

文章编号: 1007-4619 (2005)01-0039-06

# 神舟四号飞船微波辐射计定标和检验( II )

## ——微波辐射计地物参数反演及其检验

王振占<sup>1</sup>, 李 芸<sup>2</sup>

(1. 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100080; 2. 国家海洋技术中心, 天津 300111)

**摘 要:** 针对神舟四号飞船微波辐射计(RAD)特殊入射角、频率的特点, 开发了海面 and 大气参数的反演算法。然后用这个算法模拟 RAD 不同通道的亮温。最后用发射后重新定标的亮温结合国外大洋浮标、小岛上的气象探空数据以及其他星载微波辐射计产品, 对 RAD 反演算法进行改进, 最后给出海面温度、风速和大气水汽含量的反演的结果, 并且对这些结果进行了检验。

**关键词:** 神舟四号飞船; 微波辐射计; 地物参数反演  
**中图分类号:** TP702 **文献标识码:** A

## 1 引 言

神舟四号飞船微波辐射计(RAD)是我们自行研制的第一个星载被动微波遥感器。自从 RAD 发射升空以后, 我们获得了大量的地球表面南北纬 40° 以内的不同通道的微波辐射电压数据。通过定标调整<sup>[1]</sup>, 我们得到地物的微波辐射亮温。在本文中我们对数据进行分析, 通过理论计算结合国外的大气和海洋微波辐射应用算法, 开发了利用 RAD 数据反演海面温度、风速和大气中总水汽含量的算法; 并且利用国外海面浮标、小岛上的气象探空数据以及其他星载微波辐射计产品, 对反演的结果进行了检验; 最后我们对反演结果进行了分析。

## 2 RAD 大气反演模式

### 2.1 导出模式

根据神舟四号飞船的轨道, 在忽略地球曲率的情况下, RAD 的海面局部入射角变化范围从 42.4°—

42.8°变化。我们取平均角度 42.6° 为基准, 分别计算从 AMSR55° 和 SSM/I53.4° 入射角的相应频率 (GHz) 转换到 42.6° 的系数, 见表 1, 表 1 中同时给出转换后的均方根误差 (*rms*)。为了实现不同角度大气下行亮温  $T_{BD}$ 、上行亮温  $T_{BU}$  和大气透过率  $\tau$  的转换, 我们应用标准的辐射传输方程, 利用 Liebe MPM '93 大气微波吸收系数模式, 应用标准 42 条大气廓线<sup>[2]</sup>, 获得不同观测角度下的上述参数。然后对理论计算结果进行分析, 转换公式为:

$$T_{BU, RAD} = a_1 * T_{BU, other} + b_1 \quad (1a)$$

$$T_{BD, RAD} = a_2 * T_{BD, other} + b_2 \quad (1b)$$

$$\tau_{RAD} = a_3 * \tau_{other} + b_3 \quad (1c)$$

不同观测角度的大气透过率  $\tau$  之间的关系可以从大气透过率的定义推导得出:

$$\tau_2 = \tau_1^a \quad (2)$$
$$a = 2 - \sec \theta_2 / \sec \theta_1$$

所以从 SSM/I 的 53.4° 转换为 RAD 的 42.6° 的系数  $a = 1.19$ , 而从 AMSR 的 55° 转换为 RAD 的 42.6° 的系数  $a = 1.22$ 。

对于液水含量的算法, 我们应用 Wentz 的方法, 对于 0°C—20°C 和  $L$  在 0—0.2mm 变化, 应用

收稿日期: 2003-07-03; 修订日期: 2003-10-21

基金项目: 国家重点项目“神舟四号微波辐射计定标、检验、评价”项目资助。

作者简介: 王振占(1969—), 男, 1994年毕业于南开大学计算机系, 1996年8月毕业于国家海洋技术中心近海工程专业微波遥感方向, 获工学硕士学位, 在读博士。主要研究方向: 被动微波遥感技术在海洋上的应用, 其中包括星载微波辐射计辐射校正方法研究、现场测试技术和方法研究、海洋和大气水文气象参数反演算法研究等。至今已有 10 余篇论文在国际会议、国内核心期刊、重大项目论文中发表。Email: wzz - stone

@yahoo.com。

Liebe<sup>[3]</sup>纯水介电常数模式,用 2 阶拟合的系数见表 2。

$$A_L = [a_{L1} + a_{L2}(T_L - 283) + a_{L3}(T_L - 283)^2] * L \quad (3)$$

表 1 RAD 算法系数

Table 1 Algorithm coefficients of RAD

RAD	6.6 42.6°		13.9 39.4°		19.35 42.6°		23.8 42.6°		37.0 42.6°	
	AMSR6.9 55°		AMSR10.7 55°		SSM/19.35 53.4°		AMSR23.8 55°		SSM/37.0 53.4°	
系数	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
$T_{BD}$ 系数	0.6984	1.1271	1.5350	-4.5093	0.8396	-0.0249	0.8498	-1.6559	0.8480	-0.5028
<i>rms</i> /K	0.0126		0.1863		0.2916		1.4540		0.3231	
$T_{BU}$ 系数	0.6988	0.3177	1.5342	3.1203	0.8415	-0.4950	0.8552	-2.2493	0.8508	-0.9912
<i>rms</i> /K	0.0118		0.1858		0.3137		1.5899		0.3485	
光学厚度系数	0.8824	0.0046	2.1325	-0.0456	1	0	1	0	1	0
<i>rms</i> /K	0.000323		0.0038		0		0		0	

表 2 液水光学厚度系数

Table 2 Coefficients of liquid water opacity

频率/GHz	6.6	13.9	19.35	23.8	37
$a_{L1}$	0.0069	0.0305	0.0586	0.0878	0.2038
$a_{L2}$	$-1.9866 \times 10^{-4}$	$-8.5635 \times 10^{-4}$	-0.0016	-0.0023	-0.0049
$a_{L3}$	$4.6714 \times 10^{-6}$	$1.9317 \times 10^{-5}$	$3.4587 \times 10^{-5}$	$4.7986 \times 10^{-5}$	$7.94444 \times 10^{-5}$

## 2.2 理论模式

我们应用标准的辐射传输方程,利用 Liebe MPM '93<sup>[4]</sup>大气微波吸收系数模式,应用 42 条标准大气廓线<sup>[2]</sup>,获得 RAD 观测角度下的大气下行亮温  $T_{BD}$ 、上行亮温  $T_{BU}$ 和大气光学厚度  $A$ 。然后对理论计算结果进行分析,通过二阶曲线拟合,形式为:

$$P = a * V^2 + b * V + c \quad (4)$$

$P$  分别表示大气下行亮温  $T_{BD}$ 、大气上行亮温  $T_{BU}$ 和大气光学厚度  $A$ 。不同频率的系数见表 3,表 4,表 5。表中同时给出拟合的均方根误差。由于所使用的 42 条大气廓线水汽含量囊括了所有可能的大气水汽含量的变化,所以,高水汽含量的廓线,在高频段误差相对较大。考虑到大气廓线的特点,我们使用 30km 以下的数据进行理论计算。

表 3 RAD 大气下行亮温  $T_{BD}$ 系数

Table 3 Coefficients of down-welling brightness temperatures of RAD

频率/GHz	6.6	13.9	19.35	22.235 *	23.8	37.0
<i>a</i>	$1.4373 \times 10^{-4}$	$3.6450 \times 10^{-4}$	$-5.3564 \times 10^{-4}$	-0.0067	-0.0046	0.0011
<i>b</i>	0.0135	0.1337	0.8495	2.4608	2.0065	0.6944
<i>c</i>	5.9415	6.3920	7.1380	10.2613	7.8663	17.8963
<i>rms</i> /K	0.1393	0.6250	1.4452	3.6075	3.1007	3.0807

表 4 RAD 大气上行亮温  $T_{BU}$  系数

Table 4 Coefficients of up-welling brightness temperatures of RAD

频率/GHz	6.6	13.9	19.35	22.235*	23.8	37.0
$a$	$1.4350 \times 10^{-4}$	$3.6549 \times 10^{-4}$	$-6.1338 \times 10^{-4}$	-0.0072	-0.0049	0.0010
$b$	0.0141	0.1369	0.8652	2.4867	2.0379	0.7070
$c$	3.3004	3.7559	4.5087	7.7367	5.2851	15.4318
rms/K	0.1387	0.6281	1.4539	2.8834	1.1887	3.0800

表 5 RAD 大气光学厚度  $A$  系数

Table 5 Coefficients of atmospheric opacity of RAD

频率/GHz	6.6	13.9	19.35	22.235*	23.8	37.0
$a$	$2.6771 \times 10^{-6}$	$6.2123 \times 10^{-6}$	$9.5822 \times 10^{-6}$	$1.1785 \times 10^{-5}$	$1.1296 \times 10^{-5}$	$3.7160 \times 10^{-5}$
$b$	$-3.9401 \times 10^{-6}$	0.0014	0.0095	0.0306	0.0236	0.0070
$c$	0.0441	0.0538	0.0675	0.0970	0.0823	0.2199
rms/K	0.0021	0.0075	0.0159	0.0945	0.0127	0.0425

注: \* 不是 RAD 频率, 但是为了数据比较, 故在上述表格中给出。

应该注意, 这里的大气光学厚度  $A$  只是包括大气水汽和氧气的贡献, 而液水的光学厚度见公式 (3)。所以这里有关的关系式只适用于没有液水存在的情况。

### 3 RAD 海洋反演模式

海面发射率  $e_p$  可以表示为两部分: 平静海面发射率和风成海面发射率两部分。平静海面的微波辐射可以由 Fresnel 方程计算。它是海水介电常数和入射角的函数, 而介电常数又是海水温度和盐度的函数<sup>[5]</sup>。海面模式的一个关键成分是海水的介电常数模式。海水的介电常数是一个复数, 它是频率  $\nu$ ,

水温  $T_s$  和海水盐度的函数。我们利用 Wentz '96 海水介电常数<sup>[6]</sup>算法和 Fresnel 方程, 计算出平静海面的多模态微波辐射计不同频率、不同极化方式下的发射率与海水温度和盐度的关系式。我们发现, 在海水温度从  $-2^\circ\text{C}$ — $30^\circ\text{C}$  和盐度在  $29\%$ — $36\%$  变化时, 海面发射率  $e_p(p=V, H)$  总可以用如下关系形式表示:

$$e_p = (a * t^2 + b * t + c) / T \quad (5)$$

其中,  $T = t + 273.16$ 。表 6 给出不同频率的系数和对应的均方根误差(K)。可见, 这样近似的结果与原来模式非常接近, 引入的误差非常微小。由于这里只有温度项, 去掉了盐度的影响, 所以对于反演海面除盐度以外的参数更加方便。

表 6 不同频率拟合的多项式系数

Table 6 Polynomial coefficients fitted for different frequencies of RAD

$f$	6.6		13.9		19.35		22.235		23.8		37	
	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H
$a$	0.0058	0.0036	0.0133	0.0094	0.0160	0.0112	0.0164	0.0119	0.0164	0.0123	0.0143	0.0133
$b$	0.2660	0.1782	-0.2988	-0.2056	-0.6032	-0.4211	-0.7139	-0.5165	-0.7631	-0.5630	-0.9558	-0.8316
$c$	129.7930	79.4744	141.3736	93.9265	158.8957	98.4573	165.0064	102.7080	168.1671	104.9546	190.6749	122.0321
rms/K	0.0948	0.0652	0.1142	0.0842	0.0878	0.0777	0.0693	0.0736	0.0599	0.0704	0.0578	0.0526

风引起海面粗糙度增加和泡沫, 使得亮温随风速的增大而单调增大。为了得到 RAD 风成海面发射率算法, 我们使用 Lojou<sup>[7]</sup> 的海面发射率模式, 用

这个模式提取风成海面发射率  $E_w$  与风速  $w$  的模式 (6)。RAD 不同频率和入射角的系数如表 7。

$$T \cdot E_w = d \cdot w^3 + e \cdot w^2 + f \cdot w + g \quad (6)$$

表 7 RAD 不同频率和入射角的风成发射率系数

Table 7 Coefficients of wind-induced emissivity of RAD

系数		<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>
6.6	$E_V$	0.0038	-0.0256	0.3242	-0.2332
	$E_H$	0.0031	-0.0156	0.5473	-0.1085
13.9	$E_V$	0.0039	-0.0244	0.4304	-0.2109
	$E_H$	0.0032	-0.0129	0.7006	-0.0655
19.35	$E_V$	0.0039	-0.0242	0.4388	-0.2079
	$E_H$	0.0030	-0.0087	0.8298	-0.0090
23.8	$E_V$	0.0039	-0.0240	0.4699	-0.2030
	$E_H$	0.0030	-0.0070	0.9048	0.0155
37.0	$E_V$	0.0041	-0.0238	0.5497	-0.1935
	$E_H$	0.0029	-0.0031	1.0948	0.0743

### 4 海面参数反演

在神舟四号飞船发射之前,我们利用前面的大气和海洋模式,模拟产生在各种海洋和大气参数下的海洋表面亮温。然后建立亮温和不同地物参数之间的统计反演算法模式。在神舟四号发射以后,我们利用 RAD 实际测量的亮温与海面的参数建立关系,对发射前算法进行改进。

#### 4.1 海面温度反演

我们反演海面温度的算法形式如公式(7)。图 1 是从 RAD 亮温、用从浮标得出的算法反演的海面温度(SST)与 TMI 的产品比较的结果。这里我们选择全球大洋中没有陆地干扰的点共 274 个点。反演的结果与 TMI 产品比较,SST 的 *rms* 为 4.37°C。为了说明反演算法的应用效果,我们在图 2 中比较了 63 个浮标 SST 与用 RAD 反演的 SST。反演的 *rms*

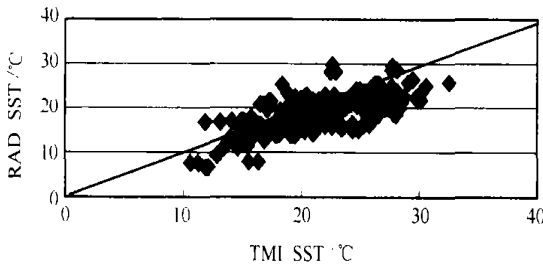


图 1 从 2003-02-05 RAD 亮温反演的海面温度(SST)与 TMI 的产品比较

Fig. 1 Comparisons of sea surface temperature(SST) of RAD and TMI

误差为 1.6°C。

$$T = -7199.9 \ln(290 - T_{B6.6V}) + 7190.2 \ln(290 - T_{B6.6H}) - 4847.3 \frac{285 - T_{B6.6H}}{285 - T_{B6.6V}} - 55.5 \frac{285 - T_{B19.35H}}{285 - T_{B19.35V}} + 41.8 \ln(290 - T_{B19.35V}) - 54.0 \ln(290 - T_{B19.35H}) + 4676.9 \quad (7)$$

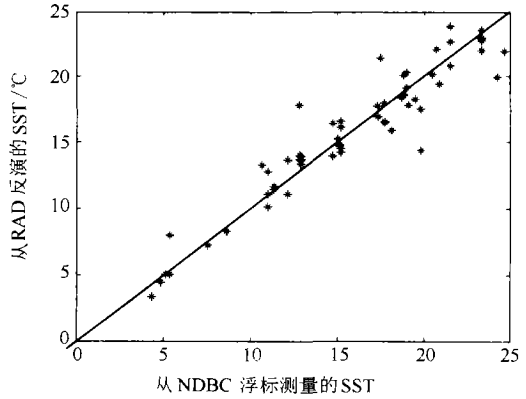


图 2 用 RAD 反演的 SST 与浮标 SST 的比较  
Fig. 2 Comparisons of sea surface temperature (SST) retrieved from RAD and buoys

#### 4.2 海面风速反演

海面风速反演的算法如公式(8)。我们给出了 RAD 反演的风速与浮标风速的比较,见图 3, *rms* 误差为 2.41m/s。

$$ws = -0.7727 T_{B19.35V} + 0.7463 T_{B19.35H} - 0.3015 T_{B23.8V} - 0.2189 T_{B37H} + 0.1368 T_{B37H} + 138.898 \quad (8)$$

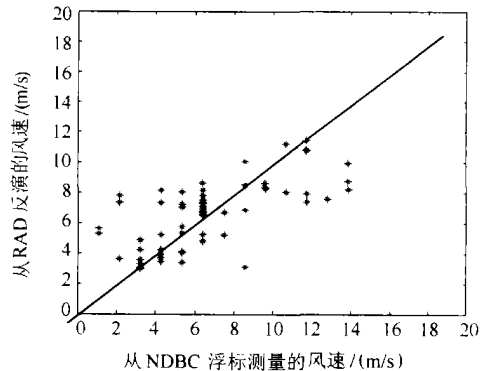


图 3 RAD 反演的风速与浮标风速的比较  
Fig. 3 Comparisons of wind speeds of RAD and TMI

### 4.3 海面大气水汽含量反演

海面大气水汽含量反演算法形式如公式(9)。图 4 是反演的 2003-02-05 的水汽含量。我们在大洋小岛上的气象探空站中找到 28 个 RAD 经过的小岛。用这些小岛上的探空数据可以计算大气的水汽含量。比较了这些水汽含量与反演的水汽含量(图 5), 我们发现, 反演的结果很接近真实测量结果,  $rms = 6.9mm$ 。

$$V = 0.1382 T_{B6.6V} + 0.7269 T_{B6.6H} - 29.8393 \ln(290 - T_{B19.35V}) - 35.9270 \ln(290 - T_{B19.35H}) - 32.2035 \ln(290 - T_{B23.8V}) + 50.2443 \ln(290 - T_{B37V}) + 44.0970 \ln(290 - T_{B37H}) - 30.8311 \quad (9)$$

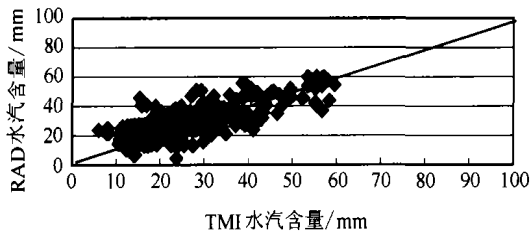


图 4 RAD 反演的 2003-02-05 的水汽含量

Fig.4 Water vapor contents (WV) retrieved from RAD brightness temperatures on Feb 5, 2003

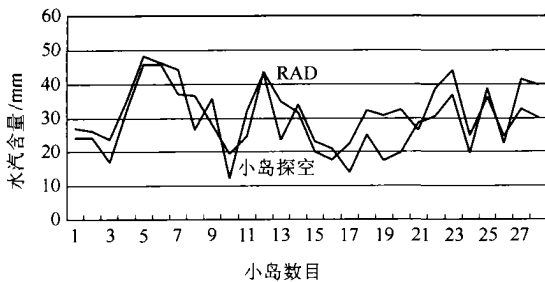


图 5 小岛上的探空数据的水汽含量与反演的水汽含量比较

Fig.5 Comparisons of WV from RAD and islands radiosonde

### 4.4 海面大气液水含量反演

下面给出云中液态水含量的算法公式(10), 我们把反演的液水含量与 TMI 产品进行了比较, 发现反演的误差较大。由于没有其它的数据来源来检验反演的效果, 所以这里我们不再进一步分析。

$$L = 0.0047 T_{B6.6V} - 0.0009 T_{B6.6H} - 0.2409 \ln(290 - T_{B19.35V}) + 0.3663 \ln(290 - T_{B19.35H}) + 0.0876 \ln(290 - T_{B23.8V}) - 0.3679 \ln(290 - T_{B37V}) - 0.1117 \ln(290 - T_{B37H}) + 0.4621 \quad (10)$$

## 5 反演结果分析

通过用 RAD 的亮温反演的海面水文和大气参数与当日的 TMI 相应产品的比较, 我们发现, 海面温度和水汽含量的反演效果比较理想, 风速的结果可以接受。图中的发散数据点只是大量数据点中少数离散的点。表 8 列出了从 RAD 反演的参数与浮标和 TMI 相应产品比较的均方根误差的比较。

表 8 RAD 反演的结果与其它真值数据的比较  
Table 8 RMS of retrievals from RAD when compared with the other data

真值来源	SST / $^{\circ}C$	风速 / $(m/s)$	水汽含量 / $mm$	液水含量 / $mm$
TMI	4.37(大洋)	3.28	8.49(大洋)	0.06
NDBC 浮标	1.6	2.41		
探空数据			6.9	

通过比较我们发现, 用我们的算法反演的结果与 TMI 的产品之间有少量的偏差。需要说明的是, 液水含量期望准确度为  $0.5mm$ , 其测量的范围为  $0-10mm$ , 而我们的算法范围为  $0-3mm$ 。所以不能直接用来比较算法的准确度。另外由于现场浮标数据有限, 我们无法进行反演结果与浮标真值之间大量的数据比较; 云中液水含量的反演误差很大, 说明或者反演算法、或者现场测量数据存在误差。由于目前没有液水含量的真值数据, 无法对实际效果进行分析。在进行比较时, 没有考虑 TMI 产品本身的误差、数据的时间不同步等差异引起的 RAD 反演误差。

## 参考文献 (References)

[1] Wang Z Z, Li Y. Calibration and Validation of Microwave Radiometer (RAD) on-board SZ-4 Spacecraft, part one [J]. *Journal of Remote Sensing*. 2004, 8(5): 397-403. [王振占, 李芸. 神舟四号飞船微波辐射计定标和检验 (第一部分) [J]. 遥感学报, 2004, 8(5): 397-403.]

[2] <http://www.fmc.se/ga/ta/rmi/ama/intercomparison>

[3] Liebe H J, Hufford G A, Takeshi M. A Model for the Complex Permittivity of Water at Frequencies Below 1 THz [J]. *International*

*Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1991, **12**(7):659–675.

- [4] Liebe H J, Hufford G A, Michael G C. Propagation Modeling of Moist Air and Suspended Water/Ice Particles at Frequencies below 1000 GHz [A], An AGARD Meeting on 'Atmospheric propagation effects through natural and man-made obscurants for visible to mm-wave radiation' [C], May, 1993.
- [5] Klein L A, Swift C T. An Improved Model for the Dielectric Constant of Sea Water at Microwave Frequencies [J]. *IEEE Transactions on*

*Antennas and Propagation*, 1979, **25**(1):104–111.

- [6] Wentz F J. AMSR Ocean Algorithm. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) [R]. Version 2, RSS Tech. Proposal 121599A-1, 2000.
- [7] Lojou J Y, Bernardin R, Eymard L. A Simple Method for Testing Brightness Temperatures from Satellite Microwave Radiometers [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1994, **11**(2):387–400.

## Calibration and Validation of Microwave Radiometer (RAD) on-board SZ-4 Spacecraft ( II ): Retrievals of Geophysical Parameters from RAD Brightness Temperatures and Their Validations

WANG Zhen-zhan<sup>1</sup>, LI Yun<sup>2</sup>

(1. Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. National Ocean Technology Center, Tianjin 300111, China)

**Abstract:** We developed a sea surface emissivity model and atmospheric model for special frequencies and incidence angles of RAD. After simulated brightness temperatures being received by RAD main beams at SZ-4 spacecraft levels, some statistical algorithms of retrieving sea surface temperatures, wind speeds, volume water vapor contents and volume liquid waters of cloud above the global ocean were developed. The retrieval results were compared and validated with those from global NDBC (National Data Buoy Center) buoys, radiosondes, and other space-borne microwave radiometer products.

**Key words:** microwave radiometer; geophysical parameter retrieval; validation