

空基微波辐射计遥感晴天大气可降水量: 不同通道组合和亮温函数形式的 效果的比较分析*

陈洪滨 吕达仁 魏 重 刘锦丽

(中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测开放实验室, 北京 100029)

摘 要 为了监测全球海洋上空的大气可降水量, 已发射上天多种星载微波波谱仪和辐射计, 相应地发展建立了多种反演算式。我们利用逐步回归分析, 研究比较了反演晴天大气可降水量 (P_w) 的多种通道组合以及算式中不同的亮温 (T_B) 函数形式的效果。主要结果有: (1) 对应于高中低 P_w 值有不同的最佳通道组合; (2) 常选的水汽吸收中心线 22.235 GHz 不太适合于反演高中且变化范围大的 P_w 值; (3) 有必要建立分气候区域和分季节的反演算式; (4) 在反演算式中采用 $\ln(T_0 - T_B)$ 一般比线性形式有更好的回归和反演效果, 但在有 22.235 GHz 通道时则不然; (5) 反演中低或变化范围大的 P_w 时, 22.235 GHz 亮温的平方项能显著改善回归和反演结果。

关键词 微波辐射计 大气可降水量 反演算式

1 引言

监测全球范围大气中的可降水量 (P_w , 即大气柱中垂直积分的总水汽含量) 的分布和变化是一项十分重要的工作。许多空间遥感 (例如, 微波高度计测高和红外反演海面温度 SST 等) 都需要作水汽订正, 而作水汽订正的前提是要确定大气中的水汽量。大气可降水量本身就是一个重要的气象参量。有人已经证明, 将此参数输入数值预报模式将使中小尺度的天气预报效果得到改善。此外, 全球的 P_w 分布和变化的资料对于天气乃至全球气候变化等研究也是十分有用的。

大量理论研究和实际观测都表明, 空间微波辐射计目前是监测大洋上空大气可降水量最有效的工具, 其精度达 10%, 这一精度是现有其他遥感技术手段达不到的^[1]。迄今为止, 上天的微波辐射计已有多种, 详见文献[2,3]。现用于反演 P_w 的通道都选 22.235 GHz 吸收线或近翼频率加上消除海面影响的窗区通道。将来有可能采用 183.3 GHz 吸收线附近的频率来反演水汽垂直结构和高纬低水汽量^[4]。

目前主要用于反演 P_w 已被选用的频率大致有 7 个, 按其高低顺序排列是: 18.5、19.35、21、22.235、23.8、31.5 和 37 GHz。反演 P_w 的通道组合以及算式多种多

1995-11-15 收到, 1996-01-09 收到修改稿

* 本工作获航天技术有关项目和国家自然科学基金的联合资助。第一作者还获得国家教委留学人员回国工作启动资金的支持

样^[5~10]。本工作的目的是利用逐步回归分析,研究和比较不同通道组合和在算式中不同的亮温函数形式的回归及反演效果,从而确定空间微波辐射计遥感反演晴天大气可降水量的“最优”通道组合和方程形式。

2 亮温 (T_B) 模拟计算

为了进行逐步回归分析,我们需要有资料样本集合。因为目前尚不可能获得 7 通道同步亮温观测资料以及相应的 P_w 资料,我们采用 Wilheit 和 Chang (1980)^[1] 的准-统计方法来构造人工样本集并建立 T_B 与 P_w 间的关系式。

微波辐射计亮温用 Chen^[11]发展的一个大气-海(地)面耦合的微波辐射传输模式来模拟计算。此模式已经充分验证,可以模拟计算多种大气(可包括云雨层)和海(地)表条件下的视在亮温(即到达天线处的 T_B)。如给定仪器的响应函数以及天线特性,则可以模拟计算仪器“真实”的测值。

这里,我们计算观测天底角为 0° 时海洋上空通道的单色视亮温。计算海面比辐射率和反射率时假定海面平静,此时反射率很容易通过 Fresnel 公式计算出。海面水温假定与其上的空气温度一致。海水盐度在所考虑的频段对比辐射率影响极小,故取平均值。实际上,海面微波比辐射率还是风速的函数(很复杂),可参考 Wentz^[12]等人的模式来考虑。这里我们认为风速对比辐射率的影响并不影响以下的逐步回归分析研究所得的相对比较结果,为了计算简捷,故不予考虑。

亮温模拟计算中所需的大气温度、气压和湿度廓线由探空资料给定。我们选用三组探空资料。第一组取自雅浦(150份)和关岛(200份),共计350份,代表热带或夏季高 P_w 的情况;第二组取自上海1993年1~7月(440份),代表中高 P_w 且有季节变化的情况;第三组取自上海、北京1993年冬季(250份)。探空资料的选取有一定的随意性,但这三组资料基本上可以代表高中低大气可降水量的探空资料情况。对应每一份探空资料,我们计算7通道亮温值以及大气水汽垂直积分总量即 P_w 。仪器测量误差由随机数产生器模拟出加到每一个 T_B 值上去。我们假设测量误差服从正态分布,无偏,标准差 σ 为 0.5 K。这样我们就得到了三个资料样本集合。

3 回归分析

从亮温 T_B 反演大气可降水量 P_w 的一般方程式为

$$PW = \alpha_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_i f(T_{B_i}), \quad (1)$$

式中, $f(T_{B_i})$ 是 T_B 的函数; m 可以大于通道数; α_0 和 α_i 是回归系数,从上面所得的资料样本通过回归计算求得。根据文献调研, $f(T_{B_i})$ 基本上有两类,一类是线性的,即直接取 T_{B_i} 。另一类称作非线性的,通常取 $f(T_{B_i}) = \ln(T_0 - T_{B_i})$, T_0 多取 280。 $f(T_{B_i})$ 还可取其他形式,例如,Prabhakara 等人^[8]用双通道 18 和 21 GHz 反演 P_w 时取 $f(T_{B_i}) = (T_{B_{21}} - T_{B_{18}})$, 他们认为用 $(T_{B_{21}} - T_{B_{18}})$ 直接反演 P_w 受海表比辐射率变化的影响较小。Alishouse 等人^[9]的工作表明,在 SSM/I 线性回归算式中再加入 $T_{B_{22}}$

平方项会改善 P_w 估计结果。

3.1 各通道亮温在反演 P_w 中的重要性分析

我们首先对全部 7 通道亮温的线性组合与 P_w 的关系作回归分析，对 F 检验的临界值 F_α 取不同的值。 F_α 取 0 时，全部通道（因子）当选， F_α 取某一定值时仅一些重要通道当选。对应 7 通道计算出的 F_i 值列在表 1 中。 F_i 值的相对大小反映了该通道在 (1) 式中即反演 P_w 时的重要性。三组资料样本的 P_w 均值（单位： g/cm^2 ）及标准差 SD 在表中最后一列给出。

表 1 7 通道线性逐步回归分析的 F_i 值以及复相关系数 R 和残差 S_e

Ch(GHz) F_α	18.5	19.35	21	22.235	23.8	31.5	37	R	S_e	$\bar{P}_w$ (SD)
0	23.71	0.323	33.74	62.43	43.90	16.74	79.81	0.99622	0.06271	
0.5	26.08		39.00	64.07	47.24	18.29	84.16	0.99622	0.06265	5.18
18.0			30.08	73.15	57.20		95.63	0.99583	0.06256	(0.715)
0	1.44	16.09	29.95	0.024	14.37	2.29	3.10	0.99860	0.08950	
0.5	1.64	16.16	52.30		17.08	2.27	3.09	0.99860	0.08950	3.45
2.5		17.90	51.72		16.77		26.77	0.99859	0.08954	(1.68)
0	0.236	4.20	36.37	47.23	19.47	19.85	30.42	0.99765	0.05012	
0.5		4.15	36.26	49.53	19.49	20.83	31.38	0.99765	0.05003	1.30
7.0			46.75	47.23	27.93	18.37	29.44	0.99761	0.05037	(0.721)

比较 F_i 值可见：对于高中低 P_w 均值，7 通道的重要性顺序并不一样；通道 37 GHz 总是很重要，尤其在高 P_w 时最为重要；在 P_w 变化范围不大时反演水汽的三通道都重要，中心吸收频率 22.235 GHz 这一通道重要性高一点，而 18 和 19 GHz 两窗区通道远不如通道 37 GHz 重要（但 18 和 19 GHz 两通道对估测降水有用）；在 P_w 变化范围大时（对应大 SD 值），通道 22.235 GHz 不重要，这是因为此频道虽然是弱吸收线但其 T_B 对高低 P_w 值时的变化响应不一样，所以在线性回归反演变化大的 P_w 时其作用就比 21 和 23.8 GHz 两通道的小。

3.2 具体的双和三通道比较分析

根据现已上天的微波辐射计，大致有如下 8 种双和三通道组合（以下通道简写为 ch，各 ch 的小数点和单位略去不写，但 23.8 GHz 记为 24）：

双 ch：(22, 37)、(24, 37)、(24, 31)；

三ch：(19, 22, 31)、(22, 31, 37)、(18, 21, 37)、(19, 22, 37)、
(18, 22, 31)。

这些双和三 ch 线性组合的回归残差 S_e 在表 2 中给出，每一 ch 组合中的前三个数字是分别从三个资料样本集合得到的，对应高中低 P_w 均值，而最后一列为高低相加的结果。比较表中结果可见：对同一资料样本现已采用的 ch 组合的回归效果差别不很大，但双 ch 一般比三 ch 的稍差一点；反演高中 P_w 时线性通道组合 (18, 21, 37) 较优，而反演低 P_w 时 (19, 22, 37) 最优；对所有 ch 组合在 P_w 变化范围大时（对应 M 和 H+L），回归残差明显地要大，因此我们认为有必要建立分季节和分气候区域的反演算式，其间可能产生的不连续可以采用适当的平滑加以消除。

3.3 不同亮温函数形式的回归效果分析

我们再来看回归算式中用不同的亮温函数形式对回归结果的影响。表 3 中非括号的

数字对应的关系式为: $PW = \alpha_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_i \ln(280 - T_{B_i})$ 。比较表 2、表 3 中的 S_e 值说明, 函数形式 $\ln(280 - T_{B_i})$ 比线性形式 T_{B_i} 一般有稍好的回归结果, 但是有 22.235 GHz 通道且 P_w 不低时却不然。我们还改变 $\ln(T_0 - T_{B_i})$ 中的 T_0 值, 看看回归结果是否有变化, 分析结果是, T_0 取得较小时 (270), 大多数情况下有较好一点的回归结果, 原因大概是 $\ln(270 - T_{B_i})$ 有更大一点的动态范围。但 T_0 不宜取小, 因为有 (云雨、陆地) 时 T_{B_i} 值可能接近或超出 270, 使得算式失效。如果将线性形式与 $\ln(280 - T_{B_i})$ 加在一起合用并设 $F_s = 0$ 时, 往往能获得稍好一点的回归结果。

表 2 8 种通道线性组合与 P_w 的回归残差 S_e

通道组合	H	M	L	H+L
(22,37)	0.0891	0.112	0.0655	0.1611
(24,37)	0.0861	0.0980	0.0739	0.1392
(24,31)	0.0876	0.0970	0.0791	0.1377
(19,22,31)	0.0860	0.0964	0.0622	0.1399
(22,31,37)	0.0781	0.1090	0.0655	0.1607
(18,21,37)	0.0760	0.0938	0.0631	0.1321
(19,22,37)	0.0793	0.0965	0.0601	0.1398
(18,22,31)	0.0782	0.102	0.0649	0.1498

表 3 同表 2, 但 T_{B_i} 函数形式不同

通道组合	H	M	L	H+L
(22,37)	0.0974 (0.0890)	0.106 (0.0903)	0.0574 (0.0574)	0.229 (0.160)
(24,37)	0.0776	0.0960	0.0703	0.104
(24,31)	0.0791	0.0980	0.0717	0.0999
(19,22,31)	0.0874 (0.0848)	0.0980 (0.0834)	0.057 (0.057)	0.127 (0.129)
(22,31,37)	0.0823 (0.0771)	0.106 (0.0938)	0.0569 (0.0570)	0.225 (0.160)
(18,21,37)	0.0691	0.0919	0.0603	0.0991
(19,22,37)	0.0818 (0.0782)	0.0957 (0.0833)	0.0552 (0.0551)	0.139 (0.131)
(18,22,31)	0.0992 (0.0942)	0.105 (0.0881)	0.0585 (0.0584)	0.150 (0.141)

表 3 中带括号的数字是对于有 22.235 GHz 通道时在线性算式中加入 $T_{B_{22}}$ 平方项的结果。与表 2 中纯线性回归结果比较, 在高 P_w 情况下回归结果无明显改变 ($F_s = 4.0$ 时, $T_{B_{22}}$ 平方项多不被选取), 而在中低 P_w 和 P_w 变化大时却有显著的改善, 比单独采用 $\ln(280 - T_{B_i})$ 的效果还好。如同时采用 $\ln(280 - T_{B_i})$ 和 $T_{B_{22}}^2$ 项, 效果会更好一点。

对于 18 和 21 GHz 双通道组合, 我们还取 $f(T_{B_i}) = (T_{B_{21}} - T_{B_{18}})$ 作了回归分析, 结果表明无论是对应什么 P_w 情况, 其回归结果比线性组合都差。

为了进一步论证以上的回归分析结果, 我们另选 180 份上海站 1993 年的探空资料模拟计算亮温值, 并对此独立样本进行反演试验。由探空廓线计算的大气可降水量 P_w

作为真值, 从回归算式求得的 P_w 即是反演值。反演的 P_w 与真值相比较的结果表明, 好的回归算式给出好的反演结果 (高相关系数, 小 rms 误差)。这就证实了以上的回归分析比较结果。

3.4 测量误差对回归算式的影响

以上分析结果是在测量随机误差 σ 取 0.5 K 时得到的。这里我们将 σ 从 0.25 到 4.0 K 变化, 考察其对通道组合 (19, 24, 37) 反演 P_w 的线性回归算式的影响, 见表 4。正如预料地那样, 回归误差随测量误差增大而增大。但测量误差直到 4.0 K, 相对的回归误差 (S_e / P_w) 仍不大于 10%, 这表明回归反演算式对测量误差有一定的忍受力。另外, 虽然对于 H 和 M 两种样本回归误差在绝对值上差不多, 但相对于各自的 P_w 则回归的相对精度不同, 即覆盖 P_w 较大变化范围的 (对应 M 样本) 回归算式的相对精度差。对其他通道组合和 T_B 的其他函数形式也有同样的结论。

表 4 对应不同 T_B 测量误差 σ 的回归残差 S_e

$\sigma(K)$	0.25	0.50	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0
S_e (H)	0.0623	0.0871	0.1182	0.1586	0.1980	0.2693	0.3253
S_e (M)	0.0883	0.0963	0.1163	0.1478	0.1871	0.2417	0.3310

4 结论

(1) 空基微波辐射计遥感晴天大气可降水量 P_w 视其大小及不同变化范围有不同的最佳通道组合;

(2) 有必要建立分季节和分气候区域的反演算式;

(3) 反演高和变化大的 P_w 时, 水汽吸收中心频率 22.235 GHz 不可选, 这是因为 22.235 GHz 通道的亮温对高低 P_w 的响应明显不同 (非线性) 且对温湿廓线变化敏感。因此我们认为 SSM / 1 采用的三通道 (19, 22, 37) 似乎不很理想, 因为 SSM / 1 有近 50 度的观测角以及沿极地轨道飞行, 其要遥测的大气可降水量变化范围极大;

(4) 在回归反演算式中, 采用 $\ln(280 - T_{B_1})$ 比直接用亮温 T_B 通常有稍好的回归和反演结果, 但是有 22.235 GHz 通道且 P_w 不低时却不然;

(5) 估测中低 P_w 和 P_w 变化大时, 在算式中加入 $T_{B_{22}}$ 平方项, 反演结果会有所改善。

参 考 文 献

- 1 Liu, W.T., W. Tang and F.J. Wentz, 1992. Precipitable water and surface humidity over global oceans from SSM / 1 and ECMWF, *J. Geophys. Res.*, 97(C2), 2251 ~ 2264.
- 2 Ulaby, F.T., R.K. Moore and A.K. Fung, 1981. *Microwave Remote Sensing, Vol.1: Fundamentals and Radiometry*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 12 ~ 17.
- 3 陈洪滨、许丽生, 1994, 空间微波被动遥感地球大气和陆洋面, 大自然探索, 13(5), 79 ~ 85.
- 4 Wang, J.R. and T.T. Wilheit, 1989. Retrieval of total precipitable water using radiometric measurements near 92 and 183 GHz, *J. Appl. Meteor.*, 28, 146 ~ 154.
- 5 Staelin, D.H. et al., 1976. Remote Sensing of atmospheric water vapor and liquid water with the Nimbus 5

- microwave spectrometer, *J. Appl. Meteor.*, **15**, 1204~1214.
- 6 Grody, N., A. Gruber and W.C. Shen, 1980, Atmospheric water content over the tropical Pacific derived from the Nimbus 6 scanning microwave spectrometer, *J. Appl. Meteor.*, **19**, 986~996.
 - 7 Prabhakara, C., H.D. Chang, and A.T.C. Chang, 1982, Remote sensing of precipitable water over the oceans from Nimbus 7 microwave measurements, *J. Appl. Meteor.*, **21**, 59~68.
 - 8 Wilheit, T.T. and A.T.C. Chang, 1980, An algorithm for retrieval of ocean surface and atmospheric parameters from the observations of the SMMR, *Radio Sci.*, **15**, 525~544.
 - 9 Alishouse, J.C. et al., 1990, Determination of oceanic total precipitable water from the SSM / 1, *IEEE Trans Geosci. Rem. Sensing*, **GE-18**, 811~816.
 - 10 Keihm, S.J., M.A. Janssen and C.S. Ruf, 1995, TOPEX / Poseidon Microwave Radiometer (TMR): III. Wet troposphere range correction algorithm and prelaunch error budget, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sensing*, **GE-33**, 147~161.
 - 11 Chen, H.B., 1991, Simulation d'observations satellitaires passives en micro-onde, These Universite de Lille, France, **537**, 37~78.
 - 12 Wentz, F.J., 1992, Measurements of oceanic wind vector using satellite microwave radiometers, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, **GE-30**, 960~972.

Comparison of the Effects of Different Microwave Channel Combinations and T_B Functions in the Algorithm for Retrieving Precipitable Water in the Clear Atmosphere

Chen Hongbin, Lu Daren, Wei Chong and Liu Jinli

(Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observations, Institute of Atmospheric Physics,
Chinese of Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract For remote sensing of atmospheric precipitable water (P_w) over the oceans, a number of retrieval regression algorithms have been developed with different microwave channel combinations and different function forms of brightness temperature (T_B). The objective of this work is to compare and examine the effects of different channel combinations and different function forms of T_B with three simulated T_B data sample sets, corresponding to high, medium, and low mean values of P_w . The successive regression analysis indicates that: (1) the optimum dual or triple channel combination is different for different variation range of P_w ; (2) the channel 22.235 GHz is not suitable for measuring high total water vapor amount with large variation range, so the triple channel combination (19, 22, 37 GHz) used by SSM / 1 is not very ideal for the global retrieval of P_w ; (3) it is necessary to establish the climate zonally or seasonally divided retrieval algorithm because it has smaller regression residual error; (4) the function form $\ln(280 - T_B)$ generally gives better regression and retrieval results than the linear form of T_B , but it is not true for 22.235 GHz; and (5) the use of the term $T_{B_{22}}^2$ can improve the regression as well as retrieval results in the case of low and medium values of P_w .

Key words microwave radiometer precipitable water retrieval algorithm
successive regression