

水体遥感的镜面反射特性研究*

季耿善 杨 静 傅 江

(江苏省环境科学研究所 南京 210029)

陈 玉 泉

(江苏省农业科学院现代化研究所 南京 210014)

摘 要 本研究提出了引起水体镜面反射的太阳高度角范围,编制了我国和世界各地进行水体遥感的适宜时间表。从而为水体和其它平面遥感的最佳实施提供了依据,具有直接的经济和科学意义。

关键词 水体,镜面反射,世界时间表

水体遥感包括水质、水深、温度、浮游物、水生生物和洪涝灾害等。水体出现镜面反射时,反射能量剧增,严重影响摄影或扫描结果,尤其是以水色、灰度特征为基础的水质遥感,如果对遥感(或航摄)时间、太阳高度、太阳方位与航向等相互关系缺乏周全的设计,将会导致水体遥感的失败。因此能否避开镜面反射,使遥感影像能正确地反映水质的光学特性差异,是水体遥感的重要技术关键。

1 镜面反射特性及研究方法

一切物体的反射均遵循反射定律:入射光线、法线、反射光线位于同一平面内,且入射角与反射角相等。因此,光滑的表面形成镜面反射;粗糙表面因有很多个反射面及各点法线方向不同而形成漫反射。灰板是根据不同灰度设计的漫反射面,是本实验用作光谱测定时的标准板。

水面(尤其是静水面)可以被近似地看作光滑的表面,当强光源入射时,在其与入射角对称的反射线方向上形成强烈的反射(仍为平行光),这就是水体的镜面反射。当有风浪时,近似光滑的水面形成倾角而造成耀斑,或在浪的顶端形成闪光点,这也是水体镜面反射造成的。

表面相对平滑的反射面,如黄土坡或建筑物平面,也可产生类似的强反射。

水体镜面反射问题谈论得很多,具体试验报道很少。V.A. Fass 认为^[1],太阳越接近天顶就会有越多的镜面反射光进入摄影透镜。在他的研究中,出现镜面反射的太阳高度角的确定是以水的波浪倾角为基础的。他提出:太阳高度角 $h_0 = 90^\circ - 2\alpha - \rho$ 时会出现

* 国家测绘局测绘科学研究所杨可、汪永贵等同志在航空摄影和资料方面曾给本研究以很大的帮助,谨此致谢。

收稿日期:1993年4月6日;收到修改稿日期:1994年1月26日

镜面反射,并假设水波的高度与长度比为 10:1,得出 $\alpha = 18.5^\circ$,而太阳连同光晕宽度 ρ 为 2° 。根据上式 $h_0 = 90^\circ - 37^\circ - 2^\circ = 51^\circ$,故建议对水体航摄应在 $20^\circ - 50^\circ$ 太阳高度角范围内进行。B.Я. 米哈依洛夫^[2]在阐述水底物体航空摄影有关太阳高度角问题时,在 V. A. Fass 公式的基础上增加了一个 β 角,即航摄机光轴对铅垂线的斜角,提出在普通波浪下允许太阳高度角为 51.3° 。但他又认为:“在水面没有波浪时,实际上可以在任何太阳高度角时进行”,显然,这个结论是不正确的。R. N. Colwee^[3],在他的书中也引用了 V. A. Fass 公式。

1983 年我国天津-渤海湾地区遥感提出过有关视像角的公式:

$$h_0 = 90^\circ - \operatorname{arctg} \frac{L(1-P)}{2f}$$

式中, L 为像幅宽度, P 为最小重叠率, f 为相机焦距。

林有才^[4]“为了在航摄中主动控制航空像片上的阴影大小”,根据航摄规范中有关太阳高度角与阴影倍数的规定,编制了“太阳位置和航摄时间图表”。这是一种以控制阴影大小来确定航摄时间的方法,为航空摄影提供了有价值的资料。

本研究是以防止水体或水平浅色地物的镜面反射为依据,确定太阳高度角的范围和航摄时间的方法。

作者认为,计算出现镜面反射的太阳高度角应依次计算以下参数:(1)航摄时间的太阳高度角(h_0)。当航摄时的太阳高度角加上视像角达到 90° 时,水体在像片上呈白色。(2)航摄机 1/2 视场角(β),以保证像片边缘不出现镜面反射。(3)波浪的倾角(α),随风的大小而定,一般小于 20° 。由波浪引起的镜面反射在像片上出现耀斑或闪光点。(4)太阳及其光晕的宽度角(ρ)。

以上 4 个参数相加若不小于 90° ($h_0 + \alpha + \beta + \rho \geq 90^\circ$),即会出现镜面反射。但后两个参数一般较难精确计算。作者认为水体遥感应晴天无云、风浪小时进行(不超过 5 级风)。本实验是在一般气象条件下,用直接测量的方法,研究不同太阳高度时水体反射率的变化。

选择一年中太阳高度角最大的夏季,在南京玄武湖公园动物园西南湖中心,以木桩固定测船,对同一水体目标点测定日出至日落间的水体光谱反射率。

试验日(1989 年 6 月 2 日)天气晴朗(下午多云),风小浪平,偏南风 4 级左右,该域水深 2m 水色淡绿带灰,透明度 29cm(塞氏奇盘法)。试验自北京时间 7 时至 14 时(夏时制 8:00—15:00),每隔 1 小时或半小时测量一组光谱反射率。除模拟航空航天遥感对水体反射率进行垂直测量外,还对准东、南、西各方向分别用 $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 角(仪器测量方向线与水面的垂线的夹角)测量水体的反射率变化,以研究不同方向、不同测角在不同太阳高度和方位情况下镜面反射特性及其与航摄角、航片判读的关系。

测量仪器用(美) EXOTECH 100BX 波段式光谱仪,带有自记记录仪(POLYCOR-DER),选用陆地卫星 $TM_1(0.45-0.52 \mu\text{m})$, $TM_2(0.52-0.60 \mu\text{m})$, $TM_3(0.63-0.69 \mu\text{m})$, $TM_4(0.76-0.90 \mu\text{m})$ 4 个通道。标准板(灰板)的绝对反射率为 0.34 左右 ($\rho_{T1} = 0.3329$, $\rho_{T2} = 0.3432$, $\rho_{T3} = 0.3460$, $\rho_{T4} = 0.3455$)。每个点的测量都重复进行 4 次,测量前后各测一次标准板,4 个通道共给出 24 个原始数据。根据这些数据依次算出各波段 4 次重复的

均值、相对值(水体均值/灰板均值 $\times 100\%$)和反射率(相对值 \times 灰板的绝对反射率)。完成一个点的测量后又在测船四周各方向分别进行 3—4 点的重复测量,故每次测量的反射率数据,实际上是 12—16 次重复(72—96 个原始数据)的平均值。

与光谱测试的同时,还对天顶光和水体(分别按垂直、 30° 、 60°)进行照度(勒克司)测量。照度计用国产 JD-1 型,测量误差不大于满刻度的 $\pm 5\%$,标定光源色温 2856K(CLE 规定标准 A 光源)。

2 实验结果与讨论

2.1 太阳高度角和方位角

南京地理纬度(ϕ)是北纬 32° ,根据天文年历,南京 1989 年 6 月 2 日的太阳赤纬角 δ 为 $22^\circ 10'$ 。用 $\sin h_0 = \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos t$ 公式(式中 t 由时间化算为度,一小时等于 15°),求得 6 月 2 日日出至日没间不同的太阳高度角(h_0);再按 $\sin A = \cos \delta \cdot \sin t / \cos h_0$ 公式,求出试验日太阳方位角(A)的变化。

太阳高度角为测点和太阳连线与地平面的夹角。1989 年 6 月 2 日南京正午时的太阳高度角为 $80^\circ 10'$,日没日出时的太阳高度为 0° ,正午达最大值,上下午对称。一年中太阳的高度角随季节而变化,夏至日南京正午时太阳高度角为 $81^\circ 26'$,冬至日正午时为 $34^\circ 34'$ 。

太阳方位角是太阳光线在地平面上的投影线与地平面正南(或正北)的夹角。在一天内太阳方位角上下午对称,并随纬度和季节而变化。南京在 6 月初日出时太阳位置为北偏东 27° 。正午时抵达正南。

2.2 水体镜面反射试验的主要结果

玄武湖是受污染的水域,水体反射率在 TM 可见光波段和近红外波段,平均值为 2.6%。其中绿波段(TM_2)的反射率较高(3.4%左右),蓝波段(TM_1)为 2.9%左右,此特征与水色偏绿有关。

太阳光线自一定高度和方向投向湖面。根据反射定律,太阳高度角越大,太阳光线的入射角和反射角越小,这就有越多的反射光投向位于天顶方向航摄机镜头内,日出日没时太阳高度角最小,反射角大,不会出现镜面反射。因此,天顶方向的镜面反射主要与太阳高度角有关,其它方向的镜面反射还与太阳方位角有关。镜面反射强度与天气条件、大气厚度、透明度和季节有关。

从表 1 可以看出,上午 10 时前各次测量几乎没有镜面反射,反射率非常接近(晨 7 时因准备测船在湖边测量,水体受岸边水泥建筑物影响,反射测量结果偏高)。上午 10 时的太阳高度角为 62° ,水体反射能量比 8 和 9 时增加 19%,11 时则增加 371%,为正常反射率的 4.71 倍,出现强烈的镜面反射。11 时至 13 时,因太阳高度角太大,在垂直测量的视场角内,标准板和水体中均出现仪器投影,达 1/3 左右,测量结果虽为正常水体反射率的 2.5—3 倍以上,却不能如实反映更为强烈的镜面反射。但这种干扰并不影响在正午时的镜面反射应达到最大值的事实。14 时的太阳高度角应与 10 时相同,均为 62° ,但测量结果与正常反射率一致,似乎没有镜面反射,这是因为 14 时天气已转为多云,天顶照度降低

表 1 不同太阳高度和方位时水体反射率与照度的变化

Table 1 Water reflectance and illuminance of different azimuth and solar altitude angle

时 间 (北京时)	水体反射率(%)					太阳位置		照 度 (lx)	
	TM ₁	TM ₂	TM ₃	TM	平均	高度角	方位角	天顶	水体
7.00	2.06	4.02	2.09	3.14	3.03	24°	75°	—	—
8.00	1.90	3.47	2.45	2.72	2.64	36°	80°	64 000	5 400
9.00	1.96	3.31	2.44	2.69	2.60	49°	85°	64 000	5 766
10.00	2.86	4.79	2.17	2.91	3.11	62°	90°	93 000	5 833
11.00	13.73	12.41	11.81	11.35	12.33	74°	120°	103 000	7 667
11.30	5.10	9.56	8.24	9.41	8.08	79°	145°	84 000	6 850
12.00	6.14	8.82	5.34	9.45	7.44	80°10	180°	—	—
13.00	4.46	6.37	4.44	6.13	5.35	74°	240°	92 000	6 225
14.00	2.05	3.00	2.52	2.61	2.55	62°	270°	52 000	4 325

近 50%，加上深色船体对被测水体的影响，因此测量结果略低。

从试验结果可以确定，太阳高度角 $>60^\circ$ 时会出现镜面反射，这个结论与前述用理论方法计算的结果一致。

2.3 不同方向和测角的水体反射率

在不同方向和不同角度测量水体的反射率有助于进一步了解水体及镜面反射率特点。实验每隔 1 小时按东、南、西、北各方向而每个方向又分别按 0° (垂直水面)， 30° 、 45° 、 60° 4 个角度测量照度及水体反射率 (TM_{1,2,3,4} 与平均值)，计算了每次测量的相对比值 (30° 、 45° 、 60° 反射率分别与归一化基准 0° 反射率之比)。

归纳实测数据(略)可看出以下特征。

(1) 在垂直测量不发生镜面反射时，不论对准哪个方向，水体反射强度一般都随测量角加大而增加。

(2) 在垂直测量出现强烈镜面反射时，不同方向和其它各测角的水体反射率均比垂直测量时小。如 11 时出现较强的镜面反射，但各测角的反射率比垂直测量时减少 2—9 倍(负值)。各方向与 0° 时的反射率相比依次为 E (0.4—0.6 倍) $>$ S (0.3—0.4 倍) $>$ W (0.2 倍左右)。

(3) 在垂直测量无镜面反射时，各测角的镜面反射在各方向上的总趋势是迎光方向的反射最强，侧光方向次之，顺光即出射方向最小。如试验中，上午 8 时 12 分对太阳方向测量水体时， 45° 角的反射率为正常水体的 13.43 倍， 60° 时达 22.02 倍。但上午 9 时向顺光方向即向西方测量时，各测角中的反射率的最高值也不超过 1.78 倍。

(4) 镜面反射与各测角的关系与反射定律一致，即当测试时的太阳高度角与测角相加越接近 90° ，反射率越强。如迎光方向测试时的太阳高度角为 36° ，此时 60° 测角的反射率是正常水体反射率的 22 倍，而 30° 测角仅为 2.6 倍。上午 10 时太阳高度角为 62° ，垂直测量时水体开始出现镜面反射 (增加 19%)。但 30° 测角的反射率比 45° 和 60° 角高，为正常水体反射率的 4 倍多。

(5) TM 各波段的变化规律如下：

有镜面反射时, 各波段平均反射率接近。如 11 时垂直测量的反射率依次为 $TM_1(13.73) > TM_2(12.41) > TM_3(11.81) > TM_4(11.35)$ 。此时原反射率最低的 TM_1 能量增加最多, 原反射率最高的 TM_2 增加最少, 与正常水体反射率次序 $TM_2 > TM_4 > TM_3 > TM_1$ 正好相反。

垂直测量无镜面反射时, 各波段的各测角反射率虽随角度加大而增高, 但仍都是 $TM_2 > TM_4 > TM_3 > TM_1$, 保持着水色的主要特征。迎光方向的 45° 和 60° 角有强烈的镜面反射时, 其反射率变为 $TM_4 > TM_3 > TM_2 > TM_1$, 这种变化与被相迎的太阳中有较多的红色光有关。

照度应是光源所张立体角的积分。由于太阳距离很远, 在实用中仍把它作为点光源看待。试验中垂直向上测得的照度为天顶光照度, 它反映大气光照之变化。在晴朗的夏日, 随太阳高度不断升高, 天顶光照度由早晨的 $6 \times 10^4 lx$, 到 11 时达 $6 \times 10^5 lx$ 以上。照度既是被测面的辐射通量, 故一般也随水体反射率增加而变大, 在方向上也有迎光照度 $>$ 侧光 $>$ 顺光的规律。

2.4 水体镜面反射研究的遥感意义

2.4.1 正确确定水面遥感(或航摄)时间

通常认为, 中午太阳位置最高, 为防止镜面反射, 应避免航摄, 这个概念是不精确的。运河航摄时间是 11 月中旬, 即使在中午时太阳高度角也 $< 40^\circ$, 不会出现镜面反射。从色温、阴影、色调、层次考虑, 只有在中午摄影才能获得高质量的航空像片。事实证明, 大多数中午摄影的航空像片质量好, 少部分过早或过迟摄影者则不理想。

表 2 我国各地正午时的太阳高度角

Table 2 Solar altitude angle of all over China at high noon

北纬	1月5日	2月4日	3月6日	4月5日	5月6日	6月6日	7月7日	8月8日	9月8日	10月8日	11月8日	12月7日
0°	$67^\circ 24'$	$73^\circ 40'$	$84^\circ 05'$	$95^\circ 55'$	$106^\circ 22'$	$112^\circ 36'$	$112^\circ 36'$	$106^\circ 20'$	$95^\circ 55'$	$84^\circ 05'$	$73^\circ 40'$	$67^\circ 24'$
10°	$57^\circ 24'$	$63^\circ 40'$	$74^\circ 05'$	85°	96°	102°	102°	96°	85°	74°	63°	57°
20°	$47^\circ 24'$	$53^\circ 40'$	$64^\circ 05'$	75°	86°	92°	92°	86°	75°	64°	53°	47°
30°	$37^\circ 24'$	$43^\circ 40'$	$54^\circ 05'$	65°	76°	82°	82°	76°	65°	54°	43°	37°
40°	$27^\circ 24'$	$33^\circ 40'$	$44^\circ 05'$	55°	66°	72°	72°	66°	55°	44°	33°	27°
50°	$17^\circ 24'$	$23^\circ 40'$	$34^\circ 05'$	45°	56°	62°	62°	56°	45°	34°	23°	17°
60°	$7^\circ 24'$	$13^\circ 40'$	$24^\circ 05'$	35°	46°	52°	52°	46°	35°	24°	13°	7°

因此, 根据本研究提出的镜面反射太阳高度角范围和编制的适宜进行水体遥感的时间表(表 2 和 3), 可以制定正确的航摄计划。这不仅具有直接经济效益, 而且也是获得高质量水体遥感成果的基础。

表 3 纬度 30° 时的太阳高度角和适宜水体遥感的时间 (当地时间)

Table 3 The solar altitude angle and world-wide time suitable for water remote sensing at latitude 30°

北 纬		南 纬													
A	12月21日	6.00	6.30	7.00	7.30	8.00	8.30	9.00	9.30	10.00	10.30	11.00	11.30	12.00	M
B	12月5日 1月5日	18.00	17.30	17.00	16.30	16.00	15.30	15.00	14.30	14.00	13.30	13.00	12.30	12.00	L
C	11月20日 1月20日			4	12	17	21	25	29	32	35	36	37		K
D	11月4日 2月5日			5	12	17	22	26	30	33	36	37	37		J
E	10月20日 2月20日			6	13	19	24	28	33	35	38	39	40		I
F	10月5日 3月7日			3	10	16	21	27	32	36	39	42	43	44	H
G	9月20日 3月22日			7	13	19	25	30	35	40	44	47	48	49	G
H	9月5日 4月6日			4	10	16	22	28	35	40	45	48	52	53	F
I	8月20日 4月22日			7	13	20	26	32	38	44	49	53	57	59	E
J	8月5日 5月7日			3	10	16	23	29	35	42	47	53	58	63	D
K	7月21日 5月22日			6	12	19	25	32	38	45	51	57	62	67	C
L	7月6日 6月6日			8	15	21	27	34	40	47	53	59	65	71	B
M	6 21日			10	16	23	29	35	42	49	55	61	67	73	A
				11	18	24	30	36	43	49	56	62	68	74	
				11	18	24	30	36	43	50	56	63	69	75	

其它浅色水平自然地物(尤其是冰、雪等)和人造地物也会有过强的反射光进入摄影镜头。原则上这些地物的摄影要求也与水体一样应考虑避免镜面反射。但要避免具有不同角度的黄土坡面的强反射,则要根据黄土坡的坡向和坡度加以设计。

此外,水体遥感的气象条件是要避免风浪(尤要避免出现浪花)和多云天气(积云等会在水中形成倒影)。

2.4.2 摄影镜头焦距和视场角大小的选择

水体遥感要求尽可能选用焦距较长、视场角较小的摄影镜头,以保证像片各部分色调均匀一致和像点位移小;用短焦宽角摄影时,几何尺寸变异较大,像片边缘容易出现镜面反射。1960年用较宽视角镜头拍摄的南京航空像片,同一水体在视场角不同位置(相邻航空像片)的镜面反射差异反映得非常清楚。

另一方面,焦距过长会增加航高,降低航空像片清晰度,故水体遥感视场角的选择还需与比例尺、航高等因素综合考虑。

2.4.3 航线设计中航向与太阳方位的关系

主要应避免迎着太阳或背光飞行。因为到达水面的太阳光线可看成是平行光线,即使像片范围内水体无镜面反射,但沿航线一侧视角范围外的部分水体反射也会对镜头产生影响,部分镜面反射光也会在镜头下方的大气层中通过。为避免这种影响,航摄机应沿着航线方向与太阳方向形成的一个合适的角度飞行。河流越宽偏转角度应越大,具体可按下式计算确定:

$$\operatorname{tg} A = \frac{\text{河流宽度(m)}}{0.23\text{m} \times \text{比例尺}}$$

在湖泊与海洋中,这种影响是难免的,可在镜头上设置滤光和遮光等附加装置。

2.4.4 航空像片判读

一般理论概念认为,航空像片是中心投影,航空像片边缘的地物因大气层厚度或光距增加,反照率将减弱。本研究的试验结果正与此相反(见水体不同测角的反射率变化),水体反射率越接近像片(或视场角)边缘越比星下点(像主点)高,而且像片各方向边缘部分的反射强度也各不相同,即:迎光的像片边缘>侧光>顺光,还有 TM 各波段在有无反镜面反射情况下的变化特点和不同时间太阳光谱成分对 TM 波段的影响等。这些特点为水体遥感航空像片判读提供了依据,并且要求相邻航空像片应有足够的重叠度,以保证像片有效部分判读的一致性。重叠度的大小应随焦距长短而有差异,一般应不小于 30%。

3 我国及世界各地适宜进行水体遥感的时间

我国疆土辽阔,共跨越纬度近 50°,太阳高度及方位差异较大。依据本研究结果,编制出了适宜我国和世界各地进行水体遥感的时间表,可为水体遥感的最佳实施提供保证。

表 2 中折线上部是正午时出现镜面反射的范围,折线下部正午时不出现镜面反射。根据此表可确定全国各地宜在正午时进行航摄的月份。表 3 为世界各地的太阳高度角和适宜进行遥感的时间范围。因篇幅所限,仅列出 30°表,略去了 0°,10°,20°,40°,50°,60°,70°,80°,90°的数据。

据表,我国南宁、广州、海南岛等地一年中有 5 个月(4—8月)上午 10 时至下午 2 时不宜进行水体航摄,但 1—3 月和 10—12 共 6 个月正午时都可航摄;沈阳、北京、呼和浩特、乌鲁木齐等 6 月份的 10—14 时和 5、7 两个月的 10:30—13:30 时应避免航摄。我国其它地区和世界各地适宜水体遥感的时间都可按当地的地理纬度依据表 3 作出安排。南极洲位于南纬 64—90° 地区,以冰雪覆盖为主,和北冰洋一样,反射很强烈。南、北极 90° 地区,一年中有半年(南极 10 月到次年 3 月上旬,北极 4 月到 9 月上旬)昼夜均有太阳,但太阳高度角低,北极遥感可考虑在 6—7 月,南极在 12 月和 1 月进行(太阳高度角 $>20^\circ$)。南纬和北纬 80° 地区,一年中适宜遥感的时间各约 3 个月左右。70° 地区约 5 个月左右。

参 考 文 献

- [1] V. A. Fass, "On the possibility of Water-bed Detection on Aerial Photographs, and Other Application of Aerial Surveying in Hydrology" Tr, NLLA, "Works of the Scientific Research Institute, 1944.
- [2] B. Я. 米哈依洛夫(北京测绘学院译), 摄影学与空中摄影学, 北京: 测绘出版社, 1960.
- [3] R. N. Colwell (周卡等译), 像片判译手册, 北京: 中国工业出版社, 1960.
- [4] 林友才, 太阳位置和航摄时间图表, 西安: 西安地图出版社, 1989.

A Study of Remote Sensing on Water Body Mirror Reflection

Ji Gengshan Yang Jing Fu Jiang

(*Jiangsu Institute of Environmental Science*)

Cheng Yuquan

(*Institute of Modernization, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences*)

Abstract In this research, we presented the following results: The range of solar altitude angle leading to the water body planar mirror reflection; The world-wide time table suitable for water remote sensing. This research is a guarantee for the optimum implementations of remote sensing for water and other planes, with direct scientific and economic significance.

Key words Water body, Mirror reflection, The world-wide time table