

56-68

p228

海洋卫星资料的地理定位及 相关几何参数算法研究*

潘德炉 毛天明 李淑菁

(国家海洋局第二海洋研究所, 杭州)

摘要 卫星原始遥感图像的应用都需要几何校正, 即对遥感图像中的每个像元点都必须进行地理经纬度的定位、太阳及扫描仪的高度角和方位角的计算。通常由已知足够数量的地面控制点或近似的插值法来实现。对于广阔的海洋, 很难找到地面控制点, 因此以卫星的轨道参数和扫描仪的视场角等参数为基础, 研究一套较完整的地理定位法和相关的几何参数法, 大大地简化了现有几何校正的方法。经过美国海岸带水色扫描仪资料 (CZCS)、甚高分辨率辐射计 (AVHRR) 和我国风云一号气象卫星资料 (FY-1B) 反演验证和局部区域的实际地面点对比表明, 地理定位精度——纬度 RMS 为 0.0001° , 经度 RMS 为 0.0005° , 太阳的高度角和方位角的 RMS 为 0.0007° , 完全可以满足气象和海洋等环境卫星及陆地资源卫星 MSS 等资料几何精校正的要求, 同时可作为 TMT 和 SPOT 的粗几何校正。该算法不仅适用于升轨的卫星, 而且也适用于降轨的卫星, 同时还适用于前、后向倾斜和垂直等三种扫描状态的图像。

关键词 ^{数据} 卫星扫描资料, 遥感图像, 地理定位

海洋, 几何参数

前言

极轨遥感卫星在几百公里高空按一定轨道飞行, 星载扫描仪所得到的扫描资料是一幅幅射值的数字矩阵图像。图像中的每一像元相当于地面确定的地理目标, 通常用地理经纬度来描述。某些环境和资源卫星的原始资料没有相应的地理定位值, 即使有 (如 NOAA 的 AVHRR 资料), 在每行 2048 个像元中, 也只有 50 个相间隔的像元定位点。目前用于地理定位的方法通常有两种: (1) 采用地面控制点, 用最小二乘方逼近定位; (2) 采用插值法近似逼近。前者每幅图像需要一定量的地面控制点, 其缺点是在远离海岸带的大洋很难找到足够多的已知地面控制点, 因而降低定位精度, 有时根本找不到地理控制点, 无法定位。后者采用插值法, 无

本文于 1995-09-05 收到, 修改稿于 1996-03-13 收到。

* 国家自然科学基金和国家航天办资助项目。

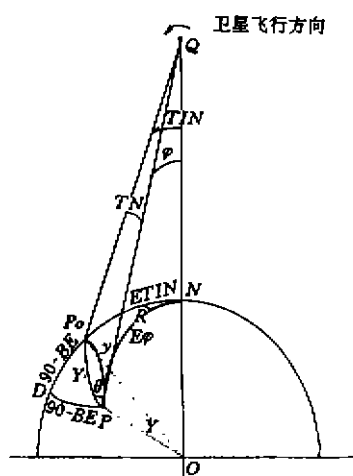


图6 卫星飞行方向和在地球
球面上的方位角

$$C = \arccos[\cos(TI/2)\cos 45 + \sin(TI/2)\sin 45\cos T], \quad (11)$$

式中, TI 为扫描倾斜角, 通常由扫描仪技术参数来定; T 由式 (7) 求得.

图6中的 TT 是轨道平面和入射-反射平面间的夹角, 可以通过球面三角 AOX 余弦定理求得

$$TT = \arcsin\left(\frac{\sin T \sin 45}{\sin C}\right). \quad (12)$$

图5中的 TN 是扫描角, 可以通过球面三角 PEX 用正弦定律求得

$$TN = \arcsin[\sin(2C)\sin TT]. \quad (13)$$

图5中的 TIN (图7和8) 是扫描行中像元点 P 在轨道方面的倾角投影, 可通过图5中球面三角 PEX 求得

$$TIN = TI + DT_1 + \arcsin \frac{\cos(2C)}{\cos TN}, \quad (14)$$

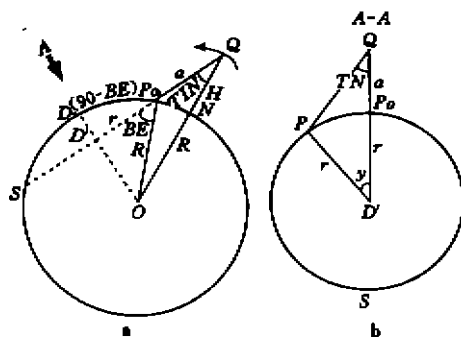


图7

- a. 卫星飞行轨道平面与地球球面的截面
- b. 扫描仪扫描平面与地球球面的截面

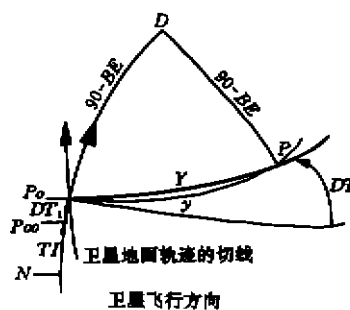


图8 像元相对于扫描行中心点在卫星飞行方向
球面剪切立体角 DT 的示意图

球坐标 Y 可以通过扫描平面 PQP_0 与地球球面的截面——以 D' 为圆心、 r 为半径的圆平面中的圆弧 y 来求得, 如图7所示. 由图7可知, 在圆截面中的圆弧 y 即 PP_0 为

$$y = \arcsin(ARl \sin TN) - TN, \quad (15)$$

式中,

$$ARl = \frac{a+r}{r} = HRl \frac{\cos TIN}{\cos BE}, \quad (16)$$

$$BE = \arcsin(HRl \sin TIN), \quad (17)$$

然后可以从 y 中求得球坐标 Y :

$$Y = 2\arcsin[\cos BE \arcsin(y/2)]. \quad (18)$$

斜倾扫描时的计算公式.

1.3 升轨和降轨情况下的定位

卫星飞行轨道分为升轨与降轨两种. 为了补偿地球自转的位移, 从东北到西南的降轨, 如 AVHRR、FY-1B、SeaWiFS, 或从东南到西北的升轨, 如 CZCS.

在1.1和1.2节已对升轨情况作了讨论, 就地理定位原理和计算算法而论, 无论升轨还是降轨都一样, 只要在1.1和1.2节所讨论的公式中, 把有关轨道倾斜角 AKL 变为 $180 - AKL$, 卫星飞行的角速度 V , 取负号, 就适用于降轨情况下的地理定位.

2 图像的地理定位过程

在上节算法的推导中, 作了两个假设: (1) 已知图像中心点的地理坐标; (2) 卫星飞行方向角保持不变, 即用图像中心点的卫星飞行方向角代替所有图像行的中心点的卫星飞行方向.

但在实际图像处理中, 不一定已知图像中心点的地理坐标. 另外, 卫星飞行方向实际上随着纬度的变化而变化, 这就影响以上算法的精度. 为此, 作整幅图像地理定位时, 在处理过程中有必要改进某些计算和确定处理过程, 以能满足在已知图像中任一点时就能实现高精度定位. 整幅图像地理定位计算过程如下:

(1) 在所要处理的图像中, 根据先验知识, 找到任一已知点或轨道报的降交点或升交点作为地理定位参考点, 它的图像坐标为 $(X_{i,ref}, Y_{i,ref})$, 而该像元的地理坐标为 (GB_{ref}, GL_{ref}) .

(2) 把 $X_{i,ref}$ 这一行作为一个像幅看待, 用1.2节所述的算法计算该参考点像元所在行的中心像元点的地理坐标 $(GB_{m,ref}, GL_{m,ref})$ 和参考行的飞行方向角为 AL_{ref} .

(3) 以参考行的中心像元点作为像幅中心点, 计算相邻行的中心像元点地理坐标 $(GB_m[X_{i,ref}+1], GL_m[X_{i,ref}+1])$ 和卫星的飞行方向 $AL(X_{i,ref}+1)$, 然后运用以上所得结果推算下一个相邻行的中心像元 $GB_m[X_{i,ref}+2], GL_m[X_{i,ref}+2]$ 和 $AL[X_{i,ref}+2]$. 按此类推计算, 得到整幅图像的每一行中心像元的地理坐标和飞行方向, 即 $GB_m[X_i], GL_m[X_i]$ 和 $AL[X_i]$.

(4) 以每行中心像元为基础, 推算每行每一像元的地理坐标, 即由 $GB_m[X_i], GL_m[X_i]$ 和 $AL[X_i]$ 推算得到 $GB[X_i, Y_i]$ 和 $GL[X_i, Y_i]$.

以上算法和计算过程的主要误差来自第二步, 因为通常只知道参考点的地理坐标, 而不知道卫星相对该点的所在行的中心点的飞行方向. 为了减少这一误差, 在第二步计算中采用逐步逼近法, 即以 GB_{ref} 和 GL_{ref} 为基础推算 $GB_{m,ref}, GL_{m,ref}$ 和 AL_{ref} , 然后以 $GB_{m,ref}, GL_{m,ref}$ 和 AL_{ref} 倒推算出参考点 $[X_{i,ref}, Y_{i,ref}]$ 的地理坐标 $[GB'_{ref}, GL'_{ref}]$. 比较已知的 (GB_{ref}, GL_{ref}) , 根据两者偏差 ΔGB_{ref} 和 ΔGL_{ref} , 取中间插值法得到 $GB_{ref}(1)$ 和 $GL_{ref}(1)$. 再以 $GB_{ref}(1)$ 和 $GL_{ref}(1)$ 为基础重算 $GB_m(1), GL_m(1)$ 和 $AL(1)$, 以 $GB_m(1), GL(1)$ 和 $AL(1)$ 倒推计算 $GB_{m,ref}(2)$ 和 $GL_{ref}(2)$, 一直循环推算直至与 GB_{ref} 和 GL_{ref} 的误差达到一门限值为止^[2], 然后, 由 $GB_{m,ref}$ 和 $GL_{m,ref}$ 推算出所有行的中心像元点地理坐标和卫星飞行方向.

此外, 原先的算法中, 误差的另一来源是以全幅图像中心点的 AL 角代替图像所有行中心

为把方位角归一化到统一坐标, 设定地球南极方向为0, 以东为正, 以西为负. 为了把 β 转换到统一的方位坐标, 把扫描行两端和中心像元点按卫星的不同飞行方向和前后方向不同倾斜扫描分别由图13~14所示, 归一化后的方位角, 可由 β 和卫星的飞行方向角得到

$$Azimuth_{\text{scanner}} = AL + \beta. \quad (33)$$

3.3 太阳的高度角^[5]

P 点的太阳高度角可由卫星过境日期、时刻和 P 点的经纬度, 由以下公式逐步求得. 地球围绕太阳按圆轨道运动, 年内不同日期天角为

$$K = \frac{2\pi(DN - 1)}{365}, \quad (34)$$

式中, DN 为儒历日. 不同时期的太阳倾角 α 为

$$\alpha = [0.006\ 918 - 0.389\ 912\cos K + 0.070\ 257\sin K - 0.006\ 758\cos(2K) + 0.000\ 907\sin(2K) - 0.002\ 697\cos(3K) + 0.001\ 48\sin(3K)] \frac{180}{\pi}, \quad (35)$$

由天角 K 计算不同日期等效时 ET (单位: min):

$$ET = [0.000\ 075 + 0.001\ 868\cos K - 0.032\ 077\sin K - 0.014\ 615\cos(2K) - 0.040\ 89\sin(2K)] \cdot 229.18. \quad (36)$$

太阳地方时 TST 由下式求得 (单位: h):

$$TST = \frac{-GL}{15} + \frac{ET}{60} + GMT, \quad (37)$$

式中, GMT 为 GMT 标准时. 太阳的上升角 Ω ($^\circ$) 为

$$\Omega = (12 - TST) \cdot 15. \quad (38)$$

最后太阳高度角由下式求得:

$$Zenith_{\text{sun}} = \arccos(\sin\alpha\sin GB + \cos\alpha\cos GB\cos\Omega). \quad (39)$$

3.4 太阳的方位角

P 点归一化的太阳方位角由太阳的高度角、太阳偏角及 P 点的纬度决定, 由下式计算得到:

$$Azimuth_{\text{sun}} = \arcsin\left(\frac{\cos\alpha\sin GB - \sin\alpha}{\sin\alpha\cos GB}\right). \quad (40)$$

方位角的符号定义为 $\Omega=0^\circ$ 时, 太阳方位角为 0° , $\Omega>0^\circ$ 时为正, $\Omega<0^\circ$ 时为负.

3.5 太阳和扫描仪之间的方位角

太阳和扫描仪之间的方位角定义为扫描视平面(扫描仪—地面像元点—扫描仪像底点)和太阳视平面之间的夹角(太阳—地面像元点—太阳底点), 在垂直扫描情况下如图12所示; 在升轨时前后倾斜扫描状况如图13; 在降轨时前后倾斜扫描状况如图14. 它可由以下公式求得:

$$Azimuth_{\text{diff}} = |Azimuth_{\text{sun}} - Azimuth_{\text{scanner}}|. \quad (41)$$

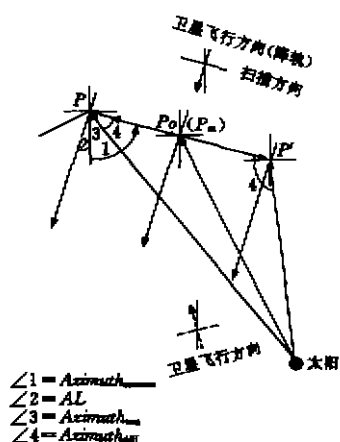


图12 扫描仪垂直扫描状况下太阳和扫描仪的方位角

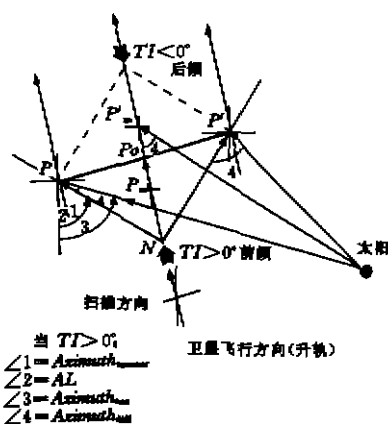


图13 卫星升轨时扫描仪倾斜扫描状况下太阳和扫描仪的方位角

4 地理定位及相关几何参数的软件包

所在地理坐标的定位、太阳和扫描仪的高度角及方位角等相关几何参数的计算都集于一个软件包,在该软件包中已包括了处理 CZCS、SeaWiFS、AVHRR、FY-1B、ROCSAT-1等多种星载传感器原始资料的地理定位和相关几何参数计算。程序开始运行时通过人机对话选择所要处理资料的类型,然后输入所要处理的图像尺寸、起始行列、结束行列、行列的增量、参考点行列、地理坐标和卫星过境时间等。该软件包包括四大部分:

(1) 通过参考点计算它所在行的中心点地理坐标和卫星飞行方向;

(2) 通过参考行的中心点计算每行中心点的地理坐标和卫星飞行方向;

(3) 计算行中每行像元点相对应的行中心点在扫描方向的球坐标增量、在飞行方向的切变和坐标增量 DX , 并列表;

(4) 最后,逐行计算每一像元点的地理坐标 $GB[X_i, Y_i]$ 、 $GL[X_i, Y_i]$ 、扫描仪高度角和方位角。表1为 SeaWiFS 升轨在 20° 前向倾斜下扫描的计算结果。

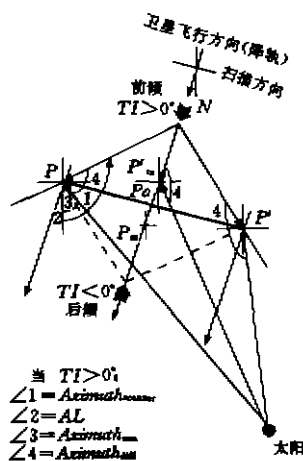


图14 卫星降轨时扫描仪倾斜扫描状况下太阳和扫描仪的方位角

表1 SeaWiFS 升轨20°前向倾斜扫描下典型像元的
地理定位及几何参数计算结果

倾斜角	视场角	扫描行数	每行像元数	日期	时刻				
20.00°	116.60°	16 000	1 285	03-21	12:00:00				
$X_{i,\text{ref}}=8\ 001$	$Y_{i,\text{ref}}=643$	$GB_{\text{ref}}=0.00$	$GL_{\text{ref}}=0.00$						
$X_{i,\text{sat}}=8\ 001$	$Y_{i,\text{sat}}=643$	$GB_{\text{m}}=0.00$	$GL_{\text{m}}=0.00$						
行	像元	纬度	经度	卫星 方位角	卫星 高度角	太阳 方位角	太阳 高度角	卫星-太阳 方位角	卫星飞行 方向角
1	51	77.29	25.64	54.04	84.06	33.81	79.45	20.23	-47.74
1	643	77.21	-49.97	-227.74	22.33	-43.15	80.66	175.42	-47.74
1	1 235	59.69	-79.35	-149.51	84.06	-74.15	81.00	75.37	-47.74
1 601	51	64.50	24.80	81.58	84.06	33.86	68.46	47.73	-20.20
1 601	643	63.41	-21.95	-200.20	22.33	-17.26	64.51	177.07	-20.20
1 601	1 235	52.82	-54.99	-121.97	84.06	-54.86	66.49	67.12	-20.20
3 201	51	49.71	17.85	88.92	84.06	29.25	53.58	59.67	-12.85
3 201	643	47.85	-12.73	-192.85	22.33	-9.96	48.35	177.11	-12.85
3 201	1 235	41.34	-39.57	-114.63	84.06	-45.84	51.71	68.79	-12.85
4 801	51	34.55	16.44	91.84	84.06	33.52	39.63	58.32	-9.94
4 801	643	31.98	-7.46	-189.94	22.33	-6.15	32.20	176.22	-9.94
4 801	1 235	27.83	-30.16	-111.72	84.06	-46.14	37.40	65.57	-9.94
6 401	51	19.31	17.33	93.14	84.06	48.26	27.85	44.88	-8.64
6 401	643	16.01	-3.50	-188.64	22.33	-1.53	16.08	172.89	-8.64
6 401	1 235	13.41	-24.08	-110.42	84.06	-58.74	24.79	51.68	-8.64
8 001	51	4.13	19.69	93.57	84.06	79.54	22.04	14.03	-8.21
8 001	643	0.00	0.00	-188.21	22.33	88.08	1.97	83.71	-8.21
8 001	1 235	-1.47	-20.01	-109.98	84.06	-94.30	18.10	15.68	-8.21
9 601	51	-10.86	23.46	93.34	84.06	112.50	26.47	19.16	-8.44
9 601	643	-16.01	3.47	-188.44	22.33	164.60	16.51	6.95	-8.44
9 601	1 235	-16.57	-17.43	-110.22	84.06	-133.66	23.23	23.44	-8.44
11 201	51	-25.49	29.08	92.33	84.06	127.95	37.69	35.63	-9.45
11 201	643	-32.00	2.33	-189.45	22.33	166.79	32.63	3.76	-9.45
11 201	1 235	-31.73	-16.34	-111.23	84.06	-150.41	35.34	39.18	-9.45
11 801	51	-39.40	37.68	90.01	84.06	130.77	51.43	40.76	-11.77
12 801	643	-47.91	12.33	-191.77	22.33	165.36	48.78	2.87	-11.77
12 801	1 235	-46.76	-17.42	-113.55	84.06	-154.94	49.51	41.39	-11.77
14 401	51	-51.80	51.85	84.45	84.06	123.95	66.20	39.50	-17.33
14 401	643	-63.60	20.67	-197.33	22.33	159.85	64.95	2.83	-17.33
14 401	1 235	-61.25	-23.29	-119.11	84.06	-151.15	64.27	32.04	-17.33
16 000	51	-60.81	76.62	64.26	84.06	104.88	81.76	40.62	-37.51
16 000	643	-78.21	44.75	-217.51	22.33	138.22	81.09	4.26	-37.51
16 000	1 235	-73.38	-44.09	-139.29	84.06	-131.09	78.83	8.20	-37.51

北纬为正, 南纬为负; 西经为正, 东经为负。太阳和卫星的方位角, 南极方向为0, 东为正, 西为负。卫星方向角, 北极方向为0, 东为正, 西为负。

5 算法验证及结果

推导算法已用于 CZCS、FY-1B、SeaWiFS 和 AVHRR (NOAA-10, NOAA-11) 卫星原始资料的地理定位和几何参数计算, 以上资料的有关轨道和扫描仪参数见表2. 用以下方法检验其算法精度.

表2 卫星轨道和扫描仪参数

卫星参数	CZCS	FY-1B	SeaWiFS	NOAA-10	NOAA-11
视场角 (°)	78.68	110.86	116.6	110.8	110.8
轨道周期 (min)	104.07	102.76	98.88	101.277	102.139
轨道倾角 (°)	99.28	98.9	98.2	98.66	98.91
扫描速率 (s/行)	0.123 75	1/6	1/6	1/6	1/6
平均高度 (km)	955	888.8	705	813	855
飞行方向	升轨	降轨	降轨	降轨	降轨
发射窗口	11:00	07:55	12:00	07:32	13:49
像元数/行	1986	2048	1285	2048	2048
扫描倾角 (°)	0, ±20	0	0, ±20	0	0

资料: 16 000行条带图像. 为了便于检验, 取条幅图像的中心点为卫星的上交点或降交点 $GB_{ref}=0^\circ$ 和 $GL_{ref}=0^\circ$. 为了便于验证太阳和传感器的高度角、方位角和卫星飞行方向的精度, 取6月1日 (夏至) 为卫星过境日期.

步骤: (1) 以像幅图像中心点作为参考点, 推算出整个条幅所有像元的地理坐标及有关几何参数; (2) 分别以开始行 (第1行)、中间行 (第8 001行) 和最后一行 (第16 000) 的第一像元、中心像元和最后一个像元点作为参考点, 取第一步得到的地理坐标, 反推算整个条幅图像的中心点的地理坐标和太阳高度角、方位角; (3) 求出第二步中不同像元点作为参考点下反演的误差和误差均

方根值; (4) 选取实际接收到的图像进行地理定位计算, 并与局部区域实际地理坐标对比验证. 按表中所列五种资料, 其中 CZCS 和 SeaWiFS 包括前、后斜倾和垂直等三种扫描状态, 共取2 592个反演验证点和实际地理验证点. SeaWiFS 尚未入轨, 未作实测资料对比, 验证结果如表3.

表3 算法验证结果

参 数	最大误差 (°)	均方根误差 (°)
纬度	0.000 14	0.000 10
经度	0.000 60	0.000 50
太阳高度角	0.000 76	0.000 70
太阳方位角	0.000 77	0.000 70
飞行方向	0.000 80	0.000 70

6 结论

(1) 经过五种卫星资料的验证表明, 以卫星轨道参数和扫描仪的视场参数为基础, 建立地理坐标定位和相关几何参数的算法是可行的;

(2) 本文所研究的算法和软件适用性广, 既适用于升轨卫星, 也适用于降轨卫星, 同时还适用于在前、后向倾斜和垂直三种扫描状态下获取的地面资料;

(3) 本算法和处理软件使用简便, 大大简化了通常的几何校正方法. 对整个条幅图像只要输入一个已知参考点, 便可对整幅图像的所有像元点进行地理定位;

(4) 气象和海洋这类环境卫星的星下点地面分辨率通常为1km左右, 陆地资料卫星 MSS、TMT、SPOT 的地面分辨率分别为56~79、30和20m. 由验证所知, 本研究成果在纬度方向的误差为0.000 14°, 经度方向为0.000 60°. NOAA 卫星高度相当于地面的误差为15.4±66m, 确保了 NOAA 等环境卫星的几何定位误差在一个像元内, 因此, 本研究的地理定位精度可以完全满足环境卫星和陆地卫星的 MSS 资料的精几何校正, 同时可以满足 TMT 和 SPOT 的粗几何校正的要求;

(5) 在本算法的基础上, 再加上每行的卫星姿态参数(滚、偏、仰角), 有潜力提高定位精度, 以便满足 TMT 和 SPOT 等甚高地面分辨率的陆地资源卫星的几何校正要求.

参考文献

- 1 Gong Huixing. Visible-infrared scanning radiometer on FY-1 meteorological satellite and its technical advances. Chinese Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1990, 9(2): 87~100
- 2 Zeng Qinbo, Xu Xuerong. Optical design of the remote sensing instrument for FY-1 meteorological satellite. Chinese Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1990, 9(2): 101~110
- 3 Nelder J A, R Mead. A simplex method for function minimization. The Computer Journal, 1965, (7): 308~313
- 4 NASA. Nimbus-7 CZCS derived products scientific algorithm description. NASA. Rep. EAC-T-8085-0027, printed in NASA, GSFC, Greenbelt, Maryland, 1978, 1~155
- 5 Muhammad Iqbal. Sun-earth astronomical relationship. In: An Introduction to Solar Radiation, Toronto, Academic Press, New York, 1981, 3~22