

水平大气中横向风对自适应光学系统性能的影响

张德良 姜文汉 吴旭斌

(中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

严海星 李树山

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘 要 从理论上分析了光波在水平大气中传播时传播路径上的横向风对理想补偿系统和时间带宽有限的自适应光学系统性能的影响, 得到了自适应光学系统的 Strehl 比与横向风速之间关系的解析表达式, 并据此得到了一批计算结果。这些结果表明横向风对自适应光学系统的补偿功能有很严重的影响, 随着横向风速的增大, 系统的 Strehl 比迅速降低。特别是对于一定接收口径的系统, 当横向风速超过一定的阈值后, 加了补偿的光波的成像效果比不加补偿的光波的成像效果更差。结合大气湍流的物理结构仔细分析了这种现象, 并对这种现象作出了合理的解释。

关键词 自适应光学, 大气光学, 横向风, 时间带宽。

1 引 言

自适应光学系统需要一束信标光以获取光波传播路径上的大气湍流信息, 通过波前控制和波前校正, 使光波所受的大气扰动得到补偿。由于系统存在时间延迟 Δt , 因此系统利用信标光的信息所校正的是 Δt 时刻后到达系统的光波。当传播路径上存在横向风的时候, 大气湍流被风吹动, 该光波所经历的大气湍流已与信标光所经历的大气湍流不同, 这使得系统的补偿效果变差。因此, 有必要就大气湍流中的横向风对自适应光学系统性能的影响进行探讨。Greenwood 和 Fried 在研究波前补偿系统的功率谱和带宽要求时曾涉及到横向风^[1, 2], 但结合大气湍流的物理结构对横向风如何影响自适应光学系统性能的机理分析, 目前未见报道。

本文分析了在水平大气条件下光波传播路径上横向风的作用。由于讨论的是水平大气, 已假定光波传播路径上的大气湍流结构常数相同, 横向风速也相同。这样可以使问题变得简单, 同时也不影响对横向风作用的理解。此外, 在理论推导过程中, 还采用了冻结湍流假设。

2 横向风影响的理论分析

自适应光学系统的性能通常由系统的 Strehl 比(简称为 SR)来描述, 系统的 Strehl 比与

光波波前相位结构函数 $D(\alpha)$ 存在如下关系^[3]

$$SR = \left[\frac{1}{4} \pi d_2^2 \iint d\alpha K(\alpha) \exp \left[- \frac{1}{2} D(\alpha) \right] \right]^{-1} \quad (1)$$

式中 d_2 为自适应光学系统的接收口径, α 为接收口径上任意两点之间的距离, 具有长度量纲, 函数 $K(\alpha)$ 为系统孔径函数的自卷积, 其表达式为

$$K(\alpha) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \{ \cos^{-1}(|\alpha|/d_2) - (|\alpha|/d_2) [1 - (|\alpha|/d_2)^2]^{3/2} \}, & |\alpha| \leq d_2 \\ 0 & |\alpha| > d_2 \end{cases} \quad (2)$$

假设系统的时间传递函数为 $H_t(f)$, 则在水平大气条件下经系统补偿后的剩余波前结构函数为:

$$D(\alpha) = 2.91k^2 C_n^2 L \iint df dt |1 - H_t(f)|^2 \exp(-i2\pi ft) \times \left[\frac{1}{2} |\alpha + vt|^3 + \frac{1}{2} |\alpha - vt|^3 - |vt|^3 \right] \quad (3)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$ 为光波的波数, C_n^2 为大气湍流结构常数, L 为光波传播路径长度, v 为光波传播路径上的横向风速。

以下分为无补偿、理想系统补偿和时间带宽有限的自适应光学系统补偿三个方面讨论剩余波前的结构函数以及相应的系统 Strehl 比。

2.1 无补偿

当自适应光学系统不工作时, 所处理的光波波前实际上只受到大气湍流的影响, 这时

$$H_t(f) = 0 \quad (4)$$

将(4)式代入(3)式, 可得剩余波前的相位结构函数为

$$D(\alpha) = 6.88 (|\alpha|/r_0)^3 \quad (5)$$

其中

$$r_0 = \left[\frac{2.91}{6.88} k^2 C_n^2 L \right]^{-3/5} \quad (6)$$

为大气湍流相干长度, 亦称大气湍流的 Fried 数。(5)式即为光波在大气中传播时大气湍流对光波波面的扰动引起的波前相位结构函数。对应的系统 Strehl 比为

$$SR = \left[\frac{1}{4} \pi d_2^2 \iint d\alpha K(\alpha) \exp \left[- 3.44 \left(\frac{|\alpha|}{r_0} \right)^3 \right] \right]^{-1} \quad (7)$$

图 1 为系统 Strehl 比和规范化直径 d_2/r_0 之间的关系曲线。

2.2 理想系统补偿

这里所指的理想系统是指能完全测量并拟合出信标光所包含的、由大气湍流引起的光波波前相位偏差, 但存在时间延迟 Δt 的系统。当然, 实际上在自适应光学中不可能存在这样的理想系统, 在此考察这种系统的原因是为了更好地理解系统时间延迟所带来的影响。系统的时间传递函数为

$$H_t(f) = \exp(-i2\pi f \Delta t) \quad (8)$$

将(8)式代入(3)式, 得到补偿后的剩余光波波前相位结构函数为:

$$D(\alpha) = 2S(\alpha, v \Delta t) \quad (9)$$

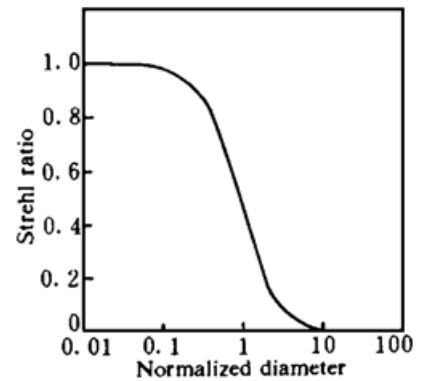


Fig. 1 Relationship between Strehl ratio of a systems and normalized diameter d_2/r_0 under open loop condition

其中

$$S(\alpha, \nu \Delta t) = 2.91k^2 C_n^2 L \left[|\alpha|^{3'} - \frac{1}{2} |\alpha + \nu \Delta t|^{3'} - \frac{1}{2} |\alpha - \nu \Delta t|^{3'} + |\nu \Delta t|^{3'} \right] \quad (10)$$

对应的系统 Strehl 比为

$$SR = \left[\frac{1}{4} \pi d_2^2 \right]^{-1} \iint d\alpha K(\alpha) \exp[-S(\alpha, \nu \Delta t)] \quad (11)$$

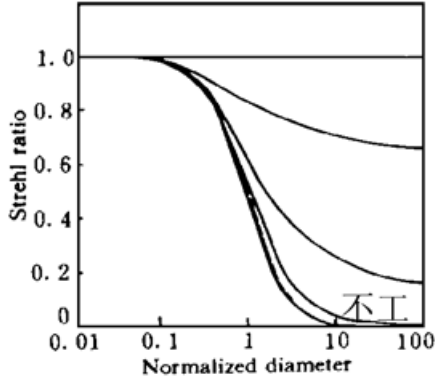


Fig. 2 Relationship between Strehl ratio of an ideal adaptive optics system and normalized diameter d_2/r_0 . $r_0 = 0.05 \text{ m}$, $\Delta t = 4.5 \text{ ms}$. The dashed line corresponds to open-loop condition, and the five solid lines correspond to $|v| = 0 \text{ m/s}$, $|v| = 2 \text{ m/s}$, $|v| = 5 \text{ m/s}$, $|v| = 10 \text{ m/s}$, $|v| = 30 \text{ m/s}$, respectively ($d_2/r_0)/(\Delta t/\tau_0) \gg 1$ 时,

图 2 给出了系统延迟时间 Δt 为 4.5 ms 时, 在不同的横向风速情况下系统的 Strehl 比与规范化直径 d_2/r_0 之间的关系曲线。

当系统的接收孔径很小, 或者系统的延迟时间很大, 即 $(d_2/r_0)/(\Delta t/\tau_0) \ll 1$ 时,

$$S(\alpha, \nu \Delta t) = 6.88 \left[\frac{|\alpha|}{r_0} \right]^{3'} \quad (12)$$

其中

$$\tau_0 = (2.91k^2 C_n^2 |\nu|^{3'} L)^{-3'} \quad (13)$$

是大气湍流的时间常数。将(12)式代入(11)式, 可得这时的系统 Strehl 比

$$SR = \left[\frac{1}{4} \pi d_2^2 \right]^{-1} \iint d\alpha K(\alpha) \exp \left[-6.88 \left[\frac{|\alpha|}{r_0} \right]^{3'} \right] \quad (14)$$

将上式与(7)式比较, 可以发现这时的波前相位结构函数是纯湍流时的波前相位结构函数的两倍, 这表明补偿后系统的 Strehl 比反而变得更小了。

当系统的接收孔径很大, 或者系统的延迟时间很小, 即

$$S(\alpha, \nu \Delta t) = (\Delta t/\tau_0)^{3'} \quad (15)$$

这时系统的 Strehl 比为

$$SR = \left[\frac{1}{4} \pi d_2^2 \right]^{-1} \iint d\alpha K(\alpha) \exp[-(\Delta t/\tau_0)^{3'}] \quad (16)$$

可以看出, 在大口径的情况下, 当系统的延迟时间 Δt 超过 τ_0 时, 系统的补偿性能将显著下降。

2.3 时间带宽有限的自适应光学系统补偿

对于时间带宽有限的自适应光学系统的时间传递函数, 可以采用如下形式

$$H(f) = \frac{\exp(-i2\pi f \Delta t)}{1 + if/f_{3\text{dB}}} \quad (17)$$

其中 $f_{3\text{dB}}$ 为系统的时间传递函数幅频特性曲线降低 3 dB 时所对应的频率。

将(17)式代入(3)式, 最后得到

$$\text{无源 } D(\alpha) = \int_0^\infty d\tau \exp(-\tau) \left[2S \left[\alpha, \nu \Delta t + \frac{0.37r_0 f_{3\text{dB}} \tau}{f_{3\text{dB}}} \mathbf{n}_v \right] - S \left[\text{环, 环} \frac{0.37r_0 f_{3\text{dB}} \tau}{f_{3\text{dB}}} \mathbf{n}_v \right] \right] \quad (18)$$

其中

$$f_{3\text{dB}} = [0.102k^2 C_n^2 L |\nu|^{3'}]^{3'} \quad (19)$$

为 Greenwood 频率, 它表征了剩余波前均方差小于 1 rad^2 时自适应光学系统需要达到的时间带宽, 而 $\mathbf{n}_v = \mathbf{v}/|\mathbf{v}|$ 为沿横向风速方向的单位矢量。对应的系统 Strehl 比为

$$SR = \left[\frac{1}{4} \pi d_2^2 \right]^{-1} \iint d\alpha K(\alpha) \times \exp \left[- \frac{1}{2} \int_0^\infty d\tau \exp(-\tau) \left| 2S \left[\alpha, \mathbf{v} \Delta t + \frac{0.37 r_0 f_G \tau}{f_{3 \text{ dB}}} \mathbf{n}_v \right] - S \left[\alpha, \frac{0.37 r_0 f_G \tau}{f_{3 \text{ dB}}} \mathbf{n}_v \right] \right|^2 \right] \quad (20)$$

图 3、图 4、图 5、图 6 给出了系统延迟时间 Δt 为 4.5 ms 时, 在不同的系统时间带宽以及不同的横向风速情况下系统的 Strehl 比与规范化直径 d_2/r_0 之间的关系曲线。

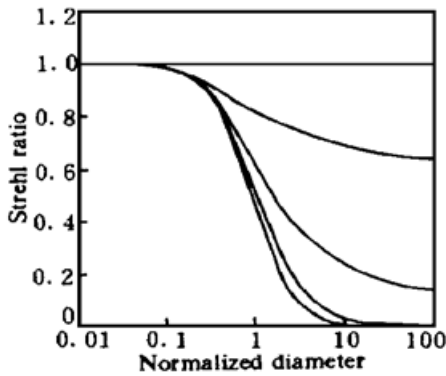


Fig. 3 Relationship between Strehl ratio of a system and normalized diameter d_2/r_0 . $f_{3 \text{ dB}} = 76.72 \text{ Hz}$. Other conditions are the same as those in fig. 2

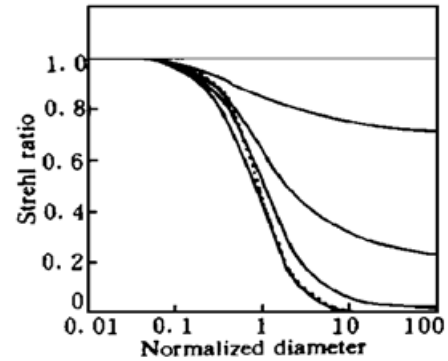


Fig. 4 Relationship between Strehl ratio of a system and normalized diameter d_2/r_0 . $f_{3 \text{ dB}} = 153.46 \text{ Hz}$. Other conditions are the same as those in fig. 2

Fig. 5 Relationship between Strehl ratio of a system and normalized diameter d_2/r_0 . $f_{3 \text{ dB}} = 306.92 \text{ Hz}$. Other conditions are the same as those in fig. 2

Fig. 6 Relationship between Strehl ratio of a system and normalized diameter d_2/r_0 . $f_{3 \text{ dB}} = 460.46 \text{ Hz}$. Other conditions are the same as those in fig. 2

3 结果分析

从图 2 到图 6 都可以看出, 横向风的影响主要体现在当系统规范化直径 $d_2/r_0 > 1$, 即系统接收口径 $d_2 > r_0$ 的时候。这是因为当 $d_2 \leq r_0$ 时, 可以认为系统接收到的光波是相干的, 它只受到波前倾斜的影响。因此, 光波波前相位分布的结构函数较小, 即使没有加自适应光学补偿, 系统的 Strehl 比也较大。而当 $d_2 > r_0$ 后, 到达系统接收口径的光波的相干性变差, 光波波前相位分布的结构函数迅速变大, 系统 Strehl 比也就迅速降低。这时候加自适应光学补偿就能有效地克服光波波前所受到的大气扰动, 使系统的 Strehl 比显著提高。

由于已假定系统的波前校正元件能完全拟合出光波波前所受到的大气扰动, 并且采用了冻结湍流假设, 因此当横向风速为零时, 加了自适应光学补偿时的系统 Strehl 比均为 1.0, 即此时系统补偿效果与系统的时间带宽无关。

在横向风速开始大于零时,从这些图可以看出,理想系统补偿的效果最好,时间带宽有限的系统补偿的效果次之,并且其补偿效果随时间带宽的减小而降低,而无补偿时的效果最差。当风速逐渐增加时,各种系统的补偿效果迅速变差,变差的程度与系统的时间带宽有关。带宽越小,补偿效果变差的程度越严重。但当风速变得很大时,补偿效果变差的程度与系统时间带宽之间的关系发生变化,带宽越大,补偿效果变差的程度越严重。在本文所研究的情况下,可以看出,在横向风速 $|\boldsymbol{v}| \geq 20 \text{ m/s}$ 以后,系统的时间带宽越大,系统的 Strehl 比越小,系统补偿效果越差。

可以根据大气湍流的物理结构解释这种现象发生的原因。因湍流由连续分布在尺度 l_0 和外尺度 L_0 之间的一系列不规则结构组成,在冻结湍流近似下,这些不规则结构及它们之间的相对位置保持不变。当光波传播路径上存在横向风的时候,这些不规则结构被风吹着沿垂直于光波传播路径的方向发生平移。在横向风速为零时,大气湍流的不规则结构不发生平移,这时波前探测元件上的信号保持稳定,信标光所经过的大气传播路径与成像用的光波所经过的大气传播路径也相同。因此,不管系统时间带宽的大小,波前探测元件总能完全测量出信标光所含的波前扰动信息,并将其加到成像用的光波波前上,故这时系统的 Strehl 比均为 1.0。当横向风速开始大于零时,大气湍流的不规则结构被风吹动,波前探测元件上的信号也因此开始不断发生变化。小尺度的不规则结构引起信号变化中的高频成分,大尺度的不规则结构引起信号变化中的低频成分。对理想系统而言,它能完全测量出这种变化的信号,但是对于时间带宽有限的系统,它只能测量出变化信号中的低频成分。时间带宽越小,它能测量出的信号的频率越低。横向风速很小时,信标光传播路径上的不规则结构在延迟时间 Δt 内只被吹动了很小的距离,这时对大气扰动的高频成分的补偿是有效的,因此理想系统的补偿效果最好,而时间带宽有限的系统在测量时丢失了信标光中的部分高频信息,故其补偿效果要差一些。时间带宽越小,测量时丢失的高频信息越多,因而补偿效果也就越差。当风速逐渐变得很大时,原来的小尺度不规则结构很快被吹离光波传播路径,同时另外的尺度相当的小尺度不规则结构被风吹到光波传播路径上,并且由这部分小尺度不规则结构引起被补偿光波所受扰动中的高频成分,因此在这个时候还利用从信标光中获得的信息对这些高频成分进行补偿不仅不必要,而且还会降低系统的补偿效果。理想系统补偿了这些高频成分,因此其补偿效果逐渐变得最差。对于时间带宽有限的系统,除补偿了波前扰动的低频成分外,它只补偿了部分高频成分,因此其补偿效果虽然也在逐渐变差,但变差的速度要缓慢一些。时间带宽越低,它所补偿的高频成分越少,其补偿效果变差的速度也越慢。因此当横向风速增大到一定程度时,理想系统的补偿效果开始变得比时间带宽高的系统还差。而当横向风速进一步增加时,时间带宽高的系统的补偿效果也逐渐变得比时间带宽低的更差。对于无补偿的情况,因为从统计上来说当湍流强度一定时,由相同的不规则结构引起的扰动都是相同的,因此光波成像的结果不受横向风的影响,始终保持不变。

从前面的理论推导以及计算结果都观察到,在有些情况下,系统的补偿效果比无补偿时要差。以图 2 给出的理想系统补偿时的结果为例,可以看出,当系统的接收口径很小时,只要横向风速 $|\boldsymbol{v}| > 0$,系统的 Strehl 比即比无补偿时的系统 Strehl 比小,而当系统的接收口径很大时,只有存在很大的横向风速,系统的 Strehl 比才会比无补偿时的系统 Strehl 比小。这是因为系统接收口径很小时,即使很小的横向风速,在延迟时间 Δt 内也能将大气湍流不规则结构吹移接收口径尺度的距离,而使补偿效果变得比无补偿时要差。但是对于很大的接收

口径, 只有存在很大的横向风速时, 才能在延迟时间 Δt 内将大气湍流不规则结构吹移接收口径尺度的距离, 使上述现象得以发生。对于这种现象, 利用(14)式也可以得到很好的理解。将(14)式和(7)式进行比较可看出, 当条件 $(d_2/r_0)/(\Delta t/\tau_0) \ll 1$ 满足时, 自适应光学补偿的效果比无补偿时差。以上条件在一定情况下可以近似为 $d_2 \ll |\mathbf{v}\Delta t|$ 。容易看出, d_2 越小, 上述条件越容易满足。 d_2 越大, 满足上述条件所需的横向风速 $|\mathbf{v}|$ 也越大。在系统接收口径 d_2 一定时, 定义系统补偿效果比无补偿差时对应的横向风速值为理想系统的阈值风速。则显然理想系统的接收口径越大, 所对应的阈值风速也越大。

对于时间带宽有限的自适应光学系统, 上述现象也一样存在。但是由于所补偿的高频成分比理想系统补偿的高频成分要少, 因此高频成分所起的反作用减弱, 在接收口径与理想系统一样的情况下, 其阈值风速变得要大一些。而且系统的时间带宽越小, 相同接收口径下所对应的阈值风速越大。

对于横向风速 $|\mathbf{v}| \leq 30 \text{ m/s}$ 的情况, 可以看出虽然存在上述现象, 但并不是很明显。在横向风速更大的时候, 也许上述现象会明显一些, 然而在实际条件下, 很少会出现那么大的横向风速。此外, 对 $d_2 \leq 0.1 r_0$ 的情况, 横向风对系统 Strehl 比的影响并不大, 而对 $d_2 > 5.0 r_0$ 的情况, 上述现象仍然存在时的系统 Strehl 比已变得很小, 失去了实际意义。因此, 可以认为上述现象只在 $0.1 r_0 \leq d_2 < 5.0 r_0$ 时存在。

从所得到的结果还可以看出, 横向风是通过系统的时间延迟而起作用的。要有效地减小横向风的影响, 必须缩短自适应光学系统的延迟时间。

结 论 本文在时间域内研究了水平传输条件下横向风对自适应光学系统补偿性能的影响。结果表明,

- 1) 横向风对自适应光学系统的补偿性能有很严重的影响, 随着横向风速的增加, 自适应光学系统的补偿性能急剧下降;
- 2) 横向风的影响与自适应光学系统的时间带宽有关。当风速较小时, 时间带宽小的系统所受的影响大, 其补偿性能下降得快。而当风速较大时, 情况发生变化, 时间带宽大的系统所受的影响大, 其补偿效果变得比时间带宽小的系统更差;
- 3) 对于接收口径一定的系统, 存在一阈值风速, 当光波传播路径上的横向风速大于阈值风速时, 系统的补偿效果变得比无补偿差。阈值风速与系统的接收口径有关, 接收口径越大, 阈值风速也越大。此外, 阈值风速与系统的时间带宽也有关, 系统的时间带宽越大, 阈值风速越小。当然, 因为实际上存在的横向风速不可能太大, 上述现象的效果并不是很明显;
- 4) 要有效地减小横向风的影响, 必须缩短自适应光学系统的延迟时间。

在完成本文的工作期间, 曾和中国科学院力学研究所的吴宝根副研究员进行了有益的讨论, 还得到了中国科学院光电研究所李新阳的帮助, 中国科学院光电研究所的荣志钧高级工程师也为本文的工作提供了很多方便, 谨在此深表谢意!

参 考 文 献

- [1] D. P. Greenwood, D. L. Fried, Power spectra requirements for wave front-compensation system. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(3): 193~ 206
- [2] D. P. Greenwood, Bandwidth specification for adaptive optics system. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, **67**(3): 390~ 392
- [3] G. A. Tyler, Turbulence-induced adaptive optics performance degradation: evaluation in the time domain. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1984, **1**(3) 251~ 262

The Influence of Transverse Wind on Performance of an Adaptive Optics System in Horizontal Atmosphere

Zhang Deliang Jiang Wenhan Wu Xubin

(*Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209*)

Yan Haixing Li Shushan

(*Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*)

(Received 19 March 1996; revised 12 August 1996)

Abstract The influences of transverse wind on the light propagation path in the horizontal atmosphere and on the performances of an ideal compensation system and an adaptive optics system with finite time bandwidth are analyzed theoretically. The analytical expression of Strehl ratio of adaptive optics system vs. the transverse wind speed has been obtained. The calculated results show that transverse wind has strong influence on the performance of an adaptive optics system. As the transverse wind speed increases, Strehl ratio of the system decreases quickly. For the adaptive optics system with certain aperture size, the image of the compensated light is worse than that of the uncompensated light while transverse wind speed exceeds a threshold value. Considering the physical structure of the atmospheric turbulence, the phenomenon has been analyzed and explained.

Key words adaptive optics, atmospheric optics, transverse wind, time bandwidth.