

文章编号 : 0253-2239(2001)06-0720-04

星载激光测风雷达的光束扫描及风场反演^{*}

胡宏伟 胡企铨

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 激光测风雷达通过多普勒频移来确定激光束视线方向上的大气风场的速度矢量。由这些测得的矢量可反演大气风场群速的速度矢量。文讨论利用单一激光多普勒风速仪系统, 激光束采用圆锥扫描方式, 在扫描圆锥的垂直截面上取四个正交点上的多普勒风速矢量。通过这四个矢量, 利用空间解析几何的知识, 最终推导出观测视场上风场的水平和垂直方向的矢量分量。

关键词: 激光雷达; 多普勒频移; 风场矢量

中图分类号: TN958.98 文献标识码: A

1 引 言

利用激光多普勒原理来探测大气风场, 具有其他技术无法比拟的优点。最早的激光多普勒风速仪是 70 年代初利用连续激光采用光学外差技术实现的^[1,2]。其原理是: 大气中气溶胶大分子或悬浮微粒的群速反映了大气风速, 它们引起散射光的多普勒频移。沿光线方向的风速与多普勒频移有固定的关系: $\Delta f = 2V/\lambda$ 。接收散射光回波并与本机振荡的固有频率比较, 即可用外差法测出这个频移, 计算出视向风速, 这就是多普勒相干激光雷达。国外已经有较成功的应用。但为避免光学外差接收在小型化、可靠性、大气补偿和修正等问题上的缺陷, 现在在许多地方采用了非相干直接探测的所谓边缘技术^[1,2], 利用脉宽 τ 的脉冲多普勒激光雷达测量风速, 同时还提供距离信息, 使风场结构的距离分辨率近似为 $c\tau$, c 为光速。

在激光雷达风场测量中, 有几种扫描和反演方法, 早先采用三个独立的系统集中测量一个共同的大气范围。这一技术, 尽管在决定风场的三个分量上比较精确, 但这种系统具体实现有很大的不便。Cliff 和 Huffaker(1974 年) 推出了速度方位显示(VAD)圆锥扫描技术。这种技术利用单一的激光多普勒风速仪(LDV)来测量三维风场信息。其方法是通过圆锥扫描激光雷达光束, 采集全部扫描过程中获取的视向风速和角度、距离数据, 通过处理得到三维风场结构。

本文将利用边缘技术原理, 提出一种利用速度方位显示扫描技术和单一的激光多普勒风速仪系统的星载激光测风雷达的光束扫描方式和风场反演算法。

在边缘技术中, 其风场数据采集测量公式如下式:

$$V = \frac{c}{2\nu} \left[\frac{I_N(\nu + \Delta\nu) - I_N(\nu)}{K[\beta(\nu, \nu + \Delta\nu)]} \right], \quad (1)$$

V 为视线方向风速, $I_N(\nu) = cF(\nu)$ 为归一化信号, $F(\nu)$ 为边缘滤波器的频率响应, K 为一个校准常数,

$$\beta(\nu, \nu + \Delta\nu) = \frac{F(\nu + \Delta\nu) - F(\nu)}{\Delta\nu},$$

是边缘函数在 ν 到 $\nu + \Delta\nu$ 之间的平均斜率, ν 为出射激光的频率, $\Delta\nu$ 为多普勒频移。详细推导和含义可参见文献 [1,3]。

2 观测坐标系风场群速度矢量的运算

2.1 光束扫描方式

假设观测视场内风场群速实际速度为 μ , 卫星在轨道上移动的速度为 ω 。根据空间解析几何知识, 采用圆锥定点扫描激光束分别在 4 个方位(A、B、C、D)测量 4 次视向速度, 每次方位角相差 90° 。在这个光束扫描方式下的风场反演算法将用到的已知量为: 圆锥扫描角 2α , 圆锥光束扫描截面上的 x 轴的正方向与卫星在轨道上的运动方向之间的夹角 Ω , 如图 1 所示。

^{*} 国家科委 863 高科技资助项目。

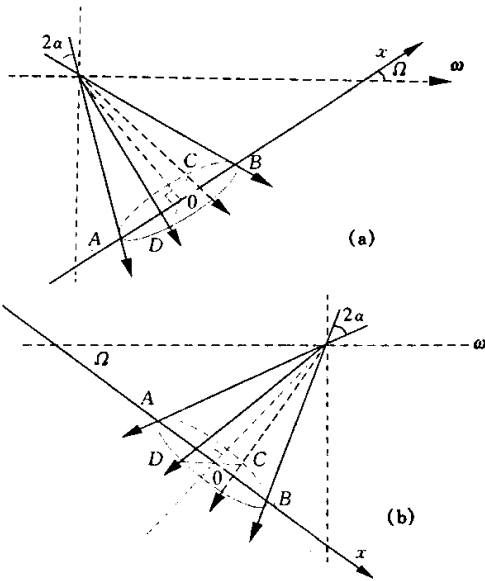


Fig. 1 Laser's scanning manner

2.2 风速矢量运算

首先 A、B、C、D 4 个点在光束扫描圆锥的垂直截面上(这个面和圆锥中轴垂直), y 轴是垂直卫星运行轨道并且平行于水平面且通过圆心的直线, x 轴是圆锥的垂直截面上垂直于此线且通过圆心的直线, 圆锥的中轴为 z 轴(正方向指向激光发射点), A、B 是 x 轴与圆截面边缘的交点(x 轴的方向为 A → B), C、D、是 y 轴与圆锥截面边缘的交点(y 轴的方向为 C → D)。以上就是本文建立的观测坐标系, 如图 2 所示。

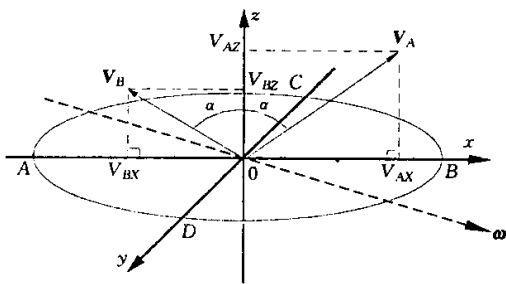


Fig. 2 The coordinate locating on the vertical section of scanning cone

在 A、B、C、D 4 个点上利用(1)式求出 4 个视线方向的风场速度矢量 V_A 、 V_B 、 V_C 、 V_D 的值 V_A 、 V_B 、 V_C 、 V_D , 当这些值为正时, 风场视线速度矢量方向指向激光出射点, 反之, 背向激光出射点为负。为了简便, 规定当 x 轴以顺时针方向和卫星移动方向成夹角 Ω 时, Ω 为负角 [如图 1(a)], 而当 x 轴以逆时针方向和卫星移动方向成夹角 Ω 时, Ω 为正角 [如图 1(b)]。把在 A、B 两点上测的视线速度矢量

平移到圆锥中轴相交在坐标原点 0 点, 如图 2 所示。

V_A 在 x 轴、y 轴、z 轴上的分量分别为

$$\begin{aligned} V_{Ax} &= V_A \sin \alpha, \\ V_{Ay} &= 0, \\ V_{Az} &= V_A \cos \alpha. \end{aligned}$$

这里 x 轴、z 轴上的两个分量是观测点的风场实际速度 μ 分量与卫星移动速度 ω 分量之和。令 A、B 两点风场的实际速度矢量为 μ_A 和 μ_B , 于是 μ_A 在 x 轴、y 轴、z 轴上的分量分别为:

$$\begin{aligned} \mu_{Ax} &= V_A \sin \alpha - \omega \cos \Omega, \\ \mu_{Ay} &= 0, \\ \mu_{Az} &= V_A \cos \alpha - \omega \sin \Omega. \end{aligned}$$

V_B 在 x 轴、y 轴、z 轴上的分量分别为

$$\begin{aligned} V_{Bx} &= -V_B \sin \alpha, \\ V_{By} &= 0, \\ V_{Bz} &= V_B \cos \alpha. \end{aligned}$$

实际风场矢量 μ_B 在 x 轴、y 轴、z 轴上的分量分别为:

$$\begin{aligned} \mu_{Bx} &= -V_B \sin \alpha - \omega \cos \Omega, \\ \mu_{By} &= 0, \\ \mu_{Bz} &= V_B \cos \alpha - \omega \sin \Omega. \end{aligned}$$

同理, 由 y 轴上在此圆锥截面的端点 C、D 上测得的视线方向的风场速度矢量 V_C 、 V_D 的值得出实际风场在 C、D 上的矢量 μ_C 在 x 轴、y 轴、z 轴上的分量坐标:

$$\begin{aligned} \mu_{Cx} &= -\omega \cos \Omega, \\ \mu_{Cy} &= V_C \sin \alpha, \\ \mu_{Cz} &= V_C \cos \alpha - \omega \sin \Omega. \end{aligned}$$

μ_D 在 x 轴、y 轴、z 轴上的分量坐标:

$$\begin{aligned} \mu_{Dx} &= -\omega \cos \Omega, \\ \mu_{Dy} &= -V_D \sin \alpha, \\ \mu_{Dz} &= V_D \cos \alpha - \omega \sin \Omega. \end{aligned}$$

由此, 在三个坐标轴上对 4 个观测点的实际风场速度的矢量坐标在 x 轴、y 轴、z 轴上求和。最终得出一个在 x 轴、y 轴、z 轴都有分量的矢量。这个矢量就是要求的观测视场上风场的群速在 xyz 坐标系求得的风场群速的速度矢量 μ 。它在坐标轴 x、y、z 上的分量 μ_x 、 μ_y 、 μ_z 的推导过程为:

$$\begin{aligned} \mu_x &= \mu_{Ax} + \mu_{Bx} + \mu_{Cx} + \mu_{Dx} \\ \mu_y &= \mu_{Ay} + \mu_{By} + \mu_{Cy} + \mu_{Dy} \\ \mu_z &= \mu_{Az} + \mu_{Bz} + \mu_{Cz} + \mu_{Dz} \end{aligned}$$

把 μ_A 、 μ_B 、 μ_C 、 μ_D 的坐标分量代入上式中得到:

$$\begin{aligned}\mu_x &= V_A \sin\alpha - V_B \sin\alpha - 4\omega \cos\Omega, \\ \mu_y &= V_C \sin\alpha - V_D \sin\alpha, \\ \mu_z &= V_A \cos\alpha + V_B \cos\alpha + V_C \cos\alpha + \\ &V_D \cos\alpha - 4\omega \sin\Omega.\end{aligned}$$

以上就是以速度 ω 在轨道上运行的卫星对观测范围内大气风场在特定的观测坐标系下测得的实际风场群速度分量。

3 风场由观测坐标系到水平面坐标系的转换

以上分析是在光束扫描圆锥截面上建立的观测坐标系中求得的观测视场中风场的群速矢量分量。根据空间解析几何知识,利用 (xyz) 坐标系和水平面上建立的坐标系 $(x'y'z')$ 的数学关系,可以推导出观测视场中风场的群速度矢量在实际水平面坐标系水平和垂直水平面的方向上的分量。两个坐标系的数学关系如图 3 所示。

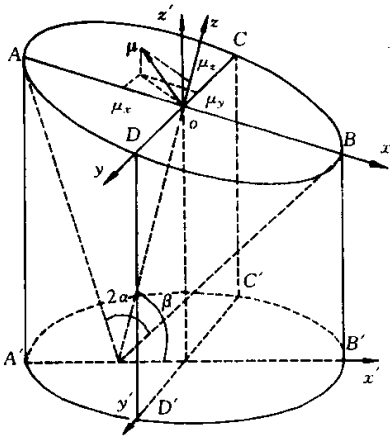


Fig. 3 The projective relation between the coordinate locating on the vertical section of scanning cone and the coordinate on the horizon

把扫描圆锥截面上的 4 个端点 (A, B, C, D) 垂直投影到水平面上的 (A', B', C', D') 4 个点,可推导出在 $x'y'z'$ 上各坐标分量 $\Lambda_x, \Lambda_y, \Lambda_z$ 同在 xyz 上的各坐标分量 μ_x, μ_y, μ_z 的关系式为:

$$\begin{aligned}\Lambda_x &= \mu_x \cos(90^\circ - \beta) + \mu_z \cos(90^\circ - \beta) = \\ &(\mu_y + \mu_z) \sin\beta, \\ \Lambda_y &= \mu_y,\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Lambda_z &= \mu_y \sin(90^\circ - \beta) + \mu_z \sin(90^\circ - \beta) = \\ &(\mu_y + \mu_z) \cos\beta.\end{aligned}$$

β 为扫描圆锥的轴与水平面的夹角,为建立方程方便,在本文中它只取正,把 μ_x, μ_y, μ_z 代入就可求出水平面上建立的坐标系的三个分量 $\Lambda_x, \Lambda_y, \Lambda_z$

$$\begin{aligned}\Lambda_x &= (\mu_x + \mu_z) \sin\beta = \\ &(V_B \sin\alpha - V_B \sin\alpha - 4\omega \cos\Omega) \sin\beta + \\ &(V_A \cos\alpha + V_B \cos\alpha + V_C \cos\alpha + V_D \cos\alpha - \\ &4\omega \sin\Omega) \sin\beta \\ \Lambda_y &= \mu_y = V_C \sin\alpha - V_D \sin\alpha, \\ \Lambda_z &= (\mu_x + \mu_z) \cos\beta = \\ &(V_A \sin\alpha - V_B \sin\alpha - 4\omega \cos\Omega) \cos\beta + \\ &(V_A \cos\alpha + V_B \cos\alpha + V_C \cos\alpha + V_D \cos\alpha - \\ &4\omega \sin\Omega) \cos\beta.\end{aligned}$$

在取得上述三个分量后,就能准确地确定观测风场的风速的水平分量和垂直分量。

以上就是激光雷达在大气风场测量中的风场矢量的反演过程。在实际过程中,一般只要求水平面上的两个分量即可。具体的方向上(如东南方向)的风场矢量的分量,可根据卫星运行的方位角另行计算得出。

结论 在激光雷达的风场测量中,有几种扫描的方法,对于不同的方法又有很多不同的数学分析过程。本文是利用单个的激光多普勒风速仪系统在对圆锥 4 点扫描求得视线方向的风场速度矢量后,进行的水平面上的风场的计算,来完成三维的大气风场的模拟。这种方法既简单,又比较可靠。对今后激光测风雷达实现三维风场的模拟有较大的意义。

参 考 文 献

- [1] Korb C L, Gentry B, Weng C. The edge technique-theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(21): 4202~4213
- [2] Gentry B, Korb C L. Edge technique for high-accuracy Doppler velocimetry. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(24): 5770~5777
- [3] Korb C L, Gentry B, Li Xingfu. Edge technique Doppler lidar wind measurements with high vertical resolution. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(24): 5976~5983
- [4] Hawley J G, Targ R, Henderson S W *et al.*. Coherent launch-site atmospheric wind sounder: Theory and experiment. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(24): 4557~4568

Beam Scanning and Inversion Method for Lidar Detecting Wind

Hu Hongwei Hu Qiquan

(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics , The Chinese Academy of Sciences , Shanghai 201800*)

(Received 17 April 2000 ; revised 17 May 2000)

Abstract : Utilizing lidar to obtain the wind velocity along the line of sight by Doppler shift and then inverting these velocity vectors to real atmosphere wind group speed is a very important purpose of laser lidar. The technique of using a conical scanning manner known as velocity azimuth display based on single laser Doppler velocimetry (LDV) system is described. The horizontal and vertical wind sections of the observed field can be obtained by spatial analytic geometry operation and analysis based on the four orthogonal points vector which located on the scanning cone's vertical section. Then inverting these vectors to the observed wind field.

Key words : laser lidar ; Doppler shift ; vector of wind