

Lecture 1 光学遥感的概念

1. 遥感(Remote sensing,RS)是通过不需要实际接触到被测物表面的手段,即传感和记录被测物反射或发射的能量,并分析处理这些信息获得被测物信息的一种技术。
2. 遥感工作的基本步骤:发射能量(对主动遥感);使能量与目标的互动;通过传感器记录能量;接收、传输并处理数据;解释和分析数据;应用数据。
3. 常用光源:阳光、闪光信号灯(Flashlight)、激光。
4. 大气作用类型:散射(Scattering)、吸收(Absorption)。
5. 主动遥感(Active RS)指用自己的光源作为能量源的遥感,工作时向其他目标发射能量,在与目标相互作用后,后向散射反射回传感器;被动遥感(Passive RS)使用自然光源。
6. 几种常见主动遥感系统:激光雷达(LIDAR: Light Detection And Ranging, 光探测与测距),短波雷达,包括紫外、可见、近红外波段;无线电雷达(RADAR: RAdio Detection And Ranging, 无线电探测与测距),长波雷达, 1-100cm;声呐(SONAR: SOund Navigation And Ranging),超长波雷达。
7. 声呐的基本特征:不能通过真空传播,易于穿透固体和液体(吸收声能远小于吸收光能),非常缓慢。包括测深声呐、(侧扫)成像声呐等。
8. 地球大气分层:对流层 Troposphere~10km,平流层 Stratosphere~50km,中间层 Mesosphere~85km,电离层/热层 Thermosphere。瑞利 Rayleigh 雷达作用于 0-90km,钠荧光 Fluorescence 雷达作用于 80-110km,米 Mie 雷达作用于 0-20km, DIAL 雷达作用于 20-45km,拉曼 Raman 雷达作用于 0-15km。
9. 卫星被动遥感主要测量可见光波段的太阳光,或者吸收并重发射的热红外波段。
10. 卫星轨道分为:地球静止轨道 Geostationary orbit,在这个轨道上卫星以与地球自转相匹配的速度旋转;近极轨道 Near-polar orbit,在两极间来回绕转。
太阳同步 sun-synchronous 轨道,是近极轨道的一种,从南极向北极时处于夜间侧(上升通道),从北极向南极时处于日光侧(下降通道),永远处于正午或午夜。
当卫星处于太阳同步轨道时,从地球上,卫星在向西运动。

Lecture 2 辐射的电磁学理论

1. 分子瑞利散射 Molecular Rayleigh Scattering 指一光子入射到分子上后,有不同的概率散射到各个立体角。产生条件是微粒直径远小于入射波的波长 ($d < 0.1\lambda$)。散射的光线在光线前进方向和反方向上的程度是相同的,而在与入射光线垂直的方向上程度最低。
2. 考虑散射截面时, z 轴为入射光方向, θ 为天顶距, φ 为经度。

3. 由于瑞利散射，天显现蓝色。

4. 大气体积后向散射系数： $\beta_{\pi}^R(\lambda) = N\sigma_{\pi}^R(\lambda)$ ，分子后向散射系数：

$$\sigma_{\pi}^R(\lambda) = \left. \frac{d\sigma_R}{d\Omega} \right|_{\theta=\pi}$$

其中 $\sigma_R(\lambda)$ 是波长 λ 的总散射截面。瑞利微分散射截面：

$$\frac{d\sigma_R(\theta, \varphi)}{d\Omega}$$

5. Mie 散射的产生条件是 $\lambda \approx d$ ，是不对称弹性散射，在入射光线前进方向最高。

6. Rayleigh 与 Mie 散射的全散射截面都正比于 λ^{-4} 。

7. Rayleigh, Mie 散射都由大气气溶胶产生。用何种散射处理可以用散射尺寸参数 $\alpha \equiv ka$ 判定，其中 k 为传播矢量， a 是气溶胶密度。 $\alpha > 0.5$ 时是不对称非弹性散射， $\alpha < 0.5$ 时是各向同性弹性散射。

Lecture 3 量子物理与辐射过程

1. Raman 散射是指一定频率的激光照射到样品表面时，物质中的分子与光子发生能量转移，振动态（例如：原子的摆动和扭动，化学键的摆动和振动）发生不同方式和程度的改变，然后散射出不同频率的光。

2. Raman 散射比 Rayleigh 散射小 3 个数量级。海水是蓝色因为海水中分子的 Raman 散射。

3. 谱线展宽分为自然展宽（由于激发态本身的不确定度）、压力展宽/碰撞展宽（由于辐射（吸收）物质与相邻原子（分子）之间的弹性或非弹性碰撞；有效降低激发态的寿命，导致额外的展宽）、多普勒展宽（由于分子热运动导致多普勒频移）

Lecture 4 辐射的相互作用与传播

1. 辐射传输方程：

$$\frac{dJ(\nu, z)}{dz} = \epsilon(\nu, z) - \kappa(\nu, z)J(\nu, z) \Leftrightarrow \frac{dJ}{d\tau} = S - J$$

J 为辐射度、 ϵ 为单位立体角的自发辐射系数、 κ 是受激辐射与吸收系数、 S 是源函数、 τ 为光学厚度。其中：

$$S(\nu, z) \equiv \frac{\epsilon}{\kappa}, \tau(\nu, l) \equiv \int_0^l \kappa(\nu, z) dz$$

对于均匀介质有 $\tau(\nu, l) = \kappa(\nu)l$ ， l 为介质厚度。若介质未激发， $\epsilon(\nu) = 0$ ；若无外部辐射， $J(\nu, 0) = 0$ 。

2. 对均匀介质，辐射传输方程的解为：

$$J(\nu, l) = J(\nu, 0)e^{-\kappa(\nu)l} + S(\nu)(1 - e^{-\kappa(\nu)l})$$

3. 带散射的辐射传输方程：

$$\frac{dI(\nu)}{dz} = \epsilon(\nu)\Delta\Omega - \kappa_\epsilon(\nu)I(\nu)$$

其中 $\kappa_\epsilon(\nu) \equiv \beta_A(\nu) + \beta_S(\nu)$ 是全衰减系数。

4. Beer-Lambert 定律：对于晴空下的准直光束，受激辐射 $\epsilon(\nu)$ 可以忽略不计，解得：

$$I(\nu, l) = I(\nu, 0)e^{-\int_0^l \kappa_\epsilon(\nu, z) dz}$$

5. 晴空下准直光束的大气全衰减系数：

$$\kappa_\epsilon(\nu) = \sum_i (\kappa_E^i(\nu) + \kappa_R^i(\nu) + \kappa_A^i(\nu)) + \kappa_M(\nu)$$

其中 i 代表大气中的不同成分， $\kappa_E, \kappa_R, \kappa_A, \kappa_M$ 分别代表 Rayleigh 散射（弹性散射）Raman 散射、分子受激吸收和 Mie 散射带来的衰减系数。 $\kappa_M(\nu) = \Sigma\beta_S(n, \nu)$ 。

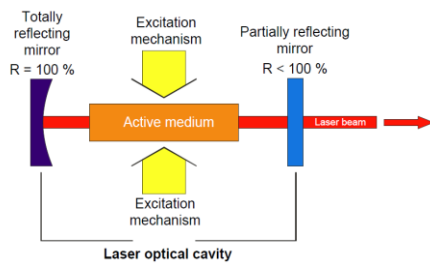
6. 能见度 R_v 随 $\kappa_M(\nu)$ 递增。

Lecture 5 激光简介

1. 涉及光子的电子跃迁分类：自发辐射（电子从激发态自发跃迁到低能态）、受激辐射（电子从激发态受外来光子激发而进入低能态）、受激吸收（低能态电子受外来光子激发进入激发态）

2. 如果我们不断对工作物质照射光子，使得受激辐射与受激吸收速率平衡时，激发态原子数目高于低能态，则称为能级翻转/粒子数反转。利用三能级工作物质，将中间能级翻转是常用的能级翻转方式，例如 He-Ne 激光器。

3. 激光器的组成：



全反射镜/工作介质/激励机制/部分反射镜

Lecture 6 激光雷达简介

1. 大气散射过程的类型：

Rayleigh 散射：原子或分子弹性散射产生的激光辐射。在散射过程中，入射光子先使电偶极子跃迁到虚拟激发态，随后电偶极子跃迁回基态并产生散射光子。散射光子与入射光子频率相同。

Mie 散射：从粒子（气溶胶或云）中弹性散射的激光辐射，其大小与辐射波长相当，且频

率不变。散射过程与 Rayleigh 散射相似，但也有多极子参与振动。

Raman 散射：分子的非弹性散射激光辐射，具有分子的频移特性。在散射过程中，入射光子把电子从基态激发到虚拟激发态，随后电子从激发态跃迁回比基态不同（通常是稍高）的振动激发态，从而使散射光子比入射光子频率不同（通常是稍低）。入射光频率高于散射光的 Raman 散射称为 Stokes 散射，低的称为反 Stokes 散射。

Resonance 共振散射：频率与特定原子跃迁频率匹配的激光辐射被一个大的散射截面散射，频率不变。在散射过程中，入射光子先使电子跃迁到激发态，随后电子跃迁回基态并产生散射光子。

荧光：频率与原子或分子的特定电子跃迁相匹配的激光辐射被吸收，随后以较低的频率发射。产生过程是入射光将电子从基态激发到激发态，随后跃迁到较低的激发态。

吸收：当频率与给定分子的吸收带匹配时，激光辐射的衰减。产生过程是电子吸收入射光子后激发到激发态上。

2. 不同类型后向散射截面数量级：

Na 吸收截面 $\sim 5 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ ；Rayleigh 散射截面比 Na 吸收截面小 14 个数量级；旋转 Raman 散射通常在 Rayleigh 散射的 2.5%，振动 Raman 散射比 Rayleigh 小 3 个数量级。对于多数散射，带宽约 1 GHz。

3. 常见激光雷达：

Mie 雷达：利用 Mie 散射测量气溶胶。

DIAL 差分吸收雷达：利用原子分子吸收测量大气成分与气体污染物含量。

Raman 雷达：利用非弹性散射测量水汽、气溶胶光学厚度、低层大气温度。

Rayleigh 雷达：测量平流层与中间层的温度与气压。

共振荧光雷达：利用共振散射、荧光、多普勒频移、分子弹性散射测量平流层、中间层的温度和密度，与中高层大气的温度、密度、云、风。

测风雷达：利用多普勒频移测量风与湍流。

荧光雷达：利用激光诱导荧光探测海洋与植被。

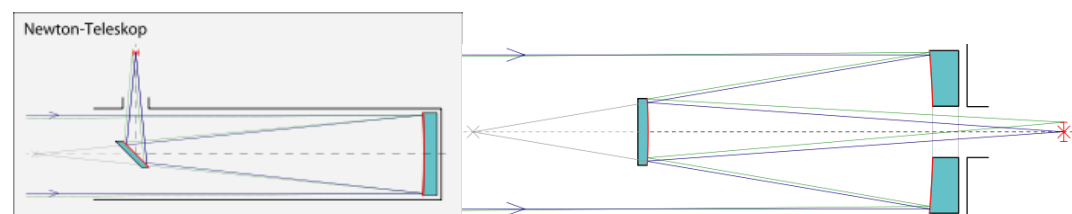
激光高度计/目标雷达：利用表面反射回波测量物体与地形。

4. 激光雷达的组成：发射器、接收器、电子控制系统。

5. 根据发射器与接收器是否在一起，激光雷达分为单站雷达与双站雷达；单站雷达分为同轴雷达与双轴雷达，同轴雷达的激光束与接收器光学元件轴重合，双轴雷达相反。

6. 为了避免近场强后向散射，可以使用电子选通光电探测器（如 PMT）或快速快门。

7. 接收器望远镜主要有牛顿型（左）和卡塞格伦型（右）。（主镜、次镜）



8. 滤波器的主要参数：中心波长 CWL、带宽、阻塞范围、光学厚度 OD

9. 单脉冲激光雷达基本方程：

$$N_s(\lambda, z) = N(\lambda_L) \cdot \xi(z)\eta(\lambda_L, \lambda) \cdot T(\lambda_L, z) \cdot \beta(\lambda_L, \lambda, z, \theta)\Delta z \cdot T(\lambda, z) \cdot \frac{A}{z^2} + N_B$$

其中 λ_L 代表激光波长， λ 代表回波波长；

$N_s(\lambda, z)$ 是光子计数器所记录到的高度 z 返回的波长为 λ 的后向散射光子数；

$N(\lambda_L)$ 是激光器发射的光子数，可以用公式：

$$N(\lambda_L) = \frac{E(\lambda_L)}{hc/\lambda_L}$$

计算，其中 $E(\lambda_L)$ 代表激光器发射光能；

$\xi(z)\eta(\lambda_L, \lambda)$ 分别是重叠因子与系统效率，取决于硬件， ξ 也会用 O 表示；

$T(\lambda_L, z)$ 是大气中激光光子的前向透射率；

$\beta(\lambda_L, \lambda, z, \theta)\Delta z$ 是透射光子在高度范围 Δz 内向每个立体角散射 λ 波长光子的概率；

$T(\lambda, z)$ 是大气中回波光子的后向透射率；

A/z^2 是散射光子被望远镜收集到的概率，即立体角， A 为望远镜接收面积；

N_B 是噪声，主要有背景噪声、PMT 暗计数与电路散粒噪声。

10. 体积散射系数的计算：

$$\beta(\lambda_L, \lambda, z, \theta) = \sum_i \left(\frac{d\sigma_i(\lambda_L, \theta)}{d\Omega} n_i(z) p_i(\lambda) \right)$$

其中 i 代表大气的不同成分；

$d\sigma_i(\lambda_L, \theta)/d\Omega$ 是物质 i 在散射角 θ 的微分散射截面；

$n_i(z)$ 是物质 i 的粒子数密度；

$p_i(\lambda)$ 是散射光子为 λ 的概率；

体积散射系数 β 是穿越单位距离的一个光子向角 θ 散射 λ 光子的概率，单位为 $m^{-1}rad^{-1}$ 。

11. 前向与后向透射率的计算：

$$T_F = T(\lambda_L, R) = \exp\left(-\int_0^R \alpha(\lambda_L, r) dr\right), T_B = T(\lambda, R) = \exp\left(-\int_0^R \alpha(\lambda, r) dr\right)$$

α 为消光系数，单位为 m^{-1} 。消光系数又可以表示为：

$$\alpha(\lambda, R) = \sum_i \left(\sigma_{i,ext}(\lambda) n_i(R) \right)$$

$$\sigma_{i,ext}(\lambda) = \sigma_{i,abs}(\lambda) + \sigma_{i,sca}(\lambda)$$

$\sigma_{i,ext}(\lambda)$ 是物质 i 的消光截面， $\sigma_{i,abs}(\lambda)$ 是吸收截面， $\sigma_{i,sca}(\lambda)$ 是散射截面。根据物质 i 的分类，又可以把 α 分为气溶胶 α_{aer} 和分子 α_{mol} 两部分。

Lecture 7 气溶胶雷达/Mie 雷达

1. 雷达比/消散比 lidar ratio:

$$L = \frac{\alpha(R)}{\beta(R)}$$

对分子弹性散射有 $L_{mol} = 8\pi/3$ 。

2. 通过经验公式, Rayleigh 散射的散射系数可以由大气温度与压强唯一确定!

3. 低层大气弹性散射的雷达方程:

$$P(R) = \frac{E_0 \eta}{R^2} \xi(R) \beta(R) \exp\left(-2 \int_0^R \alpha(r) dr\right)$$

距离-信号归一化形式(Range-Normalized-Signal):

$$S(R) = P(R)R^2 = E_0 \eta_L (\beta_{aer}(R) + \beta_{mol}(R)) \exp\left(-2 \int_0^R \alpha_{aer}(r) + \alpha_{mol}(r) dr\right)$$

由于 β_{mol} 可以直接由大气温压确定, L_{mol} 为常数, 该式只有两个变量 $\beta_{aer}(R)$ 与 $\alpha_{aer}(r)$ 。

4. 解低层大气弹性散射雷达方程的 Klett 方法:

1° 将雷达方程变换为以 $Y(R) = L_{aer}(R)(\beta_{aer}(R) + \beta_{mol}(R))$ 与 L_{aer} 为变量的形式:

$$S(R)L_{aer}(R) \exp\left(-2 \int_0^R (L_{aer}(r) - L_{mol})\beta_{mol}(r) dr\right) = E_0 \eta_L Y(R) \exp\left(-2 \int_0^R Y(r) dr\right)$$

2° 将上式化为 Bernoulli 方程形式:

$$\frac{d \ln\left(S(R)L_{aer}(R) \exp\left(-2 \int_0^R (L_{aer}(r) - L_{mol})\beta_{mol}(r) dr\right)\right)}{dR} = \frac{1}{Y(R)} \frac{dY}{dR} - 2Y(R)$$

3° 结合边界条件 $Y(R_0) = L_{aer}(R_0)(\beta_{aer}(R_0) + \beta_{mol}(R_0))$, 求解上述方程。在解 Bernoulli 方程的过程中, 可以选择前向积分 ($R_0 < R$) 或后向积分 ($R_0 > R$), 其中只有后向积分的解是收敛的, 被称为 Klett 方法。

5. 单通道气溶胶雷达只能利用 Klett 方法估算消光, 不能完全求解。通过多通道气溶胶激光雷达, 可以利用额外通道来提供额外信息, 从而更可靠地推断气溶胶消光。Raman 雷达与 HSRL 是最重要的多通道的气溶胶激光雷达。

6. 高光谱分辨率激光雷达 (HSRL) 可以分辨不同波长的回波, 从而分辨 Rayleigh 散射波形与更窄而尖锐的 Mie 散射波形。通过滤波器将 Mie 散射波形滤去后, 即可得到分子散射通道。

7. HSRL 雷达方程:

分子散射通道:

$$P_{MS}(r) = \frac{C_{MS}}{r^2} \beta_{mol}(r) \exp\left(-2 \int_0^r \alpha_{aer}(r') + \alpha_{mol}(r') dr'\right)$$

全散射通道:

$$P_{TS}(r) = \frac{C_{TS}}{r^2} (\beta_{mol}(r) + \beta_{aer}(r)) \exp\left(-2 \int_0^r \alpha_{aer}(r') + \alpha_{mol}(r') dr'\right)$$

Lecture 8 中层大气测温 Rayleigh 雷达

1. Rayleigh 雷达方程:

$$N_{Ray}(z, \lambda_L) = N_L(\lambda_L) \frac{A_L}{(z - z_L)^2} T^2 (\beta_{Ray}(z, \lambda_L) + \beta_{Mie}(z, \lambda_L)) \Delta z$$

$$T^2 = \exp\left(-2 \int_{z_L}^z \alpha_{Ray}(z', \lambda_L) dz' - 2 \int_{z_L}^z \alpha_{Mie}(z', \lambda_L) dz' - \sum_i 2 \int_{z_L}^z \sigma_i(z', \lambda_L) N_i(z') dz'\right)$$

其中：

$N_{Ray}(z, \lambda_L)$ 是单次脉冲雷达接收到的来自 z 波长为 λ_L 的光子数；

N_L 是单次脉冲雷达发射光子数，波长为 λ_L ；

A_L 是望远镜接收面积；

z 是回波光子来源的海拔， z_L 是雷达接收器/发射器海拔；

$\beta_{Ray}(z, \lambda_L) = (3/8\pi)\sigma_{Ray}(\lambda_L)N_{Air}(z)$ 是 Rayleigh 后向散射系数；

β_{Mie} 是大气气溶胶的 Mie 后向散射系数；

$\alpha_{Ray}, \alpha_{Mie}$ 分别是 Rayleigh、Mie 消光系数， $\alpha_{Ray}(z, \lambda_L) = \sigma_{Ray}(\lambda_L)N_{Air}(z)$ ；

i 代表大气中种种吸收物质。

2. 结合流体静力学平衡条件 $dp(z) = -\rho(z)g(z) dz$ 与理想气体方程 $p = nRT$ ，可以解 Rayleigh 雷达方程得到大气温度与压力。

Lecture 9 多普勒测风雷达

1. Doppler 测风雷达利用粒子速度产生的吸收/发射辐射的频率变化，测量粒子相对于接收器的径向速度。分为相干/外差探测多普勒测风雷达和直接探测多普勒测风雷达。

2. 相干探测基本原理：利用本地振荡器让返回信号与本地激光信号光学混合，产生拍频信号的频率等于运动粒子产生的多普勒频移。

3. 直接探测基本原理：使用光学频率鉴别器/频谱分析仪将多普勒频移转换为光学强度或功率的变化/空间分布，直接进行检测。光学鉴频器有三种类型：原子吸收谱线，使用整个谱线的共振荧光，如 Na、K、Fe Doppler 雷达；边缘滤光片，利用分子吸收线或光学干涉仪的透射边缘；光学干涉仪输出条纹图成像。

4. 多普勒频移： $\Delta\nu = 2v/\lambda$ 。

Lecture 10 拉曼雷达

1. Raman 雷达方程：针对我们感兴趣的大气成分 C 与参考物质 Ref（通常是氮气或氧气）分别有：

$$P_{CRa}(R, \lambda_{CRa}) = \frac{E_0 \eta \lambda_{CRa}}{R^2} O(R, \lambda_{CRa}) \beta_{CRa}(R, \lambda_0, \lambda_{CRa}) \exp\left(-\int_0^R (\alpha(r, \lambda_0) + \alpha(r, \lambda_{CRa})) dr\right)$$

$$P_{RRa}(R, \lambda_{RRa}) = \frac{E_0 \eta \lambda_{RRa}}{R^2} O(R, \lambda_{RRa}) \beta_{RRa}(R, \lambda_0, \lambda_{RRa}) \exp\left(-\int_0^R (\alpha(r, \lambda_0) + \alpha(r, \lambda_{RRa})) dr\right)$$

待测物质通道与参考物质通道的后向散射系数分别可以表示为：

$$\beta_{CRa} = N_{CRa}(R) \frac{d\sigma_{CRa}}{d\Omega}(\pi, \lambda_0, \lambda_{CRa}), \quad \beta_{RRa} = N_{RRa}(R) \frac{d\sigma_{RRa}}{d\Omega}(\pi, \lambda_0, \lambda_{RRa})$$

需要注意，不论是参考物质还是待测物质，我们都只考虑 Raman 散射，不包括气溶胶的后向散射。

2. Raman 雷达方程的求解:

1° 将两方程两边相除

$$\frac{P_{CRa}(R, \lambda_{CRa})}{P_{RRa}(R, \lambda_{RRa})} = \frac{\eta \lambda_{CRa} N_{CRa}(R) \frac{d\sigma_{CRa}}{d\Omega}(\pi, \lambda_0, \lambda_{CRa}) \exp\left(-\int_0^R \alpha(r, \lambda_{CRa}) dr\right)}{\eta \lambda_{RRa} N_{RRa}(R) \frac{d\sigma_{RRa}}{d\Omega}(\pi, \lambda_0, \lambda_{RRa}) \exp\left(-\int_0^R \alpha(r, \lambda_{RRa}) dr\right)}$$

2° 计算待测介质在大气中混合比:

$$r_c(R) = \frac{M_c(R)}{M_{air}(R)} = \frac{M_R}{M_{air}} \frac{m_c N_{CRa}(R)}{m_R N_{RRa}(R)} = \frac{M_R}{M_{air}} \frac{m_c}{m_R} \dots$$

3° 由上式, 标定 Raman 雷达数据需要: 参考物质占大气比例、两个波长下雷达探测效率之比、有效 Raman 后向散射截面之比、大气透射率/消光系数之比。随后我们利用大气模型计算 α_{mol} , 利用 Angstrom 指数估算 α_{aer} :

$$\frac{\alpha_{aer}(\lambda_0)}{\alpha_{aer}(\lambda_{Ra})} = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{Ra}}\right)^{-a(R)}, a(R) \approx 1$$

3. 当大气中待测气体浓度足够高时, Raman 雷达可以测量任何有 Raman 效应的气体。低 Raman 散射截面的待测气体对浓度要求更高。Raman 雷达不对激光波长有特定要求, 但由于散射截面正比于 λ^{-4} , 波长应越低越好。

Lecture 11 差分吸收雷达 DIAL

1. DIAL 的原理。

2. DIAL 雷达方程:

$$P_S(\lambda, R) = P_L(\lambda) (\beta_s(\lambda, R) \Delta R) \frac{A}{R^2} \exp\left(-2 \int_0^R \bar{\alpha}(\lambda, r) dr - 2 \int_0^R \sigma_{abs}(\lambda, r) n_c(r) dr\right) \eta(\lambda) G(R) + P_B$$

其中 $\sigma_{abs}(\lambda, r) n_c(r)$ 是待测介质的消光系数, $\bar{\alpha}(\lambda, r)$ 是其他物质的消光系数。

$$\beta_{sc}(\lambda, R) = \beta_{aer}(\lambda, R) + \beta_{mol}(\lambda, R)$$

$$\bar{\alpha}(\lambda, r) = \alpha_{aer}(\lambda, r) + \alpha_{mol}(\lambda, r) + \sigma_{IG}(\lambda, r) n_{IG}(r)$$

IG 是参考气体。上述的多数参数是不知道的, 因此激光器发出两种波长 λ_{ON} 和 λ_{OFF} , 得到两个雷达方程, 将两者两边相除并求对数, 可以得到解:

$$n_c(R) = \frac{1}{2\Delta\sigma_{abs}} \frac{d}{dR} \left(\ln \left(\frac{P_S(\lambda_{OFF}, R) - P_B}{P_S(\lambda_{ON}, R) - P_B} \right) \right)$$

将其变为差分的形式:

$$n_c(R) = \frac{1}{2\Delta\sigma_{abs}\Delta R} \ln \left(\frac{P_S(\lambda_{OFF}, R + \Delta R) - P_B}{P_S(\lambda_{ON}, R + \Delta R) - P_B} \cdot \frac{P_S(\lambda_{ON}, R) - P_B}{P_S(\lambda_{OFF}, R) - P_B} \right)$$

从 R_1 到 R_2 的柱密度为:

$$n_c = \frac{1}{2\Delta\sigma_{abs}\Delta R} \ln \left(\frac{P_S(\lambda_{OFF}, R_2) - P_B}{P_S(\lambda_{ON}, R_2) - P_B} \cdot \frac{P_S(\lambda_{ON}, R_1) - P_B}{P_S(\lambda_{OFF}, R_1) - P_B} \right)$$

3. DIAL 的应用: 测水蒸气、臭氧等。

4. 多波长差分吸收雷达采用三或多个波长, 通过测量几对弹性散射信号的微分吸收来计算

待测物质的含量。通过适当选择波长，气溶胶的差分散射和消光的影响显著减小。

Lecture 12 窄带钠测温测风雷达

1. 三种加宽机制：自然加宽，产生宽度~10 MHz的洛伦茨线形；压力加宽，产生与自然加宽相同的线条形状；Doppler 展宽，产生高斯线形，对线宽影响要大得多。

2. 单脉冲钠雷达方程：

$$N(z) = \frac{E_L}{hc/\lambda} \times (\eta T_A^2) \times (\rho_{Na} \sigma_{SB} \Delta z) \times \left(\frac{A_R}{z^2}\right) \times T_{\uparrow} T_{\downarrow} + N_B$$

在 Na 层下方，通常是 70km 以下，望远镜接收光子来自瑞利散射与气溶胶后向散射。