

青岛海洋大学

博士学位论文

非相干激光测风雷达理论模拟及光学系统和软件设计

姓名：刘金涛

申请学位级别：博士

专业：物理海洋

指导教师：刘智深

2001. 5. 1

摘 要

（为了实时连续监测对流层、特别是边界层中的大气风场结构和演变，作者参与研制了我国第一台地基非相干激光多普勒测风雷达。该激光测风雷达采用基于碘分子吸收滤波器的边缘检测技术探测大气风场。

在激光雷达系统中，利用激光种子注入技术和激光频率锁定技术产生线宽约为 90MHz 的、频率稳定的倍频 Nd:YAG 激光脉冲输出。大气 Rayleigh 和 Mie 回向散射信号由扫描转镜和 $\Phi 200\text{mm}$ 的 Cassegrain 望远镜接收，并使用碘分子 1109 吸收线的高波数边缘作为边缘滤波器检测出信号中的多普勒频移信息。激光测风雷达系统软件基于 Windows 平台，完成对整个雷达工作流程的实时控制和大气风场的准实时反演。论文最后对系统中的不足之处提出了改进方案。

作者在论文中首次详细论述了同时利用 Rayleigh 和 Mie 回向散射的基于碘分子滤波器的非相干激光测风原理，推导了大气径向风速公式，分析了测量灵敏度和测量误差，给出了大气水平风场反演算法。（在此基础上，作者又提出了同时利用 Rayleigh 和 Mie 回向散射进行的大气风场测量的方法，并在北航航空兵沧口机场完成了现场测量。该测量方法解决了目前激光测风雷达无法兼顾 Rayleigh 和 Mie 回向散射的问题。研制的激光雷达是按照工程样机的标准设计的，现场实验证明了作者的光机系统和软件设计是可靠和合理的。这推动了激光测风雷达向业务化运行系统的发展。）

关键词：非相干激光多普勒测风雷达；碘分子吸收滤波器；大气风场

Abstract

A ground-based incoherent Doppler wind lidar, which is the first of China, is developed successfully to monitor the wind field in the troposphere and boundary layer. Based on the edge technique, the Iodine-vapor filter is used as the edge filter in the lidar to discriminate Doppler frequency shift.

The transmitter of the wind lidar is an injection seeded Continuum PL7000 Nd:YAG laser operated at 10Hz with the linewidth of 90MHz. The frequency doubled laser output is locked at the 50% absorption level on the high wavenumber edge of the I₂ line 1109. On the receiver, the scan mirror and a Φ 200mm Cassegrain telescope collect the Rayleigh and Mie backscatter signal whose Doppler frequency shift is detected by the Iodine-vapor edge filter. The lidar software is developed on the Windows operation system, which performs the whole measurement flow controlling and takes charge of the atmospheric wind velocity retrieving. With regard to the defect of the wind lidar some improving schemes are discussed in the end of the dissertation.

In the dissertation the author expatiates the theory of the Iodine-vapor filter based incoherent lidar that utilizes Rayleigh and Mie backscatter simultaneity. The methodology for evaluating line-of-sight wind velocity is given. The measurement errors and sensitivities are analyzed. Also the retrieval algorithm of atmospheric wind velocities is deduced. The author also brings forward the corresponding experimental method. The *on site* experiments in the Cangkou airport of China naval forces prove the validity of the theory and method. The lidar system is developed as a preproduction model. The reliability and rationality of the author's optical, mechanical and software designs are verified in the *on site* severe experimental environment. This kind of preproduction research promotes the wind lidar development toward the routine operation system.

Keywords: incoherent Doppler wind lidar; iodine-vapor filter; atmospheric wind velocity

第一章 引言

第一节 研究目的和意义

大气风场在现代社会中的作用日益重要。大气风场观测的一个重要应用是数值天气预报。国际上一直积极发展数值天气预报模型。风场数据与大气压力梯度等参数密切相关,由于风场数据的严重缺乏,给数值预报模型的进一步发展带来了困难。大气风场观测的另一重要应用是帮助我们理解全球的生化及水汽循环,如对流层的水汽储量反映海洋与陆地的水汽交换量等,对这些全球或区域性循环认识的关键在于风。风场测量不仅有重要的科学研究意义,也有重要的社会和军事意义。低空风切变是造成航空灾难的主要因素之一,它对飞机起飞和着陆的危害已被国际航空和气象学界所公认。国际民航组织、世界气象组织以及各国的航空和气象机构正积极开展对风切变探测的研究。军事上,为了保证导弹、火箭、卫星等发射安全和精度,迫切需要对发射场附近的风场进行实时监测和预报。炮兵军队为提高炮火的命中率,也希望能够测量弹头飞行路径上的横向风场数据,以对弹道做必要的修正。航空兵为了战斗机攻击的准确性和安全起降,同样需要先进的机载测风仪器和陆地或舰艇机场附近风场测量设备。

激光多普勒测风雷达被认为目前测量风场的最先进的技术之一,它可以实时提供高精度、高分辨率的大气风场信息,这是目前其他测风技术难以达到的。青岛海洋大学海洋遥感研究所“八五”期间承担了“海面风场激光遥测系统”项目,对基于碘分子滤波器的非相干激光多普勒测风雷达进行了深入研究,研制成功了一套实验室系统^[1,2]。

为了推动我国在激光测风领域的进一步发展,“九五”期间,国家高技术研究计划信息领域信息获取与处理技术主题设立了“固体激光多普勒测风雷达”课题。课题目的是研制和建立一套车载测量低空风场的激光多普勒雷达工程系统,用于灵活机动地实时连续监测对流层、特别是边界层中的大气风场结构和演变,为中尺度灾害性天气短时预报(含数值预报)及相应的科研工作提供探测设备和高分辨率的大气风场数据。表 1-1 为课题

开发合同规定的固体激光多普勒测风雷达系统拟达到的性能指标。

表 1-1 固体激光多普勒测风雷达系统拟达到的性能指标

探测距离	0.5~10km
距离分辨率	0.15km
径向风速范围	0~50m/s
风速精度	1m/s
风向范围	0~360°
风向精度	15°
几何尺寸和重量	安装在标准集装箱(小于 5.9m × 2.3m × 2.3m)内, 重约 200kg

本人作为项目的第三位研究人员承担了理论模拟、光学和机械等工程设计, 以及软件设计等任务。

第二节 激光多普勒测速原理

1964 年, 激光多普勒测速技术首次被提出。激光多普勒测速原理可用图 1-1 简要表示:

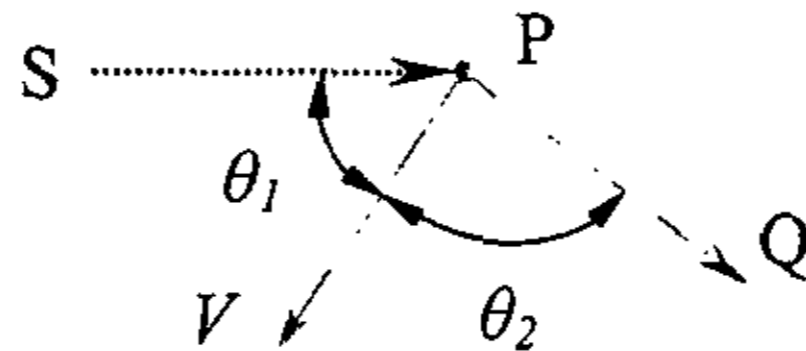


图1-1 激光多普勒测速原理

θ_1 是单频激光 S 方向与散射物 P 运动速度 V 方向的夹角, θ_2 是观察方向 Q 与运动 V 的夹角。设光源 S 频率为 ν , 则 P 点观察到的光频率 ν_1 和 Q 点观察到的光频率 ν_2 分别是^[3]:

$$\nu_1 = \frac{\nu}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \left(1 + \frac{V}{c} \cos \theta_1 \right) \quad \nu_2 = \frac{\nu_1 \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}{\left(1 - \frac{V}{c} \cos \theta_2 \right)} \quad (1.1)$$

由式(1.1)可以得到:

$$\frac{\nu_2}{\nu} = \frac{1 + (V/c) \cos \theta_1}{1 - (V/c) \cos \theta_2} \quad (1.2)$$

对上式做 V/c 的一阶泰勒展开, 并忽略高阶项得到多普勒频移为:

$$\Delta\nu = \nu_2 - \nu = 2 \frac{V\nu}{c} \cos \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \cos \frac{\theta_1 - \theta_2}{2} \quad (1.3)$$

由上式可以看到, 当激光 S 的频率为 ν 为单一值, θ_1 和 θ_2 一定时, 测得的多普勒频移 $\Delta\nu$ 与散射物 P 运动速度 V 成正比。因此, 由多普勒频移就可以得到运动物体的速度。

对于一般的激光雷达系统, $\theta_1 = \theta_2 = 0^\circ$, 则:

$$\Delta\nu = 2 \frac{V}{c} \nu \quad (1.4)$$

第三节 大气气溶胶和分子散射

大气气溶胶是指悬浮在大气中的粒径在 $10^{-4} \sim 10^2 \mu\text{m}$ 之间的各种固态或液态微粒, 如烟灰、尘埃等。气溶胶在大气中随时间、地点和高度变化很大。气溶胶主要集中在 5km 高度以下的对流层, 并随高度呈指数规律递减。但在十几公里处出现随高度递增的气溶胶层, 其峰值位于平流层 20km 高度^[4]。

一般, 由于激光雷达系统的发散角和接收视场角均很小, 因此在激光照射区域的气溶胶散射可认为是单次散射过程。气溶胶的光散射可用 Mie 散射理论进行描述, 其特性与气溶胶的尺度谱、光学折射率和照射光波长等密切相关, 其散射机制较复杂, 一般认为气溶胶角后向散射系数有如下的经验公式:

$$\beta_a(\lambda) = A\lambda^{-B} \quad (1.5)$$

式中 A 、 B 为常数, 随大气高度、气溶胶尺度、光波长等的变化而变化。大气气溶胶角后向散射系数 β_a 可以根据气溶胶的类型和粒径分布由 Mie 散射理论计算出来。

为便于理论计算, 大气气溶胶的散射光谱通常简化为高斯模型。大气气溶胶散射的光谱宽度是由于大气气溶胶粒子的布朗运动造成的多普勒展宽, 其光谱的半高全宽(FWHM)在 0.7kHz~0.7MHz 之间^[5]。

大气分子散射的理论模型是 Rayleigh 散射。Rayleigh 散射可以看作是 Mie 散射当散射粒子的直径远比波长小条件下的近似。

Rayleigh 散射总的散射截面 $\sigma(\lambda)$ 可表示为^[6]:

$$\sigma(\lambda) = \frac{8\pi}{3} \frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{2\pi}{3} \sigma_{\pi}(\lambda) \quad (1.6)$$

式中, $\sigma_{\pi}(\lambda)$ 为 Rayleigh 散射的后向散射截面。由于大气的垂直混合运动, 大气分子的成分从地面到 90km 基本不变。对 90km 以下的混合大气层而言, Rayleigh 后向散射截面为^[7]:

$$\sigma_{\pi}(\lambda) = 5.45 \left[\frac{550}{\lambda(\text{nm})} \right]^4 \times 10^{-28} \text{ cm}^2 \text{ sr}^{-1} \quad (1.7)$$

大气分子的后向散射系数为:

$$\beta_{\pi}(\lambda) \equiv N\sigma_{\pi}(\lambda) \quad (1.8)$$

其中, N 为大气分子浓度。

可以看出, 大气分子后向散射系数与入射波长的四次方成反比, 因此短波长的激发波长可获得更强的后向散射信号。

大气分子散射光谱是由于大气分子的热运动造成的多普勒展宽。分子气体的 Rayleigh 散射光谱可以简化为高斯模型^[6]。

$$R_m(\nu) = \frac{1}{\Delta\nu_D} \left(\frac{4\ln 2}{\pi} \right)^{1/2} \exp \left[\frac{-4\ln 2(\nu - \nu_0)^2}{\Delta\nu_D^2} \right]$$

$$\Delta\nu_D = \nu_0 \left(\frac{8kT \ln 2}{mc^2} \right)^{1/2} \quad (1.9)$$

式中 ν_0 为激光发射频率, m 为分子质量, k 为玻耳兹曼常数。

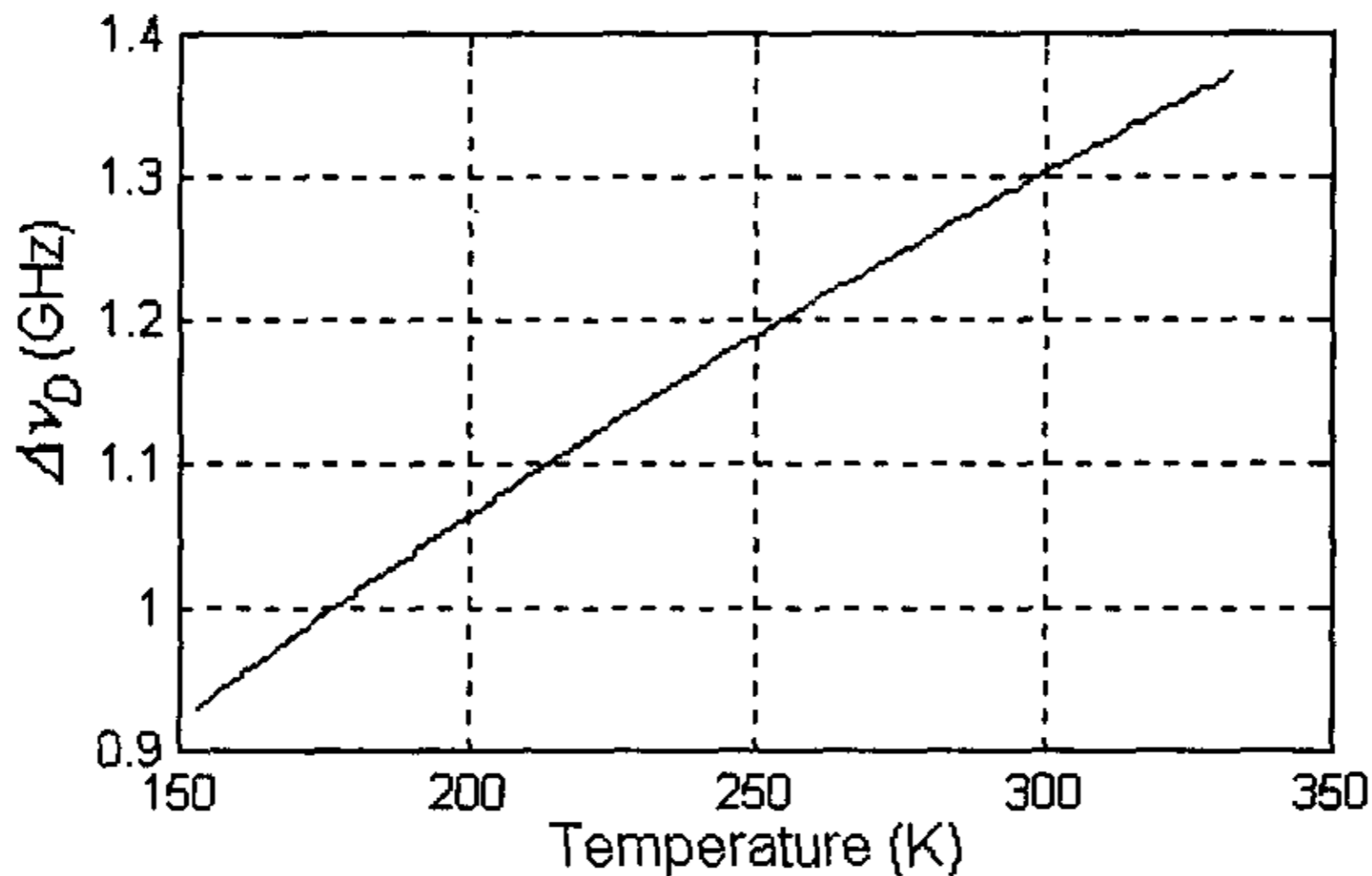


图1-2 Rayleigh散射光谱宽度与大气温度 T 的关系

图 1-2 为利用公式 1.9 计算得到的 $\Delta\nu_D$ 与大气温度 T 的关系。 $\Delta\nu_D$ 对应于大气分子 Rayleigh 散射光谱的光谱宽度。可以看出, Rayleigh 散射光谱宽度随温度变化不是很灵敏。

第四节 激光多普勒测风雷达发展概况

基于激光多普勒原理, 激光多普勒测风雷达接收大气分子的 Rayleigh 散射或气溶胶粒子的 Mie 散射, 并利用相应的信号处理算法从散射信号中提取出多普勒频移信息, 得到大气风场信息。激光多普勒测风雷达的研究是随着激光器技术、光频率检测技术等进步而不断深入和发展的。

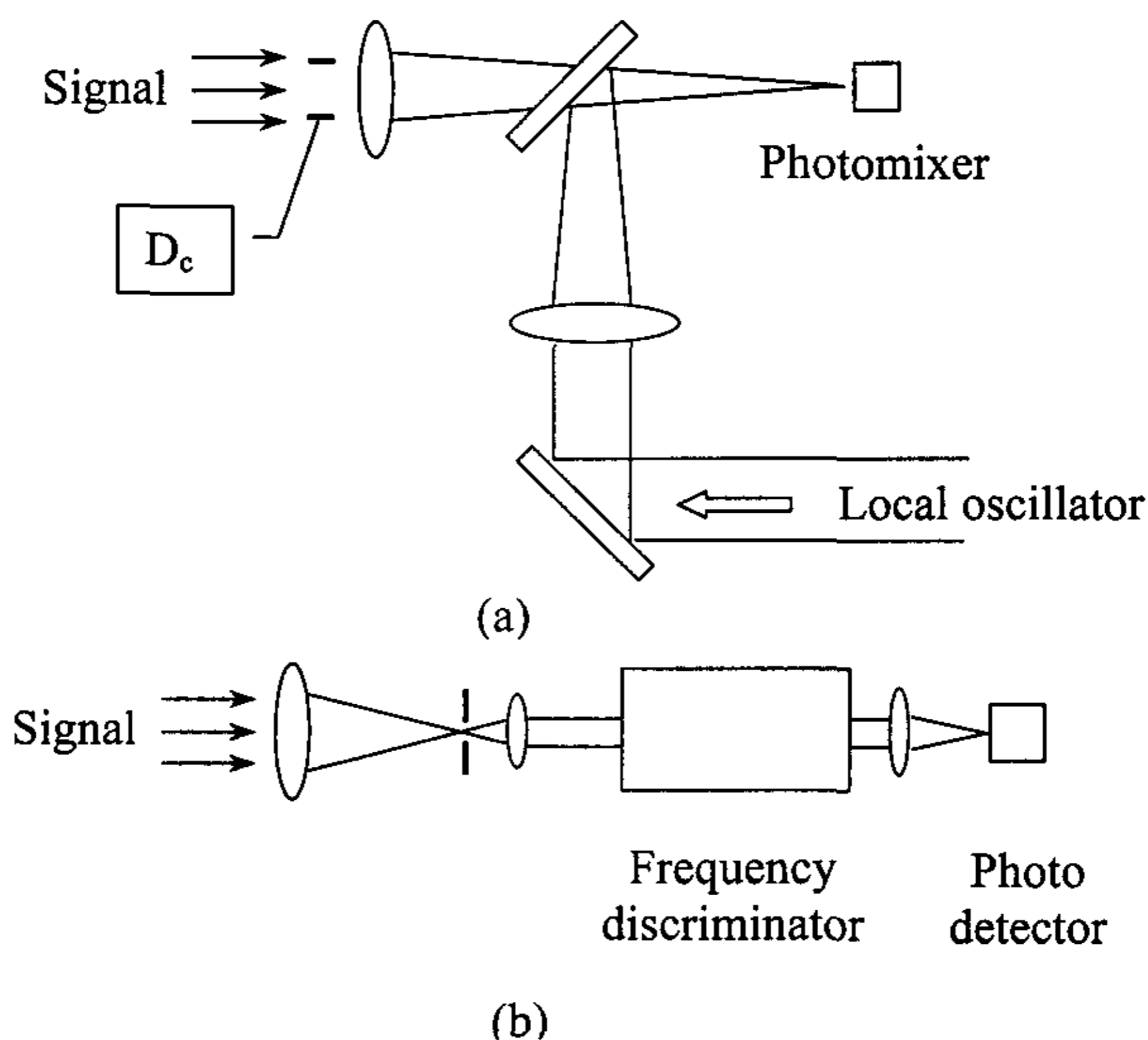


图1-3 相干检测和非相干检测示意图
(a)外差法(相干), (b)直接检测法(非相干)

激光多普勒测风雷达的测量方法主要有两种: 相干(外差)检测和非相干(直接)检测。图 1-3 为两种方法的示意图。相干测风雷达中, 一束激光作为发射光, 另一束激光作为本振光。发射激光射入大气, 大气后向散射光和本振光在光电检测器件接收面混频, 得到两个频率的差频, 即多普勒频移信息。在非相干测风雷达中, 大气后向散射光进入频率检测器件。频

率检测器件对不同频率具有不同的透射率，从而将频率信号转化为强度信号，根据信号强度就可以得到多普勒频移信息。频率检测器件可以采用单个或多个 Fabry-Perot 干涉仪、原子滤波器等。

最早研制成功的是连续相干激光多普勒测风雷达系统。1970年，R. M. Huffaker 等报道了采用连续 CO₂ 激光器的激光多普勒雷达测风系统^[8]。随后 T. R. Lawrence^[9]、R. L. Schwiesow^[10]、M. J. Post^[11]等相继研制了连续相干多普勒激光雷达测风系统。一直到八十年代中期，德国^[12]、加拿大^[13]、美国 NASA^[14,15]等发展出了多台连续相干多普勒激光测风雷达系统。其中比较有代表性的是英国 J. M. Vaughan 和 A. A. Woodfield 研制的机载测风系统。系统安装在英国 HS125 飞机上，进行了数年大量的关于空气速度和风切变的研究实验，包括 1982 年在美国举行的联合大气风研究实验 (JAWS)^[16]。值得一提的是，1972 年 W. C. Cliff 和 R. M. Huffaker 提出了测量三维风场信息的圆锥扫描显示 (VAD) 技术。此后，激光测风雷达系统普遍采用这种扫描显示技术。

由于采用连续 CO₂ 激光器，连续相干激光多普勒测风雷达系统缺失了距离信息。采用脉冲 CO₂ 激光器的脉冲相干激光多普勒测风雷达系统是与连续相干激光多普勒测风雷达系统同时发展出来的。1971 年，美国 NASA/MSFC 的 E. A. Weaver 研制了一台脉冲激光多普勒雷达用来测量清洁空气湍流，并进行飞行测试，得到了横向距离 4~6km、高度为 6km 范围内的清洁空气速率^[17]。该系统于 1984 年进行了改进，探测距离达到 10km，距离分辨率 330m^[18]。1979 年，C. A. DiMarzio 等研制了第一台车载的激光多普勒雷达，进行了阵风和风切变测量，得到了风场的二维平面图，最高风速达 40m/s^[19]。1981 年，美国 JPL 实验室研制了 0.5J TEA (Transversely-Excited Atmospheric pressure) CO₂ 激光器、重复频率 5KHz 的机载激光多普勒雷达，用于探测大气回向散射系数和风场^[20]。使用 CO₂ 激光器的脉冲相干多普勒激光雷达系统中最成功的例子是 1984 年美国 NOAA 研制的地基测风雷达^[21]。系统的成功主要归功于混合 TEA 激光器技术的发展。该类激光器利用激光注入技术将内腔式、低压、连续 CO₂ 激光器的输出经主动锁频后，注入到 TEA 激光器谐振腔中，获得单纵模能量 100mJ、重复频率 10Hz 的脉冲输出。该测风系统曾与

NASA/MSFC 的系统一起在 JAWS 项目中联合实验, 获得 50km 的二维风场^[22]。

直到八十年代末, 相干激光多普勒雷达系统仍以 $10.6\mu\text{m}$ 的 CO_2 系统为主, 这主要是因为 CO_2 激光器的输出激光线宽很窄、频率稳定性高。但是 CO_2 激光器体积较大, 维护也比较复杂。同时, $10.6\mu\text{m}$ 的大气回向散射系数要比短波长, 如 $1.06\mu\text{m}$, 的散射系数要小 4 个量级。因此探测距离一般仅限于 5km 的低对流层。随着固体激光器技术的发展成熟, 采用固体激光器的相干多普勒激光雷达系统的研制日益扩大。1984 年, T. J. Kane 等分析了利用 Nd:YAG 激光器测量大气风场的可行性^[23], 并于 1987 年报道了第一台 Nd:YAG 激光器的相干多普勒激光雷达系统^[24]。随后, M. J. Kavaya 也报道相干 Nd:YAG 的激光多普勒雷达测风系统^[25]。1991 年, K. P. Chan 等研制了短脉冲相干激光多普勒雷达。系统中, 一连续 Nd:YAG 激光器输出分为两束, 一束作为本振光, 另一束注入给一氙灯泵浦的 Nd:YAG 激光器。系统的输出能量为 100mJ, 重复频率为 10Hz^[26]。1993 年, J. G. Hawley 等为美国肯尼迪航天发射中心研制了一台相干 Nd:YAG 激光多普勒测风雷达, 用于监测发射场周围的大气风场, 以避免类似 1986 年的挑战者号航天飞机的悲剧。该系统也采用种子注入的 Nd:YAG 的激光器, 输出能量为 1J, 重复频率为 10Hz, 探测距离达到 26km, 精度 $<1\text{m/s}$ ^[27]。除使用 Nd:YAG 激光器外, NASA/FAA 的 S. M. Henderson 等人研制了波长 $2.02\mu\text{m}$ 的相干 Tm:YAG 激光多普勒雷达系统^[28]。 $2.02\mu\text{m}$ 波长处于人眼睛安全波长, 可以用于机载风切变预报。同时相对于 $10.6\mu\text{m}$ 是短波长, 大气回向散射系数比较大。经过不断改造, 于 1996 年该系统与另一台 $10.6\mu\text{m}$ 脉冲相干激光多普勒测风雷达系统一起装载在 NASA 的波音 737 上, 进行探测飞机航线前方风场的实验和风切变预报的实验^[29]。实验结果表明, 两台雷达系统视线风速测量精度都达到 1m/s。

非相干激光多普勒测风雷达系统的发展要晚于相干激光多普勒雷达测风系统, 这主要因为非相干系统对于激光器线宽的要求较高。1979 年, 美国 Michigan 大学的 V. Abreu 分析了采用位于卫星极轨平台的非相干多普勒激光雷达系统测量大气风场。该系统采用窄线宽 Nd:YAG 激光器、高分辨率 Fabry-Perot 干涉仪和图像光电倍增探测器(IPD)来检测多普勒频移信

息^[30]。1992年, V. Abreu 等在美国 Michigan 大学空间物理研究实验室建立了一台非相干多普勒激光雷达系统, 发射采用 514nm 的 A_r^+ 激光器, 脉冲能量为 $4 \times 10^{-6} \text{J}$, 脉冲重复频率为 8kHz^[31]。随后, 密执根大学又研制了 Nd:YAG 激光器的非相干激光雷达系统, 系统脉冲能量为 60mJ, Fabry-Perot 干涉仪的自由光谱范围为 0.05cm^{-1} , 采用 32 通道的 IPD, 利用气溶胶回向散射信号测到了边界层高度 1.5km 范围内的风场数据^[32]。比密执根大学的系统稍早一点研制成功的是法国 CNRS 研制的系统。该系统采用 532nm 的倍频 Nd:YAG 激光器, 采用双 Fabry-Perot 干涉仪测量大气分子散射的多普勒频移, 第一次获得了高度为 25~60km 对流层以上高空的风场^[33,34]。该系统后来又经过多次改进, 主要是对原有的双 Fabry-Perot 干涉仪进行了优化, 使它同时可以响应气溶胶回向散射信号, 从而可以测量从地面到 60Km 的风场^[35,36]。1993年, 美国 Cornell 大学的 Arecibo 观测中心也研制了一台 Rayleigh 非相干激光多普勒雷达系统, 系统采用单 Fabry-Perot 干涉仪检测多普勒频移信息, 得到了中高空大气风场信息^[37,38]。1997年, 刘智深教授首次提出了利用碘分子吸收滤波器取代了 Fabry-Perot 干涉仪测量大气风场的方案^[39]。同年, J. S. Firedman 等利用碘分子吸收滤波器通过 Rayleigh 散射获得了中高空大气风场^[40]。1992年, C. L. Korb 等提出了边缘检测技术^[41]。1994年, 他们完成了一套基于单 Fabry-Perot 干涉仪的实验室测量系统^[42]。1997年, 他们将实验室系统发展为车载系统, 利用气溶胶回向散射信号测量得到了 1.5km 内的风场^[43]。1998年, C. L. Korb 等又提出了气溶胶散射和分子散射的双边缘技术^[44,45]。

无论是相干、还是非相干多普勒激光雷达系统都是测量大气风场的强有力的工具。这两种方法各有它的优缺点。相干检测方法的优点在于: 高信噪比, 等效噪声功率接近理论极限。这是因为首先本振激光可以提供足够的信号能量。其次, 相干检测仅对信号中的频率信息敏感, 对于信号能量起伏敏感。还有, 相干检测得到中频信号的可减小系统接收带宽, 这样即可以压缩信号带宽, 又便于频率探测。相干检测也有很大的局限性, 主要表现在: ①相干多普勒激光测风雷达系统一般采用 $10.6 \mu\text{m}$ 的 CO_2 激光器, $10.6 \mu\text{m}$ 的 Rayleigh 散射系数要比短波长的 $1.06 \mu\text{m}$ 或 532nm 的 Rayleigh 散射系数小 4 个量级, 因此在气溶胶散射可以忽略的 30~80km

大气层范围内利用 CO_2 多普勒激光雷达难以探测到风场。②对于短波长, 如 $2\mu\text{m}$ 或 $1.06\mu\text{m}$ 相干激光多普勒雷达, Rayleigh 散射系数可以强一些, 但是 Rayleigh 散射谱线的半高全宽(FWHM)约为 1.2GHz , 这对相干检测来说过宽。③根据天线理论, 相干检测的光学准直要求十分严格。要得到高的相干效率, 雷达系统接收视场角 Ω 必须满足 $A_r\Omega=\lambda^2$, 其中 A_r 是接收面积, λ 是波长^[46]。接收视场角的失准严重影响相干效率, 对短波长的相干多普勒激光雷达系统来说, 校准的要求更为苛刻。④大气扰动引起的光学畸变会引入相干损失, 在短波长相干多普勒激光雷达系统中更加明显^[47]。

相对于相干检测, 非相干检测有如下特点: ①由于没有相干效率的限制, 系统接收视场可以是衍射极限的几百倍, 这允许发射激光束有相对大的发散角。②由于每次测量是空间单元的平均, 大气散斑的几乎没有相干损失影响可以忽略。③工作在短波长, 如 $1.06\mu\text{m}$ 、 532nm 或 355nm 的非相干多普勒激光雷达可获得更大数量级的 Rayleigh 散射信号, 提高风场的探测高度。④利用非相干多普勒激光雷达可以同时分析 Mie 散射和 Rayleigh 散射。随着激光技术、光电技术的发展, 非相干多普勒激光雷达测风系统将越来越受到重视, 有着广阔的应用前景。

第五节 本论文主要研究内容

本论文主要分为四部分。第一部分详细论述了非相干测风雷达的理论基础。这一部分中, 首先介绍了目前的几种非相干测风技术, 简要分析了它们之间的异同。随后详细描述了碘分子吸收滤波器, 并论述了基于碘分子吸收滤波器非相干测风雷达的原理, 并利用合理的系统参数理论模拟了测量灵敏度和测量误差。然后, 又阐述了大气径向风速的反演算法, 以及由大气径向风速反演大气风场的算法。第二部分论述了非相干激光多普勒雷达系统总体设计、激光发射系统、光学接收系统等。第三部分详细介绍了激光雷达系统软件, 包括软件总体设计、数据库设计、扫描转镜控制, 以及各测量子系统的设计。同时简要介绍了软件界面和软件使用说明。论文的第四部分给出了测风雷达系统在北航航空兵沧口机场的现场实验结果。论文最后对整个测风雷达系统做了简要总结。

第二章 基于碘分子吸收滤波器的非相干激光多普勒测风原理

第一节 非相干检测技术

目前，非相干激光多普勒测风雷达中应用的频率检测技术主要可分为三种：多通道技术(the fringe imaging technique or the multichannel technique)、双边缘技术(the double-edge technique)和单边缘技术(the edge technique)。

美国 Michigan 大学的激光雷达系统采用多通道技术。多通道技术是利用高分辨率 Fabry-Perot 干涉仪和图像光电倍增探测器(IPD)来检测多普勒频移信息。其中图像光电倍增探测器共有 32 个通道，实际系统只应用了最内部的 12 个通道。系统中这 12 个通道与高分辨率 Fabry-Perot 干涉仪的干涉环相匹配。大气回波信号中的多普勒频移会造成干涉环的移动，从而 12 个通道探测到的能量也会相应发生变化，如图 2-1 所示^[48]。通过检测图 2-1(b)中曲线峰值位置，就可以得到多普勒频移。

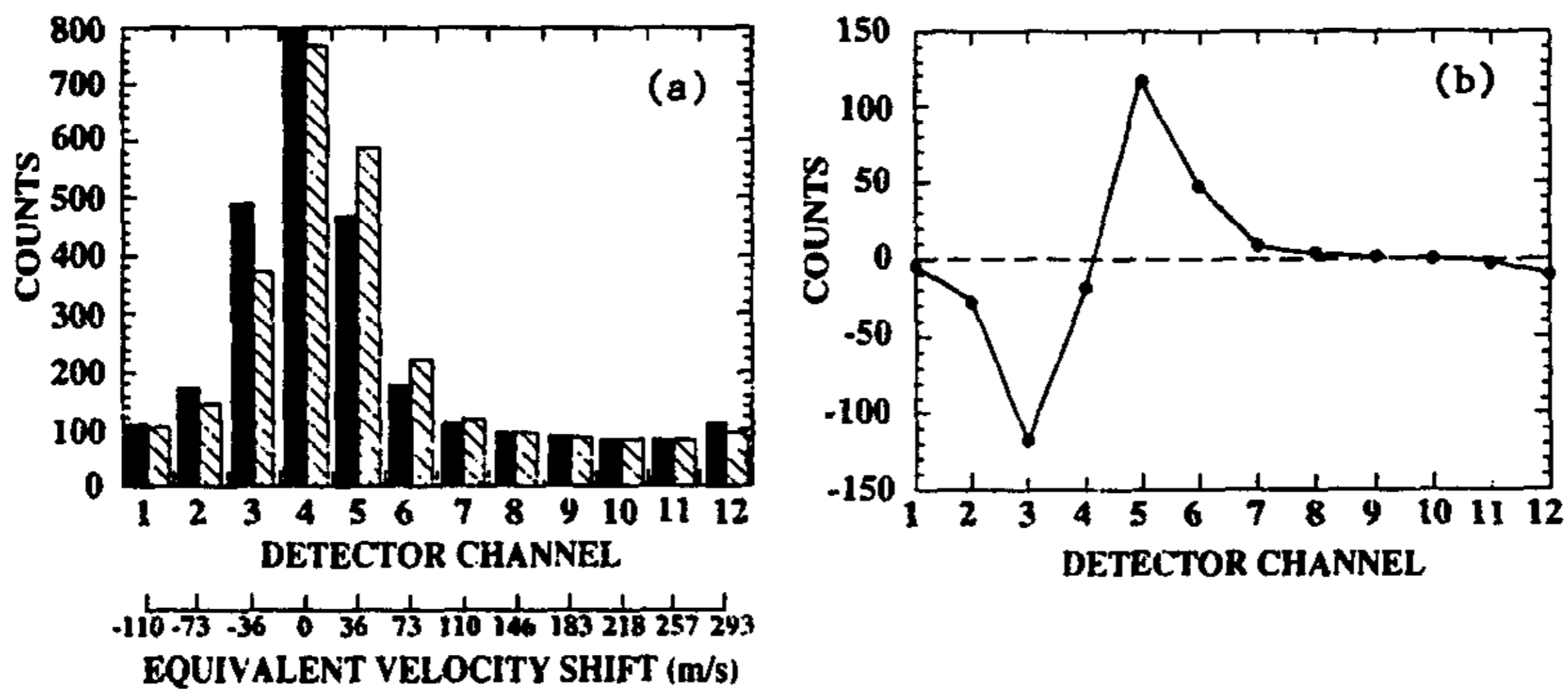


图2-1 多通道技术测量原理示意图

双边缘技术被法国 CNRS 和 C. L. Korb 等的后期系统所采用。双边缘技术的原理如图 2-2 所示(以气溶胶探测为例)^[43]。图中 Edge1、Edge2 分别

为两个 Fabry-Perot 干涉仪光谱响应曲线。中间大气回波光谱响应曲线中，上面尖而窄的为大气 Mie 散射光谱响应，下面比较宽的是大气 Rayleigh 散射光谱响应。大气回波信号中的多普勒频移会引起透过两个 Fabry-Perot 干涉仪的能量发生变化。通过测量两路信号能量的比值，就可以得到多普勒频移。从图 2-2 中可以看出，调节两个 Fabry-Perot 干涉仪光谱响应曲线的间隔，可以分别测量 Mie 散射或 Rayleigh 散射。当两个 Fabry-Perot 干涉仪光谱响应曲线的相对位置距离比较近时，Fabry-Perot 干涉仪的透过率对 Mie 散射的变化敏感，Rayleigh 散射为宽带背景光，从而可以利用气溶胶散射信号探测大气风场。当两个 Fabry-Perot 干涉仪光谱响应曲线的相对位置距离比较远时，Mie 散射的信号基本被抑制，Fabry-Perot 干涉仪透过率对 Rayleigh 散射的变化响应灵敏，从而可以利用分子散射信号探测大气风场。

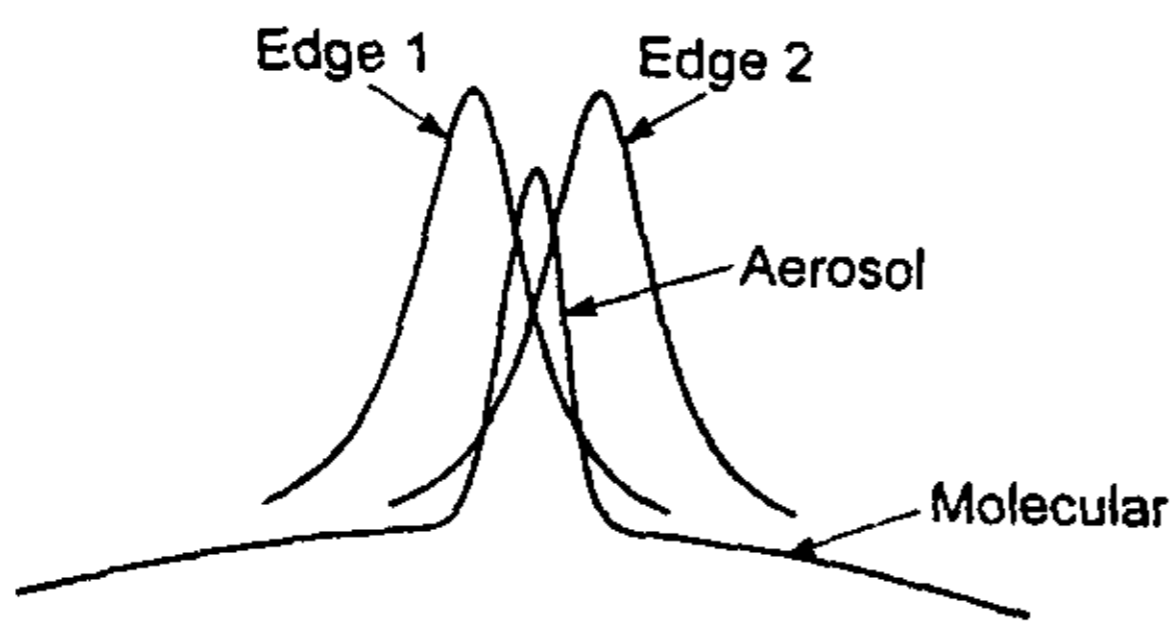


图2-2 双边缘技术测量原理

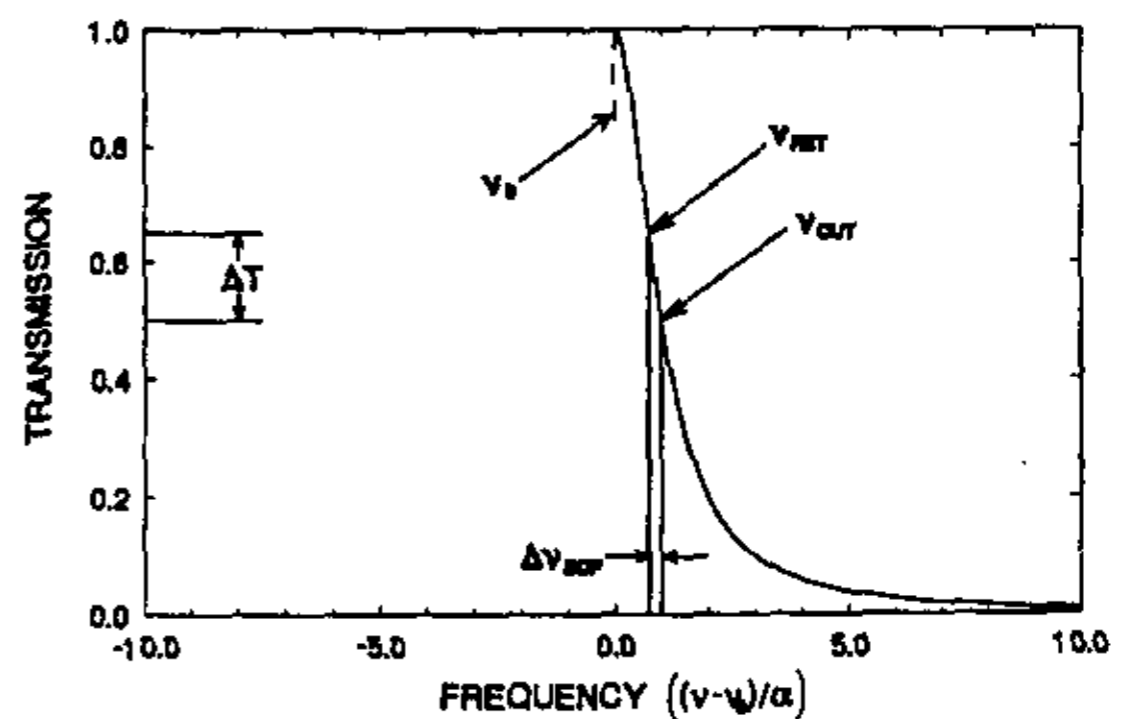


图2-3 单边缘技术测量原理

单边缘技术原理比较简单，如图 2-3 所示^[41]。图中曲线为具有陡峭光谱响应的边缘滤波器。信号中的多普勒频移的变化经过该滤波器后变换为信号能量的变化。由于边缘滤波器具有陡峭的光谱响应，很小的光频率变化转换为明显的光强度变化。只要探测光强度变换的大小，就可以得到多普勒频移。从边缘检测的原理可知，凡是具有陡峭光谱响应曲线的器件原理上都可以作为边缘滤波器，如 Fabry-Perot 干涉仪、棱镜、光栅等。

从上述的原理可知，单边缘技术是双边缘技术的基础。对于相同的测量条件，C. L. Korb 等认为双边缘技术的测量灵敏度是单边缘技术 2 倍，这是因为双边缘技术利用两个特性一致的边缘滤波器，而单边缘技术只利

用一个边缘^[44]。注意，上述结论仅指测量灵敏度而言。对于系统测量的大气风速误差，除受测量灵敏度影响外，还与系统接收到的信号能量成反比。单边缘技术利用的是大气回波信号光谱的峰值响应，而双边缘技术则利用大气回波信号光谱的两个边缘响应。因此系统测量风速误差，单边缘技术要小于双边缘技术的2倍。这一点对于利用大气 Rayleigh 散射的测量而言更明显。

由于双边缘技术和多通道技术同时适合于卫星测风，因此它们的特性被详细的进行了分析和比较^[49,50,51,52]。分析结果表明，双边缘技术可以认为是多通道技术的一个两通道的特例，两种技术的测量原理等可用相同的公式表述。两种技术一个主要的差异是：由于测量多通道较多，多通道技术对于不同的多普勒频移有基本相同的测量灵敏度，而双边缘技术的测量灵敏度则随着多普勒频移的增加而减小。就具体系统而言，多通道技术使用特殊的环状光电探测器，这种探测灵敏度要低于光电倍增管或光电二极管，而且价格高，难以购买。双边缘技术则使用两个普通的光电倍增管或光电二极管即可。对于系统中的 Fabry-Perot 干涉仪，双边缘技术所需的接收孔径要大于多通道技术，大口径的 Fabry-Perot 干涉仪的加工难度、价格、信号噪声均比较大^[53]。目前，这两种技术的比较研究仍在不断深入。

第二节 碘分子吸收滤波器

原子(分子)共振滤波器是七十年代末出现的一种超窄带(约 0.01\AA)光学滤波器^[54]，具有超窄带、高灵敏度和对背景噪声高抑制的特性。其超窄带特性主要来自工作介质原子跃迁谱线的线宽。这种滤光器的研究最初是为了解决在海水窗口(兰绿激光波段)的弱光信号检测问题，因此原子滤光器的研究重点在兰绿波段^[55]。在这个波段适用的有原子铯、铷等，也有碘、溴等分子气体。C. Y. She 在八十年代初期为研究大气参数遥测的高分辨率激光雷达，首次在激光雷达中使用了钠原子滤波器^[56]，成功地进行大气温度激光遥测。随后其研究小组分别利用钠原子滤波器和碘分子滤波器进行了大气参数测量^[57,58]。P. Piironen 等也把碘分子滤波器应用到其高分辨率激光雷达系统中，用来测量大气气溶胶剖面^[59]。

碘分子滤波器之所以得到广泛应用是因为分子碘在可见区域的 B-X 电子跃迁分子光谱有 2000 多根主要吸收线，其中一些接近倍频 Nd:YAG 激光波长 532nm。在 532nm 附近，即 $18786\text{cm}^{-1}\sim 18789\text{cm}^{-1}$ 有 8 根主要的多普勒展宽线，其吸收线系数为 1104~1112，如图 2-4 所示^[60]。

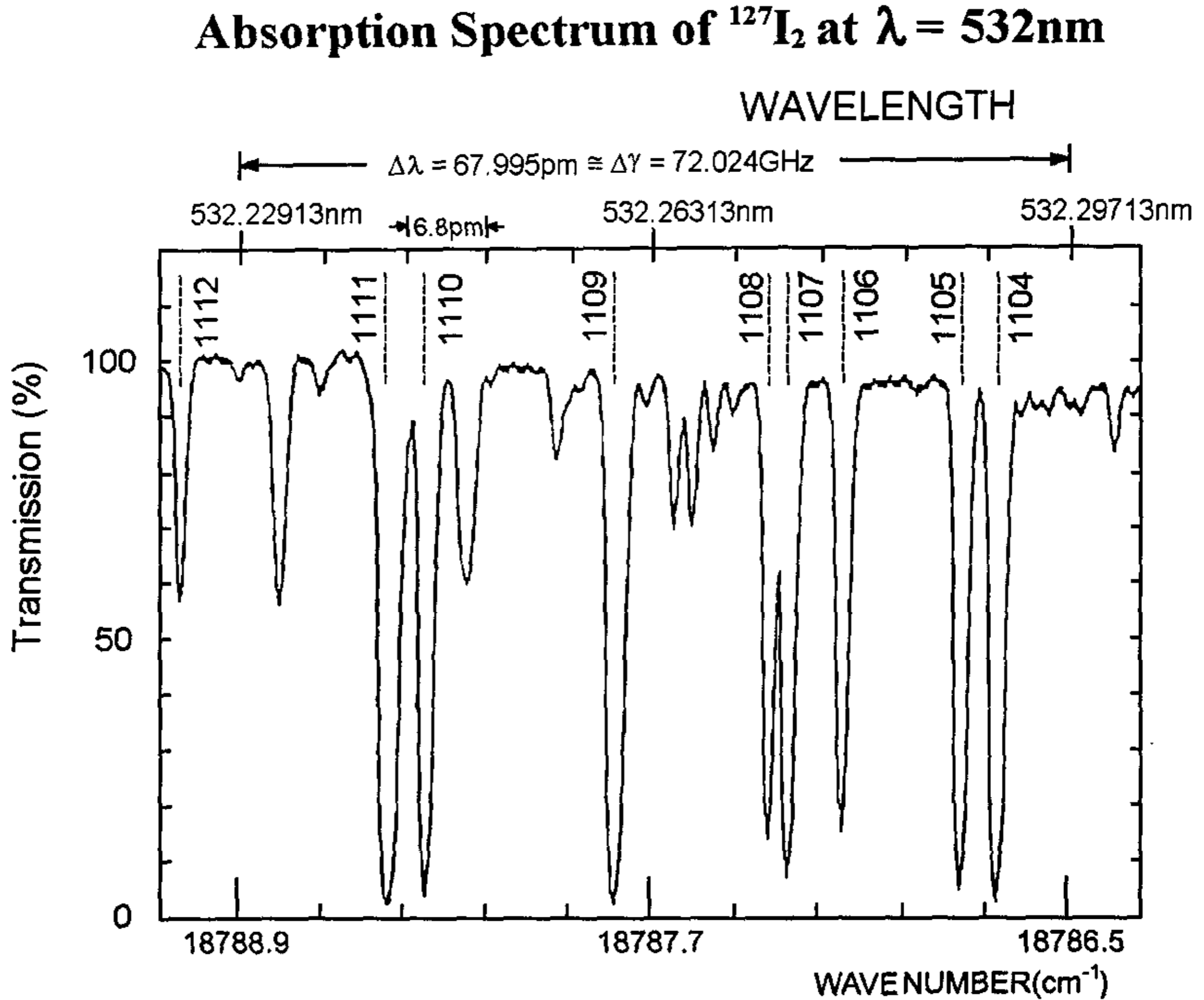


图2-4 碘分子在532nm附近的光谱吸收线

碘分子吸收线的峰值位置是绝对不变的，这是由碘分子的固有特性决定的。但是碘分子吸收线的宽度是与碘分子气体的工作温度和压力密切相关的。

根据 Mitchell 的经验公式^[61]，分子气体在谐振频率 ν_n 的透射率可表示为：

$$g(\nu) = \sum_n \exp \left\{ - (k_0 L) \exp \left[- 4 \ln 2 \left(\frac{\nu - \nu_n}{\Delta \nu_D} \right)^2 \right] \right\} \quad (2.1)$$

其中, k_0 为谐振吸收系数, $\Delta\nu_D$ 为从基态到选择态的多普勒展宽。 k_0 、 $\Delta\nu_D$ 与气体池的温度相关的, 可分别表示为:

$$\begin{aligned}\Delta\nu_D &= \frac{2.1472 \times 10^{-5}}{\lambda_0(\text{cm})} \sqrt{\frac{T_0}{M(\text{amu})}} \text{ GHz} \\ k_0 &= \frac{2.4928 \times 10^{-11}}{\Delta\nu_D(\text{GHz})} N_a(\text{cm}^{-3}) f(\text{cm}^{-1})\end{aligned}\quad (2.2)$$

式中, M 为气体的分子质量, N_a 为原子密度, f 为跃迁振荡强度。而原子密度可以从理想气体公式中导出:

$$N_a = \frac{P}{kT_0} \quad (2.3)$$

式中 P 为气体压力。

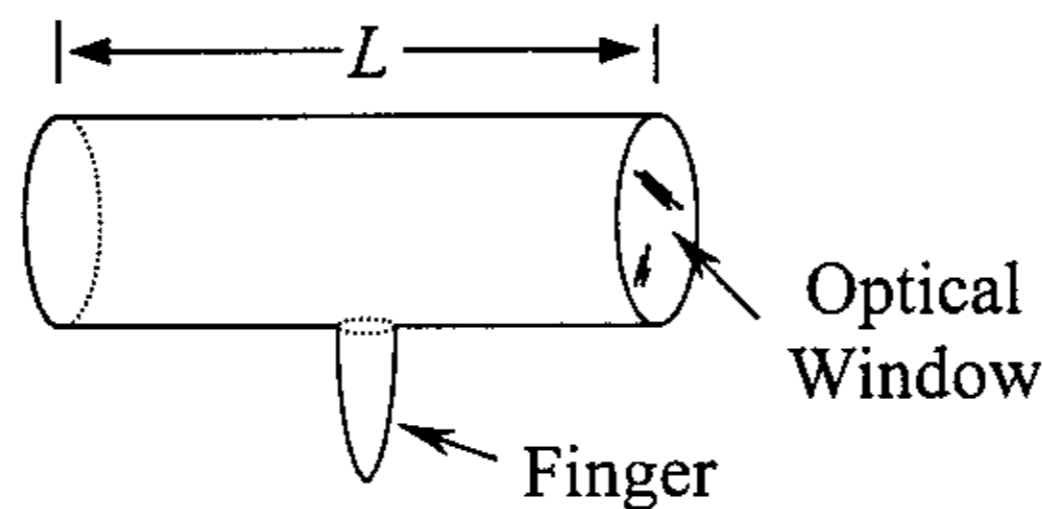


图2-5 碘分子吸收池

碘分子吸收池的外形一般如图 2-5 所示。对碘分子吸收池, 气体压力与工作温度的满足关系^[62]:

$$\log_{10} P = B - 0.2185 \frac{A}{T_0} \quad (2.4)$$

其中, 压力 P 的单位为 torr, T_0 为碘指温度(Kelvin), A 为气化的克分子热量, 单位为 cal/gmol。对分子碘来说, $A=13056.6$, $B=9.237273$ 。公式 2.4 适用于 311.7~456K 的温度范围内。

从公式 2.1~2.4 可以看出, 对于密封的碘分子吸收池, 透过率与碘指温度 T_0 直接相关。根据公式 2.1~2.4, 可以计算得到不同温度下我们实验室所用的碘分子吸收池的 1109 光谱曲线, 如图 2-6 所示。

从图 2-6 中可以看出, 不同工作温度的碘分子光谱透过率曲线相差是很大的。表 1 为以吸收线 1109 为例, 计算得到的碘指温度对碘分子光谱透过率的影响, 和根据透射率变化转化成的风速误差。碘指初始温度为 333K, 初始透射率为 0.499924。

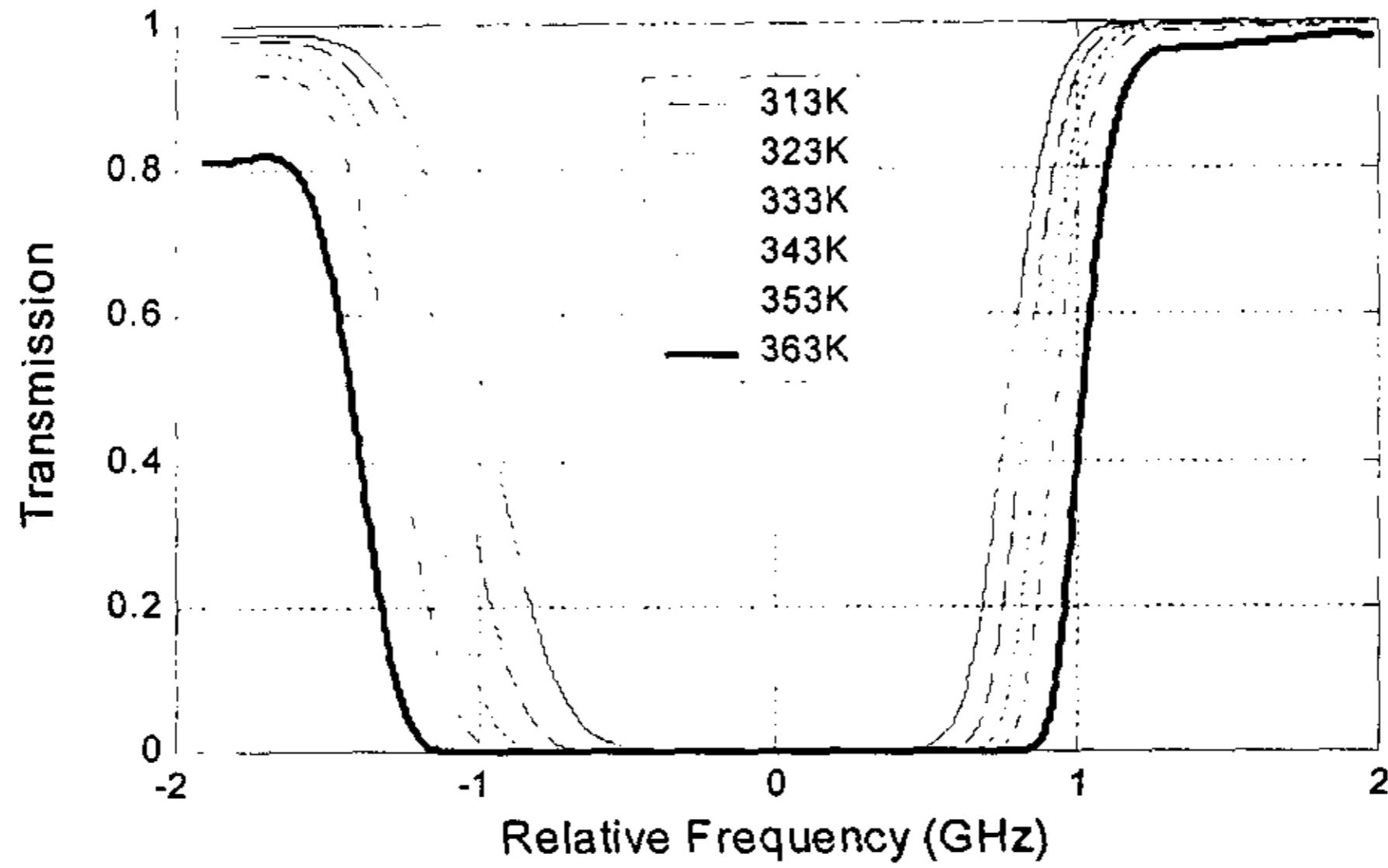


图2-6 碘指在不同温度下1109碘分子吸收线的光谱曲线

表 2-1. 碘分子滤波器温度漂移与透射率变化和风速误差的关系

温度变化(K)	±0.01	±0.02	±0.03	±0.04	±0.05	±0.1
透射率变化(%)	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.21
风速误差(cm/s)	1.35	2.70	4.05	5.40	6.75	13.5

从表 2-1 中可看出，碘吸收池的温度漂移对风速测量带来的系统误差是很明显的，在测量时必须对碘吸收池进行严格温度控制。

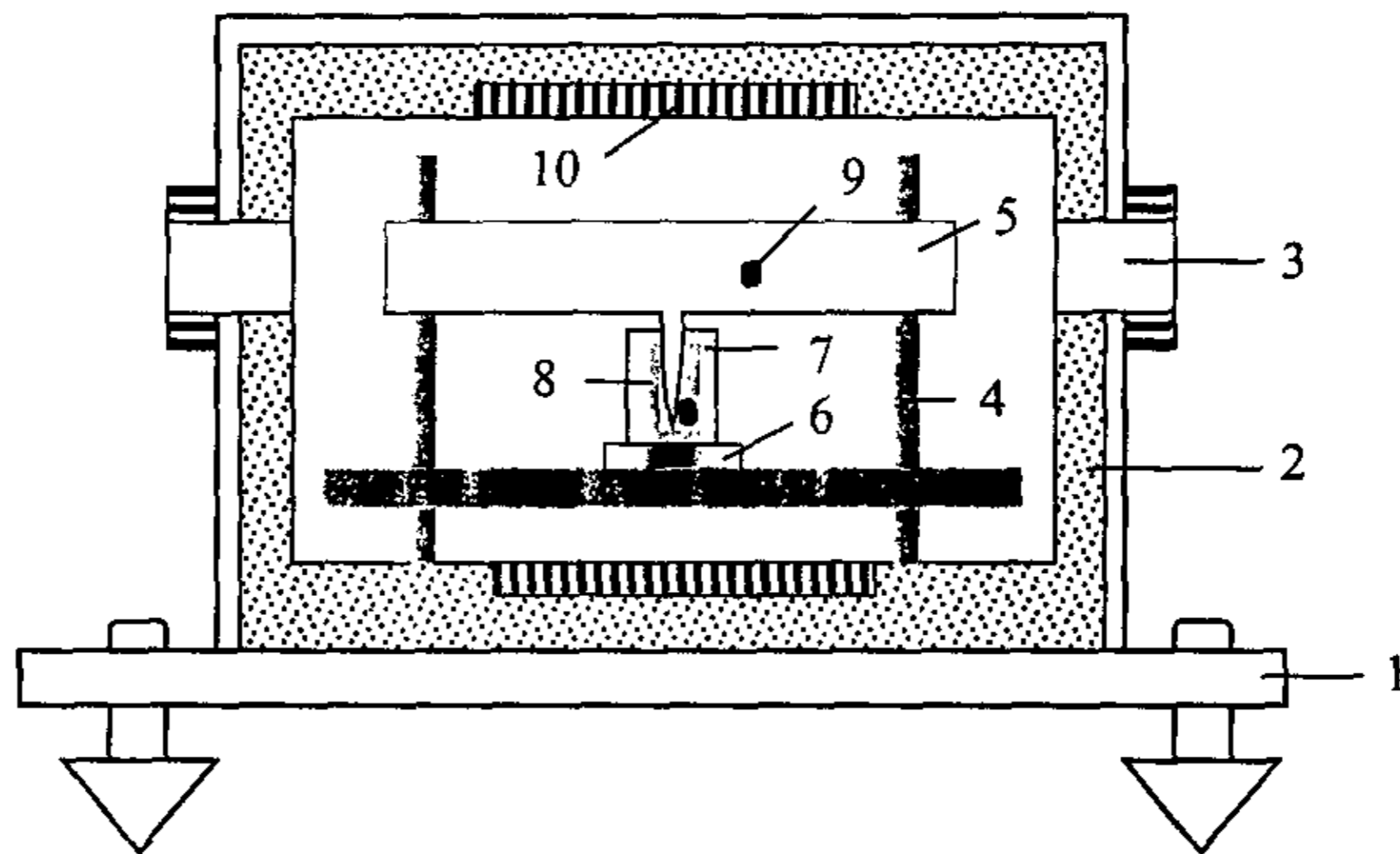


图2-7 碘分子吸收滤波器

其中，1. 外壳，2. 隔热材料，3. 光学窗口，4. 支架，5. 碘吸收池，6. 高温致冷硅，7. 保温套，8. 铜柱，9. 温度传感器，10. 加热带。

实际系统中碘吸收池放置于恒温装置中，制成碘分子吸收滤波器，如图 2-7 所示。其中，碘吸收池长为 106mm，光学口径为 25.4mm，两端为光学平面，内部充标准压力的碘分子气体。

温控系统分两部分，一部分是碘吸收池整体的控温系统，另一部分是碘吸收池中碘指控温系统。

碘吸收池密封在隔热材料中。整体控温系统采用热敏电阻作为温度传感器。热敏电阻的测温范围为 283~403K。利用热敏电阻提供的随温度变化信号与预置温度比较，产生温度控制电压控制加热带的加热。散热采用自然冷却，使温度趋于平衡。该部分的控温范围为 283~403K，控温精度为 ±0.1K。

碘指的温度低于整体控温系统的温度约 5K，该温度决定了碘分子吸收滤波器的吸收光谱特性。碘指的温度通过高温致冷硅控制。该部分的温度传感器选用 AD590。AD590 的输出电压与预置标准电压比较，输出的差值通过相应的转换电路转换为电流信号，该信号经放大后就是制冷硅的控制电流。通过调节流过致冷硅电流的大小和方向，将碘指温度控制在预值温度。碘指的控温范围为 293~383K，控温精度为 ±0.01K。因此，碘分子吸收滤波器的温度漂移造成的风速测量误差可以控制在 2.7cm/s。

第三节 测量原理

在本论文研究的非相干激光多普勒测风雷达系统中，选用碘分子吸收滤波器作为频率检测器件，利用单边缘检测技术测量大气风场，该方案于 1997 年由青岛海洋大学的刘智深教授首次提出^[39]。本论文中的非相干激光多普勒测风雷达就是上述方案的实现。

图 2-8 是激光透过碘吸收滤波器时的光谱响应示意图。若激光能量的光谱分布为 $h(\nu)$ ，所选的碘分子吸收滤波器的一条吸收线边缘的光谱分布为 $f(\nu)$ ，则图中的光谱响为 $h(\nu)$ 与 $f(\nu)$ 的卷积，即：

$$T(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\nu - \nu')f(\nu')d\nu' \quad (2.5)$$

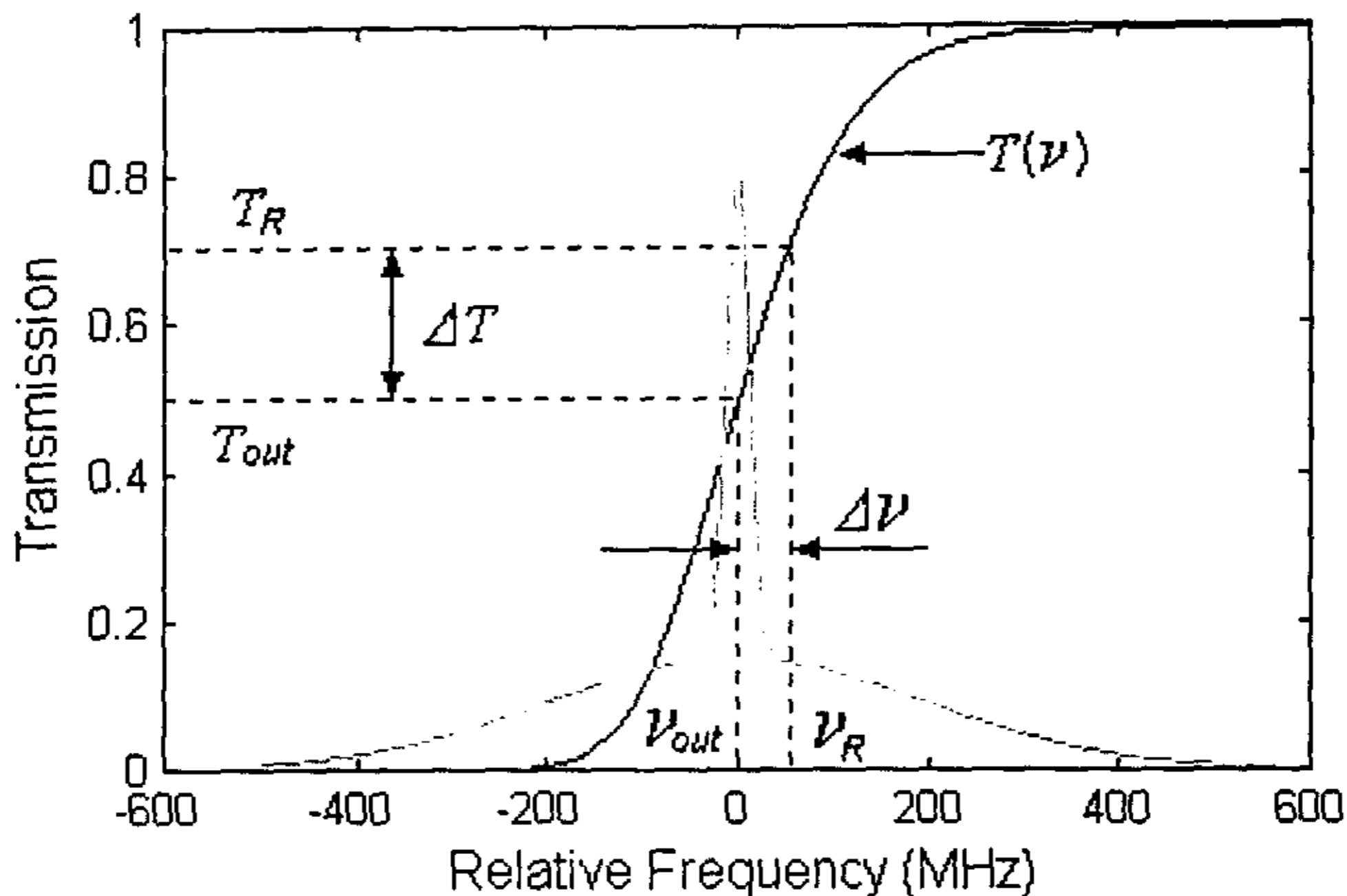


图2-8 利用碘吸收滤波器测量多普勒频移示意图 (1109吸收线)

如果激光发射频率为 ν_{out} ，大气后向散射光的频率为 ν_R ，而两个频率在碘分子吸收滤波器上对应的归一化透射率为 T_{out} 和 T_R ，则通过测量 T_{out} 和 T_R 的差 ΔT ，即可得到多普勒频移 $\Delta\nu$ ， T_{out} 和 T_R 差的符号决定了多普勒频移的正负。为了提高测量灵敏度，采用差分接收的方法来检测透射率的变化。图 2-9 为测量光路原理图。大气返回的 Rayleigh 和 Mie 散射信号被分成两部分：一部分直接由光电探测器 1 接收，作为能量监测；另一部分经碘分子吸收滤波器后，由光电探测器 2 接收，测量光谱透过率响应。

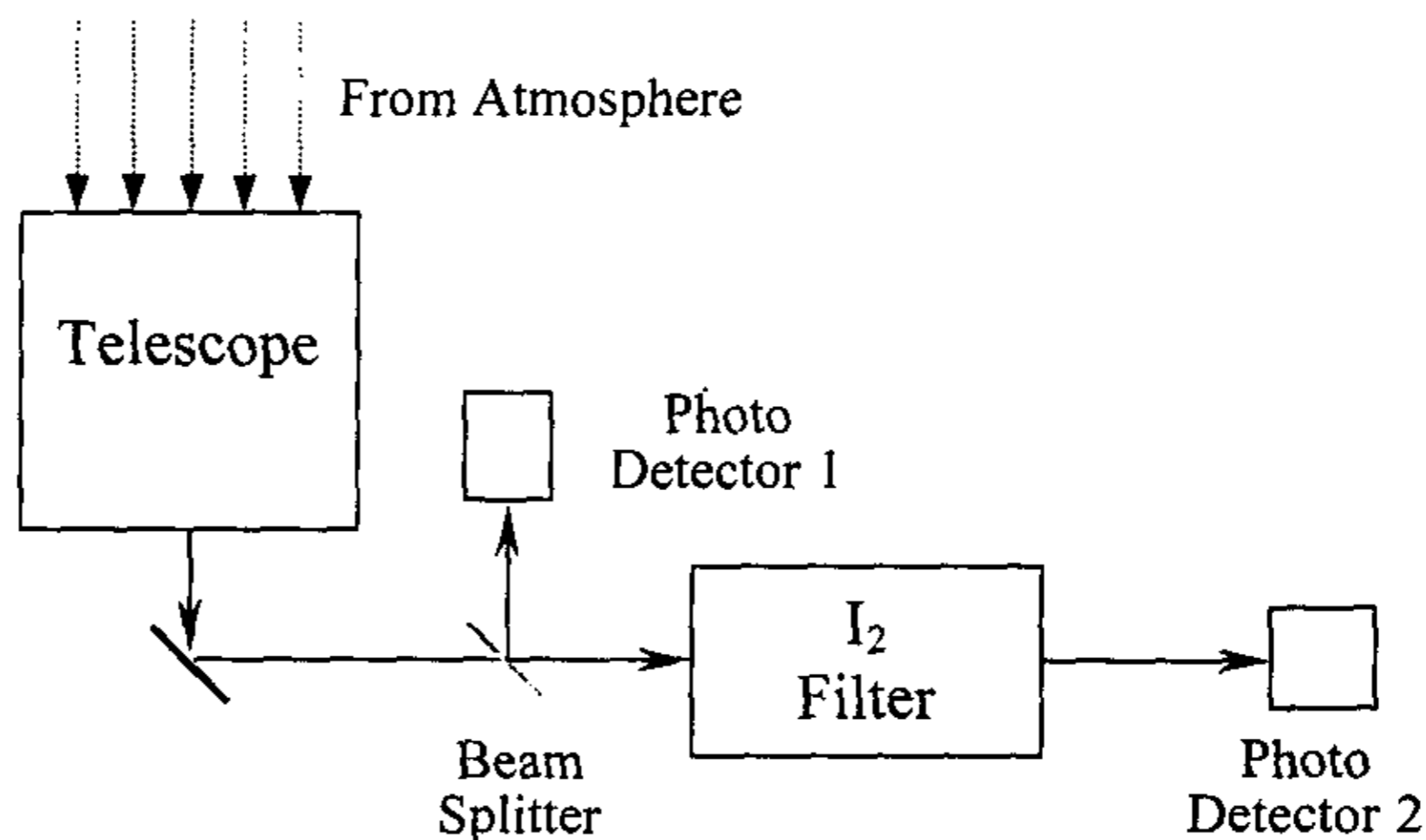


图2-9 差分接收光路示意图

根据激光雷达方程，两个通道光电探测器 1 接收到的光子数 N_1 和光电探测器 2 收到的光子数 N_2 分别为：

$$N_1(r) = \rho_1 N \eta_{QE1} \eta_{O1} \frac{A}{r^2} \Delta r [\beta_a(r) + \beta_m(r)] \exp \left\{ -2 \int_0^r [\alpha_a(r') + \alpha_m(r')] dr' \right\}$$

$$N_2(r, \nu) = \rho_2 N \eta_{QE2} \eta_{O2} \frac{A}{r^2} \Delta r [\beta_a(r) \int_{-\infty}^{\infty} T(\nu) I_a(\nu - \nu') d\nu' + \beta_m(r) \int_{-\infty}^{\infty} T(\nu) I_m(\nu - \nu') d\nu'] \times \exp \left\{ -2 \int_0^r [\alpha_a(r') + \alpha_m(r')] dr' \right\} \quad (2.6)$$

其中， N ：激光脉冲输出总光子数； $\rho_{1,2}$ ：分别为两个通道的分光比； $\eta_{QE1,2}$ ：分别为两个光电探测器量子效率； $\eta_{O1,2}$ ：分别为两个通道总的光学效率； A ：激光雷达系统接收面积； Δr ：激光雷达系统探测距离分辨率； r ：探测距离； β_a ：大气气溶胶回向散射系数； β_m ：大气分子回向散射系数； α_a ：大气气溶胶消光系数； α_m ：大气分子消光系数； I_a ：大气气溶胶回向散射光谱分布； I_m ：大气分子回向散射光谱分布。

由公式 2.6 可得到 N_1 和 N_2 比值，即碘分子吸收滤波器光谱透过率为：

$$R(r, \nu) = \frac{N_2(r, \nu)}{N_1(r)}$$

$$= K \frac{\beta_a(r) \int_{-\infty}^{\infty} T(\nu) I_a(\nu - \nu') d\nu' + \beta_m(r) \int_{-\infty}^{\infty} T(\nu) I_m(\nu - \nu') d\nu'}{\beta_a(r) + \beta_m(r)} \quad (2.7)$$

其中， $K = \rho_2 \eta_{QE2} \eta_{O2} / \rho_1 \eta_{QE1} \eta_{O1}$ 为系统校正常数。

在公式 2.7 中，定义：

$$f_a(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} T(\nu) I_a(\nu - \nu') d\nu'$$

$$f_m(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} T(\nu) I_m(\nu - \nu') d\nu' \quad (2.8)$$

即 $f_a(\nu)$ 和 $f_m(\nu)$ 分别为大气气溶胶回向散射和大气分子回向散射透过碘分子吸收滤波器的光谱响应。

同时，大气后向散射比 R_b 一般定义为：

$$R_b(r) = \frac{\beta_a(r) + \beta_m(r)}{\beta_m(r)} \quad (2.9)$$

从而可以推出： $\beta_a = (R_b - 1)\beta_m$

将公式 2.8 和 2.9 代入到公式 2.7 得到：

$$R(r, \nu) = K \frac{[R_b(r) - 1]f_a(\nu) + f_m(\nu)}{R_b(r)} \quad (2.10)$$

激光发射频率为 ν_{out} ，对应的碘分子吸收滤波器光谱透过率为 $R(r, \nu_{out})$ 。由于大气风场的作用，大气气溶胶回向散射信号和分子回向散射信号相对于激光发射频率 ν_{out} 会产生多普勒频移 $\Delta\nu$ ，此时对应的碘分子吸收滤波器光谱透过率为 $R(r, \nu_{out} + \Delta\nu)$ 。 $R(r, \nu_{out} + \Delta\nu)$ 在 ν_{out} 展开成泰勒级数，并忽略高阶导数项为：

$$\begin{aligned} R(r, \nu_{out} + \Delta\nu) &\approx R(r, \nu_{out}) + \frac{dR(r, \nu_{out})}{d\nu} \Delta\nu \\ &\approx R(r, \nu_{out}) + \frac{K}{R_b(r)} \left\{ [R_b(r) - 1] \frac{df_a(\nu)}{d\nu} + \frac{df_m(\nu)}{d\nu} \right\} \Delta\nu \end{aligned} \quad (2.11)$$

从 2.11 可以得到：

$$\Delta\nu \approx \frac{R(r, \nu_{out} + \Delta\nu) - R(r, \nu_{out})}{\frac{K}{R_b(r)} \left\{ [R_b(r) - 1] \frac{df_a(\nu)}{d\nu} + \frac{df_m(\nu)}{d\nu} \right\}} \quad (2.12)$$

将公式 2.12 代入公式 1.4 中，就可以得到径向风速表达式为：

$$\begin{aligned} V &= \frac{c}{2\nu_{out}} \Delta\nu \\ &\approx \frac{c}{2\nu_{out}} \frac{R(r, \nu_{out} + \Delta\nu) - R(r, \nu_{out})}{\frac{K}{R_b(r)} \left\{ [R_b(r) - 1] \frac{df_a(\nu)}{d\nu} + \frac{df_m(\nu)}{d\nu} \right\}} \end{aligned} \quad (2.13)$$

边缘技术中，探测灵敏度可以定义为单位风速变化所引起的透过率变化。因此，利用碘分子吸收滤波器探测大气径向风速的灵敏度为：

$$\begin{aligned} \Theta(r, \nu) &= \frac{dR(r, \nu)}{dV} \\ &= \frac{2\nu_{out}}{c} \frac{dR(r, \nu)}{d\nu} \\ &= \frac{2\nu_{out}}{c} \frac{K}{R_b(r)} \left\{ [R_b(r) - 1] \frac{df_a(\nu)}{d\nu} + \frac{df_m(\nu)}{d\nu} \right\} \end{aligned} \quad (2.14)$$

进而，径向风速的误差为：

$$\varepsilon(r, \nu) = \frac{1}{SNR(r, \nu) \Theta(r, \nu)} \quad (2.15)$$

其中， SNR 为信号的信噪比。

如果忽略探测器的噪声，每个通道的信噪比 SNR 可表示为：

$$SNR(r, \nu) = \frac{\sqrt{m} N(r, \nu)}{\sqrt{N(r, \nu) + N_b}} \quad (2.16)$$

其中, m 为测量平均次数, N 为该通道接收到的光子数, N_b 为该通道接收到的背景光光子数。

在 532nm 波长, 白天太阳背景辐射常数 I_b 为 $0.014\text{mWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{nm}^{-1}$, 则背景光子数可由下式给出:

$$N_b = \frac{I_b}{h\nu} \frac{A\pi\Omega^2}{4} \frac{2\Delta r}{c} \Delta\lambda\eta_{QE}\eta_O \quad (2.17)$$

式中, $h\nu$ 为光子能量, Ω 为接收视场角, $\Delta\lambda$ 为光学滤色片带宽。

由公式 2.7 可知, $R(r, \nu)$ 为 $N_2(r, \nu)$ 和 $N_1(r)$ 的函数。因此根据误差传递理论, $R(r, \nu)$ 的信噪比 $SNR(r, \nu)$ 为:

$$\frac{1}{SNR(r, \nu)^2} = \frac{1}{m} \left(\frac{N_1(r) + N_b}{N_1^2(r)} + \frac{N_2(r, \nu) + N_b}{N_2^2(r, \nu)} \right) \quad (2.18)$$

其中, $N_2(r, \nu)$ 和 $N_1(r)$ 可以根据公式 2.6 计算出。

根据公式 2.13, 径向风速的获得依赖于 $R(r, \nu_{out} + \Delta\nu)$ 和 $R(r, \nu_{out})$, 因此径向风速的误差为:

$$\varepsilon(r, \Delta\nu) = \left[\frac{1}{SNR^2(r, \nu_{out}) \Theta^2(r, \nu_{out})} + \frac{1}{SNR^2(r, \nu_{out} + \Delta\nu) \Theta^2(r, \nu_{out} + \Delta\nu)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.19)$$

公式 2.19 给出的是测量的绝对误差, 下面推导测量的相对误差。由径向风速表达式 2.13 可以推出:

$$\begin{aligned} (\delta V)^2 &= [\delta R(r, \nu_{out} + \Delta\nu)]^2 \left[\frac{\partial V}{\partial R(r, \nu_{out} + \Delta\nu)} \right]^2 \\ &+ [\delta R(r, \nu_{out})]^2 \left[\frac{\partial V}{\partial R(r, \nu_{out})} \right]^2 \end{aligned} \quad (2.20)$$

从而,

$$\begin{aligned} \left(\frac{\delta V}{V} \right)^2 &= \left[\frac{\delta R(r, \nu_{out} + \Delta\nu)}{R(r, \nu_{out} + \Delta\nu) - R(r, \nu_{out})} \right]^2 + \left[\frac{\delta R(r, \nu_{out})}{R(r, \nu_{out} + \Delta\nu) - R(r, \nu_{out})} \right]^2 \\ &= \left[\frac{R(r, \nu_{out} + \Delta\nu)}{R(r, \nu_{out} + \Delta\nu) - R(r, \nu_{out})} \right]^2 \left[\frac{\delta R(r, \nu_{out} + \Delta\nu)}{R(r, \nu_{out} + \Delta\nu)} \right]^2 \\ &+ \left[\frac{R(r, \nu_{out})}{R(r, \nu_{out} + \Delta\nu) - R(r, \nu_{out})} \right]^2 \left[\frac{\delta R(r, \nu_{out})}{R(r, \nu_{out})} \right]^2 \end{aligned} \quad (2.21)$$

其中, $\delta R/R$ 为该通道信号信噪比 SNR 的倒数, 可依照 2.18 式计算。

第四节 测量灵敏度和误差分析

碘分子吸收线的选择

在激光雷达系统中，由于碘分子吸收线作为频率检测器件，因此碘分子吸收线的特性对整个系统来说至关重要。

从图 2-4 可以看出，在 532nm 附近，有 1104~1112 共 8 根主要的多普勒展宽线。综合吸收线的强度、形状、与周围吸收线的间距等因素，1106 线和 1109 线是比较理想的。在实际的固体激光多普勒测风雷达系统中，考虑到系统各部分的相互关系，选用图 2-4 中 1109 线高波数边缘(图 2-6 中 1109 线正频率边缘)作频率检测。

由第二节的介绍可知，碘分子吸收线的形状受其温度的影响很大。因此，碘分子吸收滤波器的温度选择是影响雷达系统测量结果的一个重要因素。从图 2-6 中可以看出，随着碘指温度的增加，碘分子 1109 吸收线光谱宽度加宽，吸收能力增强，这有利于检测频率。同时，随着碘指温度的增加，该边缘的斜率虽变化不是很大，但是边缘部分的线性范围明显减少，这对于检测频率的范围很不利的。综合考虑上述两方面因素，实际雷达系统中，碘指的温度选定在 333~343K 之间。

探测灵敏度分析

在下面的分析和计算机模拟中，根据目前激光雷达的实际情况，选用的激光雷达系统参数和相应的数值如表 2-2 所示。

表 2-2 计算机模拟所用激光雷达参数及选用参数值

系统参数	参数值
激光器	Nd:YAG
能量 E	150mJ
波长 λ_{out}	532nm
重复频率 F	10Hz
光谱宽度(FWHM)	90MHz
脉冲宽度 τ	10ns
望远镜直径 d	200mm
系统接收视场角 Ω	1.43mrad

干涉滤光片带宽 $\Delta\lambda$	0.5nm、1nm、2nm
系统光学效率(除碘分子滤波器) $\eta_{ol,2}$	0.4
碘分子滤波器	1109 线, 长度 10cm, 温度 333K
光电探测器量子效率 $\eta_{QE1,2}$	0.2
距离分辨率 Δr	75m
系统校正常数 K	1:1
测量数据平均次数 m	1500 (一次测量时间约 3 分钟)

基于碘分子吸收滤波器的单边缘技术探测大气风场的激光测风雷达系统的灵敏度可由公式 2.14 计算。公式 2.14 中 f_a 和 f_m 分别应为碘分子 1109 吸收线光谱、激光光谱与 Mie 和 Rayleigh 光谱的卷积。如第一章第三节中所述, Mie 散射的光谱宽度为 0.7kHz~0.7MHz 之间, 与激光 90MHz 的光谱宽度相比可以忽略。因此计算机模拟时 f_a 为碘分子 1109 吸收线光谱与激光光谱的卷积。Rayleigh 的光谱宽度一般大于 1GHz, 激光的光谱宽度不到它的十分之一, 因此模拟计算时 f_m 为碘分子 1109 吸收线光谱与 Rayleigh 光谱的卷积。在模拟计算时, 假定 Rayleigh 光谱的半高全宽为 1.25GHz, 对应于大气温度约为 280K 左右。

图 2-10 为用上述参数模拟计算得到的 f_a 和 f_m 。图中 I_2 为温度为 333K 时的碘分子 1109 吸收线。

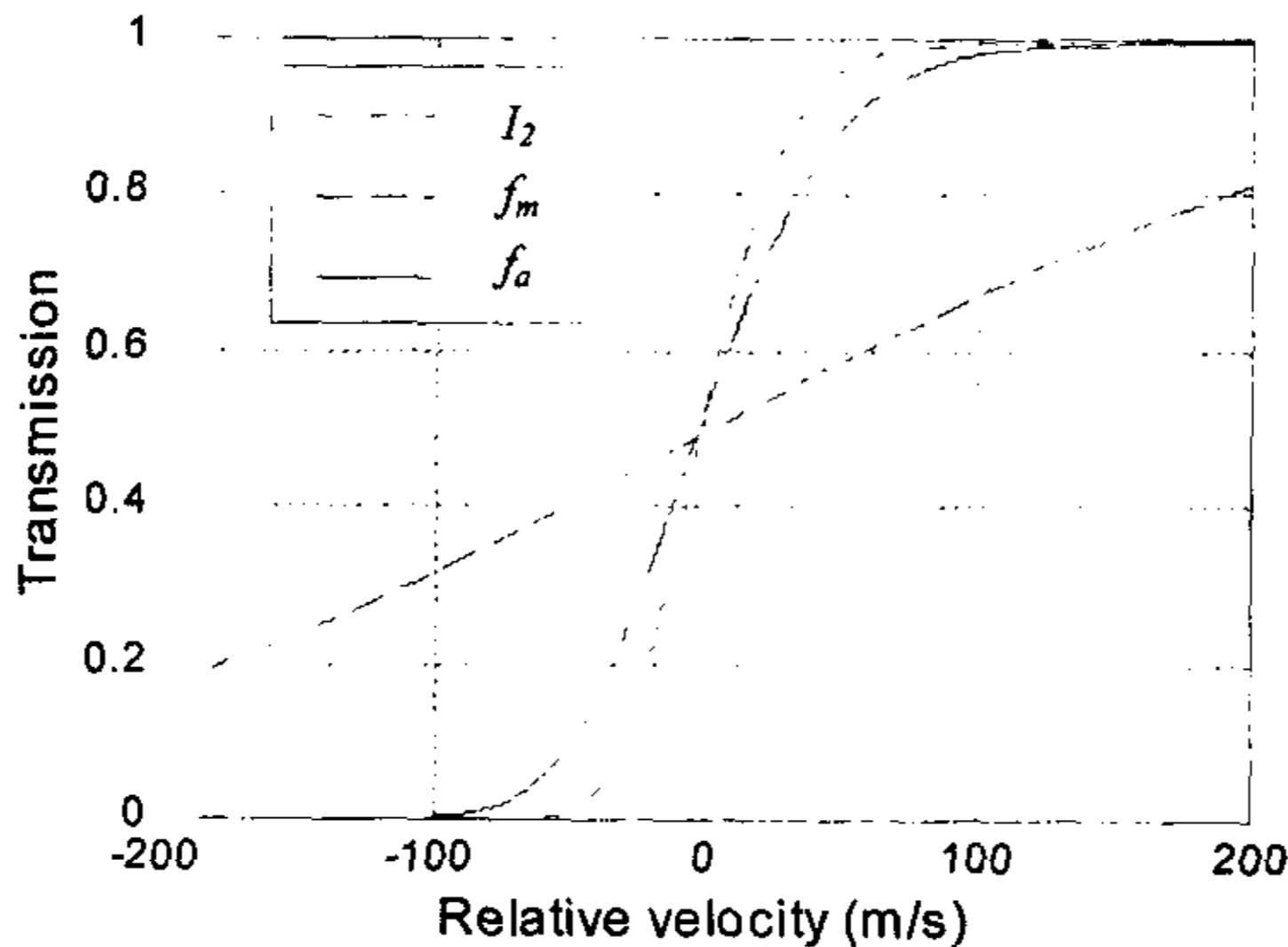


图2-10 模拟计算得到的 f_a 和 f_m

在图 2-10 计算结果的基础上, 图 2-11 为利用公式 2-14 得到的激光测风雷达径向风速探测灵敏度。

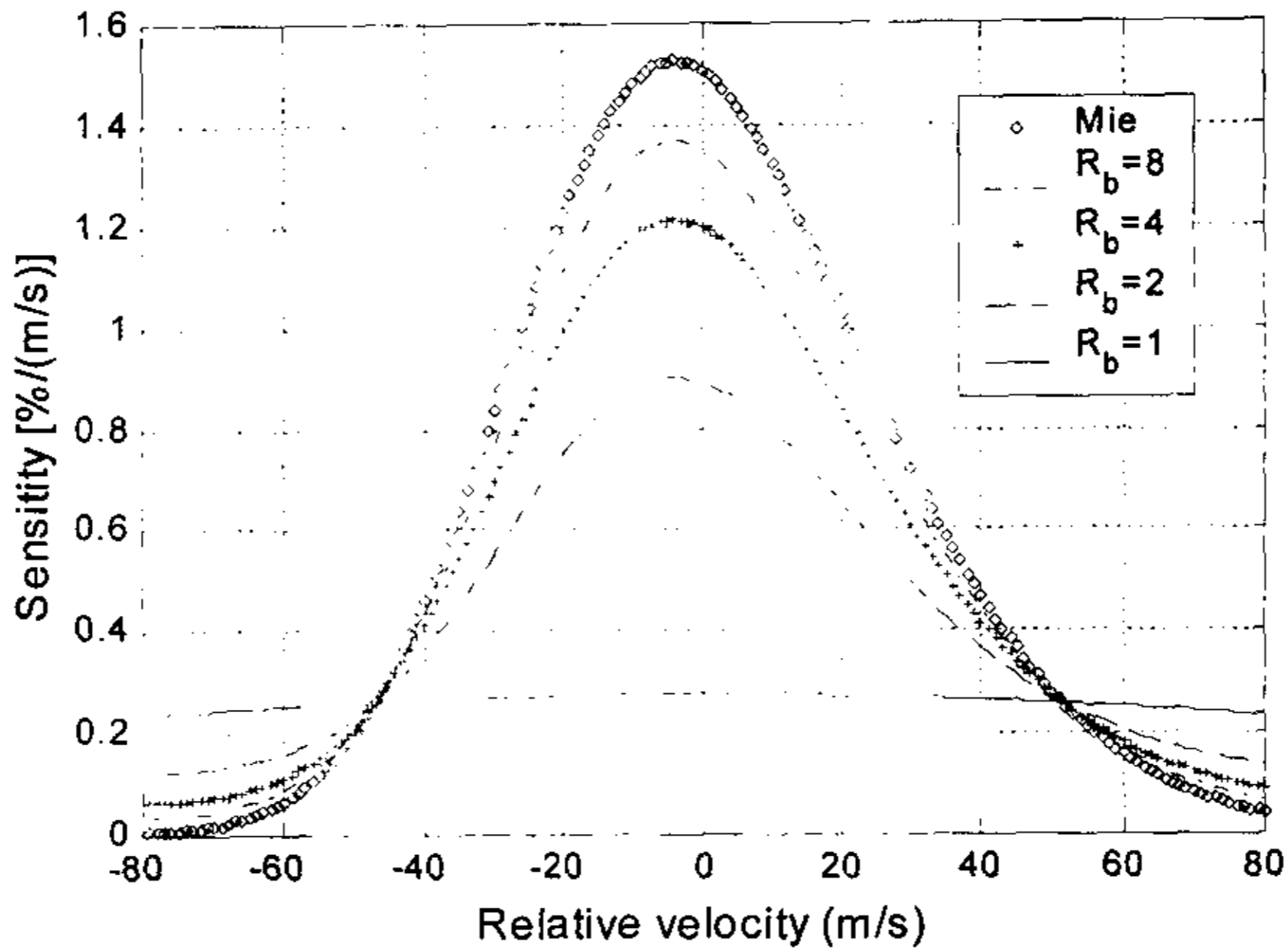


图2-11 模拟计算的激光雷达系统在不同 R_b 下的测量灵敏度

从图 2-11 结果来看, 从而 R_b 越大, 测量灵敏度越高, 也就是说, 大气中气溶胶的含量越多, 测量灵敏度越高。这是由于 I_a 的光谱宽度小于 I_m 的半高全宽, 因此 f_a 要比 f_m 陡峭(如图 2-10 所示), 即公式 2-14 中 $df_a(v)/dv$ 大于 $df_m(v)/dv$ 。

测量误差分析

在以下的模拟计算中, 大气分子模型采用 1976 年美国标准大气, 气溶胶则利用 Spinhirne 的模型^[63], 边界层选用都市气溶胶模型, β_a 、 β_m 、 α_a 和 α_m 如图 2-12 所示, 计算出来的 R_b 如图 2-13 所示。

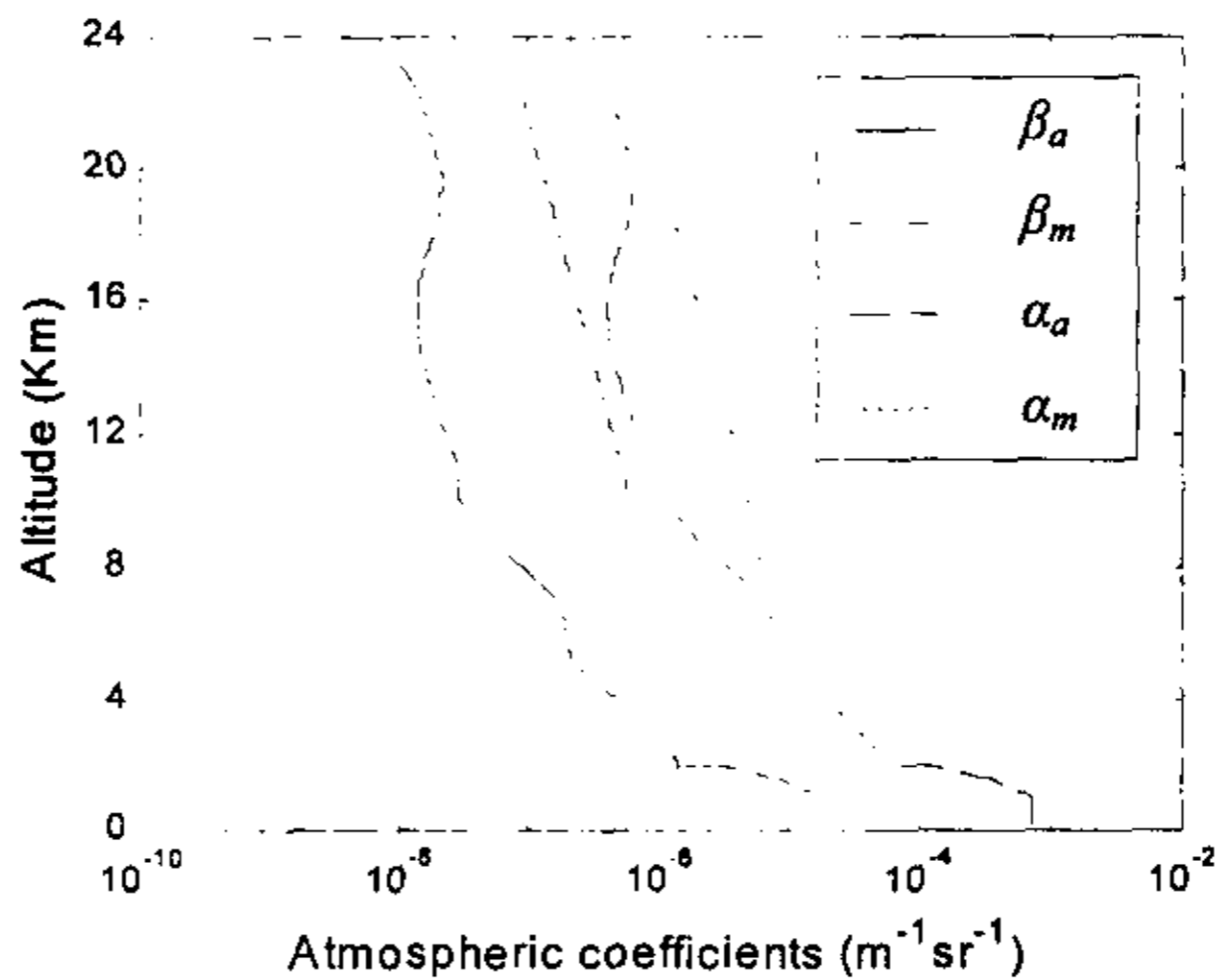
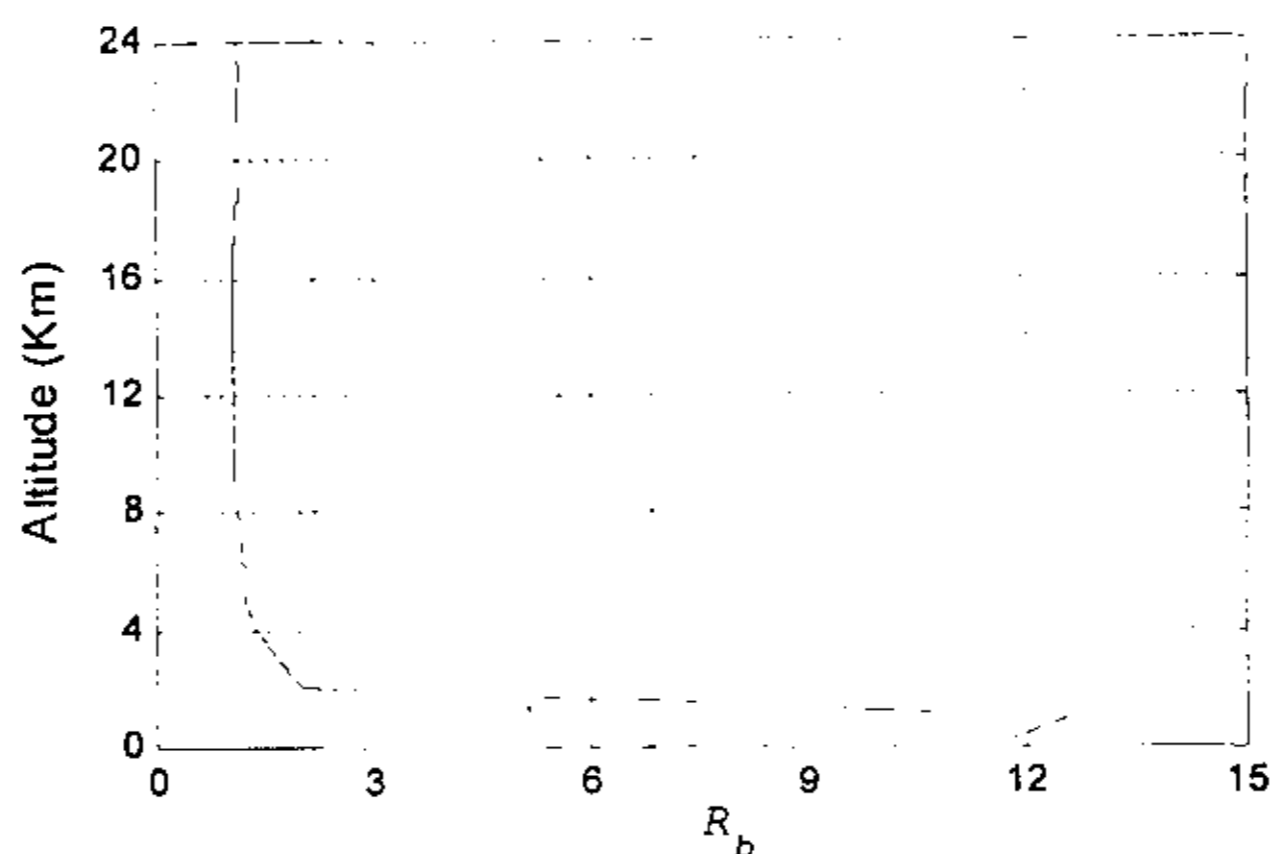


图2-12 模拟计算选用的大气模型参数

图2-13 模拟计算选用的 R_b

根据图 2-12 和 2-13 提供的大气参数，并且利用公式 2.15 到 2.19 和表 2-2 中的参数及参数值，可以模拟计算出激光雷达系统测量的绝对误差。从图 2-14~2-17 结果可以看出，夜晚由于没有太阳背景光的影响，测量误差比较小。如果以 1m/s 的误差为极限，则激光测风雷达系统可以探测到约 10km 的距离。白天的测量由于受到太阳背景的影响，测量结果随干涉滤光片的光谱带宽的不同而不同。以 1m/s 的误差为极限， $\Delta\lambda=0.5\text{nm}$ 、1nm、2nm 时，探测高度分别为 7km、6km 和不到 5km。因此，要减小白天测量的误差，采用窄带光学滤色片是行之有效的办法。

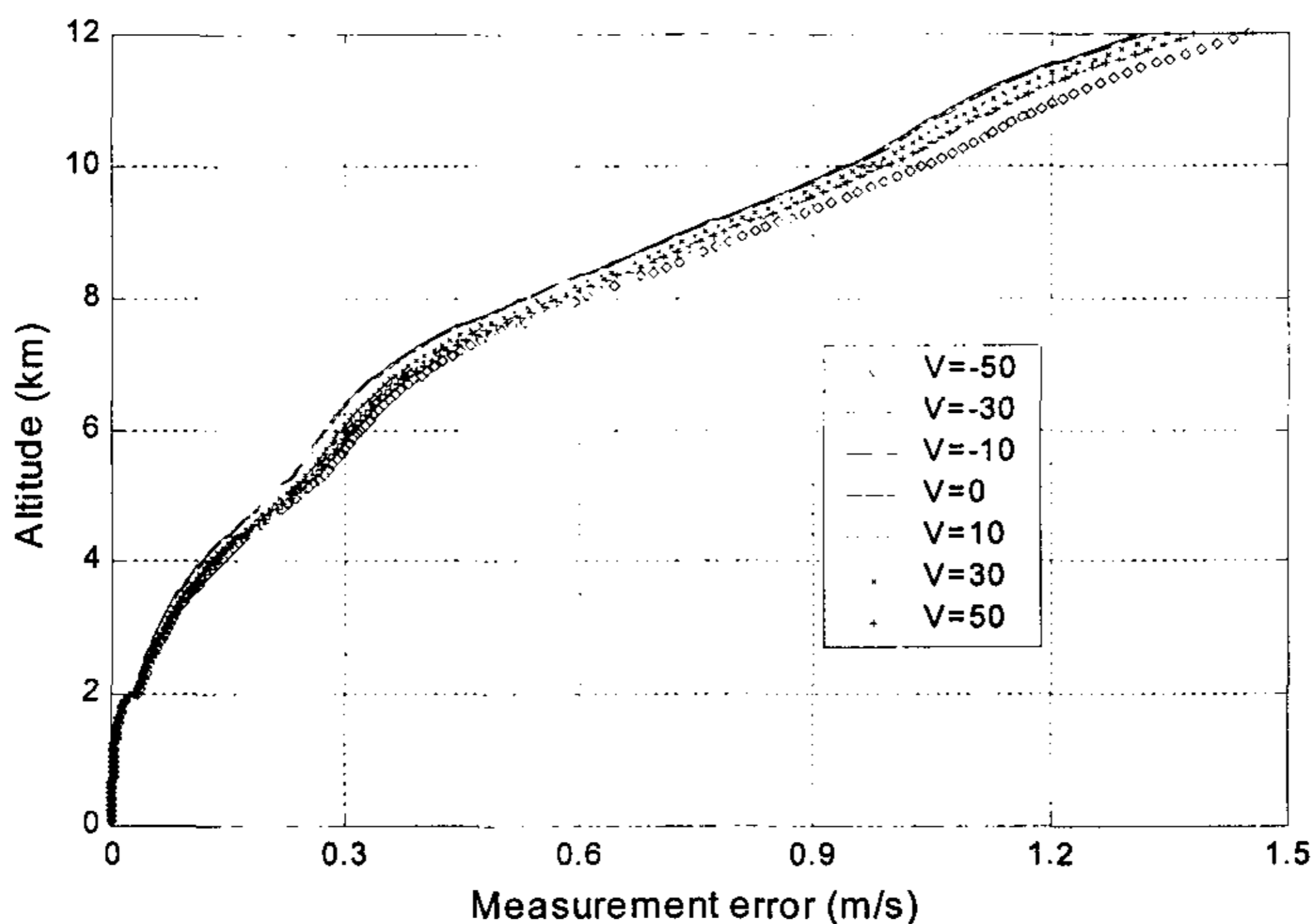


图2-14 激光雷达系统夜晚测量误差

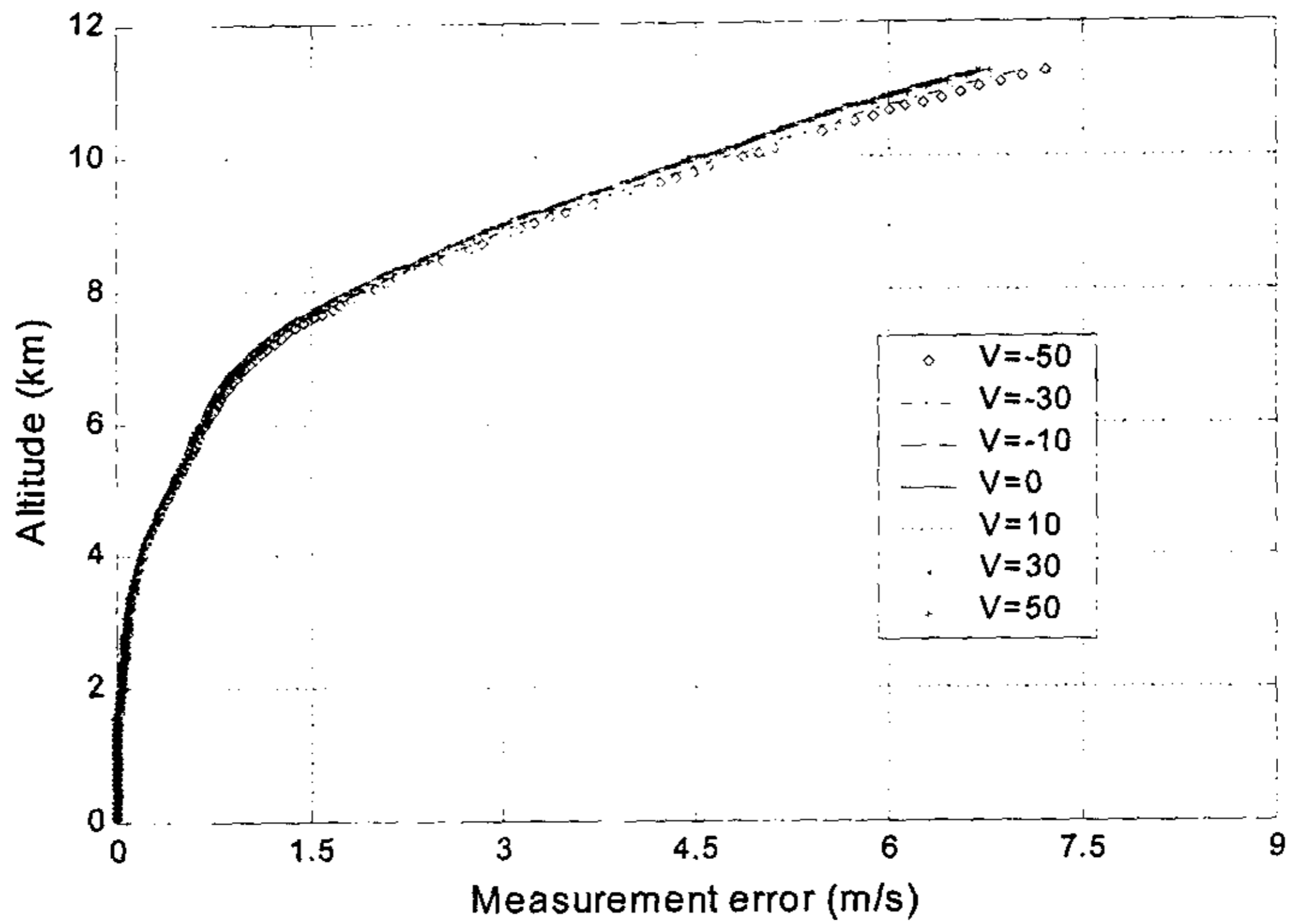


图2-15 $\Delta\lambda=0.5\text{nm}$ 激光雷达系统白天测量误差

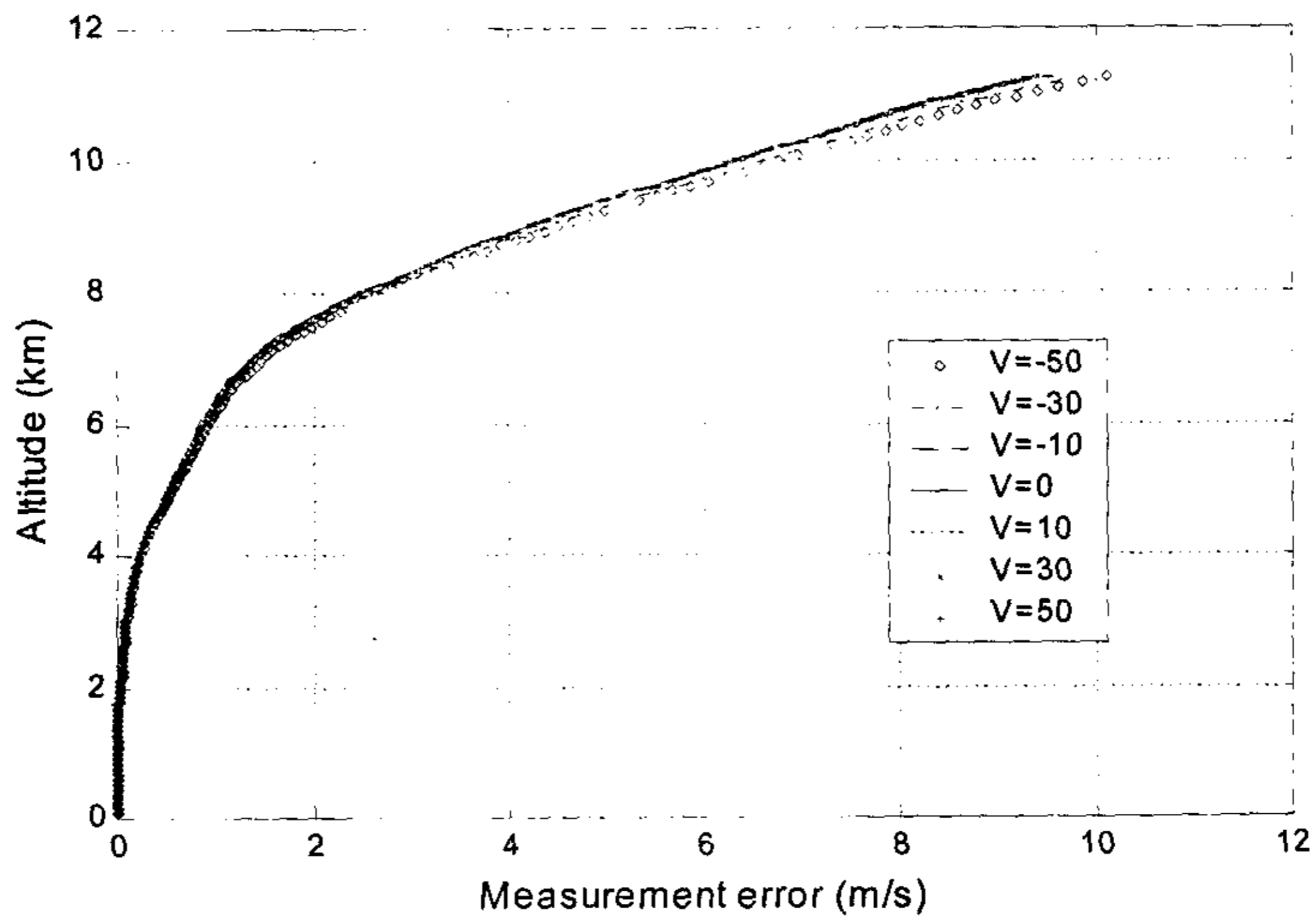
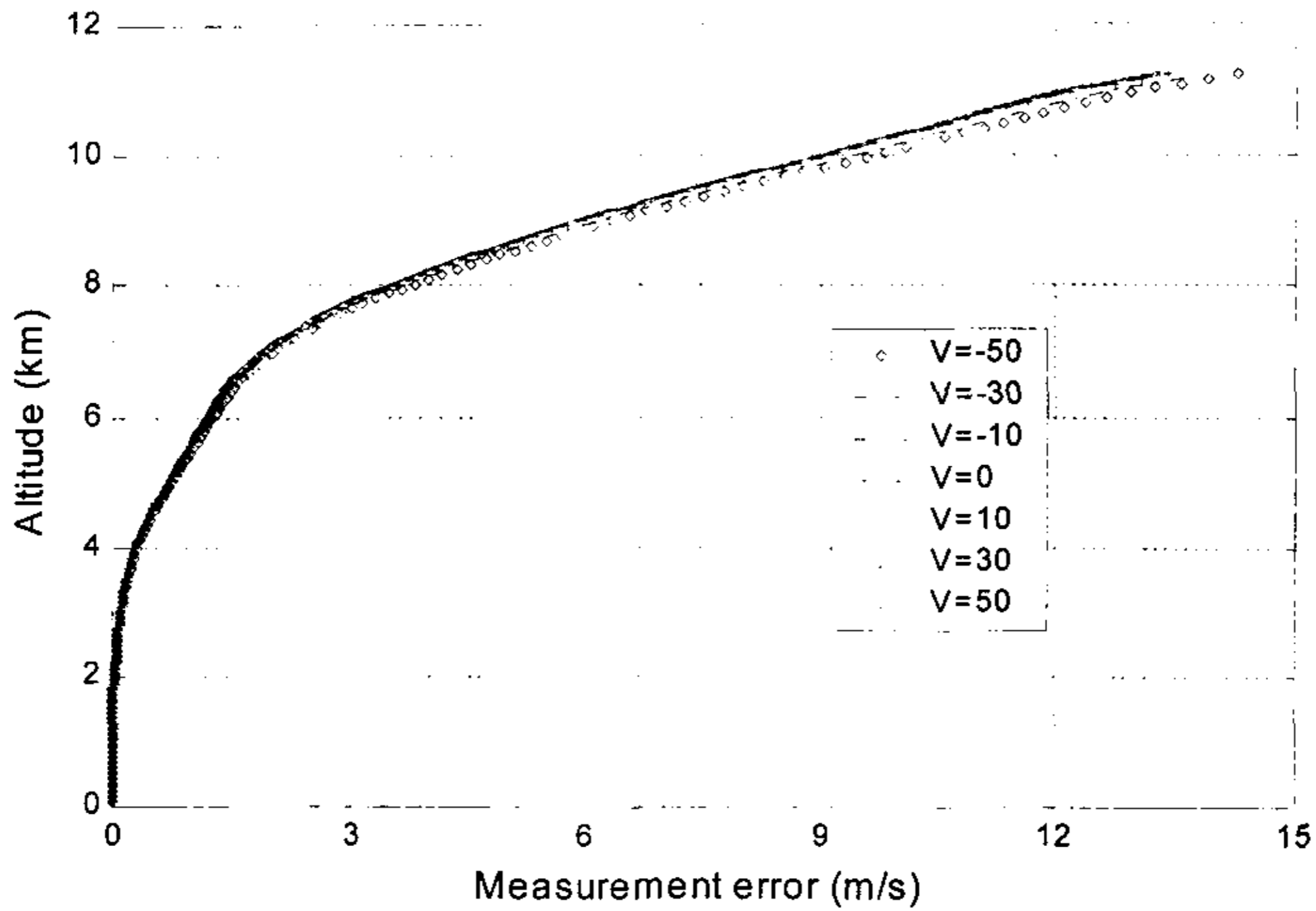


图2-16 $\Delta\lambda=1\text{nm}$ 激光雷达系统白天测量误差

图2-17 $\Delta\lambda=2\text{nm}$ 激光雷达系统白天测量误差

下面是利用公式 2.21 和相应系统参数模拟计算得到的测量相对误差结果。由于晚上没有太阳背景的影响，晚上测量的相对误差要明显小于白天的测量相对误差。白天测量中，随着光学滤色片带宽的增加，测量的相对误差也显著增加。

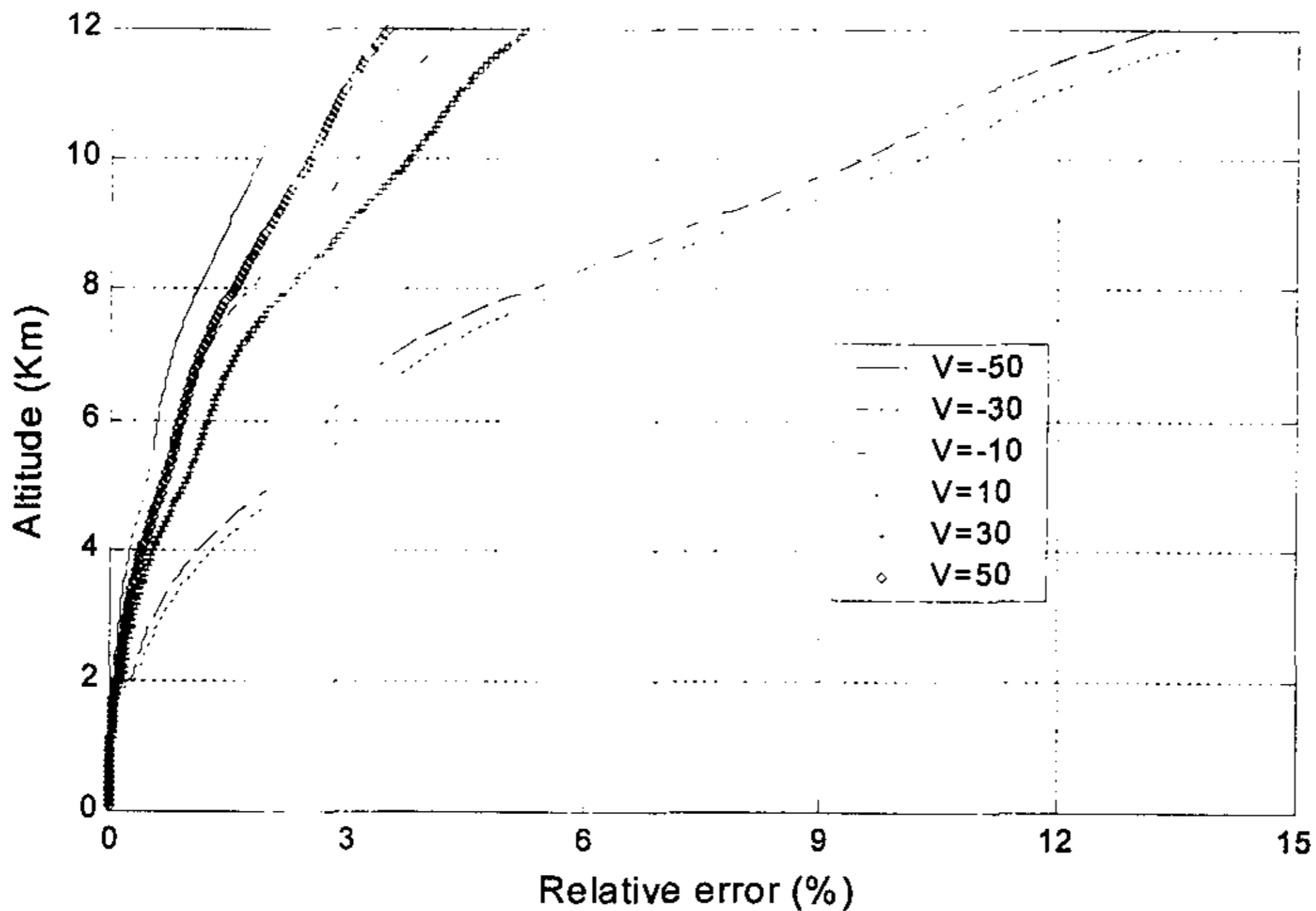


图2-18 激光雷达系统夜晚测量相对误差

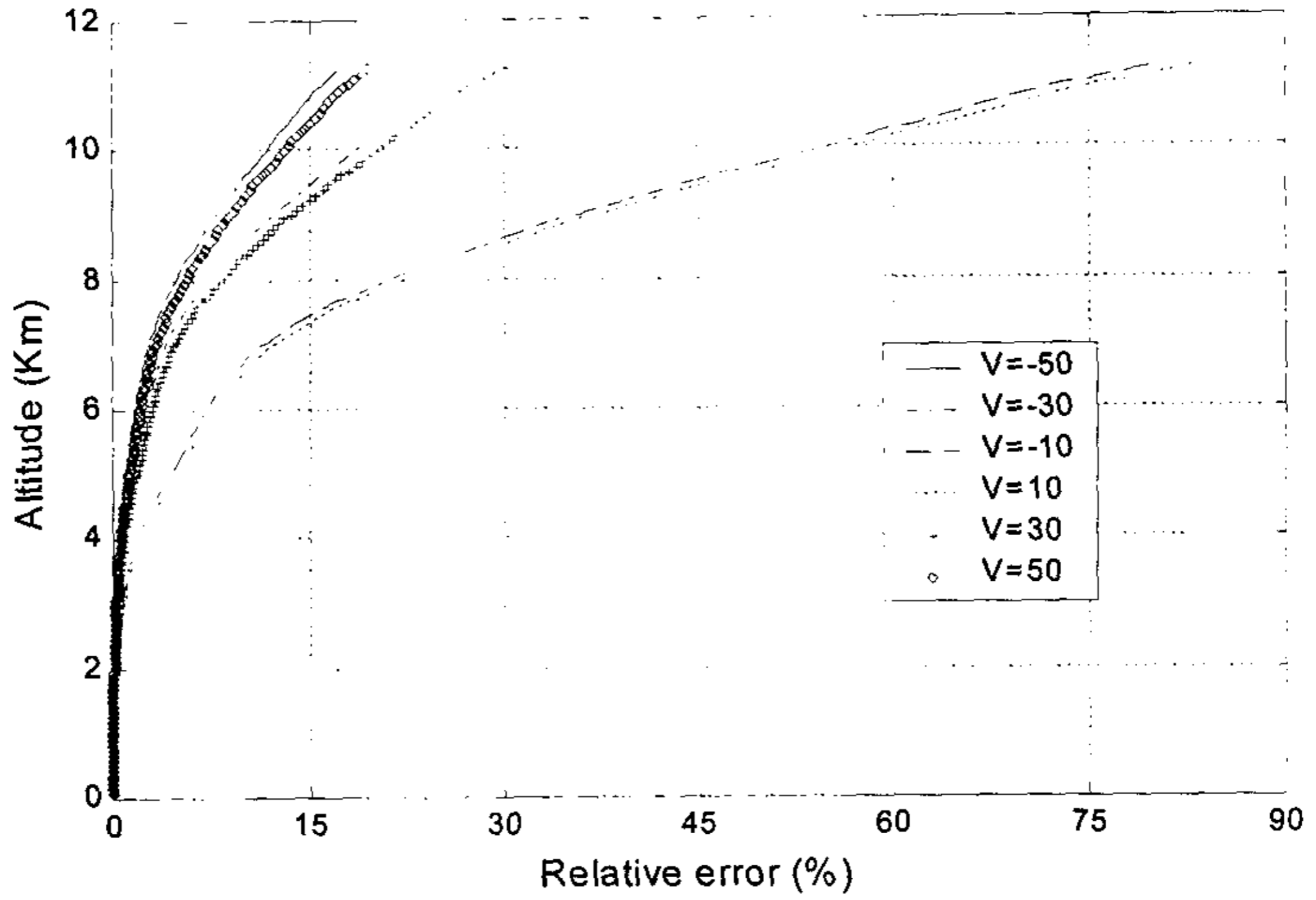


图2-19 $\Delta\lambda=0.5\text{nm}$ 激光雷达系统白天测量相对误差

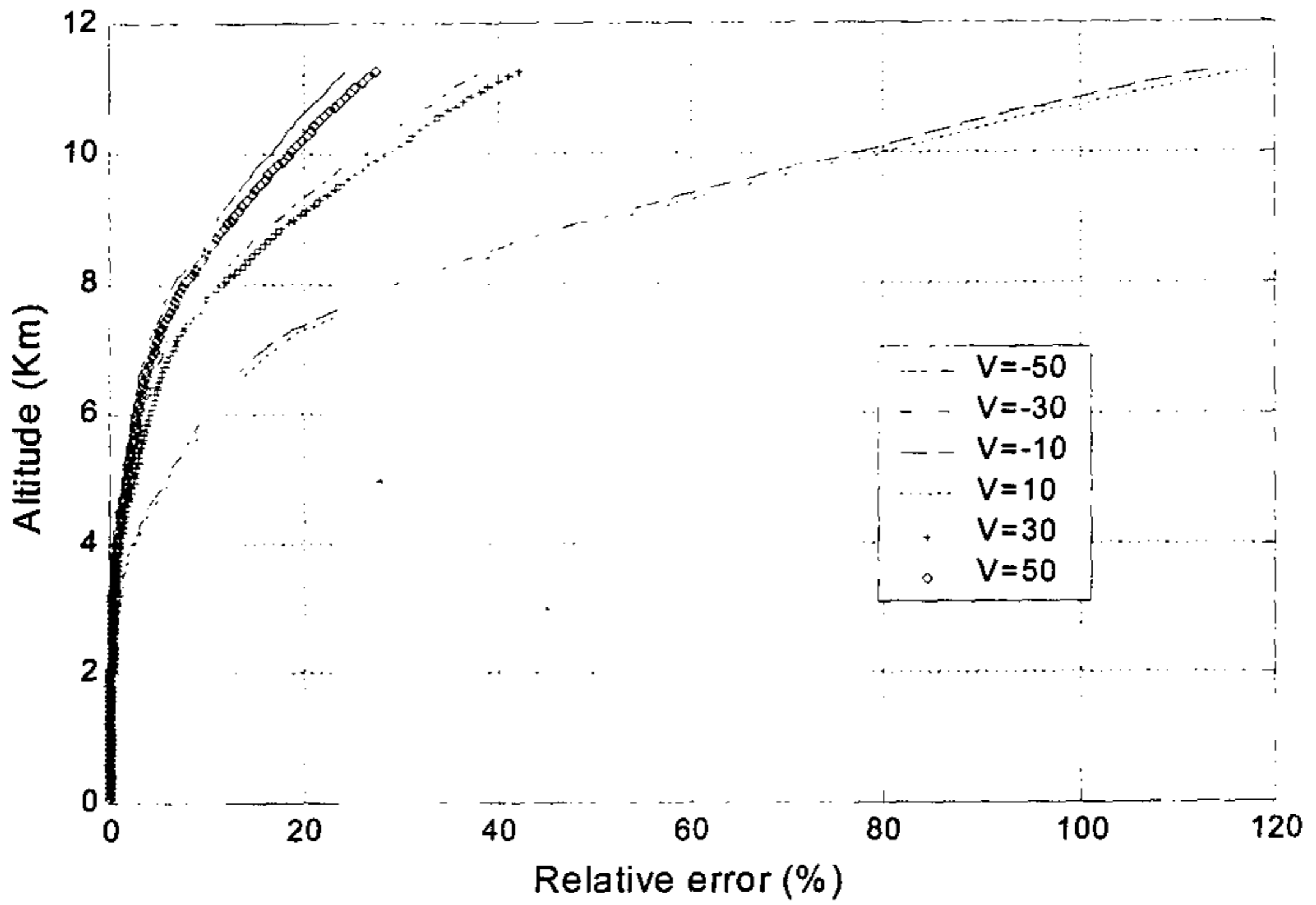
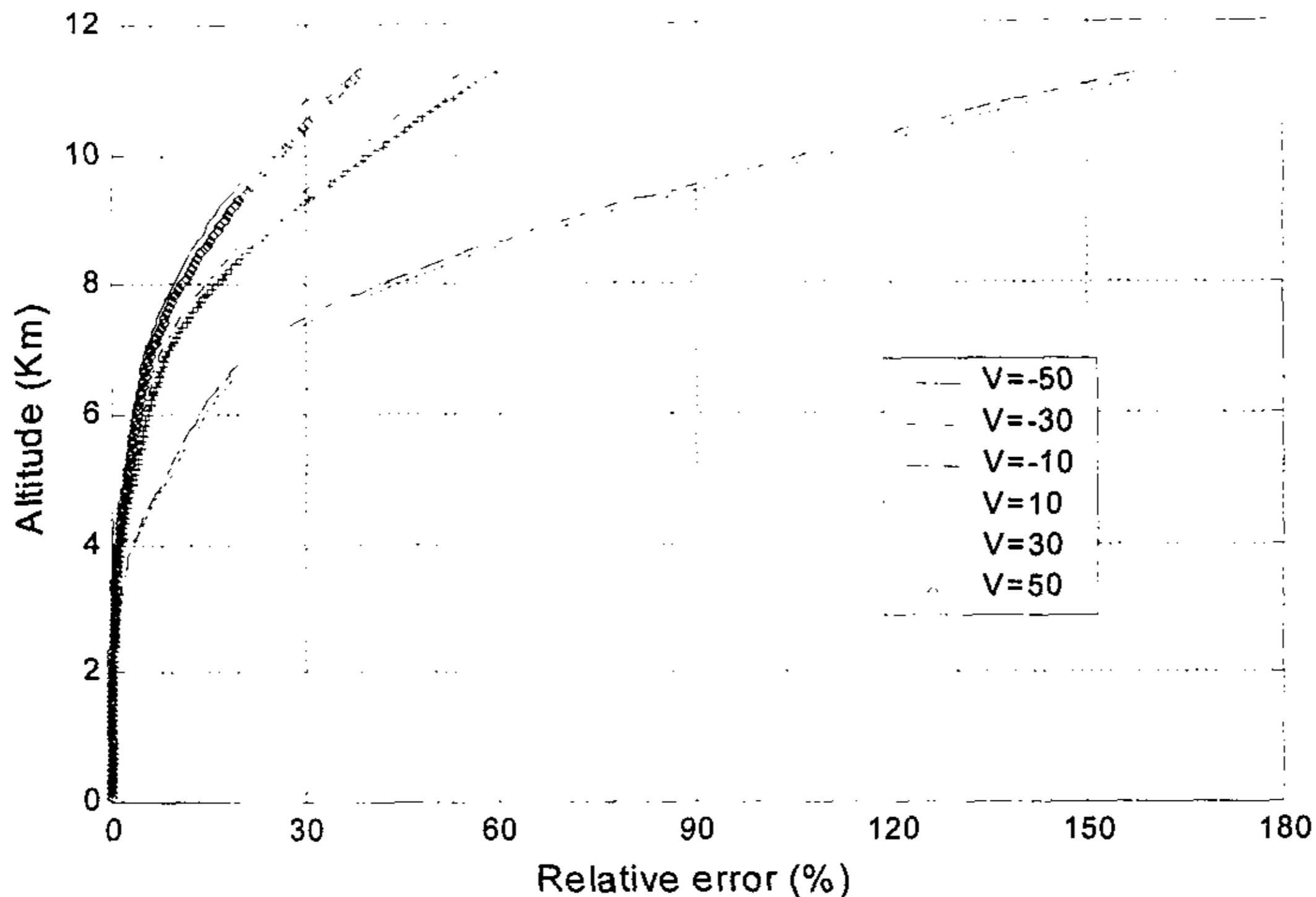


图2-20 $\Delta\lambda=1\text{nm}$ 激光雷达系统白天测量相对误差

图2-21 $\Delta\lambda=2\text{nm}$ 激光雷达系统白天测量相对误差

第五节 大气径向风速反演方法

上面详细分析了基于碘分子吸收滤波器的非相干测风原理，在实际的测量中，大气径向风场的反演比较简单。大气径向风场反演的关键是测量 $R(r, \nu)$ ，只要知道了 $R(r, \nu)$ 就能从大气回波信号中反演出大气径向风速。

当激光垂直入射到大气时，大气水平风场与激光束垂直，根据公式 1.3，水平风场引起的多普勒频移为 0。大气在垂直方向运动的分量很小，垂直风速一般在 10cm/s 的量级。因此，如果忽略大气垂直风场的影响，则可以认为当激光垂直入射到大气时，激光回波信号中多普勒频移为 0。

碘分子吸收线的光谱位置是固定不变的，因此测量 $R(r, \nu)$ 需要扫描激光频率。将激光垂直入射到大气，扫描激光频率使它覆盖碘分子 1109 吸收线高波数边缘的范围，则可以测量得到 $N_1(r)$ 和 $N_2(r, \nu)$ ，从而就可以计算出大气各个高度的 $R(r, \nu)$ 。图 2-22 中曲线是测量的某一高度 $R(r, \nu)$ 。

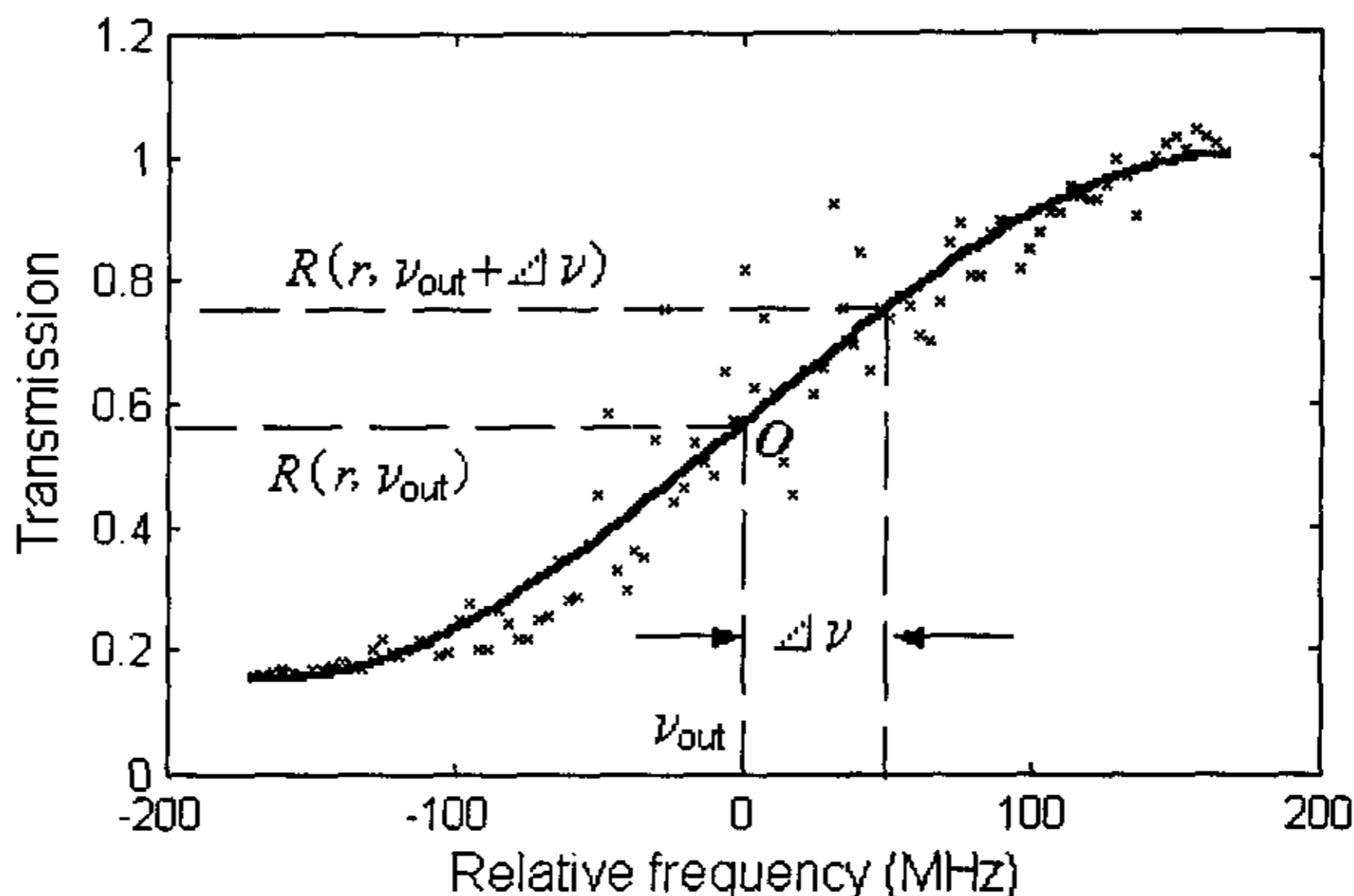


图2-22 某一高度大气径向风速反演方法示意图

测量得到 $R(r, \nu)$ 后, 将激光频率锁定在 $R(r, \nu)$ 的中间一点, 如图 2-22 种的 O 点, 可以得到 $R(r, \nu_{out})$ 和对应的 ν_{out} 。随后, 将激光束偏离垂直方向。由于存在大气水平风场, 大气激光回波的频率偏离激光频率, 此时得到 $R(r, \nu_{out} + \Delta\nu)$ 。在曲线 $R(r, \nu)$ 上可以找到与 $R(r, \nu_{out} + \Delta\nu)$ 相对应的 $\nu_{out} + \Delta\nu$, 由此可以得到多普勒频移 $\Delta\nu$, 也就可以计算得到该方向的大气径向风速。

第六节 大气风场反演方法

上面的理论分析和计算模拟给出的是固体激光多普勒雷达系统径向风速的测量结果。进一步, 激光雷达系统应该提供从测量的径向风场反演出的大气实际风场。由于大气在垂直方向运动的分量很小, 垂直风速一般小于 1m/s , 因此重点是大气水平风场的反演。

激光雷达系统垂直上空水平风场反演算法

激光测风雷达普遍采用的是 VAD 扫描技术。即让雷达以 $0 \sim \pi$ 仰角 σ 进行 $0 \sim 2\pi$ 方位角 β 的锥形扫描, 从而可以探测到整个半球内各个位置的大气径向风速速度, 如图 2-23 所示。雷达探测到的平均多普勒径向速度 $V_r(\beta)$ 是水平风速 V_h 、风向 β_0 、探测仰角 σ 和扫描方位角 β 的函数。由此得到柱面坐标系某一高度径向风场表达式^[64]:

$$V_r(\beta) = -V_h(\beta) \cos(\beta - \beta_0) \cos \sigma \quad (2.22)$$

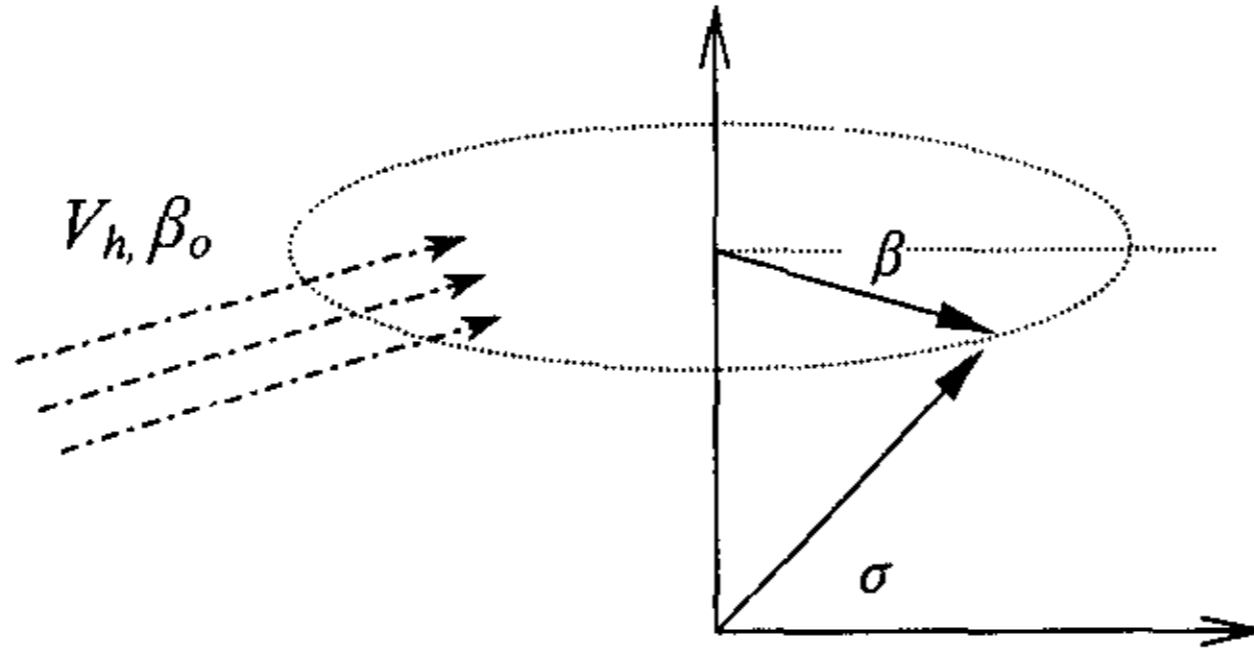


图2-23 激光多普勒雷达测风系统VAD扫描示意图

理想情况下，假设水平风速 V_h 、风向 β_0 不变时，激光雷达扫描一周得到的该高度的径向风速数据可表示为一个周期正弦信号，如图 2-24 所示（图中未考虑噪声）。

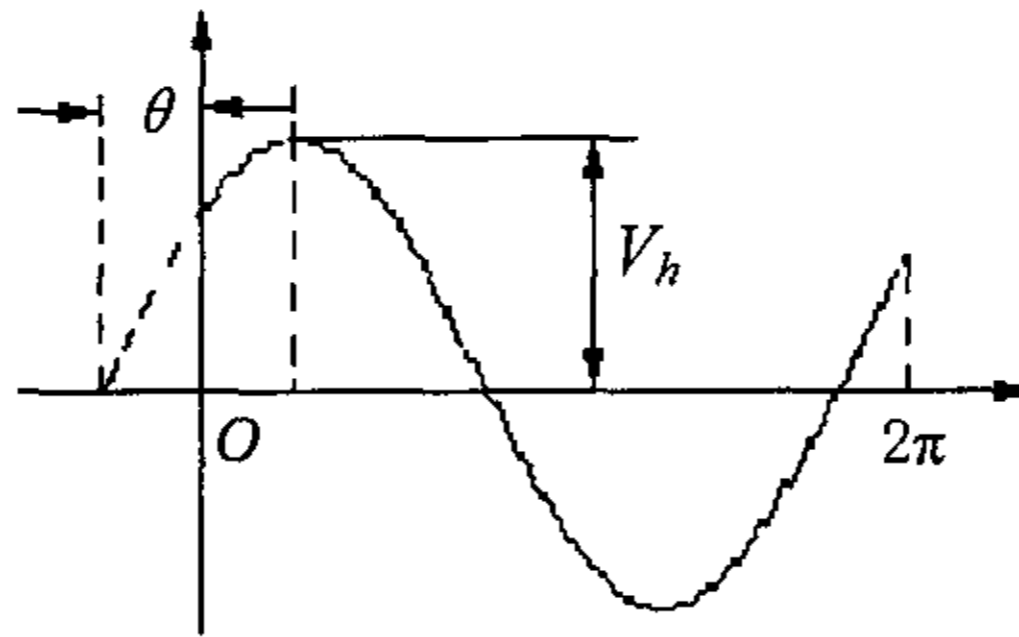


图2-24 一周径向风速示意图

图 2-24 中正弦信号表示为：

$$y = V_h \sin(2\pi ft + \theta) + \varepsilon \quad (2.23)$$

其中， y 为测量风速值， $2\pi ft$ 为测量时间，由扫描测量角度决定， ε 为噪声信号。

正弦的幅值等于当时的平均水平风速大小 V_h ，正弦的初始相位 θ 等于 $\frac{1}{2}\pi - \beta_0 + k\pi$ 。因此，问题转化为：在一定准则下，如何由测量风速值 y 和测量角度 t 求解出幅值 V_h 和初始相位 θ 。最直观也是最简单的方法是最小二乘法，即选择误差平方和最小准则。

由 2.23 式可以得到：

$$\begin{aligned} Y &= V_h \sin(2\pi fT) \cos \theta + V_h \cos(2\pi fT) \sin \theta + \varepsilon \\ &= k_1 \sin(2\pi fT) + k_2 \cos(2\pi fT) + \varepsilon \end{aligned} \quad (2.24)$$

其中: $k_1 = V_h \cos\theta$, $k_2 = V_h \sin\theta$, $\sin(2\pi fT) = [\sin(2\pi ft_1), \sin(2\pi ft_2), \dots, \sin(2\pi ft_n)]^T$, $\cos(2\pi fT) = [\cos(2\pi ft_1), \cos(2\pi ft_2), \dots, \cos(2\pi ft_n)]^T$, $Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$, $\varepsilon = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n]^T$ 。

2.24 式写成矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_i \\ \dots \\ y_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(2\pi ft_1) & \cos(2\pi ft_1) \\ \sin(2\pi ft_2) & \cos(2\pi ft_2) \\ \dots & \dots \\ \sin(2\pi ft_i) & \cos(2\pi ft_i) \\ \dots & \dots \\ \sin(2\pi ft_N) & \cos(2\pi ft_N) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \dots \\ \varepsilon_i \\ \dots \\ \varepsilon_N \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

误差平方和为:

$$\begin{aligned} \Lambda &= \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2 \\ &= [Y - k_1 \sin(2\pi fT) - k_2 \cos(2\pi fT)]^T [Y - k_1 \sin(2\pi fT) - k_2 \cos(2\pi fT)] \quad (2.26) \end{aligned}$$

使误差平方和最小, 得到:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Lambda}{\partial k_1} = -Y^T \sin(2\pi fT) + k_1 \sin(2\pi fT)^T \sin(2\pi fT) + k_2 \sin(2\pi fT)^T \cos(2\pi fT) = 0 \\ \frac{\partial \Lambda}{\partial k_2} = -Y^T \cos(2\pi fT) + k_1 \cos(2\pi fT)^T \sin(2\pi fT) + k_2 \cos(2\pi fT)^T \cos(2\pi fT) = 0 \end{cases} \quad (2.27)$$

解上述方程组, 解出 k_1 , k_2 为:

$$\begin{cases} k_1 = \frac{\begin{vmatrix} -Y^T \sin(2\pi fT) & \sin(2\pi fT)^T \cos(2\pi fT) \\ -Y^T \cos(2\pi fT) & \cos(2\pi fT)^T \cos(2\pi fT) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \sin(2\pi fT)^T \sin(2\pi fT) & \sin(2\pi fT)^T \cos(2\pi fT) \\ \cos(2\pi fT)^T \sin(2\pi fT) & \cos(2\pi fT)^T \cos(2\pi fT) \end{vmatrix}} \\ k_2 = \frac{\begin{vmatrix} \sin(2\pi fT)^T \sin(2\pi fT) & -Y^T \sin(2\pi fT) \\ \cos(2\pi fT)^T \sin(2\pi fT) & -Y^T \cos(2\pi fT) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \sin(2\pi fT)^T \sin(2\pi fT) & \sin(2\pi fT)^T \cos(2\pi fT) \\ \cos(2\pi fT)^T \sin(2\pi fT) & \cos(2\pi fT)^T \cos(2\pi fT) \end{vmatrix}} \end{cases} \quad (2.28)$$

从而得到误差平方和最小准则下平均水平风速 V_h 和风向 β_0 :

$$\begin{aligned} V_h &= \sqrt{k_1^2 + k_2^2} \\ \beta_0 &= \frac{\pi}{2} - \theta + k\pi = \frac{\pi}{2} + k\pi - \arctg\left(\frac{k_2}{k_1}\right) \quad (2.29) \end{aligned}$$

式中, 选择 $k=\pm 1$ 或 0 , 调整 β_0 为 $0\sim 2\pi$ 之间合理值。

在实际测量中, 随着探测距离的增加, 大气回向散射的信号基本上成指数衰减, 而噪声信号基本不变, 因此测量得到信噪比是随探测距离不断减小的。前面推导出的基于最小二乘法的反演方法, 不可能对信噪比随探测距离变化的信号都得到比较满意的结果。为了提高反演精度, 可以在每一个径向方向采用多次测量、多次平均的方法来提高测量数据的整体信噪比。或者, 在相同信噪比下也可以采用减小方位角的扫描步进角度、增加测量角度来提高反演精度。显然, 上述方法是以延长测量时间的为代价的。测量时间太长也是不现实的, 因此, 有必要在测量时间和反演精度之间找到比较好的平衡。

在一定信噪比下, 步进方位角越小, 则系统扫描一周得到的数据量就越多, 反演误差就越小。但是过小的步进方位角是不现实的, 可以利用数理统计中 χ^2 分布推导出不同信噪比下满足反演精度的步进方位角。

由数理统计知识可知, 样本方差 S^2 是标准差 σ^2 的无偏估计^[65], 即

$$\frac{(n-1)S^2}{\sigma^2} \sim \chi^2(n-1) \quad (2.30)$$

因此, 当标准差 σ^2 确定时, 就可以计算出样本方差 S^2 在置信度为 $1-\alpha$ (α 为较小的数) 的置信区间:

$$\left(0, \frac{\sigma^2 \chi_{1-\alpha}^2 (n-1)}{n-1}\right) \quad (2.31)$$

其中, $\chi_{1-\alpha}^2$ 为 χ^2 分布上 $1-\alpha$ 的分位点。即在上述区间中, 当标准差为 σ^2 时, 包含满足需要的样本方差 S^2 的概率为 $1-\alpha$ 。

为确定不同信噪比下的最佳步进方位角, 根据系统指标要求首先确定风速反演误差的标准差 σ_a^2 和风向反演误差的标准差 σ_θ^2 , 然后就可以得到风速和风向反演误差的样本方差在置信度为 $1-\alpha$ 时的置信上限 S_{a0}^2 和 $S_{\theta 0}^2$ 。给定信噪比, 调整步进方位角 β , 从而可以得到此时反演出的 S_a^2 和 S_θ^2 。 S_a^2 和 S_θ^2 分别小于样本方差置信上限 S_{a0}^2 和 $S_{\theta 0}^2$ 时的最大步进方位角 β_{\max} 就是该信噪比下的满足需要步进方位角, 这表明此时风速和风向反演误差的标准差小于 σ_a^2 和 σ_θ^2 的概率为 $1-\alpha$ 。改变信噪比, 就可以得到不同信噪比下的满足需要的步进角度。

图2-25是计算机模拟的步进扫描方位角与信噪比的关系。模拟时选取测量次数 n 为100，置信度 $1-\alpha$ 为0.95。根据固体激光多普勒测风雷达系统指标要求，选取 $\sigma_a=0.05$ ， $\sigma_\theta=10^\circ$ 。步进方位角噪声为高斯白噪声，其数学期望为0、均方差为 1° 。图2-25中横轴信噪比SNR指正弦信号幅度与高斯噪声标准方差之比。

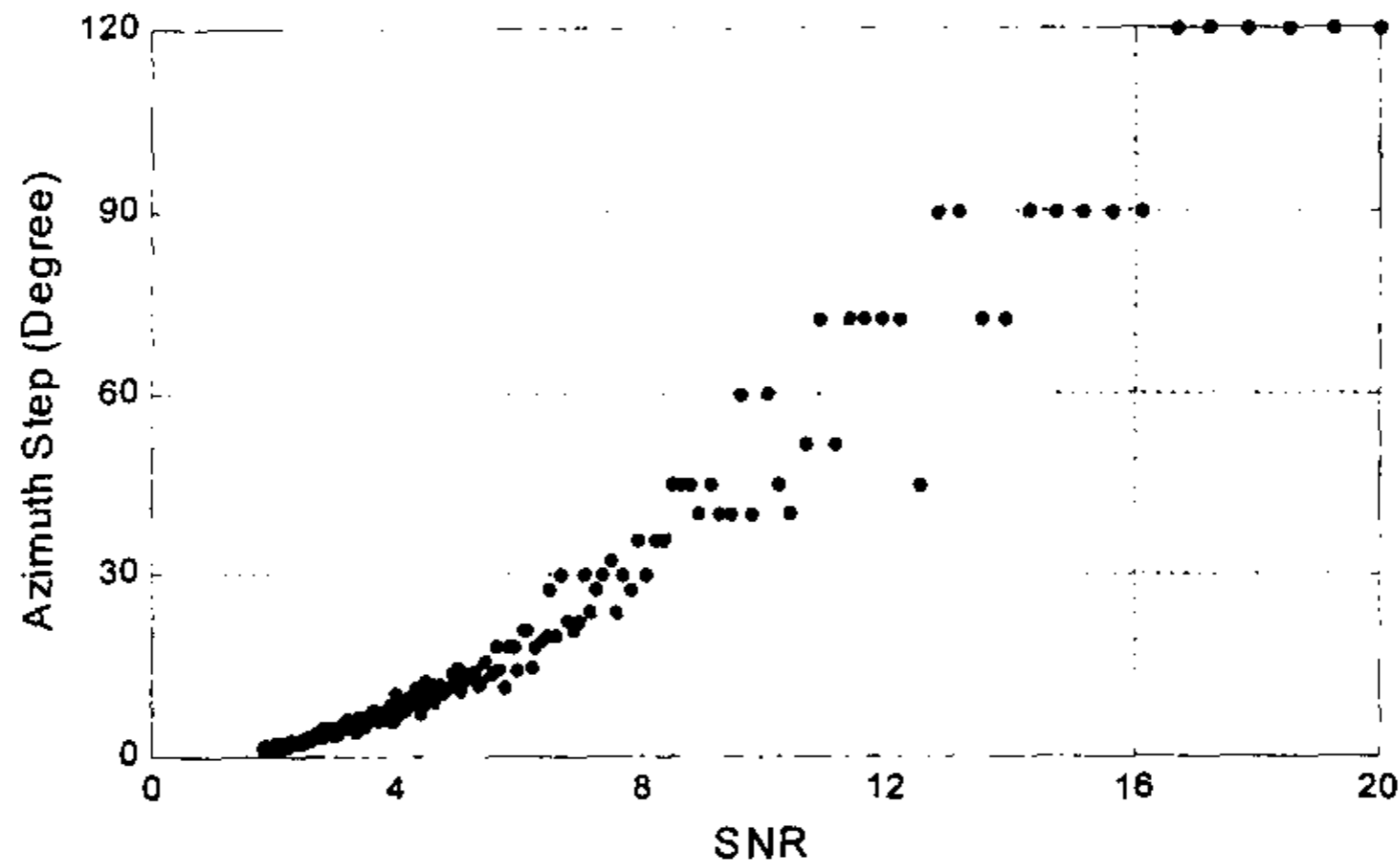


图2-25 信噪比SNR与步进扫描方位角的关系

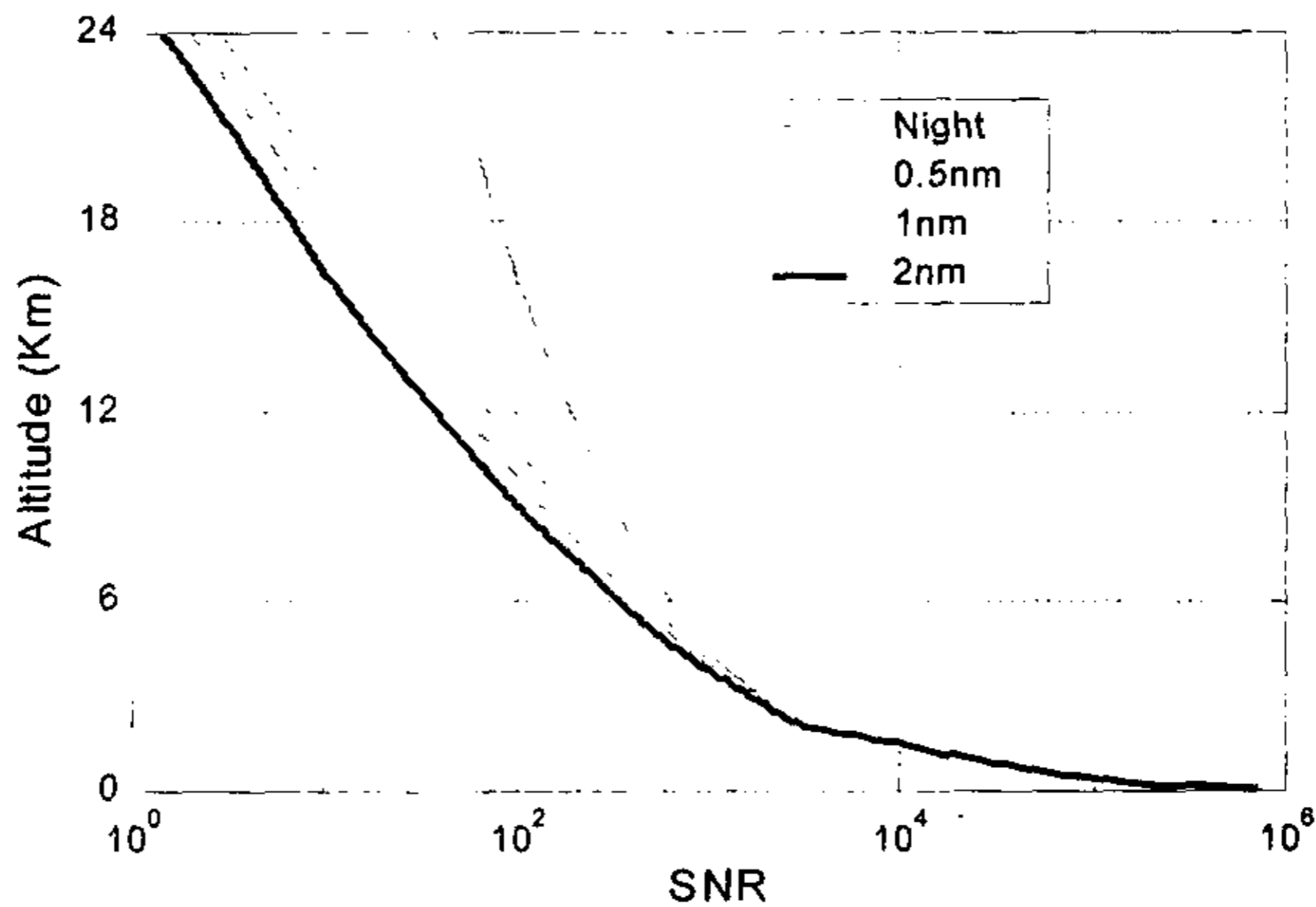


图2-26 测风雷达系统接收到的信号信噪比SNR

目前，在测风雷达系统实际测量时，使用4个方向的径向风速反演大气的水平风场，从图中可知，此时信号的信噪比应大于16。图2-26是根据公式2.18，利用表2-2参数值模拟得到的测风雷达系统接收到信号的信

噪比。由于 Rayleigh 光谱比较宽，且高空主要以 Rayleigh 散射为主，所以系统接收到的光子数随风速变化不大，因此图 2-26 中没有对系统接收到的信噪比再按风速细分。

由图 2-26 可以看出，按照表 2-2 中参数值配置的测风雷达系统利用本节的大气水平风场的反演方法在探测距离小于 16km 时可以保证足够的反演精度。

激光雷达系统非垂直上空风场反演算法

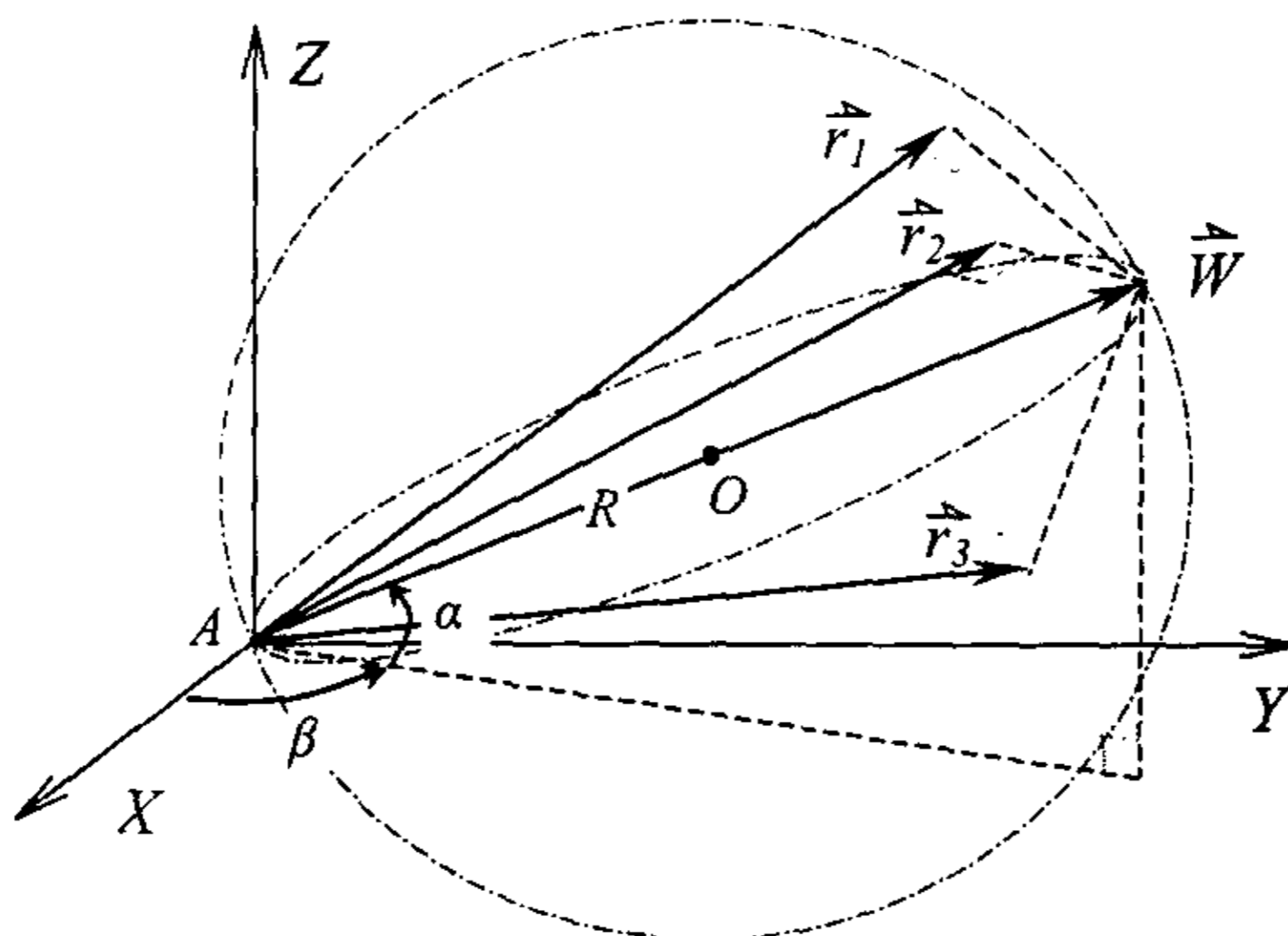


图2-27 非垂直方向风场反演示意图

对于其他非垂直方向任意点的风场，可利用该点附近任意不共面的三个的径向风矢量求出。如图 2-27 所示， $r_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $r_2(x_2, y_2, z_2)$ 和 $r_3(x_3, y_3, z_3)$ 为任意不公面的三个径向风矢量，则由空间几何知识可知，这三个矢量唯一确定了一个球面，该球面通过圆心 $O(x_0, y_0, z_0)$ 的直径 r_0 就是所求的该处实际大气风矢量。直径长度 $2R$ 就是风矢量的大小，直径矢量的方向就是大气风矢量方向。图中 β 为实际风矢量的方位角， α 为风矢量的仰角。

根据立体几何知识，可以得到下列方程组

$$\begin{cases} (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2 = R^2 \\ (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2 = R^2 \\ (x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2 + (z_3 - z_0)^2 = R^2 \\ x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 = R^2 \end{cases} \quad (2.32)$$

简化后可以得到

$$\begin{cases} x_1 x_0 + y_1 y_0 + z_1 z_0 = \frac{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}{2} \\ x_2 x_0 + y_2 y_0 + z_2 z_0 = \frac{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}{2} \\ x_3 x_0 + y_3 y_0 + z_3 z_0 = \frac{x_3^2 + y_3^2 + z_3^2}{2} \end{cases} \quad (2.33)$$

方程组的解为:

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}{2} \\ \frac{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}{2} \\ \frac{x_3^2 + y_3^2 + z_3^2}{2} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

从而反演得到大气风矢量的参数:

$$\begin{aligned} W &= 2\sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2} \\ \beta &= \arctg \frac{y_0}{x_0} \\ \alpha &= \arctg \frac{z_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}} \end{aligned} \quad (2.35)$$

第三章 非相干激光多普勒测风雷达

第一节 系统总体设计

第二章详细论述了基于碘分子吸收滤波器的非相干测风原理。在此基础上,青岛海洋大学研制了一台地基非相干激光多普勒测风雷达系统。

在研制的激光测风雷达系统中,选用种子注入的倍频 Nd:YAG 激光作为发射源,采用碘分子 1109 吸收线作为边缘滤波器,检测大气回波信号中的多普勒频移。由于碘分子吸收线的位置是固定不变的,因此一般的激光器输出波长难以与之匹配。在研制的雷达系统中,选用频率可调谐的种子激光器,通过种子注入和种子激光器频率调谐的控制,实现脉冲激光频率与碘分子吸收线的匹配。系统工作时,频率稳定的 1064nm 种子激光注入到脉冲激光器谐振腔中。倍频的 532nm 脉冲激光经扩束后,通过扫描转镜入射到大气中。大气的回向散射信号由望远镜接收,并通过碘分子滤波器将多普勒频移信息转化为透过率变化。透过的光信号通过光电转换和数字化后,送到处理中心进行实时处理,得到径向风速。径向风速显示在屏幕上,并连同扫描角度、测量时间等相关信息存储到数据库中,以备准实时的大气风场反演和其他后处理。

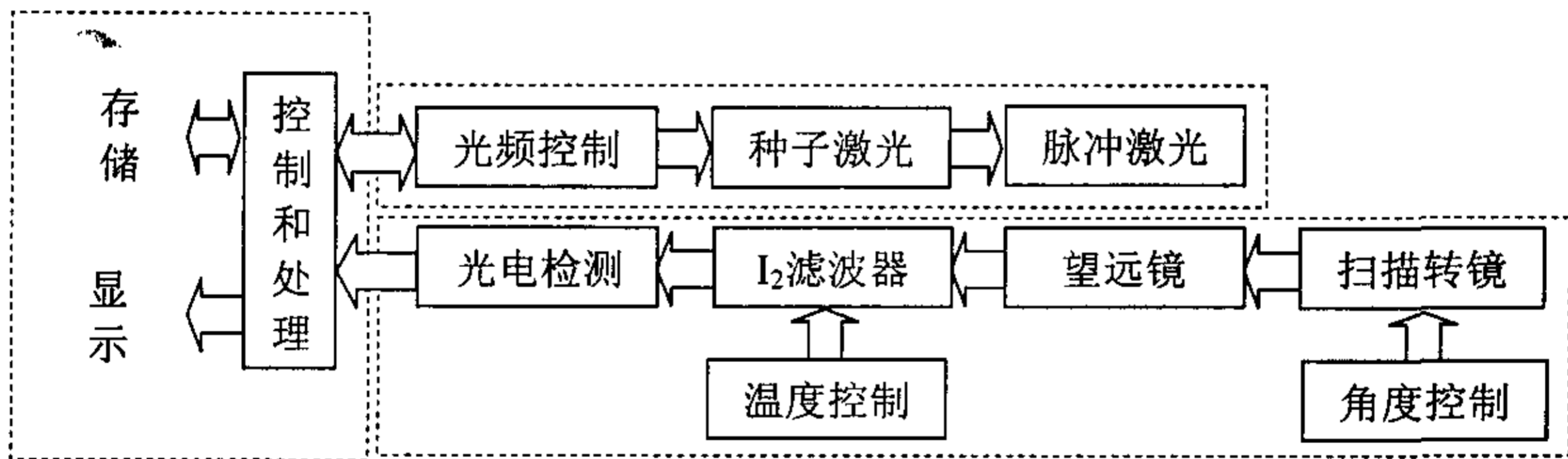


图3-1 地基非相干激光多普勒测风雷达系统框图

地基非相干激光测风雷达系统框图如图 3-1 所示。从图中可以看出,整个激光雷达基本可分为三个部分:激光发射系统、光学接收系统、控制和处理系统。激光发射系统主要采用激光种子注入和激光稳频技术获得窄

线宽、频率稳定的激光脉冲输出。光学接收系统主要是接收大气的激光回波信号，利用碘分子吸收滤波器检测大气多普勒频移信号，并通过光电倍增管进行光电转换。控制和处理系统提供整个系统的工作流程控制、信号采集处理、数据存储等。

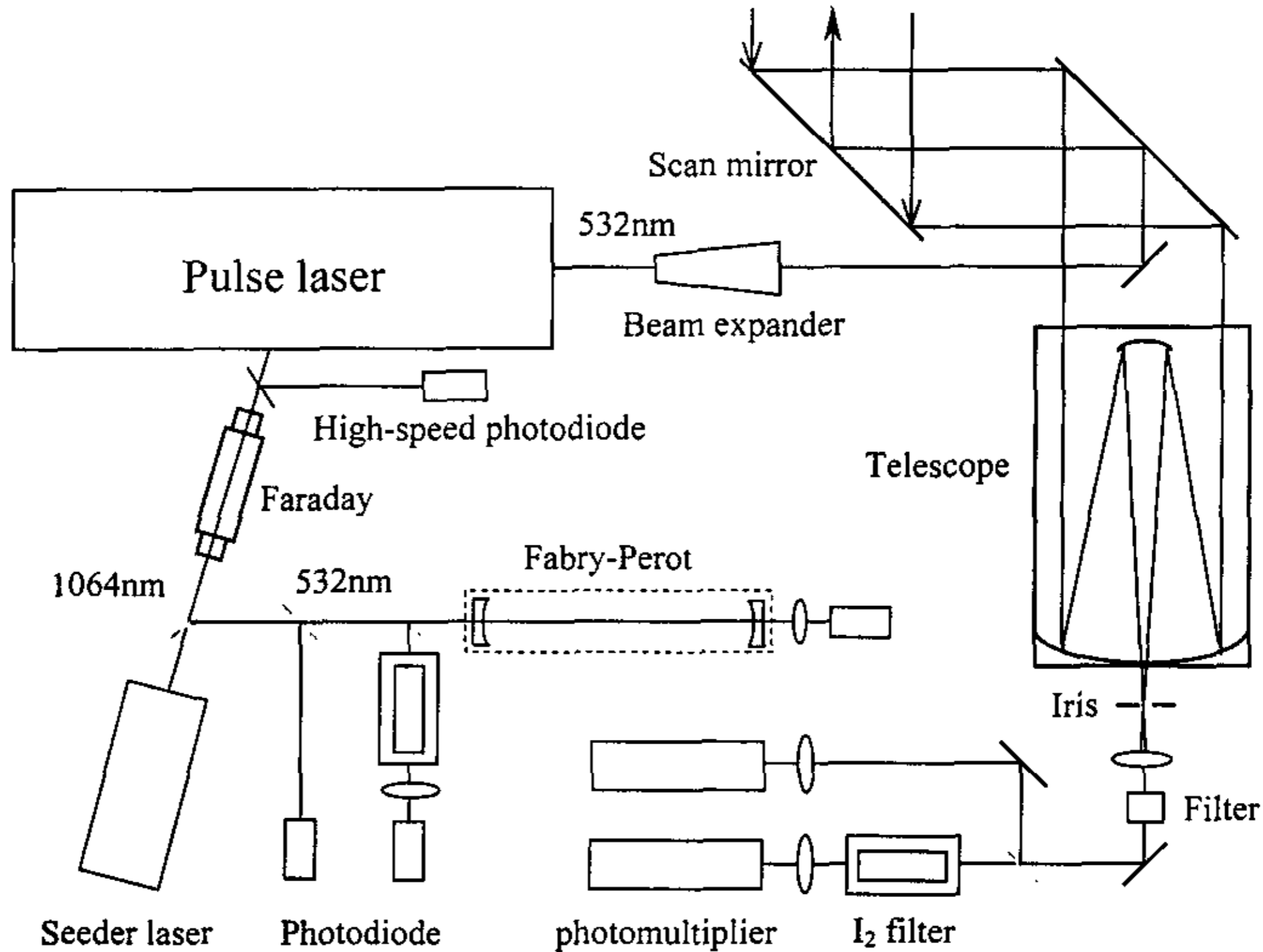


图3-2 非相干激光多普勒测风雷达系统光路示意图

地基非相干激光测风雷达系统的光路示意图如图 3-2 所示。种子激光器 1064nm 的基频光作为种子源注入到脉冲激光器的谐振腔中，强迫脉冲激光的输出频率与种子激光频率一致。种子激光器 532nm 的倍频输出用作激光频率的检测，分为三路。一路直接由光电二极管接收，另一路经过一个碘分子吸收滤波器后由光电二极管接收，通过这两路信号可以得到种子激光的碘分子滤波器透过率。种子激光的第三路光入射到一个 Fabry-Perot 标准具，由光电二极管接收其输出。该路信号用作种子激光 532nm 输出的相对频率标定。脉冲激光经 1:5 的扩束镜扩束后，由扫描转镜入射到大气中。扫描转镜同时接收激光脉冲的大气回波信号，并反射到 $\Phi 200\text{mm}$ 的 Cassegrain 望远镜中。Cassegrain 望远镜的光轴与输出脉冲激光光轴重合。Cassegrain 望远镜将接收信号汇聚，在光束焦点位置放一小孔，使系

统接收视场角略大于脉冲激光的发散角。信号光束由一个透镜变成平行光，然后经过一个窄带干涉滤色片，抑制背景光的影响。最后信号光经过差分接收光路，由光电倍增管接收。

考虑到激光测风雷达系统工程化的要求，整个光路系统采用全封闭设计，并且大部分光学元件均直接固定在光学平台上，增加系统的可靠性和稳定性。系统光路在光学平台上的布置如图 3-3 所示。

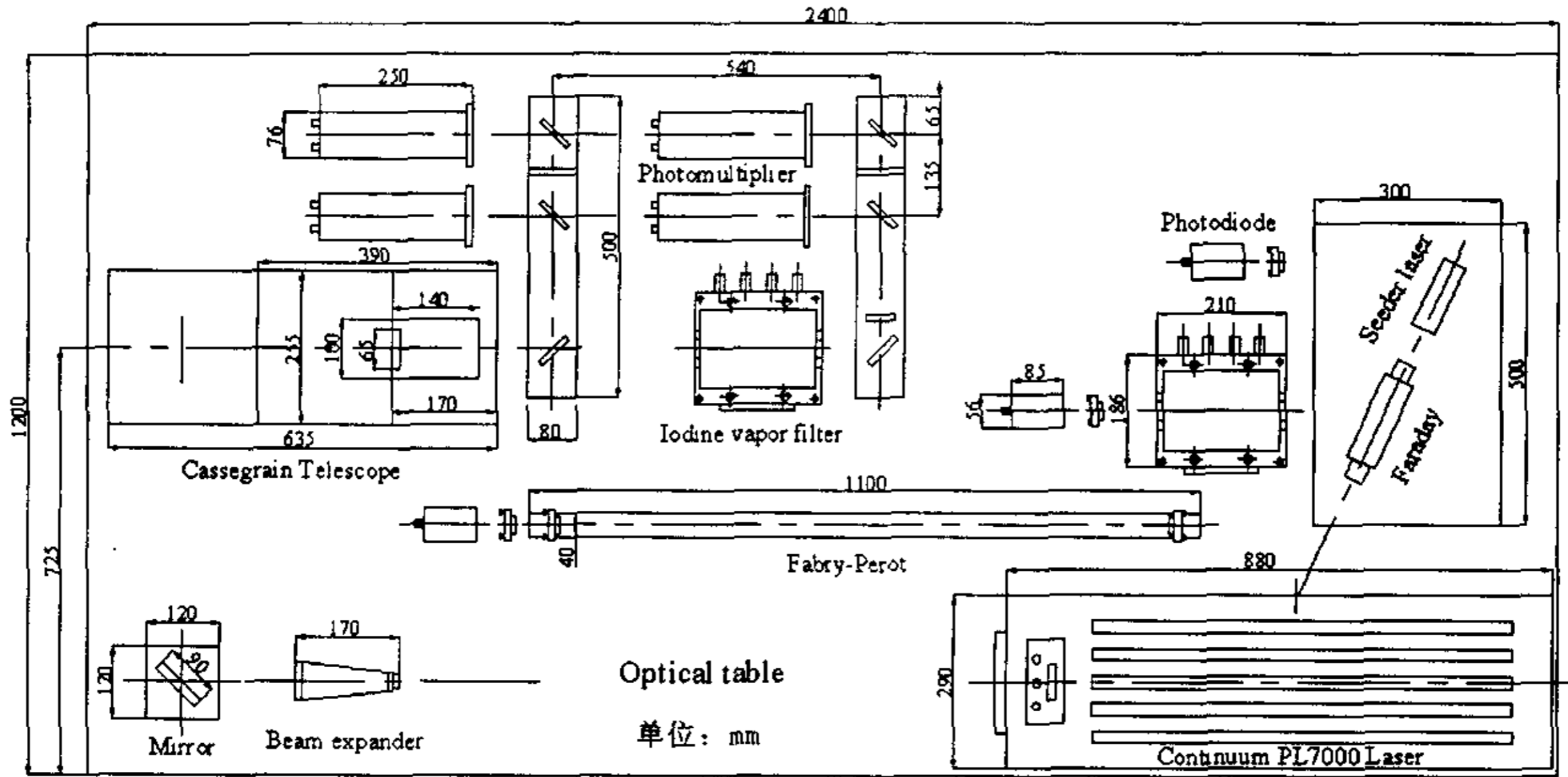


图3-3 雷达系统光路在光学平台上的布置

激光测风雷达系统的主要工作流程如下：首先，控制扫描转镜指向垂直方向，扫描种子激光器的频率，测量种子激光和脉冲激光碘分子 1109 吸收线的透过率。同时测量种子激光 Fabry-Perot 标准具的透过率，并利用该数据对碘分子 1109 吸收线透过率进行相对频率标定。然后将种子激光锁定在碘分子 1109 吸收线透过率的中间，测量此时脉冲激光碘分子 1109 吸收线的透过率，该数值对应于多普勒频移为 0 的透过率。随后旋转扫描转镜到恰当方位角和仰角，测量脉冲激光器大气回向散射信号的碘分子 1109 吸收线透过率，实时反演和显示出该方向大气径向风速，并将测量数据存入数据库。旋转扫描转镜，进行下一方向测量。全部测量完毕后，当需要其他方式数据时，如要进行径向风场 PPI 等显示，则调用数据库中相应的数据，处理并显示。

第二节 激光发射系统

发射系统的目的是获得窄线宽、频率稳定的激光脉冲输出。其中窄线宽主要是依靠激光种子注入技术实现，稳定的激光输出频率是通过利用碘分子吸收线激光频率锁定技术实现的，下面分别予以详细论述。

输出激光光谱宽度压缩

在研制的地基非相干激光测风雷达系统中，脉冲激光器采用的是美国 Continuum 公司的 PL7000 系列 Q 开关 Nd:YAG 激光器，其主要性能指标如表 3-1 所示。

表 3-1 Continuum PL7000 系列激光器主要性能指标

输出能量	150mJ(532nm)
脉冲宽度	5~7ns
光谱宽度	约 30GHz
脉冲重复频率	10Hz
发散角	0.45mrad
能量稳定性	±3.5%(532m)

碘分子吸收线的光谱宽度仅有不到 3GHz，Mie 散射的光谱宽度不到 1MHz，Rayleigh 散射的光谱宽度约为 1.3GHz。因此，利用光谱宽度约为 30GHz 的输出激光根本无法实现激光非相干检测技术，必须压缩输出激光的光谱宽度。

1980 年，Y. K. Park 等提出了激光种子注入方法，得到了稳定的单纵模激光输出^[66]。在此基础上，1986 年，R. L. Schmitt 和 L. A. Rahn 完成了更为稳定的激光种子注入系统^[67]。我们研制了地基非相干激光测风雷达系统中采用的就是此方法。

种子激光器的主要性能指标如表 3-2 所示。该种子激光器除了满足种子注入的要求以外，还在于它有 30GHz 的频率调谐范围，因此它可以与碘分子吸收滤波器匹配，这对于基于碘分子吸收滤波器的非相干检测是至关重要的。

表 3-2 种子激光器主要性能指标

输出能量	200mW(1064nm), 50mW(532nm)
光谱宽度	<10kHz/sec
频率漂移	<150kHz/sec
偏振比	100:1(水平)
频率调谐范围	30GHz
模式	TEM ₀₀

Continuum PL7000 系列激光器提供的性能指标表明, 种子注入后的激光光谱宽度约为 90MHz。图 3-4 是激光注入前和注入后的脉冲激光透过自由光谱范围为 75MHz 的共焦 Fabry-Perot 得到的干涉环。因为未注入的激光光谱宽度约为 30GHz, 所以无法形成干涉环。而种子激光注入以后, 可以看到清晰的干涉环。

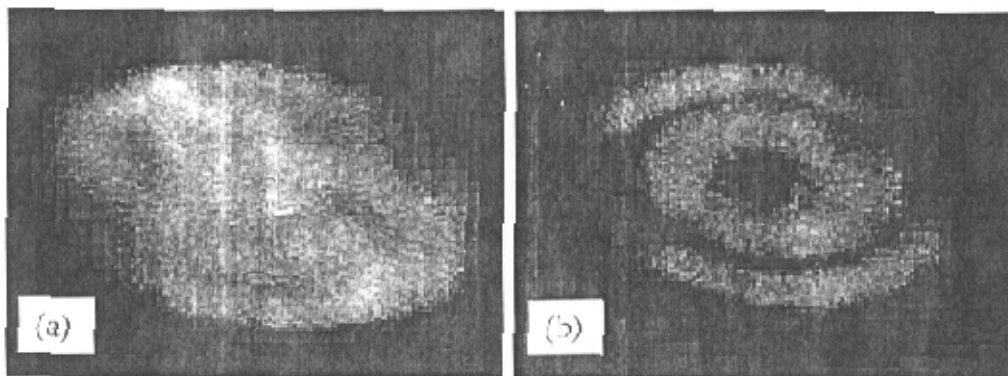


图3-4 脉冲激光透过共焦Fabry-Perot的干涉环(a)注入前(b) 注入后

激光频率的锁定

激光频率锁定的目的是抑制种子激光的频率漂移, 并使种子激光稳定在选定的碘分子吸收线边缘的中间, 从而使脉冲激光输出也稳定在相同的碘分子吸收线位置, 以提供风场测量的 0 频率信息。

从表 3-2 中种子激光器主要性能指标可以知道, 该种子激光器有

30GHz 的频率调谐范围。其频率调谐是通过调节种子激光器的 Nd:YAG 晶体的温度实现的。种子激光器提供了一个电压输入接口用以改变 Nd:YAG 晶体温度。因此，只要调节种子激光器的外加电压，就可以控制激光频率。

同样从表 3-2 中可以知道，种子激光器的频率漂移小于 100kHz/sec。对于一般应用，这种漂移是可以忽略不及的。但是，对于非相干测风技术来讲，激光器的频率漂移无法与信号中的多普勒频移区分开来，即激光器自身的频率漂移会被认为是信号多普勒频移。对于 532nm 的激光，100kHz/sec 的频率漂移对应于约 2.6cm/s 的误差，则 1min 由频率漂移引入的误差约为 1.6m/s。这对于非相干测风技术是无法忍受的。同时，由第二章的基于碘分子滤波器的非相干激光测风原理可知，实际测量风场时，需要将脉冲激光频率锁定在选定的碘分子 1109 吸收线高波数边缘的中部。这是通过采用激光种子注入技术，将种子激光频率锁定在相应的频率实现的。

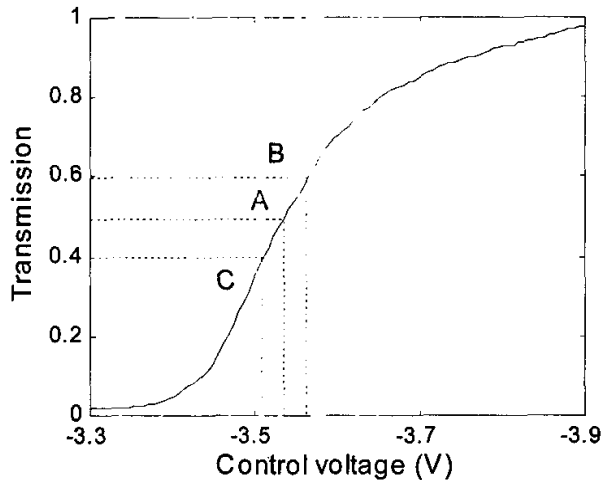


图3-5 利用碘分子吸收线激光频率锁定原理图

种子激光器输出频率的可控性为主动抑制激光频率漂移和激光频率锁定提供了可能。在我们研制的系统中，采用碘分子吸收线激光频率锁定技术实现的，该技术在 ALOMAR 激光雷达系统中首次采用^[68]。图 3-5 是该方法的原理图。图中曲线是实测的种子激光器外加控制电压与其碘分子 1109 吸收线透过率的关系，即激光输出频率的关系。初始状态将种子激光

器的碘分子 1109 吸收线透过率调节到图中 A 点。过一段时间后，由于种子激光器频率的漂移，检测到透过率到了 B 或 C 点，则通过反馈控制原理，适时、适当调节种子激光器外加控制电压将种子激光的碘分子滤波器透过率调回到 A 点。这样就实现了种子激光频率漂移的抑制和激光频率的锁定。图 3-6 是种子激光频率锁定前后种子激光器输出频率随时间变化的曲线。

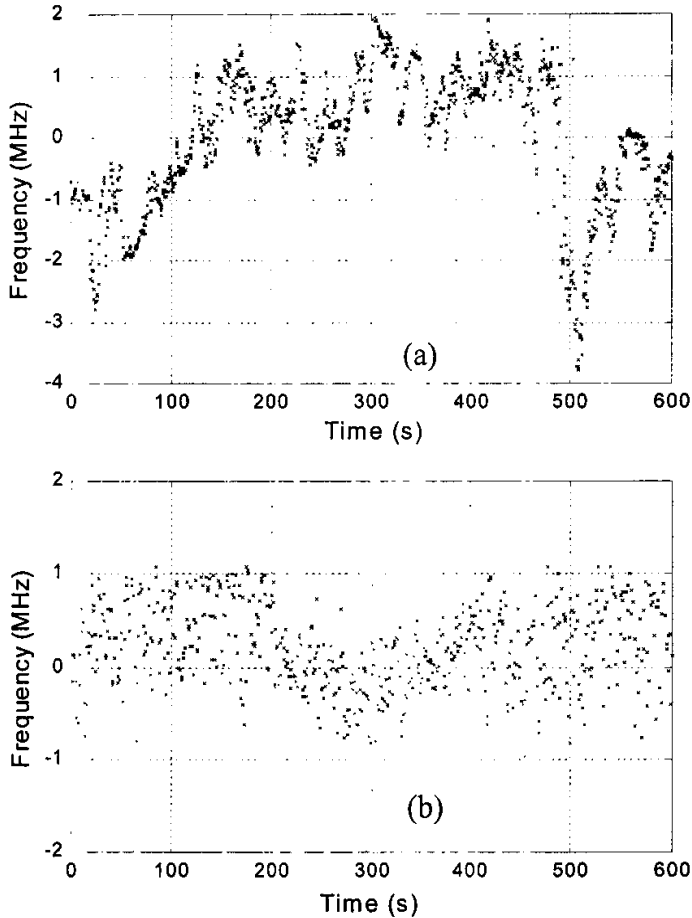


图3-6 种子激光器600s输出频率 (a)自由漂移 (b)锁频后

从图 3-6 中可以看出，通过锁频可以将种子激光器频率的长期漂移控制在 $\pm 1\text{MHz}$ 以内，对应于 $\pm 0.27\text{m/s}$ 风速误差。实际上，由于可以实时测量种子激光偏离锁定频率的绝对值，在数据处理时，就可以相应的矫正偏离频率的影响，因此激光频率漂移引入的风速测量误差要小于 $\pm 0.27\text{m/s}$ 。

碘分子吸收线的频率标定

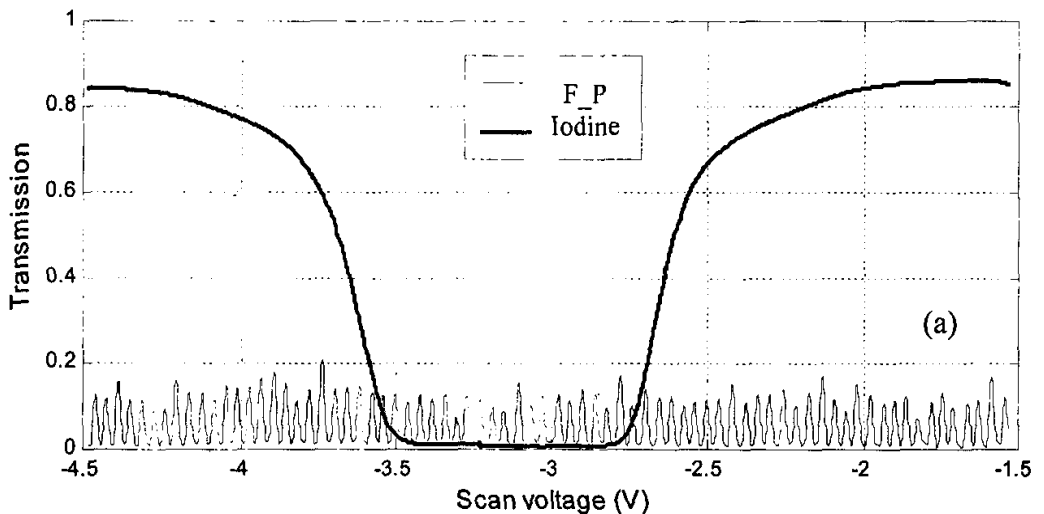
通过控制种子激光器的外加电压扫描得到的碘分子吸收线的曲线是碘分子吸收线透过率同种子激光器外加电压的关系，而在实际反演大气径向风速时，用到的是碘分子吸收线透过率同频率的关系。这就需要对碘分子吸收线透过率进行频率标定。

在我们研制的激光雷达系统中，碘分子吸收线透过率的频率标定是利用共焦 Fabry-Perot 标准具进行的。在利用种子激光器扫描碘分子吸收线的同时，分出一束种子激光入射到一个 Fabry-Perot 标准具中，如图 3-2 中所示，同时测量种子激光 Fabry-Perot 标准具的透过率。共焦 Fabry-Perot 标准具的自由光谱范围可表示为^[69]：

$$\delta\nu = \frac{c}{4r + \rho^4 / r^3} \quad (3.1)$$

其中， c 为光速， r 为球面镜的曲率半径， ρ 为光线与标准具中心轴之间的距离。

在研制的激光雷达系统中， $r=1\text{m}$ ， $\rho<4\text{cm}$ ，所以，Fabry-Perot 标准具的自由光谱范围约为 75MHz。因此，只要知道在扫描的碘分子吸收线范围内有多少个 Fabry-Perot 标准具的自由光谱范围，也就知道了该范围所覆盖的频率范围。图 3-7 中(a)为扫描测量的结果，(b)为碘分子 1109 吸收线相对频率标定的结果。



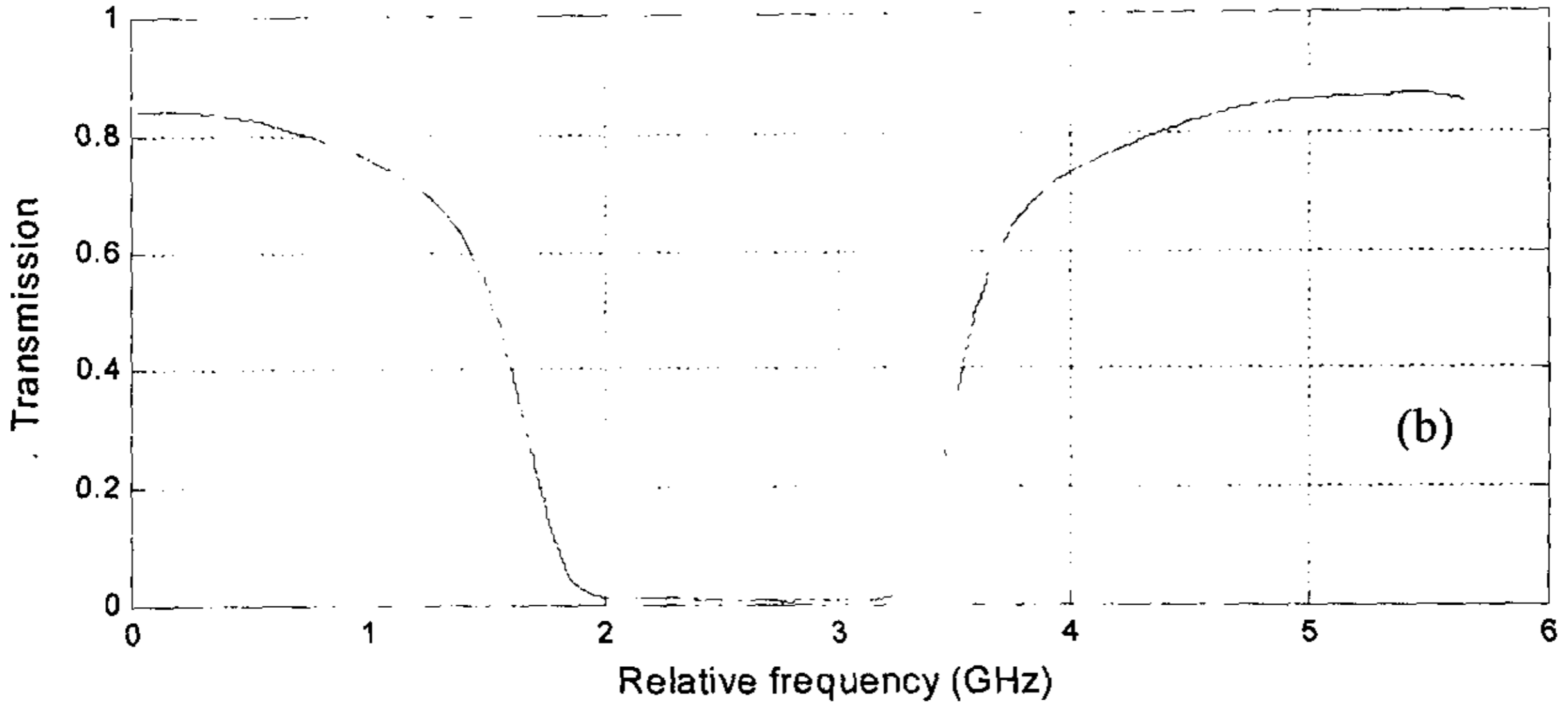


图3-7 碘分子1109吸收线频率标定(a)扫描测量数据, (b)频率标定结果

第三节 光学接收系统

光学接收系统的目的主要是接收大气激光回波信号, 利用碘分子吸收滤波器检测多普勒频移信号, 并通过光电倍增管进行信号光电转换。接收系统主要包括扫描转镜、望远镜、干涉滤光片、碘分子吸收滤波器、光电倍增管。

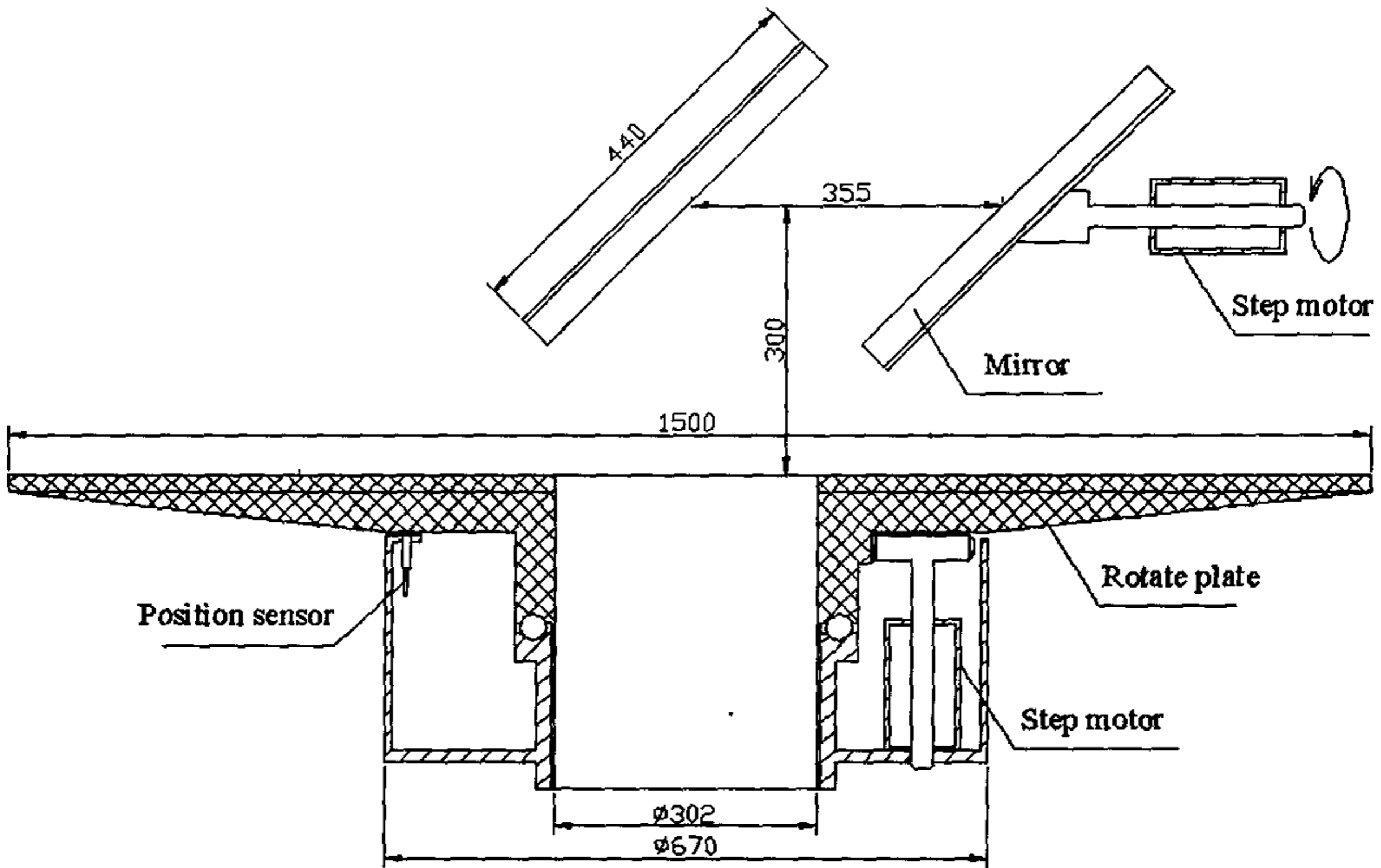


图3-8 扫描转镜结构

扫描转镜结构如图 3-8 所示。扫描转镜的旋转平台在步进电机拖动下可做 360° 转动，反射镜 1 固定在旋转平台上。反射镜 2 在步进电机拖动下可沿图中轴向做 360° 转动。因此，扫描转镜可扫描 4π 立体角。实测的旋转平台的转动角度精度为 1° ，反射镜 2 的转动角度精度为 0.3° ，这主要由齿轮配合间隙造成的。在底盘和反射镜 2 转动的极限位置安装了机械开关或接近开关进行定位监测，并用于消除转动的角度误差。

控制扫描转镜转动的是一个 C51 单片机系统。该单片机系统接收上位控制计算机的各项指令，做出判断，输出相应的控制电压和时序。控制电压和时序经电机驱动模块驱动相应电机。同时，单片机系统负责将监测扫描转镜状态的传感器的数据经处理后反馈给上位计算机。该单片机系统同上位计算机的通讯是通过 RS232 串口实现的。

接收系统中的望远镜采用的是 Cassegrain 式望远镜。该望远镜由中国科学院上海技术物理研究所制造，其有效口径为 200mm，焦距 700mm；对于 532nm 的工作波长，其光学效率为 0.813。为了限制接收系统的视场角，抑制背景光噪声，在望远镜的焦点上放置一个直径为 1mm 的小孔，如图 3-2 所示。因此整个接收系统的视场角约为 1.43mrad。经过小孔的光束用透镜汇聚成直径约为 15mm 的光束。接收系统中的干涉滤光片的光谱带宽约为 2nm，有效直径为 30mm。因为目前整个激光雷达系统工作于夜晚，太阳背景光噪声可以忽略，所以 1.43mrad 的接收视场角和 2nm 的干涉滤光片足以滤除月光、星光、大气激光 Raman 散射、1064nm 激光等杂散光的干扰。

从干涉滤光片出来的光束按照图 2-9 的差分接收光路分为两路，一路被直接检测，另一路入射进一个碘分子吸收滤波器。接收系统中的碘分子吸收滤波器与激光发射系统中用于种子激光频率锁定的碘分子吸收滤波器是一样的，它用于将大气回波信号中的多普勒频移信号转化为透过能量的变化。两套碘分子吸收滤波器的工作温度尽量保持相同，使两条碘分子 1109 线的吸收特性一致，保证种子激光锁定在碘分子 1109 线中间时，发射脉冲激光也位于相应 1109 吸收线的中部。

接收系统中使用的光电倍增管首先是英国 EMI 公司的 EMI9214 管，

后来是日本 HAMAMATSU 的 SR120。光电倍增管的门控信号取自于 Continuum PL7000 激光器的 Q 开关打开信号，该信号经限幅、整形、延迟后送给光电倍增管门控电路。光电倍增管门控用于压制大气近距离的脉冲激光回向散射，避免光电倍增管的饱和，保护光电倍增管不受损伤。

第四节 控制和处理系统

控制和处理系统提供整个系统的工作流程控制、信号采集处理、数据存储管理等。

信号的采集是通过两块 AD 采样卡实现的。第一块是 National Instrument 公司的 AT-MIO-16X AD/DA 卡。该卡的分辨率是 16bit，采样速率最快 100KHz。它有 16 个 AD 通道，雷达系统中使用了其中的 3 个通道用于采集与种子激光器相关的连续信号。因为种子激光为连续激光，而且激光能量很强，所以用光电二极管进行光电转换。通道 1 采集直接测量的种子激光的能量信号，通道 2 采集种子激光透过碘分子吸收滤波器的能量信号。这两路信号的比值就是种子激光碘分子吸收滤波器的透过率。通道 3 采集种子激光透过 Fabry-Perot 标准具的能量，用于碘分子 1109 吸收线频率标定。

第二块 AD 采集卡是四川纵横科技公司的产品，其分辨率是 12bit，采样速率最快 40MHz，对应于 3.75m 的空间分辨率。该卡用于采集接收系统中两个光电倍增管的信号。

整个雷达系统的工作流程控制和数据处理、存储、管理等功能由一台计算机完成。系统工作流程包括：种子激光频率调谐控制、种子激光碘分子吸收滤波器透过率检测、脉冲激光碘分子吸收滤波器透过率检测、种子激光频率锁定控制、扫描转镜控制等。数据处理、存储、管理包括种子激光相关参数采样、大气激光回波高速数据采集及预处理、径向方向风速计算、径向风速 PPI 显示和存储等。这部分功能在第四章详细论述。

第四章 系统软件设计

第一节 软件总体设计

非相干激光多普勒测风雷达系统软件的主要目的是完成对硬件系统的控制,采集、处理、显示、管理数据,反演必要的数据产品。软件系统与硬件结合紧密,覆盖整个系统的每个工作环节。软件系统的设计直接关系到整个雷达系统最终的工作状况。

系统软件主要功能

为完成对非相干激光多普勒测风雷达硬件系统的控制,保证达到测风雷达的性能指标和为气象科研提供大气风场数据产品,系统软件所要完成的功能主要有以下几部分:

1) 完成非相干激光多普勒测风雷达的硬件部分和 workflow 控制,主要包括:

- ▲ 种子激光频率调谐控制: 由 16 位 D/A 控制种子激光器输入电压, 根据需要调谐种子激光器输出频率。
- ▲ 种子激光碘滤波器透过率检测: 利用两路高灵敏度光电二极管检测种子激光透过碘分子滤波器的强度变化, 通过 16 位 A/D 采集该信号, 实时处理得到种子激光碘分子滤波器透过率。
- ▲ 脉冲激光碘分子滤波器透过率检测: 利用两路光电倍增管检测脉冲激光透过碘分子滤波器的强度变化, 通过高速数据 A/D 采集系统测量该信号, 实时处理得到脉冲激光碘滤波器透过率。
- ▲ F-P 透过率检测: 利用高灵敏度光电二极管检测种子激光透过 F-P 的强度变化, 通过 16 位 A/D 采集该信号, 实时处理得到种子激光 F-P 透过率。
- ▲ 计算脉冲激光碘滤波器透过率与频率关系: 由得到的脉冲激光碘分子滤波器透过率和 F-P 透过率计算出脉冲激光碘分子滤波器透过率与频率关系, 用于大气径向风速计算。

- ▲ 种子激光频率锁定控制：利用两路高灵敏度光电二极管和 16 位 A/D 实时测量种子激光碘分子滤波器透过率，通过 16 位 D/A 反馈控制种子激光频率，将种子激光锁定在所需频率。
- 2) 实时测量三维径向风场数据，包括：
- ▲ 扫描转镜控制：通过计算机控制单片机，从而控制扫描转镜的仰角和方位角，使扫描转镜转到合适的测量位置。
 - ▲ 大气回波高速数据采集及预处理：由计算机控制通过高速数据 A/D 采集系统测量大气回波信号，并进行预处理。
 - ▲ 计算大气径向风速：由计算的脉冲激光碘分子滤波器透过率与频率关系和测量的大气回波信号计算出该仰角和方位角的径向风速。
- 3) 准实时的反演和显示大气风场：
- ▲ 大气风场反演：利用基于最小二乘算法的反演算法和几何投影关系，由大气径向风速反演出大气风场。
 - ▲ 风场显示：显示反演大气风场。
- 4) 提供用户所需的反演开发产品，包括：
- ▲ 由大气径向风速，计算得到径向风速 PPI、径向风速 CAPPI 图，进行显示和存储；
 - ▲ 由大气风场得到 PPI、CAPPI 和 RHI 分布图，进行显示和存储；
 - ▲ 由不同时间的大气风场得到时间序列图，进行显示和存储；
 - ▲ 由大气风场计算中尺度涡旋、切变线等，进行显示和存储。

系统软件总体方案

1、系统软件开发平台

根据前面的系统软件业务需求和系统软件所需要完成的功能，考虑到软件系统的可靠性、兼容性、可扩充性、可移植性及易操作性，整体非相干激光多普勒测风雷达系统软件将建立在微软 Windows 操作系统上。

2、系统软件总体设计

整体系统软件分为两个部分，以实现系统软件整体结构的简洁。第一部分：完成雷达系统的硬件部分和 workflow 控制和实时测量、显示三维径向风场数据；第二部分：准实时的反演、显示三维风场并提供用户所需的反演开发产品。

- ▲ 第一部分软件完成对非相干激光多普勒测风雷达硬件系统的控制。该部分与雷达系统硬件结合紧密，对软件的执行速度要求较高，需要有强大的底层开发能力；并且系统中部分硬件设备的相应驱动主要以 C++ 库程序方式提供，同时考虑到软件可视化的需求及操作的直观性，该部分选择 Visual C++ 编程语言开发；
- ▲ 第二部分软件与雷达系统硬件完全隔离。由于该部分对软件执行速度无特殊要求，从软件开发的实效性出发，该部分软件的框架由 Visual Basic 搭建；
- ▲ 为了有效的连接第一部分和第二部分软件，存储必要的测量参数和数据，完成对测量数据的管理，该软件中选用了微软的桌面数据库 Access。选用桌面数据库 Access 首先因为它同是微软的产品，不会与操作系统、Visual C++ 和 Visual Basic 有任何冲突，这一方面比 Oracle 等数据库优越。Access 虽是桌面数据库系统，但它有完善的数据管理功能，并且提供直观的可视化管理，操作和使用十分简便。系统软件中仅使用了数据库最基本的数据管理和查询功能，Access 足以胜任。选用 Access 还有一个十分重要的原因是 Access 数据库运行时占用系统资源很少，而该软件需要进行繁重的测量流程控制，系统资源十分珍贵，这是该应用中 Access 数据库优于微软 SQL SERVER 数据库的根本原因；
- ▲ 第一部分和第二部分软件中 Visual C++ 和 Visual Basic 与数据库之间的接口选用了微软最新的基于 OLE DB 的 ADO 数据库引擎，几乎可访问现有任何数据库，提供了数据库最大的可扩充性。ADO 数据库引擎的使用虽比较复杂，但速度较常规的 ODBC 数据库引擎快，适合该软件对速度的要求；
- ▲ 该软件在风速实时反演、开发产品和反演结果显示时需要的较复杂

的数学算法，实现时直接利用 Visual C++和 Visual Basic 调用 Matlab 强大的动态连接数学库和显示库实现，以维护软件结构的简洁和代码的有效性；

- ▲ 由以上可知，除 Matlab 以外，所选用的 Visual C++、Visual Basic、Access 数据库和 ADO 数据库引擎都是微软公司基于 Windows 操作系统的产品，保证了它们相互之间的无缝连接，确保了系统软件各部分之间以及系统软件与操作系统之间的兼容性和安全性。

系统软件实施方案

该软件系统实施遵循出简到繁，由易到难，由主到次，由低级到高级逐步完善的方式。在统一规划的前提下，适当分步实施，集中开发。

1、系统软件的实施策略和开发原则

- ▲ 软件系统的实施按照自上而下的统一规划、自下而上的逐步开发实现的策略，达到边实施边见效的目的。
- ▲ 系统的实施遵循出简到繁、由易到难、由主到次逐步完善的方式，分阶段、分重点、有步骤地逐步完善。在开发过程中，首先开发当前最急需、最基本，并且较容易实现的部分。然后，在此基础上，逐步开发其他的功能模块，使系统逐步完善，基本上能满足需要。
- ▲ 软件每一功能模块的程序设计按结构化和面向对象设计程序的方法进行。应尽量减少各程序间的联系，提高各软件的独立性，以利于整个系统的调试，维护和修改等工作，提高整个系统的可靠性。

2、软件系统开发方法

由于系统软件是非相干激光多普勒测风雷达系统的一部分，在系统硬件完成之前对所需开发的目的和流程进行细致精确的描述是不客观的。软件系统只能随着整个系统的开发逐步对系统进行确切定义和不断的完善、改造直到系统的完成。因此该软件系统开发综合应用了结构化方法、快速原型法和面向对象方法相结合的软件开发方式。

- ▲ 该软件整体按照面向对象的方法设计。面向对象的设计方法更接近于对问题而不是对程序的描述。软件系统程序控制、用户界面、数

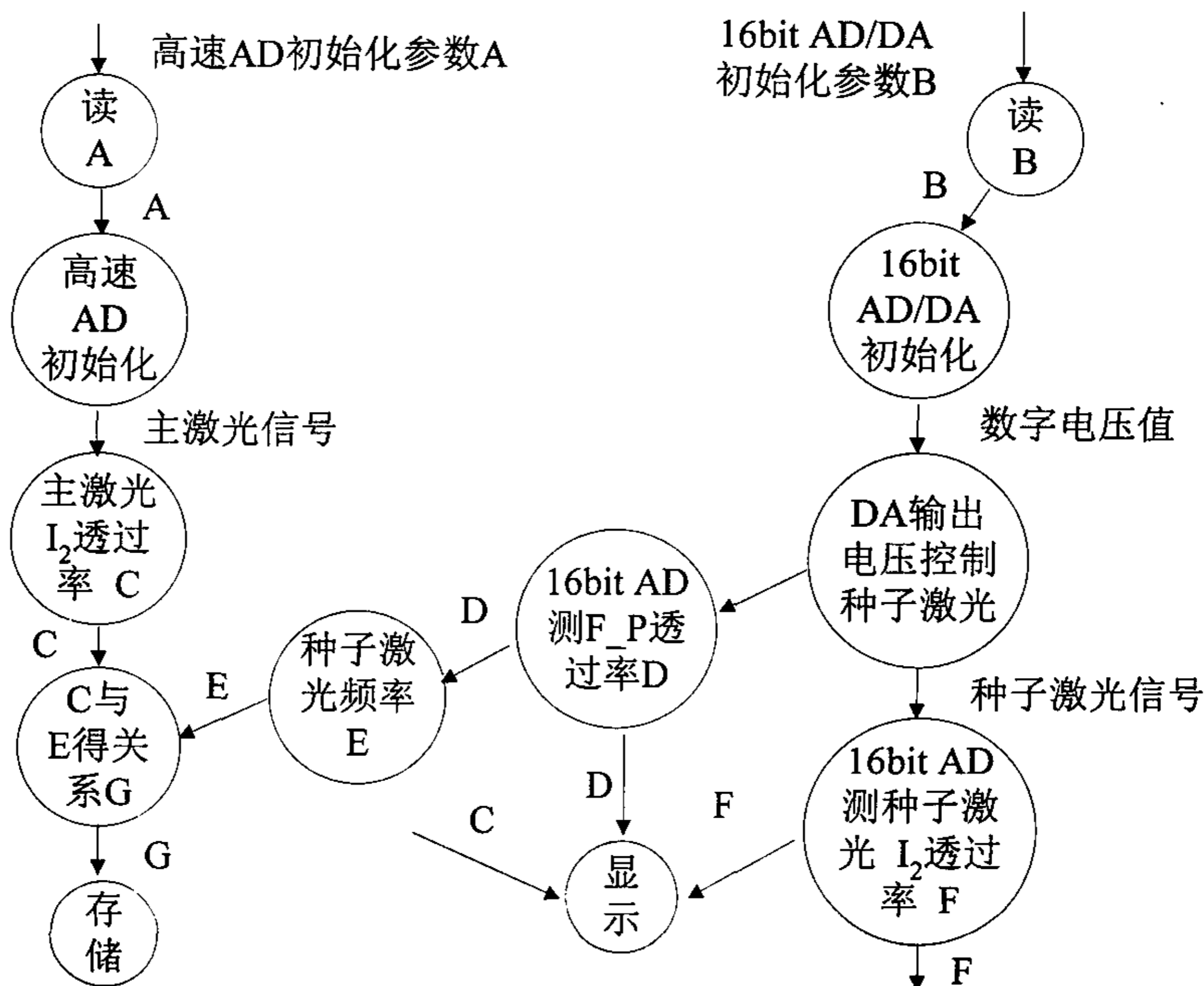
数据库访问等采用了这种设计方法，提高了编程的效率，并缩短了开发周期。

▲ 软件的整个开发过程遵循原型化的设计方法，它是一种动态的设计技术。在明确了非相干激光多普勒测风雷达基本要求后，以最快的速度构造出一个实际可用的系统软件原形。伴随着非相干激光多普勒测风雷达硬件系统的改进和完善，系统软件功能也不断进行定义与扩展，直到系统完成。

▲ 在前述两种设计方法的基础上，系统软件分化为若干层次，每一个层次又进一步分为许多小的功能模块，每一个功能模块的开发遵循结构化软件设计方法。这种模块化的开发式系统软件结构和逻辑简洁清晰，利于软件开发、维护和扩展。

非相干普勒测风雷达系统数据流图

根据系统所需完成的各项逻辑功能，基于对系统实际工作流程的详细分析，非相干普勒测风雷达系统的数据流图如图 4-1 所示：



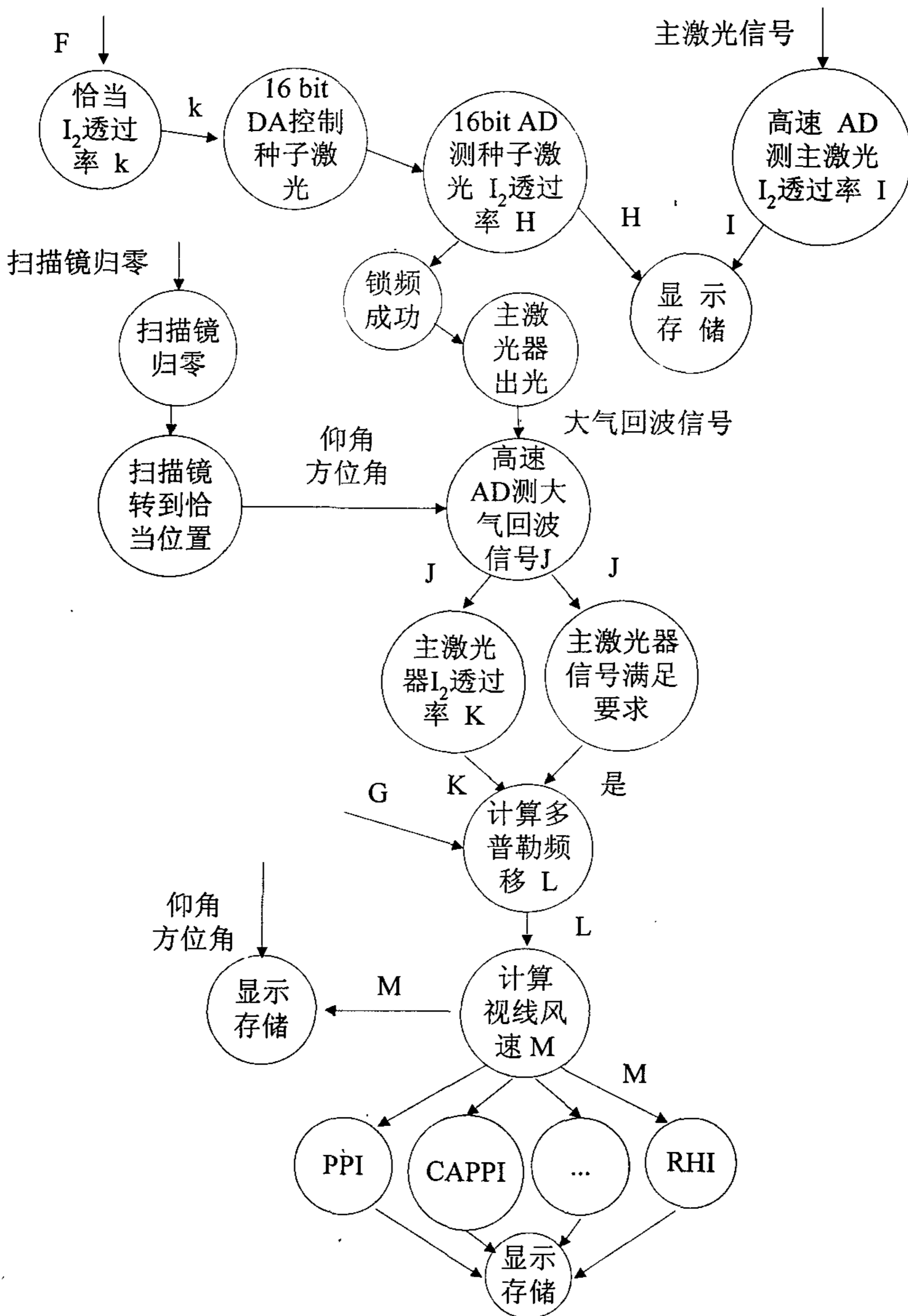


图4-1 非相干测风雷达系统的数据流图

系统软件层次图

根据软件面向对象、原型化和结构化设计方法要求，整个软件系统面向功能分解为几个功能子系统。各功能子系统应相对独立，子系统间的数据和信息相对隐蔽，使子系统间的耦合程度尽可能低，以利于整个系统的理解、实施、维护、扩展等。

基于上述原则，根据软件系统所要完成的功能，从非相干激光多普勒雷达系统数据流图出发，该软件系统分解为以下四个主要的逻辑功能子系统：

- ▲ 碘分子吸收线扫描子系统
- ▲ 激光输出频率锁定子系统
- ▲ 大气径向风速测量子系统
- ▲ 大气风场反演和开发产品子系统

其中前三个子系统结合在一起，完成大气径向风场数据的测量、实时反演和显示，组成系统软件的第一部分——实时测量软件。第四个子系统与前三个子系统完全隔离，独立完成大气风场的反演，并提供各种数据形式存储和显示模式功能，是系统软件的第二部分——大气风场反演和开发产品软件。系统软件的整体结构如图 4-2 所示。

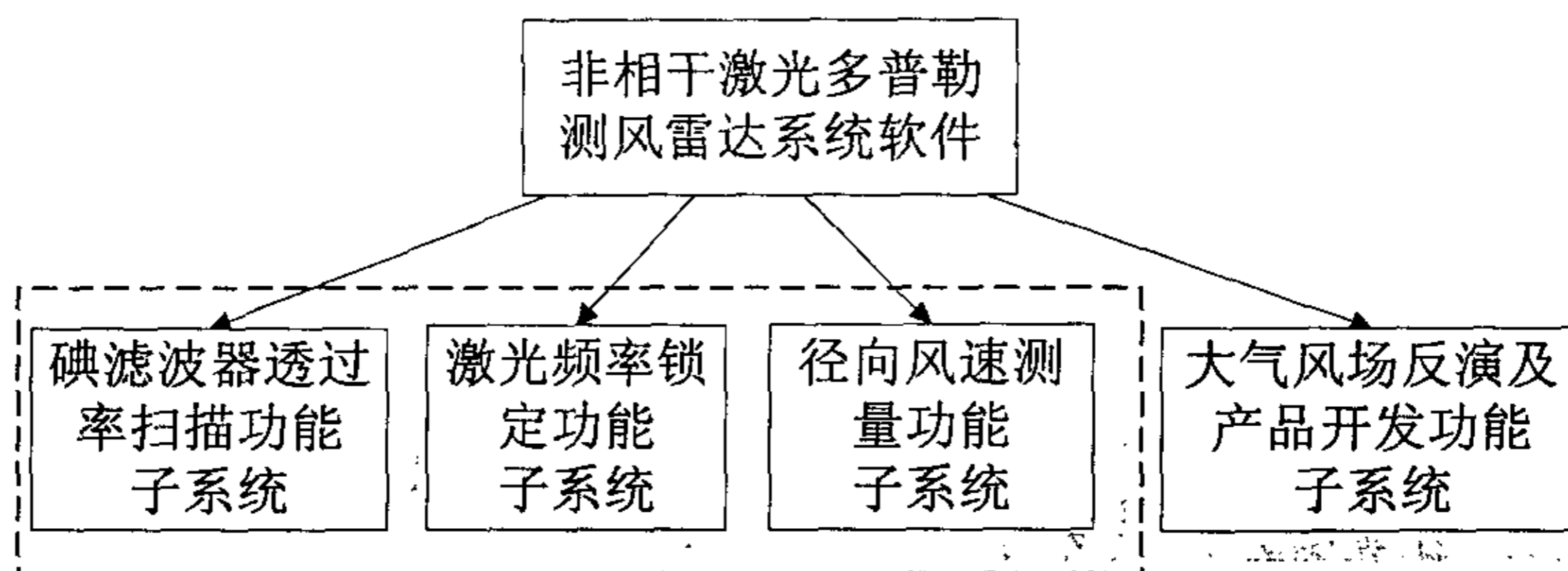


图4-2 系统软件的整体结构图

上述逻辑功能子系统根据面向对象和结构化软件开发方法，根据实际需要进一步加以分解，得到的系统软件详细结构由软件层次图给出。各功能子系统间的接口在本章后面几节的详细设计中给出。每个逻辑功能子系

统的详细层次图显示如下：

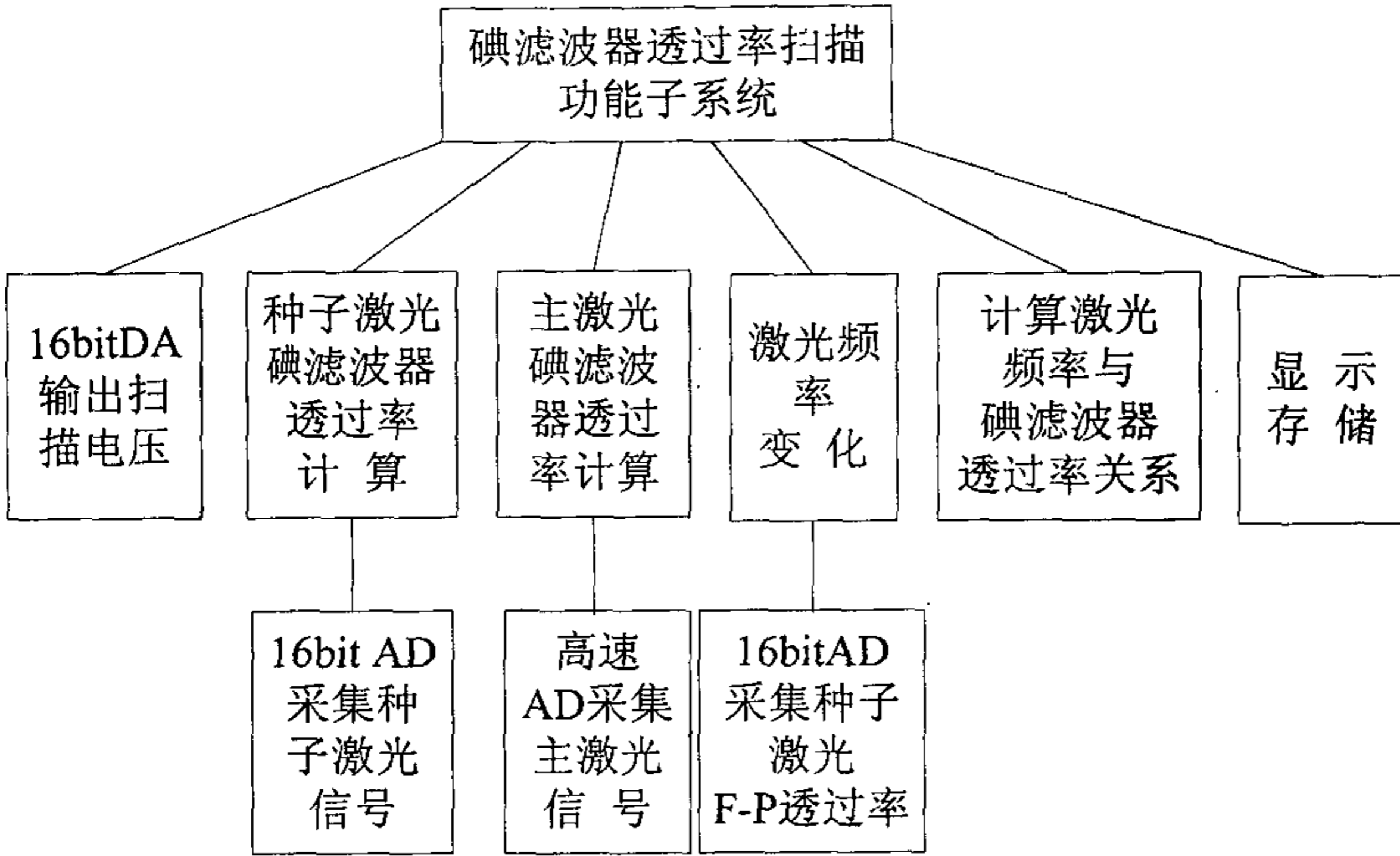


图4-3 碘分子吸收线扫描子系统框图

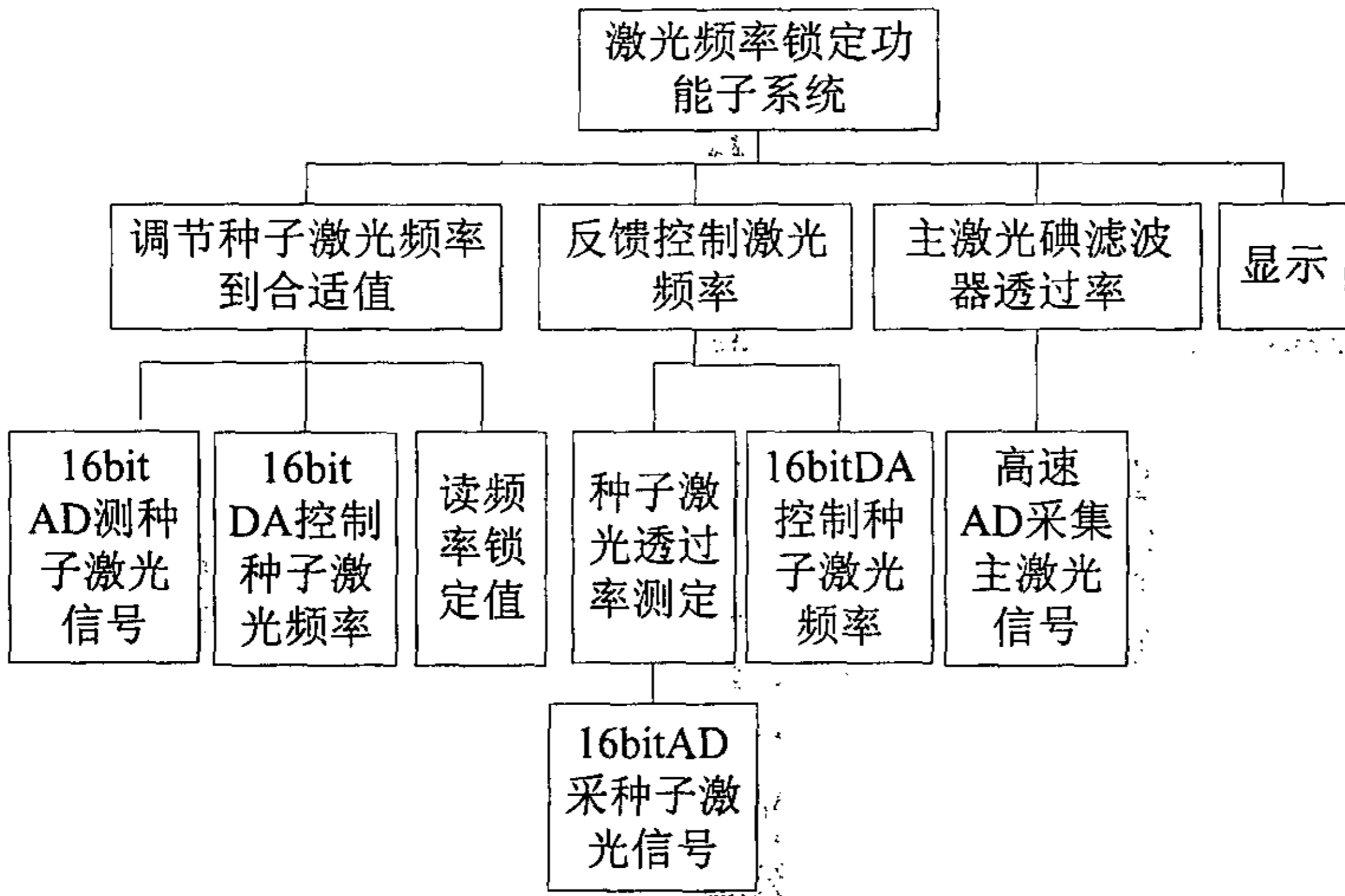


图4-4激光输出频率锁定制子系统框图

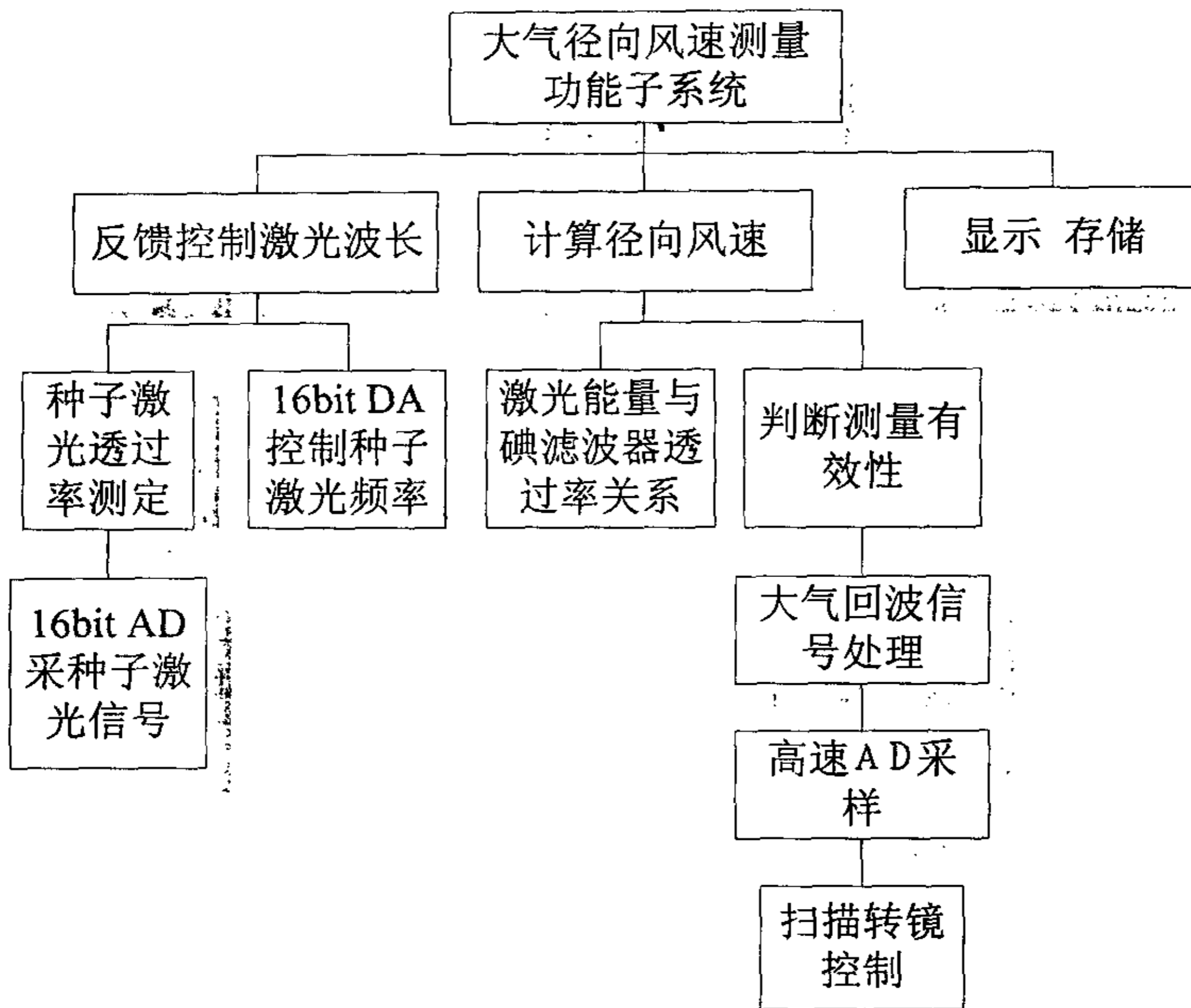


图4-5 大气径向风速测量子系统框图

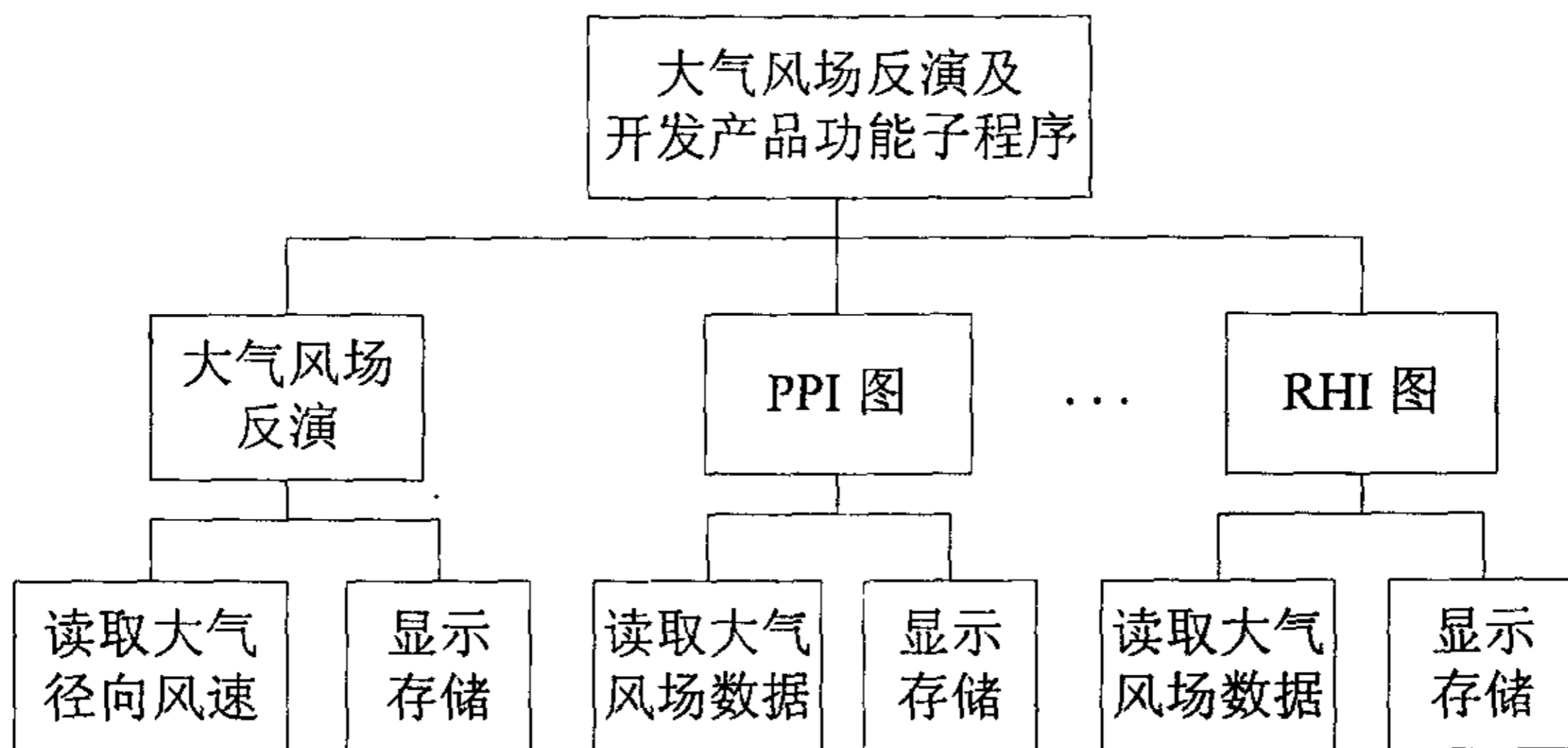
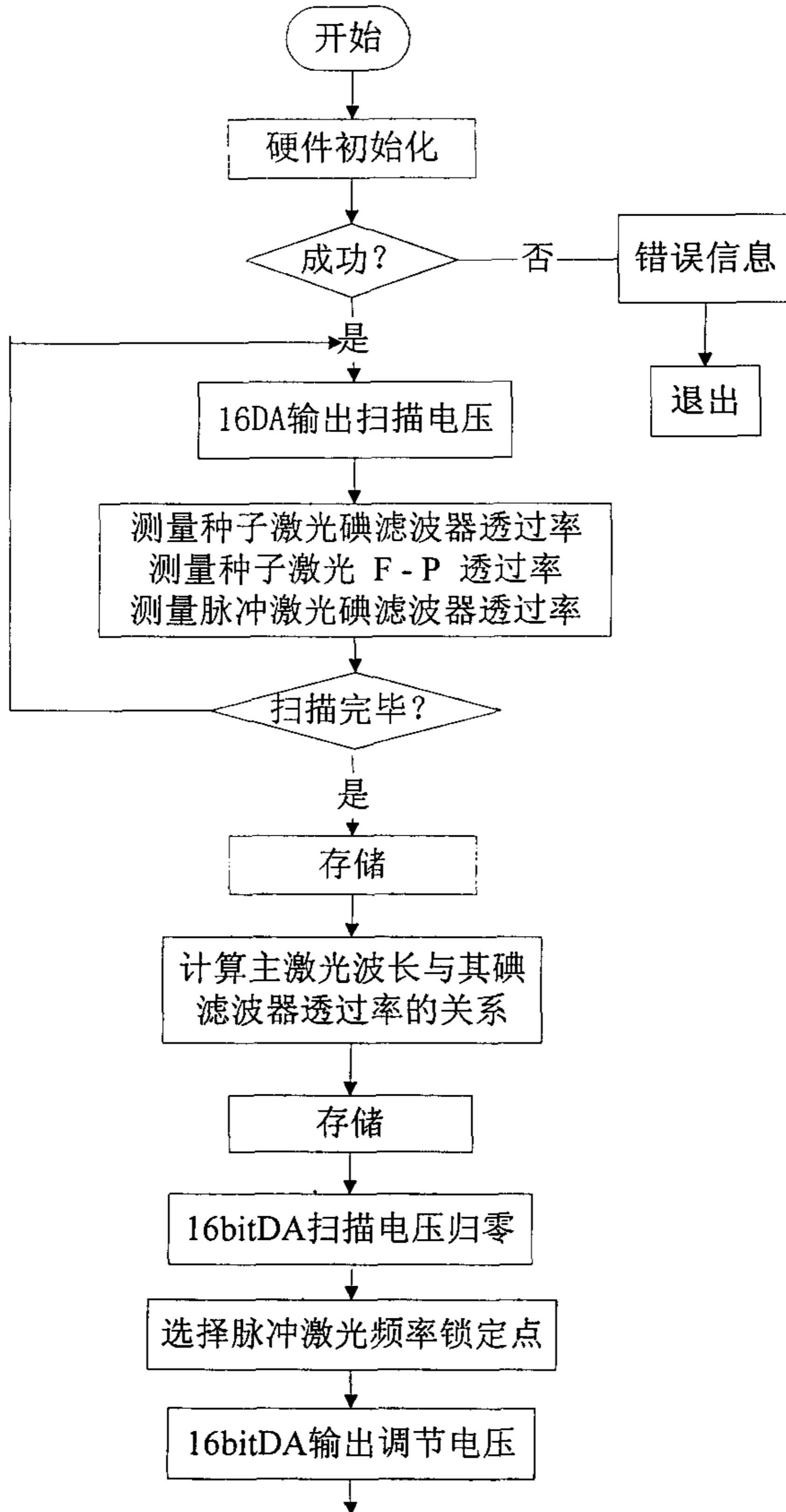


图4-6 大气风场反演和开发产品子系统框图

系统软件流程图

由前面分析得到的数据流图和层次图，得出系统软件总体流程图如图4-7所示。



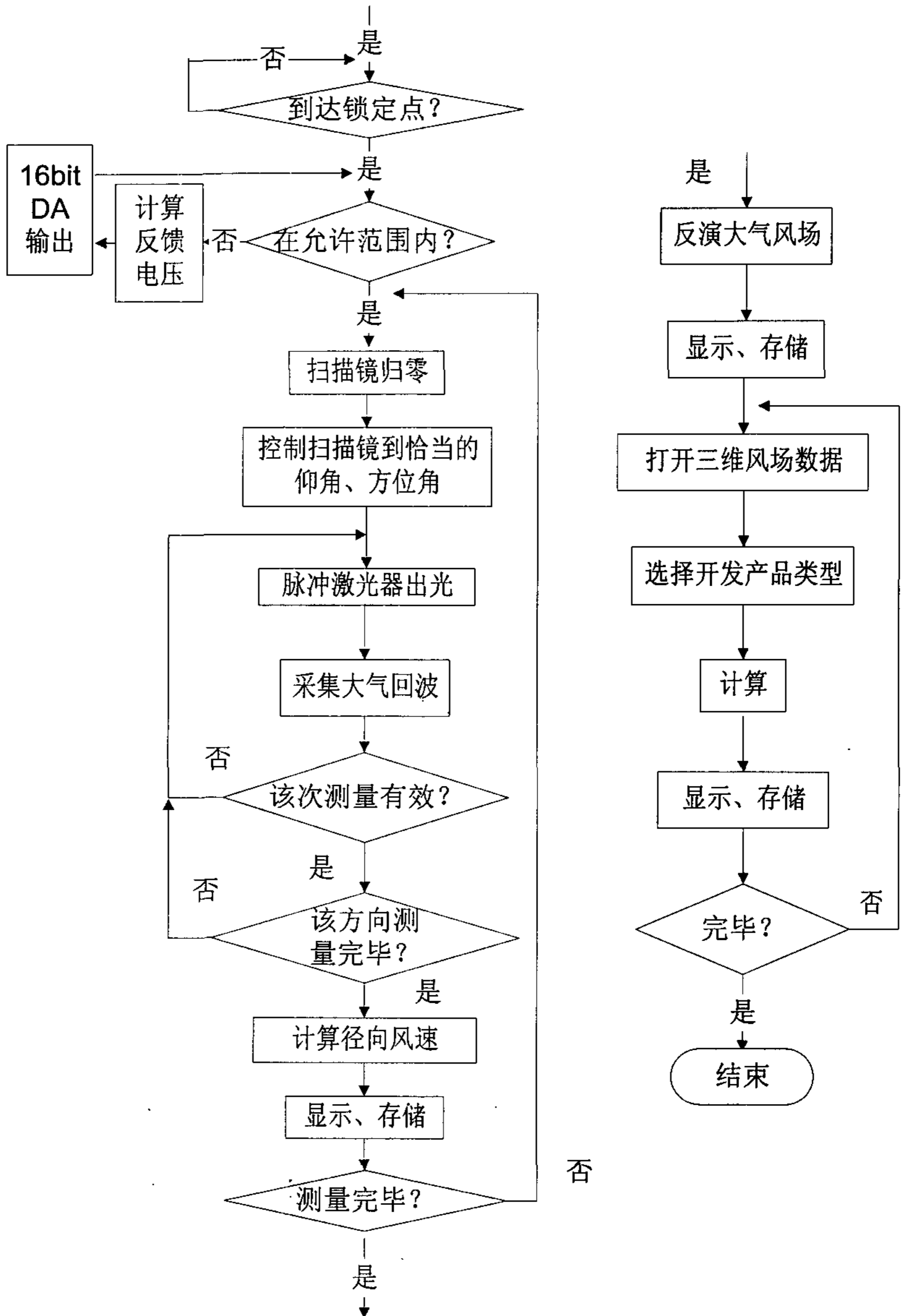


图4-7 系统软件总体流程图

第二节 数据库设计

激光雷达软件中，数据库的作用是存储必要的测量参数，管理测量数据文件，提供实时测量软件和反演软件的完全隔离。

为实现以上目的，整个非相干激光多普勒雷达系统数据库由三个表组成：currt、indext 和 datat。表 currt 用于存放最新一次测量信息。表 indext 用于存放所有测量的参数信息，由该表可以检索到与某次测量相对应的表 datat。表 datat 并非只有一个表，每一次实际风场的测量都要创建一个 datat 表。为了简便该表仅存储测量数据的文件名索引信息和必要的测量信息，通过该表可以检索到所有测量数据文件。以下详细说明各个表的结构。

表 currt 结构

表 currt 用于存放最新一次测量的信息。该表的主要目的是在实时测量时用于各测量软件子系统间传递文件信息。currt 表由三列组成：

- ▲ 列 1 — 文件名：char 类型，长度为 10，实际内容是测量日期的信息，数据格式是 XX（年）XX（月）XX（日），该值由实时测量软件根据计算机系统时间自动获得；
- ▲ 列 2 — 测量时间：char 类型，长度为 10，实际内容是测量时间信息，数据格式是 XX（小时）XX（分）XX（秒），该值由实时测量软件根据计算机系统时间自动获得；
- ▲ 列 3 — 测量序列号：整型变量，代表该日第 n 次测量，该值由程序自动生成。

表 indext 结构

indext 表存放了所有测量的参数信息，由以下内容组成：

- ▲ 列 1 — 文件名：char 类型，长度为 10，实际内容是测量日期的信息，数据格式是 XX（年）XX（月）XX（日），该值由实时测量软件根据计算机系统时间自动获得；
- ▲ 列 2 — 测量序列号：整型变量，代表该日第 n 次测量，该值由程序自动生成；

- ▲ 列 3 — 测量时间: char 类型, 长度为 10, 实际内容是测量时间信息, 数据格式是 XX (小时) XX (分) XX (秒), 该值由实时测量软件根据计算机系统时间自动获得;
- ▲ 列 4 — 扫描频率平均数: 整型变量, 内容代表种子激光和脉冲激光在频率扫描期间每一数据的平均次数, 该值在实时测量软件运行期间由操作人员作为控制参量输入;
- ▲ 列 5 — 扫描频率测量次数: 整型变量, 代表脉冲激光在频率扫描期间总的测量次数, 同时也是脉冲激光数据文件数量, 该值由实时测量软件根据实际测量的次数自动生成;
- ▲ 列 6 — 脉冲激光每次采样长度: 整型变量, 代表每一脉冲激光数据文件长度, 该值在实时测量软件内部规定, 软件外部无法修改, 目前为 4K;
- ▲ 列 7 — Fabry-Perot 测量频标: 单精度型变量, 代表反演风场的标定频率, 由实时测量软件根据种子激光频率扫描数据实时反演出;
- ▲ 列 8 — 脉冲激光平均次数: 整型变量, 代表脉冲激光在风场测风期间每一数据平均次数, 该值在实时测量软件运行期间由操作人员作为控制参量输入;
- ▲ 列 9 — 脉冲激光测量次数: 整型变量, 脉冲激光在风场测量期间每一测量方向测量次数, 代表每一测量方向数据文件数量, 该值在实时测量软件运行期间由操作人员作为控制参量输入;
- ▲ 列 10 — 扫描转镜方位角步长: 单精度型变量, 代表扫描转镜在风场测量期间转动的方位角步进角度, 也即径向测风数据方位角分辨率, 该值在实时测量软件运行期间由操作人员作为控制参量输入;
- ▲ 列 11 — 扫描转镜仰角步长: 单精度型变量, 代表扫描转镜在风场测量期间转动的仰角步进角度, 也即径向测风数据的仰角分辨率, 该值在实时测量软件运行期间由操作人员作为控制参量输入。

表 datat 结构

该表存储了某次径向风场测量数据的文件名索引信息和必要的测量信

息，通过该表可以检索到所有测量数据文件。该表并非但指一个表，为了管理方便，每一次实际的径向风场测量都对应与一个 `datat` 表。因此表 `datat` 是在实时测量软件运行期间根据需要动态生成的。为确保每一次测量对应于不同的表，并可根据表 `indext` 方便的检索到，表 `datat` 的命名遵循以下原则：表名=“t”+文件名+“_”+测量序列号

表 `datat` 由以下内容组成，

- ▲ 列 1 — 方位角：单精度型变量，代表扫描转镜在风场测量期间转动的方位角角度，该值由实时测量软件根据实际测量自动生成；
- ▲ 列 2 — 仰角：单精度型变量，代表扫描转镜在风场测量期间转动的仰角角度，该值由实时测量软件根据实际测量自动生成；
- ▲ 列 3 — 测量时间：char 类型，长度为 10，内容是该方向测量时间信息，数据格式是 XX（小时）XX（分）XX（秒），该值由实时测量软件根据计算机系统时间自动获得；
- ▲ 列 4 — 数据文件名索引：char 类型，长度为 50，存放该方向测量的文件名索引，该值由实时测量软件根据实际测量自动生成；
- ▲ 列 5 — 测量周期序列号：整型变量，代表第 n 次测量周期，该值由实时测量软件根据实际测量自动生成。

数据库访问接口

软件中 Visual C++ 和 Visual Basic 访问数据库是通过 OLE DB 的 ADO 数据库引擎。在 Visual Basic 中可以直接调用 ADO 控件实现。在 Visual C++ 中，需要更加灵活的访问数据库，无法直接应用 ADO 控件。程序中为了访问表 `currt`、`indext` 和 `datat`，分别定义了三个类 `Ccurrt`、`Cindext` 和 `Cdatat`。这三个类的基类都是 `CADORecordBinding` 类。通过 `CADORecordBinding` 类封装的 `Create`、`Open`、`Inset`、`Update` 等功能，可以快速灵活得完成各种数据库操作。

系统软件生成文件名说明

该软件中需要生成的数据文件较多，为了通过上述数据库内容方便的检索到所有文件，同时也使研究人员能一目了然的了解文件的种类，系统

中使用的文件命名规则如下:

- ▲ 种子激光器频率扫描数据: “文件名” + “测量序列号” +s.dat
- ▲ 碘分子吸收滤波器透过率脉冲激光频率标定数据: “文件名” + “测量序列号” +p.dat
- ▲ 脉冲激光器频率扫描数据: “文件名” + “测量序列号” +s+文件序列号.dat
- ▲ 脉冲激光器频率锁定数据: “文件名” + “测量序列号” +l+文件序列号.dat
- ▲ 零风速频率标定数据: “文件名” + “测量序列号” +z.dat
- ▲ 风场原始数据文件名: “文件名” + “测量序列号” + “测量周期序列号” + “测量方向序列号” +v+文件序列号.dat
- ▲ 径向风速文件名: “文件名” + “测量序列号” + “测量周期序列号” + “测量方向序列号” +w.dat
- ▲ 径向风速 PPI 模式文件名: “文件名” + “测量序列号” + “测量仰角” +ppi.dat
- ▲ 径向风速 RHI 模式文件名: “文件名” + “测量序列号” + “测量方位角” +rhi.dat
- ▲ 径向风速 CaPPI 模式文件名: “文件名” + “测量序列号” + “测量高度” +cappi.dat

第三节 扫描转镜控制

扫描镜的控制是通过单片机实现的。上位计算机通过串口发出命令,由下位单片机进行具体控制。这样使程序结构和逻辑简洁,上位计算机工作负担更小。通过单片机控制,灵活性和实时性更强。

单片机主要控制扫描镜的两个步进电机,用以实现扫描仰角和方位角的控制。单片机与上位计算机通讯的协议和命令协议如表 4-1 所示。

表 4-1 单片机与上位计算机通讯的协议和命令协议

串口通讯协议	9600bps 波特率、1bit 停止位、8bit 数据位、无校验位		
主要命令协议	上位机	00H	电机逆时针转
		FFH	电机顺时针转
		10H	电机 1
		20H	电机 2
	单片机	A1H	命令收到
		A2H	命令有效
		A3H	方向角度正确
		A4H	转动完毕
		E1H	方向角度无效
		E2H	命令无效
		55H	电机正在转动 (忙)

单片机扫描转镜控制软件流程图如图 4-8 所示。

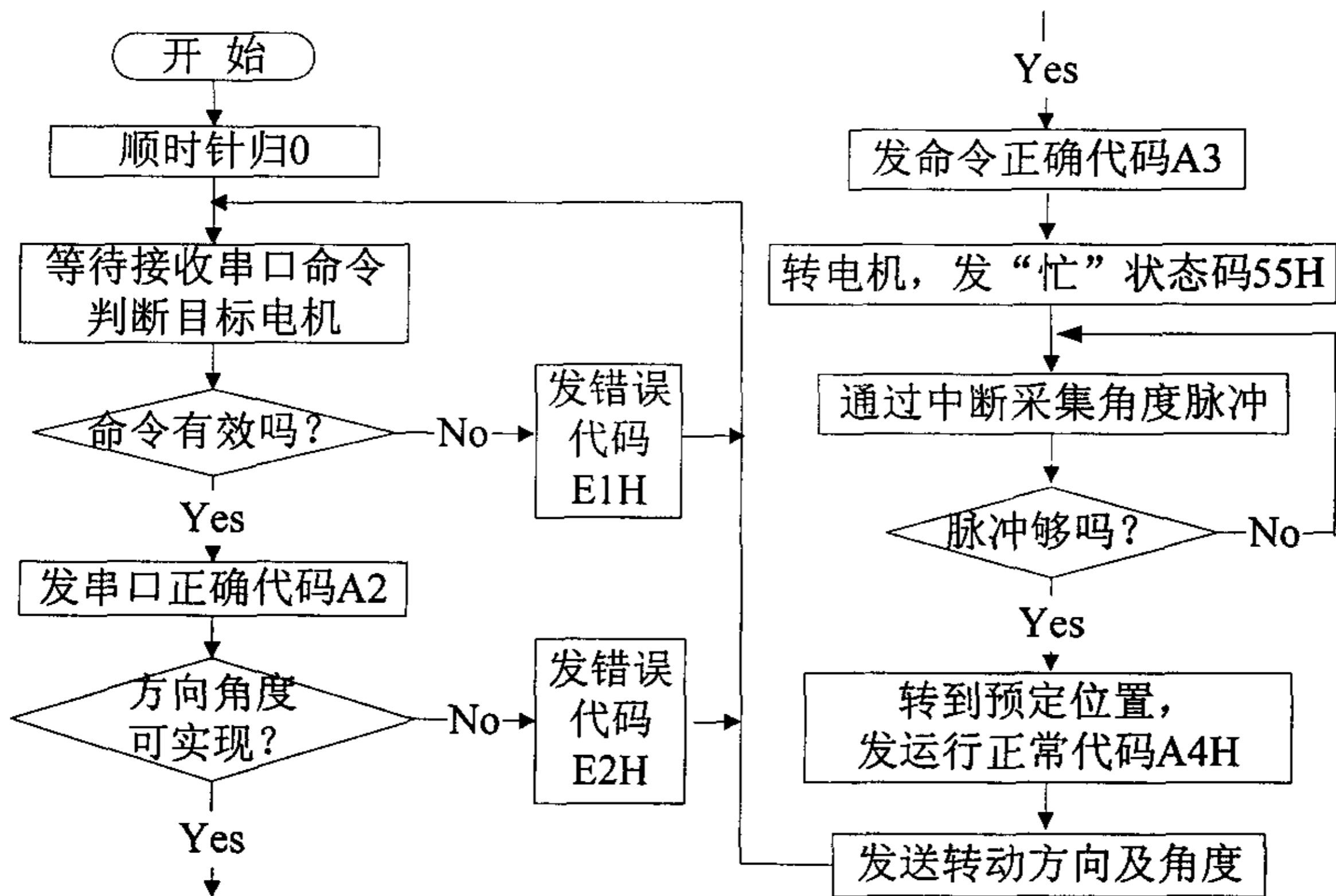


图4-8 单片机扫描转镜控制软件流程图

第四节 实时测量软件初始化

实时测量软件实现的功能是通过控制参数初始化 16bitAD/DA 卡和 40MHz 高速 AD 采集卡，为将来的控制和信号作好准备。如初始化过程中出现错误，显示出出错信息后，由操作人员控制退出。该部分另一个主要功能是为碘分子吸收线扫描子系统、激光输出频率锁定子系统和大气径向风速测量子系统提供一个容器。同时该部分还定义了全局变量，用于各子系统之间传递相互参数，以控制整个系统的运行状况。

1、实时测量软件中定义的全局变量

▲ 40MHz 高速 AD 采集卡的器件控制句柄 hJovian 和采样时基 Time_base。在实时测量软件包含的三个子系统中，将利用 40MHz 高速 AD 采集卡提供的函数库完成信号采集功能，需要上述两个参数。控制句柄 hJovian 由该 AD 卡启动程序返回，Time_base 由专门函数返回，定义为 40MHz。与此相关的 40MHz 高速 AD 采集卡主要参数为：

- ▶ 采样长度：目前为 4K，可调
- ▶ 触发方式：外触发，上升沿触发，根据需要可调
- ▶ 信号耦合方式：直流
- ▶ 通道量程：一般为 $\pm 4V$ ，可调

▲ 16bitAD/DA 卡的器件号 DeviceNumber。在实时测量软件包含的三个子系统中，当调用 16bitAD/DA 卡驱动函数以完成某项功能时，都需要此参数。器件编号 DeviceNumber 定义为 19。16bitAD/DA 卡初始化的主要参数为：

- ▶ DA 通道量程：一般选 $\pm 10V$ ，可调
- ▶ AD 通道配置：硬件配置为通道 0、1 和 2
- ▶ AD 量程：一般选 $\pm 10V$ ，可调
- ▶ AD 通道配合模式：交流耦合

▲ 激光频率锁定值 lock_ra：在激光输出频率锁定子系统和大气径向风速测量子系统使用；

▲ 激光频率锁定电压 lock_vol：在激光输出频率锁定子系统和大气径

向风速测量子系统使用；

- ▲ 激光锁频控制反馈时间 timer_step: 在激光输出频率锁定子系统和大气径向风速测量子系统使用；
- ▲ 激光锁频比例控制反馈系数 vol_step: 在激光输出频率锁定子系统和大气径向风速测量子系统使用；
- ▲ 激光锁频积分控制反馈系数 inte_step: 在激光输出频率锁定子系统和大气径向风速测量子系统使用；
- ▲ 激光锁频微分控制反馈系数 diff_step: 在激光输出频率锁定子系统和大气径向风速测量子系统使用；

程序流程图

该部分软件流程比较简单，主要是依次设置两个 AD 采样卡的参数，设置成功则继续进行，直到全部设置成功。如设置出错，则输出出错的信息，退出程序。实时测量软件初始化详细程序流程图如图 4-9 所示。

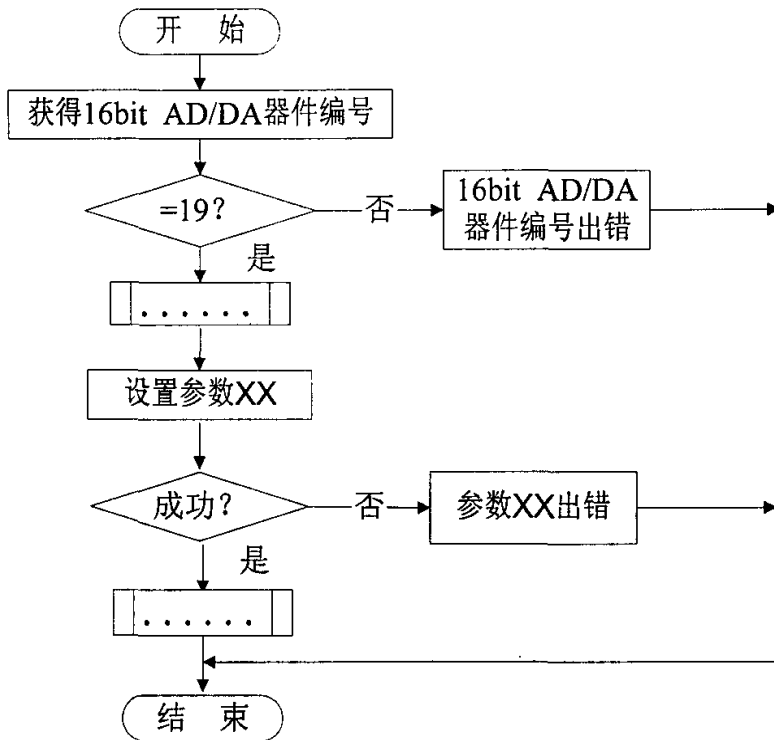


图4-9 实时测量软件初始化详细程序流程图

程序界面和使用说明

该部分的程序界面比较简单，如图 4-10 所示

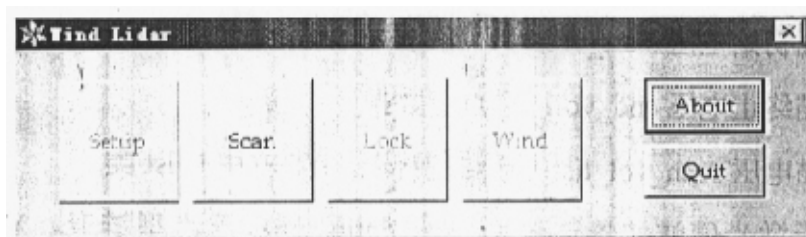


图4-10 实时测量软件初始化程序界面

- ▲ Setup 按钮：留作将来使用，目前一直处于无效状态；
- ▲ Scan 按钮：当该按钮在激活状态被按下时，将弹出碘分子吸收线扫描子系统界面；
- ▲ Lock 按钮：当该按钮在激活状态被按下时，将弹出激光输出频率锁定子系统界面；
- ▲ Wind 按钮：当该按钮在激活状态被按下时，将弹出大气径向风速测量子系统界面；
- ▲ About 按钮：当该按钮在激活状态被按下时，将弹出 About 窗口。
- ▲ Quit 按钮：按下此按钮，程序将退出。

第五节 碘分子吸收线扫描子系统

碘分子吸收线扫描子系统的功能是通过控制种子激光器的电压，调节种子激光和脉冲激光的频率，分别得到透过两套碘分子滤波器的透过率曲线以及种子激光通过 Fabry_Perot 的强度，从而计算出用于反演径向风速的脉冲激光频率同碘分子透过率的关系。

与其他子系统接口

- ▲ 40MHz 高速 AD 采集卡的器件控制句柄 hJovian 和采样时基 Time_base；
- ▲ 16bitAD/DA 卡的器件号 DeviceNumber

▲ 提供 I2 滤波器透过率脉冲激光频率标定数据文件。

该子系统主要数据和数据结构

▲ 扫描初始电压 start_vol: 浮点型数据

▲ 扫描终止电压 end_vol: 浮点型数据

▲ 扫描电压 scan_vol_list: 浮点型链表, VC++中 Clist 类

▲ 种子激光碘滤波器透过率 scan_ratio_list: 浮点型链表, VC++中 Clist 类

▲ 种子激光 Fabry_Perot 透过率 fp_ratio_list: 浮点型链表, VC++中 Clist 类

▲ 脉冲激光碘分子滤波器透过率 pulse_ratio_list: 浮点型链表, VC++中 Clist 类

▲ 高速 AD 采集脉冲激光数据 scan_channel: 浮点型数组, 长度 4K

主要文件存储格式

▲ 表 4-2 种子激光器频率扫描数据文件格式

扫描电压	种子激光碘滤波器透过率	种子激光 F_P 透过率
V0	A0	B0
V1	A1	B1
...
Vn	An	Bn

▲ 表 4-3 碘滤波器透过率脉冲激光频率标定数据文件格式

脉冲激光碘滤波器透过率	脉冲激光相对频率
C0	F0
C1	F1
...	...
Cn	Fn

该功能子系统的详细程序流程图如图 4-11 所示

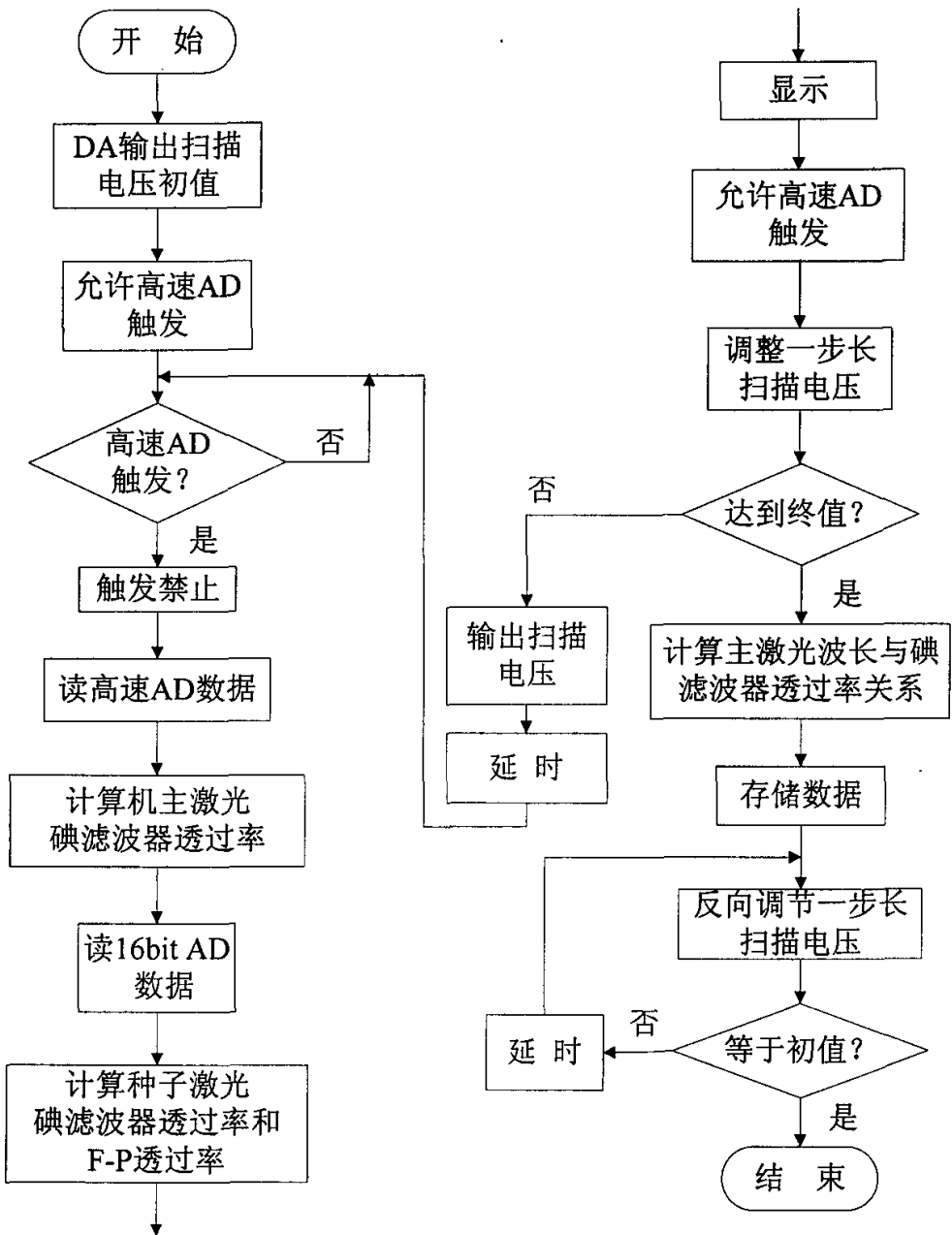


图4-11 碘分子吸收线扫描子系统流程图

程序界面

碘分子吸收线扫描子系统的程序界面如图 4-12 所示