(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104457791 B
(45)授权公告日 2017.05.10

(21)申请号 201410708137.2

(22)申请日 2014.11.27

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 104457791 A

(43)申请公布日 2015.03.25

(73)专利权人 北京航天时代光电科技有限公司
地址 100094 北京市海淀区丰滢东路1号

(72)发明人 赵政鑫 王巍 于海成 王军龙 李超 石海洋 杨学礼

(74)专利代理机构 中国航天科技专利中心 11009
代理人 安丽

(51)Int.Cl.
G01C 25/00(2006.01)

(56)对比文件
CN 102788595 A,2012.11.21,
CN 102175264 A,2011.09.07,
CN 101033969 A,2007.09.12,
US 2014250969 A1,2014.09.11,
赵政鑫等.基于等效角振动的光纤陀螺带宽测试方法.《导航与控制》.2016,第15卷(第1期),

审查员 徐建营

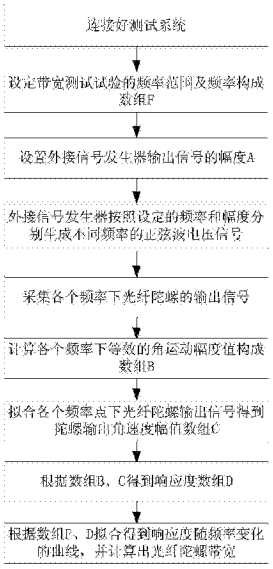
权利要求书1页 说明书6页 附图3页

(54)发明名称

一种静态条件下测量光纤陀螺带宽的方法

(57)摘要

一种静态条件下测量光纤陀螺带宽的方法，在测试频率范围内设定多个测试频率点和每个频率点的外接信号发生器输出电压信号幅度；分别产生不同频率的正弦电压信号，在各个频率点下采集光纤陀螺的输出信号；计算与正弦电压信号作用等效的角振动幅度，并利用最小二乘法计算拟合后光纤陀螺输出角速度信号的幅值；得到光纤陀螺在各频率点的响应度，拟合出光纤陀螺的响应度随频率变化曲线中响应度为0.707时对应的频率值即为光纤陀螺带宽。本发明能够在静态条件下测量光纤陀螺带宽，并且能够测量转台角振动方法无法测量的高带宽光纤陀螺带宽，最大程度上满足了光纤陀螺带宽测试的需求。



CN 104457791 B

1.一种静态条件下测量光纤陀螺带宽的方法，所述光纤陀螺包括电连接的运算放大器和Y波导，其特征在于步骤如下：

(1)将光纤陀螺内电连接的运算放大器和Y波导断开，将光纤陀螺内的运算放大器和外接信号发生器的输出端分别与外接运算放大电路的两个输入端电连接，将Y波导的输入端与外接运算放大电路的输出端电连接；

(2)设定光纤陀螺带宽测试的测试频率范围为：0Hz～N_0Hz，并在测试频率范围内设定多个测试频率点，所述测试频率点按照由小到大的顺序构成数组F；

(3)设定步骤(2)数组F中的每个频率点的外接信号发生器输出电压信号幅度A；

(4)光纤陀螺、外接信号发生器和外接运算放大电路上电工作，外接信号发生器按照步骤(2)中设定的频率点和步骤(3)中设定的输出电压信号幅值分别产生不同频率的正弦电压信号，在各个频率点下采集光纤陀螺的输出信号；

(5)在步骤(2)中设定的每个测试频率点条件下，计算步骤(4)中与正弦电压信号作用等效的角振动幅度，将各测试频率点下计算的等效角振动的幅度按照频率从小到大的顺序构成数组B，所述等效角振动的幅度具体由公式：

$$\Omega_A = 2A \cdot \frac{L}{V_H} \cdot \sin(\pi f_0 \tau)$$

给出，式中，Ω_A为等效角振动的幅度，L为光纤陀螺的量程，V_H为光纤陀螺Y波导的半波电压，π为圆周率，f_0为信号发生器当前产生的正弦电压信号的频率，τ为光纤陀螺的本征周期；

(6)在步骤(2)中设定的每个测试频率点条件下，利用最小二乘法，将步骤(4)中采集的光纤陀螺输出信号按照正弦信号拟合出光纤陀螺输出角速度信号，计算拟合后光纤陀螺输出角速度信号的幅值，并将光纤陀螺输出角速度信号的幅值按照频率由小到大的顺序构成数组C；

(7)将数组C中各频率点光纤陀螺输出角速度信号的幅值分别除以数组B中对应频率点等效角振动幅度；得到光纤陀螺在各频率点的响应度，并将各频率点光纤陀螺的响应度按照频率由小到大的顺序构成数组D；

(8)利用数组D和数组F，拟合出光纤陀螺的响应度随频率变化曲线，该曲线中响应度为0.707时对应的频率值即为光纤陀螺带宽。

2.根据权利要求1所述的一种静态条件下测量光纤陀螺带宽的方法，其特征在于：所述步骤(4)中采集光纤陀螺的输出信号时，每个频率点采集时间不少于10s。

3.根据权利要求1所述的一种静态条件下测量光纤陀螺带宽的方法，其特征在于：所述步骤(2)中N_0的取值范围为：$0<N_0\leq 2000$。

一种静态条件下测量光纤陀螺带宽的方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种测量光纤陀螺带宽的方法，特别是一种静态条件下测量光纤陀螺带宽的方法，属于光纤陀螺测试领域，适合于光纤陀螺的带宽测量。

背景技术

[0002] 闭环干涉型光纤陀螺仪是一种基于Sagnac效应的角速度传感器，其系统构成如图2所示。在光纤陀螺光路中，光源发出的光经过耦合器后到达Y波导，经过Y波导后分成强度相同的两束光进入光纤环，在光纤环中传播一周后，两束光在Y波导处汇合并形成干涉光束，由于光纤环相对惯性空间存在着转速，两束光之间存在着与光纤环转速成正比的相位差。干涉光束经耦合器后进入探测器，探测器将干涉光束的强度信号转换为电信号。光纤陀螺电路实时检测干涉光束的相位差，并将相位差补偿掉，由于补偿的相位差与转速成正比，所以补偿值即可表示光纤环的转速。光路相位差是通过探测器输出的电信号表示检测出来的，光纤陀螺电路对光路施加的相位补偿是通过光纤陀螺电路上的运算放大器对Y波导的输入端施加电压调制信号实现的。

[0003] 通常光纤陀螺的带宽是通过转台角振动的方法测试。测试时将光纤陀螺固定在转台上，光纤陀螺敏感轴与转台转轴平行，当转台以给定的频率和幅度进行正弦角振动时，光纤陀螺输出相应频率的正弦转速信号。光纤陀螺的输出信号的幅度与转台输入转速的幅度的比值称为光纤陀螺的响应度，根据不同角振动频率下光纤陀螺的响应度，可拟合光纤陀螺响应度随角振动频率的变化曲线，即幅频曲线，通常定义幅频曲线下降到-3dB时对应的频率点为光纤陀螺带宽。

[0004] 在上述带宽测试过程中，转台的作用是在提供正弦转动信号，作为带宽测试的输入信号，光纤陀螺的输出信号即是对输入信号的相应。由Sagnac效应可知，在转台的正弦角振动使得光纤陀螺内部产生的物理效应是光纤陀螺光路中的干涉光束之间产生了与转台转速同频的正弦相位差。光纤陀螺将该相位差检测出并转化成转速值输出。

[0005] 在静态条件下，在光纤陀螺的Y波导施加正弦的电压信号

[0006] $V(t)=A\cdot\sin(2\pi f_0 t)$ (1)

[0007] 其中A为信号幅度，t为时间，f_0为信号频率，π为圆周率。则该信号对两个干涉光束产生的相位调制分别为

[0008] $$Y_0(t)=\frac{\pi}{V_H}A\cdot\sin(2\pi f_0 t) \qquad (2)$$

[0009] $$Y_1(t)=\frac{\pi}{V_H}A\cdot\sin\left[2\pi f_0(t-\tau)\right] \qquad (3)$$

[0010] 其中V_H为Y波导的半波电压，τ为光纤陀螺的本征周期。则该电压信号使光纤陀螺光路中干涉光束之间产生的相位差为

[0011] $$\Delta Y(t)=Y_1(t)-Y_0(t)=2A\cdot\frac{\pi}{V_H}\cdot\sin(\pi f_0\tau)\cdot\cos\left[2\pi f_0(t-\tau/2)\right] \qquad (4)$$

[0012] 由公式(4)可知，在该电压信号的作用下光纤陀螺产生的物理效应是光纤陀螺光路内的干涉光束之间产生与输入电压信号同频的正弦相位差。由Sagnac效应可知，该物理效应等效的光纤陀螺的输入转速为

[0013] $$\Omega(t)=\Delta Y(t)\cdot\frac{2L}{2\pi}=2A\cdot\frac{L}{V_H}\sin(\pi f_0\tau)\cdot\cos\left[2\pi f_0(t-\tau/2)\right] \qquad (5)$$

[0014] 其中L表示光纤陀螺量程。

[0015] 由公式(5)可知，在正弦电压信号$V(t)=A\cdot\sin(2\pi f_0 t)$的作用下，等效于光纤陀螺进行频率为$f_0$，幅度为$2A\cdot\frac{L}{V_H}\sin(\pi f_0\tau)$的正弦角振动。

[0016] 若静态条件下将正弦电压信号与光纤陀螺电路产生的闭环调制信号按照图3所示的电路叠加在一起后施加在Y波导上，根据光纤陀螺的检测原理，正弦电压信号产生的相位差将被光纤陀螺检测到并补偿掉，光纤陀螺将补偿值作为转速值输出。由此可知，在正弦电压信号的作用下的光纤陀螺在静态条件下的输出与转台角振动时的输出一致。

[0017] 目前测试光纤陀螺带宽除了使用转台角振动的方法外，还有采用磁场发生器产生交变磁场的方法以及光纤陀螺软件检测的方法等。转台角振动方法测试光纤陀螺带宽，要求转台角振动的最高频率必须大于光纤陀螺带宽。目前转台能够实现的最大角振动频率为150Hz左右，因此，对于带宽超过转台最大角振动频率的光纤陀螺，其带宽无法通过转台角振动的方法准确测量。磁场发生器能够产生频率足够高的交变磁场，因而可实现大带宽光纤陀螺带宽的测试，但该方法在测试过程中会使光纤陀螺产生较大噪声，影响测量精度，另外，对于采取了磁屏蔽措施的中高精度的光纤陀螺，也很难采用该方法测试带宽。光纤陀螺软件测试带宽的方法需要将带宽测试的输入条件添加到光纤陀螺软件中，并对光纤陀螺软件进行适当更改，编译后下载到光纤陀螺的硬件中，根据光纤陀螺的输出计算光纤陀螺带宽。该测试方法的输入条件需要熟悉光纤陀螺软件的专业人员进行甄别，因此在没有开放光纤陀螺软硬件资源的情况下，其测试结果很难得到用户方或第三方认可。通常光纤陀螺的软硬件资源属于研制单位的核心技术，研制单位一般不会对外开放。

发明内容

[0018] 本发明的技术解决问题是：克服现有技术的不足，发明了一种静态条件下测试光纤陀螺带宽的方法，能够在静态条件下测量光纤陀螺带宽，并且能够测量转台角振动方法无法测量的高带宽光纤陀螺带宽，最大程度上满足了光纤陀螺带宽测试的需求。

[0019] 本发明的技术解决方案是：一种静态条件下测量光纤陀螺带宽的方法，所述光纤陀螺包括电连接的运算放大器和Y波导，步骤如下：

[0020] (1)将光纤陀螺内电连接的运算放大器和Y波导断开，将光纤陀螺内的运算放大器和外接信号发生器的输出端分别与外接运算放大电路的两个输入端电连接，将Y波导的输入端与外接运算放大电路的输出端电连接；

[0021] (2)设定光纤陀螺带宽测试的测试频率范围为：0Hz～N_0Hz，并在测试频率范围内设定多个测试频率点，所述测试频率点按照由小到大的顺序构成数组F；

[0022] (3)设定步骤(2)数组F中的每个频率点的外接信号发生器输出电压信号幅度A；

[0023] (4)光纤陀螺、外接信号发生器和外接运算放大电路上电工作，外接信号发生器按

照步骤(2)中设定的频率点和步骤(3)中设定的输出电压信号幅值分别产生不同频率的正弦电压信号,在各个频率点下采集光纤陀螺的输出信号;

[0024] (5)在步骤(2)中设定的每个测试频率点条件下,计算步骤(4)中与正弦电压信号作用等效的角振动幅度,将各测试频率点下计算的等效角振动的幅度按照频率从小到大的顺序构成数组B,所述等效角振动的幅度具体由公式:

[0025] $$\Omega_A = 2A \cdot \frac{L}{V_H} \cdot \sin(\pi f_0 \tau)$$

[0026] 给出,式中,Ω_A为等效角振动的幅度,L为光纤陀螺的量程,V_H为光纤陀螺Y波导的半波电压,π为圆周率,f_0为信号发生器当前产生的正弦电压信号的频率,τ为光纤陀螺的本征周期;

[0027] (6)在步骤(2)中设定的每个测试频率点条件下,利用最小二乘法,将步骤(4)中采集的光纤陀螺输出信号按照正弦信号拟合出光纤陀螺输出角速度信号,计算拟合后光纤陀螺输出角速度信号的幅值,并将光纤陀螺输出角速度信号的幅值按照频率由小到大的顺序构成数组C;

[0028] (7)将数组C中各频率点光纤陀螺输出角速度信号的幅值分别除以数组B中对应频率点等效角振动幅度;得到光纤陀螺在各频率点的响应度,并将各频率点光纤陀螺的响应度按照频率由小到大的顺序构成数组D;

[0029] (8)利用数组D和数组F,拟合出光纤陀螺的响应度随频率变化曲线,该曲线中响应度为0.707时对应的频率值即为光纤陀螺带宽。

[0030] 所述步骤(4)中采集光纤陀螺的输出信号时,每个频率点采集时间不少于10s。

[0031] 所述步骤(2)中N_0的取值范围为:0～2000。

[0032] 本发明与现有技术相比的优点在于:

[0033] (1)本发明中信号发生器可产生的最大信号频率一百兆赫兹,远远大于转台角振动的频率,因此本发明能够测量带宽较大的光纤陀螺带宽,适用范围更广;

[0034] (2)本发明利用信号发生器产生电信号,并利用产生的电信号模拟转台角振动,最终实现光纤陀螺带宽的测量,测试在静态条件下进行,因此简化了测试设备及测试流程,节省了测试成本;

[0035] (3)本发明利用电信号模拟转台角振动进行光纤陀螺带宽的测量,可以避免转台角振动测量方法中地速和转台磁场对光纤陀螺输出的影响,提高了测量精度;

[0036] (4)在带宽测试试验中,光纤陀螺输出的噪声会导致计算光纤陀螺输出信号幅值的产生误差,光纤陀螺在本发明的测试过程中输出噪声低于转台测试的噪声,因此本发明测量精度高于机械转台。

附图说明

[0037] 图1为本发明方法流程图;

[0038] 图2为光纤陀螺组成的示意图;

[0039] 图3为信号叠加电路的示意图;

[0040] 图4为带宽测试系统组成的示意图;

[0041] 图5为采用本发明方法的测试结果。

具体实施方式

[0042] 本方法通过在光纤陀螺Y波导上施加正弦电压信号的方式来等效角运动，进行光纤陀螺带宽测量。该方法的测试系统由外接信号发生器、外接运算放大电路、被测试光纤陀螺、上位机等组件组成，如图4所示，其中外接信号发生器的作用是产生正弦电压信号，使光纤陀螺光路产生与角振动等效的光程差；外接运算放大电路的组成如图3所示，其作用是将正弦电压信号与光纤陀螺的调制信号(由光纤陀螺的运算放大器输出)叠加，叠加过程中光纤陀螺的调制信号的放大倍数为1(或-1)；叠加后的信号施加到Y波导上，使光纤陀螺在静态条件产生角振动条件下的输出；上位机的作用是采集光纤陀螺输出数据。

[0043] 如图1所示为本发明的流程图，从图1可知，本发明提供的一种静态条件下测量光纤陀螺带宽的方法，所述光纤陀螺为光纤陀螺，所述光纤陀螺内包括电连接的运算放大器和Y波导输入端，步骤如下：

[0044] (1)将光纤陀螺内电连接的运算放大器和Y波导输入端断开，将光纤陀螺内的运算放大器和外接信号发生器分别与外接运算放大电路的两个输入端电连接，将Y波导的输入端与外接运算放大电路的输出端电连接；

[0045] 所述外接运算放大电路在图3所示，在图3所示的电路中，取R1＝R2，R3＝R1//R2，根据理想运放的计算公式，输出端信号

[0046] $$VO = V2 - \frac{R1}{R2} \times V1 = V2 - V1 \qquad (6)$$

[0047] 由公式(6)可知，信号叠加器实现了将调制信号与正弦信号的叠加。当V1接“正弦信号”，V2接“调制信号”时，调制信号的放大倍数为1，当V2接“正弦信号”，V1接“调制信号”时，调制信号的放大倍数为-1，两种连接方式都可实现正弦信号与调制信号的叠加；

[0048] (2)设定光纤陀螺带宽测试的测试频率范围为：0Hz～N_0Hz，并在测试频率范围内设定测试频率点，所述测试频率点按照由小到大的顺序构成数组F；所述步骤(2)中N_0的取值范围为：0～2000。

[0049] (3)设定步骤(2)数组F中的每个频率点的外接信号发生器输出电压信号幅度A；

[0050] (4)光纤陀螺、外接信号发生器和外接运算放大电路上电工作，外接信号发生器按照步骤(2)中设定的频率点和步骤及(3)中确定的幅度值产生电信号，采集光纤陀螺的输出信号；所述采集光纤陀螺的输出信号时，每个频率点采集时间不少于10s；

[0051] (5)在步骤(2)中设定的每个测试频率点条件下，计算步骤(4)中外接信号发生器电信号产生的等效角振动幅度，将各测试频率点的等效角振动幅度按照频率从小到大的顺序构成数组B，所述等效角振动幅度具体由公式：

[0052] $$\Omega = 2A \cdot \frac{L}{V_H} \cdot \sin(\pi f_0 \tau)$$

[0053] 给出，式中，Ω为等效角振动幅度，L为光纤陀螺的量程，V_H光纤陀螺Y波导的半波电压，π为圆周率，f_0为信号发生器当前频率，τ为光纤陀螺的本征周期；

[0054] (6)在步骤(2)中设定的每个测试频率点条件下，利用最小二乘法，将步骤(4)中采集的光纤陀螺输出信号按照正弦信号拟合出光纤陀螺输出角速度信号，计算拟合后光纤陀螺输出角速度信号的幅值，并将光纤陀螺输出角速度信号的幅值按照频率由小到大的顺序

构成数组C。

[0055] (7)将数组C中各频率点光纤陀螺输出角速度信号的幅值分别除以数组B中对应频率点等效角振动幅度;得到各频率点光纤陀螺的响应度,并将各频率点光纤陀螺的响应度按照频率由小到大的顺序构成数组D;

[0056] (8)利用数组D和数组F,拟合出光纤陀螺的响应度随频率变化曲线,并对拟合后的曲线进行归一化,得到归一化曲线,归一化曲线中响应度为0.707时对应的频率值即为光纤陀螺带宽。

[0057] 具体实施例

[0058] 以半波电压V_H=3.2V,量程L=205°/s,本征周期τ=4us的光纤陀螺为例,使用本方法测试带宽的具体实施步骤如下:

[0059] (1)将光纤陀螺与测试系统按照图4所示的关系连接好。

[0060] (2)预先制定输入电压信号的频率点,如数组F所示,F={5,10,20,30,40,50,60,70,80,90,100,120,140,160,180,200,240,280,320,400},单位:Hz。

[0061] (3)设置信号发生器输出电压信号幅度为A=2.5V,按照数组F中的频率值,分别设定信号发生器输出电压信号的频率。

[0062] (4)在每个频率点,采集并保存10s的光纤陀螺的输出数据。

[0063] (5)根据公式$\Omega_A = 2A \cdot \frac{L}{V_H} \cdot \sin(\pi f_0 \tau)$计算,每个频率的电压信号产生的等效角振动的幅值,如数组B所示,B={0.0203,0.0406,0.0812,0.1219,0.1625,0.2031,0.2437,0.2843,0.3249,0.3656,0.4062,0.4874,0.5686,0.6499,0.7311,0.8124,0.9748,1.1373,1.2998,1.6247},单位:°/s。

[0064] (6)在各个频率的电压信号下,利用最小二乘法,将步骤(4)中采集的光纤陀螺输出数据,按照正弦信号拟合出光纤陀螺输出的角速度信号的幅值,按照频率点的顺序构成数组C,C={0.0202,0.0406,0.0799,0.1194,0.1580,0.1962,0.2298,0.2584,0.2976,0.3230,0.3509,0.4053,0.4332,0.4602,0.4895,0.5282,0.5550,0.5688,0.5705,0.5489},单位:°/s。

[0065] (7)将数组C中的值分别除以数组B中相同位置的值,得到归一化的数组D,D={0.9929,0.9989,0.9841,0.9800,0.9726,0.9663,0.9430,0.9088,0.9157,0.8836,0.8639,0.8316,0.7618,0.7081,0.6696,0.6502,0.5693,0.5001,0.438,0.3379}。

[0066] (8)利用数组F、D,拟合出D随F的变化曲线,如图5所示,计算该相应曲线中响应度等于0.707时对应的值F0=158.8Hz,即光纤陀螺带宽为158.8Hz。

[0067] 外接信号发生器最高可产生百兆赫兹量级的正弦电压信号,而目前光纤陀螺的带宽一般小于2000Hz,因此本发明可满足任何带宽光纤陀螺的带宽测试。

[0068] 本发明可在静态条件下测试光纤陀螺带宽,省去了转台角振动方法中所需的转台、激光干涉仪等复杂设备的装配调试,简化了试验设备及流程。信号发生器及运算放大电路相对于转台、激光干涉仪设备成本较低,因而本发明降低了试验成本。

[0069] 在转台角振动测试光纤陀螺带宽的试验中,转台转速的不稳定将导致光纤陀螺输出的噪声增大,影响到计算光纤陀螺输出信号幅值精度,造成测试误差。同样本发明中的方法中信号发生器产生电压信号的噪声同样会影响到计算光纤陀螺输出信号幅值精度,造成

相同的测试误差。但通过两种测试方法的数据比较看，采用本发明方法的噪声远小于转台角振动方法的噪声，因此本发明的测试精度高于转台角振动方法。

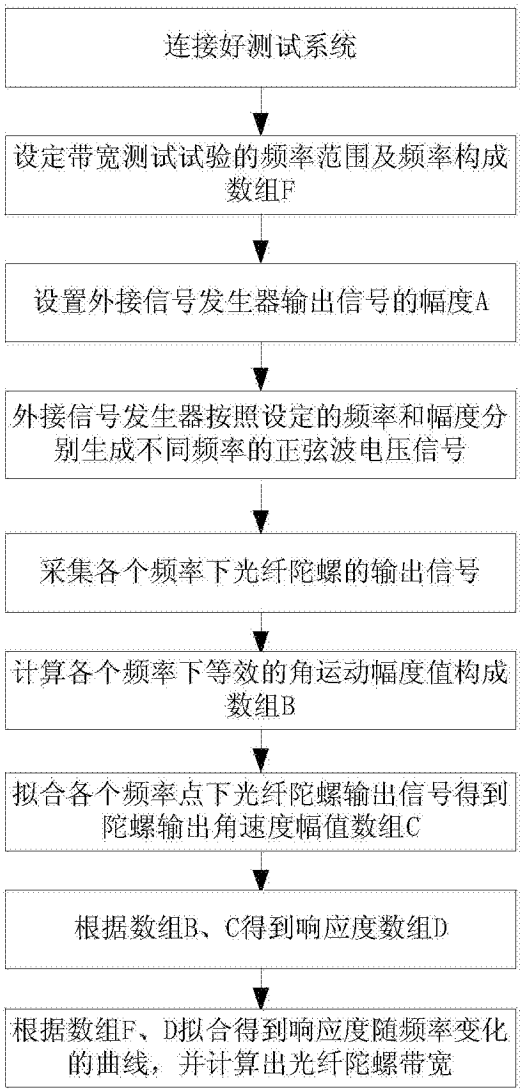

连接好测试系统
设定带宽测试试验的频率范围及频率构成数组F
设置外接信号发生器输出信号的幅度A
外接信号发生器按照设定的频率和幅度分别生成不同频率的正弦波电压信号
采集各个频率下光纤陀螺的输出信号
计算各个频率下等效的角运动幅度值构成数组B
拟合各个频率点下光纤陀螺输出信号得到陀螺输出角速度幅值数组C
根据数组B、C得到响应度数组D
根据数组F、D拟合得到响应度随频率变化的曲线，并计算出光纤陀螺带宽

图1

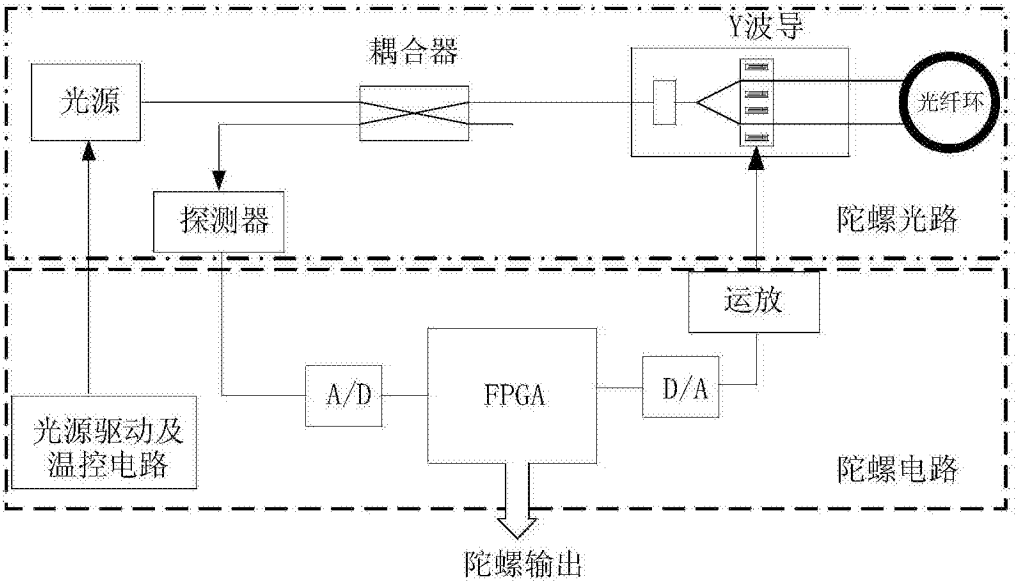

Y波导
耦合器
光源
光纤环
探测器
陀螺光路
运放
A/D
FPGA
D/A
光源驱动及
温控电路
陀螺电路
陀螺输出

图2

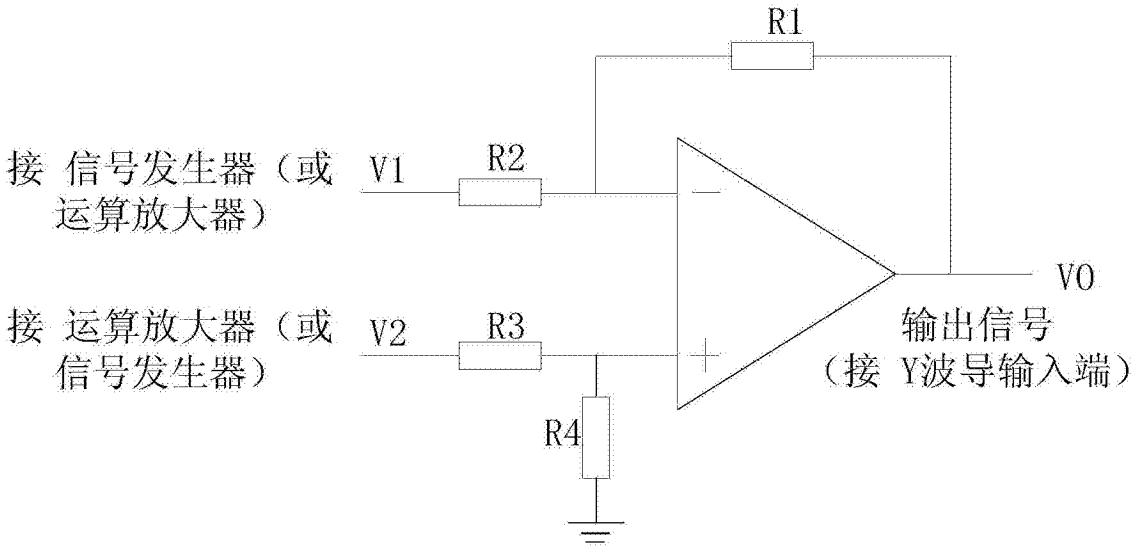

R1
接 信号发生器（或
运算放大器）
V1
R2
V0
接 运算放大器（或
信号发生器）
V2
R3
输出信号
（接 Y波导输入端）
R4

图3

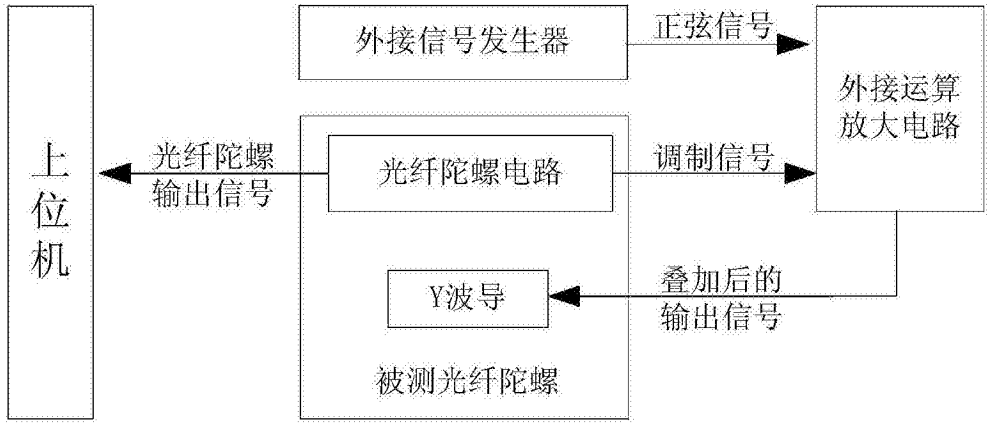

上位机
光纤陀螺输出信号
外接信号发生器
正弦信号
外接运算放大电路
光纤陀螺电路
调制信号
Y波导
叠加后的输出信号
被测光纤陀螺

图4

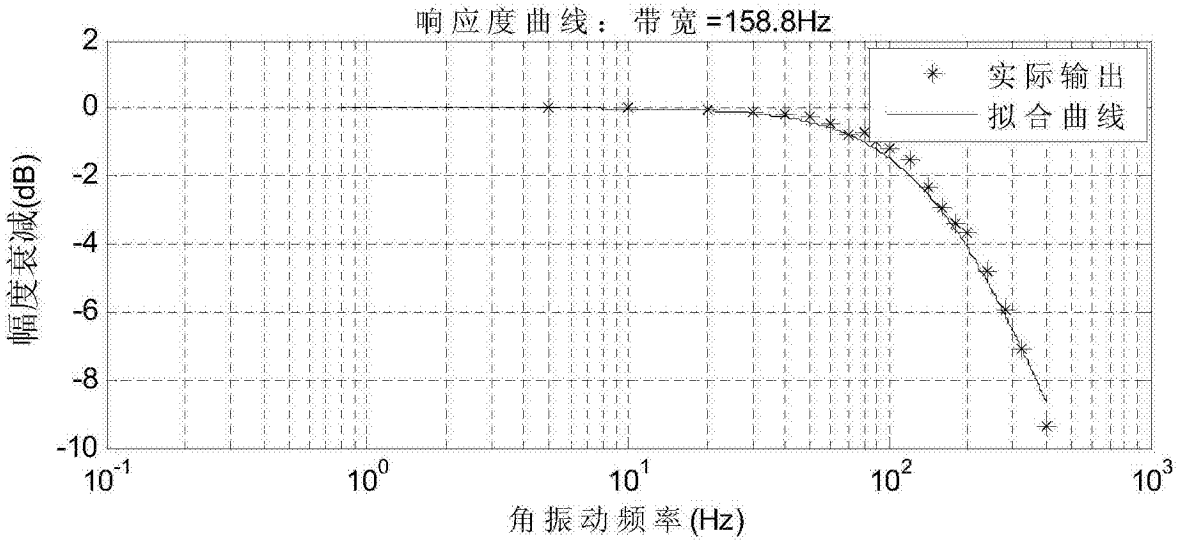

响应度曲线：带宽=158.8Hz
实际输出
拟合曲线
幅度衰减(dB)
角振动频率(Hz)
2
0
-2
-4
-6
-8
-10
10^-1
10^0
10^1
10^2
10^3

图5