



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107144856 B

(45)授权公告日 2019.05.24

(21)申请号 201710345077.6

(22)申请日 2017.05.16

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 107144856 A

(43)申请公布日 2017.09.08

(73)专利权人 武汉大学  
地址 430072 湖北省武汉市武昌区珞珈山  
武汉大学

(72)发明人 易帆 柳付超 张云鹏 余长明  
何裕金 谭莹 翁淼 易洋  
潘向亮

(74)专利代理机构 武汉科皓知识产权代理事务  
所(特殊普通合伙) 42222  
代理人 赵丽影

(51)Int.Cl.

G01S 17/95(2006.01)

G01S 7/481(2006.01)

(56)对比文件

CN 106054158 A,2016.10.26,

CN 103792544 A,2014.05.14,

CN 101477196 A,2009.07.08,

CN 105675576 A,2016.06.15,

李仕春 等.绝对探测大气温度的纯转动拉曼激光雷达系统.《物理学报》.2016,第65卷(第14期),143301-1-143301-7.

李亚娟 等.基于纯转动Raman激光雷达的中低空大气温度高精度探测.《地球物理学报》.2015,第58卷(第7期),2294-2305.

审查员 李苏宁

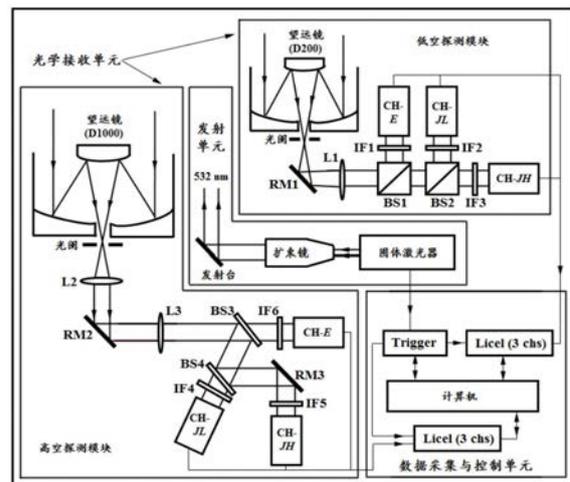
权利要求书2页 说明书6页 附图2页

(54)发明名称

一种高精度测量0-35km大气温度的转动拉曼激光雷达系统

(57)摘要

本发明公开了高精度测量~0-35 km大气温度的转动拉曼激光雷达系统。系统采用分层接收技术,通过低空探测模块和高空探测模块分别针对~0-15 km和~8-35 km高度范围大气进行探测;系统同时以模拟AD和光子计数PC两种工作模式有效记录高、低空探测模块回波数据。最终,系统实现~0-35 km高度范围大气温度的高精度完全覆盖测量。



1. 一种高精度测量0-35km大气温度的转动拉曼激光雷达系统,包括发射单元、光学接收单元、数据采集与控制单元;发射单元采用种子注入的大功率固体激光器输出单脉冲能量800mJ,重复频率30Hz,线宽 $<0.006\text{cm}^{-1}$ 的532.23nm激光并导向天顶;光学接收单元收集来自大气物质的后向散射光;数据采集与控制单元保障整个雷达系统有序工作,其特征在于:所述光学接收单元包括分层接收模块,具体为低空探测模块实现0-15km高度范围回波信号的有效提取,高空探测模块实现8-35km高度范围回波信号的有效提取,二者联合最终实现0-35km高度范围大气温度的完全覆盖探测;所述数据采集与控制单元同时以模拟和光子计数两种工作模式记录来自各探测通道的数据,拓展各通道允许输入的信号强度动态变化范围优于6个数量级;

所述发射单元包括种子注入的固体激光器、扩束镜和发射台;

大功率固体激光器在种子注入后输出线宽 $<0.006\text{cm}^{-1}$ 的532.23nm激光;输出激光单脉冲能量800mJ,重复频率30Hz,通过8倍扩束镜后照射发射台;发射台通过电动精密控制,以高于99.5%的反射率将水平来射激光导向天顶;

所述光学接收单元包括低空探测模块和高空探测模块;低空探测模块包括望远镜系统、反射镜RM1、准直镜L1、分束器BS1、窄带干涉滤光片IF1、弹性探测通道CH-E、分束器BS2、窄带干涉滤光片组IF2、低量子数拉曼探测通道CH-JL、窄带干涉滤光片组IF3、高量子数拉曼探测通道CH-JH;高空探测模块包括望远镜系统、准直镜L2、反射镜RM2、透镜L3、分色镜BS3、窄带干涉滤光片IF6、弹性探测通道CH-E、分色镜BS4、窄带干涉滤光片IF4、低量子数拉曼探测通道CH-JL、转折镜RM3、窄带干涉滤光片IF5、高量子数拉曼探测通道CH-JH;低空探测模块和高空探测模块组合最终实现0-35km高度范围大气温度的完全覆盖探测。

2. 如权利要求1所述的一种高精度测量0-35km大气温度的转动拉曼激光雷达系统,其特征在于:所述低空探测模块实现0-15km高度范围回波信号的有效提取;望远镜系统收集大气后向散射光信号,设置光阑直径以限制系统视场为1.5mrad;望远镜有效口径为203.2mm,焦距2032mm;光信号穿过光阑后由反射镜RM1转折并照射准直镜L1,准直镜L1直径25.4mm,有效焦距100mm;经过准直镜L1的准直光束首先照射分束器BS1;分束器BS1反射约10%的光信号照射窄带干涉滤光片IF1,随后进入弹性探测通道CH-E;分束器BS1透射90%的光信号照射分束器BS2;分束器BS2反射50%的光信号在照射窄带干涉滤光片组IF2后进入低量子数拉曼探测通道CH-JL,同时透射50%的光信号在照射窄带干涉滤光片组IF3后进入高量子数拉曼探测通道CH-JH;分束器BS1与BS2边长25.4mm;窄带干涉滤光片IF1直径25.4mm,中心波长532.23nm,带宽0.3nm,峰值透过率 $>50\%$ ,带外抑制优于3个量级;窄带干涉滤光片组IF2由两片相同的滤光片组成:各滤光片直径25.4mm,中心波长530.55nm,带宽0.6nm,峰值透过率 $>50\%$ ,对带外及532.23nm附近弹性信号的抑制优于6个量级;窄带干涉滤光片组IF3由两片相同的滤光片组成:各滤光片直径25.4mm,中心波长529.21nm,带宽1.0nm,峰值透过率 $>50\%$ ,对带外及532.23nm附近弹性信号的抑制优于6个量级。

3. 如权利要求1所述的一种高精度测量0-35km大气温度的转动拉曼激光雷达系统,其特征在于:所述高空探测模块实现8-35km高度范围回波信号的有效提取;望远镜系统收集大气后向散射光信号,设置光阑直径以限制系统视场为0.4mrad;望远镜有效口径1000mm,系统焦距8000mm;光信号穿过光阑后由准直镜L2准直,随后为反射镜RM2导向水平后照射透镜L3;准直镜L2直径25.4mm,有效焦距128mm;经过透镜L3的准直光束首先照射分色镜BS3,

分色镜BS3以>70%的透过率透过532.05-532.35nm范围光,随后穿过窄带干涉滤光片IF6后进入弹性探测通道CH-E;分色镜BS3以>95%的反射率反射528.50-530.90nm范围光,随后照射分色镜BS4;分色镜BS4以>80%的透过率透过530.27-530.77nm范围光,随后穿过窄带干涉滤光片IF4后进入低量子数拉曼探测通道CH-JL;分色镜BS4以>95%的反射率反射528.50-529.80nm范围光,经反射镜RM3转折后照射窄带干涉滤光片IF5后进入高量子数拉曼探测通道CH-JH;分色镜BS3与分色镜BS4直径25.4mm,工作角度6°;带干涉滤光片IF6直径25.4mm,中心波长532.23nm,带宽0.3nm,峰值透过率>50%,带外抑制优于3个量级;窄带干涉滤光片IF4直径25.4mm,中心波长530.55nm,带宽0.6nm,峰值透过率>50%,对带外及532.23nm附近弹性信号的抑制优于6个量级;窄带干涉滤光片IF5直径25.4mm,中心波长529.21nm,带宽1.0nm,峰值透过率>50%,对带外及532.23nm附近弹性信号的抑制优于6个量级。

4.如权利要求1所述的一种高精度测量0-35km大气温度的转动拉曼激光雷达系统,其特征在于:所述数据采集与控制单元包括计算机、时序电路Trigger、两个三通道的Licel瞬态记录仪;

计算机控制两个三通道的Licel瞬态记录仪分别采集来自高、低探测模块中三个探测器的信号,通过时序电路Trigger控制整个雷达系统自动有序工作;每个Licel瞬态记录仪同时以模拟和光子计数两种工作模式记录原始数据,数据通过一根网线传输至计算机并自动存储。

## 一种高精度测量0-35km大气温度的转动拉曼激光雷达系统

### 技术领域

[0001] 本发明属于激光雷达遥感探测技术领域,具体涉及一种能够准确、高时空分辨率测量自近地面到35km高度范围大气温度的转动拉曼激光雷达系统。

### 背景技术

[0002] 自近地面到35km高度范围是整个地球大气的重要高度区间:向下,它包括大气边界层,是地表与大气的直接相互作用区域;向上,它包括低层大气与中高层大气的过渡区。准确、高分辨率地监测0-35km高度范围的大气温度,对精细刻画在垂直方向上的大气物质、能量/动量的变化与输运等至关重要。激光雷达能够连续工作,具备高时间与空间分辨率的优势,是进行大气探测的有力工具。当前,针对大气温度进行探测的激光雷达在类型上主要包括:共振荧光测温激光雷达,瑞利测温激光雷达和转动拉曼测温激光雷达。共振荧光测温激光雷达需要借助金属原子“示踪物”(例如,Fe、Na、K等)获取回波信号,测温高度范围通常为80-120km。瑞利激光雷达利用大气分子的瑞利回波,在理想气体和静力学平衡假设条件下可得到30-80km洁净大气区域温度,但在30km以下有气溶胶存在时工作失效。转动拉曼测温激光雷达常通过提取大气分子(主要为 $N_2$ 与 $O_2$ 分子)位于不同频谱位置的两路转动拉曼回波信号作比来反演温度,即便在气溶胶存在时也可有效工作,且具备较高的理论测温准确度。

[0003] 当前,已有报道的转动拉曼测温激光雷达系统,其有效探测区间要么对应较低高度范围(例如,从数百米到20km附近),要么对应较高高度范围(例如,从数公里到30km附近),目前尚无实现0-35km高度范围完全覆盖探测的转动拉曼测温激光雷达系统先例。一个重要难点在于,激光雷达回波信号强度与探测高度的平方成反比,且大气分子数密度随高度增加而指数规律减小,这导致激光雷达回波信号强度随探测高度的增加而急剧衰减。理论模拟计算与实践经验都表明,在0-35km高度范围的实际雷达回波信号强度动态变化范围极大,可跨越至少8个数量级!而常见的用于光电转换的探测器件(例如,光电倍增管),在常规工作条件下允许输入的信号幅度变化范围往往只有3-4个量级,信号继续增强将导致探测器工作异常。为此,考虑到拉曼散射效率较低,为有效增强在较高高度上的拉曼回波信号强度,要求配备大功率的激光器,加大望远镜有效口径和尽量提高光学接收系统传输效率;但与此同时,为对较低高度上强信号的准确提取,即让低空回波信号强度落入探测器允许的强度范围之内,则要求极大程度地降低接收光学系统的传输效率(或改变雷达系统光学设计方案,降低发射激光功率与缩小望远镜口径)。可见,在发射激光功率、望远镜口径及光学接收系统效率给定的情况下,对高空弱信号和低空强信号的同时有效接收难以兼顾。或者说,要同时实现对高空弱信号和低空强信号的有效提取,对雷达光学系统提出的性能参数要求是相互矛盾的。

### 发明内容

[0004] 为实现自近地面到35km高度范围内大气温度的高精度探测:一方面,要求有效增

强在较高高度上的拉曼回波信号强度;另一方面,需要同时实现在整个探测高度范围内拉曼回波信号的有效提取。为此,本发明提出了一种高精度测量0-35km大气温度的转动拉曼激光雷达系统,系统由发射单元、光学接收单元和数据采集与控制单元组成。发射单元采用种子注入的大功率固体激光器输出极窄线宽的532.23nm激光并导向天顶;光学接收单元采用分层接收技术,通过低空探测模块实现0-15km高度范围回波信号的有效提取,通过高空探测模块实现8-35km高度范围回波信号的有效提取;数据采集单元同时工作于模拟(AD)与光子计数(PC)模式,有效拓展了探测器允许的输入信号强度动态变化范围(优于6个数量级),控制单元保障整个雷达系统自动有序工作。

[0005] 为了实现上述目的,本发明提供的技术方案是:

[0006] 一种高精度测量0-35km大气温度的转动拉曼激光雷达系统,由发射单元、光学接收单元,数据采集与控制单元组成。发射单元包括种子注入的固体激光器、扩束镜、发射台。光学接收单元包括低空探测模块和高空探测模块:低空探测模块由望远镜系统、反射镜RM1、准直镜L1、分束器BS1、窄带干涉滤光片IF1、弹性探测通道(CH-E)、分束器BS2、窄带干涉滤光片组IF2、低量子数拉曼探测通道(CH-JL)、窄带干涉滤光片组IF3、高量子数拉曼探测通道(CH-JH)组成;高空探测模块由望远镜系统、准直镜L2、反射镜RM2、透镜L3、分色镜BS3、窄带干涉滤光片IF6、弹性探测通道(CH-E)、分色镜BS4、窄带干涉滤光片IF4、低量子数拉曼探测通道(CH-JL)、转折镜RM3、窄带干涉滤光片IF5、高量子数拉曼探测通道(CH-JH)组成。数据采集与控制单元主要由计算机、时序电路Trigger、两个三通道数据采集系统(Licel)组成,对数据进行采集、存储及保障整个雷达系统自动有序工作。

[0007] 固体激光器在种子注入后产生极窄线宽( $<0.006\text{cm}^{-1}$ )的532.23nm激光输出。输出激光单脉冲能量800mJ,重复频率30Hz,通过8倍扩束镜后照射发射台。发射台可电动精密控制,以高于99.5%的反射率将水平来射激光导向天顶。

[0008] 低空探测模块实现0-15km高度范围回波信号的有效提取。望远镜系统收集大气后向散射光信号,设置光阑直径以限制系统视场为1.5mrad。望远镜有效口径为203.2mm,焦距2032mm。光信号穿过光阑后由反射镜RM1转折并照射准直镜L1,准直镜L1直径25.4mm,有效焦距100mm。经过准直镜L1的准直光束首先照射分束器BS1。分束器BS1反射约10%的光信号照射窄带干涉滤光片IF1,随后进入弹性探测通道CH-E;分束器BS1透射90%的光信号照射分束器BS2。分束器BS2反射50%的光信号在照射窄带干涉滤光片组IF2后进入低量子数拉曼探测通道CH-JL,同时透射50%的光信号在照射窄带干涉滤光片组IF3后进入高量子数拉曼探测通道CH-JH。分束器BS1与分束器BS2为边长25.4mm的立方体。窄带干涉滤光片IF1直径25.4mm,中心波长532.23nm,带宽0.3nm,峰值透过率 $>50\%$ ,带外抑制优于3个量级。窄带干涉滤光片组IF2由两片相同的滤光片组成:各滤光片直径25.4mm,中心波长530.55nm,带宽0.6nm,峰值透过率 $>50\%$ ,带外抑制(包括对532.23nm附近弹性信号)优于6个量级。窄带干涉滤光片组IF3由两片相同的滤光片组成:各滤光片直径25.4mm,中心波长529.21nm,带宽1.0nm,峰值透过率 $>50\%$ ,带外抑制(包括对532.23nm附近弹性信号)优于6个量级。

[0009] 高空探测模块实现8-35km高度范围回波信号的有效提取。望远镜系统收集大气后向散射光信号,设置光阑直径以限制系统视场为0.4mrad。望远镜有效口径1000mm,系统焦距8000mm。光信号穿过光阑后由准直镜L2准直,随后为反射镜RM2导向水平后照射透镜L3。准直镜L2直径25.4mm,有效焦距128mm。经过透镜L3的准直光束首先照射分色镜BS3。分色镜

BS3以>70%的透过率透过532.05-532.35nm范围光,随后穿过窄带干涉滤光片IF6后进入弹性探测通道CH-E;分色镜BS3以>95%的反射率反射528.50-530.90nm范围光,随后照射分色镜BS4。分色镜BS4以>80%的透过率透过530.27-530.77nm范围光,随后穿过窄带干涉滤光片IF4后进入低量子数拉曼探测通道CH-JL;分色镜BS4以>95%的反射率反射528.50-529.80nm范围光,经反射镜RM3转折后照射窄带干涉滤光片IF5后进入高量子数拉曼探测通道CH-JH。分色镜BS3与分色镜BS4直径25.4mm,工作角度6°。带干涉滤光片IF6直径25.4mm,中心波长532.23nm,带宽0.3nm,峰值透过率>50%,带外抑制优于3个量级。窄带干涉滤光片IF4直径25.4mm,中心波长530.55nm,带宽0.6nm,峰值透过率>50%,带外抑制(包括对532.23nm附近弹性信号)优于6个量级。窄带干涉滤光片IF5直径25.4mm,中心波长529.21nm,带宽1.0nm,峰值透过率>50%,带外抑制(包括对532.23nm附近弹性信号)优于6个量级。

[0010] 在低空探测模块和高空探测模块中,各弹性探测通道(CH-E)都由中性衰减片(透过率0.1%)、汇聚镜和探测器组成;各拉曼探测通道(CH-JL与CH-JH)都由汇聚镜和探测器组成。利用低空探测模块中两路拉曼信号最终实现0-15km高度范围大气温度的测量,利用高空探测模块中两路拉曼信号最终实现8-35km高度范围大气温度的测量,二者组合最终实现对0-35km高度范围大气温度的完全覆盖探测。

[0011] 数据采集与控制单元主要由计算机、时序电路Trigger、两个三通道的Licel瞬态记录仪组成。计算机通过软件控制两个三通道的Licel瞬态记录仪分别采集来自高、低探测模块中各个探测器的信号,通过时序电路Trigger控制整个雷达系统自动有序工作。每个Licel瞬态记录仪同时以模拟(AD)和光子计数(PC)两种工作模式记录原始数据,数据通过一根网线传输至计算机并自动存储。

[0012] 如上所述的一种高精度测量0-35km大气温度的转动拉曼激光雷达系统,其光学接收单元采用分层接收技术,具体为高空探测模块实现8-35km回波信号的有效提取,低空探测模块实现0-15km回波信号的有效提取,二者联合最终实现0-35km高度范围大气温度的完全覆盖探测。

[0013] 如上所述的一种高精度测量0-35km大气温度的转动拉曼激光雷达系统,发射单元采用大功率固体激光器产生单脉冲能量800mJ,重复频率30Hz的532.23nm激光输出;高空探测模块选择有效口径1000mm的大望远镜收集大气后向散射光信号,限制系统视场为0.4mrad以提高完全进视场高度,分光系统采用小角度(6°)工作的两组分色镜(BS3与BS4)实现两路拉曼信号的分离与高效传输;低空探测模块选择有效口径203.2mm的小望远镜收集大气后向散射光信号,设置系统视场为1.5mrad以降低完全进视场高度,分光系统采用两组分束器(BS1与BS2)实现两路拉曼信号的分离与较低效率的传输;数据采集系统同时以模拟(AD)和光子计数(PC)两种工作模式记录来自各个探测通道的数据。

[0014] 本发明具有以下优点和有益效果:

[0015] 理论模拟与实践经验都表明,地基激光雷达在0-35km高度范围的回波信号强度可跨越至少8个数量级。然而,常见的探测器(光电倍增管)在常规工作条件下允许输入的信号强度变化范围仅为3-4个数量级。因此,单一探测通道难以实现0-35km高度范围信号的完全覆盖测量。本发明光学接收单元采用分层接收技术,具体为高空探测模块限制望远镜系统视场为0.4mrad,针对8-35km高度范围进行探测;低空探测模块设置望远镜系统视场为

1.5mrad降低完全进视场高度,针对0-15km高度范围进行探测;二者组合最终实现0-35km高度范围大气温度的全覆盖探测。

[0016] 由于拉曼散射效率极低,且激光雷达回波信号强度随探测距离的增加而急剧衰减,故在针对高空探测时要着重考虑设法增强回波信号强度。为此,高空探测模块在引入大功率激光器的前提下,采用有效口径1000mm的大望远镜收集大气后向光散射信号,分光系统采用小角度( $6^\circ$ )工作的两组分色镜(BS3与BS4)实现两路拉曼信号的分离与高效传输,保证了高空回波信号强度,同时限制系统视场为0.4mrad以提高完全进视场高度,防止低空信号过强导致探测器工作异常。相反,在低空探测模块中,选择有效口径203.2mm的小望远镜收集大气后向光散射信号,分光系统采用两组分束器(BS1与BS2)实现两路拉曼信号的分离与较低效率的传输,有效控制了实际到达探测器的信号强度。

[0017] 常见的探测器(光电倍增管)工作于模拟(AD)模式时,允许输入的信号强度动态变化范围3个数量级;工作于光子计数(PC)模式时,允许输入的信号强度动态变化范围4个数量级。系统中数据采集单元同时以模拟(AD)和光子计数(PC)两种工作模式记录来自各个探测通道的原始数据,有效拓展了探测器允许输入的信号强度动态范围(优于6个数量级)。实测结果表明,六个探测通道回波信号强度都控制在6个数量级以内。这样,数据采集系统最终实现对0-35km高度范围回波信号的有效记录。

## 附图说明

[0018] 图1为本发明实施例的激光雷达系统框图。RM,反射镜;L,透镜;IF,窄带干涉滤光片;BS,分束器或分色镜;CH-E,弹性探测通道;CH-JL,低量子数拉曼探测通道;CH-JH,高量子数拉曼探测通道;Trigger,时序电路;Licel,三通道瞬态记录仪。

[0019] 图2为本发明实施例的激光雷达系统对大气温度的一次实测结果。

## 具体实施方式

[0020] 本发明由发射单元、光学接收单元、数据采集和控制单元组成。结合附图1,本发明的实施方案具体陈述如下。

[0021] 发射单元包括种子注入的固体激光器、扩束镜和发射台。固体激光器(美国,Continuum,Powerlite 9030)在种子注入后产生单脉冲能量800mJ,重复频率30Hz的532.23nm激光输出(线宽 $<0.006\text{cm}^{-1}$ )。自制的扩束镜以8倍倍率放大入射激光束直径及压缩入射激光束发散角。电控发射台(日本,Kohzu)具备二维调节能力,以 $>99.5\%$ 的反射率将水平来射激光精准导向天顶方向。

[0022] 光学接收单元包括低空探测模块和高空探测模块:低空探测模块由望远镜系统、反射镜RM1、准直镜L1、分束器BS1、窄带干涉滤光片IF1、弹性探测通道(CH-E)、分束器BS2、窄带干涉滤光片组IF2、低量子数拉曼探测通道(CH-JL)、窄带干涉滤光片组IF3、高量子数拉曼探测通道(CH-JH)组成;高空探测模块由望远镜系统、准直镜L2、反射镜RM2、透镜L3、分色镜BS3、窄带干涉滤光片IF6、弹性探测通道(CH-E)、分色镜BS4、窄带干涉滤光片IF4、低量子数拉曼探测通道(CH-JL)、转折镜RM3、窄带干涉滤光片IF5、高量子数拉曼探测通道(CH-JH)组成。

[0023] 低空探测模块实现0-15km高度回波信号的有效提取。卡塞格林式望远镜(美国,

Meade)收集大气后向散射光信号,设置光阑直径以限制系统视场为1.5mrad。望远镜有效口径203.2mm,有效焦距2000mm。光信号穿过光阑后由反射镜RM1转折并照射准直镜L1,准直镜L1(美国,Thorlabs)直径25.4mm,有效焦距100mm。经过准直镜L1的准直光束首先照射分束器BS1。分束器BS1反射约10%的光信号照射窄带干涉滤光片IF1,随后进入弹性探测通道CH-E;分束器BS1透射90%的光信号照射分束器BS2。分束器BS2反射50%的光信号在照射窄带干涉滤光片组IF2后进入低量子数拉曼探测通道CH-JL,同时透射50%的光信号在照射窄带干涉滤光片组IF3后进入高量子数拉曼探测通道CH-JH。分束器BS1(美国,Thorlabs)与分束器BS2(美国,Thorlabs)为边长25.4mm的立方体。窄带干涉滤光片IF1(美国,Barr)直径25.4mm,中心波长532.23nm,带宽0.3nm,峰值透过率>50%,带外抑制优于3个量级。窄带干涉滤光片组IF2(美国,Barr)由两片相同的滤光片组成:各滤光片直径25.4mm,中心波长530.55nm,带宽0.6nm,峰值透过率>50%,带外抑制(包括对532.23nm附近弹性信号)优于6个量级。窄带干涉滤光片组IF3(美国,Barr)由两片相同的滤光片组成:各滤光片直径25.4mm,中心波长529.21nm,带宽1.0nm,峰值透过率>50%,带外抑制(包括对532.23nm附近弹性信号)优于6个量级。

[0024] 高空探测模块实现8-35km高度范围回波信号的有效提取。定制的卡塞格林式望远镜系统收集大气后向散射光信号,设置光阑直径以限制系统视场为0.4mrad。望远镜有效口径1000mm,有效焦距8000mm。光信号穿过光阑后由准直镜L2准直,随后为反射镜RM2导向水平后照射透镜L3。准直镜L2直径25.4mm,焦距128mm。经过透镜L3的准直光束首先照射分色镜BS3。分色镜BS3以>70%的透过率透过532.05-532.35nm范围光,随后穿过窄带干涉滤光片IF6后进入弹性探测通道CH-E;分色镜BS3以>95%的反射率反射528.50-530.90nm范围光,随后照射分色镜BS4。分色镜BS4以>80%的透过率透过530.27-530.77nm范围光,随后穿过窄带干涉滤光片IF4后进入低量子数拉曼探测通道CH-JL;分色镜BS4以>95%的反射率反射528.50-529.80nm范围光,经转折镜RM3后穿过窄带干涉滤光片IF5并进入高量子数拉曼探测通道CH-JH。分色镜BS3与分色镜BS4为订制品(美国,Barr),直径25.4mm,工作角度6°。窄带干涉滤光片IF6(美国,Barr)直径25.4mm,中心波长532.23nm,带宽0.3nm,峰值透过率>50%,带外抑制优于3个量级。窄带干涉滤光片IF4(美国,Barr)直径25.4mm,中心波长530.55nm,带宽0.6nm,峰值透过率>50%,带外抑制(包括对532.23nm附近弹性信号)优于6个量级。窄带干涉滤光片IF5(美国,Barr)直径25.4mm,中心波长529.21nm,带宽1.0nm,峰值透过率>50%,带外抑制(包括对532.23nm附近弹性信号)优于6个量级。

[0025] 在高、低空探测模块中,各弹性探测通道(CH-E)都由中性衰减片、汇聚镜和探测器组成;各拉曼探测通道(CH-JL与CH-JH)都由汇聚镜和探测器组成。中性衰减片(美国,Thorlabs)直径25.4mm,透过率0.1%。汇聚镜(美国,Thorlabs)直径25.4mm,焦距40mm。探测器选用光电倍增管(H10721,Hamamatsu,日本),光敏面直径8mm,对532nm附近光量子效率20%。

[0026] 数据采集与控制单元主要由计算机、时序电路Trigger和两个三通道的Licel瞬态记录仪组成。计算机通过自主开发的软件控制两个三通道的Licel瞬态记录仪采集来自高、低空探测模块中各个探测器的信号,通过自制的时序电路Trigger控制整个雷达系统自动有序工作。每个Licel瞬态记录仪(德国,Licel)同时以模拟(AD)和光子计数(PC)两种工作模式记录原始数据,数据通过一根网线传输至计算机并自动存储。

[0027] 图2展示了本发明实施例的转动拉曼激光雷达系统对大气温度的一次实际探测结果(探测时间为2016年11月03日夜晚。时间分辨率15min;高度分辨率:15km以下30-90m, 15km以上90-500m)。可以看出低空探测模块测温结果(划线)、高空探测模块测温结果(点划线)在8-15km范围高度吻合。高、低空探测模块组合实现0-35km高度范围温度的完全覆盖探测,且与探空气球(武汉市气象局)温度剖面结果高度一致。

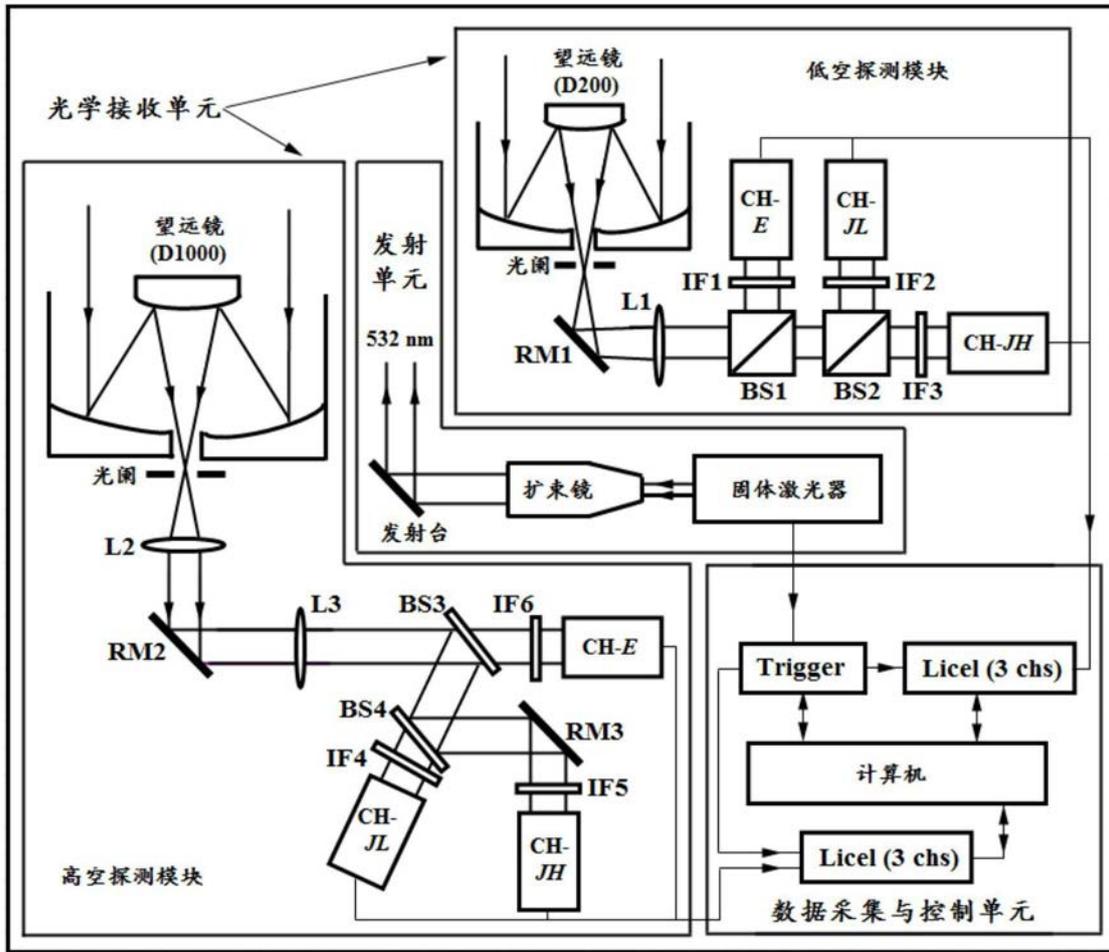


图1

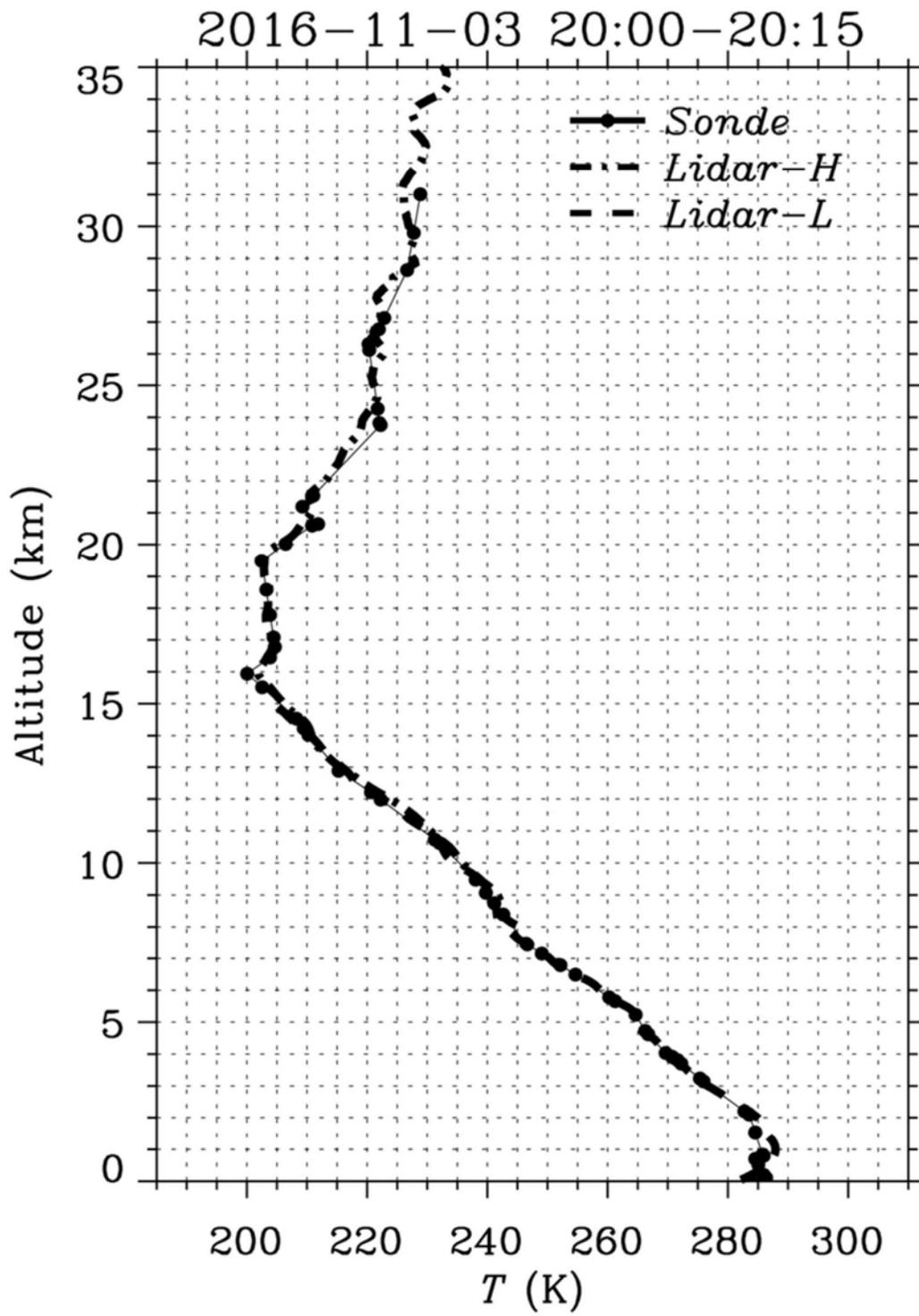


图2