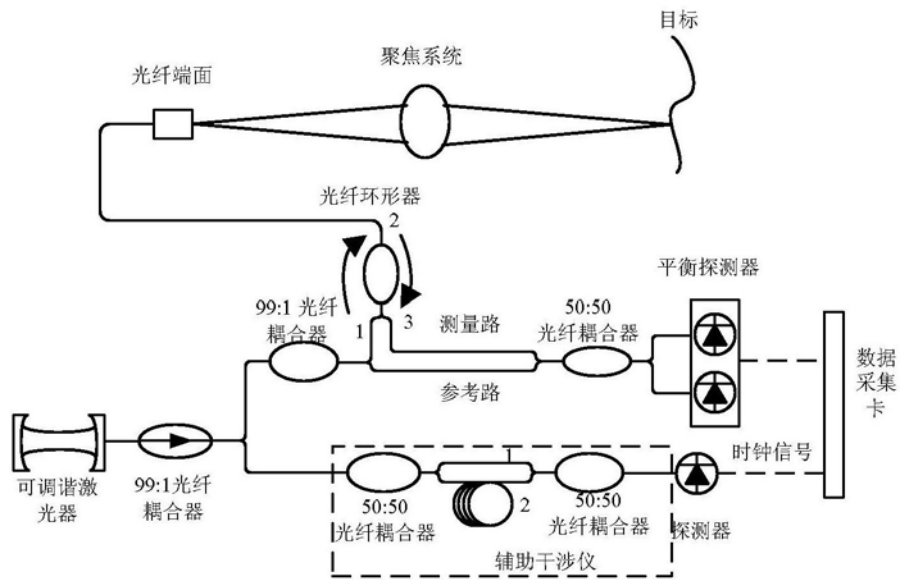


图1

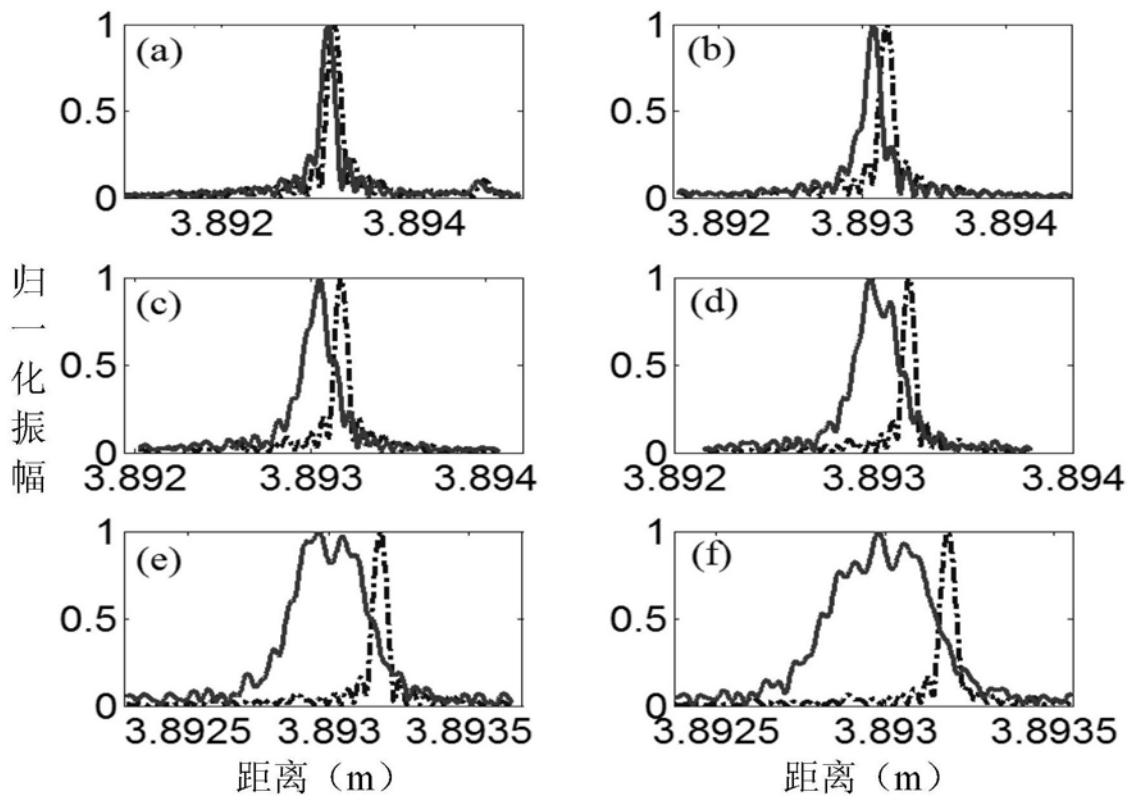


图2

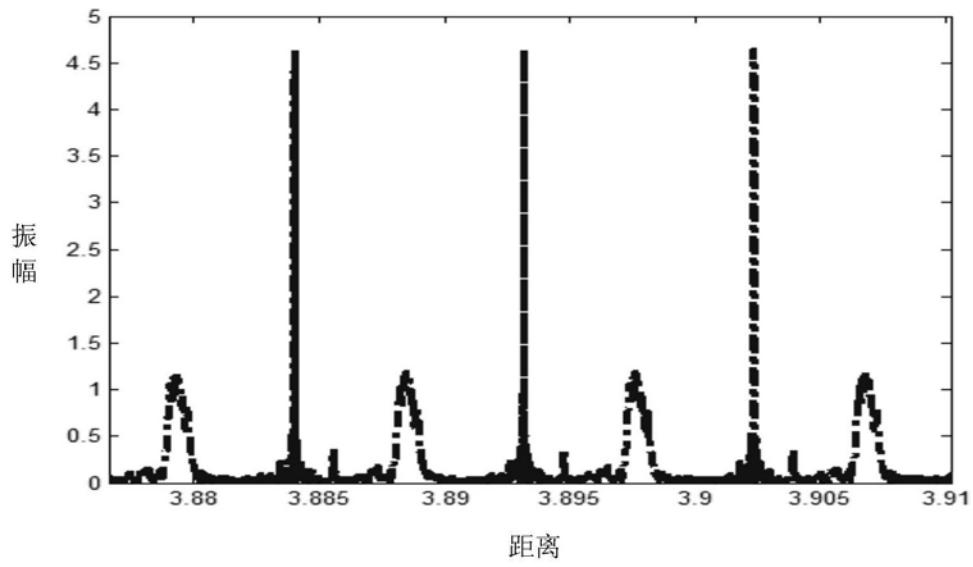


图3

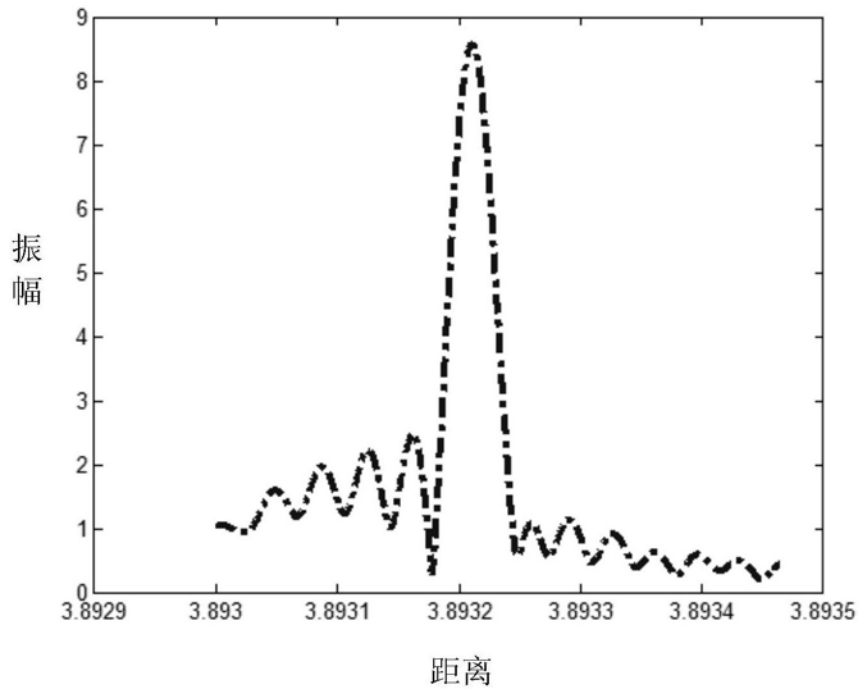


图4

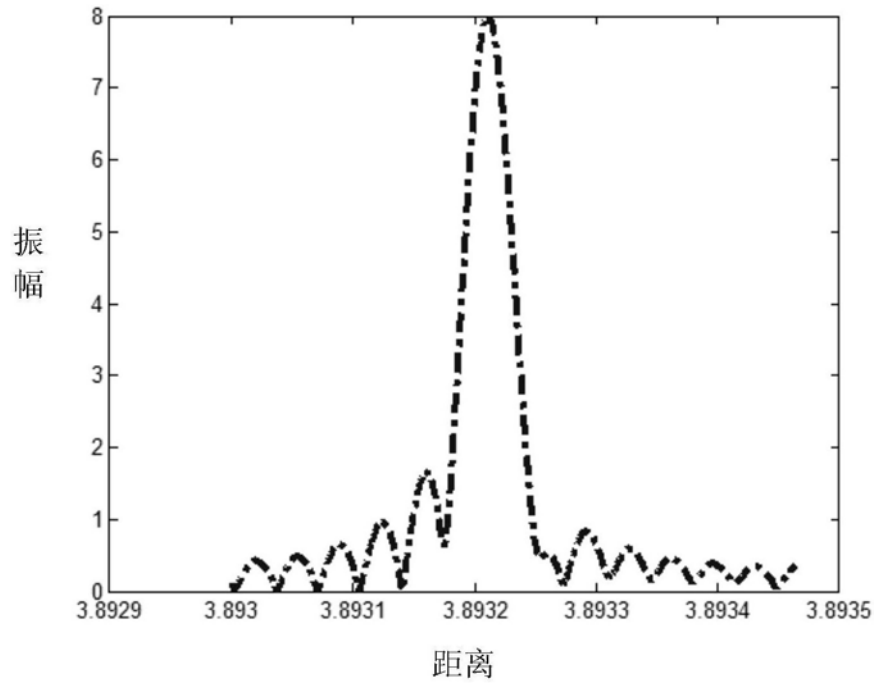


图5