

## Hufnagel-Valley 湍流强度廓线的高精度实时反演方法

程 知<sup>1,2</sup>, 侯再红<sup>1</sup>, 靖 旭<sup>1</sup>, 李 菲<sup>1</sup>, 陆茜茜<sup>1,2</sup>, 于龙昆<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气成分与光学重点实验室,  
安徽 合肥 230031; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 分析了 Hufnagel-Valley 大气湍流模型参数反演的必要性, 根据实时测量的大气相干长度和等晕角, 反演该模型中的两个可调参数, 并提出了改进的反演计算公式。数值仿真结果表明, 改进公式弥补了原有公式在近地面湍流较弱时, 不能有效反演高空风速参数的不足; 适合于反演不同的湍流条件, 提高了湍流强度廓线的反演精度: 以两种典型的风速模型为例, 改进公式反演的参数, 相对误差均在 0.5% 以内; 同时改进公式也减弱了相干长度和等晕角测量误差对反演的影响。

**关键词:** 湍流强度廓线; Hufnagel-Valley 模型; 大气相干长度; 等晕角; 反演  
**中图分类号:** P427.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)06-1562-06

## High-precision and real-time inversion method of Hufnagel-Valley turbulence profile

Cheng Zhi<sup>1,2</sup>, Hou Zaihong<sup>1</sup>, Jing Xu<sup>1</sup>, Li Fei<sup>1,2</sup>, Lu Qianqian<sup>1,2</sup>, Yu Longkun<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Chinese Academy of Sciences, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The necessity to inverse the parameters of Hufnagel-Valley atmospheric turbulence model was analyzed. The two adjusted parameters were inverted according to real-time measurement of atmospheric coherence length and isoplanatic angle. Furthermore, an improved inversion equation was proposed. By numerical simulation, the results show that the improved equation covers the shortage which the original equation can't inverse the high wind parameter effectively when turbulence near the ground is weak. It is suitable for inversion of different turbulence conditions, and improves the accuracy of turbulence profile: taking two typical wind model as examples, the relative error of parameters inverted by improved equation are within 0.5%; the improved equation also weakens the influence due to measurement errors of coherence length and isoplanatic angle.

**Key words:** turbulence profile; hufnagel-valley model; atmospheric coherence length; isoplanatic angle; inversion

收稿日期: 2012-10-25; 修订日期: 2012-11-23

基金项目: 国家 863 计划

作者简介: 程知(1987-), 女, 硕士生, 主要从事大气湍流测控仪器方面的研究。Email: zhicg@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 侯再红(1968-), 男, 研究员, 博士, 主要从事光电仪器设计方面的研究。Email: zhou@aiofm.ac.cn

## 0 引言

大气湍流折射率结构常数是表征大气湍流强度的一个重要参数,它随高度变化的规律,对于研究激光大气传输、天文观测和自适应光学系统等都具有重要价值。目前,湍流廓线的垂直分布 $C_n^2(\mathbf{h})$ 已成为天文选址<sup>[1]</sup>的一个重要指标,也是现代天文观测技术中的一个重要部分。日益发展的湍流补偿技术,比如自适应光学系统中的全场补偿技术<sup>[2]</sup>,也都与湍流强度廓线有着密不可分的联系。在湍流廓线的多种测量仪器中,常用的有探空气球、闪达(SCIDAR)、星光闪烁仪、多普勒声雷达以及最近广泛应用的多孔径闪烁设备(MASS)<sup>[3]</sup>。然而,它们都有其局限性<sup>[4]</sup>,星光闪烁仪、多普勒声雷达和多孔径闪烁设备等,虽然完成一次测量所需时间较短,但空间分辨率不高;探空气球虽有较高分辨率,但是测量时间长,而且容易受高空风速的影响。

综合实时性和分辨率两方面的需求, Tyson Robert K 等人<sup>[5]</sup>针对 Hufnagel-Valley 模型,提出了一种快速反演其参数,获取湍流强度廓线的方法,并给出了反演计算式,但是没有提到该方法的反演误差,文中依据该方法,通过理论推导,建立了更加精确的反演计算式,并进行了误差分析。

## 1 Hufnagel-Valley 模型

常用的 $C_n^2(\mathbf{h})$ 模型有 PAMELA 模型、Gurvic 模型、SLC-Day 模型、Hufnagel-Valley 模型、NOAA 模型、Hufnagel 模型等。大部分模型仅与高度有关, Hufnagel-Valley 模型和 NOAA 模型不仅与高度有关,而且分别引入了两个可调参数,因此这两个模型应用较广泛、灵活。由于 NOAA 模型的两个参数是冲击湍流层厚度 L 和 Brunt-Vaisala 频率  $N^2$ , 并且该模型在一定高度处的取值表现为一个复杂的积分形式,难于反演,文中选择 Hufnagel-Valley 模型反演。

Hufnagel-Valley<sup>[5]</sup>模型包含了两个参数,其表述如下:

$$C_n^2(\mathbf{h}) = 5.94 \times 10^{-23} (W/27)^2 h^{10} e^{-h} + 2.7 \times 10^{-16} e^{-2h/3} + A e^{-10h} \quad (1)$$

其中

$$W^2 = 1/15 \int_5^{20} V^2(\mathbf{h}) d\mathbf{h} \quad (2)$$

式中: $C_n^2(\mathbf{h})$ 为湍流强度的高度分布,单位为  $m^{-2/3}$ ;  $W$  为高空风速参数,单位为  $m/s$ ;  $V(\mathbf{h})$  为风速的高度分布;  $h$  为高度,单位为  $km$ ;  $A$  对应于地面上  $C_n^2(\mathbf{h})$  的典型值,单位为  $m^{-2/3}$ 。

该模型适用于从地面到 25 km 的高度,是一个适合于中纬度的模型,得到了广泛的应用,它最大的优势是可以根据不同的湍流条件来调整  $W$  和  $A$  两个参数。由公式(2)中  $W$  的定义可知,实时获取  $W$  参数需要知道高空风速的高度分布(风速模型),但是高空风速的高度分布并不唯一,且容易变化,难于实时确定,因此选择另外一种合理有效的方法来反演  $W$  和  $A$  两个参数是很有必要的。

由于大气相干长度和等晕角在描述湍流效应时经常被用到,并且它们的最短测量时间可低至 8 s,统计平均值的获取时间可低至 30 s,测量实时性很高,因此可以借助于相干长度和等晕角来反演  $W$  和  $A$  两个参数。

## 2 反演过程

大气相干长度  $r_0$  是表征某一特定光程中一定横向间距上的大气相干性,整层  $r_0$  可表示为:

$$r_0 = \left[ 0.423k^2 \int_0^\infty C_n^2(\mathbf{h}) d\mathbf{h} \right]^{-3/5} \quad (3)$$

式中: $k$  为波数,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为波长。

等晕角  $\theta_0$  是表征通过大气湍流到达观测点的光波波前的角度相关性的特征参数,其整层  $\theta_0$  的定义为:

$$\theta_0 = \left[ 2.91k^2 \int_0^\infty C_n^2(\mathbf{h}) h^{5/3} d\mathbf{h} \right]^{-3/5} \quad (4)$$

若湍流强度符合 Hufnagel-Valley 模型,将公式(1)的  $C_n^2(\mathbf{h})$  ( $h$  化为以  $m$  为单位)代入公式(3)和(4),其中  $W$  和  $A$  与积分高度  $h$  无关,

$$r_0^{-5/3} \lambda^2 = 0.423 \times (2\pi)^2 [5.94 \times 10^{-53} \times \left(\frac{W}{27}\right)^2 \times \int_0^\infty z^{10} e^{-z/1000} dz + 2.7 \times 10^{-16} \times \int_0^\infty e^{-z/1500} dz + A \int_0^\infty e^{-z/100} dz] \quad (5)$$

$$\theta_0^{-5/3} \lambda^2 = 2.91 \times (2\pi)^2 [5.94 \times 10^{-53} \times \left(\frac{W}{27}\right)^2 \times \int_0^\infty z^{35/3} e^{-z/1000} dz + 2.7 \times 10^{-16} \times \int_0^\infty z^{5/3} e^{-z/1500} dz + A \int_0^\infty z^{5/3} e^{-z/100} dz] \quad (6)$$

对公式(5)、(6)进行化简时用到  $\Gamma$  函数为:

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} \frac{t^{z-1}}{e^t} dt \quad (7)$$

结合公式(5)、(6)、(7)可得:

$$r_0^{-5/3} \lambda^2 = 3.5998 \times 10^{-12} \times \left(\frac{W}{27}\right)^2 + 6.7632 \times 10^{-12} + 1.6699 \times 10^3 A \quad (8)$$

$$\theta_0^{-5/3} \lambda^2 = 1.4146 \times 10^{-4} \times \left(\frac{W}{27}\right)^2 + 1.3764 \times 10^{-5} + 3.7250 \times 10^7 A \quad (9)$$

用  $r_0$ 、 $\theta_0$  和  $\lambda$  来反解  $W$  和  $A$  可得:

$$W = 27 \times [7.11 \times 10^3 \theta_0^{-5/3} \lambda^2 - 1.58 \times 10^8 r_0^{-5/3} \lambda^2 - 9.67 \times 10^{-2}]^{1/2}$$

$$A = 5.99 \times 10^{-4} r_0^{-5/3} \lambda^2 - 1.53 \times 10^{-11} \theta_0^{-5/3} \lambda^2 - 3.84 \times 10^{-15} \quad (10)$$

式中:  $r_0$ 、 $\theta_0$  和  $\lambda$  单位分别为 m, rad 和 m。

由于实际测量中,  $r_0$  单位常取为 cm;  $\theta_0$  为 mrad;  $\lambda$  为 mm, 也为了与 Robert K. Tyson<sup>[5]</sup> 等人保持一致, 对公式(10)进行单位换算:

$$W = 27 \times [7.11 \theta_0^{-5/3} \lambda^2 - 0.34 r_0^{-5/3} \lambda^2 - 0.097]^{1/2}$$

$$A = 1.29 \times 10^{-12} r_0^{-5/3} \lambda^2 - 1.53 \times 10^{-13} \theta_0^{-5/3} \lambda^2 - 3.84 \times 10^{-15} \quad (11)$$

式中:  $r_0$ 、 $\theta_0$  和  $\lambda$  的单位分别为 cm, mrad 和 mm。

Robert K. Tyson<sup>[5]</sup> 等人的反演式:

$$W = 27 \times (75 \theta_0^{-5/3} \lambda^2 - 0.14)^{1/2}$$

$$A = 1.29 \times 10^{-12} r_0^{-5/3} \lambda^2 - 1.61 \times 10^{-13} \theta_0^{-5/3} \lambda^2 - 3.89 \times 10^{-15} \quad (12)$$

目前测量  $r_0$  和  $\theta_0$  的常用方法分别是差分像运动法<sup>[6]</sup>和星光闪烁法<sup>[7]</sup>。基于这两种方法研制而成的相干长度和等晕角测量仪, 可以实现  $r_0$  和  $\theta_0$  的同时测量, 将所测数据和探测波长代入公式(11)或公式(12), 便可以快速反演  $W$ 、 $A$  两个参数的值。

公式(11)与公式(12)最大的区别是公式(11)中  $W$  的反演中增加了  $r_0^{-5/3} \lambda^2$  项, 即考虑了  $r_0$  的大小影响到风速参数  $W$  的反演。下节将要通过数值仿真验证公式(11)有更高的精度和更广泛的适用范围。

### 3 数值计算

为比较公式(11)、(12)的优劣, 最理想的方法是在符合 Hufnagel-Valley 湍流模型的地区, 实时测量当地的大气相干长度和等晕角, 将两组公式反演出的湍流廓线与其他方法(比如探空气球)测得的湍流廓线进行比较, 最接近实测廓线的那组公式应该更为准确。

由于高空湍流强度  $C_n^2(h)$  的对比数据仍不充分, 文

中借助于数值仿真来予以说明。仿真时公式(1)中的高度  $h$  以 m(米)为单位, 选取的积分步长为 0.01 m, 积分下限为 0m, 积分上限为 25000m, 取波长为 0.5mm。

#### 3.1 不同风速模型的反演

仿真分别设定了高空风速模型满足 Bufton 风速模型<sup>[8]</sup>:

$$V(h) = 5 + 30 \exp[-[(h-9.4)/4.8]^2] \quad (13)$$

或者 Hughes Research laboratories 提出的风速模型<sup>[9]</sup>:

$$V(h) = 3 + 17 \exp[-[(h-12.5)/4]^2] \quad (14)$$

将公式(13)和(14)代入公式(2)得到  $W$  理论值分别为 22.9 m/s 和 12.3 m/s。结合不同地区实测的近地面湍流强度<sup>[10]</sup>,  $A$  的理论值选取为  $10^{-15} \sim 10^{-13} m^{-2/3}$ , 采用相对误差来衡量反演值与理论值的偏离程度。

由图 1 可知, 对于 Bufton 风速模型, 由公式(11)反演的  $W$  和  $A$  均与理论值非常接近, 并且其反演误差受近地面湍流强度的影响很小; 由公式(12)反演的  $W$ , 随着近地面湍流的增强, 其误差越来越大, 而  $A$  的反演误差却表现为近地面湍流越弱, 误差越大。

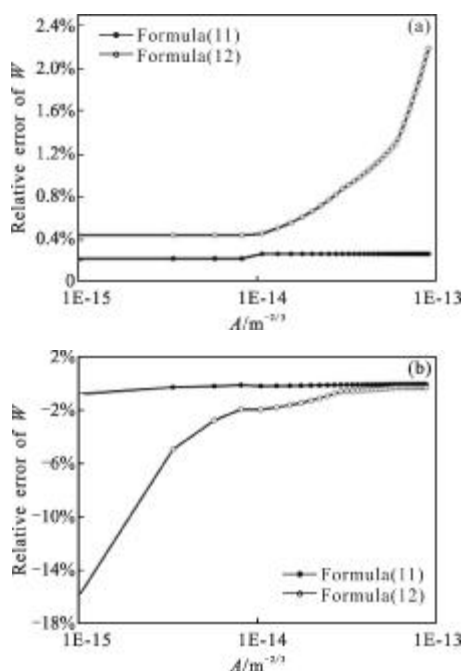


图 1 Bufton 风速模型下反演的  $W$  和  $A$  相对误差

Fig.1 Relative errors of  $W$  and  $A$  inverted in the Bufton wind model

图 2 为 Hughes Research laboratories 风速模型下反演出的  $W$  和  $A$  误差。由图 2 可得, 由公式(11)反演得到的  $W$  误差和  $A$  误差均不超过 0.5%, 而对于公式(12), 在近地面湍流较弱时,  $W$  和  $A$  的反演误差较

大,并且反演值均比理论值小,只有在近地面湍流很强时,误差才较小。

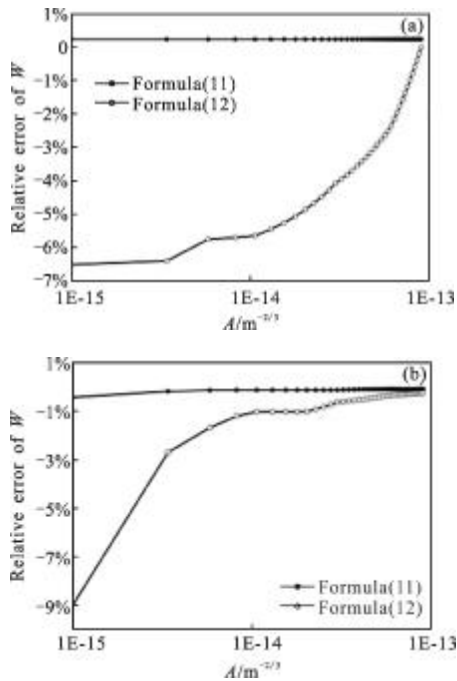


图 2 Hughes Research laboratories 风速模型下反演的  $W$  和  $A$  相对误差

Fig.2 Relative errors of  $W$  and  $A$  inverted in the Hughes Research laboratories wind model

综合分析图1和图2,对于不同的风速模型和近地面湍流状况,公式(11)反演的  $W$  和  $A$  两个参数值均与理论值偏离较小;而由公式(12)反演的两个参数,其误差却有很大的变化,只有在特定的湍流状况下,反演精度才比较高,从而表明公式(11)的适用范围更广泛。

前面已提到根据高空风速模型获得  $W$  有一定的局限性,并且依据现有的风速高度模型只能得到一部分  $W$  值,为了得到更大范围的  $W$  取值,下节将要通过  $r_0$  和  $\theta_0$  来反演  $W$  和  $A$ 。

### 3.2 不同 $r_0$ 和 $\theta_0$ 的反演

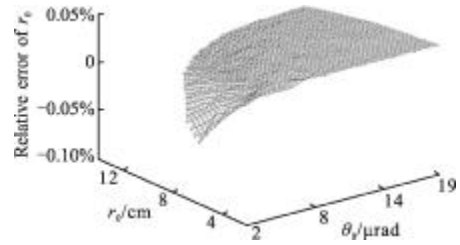
当波长为  $0.5\text{ mm}$  时,结合公式(11)、(12)均要求  $W$ 、 $A$  大于零,并保证两组公式在相同的自变量取值范围内比较,仿真时选取的  $r_0$  变化范围为  $2\sim 14\text{ cm}$ ,  $\theta_0$  为  $2\sim 19\text{ mrad}$ 。

#### 3.2.1 $r_0$ 和 $\theta_0$ 的计算误差

此节的仿真具体分为以下几步:(1) 根据设定的  $r_0$  和  $\theta_0$  反演  $W$  和  $A$ ; (2) 将  $W$  和  $A$  代入  $C_n^2(h)$  进行积分得到  $r_0$  和  $\theta_0$ ; (3) 计算  $r_0$  和  $\theta_0$  的积分值与设定值

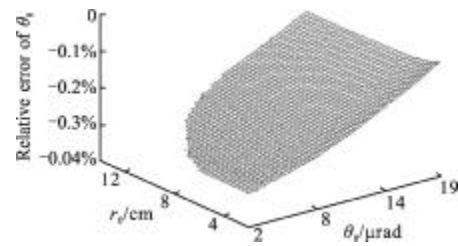
的相对误差;(4) 在考虑计算误差的前提下,由(3)得到的相对误差若接近于零,则认为  $W$  和  $A$  的反演值接近真实值,反之则认为反演值偏离真实值较大。

图 3 是不同反演公式对应的相干长度误差和等



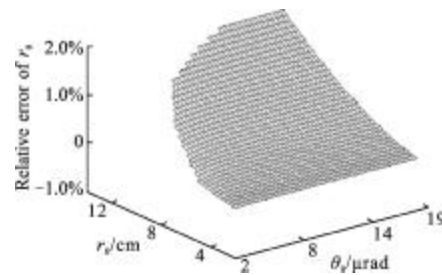
(a) 由公式(11)计算的相干长度误差

(a) Relative error of coherence length caculated from formula(11)



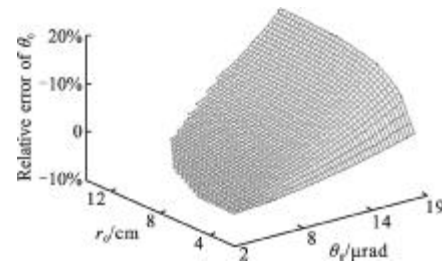
(b) 由公式(11)计算的等晕角误差

(b) Relative error of isoplanatic angle caculated from formula(11)



(c) 由公式(12)计算的相干长度误差

(c) Relative error of coherence length caculated from formula(12)



(d) 由公式(12)计算的等晕角误差

(d) Relative error of isoplanatic angle caculated from formula(12)

图 3 相干长度相对误差和等晕角相对误差与等晕角和相干长度的关系

Fig.3 Relative errors of coherence length and isoplanatic angle vs isoplanatic angle and coherence length

晕角误差随等晕角和相干长度的变化曲面。由图(a)、(b)可得,对于不同的  $r_0$  和  $\theta_0$  取值,由公式(11)反演的相干长度误差和等晕角误差均较小,即公式(11)能较好地反演不同的湍流状况。从图(c)、(d)可以看出,在  $r_0$  取较大值时,由公式(12)反演的相干长度误差较大;在  $\theta_0$  取较大值时,等晕角误差较大。从图(d)可得,在  $r_0$  和  $\theta_0$  均接近最大值时,等晕角误差最大。由于高空湍流对等晕角影响较大,近地面湍流对相干长度影响较大,因此这一结果这与 3.1 节中  $W$  较小,  $A$  较小时,  $W$  反演误差较大的结果一致。

3.2.2 测量误差引起的反演误差

由于实际测量中  $r_0$  或  $\theta_0$  总存在一定误差,此节采用以下仿真方法:假定仿真中选取的  $r_0$  和  $\theta_0$  与理论值存在一定的误差,利用公式(11)和公式(12)分别计算由此导致的  $W$  和  $A$  的误差,对于相同的相干长度和等晕角误差,计算出的  $W$  和  $A$  误差越小,则反演效果越好。

结合全微分在误差分析中的应用,  $W$  和  $A$  的相对误差可以表示为(式中下标 1、2 分别对应公式(11)和公式(12)):

$$\delta_1 = \frac{\Delta W_1}{W_1} \cdot \frac{1215}{2W_1^2} \left[ -71.1\theta_0^{-5/3} \lambda^2 \frac{\Delta\theta_0}{\theta_0} + 0.34r_0^{-5/3} \lambda^2 \frac{\Delta r_0}{r_0} \right]$$

$$\eta_1 = \frac{\Delta A_1}{A_1} \cdot \frac{5}{3A_1} \left[ 1.53 \times 10^{-13} \theta_0^{-5/3} \lambda^2 \frac{\Delta\theta_0}{\theta_0} - 1.29 \times 10^{-12} r_0^{-5/3} \lambda^2 \frac{\Delta r_0}{r_0} \right] \quad (15)$$

$$\delta_2 = \frac{\Delta W_2}{W_2} \cdot \frac{1215}{2W_2^2} \left[ -75\theta_0^{-5/3} \lambda^2 \frac{\Delta\theta_0}{\theta_0} \right]$$

$$\eta_2 = \frac{\Delta A_2}{A_2} \cdot \frac{5}{3A_2} \left[ 1.61 \times 10^{-13} \theta_0^{-5/3} \lambda^2 \frac{\Delta\theta_0}{\theta_0} - 1.29 \times 10^{-12} r_0^{-5/3} \lambda^2 \frac{\Delta r_0}{r_0} \right] \quad (16)$$

从公式(15) (16)可得,若单独讨论  $\Delta\theta/\theta_0$  或  $\Delta r_0/r_0$  对  $\delta_1$ 、 $\eta_1$ 、 $\delta_2$ 、 $\eta_2$  的影响,需要先对  $r_0$ 、 $\theta_0$  和  $\lambda$  作相关设定,再分析  $\Delta\theta/\theta_0$  或  $\Delta r_0/r_0$  不同取值对  $W$  和  $A$  误差的影响。限于文章篇幅,此节不作深入的讨论,仅定性地比较两反演式的优劣,因此文中采取相对误差的比值,即相干长度和等晕角的测量误差对两反演式的相对影响来进行讨论。

由于  $r_0$  误差对公式(16)中  $W$  的误差无影响,故只考虑  $\theta_0$  误差对  $W$  误差之比  $\delta_1/\delta_2$  的影响,计算  $\eta_1/\eta_2$

并化简可得:

$$\frac{\delta_1}{\delta_2} = \frac{71.1W_2^2}{75W_1^2} \cdot \frac{71.1(75\theta_0^{-5/3} \lambda^2 - 0.14)}{75(71.1\theta_0^{-5/3} \lambda^2 - 0.34r_0^{-5/3} \lambda^2 - 0.097)} \quad (17)$$

$r_0$  误差或  $\theta_0$  误差对  $A$  误差之比  $\eta_1/\eta_2$  的影响:

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{A_2}{A_1} \times \frac{\Delta A_1}{\Delta A_2} \cdot \frac{A_2}{A_1} \times \left( \frac{1.53 \times 10^{-13} \theta_0^{-5/3} \lambda^2 \frac{\Delta\theta_0}{\theta_0} - 1.29 \times 10^{-12} r_0^{-5/3} \lambda^2 \frac{\Delta r_0}{r_0}}{1.61 \times 10^{-13} \theta_0^{-5/3} \lambda^2 \frac{\Delta\theta_0}{\theta_0} - 1.29 \times 10^{-12} r_0^{-5/3} \lambda^2 \frac{\Delta r_0}{r_0}} \right) \quad (18)$$

对于公式(17),从公式本身不易直接看出  $\eta_1/\eta_2$  的取值,仍取  $r_0$  为 2~14 cm,  $\theta_0$  为 2~19 mrad,  $\lambda$  为 0.5 mm 进行仿真。结果如图 4 所示,由图可以看出,  $\delta_1/\delta_2$  始终小于 1,随着等晕角的增加,比值越来越小,即两反演式的  $W$  误差,取值差别越来越大,从而反映出公式(11)反演的  $W$ ,在等晕角较大时,其优势更为明显,这一结果与前面仿真结果一致。

对于公式(18),由于  $A_2/A_1 < 1$  且  $\Delta A_1/\Delta A_2 < 1$ ,故对于  $\Delta r_0/r_0$  或  $\Delta\theta_0/\theta_0$  的任意值,公式(11)的反演误差始终小于公式(12)。

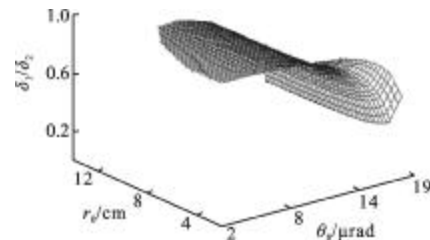


图 4  $\Delta r_0/r_0=0$  且  $\Delta\theta_0/\theta_0 \neq 0$  时,  $\delta_1/\delta_2$  随  $r_0$  和  $\theta_0$  的变化关系  
Fig.4  $\delta_1/\delta_2$  vs isoplanatic angle and coherence length with  $\Delta r_0/r_0=0$  and  $\Delta\theta_0/\theta_0 \neq 0$

3.3 仿真结果分析

从仿真结果来看,  $r_0^{-5/3} \lambda^2$  项的存在对  $W$  的反演有很大影响,主要原因如下:从物理含义上,该项表明了高空湍流对  $r_0$  的影响。近地面湍流对  $r_0$  贡献较大,但高空湍流对  $r_0$  也有贡献。结合图 2(a)、图 3(d)可得,在近地面湍流较弱时,高空湍流对  $r_0$  的贡献不能忽略,而原有公式却没有体现这一物理现象。同时,从图 1(b)、图 2(b)、图 3(c)看出,在近地面湍流较弱时,文中提出的  $A$  反演式,更接近于真实的湍流状况,而原反演式  $A$  所得到的湍流强度比真实值小,反演误差较大。

## 4 结 论

利用大气相干长度和等晕角反演 Hufnagel-Valley 模型中的两个参数, 解决了高空风速模型难以确定的问题, 并且这种方法获得的湍流强度廓线实时性高。文中所建立的反演计算式相对于原有反演计算式, 在四个方面有较大改进:(1) 考虑了高空湍流对  $r_0$  的贡献, 尤其是近地面湍流很弱时, 高空湍流对  $r_0$  的影响较大;(2) 极大地提高了风速参数  $W$  的反演精度, 也提高了近地面湍流较弱时  $A$  的反演精度, 从而提高了反演廓线的精度;(3) 当  $r_0$  和  $\theta_0$  存在测量误差时, 对  $W$  和  $A$  的反演影响较小;(4) 适用于更大范围的  $r_0$  和  $\theta_0$ 。当波长为 0.5 mm 时, 公式(12)要求等晕角不超过 19 mrad, 而公式(11)中的等晕角取值无这样的限制。

文中只研究了 Hufnagel-Valley 模型中参数反演的数值仿真结果, 下一步研究的重点是开展相关的实验对比工作, 进行对比实验的可行性分析以及测量结果的论证等。同时对文中的这种反演思路进行扩展, 探讨该方法用于反演其他带参数湍流模型的适用性。

### 参考文献:

- [1] Tokovinin A, Kornilov V, Shatsky N, et al. Restoration of turbulence profile from scintillation indices [J]. Not R Astron Soc, 2003, 343: 891-899.
- [2] Yu Hao, Huang Linhai, Huang Lixin, et al. Experiment of full field compensation with two-deformable mirrors adaptive optics system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(8): 1542-1546. (in Chinese)  
余浩, 黄林海, 黄立新, 等. 双变形镜自适应光学系统全场补偿实验验证[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(8): 1542-1546.
- [3] Ni Zhibo, Huang Honghua, Huang Yinbo, et al. Atmospheric turbulence profile measurement techniques based on scintillation method [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(1): 160-165. (in Chinese)  
倪志波, 黄宏华, 黄印博, 等. 基于闪烁法的大气湍流廓线测量技术[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(1): 160-165.
- [4] Beland R R. Propagation through atmospheric optical turbulence [M]//The Infrared and Electro Optical Systems Handbook. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1993.
- [5] Tyson R K. Adaptive optics and ground-to-space laser communications [J]. Appl Opt, 1993, 35(19): 3640-3646.
- [6] Jing Xu, Hou Zaihong, Qin Lai'an, et al. Measurement of whole layer atmospheric coherence length by observing stars in daytime [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(7): 1352-1355. (in Chinese)  
靖旭, 侯再红, 秦来安, 等. 白天观测恒星测量整层大气相干长度[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1352-1355.
- [7] Walters D L, Bradford L W. Measurements of  $r_0$  and  $\theta_0$ : two decades and 18 sites [J]. Appl Opt, 1997, 36(30): 7876-7886.
- [8] Su Yi, Wan Min. High Energy Laser System [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 131-132. (in Chinese)  
苏毅, 万敏. 高能激光系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 131-132.
- [9] Li Xiaofeng. The Principle and Technology of the Satellite-to-ground Laser Communication Links[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007: 129-130. (in Chinese)  
李晓峰. 星地激光通信链路原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 129-130.
- [10] Sun Gang, Weng Ningqun, Xiao Liming, et al. Profile and character of atmospheric constants of refractive index[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(4): 485-490. (in Chinese)  
孙刚, 翁宁泉, 肖黎明, 等. 不同地区大气折射率结构常数分布特性及分析 [J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(4): 485-490.