

# VAS 试验述评

汪 勤 模

(国家气象局卫星气象中心)

**摘要**——本文简要介绍美国第三代地球静止业务气象卫星上携带探测器——VAS 的性能、校准技术以及用其探测资料反演大气温湿廓线的方法。对试验结果及其在气象学上的可能应用作了评述。

## 一、引 言

八十年代初,携带可见红外自旋扫描辐射仪(VISSR)大气探测仪(缩写为 VAS)的地球静止气象卫星 GOES-D 的成功发射,是从空间进行天气观测的重大进展。VAS 不仅保留了原来 VISSR 的双通道摄象功能,而且能通过附加的红外通道来获取大气温度和湿度的三维结构资料,为气象工作者和其它研究人员提供了在地球静止轨道高度上进行环境科学广泛研究的必要条件,标志了地球静止气象卫星进入新阶段。

## 二、VAS 简介

VAS 是自旋稳定型地球静止气象卫星上携带的、在 VISSR 基础上改进发展的一种多通道辐射仪。除保留 VISSR 的可见和红外通道外,另外增加了十一个通道,其光谱特性如表 1 所示。

可见光通道的焦平面上,沿南北方向排列 8 根光导管,传感器使用光电倍增管,星下点分辨率约为 1 km。红外传感器有 6 个,其中两个是碲镉汞长波传感器,它的星下点分辨率为 6.9 km,主要用于摄象;另外四个星下点分辨率为 13.8 km,其中两个是碲镉汞,两个是铟化镉,用于大气垂直探测。在每一次卫星自旋期间,仅仅使用两个传感器。位于传感器组件前面的滤光片转盘上装有 12 个滤光片,通过指令使转盘旋转,利用滤光片使所需要的波长区的辐射进入传感器,从而达到选择光谱波段的目的。传感器配置如图 1 所示<sup>[1]</sup>,滤光片转盘位置序号和光谱通道序号对应关系如图 2 所示。为了提高红外传感器的灵敏度,在 VAS 上安装了辐射致冷器,通常保持在 95 K 左右。GOES 卫星以 100 r/min 的速率自西向东旋转,扫描镜由北向南步进,从而实现分辨率分别为 1 km 和 6.9 km 或 13.8 km 的空间复盖。

VAS 有三种工作方式: 1. VISSR 工作方式。以这种方式工作, VAS 的产品和发送

本文 1984 年 9 月 22 日收到。

表1 VAS 红外通道性能 (GOES-5)

Table 1 Performances of VAS infrared channels (GOES-5)

通道序号	中心波数 (cm <sup>-1</sup> )	权重函数峰值高度 (mbar)	吸收气体	飞行信号采样噪声 (mWm <sup>2</sup> sr <sup>-1</sup> cm <sup>-1</sup> )	自旋计数典型值	信号空间采样噪声 (mWm <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup> cm <sup>-1</sup> )	探测亮度温度噪声典型值* (°C)
1	679.95	40	CO <sub>2</sub>	2.740	1	2.740	0.6
2	691.20	70	CO <sub>2</sub>	1.360	4	0.680	0.2
3	702.89	150	CO <sub>2</sub>	1.020	4	0.510	0.2
4	714.85	450	CO <sub>2</sub>	0.940	2	0.660	0.2
5	751.37	950	CO <sub>2</sub>	0.760	2	0.540	0.2
6	2214.35	850	CO <sub>2</sub>	0.028	4	0.011	0.2
7	789.39	表面	H <sub>2</sub> O	0.640	2	0.450	0.2
8	889.52	表面	—	0.100	1	0.100	0.1
9	1379.69	600	H <sub>2</sub> O	0.650	4	0.330	0.2
10	1486.33	400	H <sub>2</sub> O	0.150	1	0.150	0.2
11	2254.28	500	CO <sub>2</sub>	0.029	4	0.015	0.2
12	2538.07	表面	—	0.009	1	0.009	0.1

\* 一个探测区 25 个采样的平均结果。

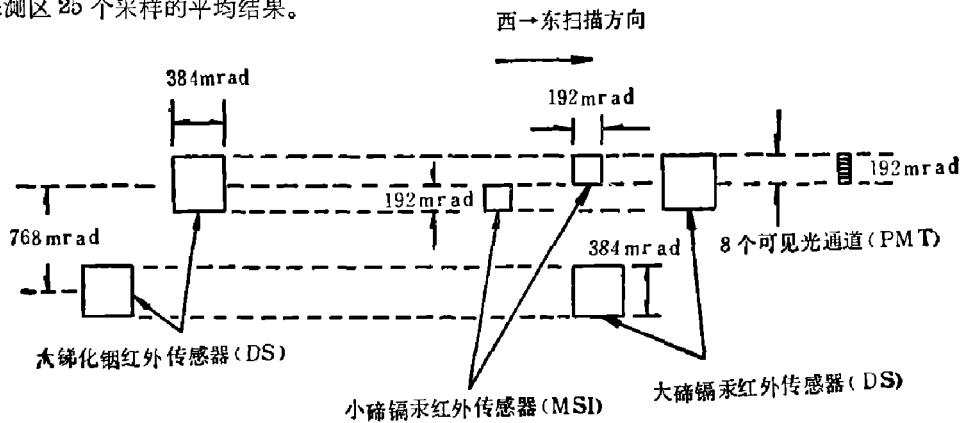


图1 传感器配置示意图

Fig. 1 Arrangement of detectors

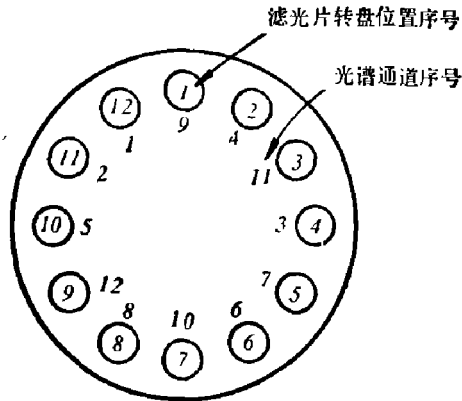


图2 滤光片转盘位置序号和光谱通道序号对应关系

Fig. 2 Serial number of filter wheel position vs serial number of spectral channel

方式同 VISSR 一样。2. 多光谱图象(MSI)工作方式。这种方式除产生 VISSR 云图外, 还有任意两个附加的红外通道云图。3. 静态探测(DS)方式。这种方式利用位于  $3.6\sim 14.7\ \mu\text{m}$  谱区内的 12 个分立通道, 对同一地点进行数次扫描来测量大气温、湿度的垂直分布。所谓“静态”, 就是指扫描镜在某段时间内不步进地单一扫描同一区域。

在后面两种工作方式时, 对空间分辨率、光谱通道、复盖范围以及观测频次有多种选择的可能性。VAS 具有可编程序的特点, 把与工作方式有关的参数编入程序, 存贮在星上处理器内, 使得地面操作员能与卫星对话, 利用最新的观测值使卫星按照地面指令工作。

### 三、VAS 轨道校准方法

VAS 轨道校准有可见和红外的阶梯电压校准及红外光闸校准两种方式。

电压校准是将阶梯电压插入前置放大器输入端, 对可见和红外通道的增益和线性性进行校准, 精度可达 0.1%。光闸校准是使用温度监测的圆锥型黑体和反射光闸对红外辐射进行校准。

校准用的光闸, 在 VAS 红外通道不扫描地球期间, 插入到通道的光程内, 使黑体能量反射到红外传感器上。并且在黑体内附加了按指令工作的加热器, 可以在多个点测量温度。根据指令, 将这些温度资料插入每一条扫描线的资料流中。

在把 VAS 红外传感器的输出电压转换成辐射值的过程中, 通常假定两者呈线性关系。若宇宙空间、内部黑体和目标物的输出电压分别为  $V_1$ 、 $V_2$  和  $V_3$ , 则有:

$$V_1 = \alpha(1-\gamma)B(T_A) + V_0, \quad (1)$$

$$V_2 = \alpha[(1-\varepsilon)B(T_s) + \varepsilon B(T_{so})] + V_0, \quad (2)$$

$$V_3 = \alpha[\gamma N_T + (1-\gamma)B(T_A)] + V_0. \quad (3)$$

其中,  $\alpha$  是 VAS 辐射仪的响应率,  $\gamma$  是 VAS 望远镜的透过率,  $B(T)$  是温度为  $T$  的黑体普朗克辐射,  $\varepsilon$  是光闸的比辐射率,  $T_{so}$  是光闸温度,  $T_s$  是黑体温度,  $T_A$  是 VAS 望远镜负荷平均温度,  $N_T$  是入射辐射,  $V_0$  是系统的补偿电压。

由式(1)、(2)、(3)可得:

$$N_T = \frac{1}{\gamma} [(1-\varepsilon)B(T_s) + \varepsilon B(T_{so}) - (1-\gamma)B(T_A)] \frac{V_3 - V_1}{V_2 - V_1}. \quad (4)$$

式(4)右边中括号中的第三项可根据 VAS 望远镜内各部分温度  $T_i$  求出:

$$(1-\gamma)B(T_A) = \sum_i a_i B(T_i), \quad (5)$$

其中  $a_i$  是由望远镜内各部分的反射率、比辐射率、透过率等决定的常数。

若外部黑体温度用  $T_E$  表示, 由式(4)、式(5)得:

$$\begin{aligned} B(T_E) &= N_T - \frac{V_2 - V_1}{V_3 - V_1} \\ &= \frac{1}{\gamma} [(1-\varepsilon)B(T_s) + \varepsilon B(T_{so}) - \sum_i a_i B(T_i)]. \end{aligned} \quad (6)$$

假定各处温度与  $T_s$  量级相当, 用泰勒级数展开上式, 并作适当简化<sup>[1]</sup>, 则有:

$$T_E - T_s = -\frac{1}{\gamma} \sum_i a_i (T_i - T_s). \quad (7)$$

式(7)亦可改写为

$$T_B = T_s - \sum_i C_i(T_i - T_s), \quad (8)$$

其中  $C_i = a_i/\gamma$ 。由式(4)、(6)、(8)得

$$N_T = B(T_B) \frac{V_3 - V_1}{V_2 - V_1},$$

即

$$N_T = B[T_s - \sum_i C_i(T_i - T_s)] \frac{V_3 - V_1}{V_2 - V_1}. \quad (9)$$

这样,在测出  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ 、 $T_s$  及  $T_i$  之后,利用发射前确定的与望远镜内各部分光学特性有关的常数  $C_i$ ,再根据式(9),即可求出对应于目标物的辐射仪输出电压  $V_3$  的辐射值  $N_T$ ,实现红外校准目的。

#### 四、利用 VAS 测值反演大气廓线的方法

利用 VAS 仪器 DS 方式的测值反演大气温度廓线  $T(P)$  的算法,是以 Smith 迭代法为基础的。根据以温度表示的普朗克辐射的一级泰勒展开式,辐射传递方程变为<sup>[2]</sup>

$$T_B(\nu) - T_B^n(\nu) = \int_0^{P_s} [T(P) - T^n(P)] W^n(\nu, p, \theta) \frac{dp}{p}, \quad (10)$$

其中  $T_B(\nu)$  是亮度温度测值,  $T_B^n(\nu)$  是假定真实温度  $T(P)$  为估值  $T^n(P)$  时得到的亮度温度,  $W^n(\nu, p, \theta)$  是温度廓线的权重函数。

$$\begin{cases} T_B^n(\nu) = B^{-1}[R^n(\nu, \theta)], \\ R^n(\nu, \theta) = B(\nu, T_s) \tau^n(\nu, p_s, \theta) - \int_0^{P_s} B(\nu, T^n) \frac{\partial \tau(\nu, p, \theta)}{\partial \ln p} \frac{dp}{p}, \\ W^n(\nu, p, \theta) = \left[ \frac{\partial B(\nu, T^n)}{\partial B(\nu, T_B^n)} \right] \left[ \frac{\partial \tau^n(\nu, p, \theta)}{\partial \ln p} \right]. \end{cases} \quad (11)$$

按 Smith(1970) 迭代解法,式(10)的迭代解为

$$T^{n+1}(p_k) = T^n(p_k) + \frac{\sum_{j=1}^M W^*(\nu_j, p_k, \theta) [T_B(\nu_j) - T_B^n(\nu_j)]}{\sum_{j=1}^M W^*(\nu_j, p_k, \theta)}, \quad (12)$$

式中上标  $n$  表示迭代次数,下标  $k$  表示大气层次,  $j$  表示光谱通道序号。

$$\begin{cases} W^*(\nu_j, p_k, \theta) = \frac{W^n(\nu_j, p_k, \theta)}{\epsilon(\nu_j)}, \\ \epsilon(\nu_j) = \frac{\sigma(\nu_j)}{\left[ \frac{\partial B(\nu_j, T_B)}{\partial T} \right] [s(\nu_j) N(\nu_j)]^{1/2}}. \end{cases} \quad (13)$$

在式(13)中,  $\sigma(\nu_j)$  是表 1 中给出的信号采样噪声;  $S(\nu_j)$  是自旋计数值 (spin budget), 即对于通道  $\nu_j$ , 某一滤光片转盘位置的卫星自旋数;  $N(\nu_j)$  是辐射的空间采样数。

式(12)的收敛条件为

$$\sum_{j=1}^M [T_B^n(\nu_j) - T_B^{n-1}(\nu_j)]^2 \leq \frac{1}{10} \sum_{j=1}^M \epsilon^2(\nu_j). \quad (14)$$

式中系数  $\frac{1}{10}$  是根据经验得出的,可保证从一次迭代到下一次迭代得到的温度廓线有明显变化。

式(11)中的表层温度  $T_s$  可以用多窗区近似法 (Split Window approximation) 求出。根据参考文献[2], 有

$$T_s = T_B(11 \mu\text{m}) + K [T_B(11 \mu\text{m}) - T_B(12 \mu\text{m})],$$

式中  $K$  是常数。

大气湿度廓线的反演方法与上述温度廓线反演方法类似。第  $(n+1)$  次的水汽可降水量 (precipitable water vapor) 迭代解为

$$u^{n+1}(p_j) = u^n(p_j) \left\{ \frac{\sum_{i=1}^I W_w^*(\nu_i, p_j) \gamma^n(\nu_i)}{\sum_{i=1}^I W_w^*(\nu_i, p_j)} \right\}, \quad (15)$$

式中上标  $n$  表示迭代次数, 下标  $j$  表示大气层次, 下标  $i$  表示光谱通道序号。

$$\begin{cases} W_w^*(\nu_i, p_j) = \frac{W_w^n(\nu_i, p_j)}{\epsilon(\nu_i)}, \\ W_w^n(\nu_i, p_j) = \tau^n(\nu_i, p) \ln \tau^n(\nu_i, p) \frac{\partial B(\nu_i, T^n)/\partial T}{\partial B(\nu_i, T_B^n)/\partial T} \frac{\partial T}{\partial \ln p}, \\ \gamma^n(\nu_i) = \frac{u(p)}{u^n p} = \frac{T_B(\nu_i) - T_B^n(\nu_i)}{\int_0^{p_s} W_w^n(\nu_i, p) \frac{dp}{p}}. \end{cases} \quad (16)$$

混合比  $q(p)$  的迭代解为

$$q^{n+1}(p) = q^n(p) \left[ \frac{u^{n+1}(p)}{u^n(p)} \right] + g u^n(p) \frac{\partial}{\partial p} \left[ \frac{u^{n+1}(p)}{u^n(p)} \right]. \quad (17)$$

式(17)中的  $g$  为重力加速度。式(16)中的  $\epsilon(\nu_i)$  同式(13)中的  $\epsilon$  值。

Smith<sup>[2]</sup> 还给出了近似求解水汽含量的一种参数法。将水汽取为三层。  $p_1 = 700 \text{ mbar}$ 、 $p_2 = 500 \text{ mbar}$ 、 $p_3 = 300 \text{ mbar}$ , 分别对应于 VAS 的三个水汽通道的权重函数峰值高度。假定  $u(p)$  是两个参数  $c_1$  和  $c_2$  以及气压  $p$  的函数, 即

$$\ln \frac{u(p)}{u_0(p)} = \begin{cases} 0, \\ c_1 \left( \frac{p - p_3}{p_1 - p_3} \right), \\ c_1 \left( \frac{p_2 - p}{p_2 - p_1} \right) + c_2 \left( \frac{p - p_1}{p_2 - p_1} \right), \\ c_2 \left( \frac{p_3 - p}{p_3 - p_3} \right), \\ 0. \end{cases} \quad (18)$$

式中, 下标  $s$  表示地面, 并假定在地面或  $300 \text{ mbar}$  高度之上的区域的水汽含量的真实廓线  $U(p)$  与参考廓线  $U_0(p)$  是相同的, 而  $U_0(p)$  是对应于层平均湿度廓线的。参数  $c_1$  和  $c_2$  可根据辐射传递方程用最小二乘法求出。

在用 VAS 辐射测值求解大气廓线的过程中, 初估廓线可选用国家气象中心的预报值或气候廓线。解中使用的透过率可采用 McMillin 和 Fleming<sup>[4]</sup> 的快速算法得出。

## 五、结果分析与气象上的可能应用

七十年代初, Suomi 等人提出从地球静止高度探测大气的设想之后, 经过威斯康星大

学、NOAA、NASA、圣巴巴拉研究中心和韦斯汀豪斯电气公司的紧密合作，十年后研制成 VAS，并在 1980 年发射的 GOES-D 上首次试验。威斯康星大学空间科学和工程中心实时接收 VAS 的探测资料，采用上述迭代法，用人机对话数据处理系统 (MCIDAS) 进行处理，图 3 系结果之一。其后又发射了两颗 GOES 卫星，近四年来的试验，特别是 1982 年的 VAS/AVE (VAS 大气参量试验) 表明，VAS 探测大气结构的方案是可行的 (参见图 4)<sup>[2]</sup>，尤其是在帮助人们认识局地中尺度天气系统并作出“现实预报”方面起了很好的作用<sup>[6]</sup>。水汽云图能比红外云图更好地确定缺少风报告和卷云移动矢量地区的大尺度高空流场，更精确地定

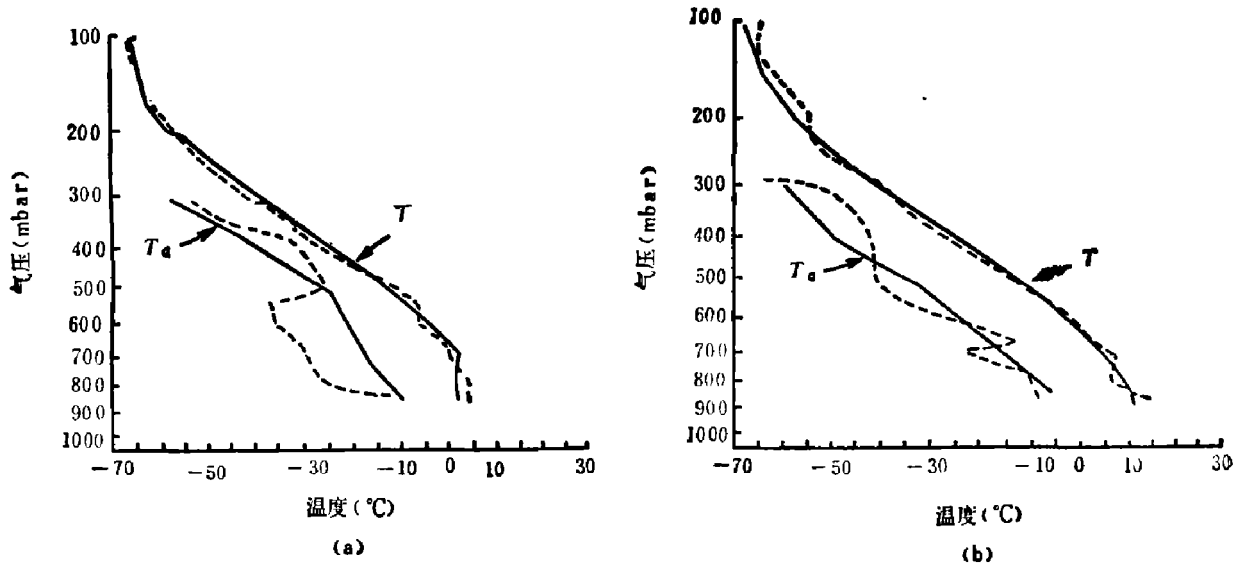


图 3 VAS 反演结果与无线电探空廓线之比较 (拉皮德城, 1980 年 10 月 11~12 日)

Fig. 3 Comparison of VAS retrievals and radiosonde profiles  
(Rapid city, Oct. 11~12, 1980)

— VAS 反演结果, (a) 为 14 GMT, (b) 为 20 GMT  
 ..... 无线电探空廓线, (a) 为 12 GMT, (b) 为 00 GMT

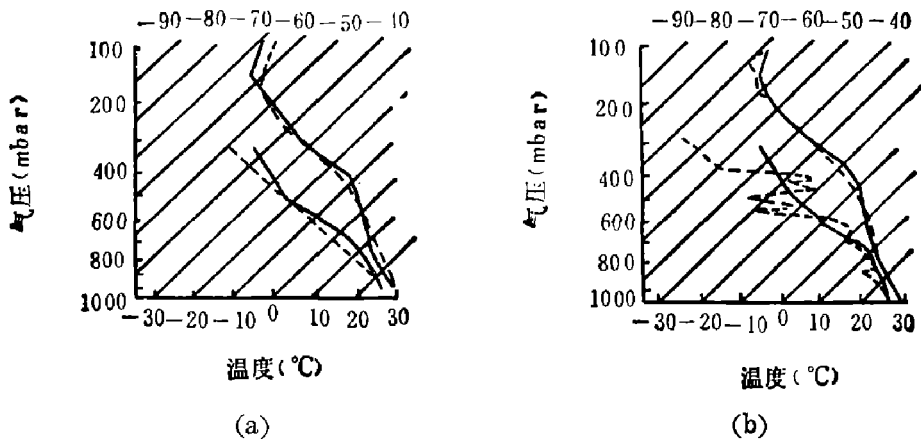


图 4 VAS 反演结果与常规值之比较

(Grand cayman, 19°N, 81°M, 1982 年 9 月 1 日 12 GMT)

Fig. 4 Retrievals of atmospheric temperature and dewpoint  
(solid curves) at Grand caymay on sep 1, 1982 (12 GMT)

— VAS 反演结果  
 ..... (a) 为国家气象中心 12 GMT 预报廓线  
 ..... (b) 为 Grand Cayman 无线电探空观测值

位和诊断高层环流特征,如风极大值、环流中心、变性区等,还为云气候学研究积累了宝贵的资料。此外,对于海洋研究,如洋流边界的定位和跟踪、涌流区检测、海面温度测定等等,也是最有成效的应用领域之一。

须着重指出,VAS 试验研究的最终目的是为大气结构和动力学研究提供定量观测资料,其多光谱数据能用于气象学多种研究领域。由于测量时间间隔短,且适于局部地区,所以它的最直接应用是中尺度和强风暴的研究和预测,预计有以下几方面:

(1) 中尺度系统及其环境作用的估计分析,研究这种系统的动力和结构特性,如积云对流的中尺度激发和诊断。

(2) 典型非地转运动及其温、湿场灵敏性的研究分析。

(3) 降水特性的卫星和地面观测的综合评价。

(4) 中尺度风计算的研究,以提供一种利用 VAS 云图通过高度定量测定和水汽图形跟踪来改进云-风预报的方法。

(5) 强风暴的“现时预报”试验研究,以确定 VAS 资料在作强风暴发展短时预报方面的能力。

试验表明, VAS 探测具有以下一些优点:

(1) 能多次观测任一既定区域,可以较好地判释时、空梯度,提高反演精度。

(2) 容易与其它来源的资料相匹配,能有效地改进空间分辨率。

(3) 由于只有一类探测器,辐射校准及数据订正可大大简化。

VAS 大气参数垂直探测的最大局限性是由于它是在红外光谱区工作,由于云中的水对红外辐射的吸收,导致在多云区探测无效。另外,光谱分辨率较低,限制了 VAS 的垂直探测分辨率。当然,这可以通过增加微波探测手段和使用高分辨率干涉方法加以改进。预计在 1985 年以前仍处于试验或准业务使用阶段,可望在八十年代后期, VAS 将会投入正式业务使用。

## 参 考 文 献

- [1] 木村光一,气象卫星センサー技术报告, 4(1981), 133~140.
- [2] Smith W. L. et al., *Journal of the Atmospheric Sciences*, 40 (1983), 8.
- [3] Smith W. L., *Appl. Opt.*, 9 (1970), 9.
- [4] McMillin L. M. and Fleming H. E., *Appl. Opt.*, 15 (1976), 2; 16 (1977), 5; 18 (1979), 10.
- [5] Smith W. L. et al., *Bulletin of the American Meteorological Society*, 62 (1981), 2.
- [6] NASA, CP 2253, 1982.

## REVIEW ON VAS EXPERIMENTS

WANG QINMO

(Satellite Meteorological Center, SMA)

### ABSTRACT

The experimental results and some potential applications of GOES/VAS data in meteorology are reviewed.