

文章编号: 1007 4619(2006) 05 0651-05

大气折射对航空 CCD 成像精度影响的研究

卫 征^{1,2}, 胡方超^{1,2}, 张 兵¹

(1. 遥感科学国家重点实验室, 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101; 2 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘 要: 大气折射是造成遥感影像像点位移的原因之一。对于传统的航空胶片摄影, 大气折射造成的影响常被忽略不计。本文分析了被常见遥感书籍广泛引用的遥感影像大气折射改正模型, 指出了该模型存在的问题, 给出了新的解算方案。通过数据模拟, 本文得出了大气折射对于航空数字遥感影像的影响不容忽略的结论。

关键词: 航空数字遥感; 大气折射; 影像变形

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A

The Influence of Atmospheric Refraction on Aerial Digital Remote Sensing

WEI Zheng^{1,2}, HU Fang-chao^{1,2}, ZHANG Bing¹

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The atmospheric refraction is a main cause to remote sensing image distortion. For traditional film photography, the influence of this is often ignored. But after analyzing the atmosphere correction model which is referenced widely by remote sensing teaching material, the paper points out the problems to the model and promote new resolving scheme. Through data simulating, the thesis proves that atmospheric refraction is not a neglected factor in aerial digital remote sensing images.

Key words aerial digital remote sensing; atmosphere refraction; image distortion

1 引 言

对于遥感影像, 无论是航空遥感还是航天遥感, 都是通过搭载于一定遥感平台上的传感器对地观测, 获取相应的地面数据。这些获取的数据实际上都是电磁波信息或地表反射光信息。大气对地表反射光的折射率受到多种大气物理参数的影响。总体而言, 由于大气的密度随离地面距离的增加而减少, 电磁波的大气折射率即随大气层高度的变化而变化。地面物体发射的电磁波通过大气层时会发生连续的折射, 导致传播路径由理想的直线变成了

曲线, 从而引起遥感传感器成像面上的像点的位移。

对于传统的航空胶片摄影测量, 大气折射造成的影响被视为是微小的, 一般都忽略不计, 人们往往更关注倾斜摄影、平台外方位元素、地表起伏等导致影像变形的因素。通过本文的分析发现, 对于航空数字遥感影像而言, 大气折射是一项不容忽视的重要影响, 而且通常遥感资料引用的大气折射模型也存在一定的问题。

2 大气折射导致影像变形的模型

对于遥感的中心投影图像, 大气折射偏差的原

收稿日期: 2006-04-10 修订日期: 2006-05-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 40571113), 中国科学院百人计划项目 (编号: KZCX0415), 国家教育部留学回国人员科研启动基金重点项目 (编号: HX040013), 国防科学技术工业委员会项目 (编号: KJSX0401)。

作者简介: 卫 征 (1978—), 男, 博士研究生。现就读于中国科学院遥感应用研究所地图学与地理信息系统专业。主要研究方向为遥感图像处理与高光谱遥感应用。

理光路图如图 1 所示。显然,地物成像点的位置取决于其入射光线的方向。假设像平面坐标系以航向为 x 轴,以旁向(垂直航线方向)为 y 轴,以面阵 CCD 的中心点为原点。在图 1 中,假定有地面任意点 A 在遥感器成像面上的理想成像点为 a_0 ;由于大气折射,实际成像点为 a_1 ,则大气折射引起的该点偏移为 a_1a_0 。假设遥感器的焦距为 f 投影中心为 S , o 点为其成像面上的主点位置(理想)。令 a_1 点到 o 点的距离为 r 像点偏移 $a_1a_0 = \Delta r$; 令地物点的实际光路离开地面时的出射角和折光角差分别为 α 和 β 实际光路进入相机系统的入射角为 α_H 折光角差为 β_H 。根据图 1 显示的几何关系,从 a_0 点向对应 a_1 点的入射光路作垂线,令垂足为 a_2 ,则有

$$\Delta r = a_0a_2 \cdot \sec\alpha_H$$

$$a_0a_2 = f \cdot \sin\beta_H / \cos(\alpha_H - \beta_H)$$

由于 $\beta_H \rightarrow 0$ 可得 $\Delta r = f \cdot \beta_H / \cos^2\alpha_H = f \cdot (1 + \tan^2\alpha) \cdot \beta_H$ 。

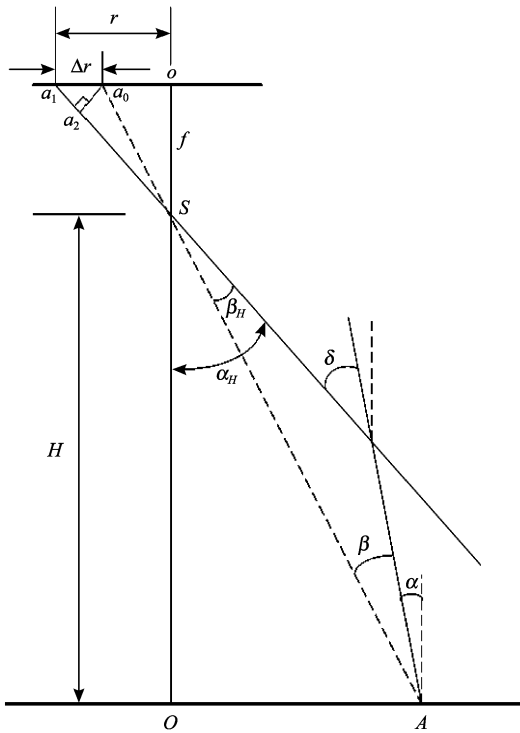


图 1 大气折射造成的影像位移

Fig 1 Image offset caused by atmosphere refraction

根据直角 $\triangle Soa_1$ 中 $\tan\alpha_H = r/f$ 折射定理 $\sin\alpha_H = n \sin\alpha / n_H$ (假设地面和航摄处的大气折射率分别为 n 和 n_H) 和近似关系 $\beta_H \approx \beta = n_H / n$ 可以得到:

$$\beta_H = \frac{n_H}{n + n_H} \cdot \delta = \frac{n_H (n - n_H)}{n (n + n_H)} \tan\alpha_H \quad (1)$$

从而,可以得到中心投影影像受大气折射影响的通用改正模型。

$$\Delta r = \frac{n_H (n - n_H)}{n (n + n_H)} \cdot \left\{ r \left[1 + \frac{r^2}{f^2} \right] \right. \\ \left. = K \left[r + \frac{r^3}{f^2} \right] \right. \quad (2)$$

上式用坐标表达就是:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= -K \left(x + \frac{x^3}{f^2} \right) \\ \Delta y &= -K \left(y + \frac{y^3}{f^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

3 系数 K 的计算模型及讨论

从上节推导的大气折射改正模型可见,系数 K 是一个与遥感平台航高 H , 乃至地面点高程有关的大气条件常数。据式 (2) 可知

$$K = n_H (n - n_H) / n (n + n_H)$$

目前,在常见的涉及遥感原理、方法的专业书籍中,关于系数 K 的表达,都是引用 Bertram 博士在 1966 年根据 1959 年的 ARDC 大气模型导出的 K 的表达式^[1,2]:

$$K = \frac{2410H}{H^2 - 6H + 250} - \frac{2410H}{h^2 - 6h + 250} \cdot \frac{h}{H} \quad (4)$$

式中, H 和 h 以 km 为单位。如果式 (4) 正确,就可以确定 K 值,进而估算不同航高的遥感影像受大气折射的影响。本文以面阵为 $4k \times 4k$ 的 CCD 数码相机垂直摄影为例进行概算,分析影像最边缘点的像移情况。CCD 探测单元为 $9\mu m$, 则最边缘点距 CCD 中心的距离为 $r_{max} = 9\mu m \times 4096 / 2 = 18.432mm$ 。相机采用 80mm 镜头,令拍摄地面点的高程都为 0。这时,式 (4) 简化为

$$K = 2410H / (H^2 - 6H + 250)$$

结合 (2) 式,解算可以得到表 1 所示数据。

由表 1 可见,根据式 (4) 计算出来的 K 值过大,

表 1 基于传统 K 系数模型的概算试验

Table 1 Budgetary estimation basing on tradition model of coefficient K

航高 h	500	1000	2000	3000	4000	5000	9000
K	4.874	9.837	19.917	30	39.835	49.1837	78.303
$\Delta r / mm$	94.599	190.935	386.605	582.313	773.210	954.677	1519.901

由此解得的大气折射偏移相对 CCD 尺寸, 乃至传统的航摄相片都极不相称。考虑到实际航空作业时 $n_H \rightarrow n$, 因此可以认为, 通行遥感教材给出的 K 值经验公式存在问题。经查阅相关文献^[3], 发现实际 K

值的计算公式为:

$$K = \left[\frac{2410H}{H^2 - 6H + 250} - \frac{2410H}{h^2 - 6h + 250} \cdot \frac{h}{H} \right] \times 10^{-6} \quad (5)$$

根据式 (5) 进行概算的结果见表 2

表 2 基于传统 K 系数模型的概算试验

Table 2 Budgetary estimation basing on tradition model of coefficient K

航高 h	500	1000	2000	3000	4000	5000	9000
K	4.8736E-06	9.8367E-06	1.9917E-05	3E-05	3.9835E-05	4.9184E-05	7.8303E-05
$\Delta r / \text{mm}$	9.4599E-05	1.9094E-04	3.8660E-04	5.8231E-04	7.7321E-04	9.5468E-04	1.5199E-03
偏移 / pixel	0.0105	0.0212	0.0430	0.0647	0.0859	0.1061	0.1689

为了进行比较, 本文根据大气物理学原理, 推导有关大气折射率的精确计算公式, 构建新的 K 值模型。由大气物理学可知, 空气折射率的理论推导公式为^[4]:

$$(n - 1) \times 10^6 = A \frac{p}{T} \cdot \left(1 + \frac{B}{T} \cdot \frac{e}{p} \right) \quad (6)$$

式中, p 为气压 (hPa), e 为水汽压 (hPa), T 为温度 (K)。令 $\lambda (\mu\text{m})$ 为入射光波长, 对于可见光 (0.4—0.7 μm), A, B 值有:

$$A = 77.5 \left[1 + \frac{5.15 \times 10^{-3}}{\lambda^2} + \frac{1.07 \times 10^{-4}}{\lambda^4} \right] \quad (\text{K hPa}),$$

$$B \approx -0.12T.$$

根据大气压高公式, 可知对于标准大气 (静止的、充分混合的、干的理想气体), 在大气层高 11km

以内有压强公式:

$$p = 1013.250 \times (1 - 2.26 \times 10^{-5} H)^{5.26}$$

综合上述分析, 由式 (6) 计算出 n 值, 就可以推算出 K 值。

4 大气折射对航空 CCD 图像的影响评价

对于航空数字遥感, 假设在干空气 ($e=0$)、273K 气温和 0.589 μm (λ , 人眼最敏感的黄绿光) 条件下进行垂直摄影, 则可以计算出 $A = 78.71937887 \text{K hPa}$ 地表的空气折射率 $n = 1.000293$ 。由此, 可以得到表 3 所列的概算数据。

表 3 根据改进系数 K 模型的概算

Table 3 Budgetary estimation based on modified model of coefficient K

航高 h	500	1000	2000	3000	4000	5000	9000
p	954.4563	898.4566	794.4305	700.3812	615.5594	539.2558	306.3660
n_H	1.000275	1.000259	1.000229	1.000202	1.000177	1.000155	1.000088
K	8.889E-06	1.696E-05	3.195E-05	4.551E-05	5.773E-05	6.873E-05	0.000102
$\Delta r / \text{mm}$	0.00017	0.00033	0.00062	0.00088	0.00112	0.00133	0.00199
偏移 / pixel	0.019	0.037	0.069	0.098	0.125	0.148	0.221

比较表 3 和表 2 可见, 根据改进的系数 K 模型进行的计算是合理的。而且表中数据表明, 大气折射随航高的增加, 造成的影像偏移逐步增大; 当航高超过 3000m 时, 大气折射对最远点的偏移量相对 CCD 探测单元 (9 μm) 已经超过 0.1 个 pixel 这就要考虑误差累积造成的影响。

为了进一步考察普遍状况, 以图 2 所示的光路图分析面阵 CCD 倾斜摄影时大气折射的影响。

比较图 1 和图 2 显示的成像模态, 可以认为倾斜摄影相当于增加了图 1 中 r 的长度, 即由于相机固定的旁向倾角, 使得相对投影中心垂直地面的光线与 CCD 的交点落在 CCD 外侧, 线段 aa_0 是大气折

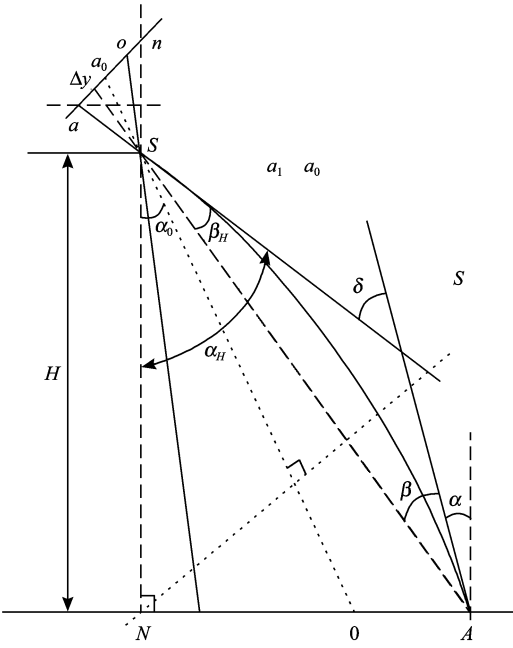


图 2 大气折射对倾斜摄影的影响

Fig 2 The influence of atmosphere refraction to incline photography

射造成的偏移。假设相机倾角为 α_0 ，焦距为 f 则对 y 方向有：

$$\begin{aligned} \Delta y &= ao - a_0o \\ &= f \frac{\tan^2(\alpha_H - \alpha_0) + 1}{\tan(\alpha_H - \alpha_0) + 1 / \tan \beta_H} \end{aligned} \quad (7)$$

同时，根据三角形几何关系有：

$$\tan \alpha_H = \frac{f \sin \alpha_0 - y \cos \alpha_0}{f \cos \alpha_0 + y \sin \alpha_0} \quad (8)$$

$$\tan(\alpha_H - \alpha_0) = \frac{r \cos \alpha_0 - f \sin \alpha_0}{f \cos \alpha_0} = -y / f \quad (9)$$

将式 (8) 代入式 (1)，并考虑到 $\beta_H \rightarrow 0$ 则有：

$$\tan \beta_H \approx \beta_H = K \cdot \frac{f \sin \alpha_0 - y \cos \alpha_0}{f \cos \alpha_0 + y \sin \alpha_0} \quad (10)$$

将式 (8)，(9) 和 (10) 代入式 (7)，有

$$\Delta y = \frac{f^2 + y^2}{-y + \frac{f}{K} \cdot \frac{f + y \tan \alpha_0}{f \tan \alpha_0 - y}} \quad (11)$$

对于 x 方向，其实相当于中心投影的垂直摄影，只是对于 x 方向的每一行影像，对应到投影中心 S 的垂直距离不同，即每行影像都有各自的 f 取值。因而，对 x 方向的任意行影像，根据图 2 显示的几何关系可知：

$$f_x = f \cos \alpha_0 + y \sin \alpha_0$$

代入式 (3) 有：

$$\Delta x = K \left[x + \frac{x^3}{(f \cos \alpha_0 + y \sin \alpha_0)^2} \right] \quad (12)$$

式 (11) 和 (12) 就是倾斜摄影状态下，大气折射在 x 和 y 方向上的影响模型。令摄影倾斜 $\alpha = 23^\circ$ ， $f = 80\text{mm}$ ， $y = -18.432\text{mm}$ ， $x = 18.432\text{mm}$ ，其他参数与表 1 和表 2 相同，则可以得到表 4 所示的数据。

表 4 大气折射对倾斜影像的偏移影响

Table 4 Influence of atmosphere refraction for incline photography

航高 h m	500	1000	2000	3000	4000	5000	9000
p	954.456	898.457	794.430	700.381	615.559	539.256	306.366
n	1.000275	1.000259	1.000229	1.0002024	1.000177	1.000155	1.000088
K	8.889E-06	1.696E-05	3.195E-05	4.551E-05	5.773E-05	6.873E-05	0.0001023
Δx /mm	0.000176	0.000337	0.000634	0.000903	0.001146	0.001364	0.002031
Δy /mm	0.000544	0.001037	0.001954	0.002783	0.003530	0.004203	0.006255
均方 /mm	0.000572	0.001090	0.002054	0.002925	0.003712	0.004419	0.006576
偏移 /pixel	0.063	0.121	0.228	0.325	0.412	0.491	0.731

从表 4 可见，对于倾角较大的航空数字中心摄影（常常是多角度摄影），大气折射带来的影像偏移是较大的。在 1000m 航高时像移影响就超过 0.1 个 pixel 这需要进行必要的校正。对表中像移方向进行分析可知，大气折射造成了地物成像相对像平面主点的扩散，

因此在改正时，像点坐标都要向着主点收敛。

本文认为，大气折射之所以对航空面阵 CCD 成像产生异于传统胶片摄影的较大影响，主要原因是 CCD 的成像面积只相当于胶片成像面积的 10^{-2} 量级。比如本文试验用的 $4k \times 4k$ 的大面阵 CCD 芯

片,边长为 38.864mm;与常用的 $23\text{cm} \times 23\text{cm}$ 标准航空摄影胶片相比,成像面积相差近 40 倍。因此,尽管大气折射造成的偏移影响是微米级的,但相对于 CCD 同样微米级的探测单元却是不容忽视的。而且,如果 CCD 探测单元的精度提高(如从 $9\mu\text{m}$ 提高到 $4\mu\text{m}$),这种影响显然会加剧。

5 结 论

本文分析了通行遥感教材常用的大气折射引起影像变形的模型,通过概算指出了公式引用存在的问题,并订正了错误。在此基础上,本文引入大气物理学理论,给出关于系数 K 的新公式,并推导出对于航空面阵 CCD 任意倾角摄影时受大气折射影响的模型。而后,通过概算试验,本文证明对于航空数

字遥感,大气折射造成的像点偏移不容忽视;尤其对多角度的航空数字遥感系统,大气折射造成的偏差必须进行相应的校正。

参 考 文 献 (References)

- [1] Jin W X, Yang X H, *et al*. Photogrammetry [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003. [金为铄, 杨先宏等. 摄影测量学 [M]. 湖北: 武汉大学出版社, 2003.]
- [2] Sun J B, Su N, Guan Z Q. Principles, Methods and Applications of Remote Sensing [M]. Beijing: Survey Press, 1997. [孙家柄, 舒宁, 关泽群. 遥感原理、方法和应用 [M]. 北京: 测绘出版社, 1997.]
- [3] Bertram S. Atmospheric Refraction [J]. *Photogrammetric Engineering*, 1966, 32(1): 76-84.
- [4] Xun S Z. Foundation of Aerophysics [M]. Beijing: Meteorological Press, 1993. [许绍祖. 大气物理学基础 [M]. 北京: 气象出版社, 1993.]