

一种中尺度滤波方法及其在卫星资料 个例分析中的初步应用*

韩卫清 王宗皓
(国家气象局卫星气象中心)

提 要

本文提出一种“修正的双傅氏级数”滤波方法,应用卫星资料个例,与 Barnes 带通滤波法进行了对比试验。初步结果表明:用本文的方法分析得到的中尺度系统,结构更清晰,强度更强。

一、引 言

随着气象卫星携带的探测仪器及反演方法的改进,使我们能够得到水平分辨率较高(25~100km)的卫星资料,这无疑对天气尺度和中尺度系统的分析和预报有一定作用,许多国家和地区制定并实施了中尺度试验计划^[1]。目前,气象工作者正在利用各种渠道的卫星探测资料,寻求有效的分析方法,配合应用常规资料、雷达资料和云图,对中尺度系统进行分析研究。

Shuman^[2]首先提出对网格点上的物理量进行平滑的滤波方法。用同样原理,夏大庆等^[3]设计了几种高通滤波器。Barnes^[4]提出了含有滤波作用的客观分析方法,之后在算法和应用上都有了新的发展^{[5][6]}。然而,无论是平滑滤波,还是两个低通滤波相减得到的带通滤波,在进行中尺度滤波时,都不可避免地要削弱中尺度波的振幅,同时还保留了部分大尺度波分量。为此,本文提出了能过滤出中尺度波动的滤波方法——“修正的双傅氏级数”滤波法。该方法的优点是比较灵活,它可以方便地分离出我们所需要的波段而不含其它尺度的波分量,从而更有效地突出了中尺度波特征。也可以逐波分析,这对于中尺度波的研究是有一定意义的。同时,这种方法解决了傅氏级数在有限区域内展开时边界处理的困难,便于将分析场直接用于有限区域谱模式预报^{[7][8]}。

二、资料及计算区域

1. 资料

本文用卫星气象中心大气遥感反演室 1986 年 8 月 6 日 12Z GMT NOAA-9 卫星探

本文 1989 年 10 月 20 日收到 1990 年 3 月 2 日收到修改稿。

* 非教育系统基金资助。

测资料反演得到的温度场,推算出 $H_{500-1000}$ 、 $H_{700-1000}$ 、 $H_{850-1000}$ 的厚度场。利用文献[9]中的方法可得到 1000hPa 的位势高度场:

$$Z_{1000} = \frac{R_d T_s}{g} \ln\left(\frac{P_s}{1000}\right) / \left[1.0 + 0.003 \frac{R_d}{g} \ln\left(\frac{P_s}{1000}\right)\right] \quad (1)$$

其中, $R_d = 2.87 \times 10^{-1} \text{J/g} \cdot ^\circ\text{C}$, $g = 980 \text{cm/s}^2$, P_s 和 T_s 分别为地面气压和气温。从而得到各层次卫星资料的位势高度场:

$$Z_{500} = Z_{1000} + H_{500-1000} \quad (2)$$

同理可得 Z_{700} 、 Z_{850} 。

2. 计算范围

本文所指的中尺度是空间尺度为 200—2000km 的 α 中尺度。以下所有的计算均在格距 Δd 取为 1 个经、纬度的网格上进行。分析区域是如图 1 所示的范围 ($86-134^\circ\text{E}$, $27-59^\circ\text{N}$), 其中小圆点为卫星资料分布点。

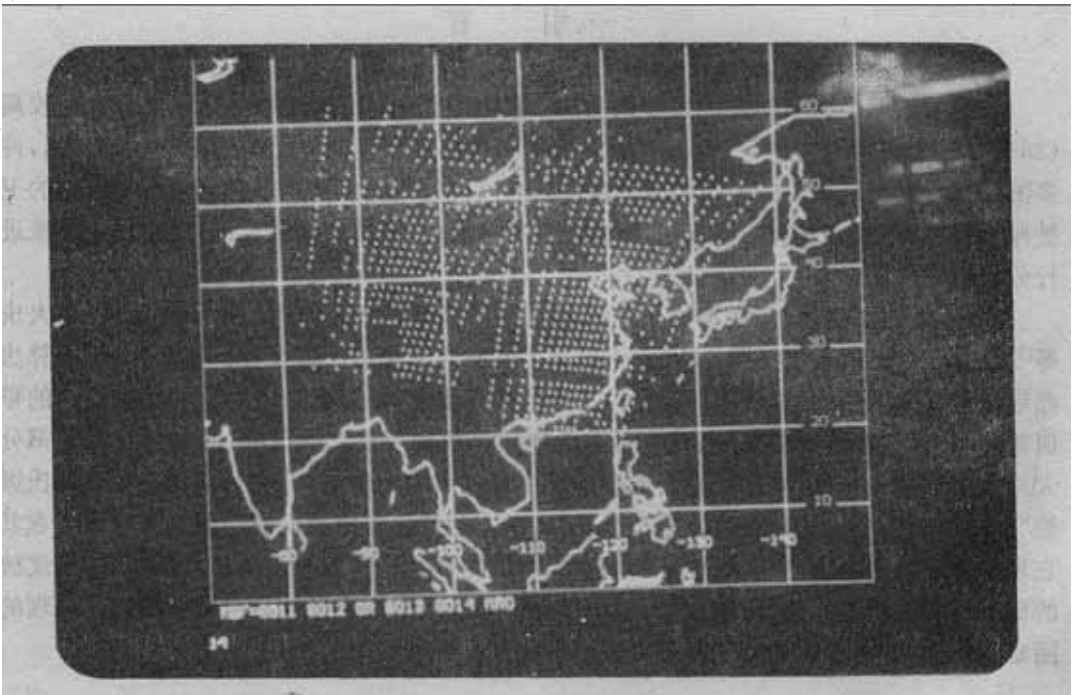


图 1 1986 年 8 月 6 日亚洲上空 NOAA-9 卫星探测资料点的分布^[10]
(轨道 1: 10: 25Z, 轨道 2: 12: 05Z)

三、快速 Barnes 客观分析方法及带通滤波原理

作为初步试验,我们首先用快速 Barnes 客观分析方法,将不规则的资料内插到均匀分布的网格点上,取 $k=2000\text{km}^2$ 。然后分别用“修正的双傅氏级数”滤波法及 Barnes 带通

滤波法,分离出中尺度波动。

1. 快速 Barnes 方法

快速 Barnes 方法是 Barnes 方法的一种变换形式,通过减少运算过程中的乘法运算次数来提高计算速度,详见[5]。

2. 带通滤波原理

用下面的权重函数,将资料内插到均匀分布的格点上,即得到中尺度波的格点值:

$$W(r, k) = \left(\frac{1}{4\pi k} \right) \left[e^{-\left(\frac{r^2}{4k_1} \right)} - e^{-\left(\frac{r^2}{4k_2} \right)} \right] \quad (3)$$

其中, $k_1 = 2000 \text{ km}^2$, $k_2 = 30000 \text{ km}^2$, 这实际上是两低通滤波相减。相应的带通滤波响应函数为:

$$D(a, k) = e^{-a^2 k_1} - e^{-a^2 k_2} \quad (4)$$

详见文献[6],这里未加 Shapiro 平滑。

四、“修正的双傅氏级数”滤波法

1. 谱展开的基本思想

傅氏展开要求展开场的边界条件为周期的,而在有限区域内,客观分析得到的初始场一般为非周期的,因此不能直接进行傅氏展开。为了解决这一问题,我们在傅氏级数后加一线性函数,使得整个函数(傅氏级数加线性函数)满足分析场中给定的边界条件。具体方法如下:

设在经、纬度网格上,有一区域 R , F 为任一变量, F 的二维展开可化为两次相继的一维展开,先沿 x 方向展开,后沿 y 方向展开。首先,我们沿 x 方向展开,令:

$$F(x, y) = \hat{F}(x, y) + \hat{\hat{F}}(x, y) \quad (5)$$

$$\text{其中 } \hat{F}(x, y) = [F(x_M, y) - F(0, y)] \times \frac{x}{L_x} \quad (6)$$

(x, y) 为网格点坐标,以度为单位, L_x 为沿纬圈的宽度。本文中, $L_x = 49$ 度,则:

$$\hat{\hat{F}}(x, y) = F(x, y) - [F(x_M, y) - F(0, y)] \frac{x}{L_x}$$

显然, $\hat{\hat{F}}(x, y)$ 在两个相对边界点 (x_M, y)、($0, y$) 上等于同一值 $F(0, y)$, 即:

$$\hat{\hat{F}}(x_M, y) = \hat{\hat{F}}(0, y) = F(0, y)$$

故在 x 方向, $\hat{\hat{F}}(x, y)$ 可展开为:

$$\hat{\hat{F}}(x, y) = \sum_{n=0}^{M-1} F_n(y) e^{i \frac{2\pi n x}{L_x}} \quad (7)$$

其中, M 是沿 x 方向的最大波数,

$$F_n(y) = \frac{1}{L_x} \int_0^{L_x} \hat{\hat{F}}(x, y) e^{-i \frac{2\pi n x}{L_x}} dx \quad (8)$$

沿 y 方向展开与沿 x 方向展开类似,我们令:

$$F_m(y) = F_m^*(y) + F'_m(y) \quad (9)$$

$$F_m^*(y) = [F_m(y_N) - F_m(o)] \frac{y}{L_y} \quad (10)$$

则：
$$F'_m(y) = F_m(y) - F_m^*(y) = F_m(y) - [F_m(y_N) - F_m(o)] \frac{y}{L_y} \quad (11)$$

显然：
$$F'_m(y_N) = F'_m(o) = F_m(o)$$

故 $F'_m(y)$ 可沿 y 方向傅氏展开。

$$F'_m(y) = \sum_{n=0}^{N-1} F_{mn} e^{i \frac{2\pi n y}{L_y}} \quad (12)$$

N 为 y 方向的最大波数。由(5)–(12)式可得任一变量的二维展开为：

$$F(x, y) = [F(x_M, y) - F(o, y)] \frac{x}{L_x} + \sum_{m=0}^{M-1} F_m^*(y) e^{i \frac{2\pi m x}{L_x}} + \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} F_{mn} e^{i \frac{2\pi m x}{L_x}} e^{i \frac{2\pi n y}{L_y}} \quad (13)$$

我们称(13)式为“修正的双傅氏展开”。

2. “修正的双傅氏”滤波

用(13)式,我们可在有限区域内对任一气象要素进行展开,通过控制波数 m 和 n ,即可取得滤波结果。本文中取:

$$x \text{ 方向 } J_M = 49 \quad \Delta d_1 = 1 \quad (\text{经距})$$

$$y \text{ 方向 } I_N = 33 \quad \Delta d_2 = 1 \quad (\text{纬距})$$

选择波段为:

$$x \text{ 方向 } \quad 6 < m < 24 \quad (14)$$

$$y \text{ 方向 } \quad 4 < n < 16 \quad (15)$$

相应的波长为:

$$2\Delta d_1 < L_1 < 8\Delta d_1 \quad (16)$$

$$2\Delta d_2 < L_2 < 8\Delta d_2 \quad (17)$$

在二维情况下,有

$$2\sqrt{\Delta d_1^2 + \Delta d_2^2} < L < 8\sqrt{\Delta d_1^2 + \Delta d_2^2} \quad (18)$$

取 $\Delta d_2 = 111\text{km}$, $\Delta d_1 = 72\text{km}$, 近似得

$$260\text{km} < L < 1000\text{km} \quad (19)$$

此波段与 Barnes 带通滤波波段相近。

五、结果分析

1. “修正的双傅氏级数”滤波结果检验

我们用接近卫星资料探测时间的云团位置来验证滤波结果的合理性。图2为1986年8月6日09Z的GMS卫星云图,图3为同日500hPa卫星资料位势高度的傅氏滤波结果。



图 2 1986 年 8 月 6 日 09Z GMS 卫星云图

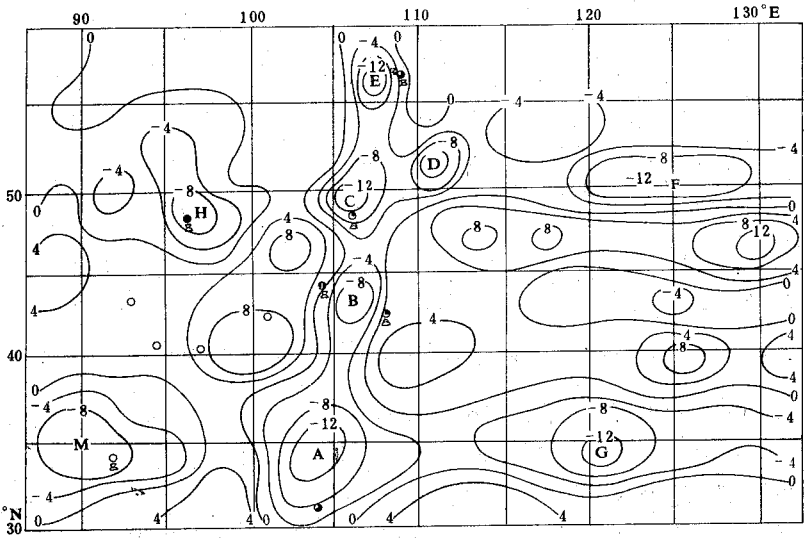


图 3 1986 年 8 月 6 日 500hPa 卫星探测资料
 “修正的双傅氏”滤波结果(单位:位势什米)
 图中的符号为相应测站 12Z 的云量云状

图 3 中所用的卫星资料由两条轨道组成:第一条主要在 110°E 以东,探测时间为 10 : 25Z,与图 2 的时间 09Z 接近;第二条轨道的探测点主要在 110°E 以西,探测时间为 12 :

05Z,以 12Z 的地面天气图中观测到的云量为参考。由图 3 可见,110°E 以东的几个较强的中尺度低压 F、G、D,与卫星云图上的云团有较好对应关系。110°E 以西的几个负值中心,如 H、M,其附近的地面测站观测到有积雨云存在,负值区 E、C、B 也有类似情况。40—45°N,90—103°E 的正值区,地面观测到一片晴空区。但负值区 A 附近地面测站稀少,较近的测站只测到微量的卷云;从卫星探测资料点的分布来看(图 1),负值区 A 正位于第一、二条轨道的交接处,其附近资料稀少,(30—35°N,100—105°E 处几乎无资料)因 Barnes 客观分析方法对资料不连续的区域分析效果不很理想,因此,负值区 A 可能不太可靠。

2. 与 Barnes 带通滤波结果的比较

为了比较,我们用 Barnes 带通滤波法对同一资料进行了滤波分析,见图 4。比较图 3、

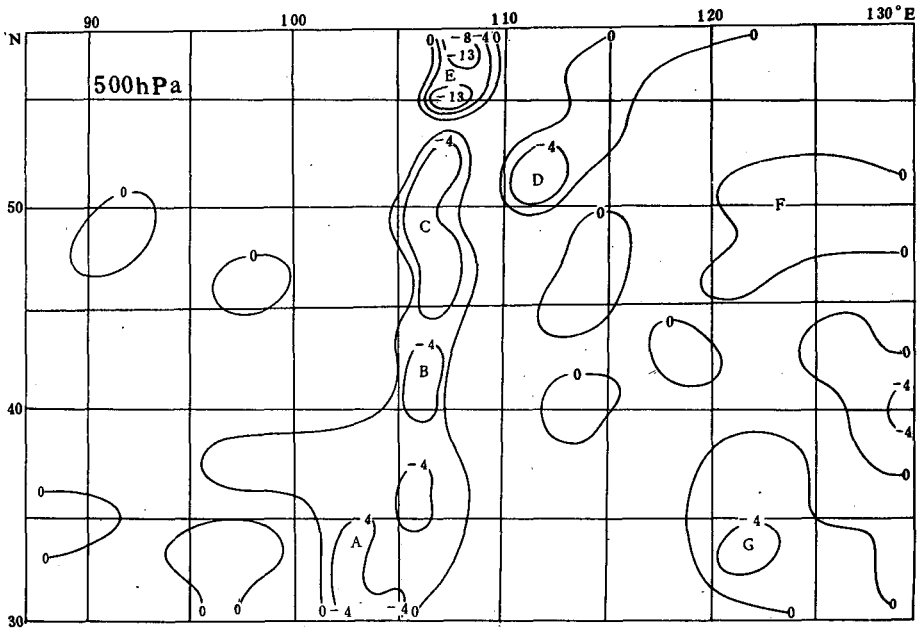


图 4 1986 年 8 月 6 日 500hPa 卫星资料 Barnes 带通滤波结果(单位:位势什米)

图 4,我们可清楚地看到,图 3 中分析得到的中尺度系统、结构更清晰,更明确,强度也更强。可能原因如前所述,Barnes 带通滤波及其它类似的滤波方法,是两个低通滤波之差,不可避免地削弱了要选择的中尺度波振幅,同时又含有大尺度波分量。平滑滤波也有此不足之处。“修正的双傅氏级数”滤波法则不同,它可以方便地分离出我们所需要的中尺度波动而不含其它尺度的波分量,从而使得中尺度波的结构特征更突出,这正是我们所期望的结果。

“修正的双傅氏级数”滤波法与 Barnes 方法,在进行低通滤波时,都可以保留大尺度波及中尺度波,从而分析结果具有一定的预报意义。但在进行带通滤波时二者有所不同,Barnes 带通滤波法以某一波长为主,响应曲线的形式见[6]。而“修正的双傅氏级数”滤波法是把所需要的中尺度波段内的波以有限波数形式分离出来,对分离出的每个波的

波振幅无削弱作用,滤波结果反应了整个中尺度波段的共同作用。但是,我们可以对所取波段的波逐波分析,从而得到各单波的作用,分析结果也具有—定预报指示意义。

参 考 文 献

- [1] Arrold, J., G. Wilson, st. williams and R. McNider, Satellite precipitation and cloud experiment, Experiment Design Document, March, 1986.
- [2] Shuman, F. G., Numerical methods in weather prediction: II. Smoothing and filtering, *Mon. Wea Rev.*, 85, 357—361, 1957.
- [3] 夏大庆等,气象场的几种中尺度分离算子及其比较, *大气科学*, 7, 303—311, 1983.
- [4] Barnes, S. L., A technique for maximizing details in numerical weather analysis, *J. Appl. Meteor.*, 3, 396—409, 1964.
- [5] 姜林(译),将观测值内插到均匀网格上的有效方法, *气象科技*, 第5期, 1987年.
- [6] 党人庆等,一种带通滤波方法及其初步应用, *气象科学研究院院刊*, 4, 1, 1989.
- [7] 韩卫清,纪立人,正压原始方程有限区域谱模式的预报试验研究, *气象学报*, 待发表.
- [8] Han Weiqing and Liao Dongxian, A comparative study of short-range forecasting with a limitedarea spectral shallow-water equation model, (to be published).
- [9] 毛建平, TINOS—N 卫星测厚资料对我国业务数值天气分析和预报影响的试验研究, 国家气象局气象科学研究所研究生毕业论文, 1987年.
- [10] 吴 桐, MCIDAS 显示气象卫星定量数据的三维结构和剖面结构, 气象科学研究所研究生毕业论文, 1989年.

A MESO-SCALE FILTERING METHOD AND ITS PRELIMINARY APPLICATION TO THE CASE ANALYSIS OF SATELLITE SOUNDING DATA

Han Weiqing Wang Zonghao
(*Satellite Meteorological Center, SMA*)

Abstract

A "modified double Fourier-Series" filtering method is presented and applied to the separation of meso-scale waves from satellite sounding data. The comparative study of this method and Barnes band-pass filtering method shows that the effect of the former is superior to that of the latter.