



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103472458 B

(45) 授权公告日 2015. 04. 15

(21) 申请号 201310419707. 1

W0 2004025324 A1, 2004. 03. 25, 全文 .

(22) 申请日 2013. 09. 16

W0 2009046717 A2, 2009. 04. 16, 全文 .

(73) 专利权人 中国科学院上海光学精密机械研究所

审查员 余莹洁

地址 201800 上海市嘉定区 800-211 邮政信箱

(72) 发明人 陈卫标 罗远 贺岩

(74) 专利代理机构 上海新天专利代理有限公司 31213

代理人 张泽纯

(51) Int. Cl.

G01S 17/89(2006. 01)

(56) 对比文件

CN 101825713 A, 2010. 09. 08, 全文 .

CN 201159766 Y, 2008. 12. 03, 全文 .

CN 101819270 A, 2010. 09. 01, 全文 .

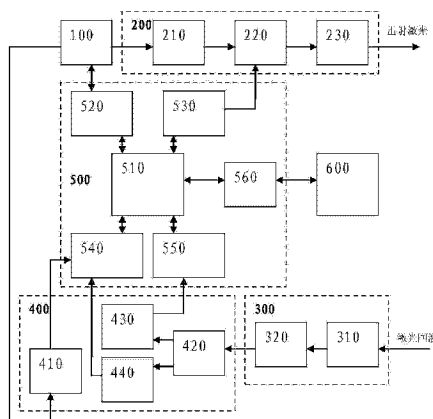
权利要求书2页 说明书6页 附图2页

(54) 发明名称

基于声光扫描的三维视频激光雷达系统

(57) 摘要

一种基于声光扫描实现三维视频激光雷达系统, 由激光器、激光发射模块、激光接收模块、信号处理模块、主控电路模块和上位机处理程序模块组成。本发明克服了基于传统扫描方式的三维成像激光雷达应用中所面临的成像速度慢、体积大、质量大等问题, 利用二维声光扫描器件, 快速灵活得改变扫描角度、扫描角度范围以及角度分辨率, 实现三维视频成像, 能够满足对成像速度要求较高的特殊场合的需求, 同时利用二维声光扫描器件的体积小、质量轻、功耗低等优点, 大大减小了系统的体积和重量。



1. 一种基于声光扫描的三维视频激光雷达系统,其特征是:该激光雷达系统由激光器(100)、激光发射模块(200)、激光接收模块(300)、信号处理模块(400)、主控电路模块(500)和上位机程序处理模块(600)组成,所述的激光器(100)为高重频、窄脉宽的脉冲光纤激光器,所述的激光发射模块(200)由激光准直透镜(210)、二维声光扫描模块(220)和光学缩束模块(230)组成,所述的激光接收模块(300)由接收光学系统(310)和探测器(320)组成,所述的信号处理模块(400)由起始信号检测电路(410)、信号放大电路(420)、峰值保持电路(430)和阈值甄别整形电路(440)组成,所述的主控电路模块(500)由FPGA主控芯片(510)、激光器控制模块(520)、频率控制模块(530)、时间差检测模块(540)、AD数据采集模块(550)和USB数据通信模块(560)组成,所述的主控电路模块(500)的FPGA主控芯片(510)控制激光器控制模块(520)向激光器(100)周期性地输出触发脉冲,激光器(100)收到触发脉冲后,输出激光脉冲,激光脉冲分为两路,一路激光脉冲经过激光准直透镜(210)、二维声光扫描模块(220),另一路激光脉冲输出至起始信号检测电路(410);FPGA主控芯片(510)在控制输出激光器触发脉冲的同时,控制所述的频率控制模块(530)并行输出频率控制字信号至二维声光扫描模块(220),二维声光扫描模块(220)通过频率控制字调整出射激光的方向,FPGA主控芯片(510)在每次控制输出激光器触发脉冲的同时,改变频率控制字,实现激光出射方向的调整,从而实现激光二维扫描;出射激光脉冲在接触到物体表面后,产生激光回波,激光回波被激光接收模块(300)接收,产生回波电信号,回波电信号传送至信号处理模块(400),回波电信号经过信号放大电路(420)放大后分为两路,一路经过峰值保持电路(430)传送至AD数据采集模块(550),另一路经过阈值甄别整形电路(440)传送至时间差检测模块(540);该时间差检测模块(540)接收到起始信号检测电路(410)的起始信号后开始计数,在接收到阈值甄别整形电路(440)的回波信号后终止计数,得到激光脉冲的飞行时间,上传至FPGA主控芯片(510);在FPGA主控芯片(510)下次控制输出激光器触发脉冲前,AD数据采集模块(550)采集峰值保持电路(430)输出的回波信号的幅值,上传至FPGA主控芯片(510);在AD数据采集模块(550)采集完成后,USB数据通信模块(560)将频率控制字、激光脉冲飞行时间数据和回波信号幅值数据打包,上传至上位机程序处理模块(600);上位机程序处理模块(600)根据频率控制字计算激光的出射角,利用激光脉冲飞行时间计算每个像点的距离,从而反演出物体三维图像,同时根据回波信号的幅值,得到物体的灰度值。

2. 根据权利要求1所述的基于声光扫描实现三维视频激光雷达系统,其特征是:所述的二维声光扫描模块(220)由第一数字频率合成器DDS(221X)、第一信号放大模块(222X)、第二数字频率合成器DDS(221Y)、第二信号放大模块(222Y)和二维声光扫描器件(223)组成。

3. 根据权利要求2所述的基于声光扫描实现三维视频激光雷达系统,其特征是:所述的二维声光扫描器件(223)是利用声光偏转效应,通过快速改变通过声光晶体的声频率,实现通过声光晶体的光束的高速偏转。

FPGA主控芯片(510)通过频率控制模块(530)将并行的两路频率控制字分别发送至第一数字频率合成器DDS(221X)和第二数字频率合成器DDS(221Y),DDS生成特定频率的正弦电信号,经第一信号放大模块(222X)和第二信号放大模块(222Y)分别放大后,传送至二维声光扫描器件(223)。

4. 根据权利要求 2 所述的基于声光扫描实现三维视频激光雷达系统,其特征是:所述的光学缩束模块(230)由缩束镜组(231)构成,由于声光扫描器件的扫描范围小,为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,不能满足实际应用需求,利用缩束镜可以扩大出射光束的扫描范围,以满足应用要求。

5. 根据权利要求 1 所述的基于声光扫描实现三维视频激光雷达系统,其特征是:所述的接收光学系统(310)包括接收望远镜和滤光片。

6. 根据权利要求 1 所述的基于声光扫描实现三维视频激光雷达系统,其特征是:所述的探测器(320)为雪崩光电二极管、光电倍增管或单光子探测器。

7. 根据权利要求 1 所述的基于声光扫描实现三维视频激光雷达系统,其特征是:所述的时间差检测模块(540)是由高精度的 TDC—GPX 时间测量芯片和优化的外围设计电路组成,最高时间测量精度达到 10 皮秒,最高测距精度为 1.5mm。

基于声光扫描的三维视频激光雷达系统

技术领域

[0001] 本发明涉及视频激光雷达,特别是一种基于声光扫描的三维视频激光雷达系统。

背景技术

[0002] 随着激光雷达技术以及光电探测技术的不断发展,激光雷达越来越广泛得应用于遥感探测成像测距等领域,其中,成像激光雷达更是成为发展的主流。三维成像激光雷达具有应用范围广、探测距离远、使用便捷、无接触无损伤等优点,在矿场检测、地形绘制、桥梁监测、公路检测、文物保护、犯罪现场复制等民用领域具有广泛应用,同时在军事、航天等领域也发挥着关键的作用。目前已经存在基于高精度步进电机实现二维扫描的三维成像激光雷达,能够实现大范围、高点密度的三维测量,但同时存在成像速度慢、体积大、质量大等缺点,通常获取一幅完整的三维图像需要数十秒,不能满足对成像速度要求高的特殊场合,如导弹制导、航天器着陆地点的选择、飞机测绘等。为克服三维成像速度慢的缺点,国内外的科研人员尝试了很多技术途径,主要分为两类:

[0003] ①基于面阵探测器的无扫描三维成像激光雷达。此种技术采用大面元的探测器,每个面元作为一个独立的探测器,可单独输出信号,后续电路可测量起始信号到回波信号的时间差,反演出每个像素对应的距离信息,因此,只需发射一个激光脉冲,便可获得整幅三维图像,成像速度快。该技术要求出射激光发散角大,在远距离成像时,对出射激光脉冲能量要求高。由于这种高灵敏度的大面阵探测器制作工艺复杂,目前国内无法自行研制,也无法获得这种探测器,因此,目前国内无法实现基于面阵探测器的无扫描三维成像激光雷达技术。

[0004] ②基于非机械扫描的三维成像激光雷达,国外主要采用二维 MEMS 微镜扫描技术。此种技术主要应用 MEMS 微镜器件,能够在二维方向上快速扫描,同时通过时间飞行法,测量每点的距离,反演得到三维图像。由于 MEMS 微镜器件同样存在制作工艺复杂的问题,国内目前没有成熟的二维 MEMS 器件,所以,此种基于 MEMS 微镜的非机械扫描技术在国内也无法实现。

[0005] 为克服成像速度慢的缺点,同时基于目前国内条件的考虑,提出利用声光扫描的非机械扫描方式,实现快速三维成像。该扫描方式利用声光偏转效应,通过快速改变声频率,实现光束的高速偏转,相比机械的扫描,具有更快速的扫描角度控制和灵活的控制方式,能够实时改变扫描角度范围、角度分辨率和扫描速度,非常适合高速扫描且扫描方式实时可变的应用,同时具有体积小、质量轻等优点。

发明内容

[0006] 本发明要解决的问题在于克服上述基于传统扫描方式的三维成像激光雷达应用中所面临的问题,克服传统三维成像激光雷达成像速度慢、体积大、质量大等缺点,提出一种基于声光扫描实现三维视频激光雷达系统,该系统利用二维声光扫描器件,快速灵活地改变扫描角度、扫描角度范围以及角度分辨率,实现三维视频成像,能够满足对成像速度要

求较高的特殊场合的需求。同时利用二维声光扫描器件的体积小、质量轻、功耗低等优点，大大减小了系统的体积和重量。

[0007] 本发明的技术解决方案如下：

[0008] 一种基于声光扫描的三维视频激光雷达系统，其特点是：该激光雷达系统由激光器、激光发射模块、激光接收模块、信号处理模块、主控电路模块和上位机程序处理模块组成，所述的激光器为高重频、窄脉宽的脉冲光纤激光器，所述的激光发射模块由激光准直透镜、二维声光扫描模块和光学缩束模块组成，所述的激光接收模块由接收光学系统和探测器组成，所述的信号处理模块由起始信号检测电路、信号放大电路、峰值保持电路和阈值甄别整形电路组成，所述的主控电路模块由 FPGA 主控芯片、激光器控制模块、频率控制模块、时间差检测模块、AD 数据采集模块和 USB 数据通信模块组成，所述的主控电路模块的 FPGA 主控芯片控制激光器控制模块向激光器周期性地输出触发脉冲，激光器收到触发脉冲后，输出激光脉冲分为两路，一路激光脉冲经过激光准直透镜至二维声光扫描模块，另一路激光脉冲输出至起始信号检测电路；FPGA 主控芯片在控制输出激光器触发脉冲的同时，控制所述的频率控制模块并行输出频率控制字信号至二维声光扫描模块，二维声光扫描模块通过频率控制字调整出射激光的方向，FPGA 主控芯片在每次控制输出激光器触发脉冲的同时，改变频率控制字，实现激光出射方向的调整，从而实现激光二维扫描；出射激光脉冲在接触到物体表面后，产生激光回波，激光回波被激光接收模块接收，产生回波电信号，回波电信号传送至信号处理模块，回波电信号经过信号放大电路放大后分为两路，一路经过峰值保持电路传送至 AD 数据采集模块，另一路经过阈值甄别整形电路传送至时间差检测模块；该时间差检测模块接收到起始信号检测电路的起始信号后开始计数，在接收到阈值甄别整形电路的回波信号后终止计数，得到激光脉冲的飞行时间，上传至 FPGA 主控芯片；在 FPGA 主控芯片下次控制输出激光器触发脉冲前，AD 数据采集模块采集峰值保持电路输出的回波信号的幅值，上传至 FPGA 主控芯片；在 AD 数据采集模块采集完成后，USB 数据通信模块将频率控制字、激光脉冲飞行时间数据和回波信号幅值数据打包，上传至上位机程序处理模块；上位机程序处理模块根据频率控制字计算激光的出射角，利用激光脉冲飞行时间计算每个像点的距离，从而反演出物体三维图像，同时根据回波信号的幅值，得到物体的灰度值。

[0009] 所述的二维声光扫描模块由数字频率合成器 DDS、信号放大模块、数字频率合成器 DDS、信号放大模块和二维声光扫描器件组成。

[0010] 所述的二维声光扫描器件是利用声光偏转效应，通过快速改变通过声光晶体的声频率，实现通过声光晶体的光束的高速偏转。

[0011] FPGA 主控芯片通过频率控制模块将并行的两路频率控制字分别发送至数字频率合成器 DDS 和数字频率合成器 DDS，DDS 生成特定频率的正弦电信号，经信号放大模块和信号放大模块分别放大后，传送至二维声光扫描器件。

[0012] 所述的光学缩束模块由缩束镜组构成，由于声光扫描器件的扫描范围小，大概为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ，不能满足实际应用需求，利用缩束镜可以扩大出射光束的扫描范围，以满足应用要求。

[0013] 所述的接收光学系统包括接收望远镜和滤光片；

[0014] 所述的探测器为雪崩光电二极管、光电倍增管或单光子探测器。

[0015] 所述的时间差检测模块是由高精度的 TDC—GPX 时间测量芯片和优化的外围设计电路组成,最高时间测量精度达到 10 皮秒,最高测距精度为 1.5mm。

[0016] 本发明的优点在于:

[0017] ①本发明的三维成像速度快,实现三维成像的视频输出。二维声光扫描是一种非机械扫描方式,改变扫描状态无需机械偏转,FPGA 主控芯片改变频率控制器的频率控制字只需几个 FPGA 芯片的时钟周期,大大提高了扫描速度,能够适用于对成像速度要求高的场合。

[0018] ②本发明使用了二维声光扫描器件,与传统扫描方式相比,具有体积小、质量轻、功耗低等优点,便于缩小三维激光雷达系统的体积、质量、功耗,从而拓宽了该激光雷达的应用范围,如军事、航天等领域。

[0019] ③本发明基于二维声光扫描器件的三维成像方式,与非扫描的三维成像方式和其他扫描的成像方式比具有器件工艺成熟、成本低、激光能量要求低等优点。

[0020] ④本发明能够实时工作,操作方便,数据上传后可以及时显示三维图像。

附图说明

[0021] 图 1 为本发明基于声光扫描的三维成像激光雷达的示意框图;

[0022] 图 2 为本发明主控电路板工作时序示意图;

[0023] 图 3 为本发明基于二维声光扫描器件的激光扫描示意图;

具体实施方式

[0024] 本发明以某场合下的对物体的三维视频成像为实施例,采用重频为 100KHz/200KHz、脉宽为 3ns 的光纤激光器为光源,采用二维声光扫描器件,实现扫描范围可调、扫描分辨率可调,实现对物体不同分辨率、不同范围的三维成像。下面结合具体实施例和附图对本发明作进一步说明,但不应该以此限制本发明的保护范围。

[0025] 首先请参照图 1,图 1 为本发明基于二维声光扫描的三维成像激光雷达的整体机构示意图:由图可见,本发明基于声光扫描的三维视频激光雷达系统,由激光器 100、激光发射模块 200、激光接收模块 300、信号处理模块 400、主控电路模块 500 和上位机程序处理模块 600 组成,所述的激光器 100 为高重频、窄脉宽的脉冲光纤激光器,所述的激光发射模块 200 由激光准直透镜 210、二维声光扫描模块 220 和光学缩束模块 230 组成,所述的激光接收模块 300 由接收光学系统 310 和探测器 320 组成,所述的信号处理模块 400 由起始信号检测电路 410、信号放大电路 420、峰值保持电路 430 和阈值甄别整形电路 440 组成,所述的主控电路模块 500 由 FPGA 主控芯片 510、激光器控制模块 520、频率控制模块 530、时间差检测模块 540、AD 数据采集模块 550 和 USB 数据通信模块 560 组成,所述的主控电路模块 500 的 FPGA 主控芯片 510 控制激光器控制模块 520 向激光器 100 周期性地输出触发脉冲,激光器 100 收到触发脉冲后,输出激光脉冲,激光脉冲分为两路,一路激光脉冲经过激光准直透镜 210、二维声光扫描模块 220,另一路激光脉冲输出至起始信号检测电路 410;FPGA 主控芯片 510 在控制输出激光器触发脉冲的同时,控制所述的频率控制模块 530 并行输出频率控制字信号至二维声光扫描模块 220,二维声光扫描模块 220 通过频率控制字调整出射激光的方向,FPGA 主控芯片 510 在每次控制输出激光器触发脉冲的同时,改变频率控制字,

实现激光出射方向的调整,从而实现激光二维扫描;出射激光脉冲在接触到物体表面后,产生激光回波,激光回波被激光接收模块 300 接收,产生回波电信号,回波电信号传送至信号处理模块 400,回波电信号经过信号放大电路 420 放大后分为两路,一路经过峰值保持电路 430 传送至 AD 数据采集模块 550,另一路经过阈值甄别整形电路 440 传送至时间差检测模块 540;该时间差检测模块 540 接收到起始信号检测电路 410 的起始信号后开始计数,在接收到阈值甄别整形电路 440 的回波信号后终止计数,得到激光脉冲的飞行时间,上传至 FPGA 主控芯片 510;在 FPGA 主控芯片 510 下次控制输出激光器触发脉冲前,AD 数据采集模块 550 采集峰值保持电路 430 输出的回波信号的幅值,上传至 FPGA 主控芯片 510;在 AD 数据采集模块 550 采集完成后,USB 数据通信模块 560 将频率控制字、激光脉冲飞行时间数据和回波信号幅值数据打包,上传至上位机程序处理模块 600;上位机程序处理模块 600 根据频率控制字计算激光的出射角,利用激光脉冲飞行时间计算每个像点的距离,从而反演出物体三维图像,同时根据回波信号的幅值,得到物体的灰度值。

[0026] 所述的二维声光扫描模块 220 由数字频率合成器 DDS221X、信号放大模块 222X、数字频率合成器 DDS221Y、信号放大模块 222Y 和二维声光扫描器件 223 组成。

[0027] 所述的二维声光扫描器件 223 是利用声光偏转效应,通过快速改变通过声光晶体的声频率,实现通过声光晶体的光束的高速偏转。

[0028] FPGA 主控芯片 510 通过频率控制模块 530 将并行的两路频率控制字分别发送至数字频率合成器 DDS221X 和数字频率合成器 DDS221Y,DDS 生成特定频率的正弦电信号,经信号放大模块 222X 和信号放大模块 222Y 分别放大后,传送至二维声光扫描器件 223。

[0029] 所述的光学缩束模块 230 由缩束镜组 231 构成,由于声光扫描器件的扫描范围小,大概为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,不能满足实际应用需求,利用缩束镜可以扩大出射光束的扫描范围,以满足应用要求。

[0030] 所述的接收光学系统 310 包括接收望远镜和滤光片;

[0031] 所述的探测器 320 为雪崩光电二极管、光电倍增管或单光子探测器。

[0032] 所述的时间差检测模块 540 是由高精度的 TDC—GPX 时间测量芯片和优化的外围设计电路组成,最高时间测量精度达到 10 皮秒,最高测距精度为 1.5mm。

[0033] 其次请参考图 2,图 2 为本发明主控电路板工作时序示意图。如图所示,FPGA 主控芯片 510 通过激光器控制模块 510 转送给激光器一个触发脉冲,激光器接收到触发脉冲后出光。在打开激光的同时,通过频率控制模块 530 将频率控制字传送至二维声光扫描模块 220,激光按照设定的方向出射。同时,初始化时间差检测模块 540、AD 模块 550 和 USB 数据通信模块 560,使其处于正常工作状态。TDC 时间差检测模块 520 接收到两个信号,起始参考信号晚于激光器触发脉冲数十纳秒,起始信号和终止信号的时间差为脉冲飞行时间,在下次发送激光器触发脉冲时,将数据打包上传至上位机。

[0034] 然后请参考图 3,图 3 为本发明基于二维声光扫描器件的激光扫描示意图,频率控制模块 530 在激光器打开时,将频率控制字并行写入数字频率合成器 DDS221X 和数字频率合成器 DDS221Y,DDS 按照频率控制字产生特定频率的正弦信号,正弦信号分别经信号放大模块 222X 和信号放大模块 222Y 放大后,传送至二维声光扫描器件 223 的两个不同方向,利用声光偏转效应实现激光偏转角度的控制。在激光器控制模块 520 输出激光触发脉冲时,改变 X、Y 方向频率控制字,从而改变通过二维声光器件 X、Y 方向上的声频率,实现改变激

光的偏转方向。FPGA 主控芯片 510 通过频率控制模块 530 改变频率控制字通常只需要几个时钟周期,因此,能够快速改变出射激光的偏转角度,只需几十纳秒到几百纳秒。另外,频率控制字在一定范围内,可任意改变,因此,二维声光扫描器件 223 能够方便、灵活、快速地改变激光扫描角度范围、角度分辨率和扫描速度。由于声光扫描器件的扫描范围小,大概为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,不能满足实际应用需求,利用缩束镜 230 可以扩大出射光束的扫描范围,以满足实际应用要求。

[0035] 本实施例采用的主要器件有:重频为 100KHz/200KHz、脉宽为 3ns 的光纤脉冲激光器 100;二维声光扫描器件 223 为 AA.DTS.XY-400;FPGA 主控芯片 510 采用时钟频率为 40MHz 的 Cyclone II 系列的 EP2C8Q208I8 芯片;时差检测电路 540 采用 2 通道时间测量芯片 TDC-GPX,工作于 R 模式,通过器件内部的门电路延时支持 27ps 的测量精度;AD 数据采集模块 550 采用高速 14 位 AD 采集芯片 AD1674;USB 数据通信模块 560 采用的器件为 CYPRESS 的 C7Y68013A-AXC100,支持 USB2.0 协议,内嵌增强型的 8051 处理器。

[0036] 结合图 1、图 2 和图 3,本实施例的基于二维声光扫描器件的快速三维成像激光雷达系统的工作过程是:

[0037] ①参数设置和器件准备:

[0038] 编写 FPGA 主控程序并烧入 FPGA 主控芯片 510,设置系统的初始状态:激光器控制模块 520 触发脉冲无输出,频率控制模块 530 输出为 0,时差检测模块 540 的 2 通道时间测量芯片 TDC-GPX 工作于 R 模式,R 模式为 TDC-GPX 芯片通过器件内部的门电路延时支持 27ps 的测量精度,输入电平可为 LVPECL,主控板采用 LVTTTL 电平。

[0039] ②FPGA 主控芯片 510 控制激光器控制模块 520 输出触发脉冲的,触发脉冲触发激光器输出激光脉冲,同时,频率控制模块 530 将 X、Y 方向的频率控制字分别写入数字频率合成器 DDS221X 和数字频率合成器 DDS221Y,DDS 按照频率控制字产生特定频率的正弦信号,正弦信号分别经信号放大模块 222X 和信号放大模块 222Y 放大后,传送至二维声光扫描器件 223 的两个不同方向,利用声光偏转效应实现激光偏转角度的控制。在 FPGA 主控芯片 510 每次控制激光器控制模块 520 输出触发脉冲的同时,改变 X、Y 方向的频率控制字,实现激光二维扫描的控制。

[0040] ③AD 数据采集模块 550 在 FPGA 主控芯片 510 控制激光器控制模块 520 输出触发脉冲前,采集峰值保持电路 430 输出的回波信号的幅值信息。

[0041] ④时差检测电路 540 在接收到起始信号检测电路 410 输出的起始信号后,开始时钟计数,在接收到阈值甄别整形电路 440 输出的回波信号后,终止时钟计数,得到激光脉冲飞行时间,FPGA 在下次激光脉冲触发前,读取 TDC-GPX 芯片测量的时间差数据。由于时间测量芯片支持 27ps 的测量精度,因此,理论上能够达到 5.1mm 的距离分辨率,但实际上,由于信噪比、大气湍流等的影响,测量精度在 1 厘米量级。

[0042] ⑤USB 数据通信模块 560 在下次激光脉冲触发前,将频率控制模块 530 的 X、Y 方向上的频率控制字、时差检测电路模块 540 测量的激光脉冲飞行时间数据和 AD 数据采集模块 550 采集的回波信号幅值数据打包,上传至上位机程序处理模块 600。

[0043] ⑥上位机程序处理模块 600 根据 X、Y 频率控制字分别计算激光在 X、Y 方向上的出射角,利用激光脉冲飞行时间计算每个像点的距离,利用激光出射角和每个像点的距离,建立三维坐标系,从而反演出物体三维图像,同时根据回波信号的幅值,得到物体的灰度值。

由于激光器的重频为 100KHz,若图像的分辨率为 63×63 像素,则可实现 25 帧 /s 的帧频输出,实现三维视频输出。若激光器的重频设定为 200KHz,则可实现更高的帧频或更高的图像分辨率。

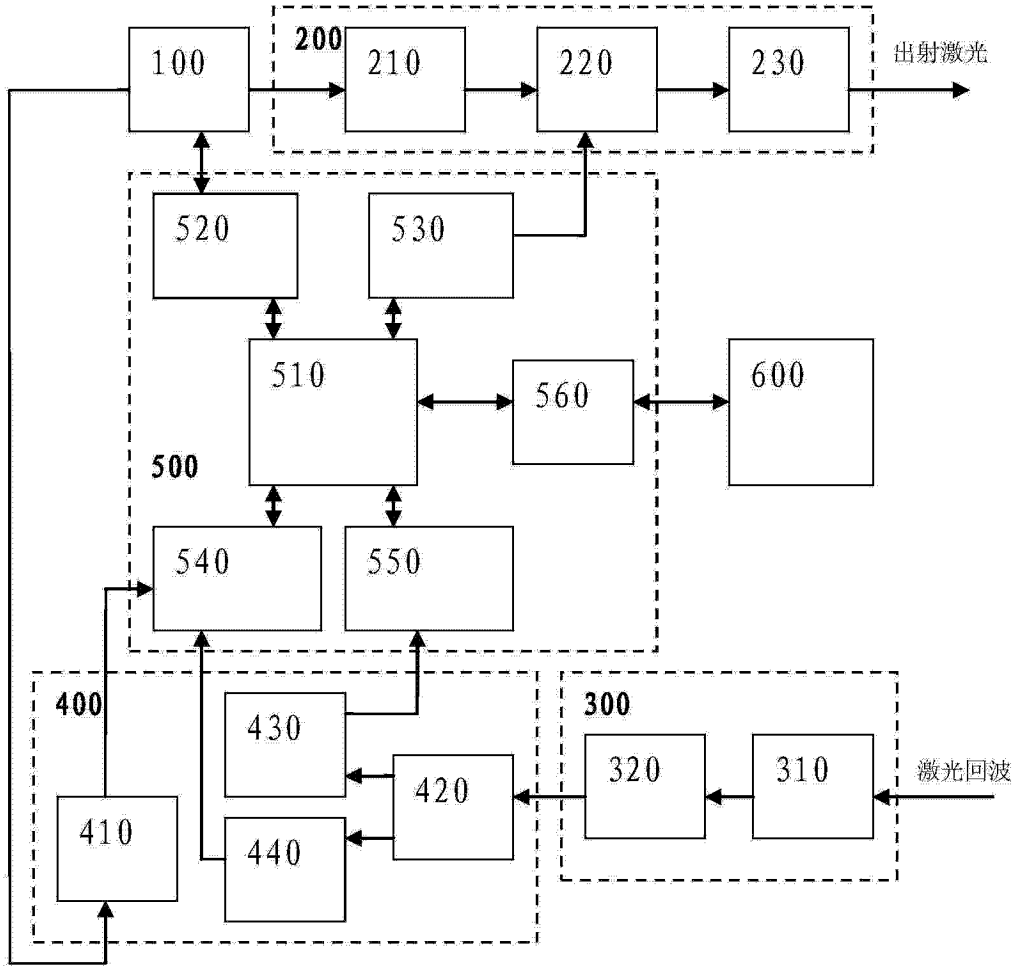


图 1

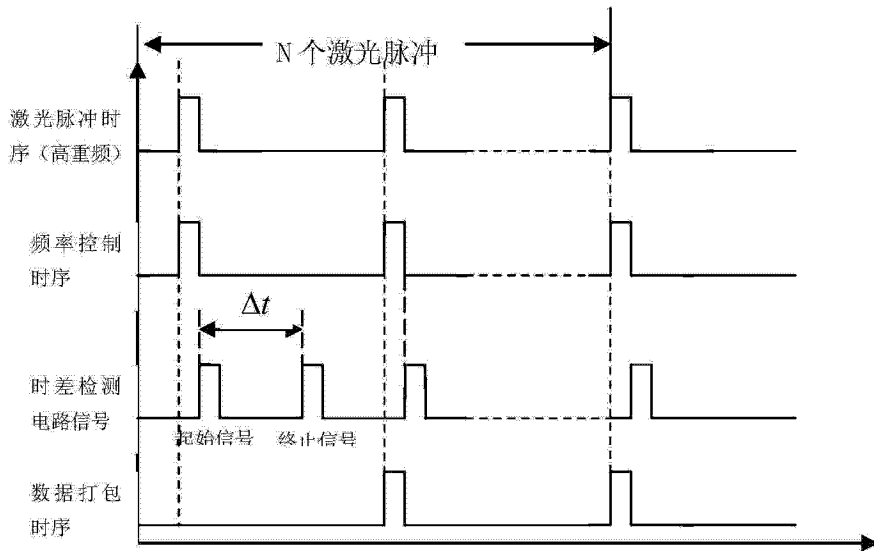


图 2

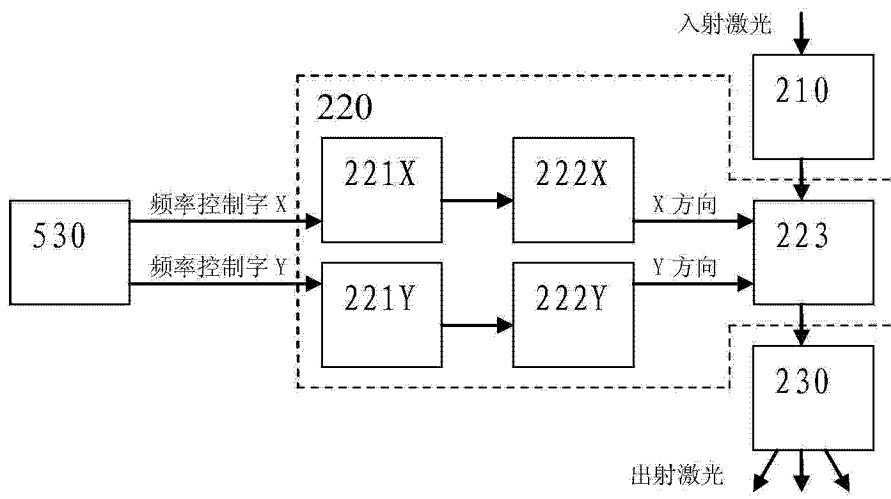


图 3