

# 用于地球静止卫星云图象素定位的 非线性插值法

钟晓平

(成都高原气象研究所, 610072)

## 提 要

根据对 GMS-4 地球静止卫星所发定位网格数据的分析, 发现同一纬线上两定位格点间象素分辨率的变化率基本保持不变。可以利用等比级数的原理计算象素分辨率, 从而确定象素的地理位置。据此设计的非线性插值方法明显优于线性插值法。

**关键词:** 地球静止卫星 定位网格数据 象素分辨率 非线性插值法

## 引 言

卫星云图能获得充分有效使用的关键之一, 是可以准确地定出每个象素的地理位置。象素的定位误差来源很多, 如投影变换、视角影响、红外临边变暗效应、大气削弱影响、太阳高度影响等等。使用不同定位方法时, 它们对误差的影响也不一样。定位方法主要有两类, 一是直接利用有关卫星姿态和位置的原始资料, 如卫星高度、星下点地理位置等<sup>[1-2]</sup>, 二是利用经过导航处理过的资料, 如日本 GMS-4 所发出的每隔 5 个经纬度的定位网格数据。前者可以仅根据一组象素坐标计算出相应的地理位置, 但是计算方法比较复杂, 要用到较多有关参数。后者计算方法简单, 仅仅是一种内插, 不需要任何参数, 但是要求卫星自身提供的定位数据要可靠, 内插方法的精度要高, 才能得到好的结果。

目前我国大多数基层台站的计算机能力有限, 对于卫星云图的接收和使用都要作一定的简化。从方便易行的角度来看, 象素定位可以使用内插方法。即认为接收到的定位网格数据的精度满足要求, 可以用来内插求出各个象素对应的地理位置。在这种情况下, 内插方法本身产生的误差占主要地位。所以方

法的选择便成了关键问题。

现在我们所接收使用的静止卫星云图, 大多来自日本的 GMS-4, 其中心经度是 140° E。星下点位置偏东, 使我国西南, 西北等地区处于其扫描范围的边缘地区, 分辨率加大 (单个象素所代表的空间范围增大), 定位误差增加, 更需要选择好的定位方法, 才能满足实际应用的要求。GMS-4 自身提供的标准定位网格数据的精度一般是比较可靠的, 可直接加以利用。但不同定位方法的结果差别相当大。有的认为是 1—2 个象素, 也有认为由于对地球表面所作的不同近似, 会导致最大达 4 个象素的误差<sup>[1]</sup>。

卫星观测是在高空对椭球状地面进行扫描, 云图上象素的坐标又用顺序排列的象素行、列数来表示, 所以云图上的象素行、列坐标与地理上的经纬度坐标之间的关系比较复杂 (表略)。在这种情况下, 要将各个领域中得到广泛使用的线性插值法, 用于这两类坐标转换从数学原理上都难以通过, 应该使用其它更为准确的方法。针对这类定位网格数据的特点, 本文提出一种非线性插值方法。无论从数学原理, 还是插值结果都优于线性插值方法。

## 1 建立方法的基础

为方便起见,将每5度经纬网格点处的象素的行、列序号称为标准定位点,过这些点的经纬线分别称为标准经纬线。并将各扫描行上处于同一序号的象素合并称为扫描列,虽然它们并不是在一次扫描中得到的。

从表1中可见,相邻两个标准定位点间具有的列数并不是常量。在靠星下点较远的地方,列数较多,分辨率较小。离星下点较远的地方则相反。从象素图(略)中可以清楚地发现这种变化(即使考虑到高纬度上每5个经度之间的几何距离减小,这种变化仍然存在)。以星下点为坐标原点,在左上象限内分辨率是从西向东,从北向南增大的(以下的描述将限制在该区域内。其它区域可作类似处理)。表1中还列出了各标准定位格点间平均分辨率的变化情况,其中RD为相邻区间分辨率之差,RM为分辨率之商。如果在同一纬线上RD的变化可忽略不计,就可按等差级数的原理计算分辨率R的变化;如果RM的变化极小,则应按等比级数的原理计算R的变

化。从表1可见,相邻区间内RD的变化(RRD)很大,大多在30%到60%之间。而RM的变化(RRM)则很小,最大者也没超过5%。所以完全可以在相邻区间内将RM近似的认为是常量。既然平均分辨率以固定比率变化,那也不妨将区间内象素分辨率假设为以固定比率变化。设这种分辨率的变化率为 $k$ ,则只要知道了某一个象素的地理位置 $S_0$ 和沿某方向的分辨率 $R_0$ 后,就能够求出该方向上与这个象素相距 $N$ 个位置处象素的分辨率 $R_N$ 和它的地理位置 $S_N$ 。其公式和简单的存款利息计算基本是一样的,只要将各个象素的分辨率相加即可。但是要考虑到分辨率本身的特点:这 $N+1$ 个象素之间的距离并不是这些象素的分辨率之和,开始和结尾处那两个象素的分辨率只能有一半被用来计算这段距离。即

$$R_N = R_0 \cdot (1 + k)^N \quad (1)$$

$$S_N = S_0 + R_0 \sum_{i=1}^N (1 + k)^i + \frac{1}{2} R_0 - \frac{1}{2} R_0 \cdot (1 + k)^{N+1} \quad (2)$$

表1 GMS-4定位格点间列数的变化,1992年7月12日1800Z

经度范围	A 55°N						B 40°N					
	列数	R	RD	RRD	RM	RRM	列数	R	RD	RRD	RM	RRM
85—90°E	31	0.1613	0.0224	61.2	0.8611	-4.3	40	0.1250	0.0186	53.7	0.8512	-3.9
90—95°E	36	0.1389	0.0139	21.9	0.8999	-1.0	47	0.1064	0.0121	26.0	0.8862	-1.3
95—100°E	40	0.1250	0.0114	58.3	0.9088	-3.0	53	0.0943	0.0096	45.5	0.8982	-2.6
100—105°E	44	0.1136	0.0072	-14.3	0.9366	1.7	59	0.0847	0.0068	17.9	0.9221	-0.7
105—110°E	47	0.1064	0.0084	12.7	0.9211	-2.7	64	0.0781	0.0056	40.0	0.9283	-1.7
110—115°E	51	0.0980	0.0037	-26.0	0.9622	1.6	69	0.0725	0.0040	48.1	0.9448	-1.6

注:R为分辨率;RD:相邻区间分辨率之差;

RRD:相邻区间分辨率之差的变化率(%);

RM:相邻区间分辨率之商;

RRM:相邻区间分辨率之商的变化率(%).

## 2 非线性插值方法

虽然在卫星云图上扫描行不与纬线平行,扫描列也不与经线平行,它也不妨碍在经、纬线上直接利用式(1)和式(2)。这两个公式的成立与分辨率的方向没有关系。不过,由于这种不平行会导致某一扫描列在一条标准纬线上位于某两条标准经线之间,而在另一标准纬线上却位于另两条标准经线之间。在

确定扫描列的位置时必须注意到这种特性。应用式(1)和式(2)的关键首先在于要找到一个已知其地理位置的象素,确定出它的分辨率,和象素分辨率的变化率 $k$ 。

如图1所示,该方法需要用到3条标准经线和3条标准纬线上的数据。在所考虑的区域,同一标准纬线上扫描列的分辨率以固定比率由东向西逐渐增大。要求象素 $(J, N_0)$ ,

$EL_0$ )的地理位置,一种顺序是先求出扫描列  $EJ_{0_0}$  与标准纬线  $LA_1, LA_2$  和  $LA_3$  的交点  $E_1, E_2$  和  $E_3$  的地理经度,以及这些点处的扫描行序号,然后再求  $(LN_0, EL_0)$  处的经纬度。相反的顺序则是先求出扫描行  $LN_0$  与标准经线  $LO_1, LO_2$  和  $LO_3$  的交点处的地理纬度,然后再求出象素  $(LN_0, EL_0)$  的经纬度。以后将会看到对于非线性插值方法,两种顺序所得结果相差不大。下面按照第一种顺序介绍这种插值方法。

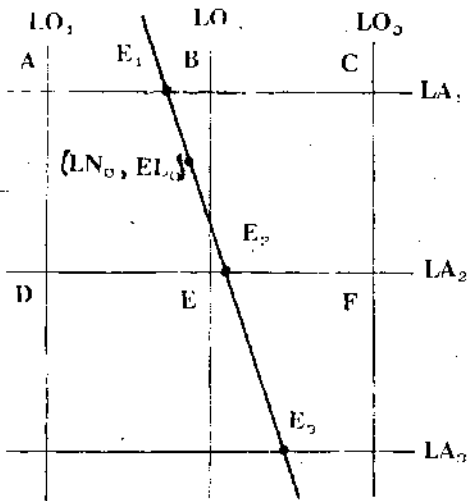


图1 插值方法图示

要求出交点  $E_1, E_2$  和  $E_3$  的地理经度,首先必须求出象素分辨率的递减率  $k$ 。点 A, B 和 C 处的象素的地理位置已知,扫描行、列的序号也是已知,因此可以求出纬线  $LA_1$  上  $LO_1$  与  $LO_2$  之间扫描列的平均分辨率(以经度为单位)  $S_1$  和  $LO_2$  与  $LO_3$  之间的平均分辨率  $S_2$ 。

$$S_1 = (LO_2 - LO_1) / (EL_B - EL_A) \quad (3)$$

$$S_2 = (LO_3 - LO_2) / (EL_C - EL_B) \quad (4)$$

当然,也可以将  $S_1$  和  $S_2$  分别近似的认为是纬线  $LA_1$  上位于  $LO_1$  与  $LO_2$  和  $LO_2$  与  $LO_3$  之间中点处的那个扫描列的分辨率。这种近似做法的精确度可以通过与实际计算后得到的中点处象素的分辨率进行比较来估计。表2为根

据1992年7月12日18时 GMT 卫星云图定位数据计算出的  $40^\circ N$  上的两组平均分辨率和中点分辨率。两者之间的绝对误差相当小,相对误差也在万分之一的量级,这种精度不会对计算结果产生太大的影响。

表2 1992年7月12日18时 GMT 卫星云图上  $40^\circ N$  处两标准经线间的平均分辨率和中点分辨率之比较(单位:经度)

	80—85°E	85—90°E
平均分辨率	0.14705880	0.12500000
中点分辨率	0.14692195	0.12488352
相对误差	-0.00093058	-0.00093184

求出这两个中点之间所具有的扫描列的数目

$$DE = \text{INT} \{ [(EL_B - EL_A) + (EL_C - EL_B)] / 2 + 0.5 \} \quad (5)$$

其中,符号 INT 表示取其整数部分。则根据式(1)可求得

$$k = DE \sqrt{S_2/S_1} - 1 \quad (6)$$

令点 A 处扫描列的分辨率为  $X_0, D_1 = EL_B - EL_A$ , 根据式(2)有

$$LO_2 - LO_1 = X_0/2 + \sum_{i=1}^{D_1} [X_0 \cdot (1+k)^i] - [X_0 \cdot (1+k)^{D_1}] / 2 \quad (7)$$

因此,

$$X_0 = \frac{LO_2 - LO_1}{1/2 + \sum_{i=1}^{D_1} (1+k)^i - (1+k)^{D_1}/2} \quad (8)$$

那么标准纬线  $LA_1$  上  $LO_1$  与  $LO_2$  间的扫描列  $EL_0$  相对于 A 点的距离 DLON(以经度为单位)就可以写为

$$DLON = X_0/2 + \sum_{i=1}^{D_0} [X_0 \cdot (1+k)^i] - [X_0 \cdot (1+k)^{D_0}] / 2 \quad (9)$$

其中  $D_0 = EL_0 - EL_A$ 。A 点的经度为已知,故扫描列  $EL_0$  在标准纬线  $LA_1$  上的经度得以确定。根据同样方法,扫描列  $EL_0$  在标准纬线

$LA_2$ 和 $LA_3$ 上的经度也可得到。

要求出象素( $LN_0, EL_0$ )的确切地理位置,还需求出 $E_1, E_2$ 和 $E_3$ 处的扫描行序号。其方法与DLON的求法相似。求DLON是用已知扫描列序号去求经度差值,现在则是要用已知的经度差值求出扫描行序号。即已知式(9)的左端,去求出 $D_0$ 之值。当然这时 $X_0$ 和 $k$ 的值要用A, B和C点处的扫描行序号重新确定。

根据 $E_1, E_2$ 和 $E_3$ 处的经纬度和扫描行序号,再利用与式(9)类似的公式,可以很容易地内插出象素( $LN_0, EL_0$ )的确切经纬度。

在插值过程中要注意一点。如图1所示,某一扫描列在标准纬线 $LA_1$ 上是位于标准经线 $LO_1$ 和 $LO_2$ 之间,但在标准纬线 $LA_2$ 上却是位于标准经线 $LO_2$ 和 $LO_3$ 之间,所以在内插求出 $E_1, E_2$ 和 $E_3$ 的经度和行号时,标准经度的数值是随着纬线而改变的,不能用同一数值。

式(3)、(4)、(5)、(6)、(8)和(9)构成了这种非线性插值的一组公式。事实上它是一组广义的插值公式,通常所用的线性插值公式只是它的一种特例。在适合线性插值的数学问题中必须有 $S_1=S_2$ ,因为这里的 $LO_2-LO_1$ 等于 $LO_3-LO_2$ 。所以有 $k=0$ 。那么根据式(8)和(9)很容易得出

$$DLON = \frac{LO_2 - LO_1}{EL_B - EL_A} \times (EL_0 - EL_A) \quad (10)$$

这是典型的线性插值公式。

### 3 精度分析

到目前为止,还没有一种能为每一个象素准确定位,而又简单易行,不占用太多内存也不花费太多计算时间的方法。因此在大多数情况下,只能根据各定位方法本身的数学原理和定位结果,与卫星观测原理的符合情况作一些定性的分析来确定方法的优劣。

在卫星云图定位网格资料中,象素分辨率在相邻区间几乎是按相等的比率变化,如

果使用线性插值必然会带来很大误差。使用非线性插值,则可以较好的解决这个问题。从数学原理上来看后者必定优于前者。

利用改变插值顺序的方法也可以检验二维插值方法的优劣。如果两种顺序下求得的结果差异较小,这种方法的精度必然较高。计算表明,非线性插值法在先求扫描列在标准纬线上的经度和先求扫描行在标准经线上的纬度这两种顺序下的结果间的差异程度小于线性插值。

这种非线性插值方法的优点还能够更好的在插值结果中体现。从理论上讲,所考虑区域内卫星扫描列的形状应该为向右上角(东北方)凸出的平滑曲线,斜率随纬度的增大而增大。线性与非线性插值方法在总体上都表现出了这种特征(略)。然而在细节上后者远远比不上前者。线性插值得出的扫描列在各标准纬线之间显得比较直,在较偏北的标准纬度间甚至向西南方向凹陷下去。整个扫描列看上去并不是一条平滑曲线,而是一段一段连接起来的折线。在标准纬线两侧出现明显的拐角。非线性插值的结果显然没有这些缺点。整条扫描列曲线十分平滑,完全看不出一截一截的线段和明显的拐角。在较偏北的标准纬度间向东北方微微凸出,与上述理论推断十分吻合。

分别用线性与非线性方法计算出每个象素点的经纬度之后,对应相减就可得出其误差相对于经纬度的分布。为了滤去随机误差,取10个时次的云图定位资料分析结果进行平滑处理,获得了整个区域内误差的分布情况。综合分析发现,无论经度误差还是纬度误差,都是从东南向西北方逐渐增大的。但是,纬度误差(即沿经度方向的误差)普遍偏小,无论在哪一个范围内,最大误差均不超过一个象素点。因此可以不予考虑,视其在可接受范围。然而沿纬度方向的经度误差却有很大的变化。总的来看,右下角的经度误差较小,在左上角明显增大。在标准纬线上,经度误差和

纬度误差一样,普遍较小。图2(单位为局地像素点的个数)是用等值线表示的经度误差,从中首先可以发现误差呈带状分布在各标准纬度之间。每个误差带上的最大值位于两标准纬度之间的中心,最西边的经度处。这主要是由于标准定位网格点处,误差总是为零;而在各个标准纬线上,误差总是小于一个像素点所造成的。各标准纬线之间经度误差都是由东向西增加。靠近标准纬线处,误差等值线为波浪形曲线。各个误差带的最大误差是由南向北逐渐增大的。如果忽略标准定位纬线附近的误差小值区,可以发现误差由东南向西北方逐渐增大。从 $50^{\circ}\text{N}$ ,  $127^{\circ}\text{E}$  向 $15^{\circ}\text{N}$ ,  $90^{\circ}\text{E}$  划一直线,在其右下方为误差小于2个像素点的地区,且该区内误差梯度较小。而它的左上

方大部分区域内误差都大于2个像素点,且误差增大较快。在 $47.5^{\circ}\text{N}$ ,  $90^{\circ}\text{E}$  处已高达4个像素点。

#### 4 结 语

由于 GMS-4 卫星的像素定位网格数据中,像素的行列序号呈非线性分布,因此直接利用常规的线性插值方法不仅在数学原理上难以通过,计算结果也误差太大。在这种情况下根据定位网格数据特点发展起来的非线性插值方法表现出较好的性能。

这种非线性插值实际上是一种包括了常规线性插值的广义插值方法。其基础在于相邻定位格点间像素的分辨率可以被看作是以相同比率变化的。从而根据等比数列的原理可求解出任意位置上像素的分辨率,进而求得其地理位置。虽然其计算远较线性插值复杂得多,难以用手工做出,但是却很容易在计算机上实现。在采取了一定的转换以后,还能大大的节省计算时间,便于在微机上对卫星云图进行实时处理。与线性插值相比,非线性插值方法在数学意义上更为合理,改变插值顺序对结果的影响也不大,所以插值结果也更加符合实际情况。

#### 参考文献

- 1 李凤吕. 数字展宽地球同步卫星扫描云图的定位. 气象, 1992, 18(6): 53-55.
- 2 The Simplified Mapping Equation of VISSR Image data from Geostationary Meteorology Satellite(GMS). Meteorological Satellite Center(Japan), Technical Note, No. 1, March, 1979.

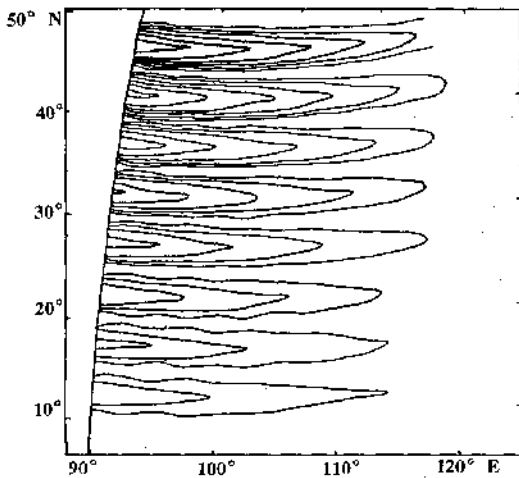


图2 线性插值的误差分布

## Nonlinear Interpolation for Navigation of Satellite Image

Zhong Xiaoping

(Chengdu Research Institute of Plateau Meteorology, 610072)

### Abstract

Based on the analysis of grid data for navigation from GMS-4, it is discovered that the variability of pixel resolution between two grid points at the same latitude may be used as a constant. The resolution of each pixel can be computed according to the principle of geometrical progression. The geographical position of the pixel, in turn, can be determined. A method of nonlinear interpolation designed from this result has more advantage than the linear interpolation.

**Key Words:** GMS grid data for navigation pixel resolution nonlinear interpolation