

FY-4A 大气垂直探测仪(GIIRS) 温度探测通道优选

杨雨晗^{1,2}, 尹球^{3,*}, 束炯^{1,2}

(1. 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241;

2. 华东师范大学地理科学学院, 上海 200241;

3. 中国气象局气象卫星用户办公室, 上海 200030;

4. 上海市气象局, 上海 200030)

摘要: 针对中国第二代静止气象卫星风云四号(FY-4A)的干涉式大气垂直探测仪(GIIRS)从信息容量的角度,运用分步迭代法,以及精确型辐射传输模式LBLRTM,进行温度探测通道优选试验。计算得到在全球范围反演温度廓线的56个优选通道以及FY-4A探测范围的58个优选通道,所选通道自身信息容量较高,相互之间相关性小,可应用于大气温度廓线反演和数据同化研究。

关键词: 风云四号A; 干涉式大气垂直探测仪; 通道优选; 红外高光谱; 信息容量

中图分类号: P4 文献标识码: A

Channel selection of atmosphere vertical sounder (GIIRS) onboard the FY-4A geostationary satellite

YANG Yu-Han^{1,2}, YIN Qiu^{3,*}, SHU Jiong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geographic Information Science Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200241, China;

2. School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China;

3. Meteorological Satellite User's Office of China Meteorological Administration, Shanghai 200030, China;

4. China Shanghai Meteorological Service, Shanghai 200030, China)

Abstract: Channel selection experiments for the retrieval of temperature have been carried out using the data obtained by GIIRS (the hyperspectral vertical detector equipped on the FY-4A geostationary satellite). According to information capacity, using line-by-line radiative transfer model, channels are selected by step-by-step iterative method. Finally, sensitive channels using for retrieval of temperature profile are selected, 56 channels in global and 58 in FY-4A's detection range. The selected channels have small correlation with each other, and they have higher information capacity, which can be used as the representative channel set for temperature profile retrieval research and data assimilation.

Key words: FY-4A, interferometric atmospheric vertical detector, channel selection, infrared hyperspectral, information content

PACS: 42.68.Ay, 92.60.Vb

引言

为了提高气象卫星数据在预报业务中的应用精度,从90年代初期开始,国外开始红外高光谱大气

垂直探测研究。卫星上搭载的大气探测仪已经从以前的多光谱的十几个通道发展到现在的上千通道^[1]。2002年5月发射成功的美国EOS-AQUA极轨卫星首次在卫星上实现红外高光谱大气探测,其装

收稿日期: 2018-01-11 修回日期: 2018-03-07

Received date: 2018-01-11 revised date: 2018-03-07

基金项目: 上海市气象局科技开发项目(YJ201408); 国家自然科学基金项目(41271055和41601469)

Foundation items: Supported by Technology Development Project Foundation of Shanghai Meteorological Service (YJ201408); Supported by the National Natural Science Foundation of China (41271055 #1601469)

作者简介(Biography): 杨雨晗(1993-),女,云南丽江人,硕士学位,主要研究领域为大气物理、气象卫星资料应用。E-mail: yangyh1993@126.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: yinqiu@cma.gov.cn

载的 AIRS 在红外 $3.7 \sim 16.4 \mu\text{m}$ 有 2 378 个通道^[2]。2006 年 10 月和 2012 年 9 月发射的欧洲极轨气象卫星 METOP-A、METOP-B 上的干涉式大气红外探测仪 IASI 有 8 461 个通道^[3]。2011 年 11 月发射的美国极轨气象卫星 SUOMI-NPP 搭载了 CrIS, 是继 AIRS 和 IASI 之后的又一个星载高光谱大气探测仪, 三段式光谱覆盖 $3.92 \sim 15 \mu\text{m}$, 共 1 305 个通道。我国第二代静止气象卫星 FY-4A 星于 2016 年 12 月 11 日发射成功, 国际上首次在静止气象卫星搭载了干涉式大气红外高光谱垂直探测仪(GIIRS)。

高光谱探测具有很高的光谱分辨率, 能探测到更精细的大气吸收特征, 但是高光谱探测器通道数目多, 卫星传输信息存储和处理量会过大。通道之间特性相关, 会造成目标变量反演不稳定^[4]。并且, 研究和实践证明, 在通道多的情况下, 会带入干扰反演精度的信息, 产品质量未必就能提高^[5]。为了发挥 FY-4A GIIRS 的应用效益, 从其 1 674 个探测通道中优选出适合的通道, 无论对于大气参数反演还是数据同化应用, 都是亟待解决的问题。

进行通道选择的主要原则为: (1) 通道对探测变量敏感; (2) 光谱特征非常清楚, 辐射传输模式有较高精度; (3) 探测器的噪声和定标误差小; (4) 所选通道之间信息不相关; (5) 权重函数宽度小。过去由于技术的限制, 多通过利用通道的光谱响应特性, 控制通道权重函数来有效的反演大气参数^[6-7]。目前国内外进行通道选择常用的方法有三种: 针对 Jacobian 函数选取、基于主成分影响选取和基于信息容量选取^[8-9]。事实上, 反演精度取决于 Jacobian 函数、通道噪声和背景场三个因素^[10], 仅从 Jacobian 函数出发, 会忽略其他因素对反演的影响。基于主成分影响选取, 能最大限度降低所选通道之间的相关性, 但是无法兼顾信息量。目前通道选取方法主要是基于信息容量, 该方法能较好的考虑上述影响反演精度三个因素。

将以信息熵为指标, 针对 GIIRS, 运用分步迭代法, 对反演大气温度廓线的通道进行优选, 使所选出的最优通道组合达到温度反演的最大信息容量。

1 GIIRS 与辐射传输模式

1.1 FY-4A GIIRS 技术指标

FY-4A 的 GIIRS 主要性能参数见表 1。

红外光谱波段, GIIRS 共覆盖两个谱段(图 1), 分别是 $8.85 \sim 14.28 \mu\text{m}$ ($700 \sim 1130 \text{ cm}^{-1}$) 的长波波段和 $4.45 \sim 6.06 \mu\text{m}$ ($1650 \sim 2250 \text{ cm}^{-1}$) 的短中

表 1 FY-4A 上 GIIRS 主要技术指标

Table 1 Major performance of FY-4A satellite

名称	指标要求
工作波段	长波: $700 \sim 1130 \text{ cm}^{-1}$ 中短波: $1650 \sim 2250 \text{ cm}^{-1}$ 可见光: $0.55 \sim 0.75 \mu\text{m}$
空间分辨率	2.0 km(可见光); 16.0 km(红外)
时间分辨率	中小尺度: 35 min; 区域: 67 min
光谱分辨率	长波: 0.8 cm^{-1} ; 中波: 1.6 cm^{-1}

波波段, 主要用于获取大气温湿度廓线数据。两个谱段最高光谱分辨率为 0.625 cm^{-1} , 一共 1 674 个待选通道, 其中, 长波波段 689 个, 中短波波段 985 个。在不同的波长范围, 主要针对的探测目的也不同^[11](表 2)。

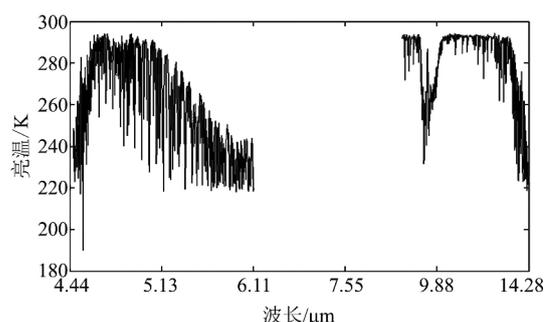


图 1 GIIRS 的光谱覆盖范围

Fig. 1 Spectral coverage of GIIRS

表 2 高光谱探测器的主要探测目的

Table 2 The main target of hyperspectral detection

光谱范围/ cm^{-1}	主要探测目的
650 ~ 790	温度廓线探测, 利用冷目标和云顶高度的敏感性, 进行部分云存在时的温度廓线反演
790 ~ 1180	表面和云特性, O_3 探测
1210 ~ 1650	水汽、温度廓线探测; N_2O 、 CH_4 和 SO_2 探测
2100 ~ 2150	CO 总量探测
2150 ~ 2250	温度廓线探测; N_2O 总量
2350 ~ 2420	温度廓线探测
2420 ~ 2700	表面和云特性

1.2 辐射传输模式

国际上根据透过率计算的方法分类, 将大气辐射传输模型大致分为两类, 即精确模型(如 FAS-COD, LBLRTM 等)和快速模型(如 RTTOV, CRTM 等)^[12-14]。

逐线积分大气分子吸收计算模式 LBLRTM (line-by-line radiative transfer model) 是国际上公认的精确逐线积分计算程序, 是计算大气分子吸收最精确的方法。相较于快速模型和精确模型, 它的计算精度都较高, 达 0.5%, 适用于计算窄光谱波段的大气分子吸收^[15]。

2 通道选择方法

2.1 信息容量

Shannon 熵可以表示信息的不确定性,从而可用于表示温度廓线反演的精确度^[16]。假设矢量 X 的误差概率密度分布为 $P(X)$,则可定义其信息熵为:

$$S[P(X)] = - \int P(X) \log [P(X)] / M(X) dX \quad (1)$$

其中 $M(X)$ 为常量。若 X 中每个元素的误差均满足正态分布,即系统的概率分布为高斯分布时,

$$S[P(X)] = \log |S| / 2 \quad (2)$$

S 为 X 的误差协方差矩阵。现引入信息熵的概念来较直接地描述该测量精度^[17]。由信息熵的定义可得到,将观测前后系统的概率分布分别用 $P_1(x)$, $P_2(x)$ 表示,易得,此次观测所需要的信息容量可以定义为 $H = S(P_1) - S(P_2)$ 。对于卫星反演而言,每一层的温度、水汽和其他待反演变量即为矢量 X 。对于待反演参数的误差协方差矩阵 S ,将通过物理反演法计算得到利用某通道进行反演时的误差协方差矩阵为:^[18]

$$S = S_a - S_a K^T (K S_a K^T + S_\varepsilon)^{-1} K S_a \quad (3)$$

$$S^{-1} = (K S_\varepsilon K^T + S_a)^{-1} \quad (4)$$

其中 S_a 为背景场的误差协方差矩阵; S_ε 为卫星观测辐射量/亮温的误差协方差矩阵; K 为 Jacobian 函数。系统的熵可统计为

$$S(P) = \ln |S| / 2 \quad (5)$$

S 为误差协方差矩阵,若观测前后描述大气廓线的误差协方差矩阵分别为 S_1 、 S_2 ,则信息容量可以表示为

$$c = (\ln |S_1| - \ln |S_2|) / 2 \quad (6)$$

高光谱探测中,将观测值记为 y (即辐射量或亮温),目标物理量(如温度、湿度等参数)为 x ,则在辐射传输过程中 y 与 x 之间的关系可记为

$$y = F(x) + \varepsilon \quad (7)$$

式中 F 为辐射传输模式算法(本文采用 LBLRTM 辐射传输模式), ε 是观测噪声或观测误差。

通常是通过求解下面函数的极小值可以得到比较精确的反演结果:

$$-2 \ln P(y|x) = (y - F(x))^T S_\varepsilon^{-1} (y - F(x)) + (x - x_a)^T S_a^{-1} (x - x_a) \quad (8)$$

其中 x_a 为背景场, S_a 为背景场误差协方差矩阵, S_ε 为观测误差协方差矩阵。通过推导,可得上式解的

一个表达式为

$$\hat{x} = x_a + S_a K^T (S_\varepsilon + K S_a K^T)^{-1} (y - K x_a) \quad (9)$$

式中 $K = \partial F / \partial x$ 为 Jacobian 矩阵,它表示每个通道的观测值相对于待反演大气参数的敏感性程度。

将温度 Jacobian 函数矩阵记为 K ,转换得到可以表示信息容量的反演大气参数精度的指标

$$c = 1 - \exp\left(\frac{1}{2n} \ln(|S S^{-1}|)\right) \quad (10)$$

其中 S_a 为被反演参数背景场的误差协方差矩阵, S 为被反演参数反演产品的误差协方差矩阵。

2.2 信息熵的分步迭代法计算方法

按照以上标准,对用高光谱分辨率资料反演大气温度廓线时的通道选择方案进行设计。参照在 1998 年 C. D. Roger 提出了信息熵-分步迭代法:以信息容量最大为标准选出通道,在迭代过程中,以每一次计算最大值选出一个通道,下一次迭代时利用该选中通道计算出新的观测误差协方差矩阵(式 3)然后将本次未选中的通道作为下一次计算的待选通道^[19]。通过 n 次迭代得到最终选出的通道组合。现实中若从待选通道选出所需通道,每一种组合形式都需要计算信息量,计算量太大,分步迭代法正好可以弥补。

首先,得到计算单个通道表征信息容量的表达式。考虑只采用一个通道进行反演的情况,记 Jacobian 函数矩阵 K 中的某一行向量 k 为该通道所对应的 Jacobian 函数, S_ε 矩阵中对应的对角元素 s_ε 为该通道的误差。化简得到该通道进行反演时的误差协方差矩阵为

$$S = S_a - S_a K^T (K S_a K^T + s_\varepsilon)^{-1} K S_a \quad (11)$$

将其化简并代入式(1)就得到

$$c = 1 - \exp\left(\frac{1}{2n} \ln\left(\left|I - \frac{((k S_a)^T k)}{s_\varepsilon + k(k S_a)^T}\right|\right)\right) \quad (12)$$

对式(12)的矩阵计算进行简化,定义被观测误差和先验误差规范后的 Jacobian 函数矩阵为 $R = S_\varepsilon^{-1/2} K S_a^{1/2}$,则表示单通道的规范后 Jacobian 矩阵为 $r = s_\varepsilon^{-1/2} k S_a^{1/2}$,代入式(12)经过化简有

$$c = 1 - \exp\left(-\frac{1}{2n} \ln(1 + r^T r)\right) \quad (13)$$

实施分步迭代法,代入信息容量的表达式(13)进行计算,则该次计算中,最大 c 所对应的通道即为该次迭代所要选中的通道。完成一次迭代,某一通道被选中后,就利用该通道按照式(3)计算出 S 作为下一次迭代的 S_a ,将其余未被选中的通道作为下

一次迭代的待选通道。应用这个方法可以记录下所有通道被选中的顺序,在实际应用中如果需要 n' 个通道,且 $n' < n$ 时无需重新选择,使得效率有所提高^[20]。最终依据以上指标和方法,将按照图 2 所示技术路线进行 GIRS 的通道优选试验。

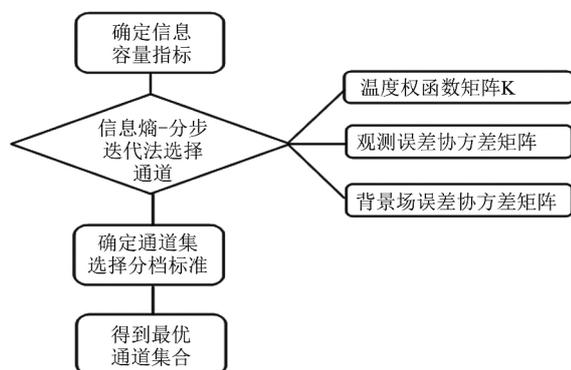


图 2 通道选择流程图

Fig. 2 The flow chart of channel selection

3 计算结果与结果分析

3.1 背景场误差协方差矩阵

利用欧洲中心 5000 条抽样大气廓线集进行计算(来自: <https://www.nwpsaf.eu/site>)。廓线集垂直分为 91 层,抽样自全球不同季节的各个区域,抽样时间为 2005 年 1 月至 2006 年 12 月,抽样点分布如图 3 所示,可见该廓线集的抽样分布除了热带区域以内抽样点较少,在全球范围上看来分布较为均匀。

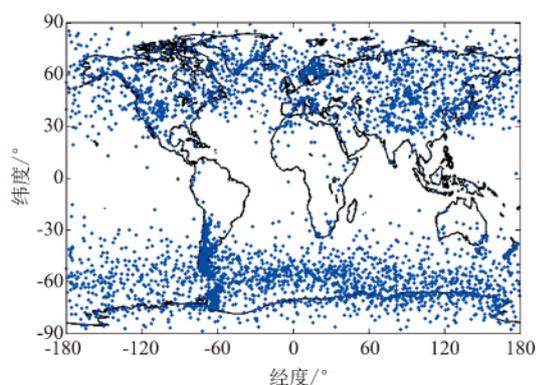


图 3 廓线集抽样点分布

Fig. 3 Sample point distribution of profile dataset

用统计方法计算得到廓线集气候平均值,并与抽样廓线实际值比较,计算二者的偏差^[16]。将大气廓线集用统计方法进行平均得到气候均值做计算的

背景场,再将每一条抽样得到的廓线减去该背景场得到样本距平,计算得到背景场的误差协方差矩阵。

$$S_a = \frac{X'_{n,m}(X'_{n,m})}{m-1}, \quad (14)$$

其中 $X'_{n,m}$ 为廓线集的距平, n 为大气廓线的层数, m 为廓线的样本数,得到背景场误差协方差矩阵分布(图 4)。

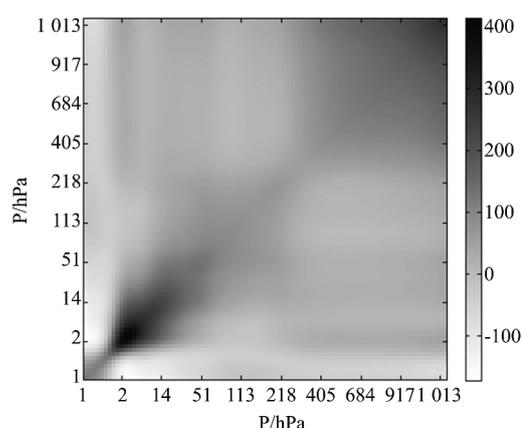


图 4 背景场误差协方差矩阵(单位: K^2)

Fig. 4 The background covariance matrix (unit: K^2)

3.2 Jacobian 矩阵

将美国标准大气廓线在辐射传输模式 LBLRTM 中计算得到 Jacobian 矩阵,如图 5。对大气廓线将温度逐层分别改变 1 K,得到不同层对于相同温度改变的敏感性。采用的辐射传输模式 LBLRTM,在垂直方向上从 0 到 1013 hPa,共 46 层。对比短中波和长波,短中波对温度每变化 1 K 的敏感性相对较高,但两个波段均在对流层以内表现出较强的敏感性。

在一些敏感波段,由于 H_2O 、 O_3 等主要气体对温度 Jacobian 矩阵的影响不可忽略,考虑将其去除,剔除噪声较大和衡量气体的强敏感通道,以净化待选通道:(1) 考虑非局地热动平衡效应的影响;(2) 在模式顶层干扰波动大,剔除长波 CO_2 区域和 H_2O 的高层通道^[21];(3) 考虑地表信息的不确定性,考虑先剔除所有峰值在地表的通道。

3.3 观测误差协方差矩阵

观测误差主要来源于观测资料误差和观测算子误差,各通道误差通常认为是互不相关,故观测误差协方差矩阵的对角元素即为各通道的误差。根据辐射传输模式计算得到仪器探测器中心像元数据的噪声等效辐射,用来代表此次 FY-4A 卫星高光谱各通道的观测误差,如图 6 所示。在长波波段观测噪声

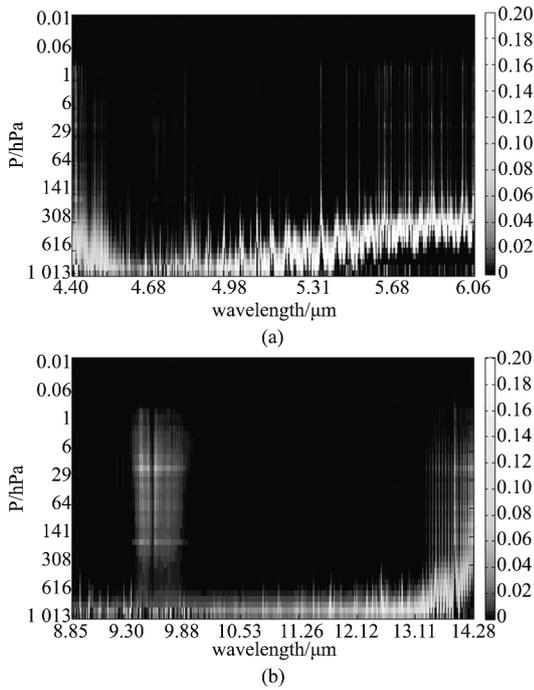


图5 温度 Jacobian 矩阵
Fig. 5 The Jacobian matrix of temperature

值在 0 ~ 0.4 Ner 之间分布, 并且受水汽等影响存在噪声较大的部分通道, 相对长波波段而言短中波波段噪声较小。

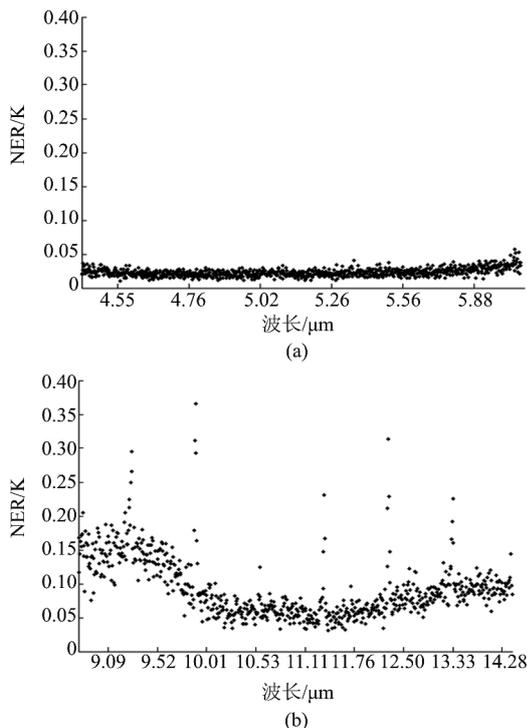


图6 GIIRS 各通道误差
Fig. 6 The channel noise of GIIRS

3.4 优选通道

通过以上计算得到的 Jacobian 矩阵, 背景场误差协方差矩阵, 观测误差协方差矩阵, 依据 2.2 中所描述的分步迭代法步骤进行通道选择。考虑到图 7 所示标记 FY-4A 的 GIIRS 探测范围, 将分别对全球范围和北半球东部(0° ~ 90°N, 0° ~ 180°E) 进行通道优选试验。

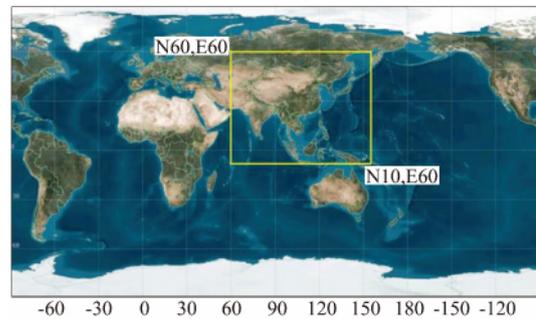


图7 GIIRS 扫描区域示例(参考来源: 国家卫星气象中心网站)
Fig. 7 GIIRS' scanning areas (Reference: <http://www.nsmc.org.cn/>)

3.4.1 全球范围

参考 AIRS 和 IASI 在业务上公布的都是约 300 个通道集合, 于是初设将要选择的温度反演通道数量为 300, 得到一组优选通道集合, 其中短中波波段满足条件的有 296 个通道, 长波波段有 4 个, 其位置分布如图 8 所示。

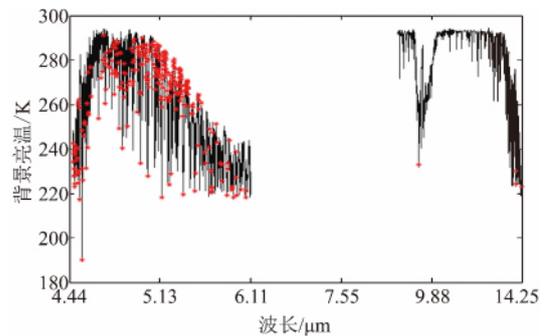


图8 初次选出的 300 个通道的分布
Fig. 8 The location of the 300 selected channels at the first experiment

利用分步迭代法进行通道选择的过程中, 随着每一次通道的选出, 表征信息容量的值会随之发生变化。由该组被选出的通道的温度信息容量随迭代次数变化的曲线(图 9), 可见对于本文研究的探测器对象 GIIRS 来说, 对全球范围, 按照被选中的次序, 单个通道信息贡献量在选出第 56 个通道之后趋

于0量级小于 10^{-6} 。进一步根据该曲线特征计算依次选出的通道的累加信息容量(图10),当精确到0.01%时,前56个通道的累积信息量占选出的300个通道累积信息量的99.99%,依照此标准确定本次全球范围温度反演通道选择为56个(图11)。最能以最少的通道数涵盖较全面的温度反演所需信息最敏感的通道。

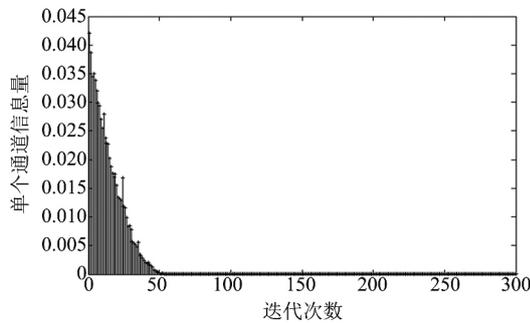


图9 单个通道温度信息容量随迭代次数的变化
Fig.9 The information content of temperature for each selected channel

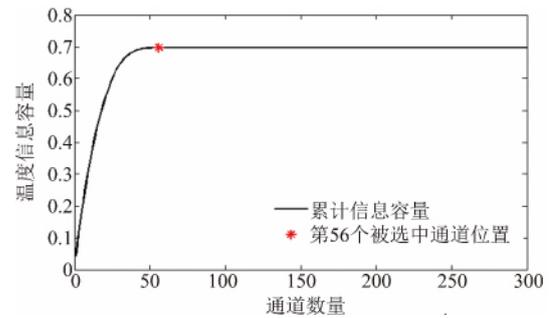


图10 温度信息容量随通道数目增加的变化
Fig.10 The information content of temperature varied with the selection process of the channel

考虑到选取通道的预设值是否会影响最终选出的通道数量及信息量,将预设值设为200和100分别再进行试验。结果显示每个通道的信息容量不会随着预设值的变化而变化,此时不同信息量的需求确定所需要的通道数量(表3)。

3.4.2 北半球东部

参照FY-2E,考虑到FY-4系列未来的星下点可能较现在偏西,故将整个北半球东部作为研究区域。

表3 最优通道集合详细信息
Table 3 Details of the optimal channel set

序号	中心波长/ μm	单通道信息量	累计信息量	序号	中心波长/ μm	单通道信息量	累计信息量
1	4.5109	0.0421	0.0421	29	4.4919	0.0084	0.6376
2	5.0794	0.0387	0.0807	30	4.5377	0.0077	0.6453
3	5.2788	0.0344	0.1152	31	4.5147	0.0057	0.6511
4	5.8330	0.0349	0.1501	32	5.5645	0.0054	0.6564
5	5.6457	0.0338	0.1839	33	4.4780	0.0052	0.6616
6	4.7790	0.0320	0.2158	34	4.4581	0.0047	0.6664
7	5.6398	0.0299	0.2457	35	4.4655	0.0055	0.6719
8	4.9582	0.0294	0.2751	36	4.4693	0.0034	0.6753
9	4.4531	0.0271	0.3022	37	4.4494	0.0032	0.6785
10	5.2858	0.0254	0.3277	38	4.8135	0.0028	0.6813
11	4.9444	0.0280	0.3556	39	4.9798	0.0024	0.6838
12	5.5749	0.0237	0.3793	40	4.4718	0.0020	0.6858
13	4.4856	0.0229	0.4022	41	4.4743	0.0019	0.6877
14	13.8768	0.0227	0.4250	42	9.4787	0.0020	0.6897
15	5.8802	0.0202	0.4451	43	4.4618	0.0016	0.6913
16	5.8522	0.0187	0.4638	44	4.5020	0.0015	0.6929
17	5.8975	0.0177	0.4815	45	4.4793	0.0012	0.6941
18	5.6437	0.0170	0.4985	46	4.4606	0.0007	0.6948
19	13.8889	0.0175	0.5160	47	4.4805	0.0006	0.6954
20	5.1480	0.0154	0.5314	48	4.8368	0.0004	0.6958
21	5.7000	0.0134	0.5449	49	4.7478	0.0003	0.6961
22	4.4568	0.0131	0.5580	50	4.4543	0.0002	0.6963
23	5.9369	0.0129	0.5708	51	5.2134	0.0001	0.6965
24	5.8267	0.0168	0.5877	52	5.2356	0.0001	0.6967
25	5.8824	0.0118	0.5995	53	14.2857	0.0001	0.6967
26	5.7678	0.0115	0.6110	54	5.9903	0.0001	0.6968
27	4.4457	0.0099	0.6210	55	5.0204	0.0001	0.6969
28	5.5153	0.0083	0.6292	56	4.5185	0.0001	0.6969

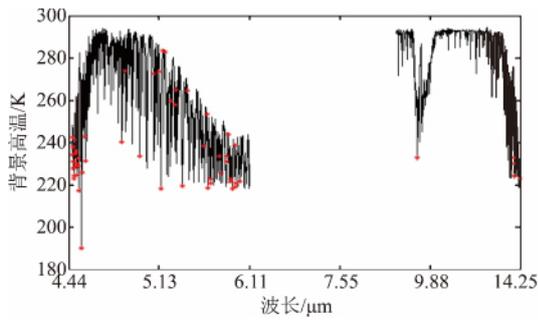


图 11 最终通道优选的 56 个通道分布
Fig. 11 The location of the 56 optimal channels

首先得到了 FY-4A 观测范围内的 300 个温度反演通道(图 12),短中波波段 294 个,长波波段有 6 个。由该组通道的温度信息容量变化的曲线(图 13)和累积信息容量变化曲线(图 14),当选出第 58 个通道后,单个通道的信息容量趋于零,累积信息容量趋于 67.22%,占 300 个通道信息容量的 99.99%,故这 58 个通道为此次试验北半球东部温度反演通道的最优组合。

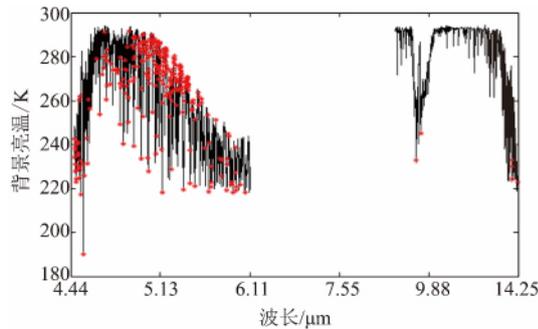


图 12 北半球东部范围初次选出的 300 个通道的分布
Fig. 12 The location of the 300 selected channels at the first experiment in Eastern part of the Northern Hemisphere

对比全球范围内和北半球东部的温度反演通道位置(图 15),除个别敏感通道位置存在差异,二者共有的通道的信息量占前者总信息量的 84.14%,占后者的 83.52%,这些共同的通道即为,不论在全球范围还是 FY-4A 扫描范围都敏感的温度反演通道。

4 结语

基于 FY-4A 卫星高光谱探测仪的应用,以信息熵作为基础,考虑到模式系统误差,观测误差,以及背景场误差,运用分步迭代法对全球范围以及 FY-4A 观测范围反演温度廓线的最优通道进行通道优

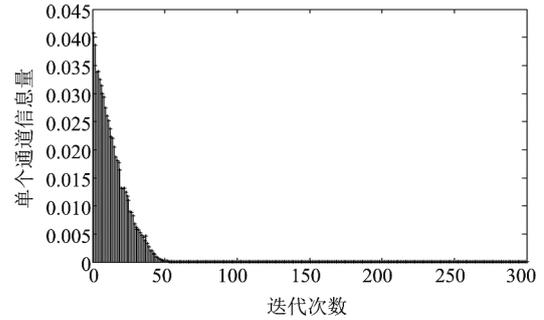


图 13 北半球东部单个通道温度信息容量随迭代次数的变化
Fig. 13 The information content of temperature for each selected channel in Eastern part of the Northern Hemisphere

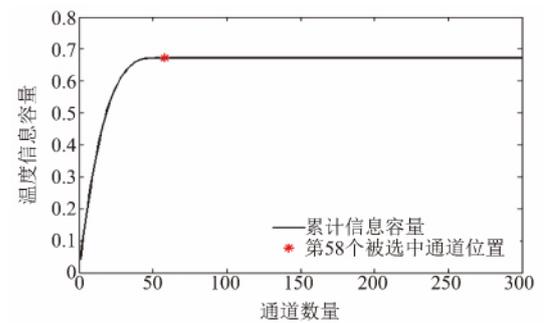


图 14 北半球东部范围温度信息容量随通道数目增加的变化
Fig. 14 The information content of temperature varied with the selection process of the channel in Eastern part of the Northern Hemisphere

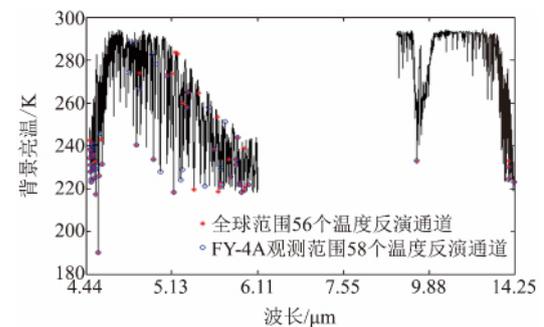


图 15 全球范围和北半球东部最优温度反演通道分布
Fig. 15 The location of the selected channels for the global and the Eastern part of the Northern Hemisphere

选。全球范围内,从 1 674 个通道中得到 56 个最优温度反演通道,该最优通道集合信息容量为 69.69%,且占 300 个通道信息量的 99.99%;北半球东部,选出 58 个通道,信息容量为 67.22%。所选通道主要分布在 $2150 \sim 2250 \text{ cm}^{-1}$ 的短中波波段和 $700 \sim 790 \text{ cm}^{-1}$ 的长波波段,对业务反演有一定的借鉴作用。

对比国外 IASI 和 AIRS 业务上公布的反演通道

集合,除个别通道差异外,整体位置大概一致,皆分布在温度反演的敏感波段,与表2给出的温度廓线探测波段大致吻合。AIRS业务公布的300个通道包括温度、湿度等反演的敏感通道,在进行GIRS通道优选时仅考虑了对大气温度廓线的反演,但这样对温度的反演将会更有针对性和专一性。但在实际应用中,如需要在通道选择角度来提高反演精度,还应考虑不同纬度、季节、下垫面带来的影响,以得到更有针对性的通道组合供反演使用。

致谢:

衷心感谢中科院上海技术物理研究所华建文研究员、李红兵副研究员的大力支持!辐射传输模式的计算在华东师范大学高性能计算机曙光5000上完成。

References

- [1] Li J, Wolf W, Menzel W. Global sounding of the atmosphere from ATOVS measurement: The algorithm and validation [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2000, **39**(8): 1248-1268.
- [2] Panguad T, Fourrie N, Guidard V. Assimilation of AIRS radiances affected by mid to low-level clouds [J]. *Monthly Weather Review*, 2009, **137**(12): 4276-4292.
- [3] Kwon E, Sohn B J. Validating IASI temperature and moisture sounding retrievals over east asia using radiosonde observations [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2012, **29**(9): 1250-1263.
- [4] Yin Qiu, Zhang Zhao-Xian, Kuang Ding-Bo. Channel selection of atmospheric remote sensing. [J]. *Applied optics*, 1996, **35**(36): 7136-7143.
- [5] XU Fei-Fei, HU Yong, YIN Qiu, et al. CO2 column sounding sensitivity analysis by IR hyper-spectroscopy [J]. *Journal of atmospheric and environmental optics* (徐菲菲, 胡勇, 尹球, 等. 红外高光谱探测柱总量CO₂的敏感性分析. 大气与环境光学学报), 2013, **8**(6): 440-447.
- [6] ZHANG Pei-Chang, WANG Zhen-Hui. Atmospheric Microwave Remote Sensing Basics (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press (张培昌, 王振会. 大气微波遥感基础. 北京: 气象出版社), 1995.
- [7] ZENG Qing-Cun. The Principle of Atmospheric Infrared Remote Sensing (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, (曾庆存. 大气红外遥测原理. 北京: 科学出版社), 1974: 174.
- [8] Rabier F, Fourrie N, Chafai D. Channel selection methods for infrared atmospheric sounding interferometer radiances [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2010, **128**(581): 1011-1027.
- [9] WANG Gen, LU Qi-Feng, ZHANG Jian-Wei, et al. Study on method and experiment of hyper-spectral atmospheric infrared sounder channel selection [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, (王根, 陆其峰, 张建伟, 等. 高光谱大气红外探测器通道选择方法及试验研究. 遥感技术与应用), 2014, **29**(5): 796-802.
- [10] GUO Hai-Long, DU Hua-Dong, HE Ming-Yuan. Research on channel selection of high spectral resolution data [J]. *Infrared* (郭海龙, 杜华栋, 何明元. 高光谱分辨率资料通道选择方法研究. 红外), 2013, **34**(7): 9-14.
- [11] DONG Chao-Hua, LI Jun, ZHANG Peng. The principle and application of satellite hyperspectral infrared atmospheric remote sensing (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, (董超华, 李俊, 张鹏, 等. 卫星高光谱红外大气遥感原理和应用. 北京: 科学出版社) 2013: 3-7
- [12] LI Jun. Research on atmospheric infrared remote sensing and its inversion [D]. Beijing: The Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences (李俊. 大气红外遥感及其反演问题研究. 北京: 中国科学院大气物理研究所), 1995.
- [13] LIU Le, LI Yao-Dong. The application and research advances of RTTOV fast radiative transfer mode [J]. *Journal of Anhui Agri. Sci.* (刘乐, 李耀东. RTTOV快速辐射传输模式应用研究进展. 安徽农业科学), 2016, **44**(33): 230-232.
- [14] DONG Pei-Ming, LI Wei, HUANG Jiang-Ping, et al. Study on the effect and sensitivity of water content on the satellite microwave remote sensing [J]. *Remote Sensing Technology and Application* (董佩明, 李玮. 卫星微波遥感受水成物影响及其敏感度分析研究. 遥感技术与应用), 2014, **29**(2): 301-308.
- [15] WEI He-Li, DAI Cong-Ming. Research of atmospheric transfer correction in radiance measurement: atmospheric radiative transfer model and the analysis of key atmospheric parameters [J]. *Infrared and Laser Engineering* (魏合理, 戴聪明. 辐射特性测量大气传输修正研究: 大气辐射传输模式和关键大气参数分析. 红外与激光工程), 2014, **43**(3): 885-890.
- [16] ZHANG Shui-Ping. Hyperspectral atmospheric sounding information channel selection study [J]. *Journal of the Meteorological Sciences* (张水平. AIRS资料反演大气温度廓线的通道选择研究. 气象科学), 2009, **29**(4): 475-481.
- [17] Rodgers C D. Information content and optimization of high spectral resolution measurements [J]. *Proc SPIE*, 1996, **2830**: 136-147.
- [18] Collard A D. Selection of IASI channels for use in numerical weather prediction [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorol Society*, 2007, **133**(629): 1977-1991.
- [19] Rodgers C D. Inverse methods for atmospheric sounding: theory and practice [M]. Singapore: World Scientific Publishing Co Pte Ltd. 2000.
- [20] DU Hua-Dong, HUANG Si-Xun, SHI Han-Qing. Method and experiment of channel selection for high spectral resolution data [J]. *Acta Physica Sinica*, (杜华栋, 黄思训, 石汉青. 高光谱分辨率遥感资料通道最优选择方法及试验. 物理学报), 2008, **57**(12): 7685-7691.
- [21] ZHANG Jian-Wei, WANG Gen, ZHANG Hua, et al. Experiment on hyper-spectral atmospheric infrared sounder channel selection based on the cumulative effect coefficient of principal component [J]. *Trans Atmos Sci* (张建伟, 王根, 张华, 等. 基于主成分累计影响系数法的高光谱大气红外探测器的通道选择试验. 大气科学学报), 2011, **34**(1): 36-42.