

STRADM

(Scalar Thermal Radiation using Adding-
Doubling Algorithm in Matlab)

倍加累加的标量长波辐射 传输算法(Matlab 程序)

使用手册

孙丙强，高晨旭

复旦大学大气与海洋科学系

如果程序有问题，请联系孙丙强(bingqsun@fudan.edu.cn)或高晨旭(cxgao21@m.fudan.edu.cn)。

目录

1	引言	3
1.1.	编写目的	3
1.2.	背景	3
2.	程序概述	3
2.1.	功能概述	3
2.2.	程序框架	3
3.	运行环境需求	5
4.	程序运行环境	6
5.	软件使用说明	6
5.1.	子程序功能介绍	6
5.2.	主程序输入输出	8
5.3.	输入输出示例	10
5.4.	输入输出辅助程序	14
6.	个例展示	16
6.1.	初始设定	16
6.2.	程序调用	16
6.3.	屏幕输出展示	16
6.4.	结果可视化展示	17
7.	总结	19
8.	注	19

1 引言

1.1. 编写目的

本文档是基于 Matlab 程序的标量热辐射倍加累加辐射传输算法 (Scalar Thermal Radiation using Adding-Doubling algorithm in Matlab, 简称为 STRADM), 针对用户所编写的使用说明手册。本文档通过对程序的框架以及运算步骤进行了详细的描述, 方便用户通过本文档了解算法程序的功能。

1.2. 背景

开发单位: 复旦大学大气与海洋科学系

2. 程序概述

2.1. 功能概述

在平面平行近似下, 本程序是基于倍加累加法的标量辐射传输算法, 主要处理热辐射波段 (长波) 的辐射传输问题, 计算出在特定的大气温度、粒子散射和吸收廓线下以及在特定的地表温度和地表反照率下各层的辐射强度、辐射通量以及光化通量。

2.2. 程序框架

本程序使用平面平行假设, 温度、粒子散射和吸收廓线以及边界参数设定如图 1 所示。大气层顶的边界为宇宙背景辐射 (宇宙背景辐射温度为 2.725K), 地表为朗伯体表面 (地表反射各项同性)。

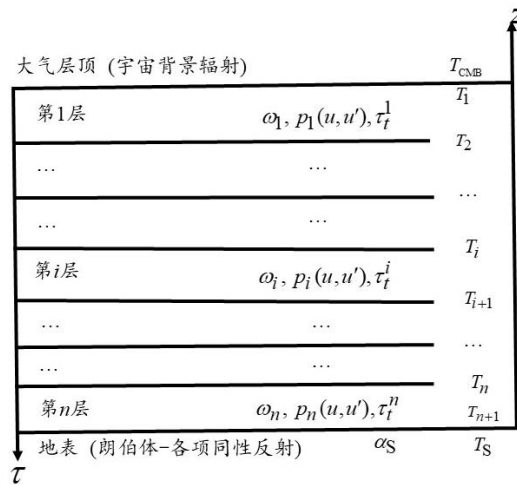


图 1 平面平行假设下长波标量辐射传输示意图

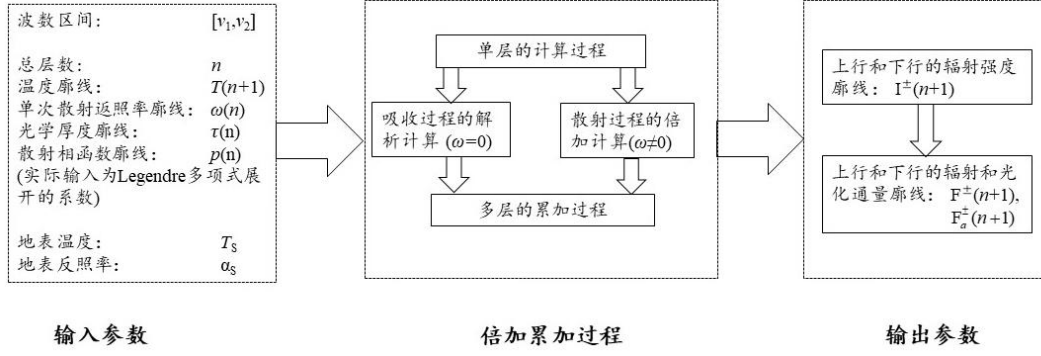


图 2 倍加累加法辐射传输程序的流程示意图

算法的整体框架如图 2 所示, 分为三个过程模块。首先是参数输入过程: 需要的参数包含光谱信息 (波数区间范围)、吸收和粒子散射信息 (大气层数、温度廓线、单次散射反照率廓线、光学厚度廓线和散射相函数展开系数廓线) 和地表边界条件 (地表反照率和地表温度); 第二部分为倍加累加过程: 首先根据大气中各层的单次散射反照率分为无粒子散射情况和粒子散射情况, 分别使用吸收解析解和倍加法得到单层的辐射结果, 然后使用累加法计算多层的辐射结果; 第三部分为结果输出过程: 通过累加法计算得到上行和下行的辐射强度廓线, 通过对辐射强度积分可以得到上行和下行的辐射通量和光化通量廓线。

单层大气的长波辐射传输示意如图 3 所示, 包括下行和上行入射引起的反射和透射, 此部分和短波辐射的处理相同, 还包括内部热辐射引起的上行和下行辐射。内部热辐射的普朗克函数可以假设为常数、随光学厚度的线性变化和指数变化等。

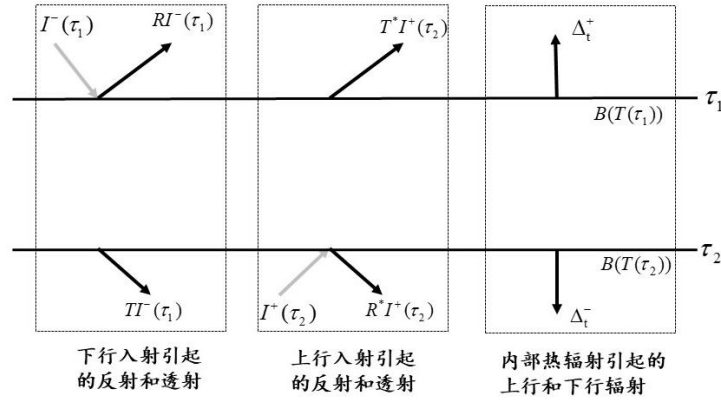


图 1 单层大气的长波辐射传输示意图, 三个虚线框分别表示由下行入射和上行入射引起的反射和透射以及内部热辐射引起的上行和下行辐射。内部热辐射的普朗克函数可以设定为常数、随光学厚度线性变化和指数变化。 R 和 T 分别代表反射和透射函数, 上标 “*” 代表入射方向为向上, Δ 代表内部热源引起的长波辐射, “+” 和 “-” 分别代表上行和下行辐射。

倍加累加法的原理如图 4 所示, 对于两层大气的辐射传输过程, 如果每层的辐射传输参数为已知 (在图中上层参数记为下标 a , 下层参数记为下标 b), 那么两层叠加后的辐射参数可以用上下两层的参数来表示, 此方法记为累加法, 主要应用于计算不同层之间的叠加计算过程; 如果上下两层的参数相同, 那么两层叠

加后为光学厚度加倍的过程，此方法记为倍加法，如图 5 所示，主要应用于单层大气的倍加计算过程。通过倍加累加过程计算所有层的辐射特性。

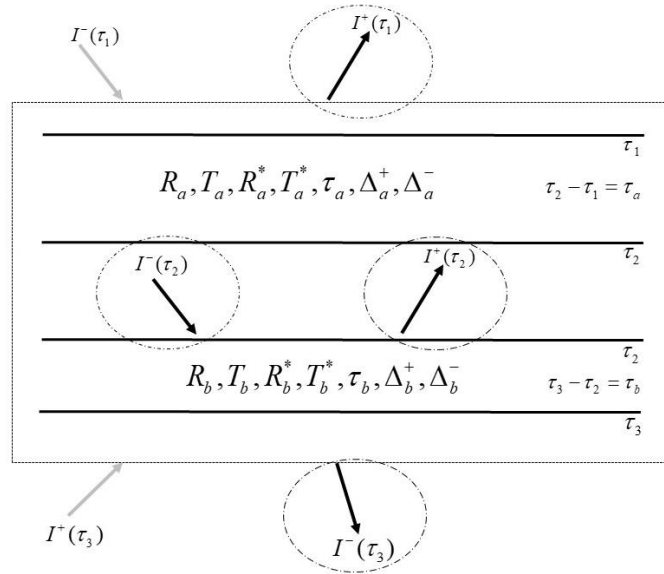


图 4 倍加累加辐射传输算法示意图。

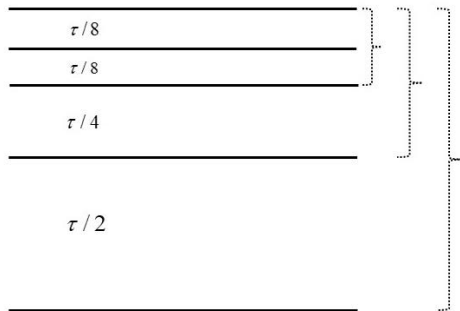


图 5 倍加算法示意图。示例展示了三次倍加过程。

3. 运行环境需求

软件要求：

类别	名称	基本环境
客户端	软件	Matlab v9.5 及以上

4. 程序运行环境

本程序使用 Matlab 进行开发，在 windows 操作系统上无需编译可以直接运行。图 6 为在 windows 10 操作系统上的运行示例，使用的 Matlab 版本为 v9.9 (R2020b)，设定好输入参数后直接点击运行即可以得到各层的辐射强度和通量等结果，命令行窗口仅输出辐射通量和光化通量结果。

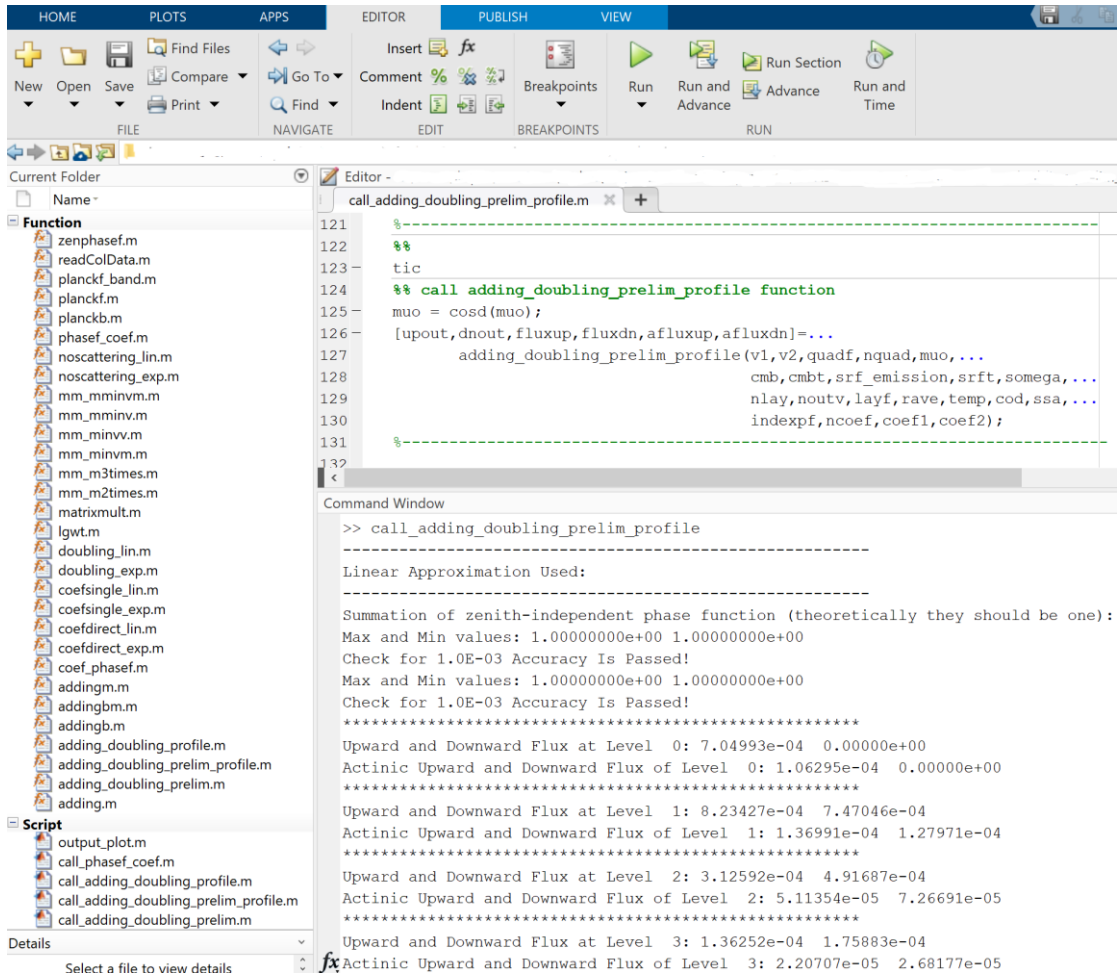


图 6 程序运行示例。所有的源函数放在同一文件夹下，在 windows 操作系统下使用当前程序时可以直接点击运行进行计算，可以计算各层的辐射强度和通量等结果，图示的输出如命令行窗口所示，仅输出了各层的上行和下行光化通量结果。

5. 软件使用说明

5.1. 子程序功能介绍

程序中可调用子程序列表如图 7 所示，主要分为相函数展开系数计算模块、普朗克函数计算模块、单次散射计算模块、吸收计算模块、矩阵操作模块以及倍

加累加模块等部分，子程序相对应的模块功能如表 1 所示。

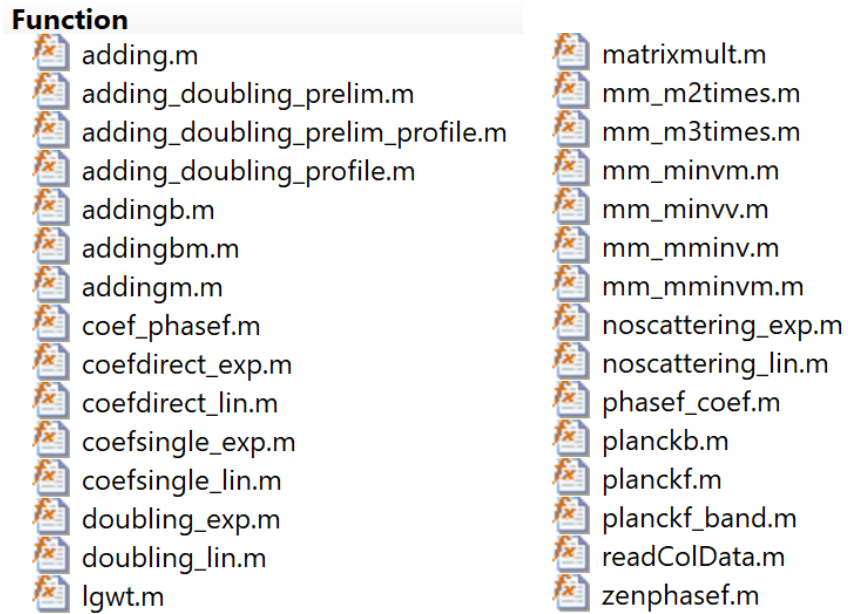


图 7 可调子程序总览。

表 1 子程序模块功能

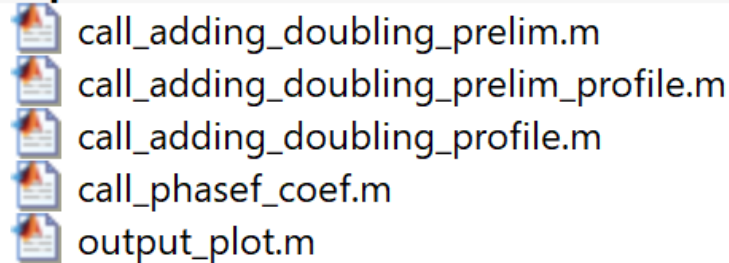
子程度模块	模块功能
matrixmult.m mm_m2times.m mm_m3times.m mm_minvm.m mm_minvv.m mm_mminv.m mm_mminvm.m	高斯天顶角和观测天顶角下组合矩阵操作 (涉及组合矩阵下的乘法、求逆以及组合 操作等)
planckb.m planckf.m planckf_band.m	普朗克函数以及亮温的计算模块
phasef_coef.m coef_phasef.m zenphasef.m	相函数展开系数以及方位角独立的相函数 计算
coefdirect_exp.m coefdirect_lin.m noscattering_exp.m noscattering_lin.m	无散射层吸收计算
coefsingl_exp.m coefsingl_lin.m doubling_exp.m doubling_lin.m	散射层计算 (倍加计算)

adding.m addingb.m addingm.m addingbm.m	累加计算
adding_doubling_prelim.m adding_doubling_profile.m adding_doubling_prelim_profile.m	倍加累加的辐射传输模块

5.2. 主程序输入输出

主程序如图 8 所示包含波数区间范围、大气层数、吸收和粒子散射参数廓线、温度廓线、地表温度和地表反照率等输入参数的设定,方位角平均的相函数计算,倍加累加过程子程序的调用,辐射强度和通量等结果的输出等。主程序的使用可以有两种方式:第一种是直接调用 `call_adding_doubling_prilim_profile.m` 进行方位角平均相函数的计算、辐射参数输入和辐射参量的计算等;第二种是先调用 `call_adding_doubling_prelim.m` 预先计算方位角平均的相函数进行保存,再调用 `call_adding_doubling_profile.m` 进行辐射参数输入和辐射参量的计算等,两个调用函数组合可以只计算方位角平均的相函数一次,可极大的节省计算时间。`Call_phasef_coef.m` 和 `output_plot.m` 为输入输出的辅助函数,将在 6.4 节介绍。

Script



```
call_adding_doubling_prelim.m
call_adding_doubling_prelim_profile.m
call_adding_doubling_profile.m
call_phasef_coef.m
output_plot.m
```

图 8 主程序总览。

主要输入输出参数变量名如表 2 所示。输入部分包括总体参数设定、高斯积分算法选择、大气层顶和地表边界条件、廓线输入、相函数相应输入、观测方位输入等,输出部分为辐射强度和能量等,其中波数单位为 cm^{-1} ,温度单位为 K,辐射强度单位为 $\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}$,通量单位为 W/m^2 ,其它为无量纲量,如果为数组或矩阵后面括号内标注维度。

表 2 程序参数变量名定义

输入输出	变量	变量名
	总体参数设定	
	v1, v2	波数光谱范围(下限, 上限)
	quadf	高斯积分算法选择
	nquad	半球计算流数

输入参数	layf, rave	普朗克函数单层的近似设定
	相函数展开系数预定义	
	coefR	瑞利散射展开系数
	nhg,gasym,coefHG	HG 相函数: 项数,非对称因子, 展开系数
	ncoef	相函数个数
	coef1,coef2,...	相函数展开系数(总数为 ncoef)
	边界条件	
	cmb	宇宙背景辐射开关
	cmbt	宇宙背景辐射温度
	srf_emission	地表黑体辐射开关
	somega	地表反照率
	srft	地表温度
	廓线输入	
	nlay	大气层数
	temp	温度(维度:nlay+1)
	cod	光学厚度(维度:nlay)
	ssa	单次散射反照率(维度:nlay)
	indexpf	相函数索引(维度:nlay)
	观测天顶角和输出层数	
	nzout	观测天顶角个数
	muo	观测天顶角余弦值(维度:nzout)
	nout	输出层数
	noutv	输出层级数索引(维度:nout)
输出参数	辐射强度输出(维度:nzout*nout)	
	upout	上行辐射强度
	dnout	下行辐射强度
	通量密度输出(维度:nzout*nout)	
	fluxup	上行辐射通量密度
	fluxdn	下行辐射通量密度
	afluxup	上行光化通量密度
	afluxdn	下行光化通量密度

5.3. 输入输出示例

```
% wavenumber interval
v1=2500.0-0.5;
v2=2500.0+0.5;

% Quadrature: 'gauss', 'radau' and quadrature number
quadf='gauss'; nquad=120;

if strcmp(quadf,'gauss')
    % Gaussian quadrature
    nmax = nquad;
elseif strcmp(quadf,'radau')
    % Radau quadrature
    nmax = nquad+1;
end

% Planck function approximation inside a layer
% layf: 'lin', 'exp', 'con'
%     if layf=='con', average style (avet=topt+(bott-topt)*rave),
%     where rave=[0.0,1.0]
layf='lin'; rave=0;
```

图 9 总体参数设定示例。

总体参数设定如图 9 所示，其中 v_2 和 v_1 分别表示积分波数的上下边界(单位为 cm^{-1})； $quadf$ 为高斯积分的选择(‘gauss’选择 Gauss-Legendre 的高斯积分，此积分不包括积分的两个端点；‘radau’选择 Radau 的高斯积分，此积分包括积分的一个或两上端点)， $nquad$ 为半球积分的流数(当选用 ‘radau’ 高斯积分时不包括端点的流数)； $layf$ 为单层普朗克函数针对光学厚度的选择(‘lin’选择线性近似，‘exp’选择指数近似，‘con’选择常数近似)， $rave$ 为选择 ‘con’ 时常数温度的设定(常数温度=上层温度+(下层温度-上层温度)* $rave$)。

```
%-Predefined EC-----
% Rayleigh-phase-function 3/4*(1+x^2)
coefR=zeros(3,1);
coefR(1)=1.0; coefR(2)=0.0; coefR(3)=0.5;
% Henyey-Greenstein-phase-function (1.0e-06 cutoff)
gasym=0.9;
nhg=ceil(-6.0*log(10)/log(gasym))+1;
coefHG=zeros(nhg,1);
for i=1:nhg
    coefHG(i)=(2.0*(i-1)+1.0)*(gasym^(i-1));
end
%-----
% Used EC
ncoef=2;
coef1=expc1(:,1);
coef2=expc2(:,1);
% coef3, coef4, ...
```

图 10 散射相函数展开系数设定。

图 10 为相函数展开系数示例。展开系数的定义为 $P(\Theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n P_n(\cos \Theta)$ ，其中 $P(\Theta)$ 为归一化的散射相函数， Θ 为散射角， α_n 为本程序使用的展开系数， $P_n(\cos \Theta)$ 为 Legendre 函数；coefR 和 coefHG 分别为常用的瑞利散射和 Henyey-Greenstein 散射相函数展开系数，可以直接调用。其中 ncoef 为所有层使用的总相函数个数；(coef1,coef2,...)是相应的相函数展开系数(示例直接从文件读入)，总数为 ncoef 个。

```
% cosmic microwave background radiation
cmb=false;
cmbt = 2.725;

% surface parameters
% Surface emission (true or false)
srf_emission=true;
% surface albedo and temperature
somega=0.5;
srft=300;
```

图 11 边界条件设定。

边界条件设定如图 11 所示，其中(a)为大气层顶边界条件，其中 cmb 为微波背景辐射开关，cmbt 固定为 2.725K;(b)为地表边界条件，其中 srf_emission 为地表黑体辐射开关，somega 为地表反照率，srft 为地表温度。

```
%-----
% layers and levels (all output are at levels)
% example of 3 layers
%
%-----TOA-----
%-----level 0-----
%          layer 1
%-----level 1-----
%          layer 2
%-----level 2-----
%          layer 3
%-----level 3-----
%-----Surface-----
%
% Profiles (enumerate from top to bottom)
nlay = 23;
temp = zeros(nlay+1,1);
ssa = zeros(nlay,1);
cod = zeros(nlay,1);
indexpf = zeros(nlay,1);
% temperature, optical depth, single-scattering albedo, and phase function
% index profiles
temp = temp(:);
ssa(:) = 0.402856;
for i=1:nlay
    cod(i) = 2.0*i;
end
indexpf(1:2:nlay) = 1;
indexpf(2:2:nlay)= 2;
```

图 12 层和层级数设定以及廓线输入示例。

廓线输入示例如图 12 所示, 层数(layer, 从 1 到 nlay)和层级数(level, 从 0 到 nlay)定义如示意图所示, 其中 nlay 为总的层数, 在每一层内有特定的光学厚度, 单次散射反照率以及相应的散射相函数, ssa 和 cod(维度均为 nlay)分别为单次散射反照率和光学厚度廓线, 如果某层的 ssa 为 0, 则该层为纯吸收层没有散射发生, indexpf 是相函数的索引数组(索引和层数相对应)。层级数为 nlay+1, 温度廓线(维度为 nlay+1)定义在层级数上, 示例中直接从文件中读入。

```
% viewing levels
nout = nlay + 1;
noutv = zeros(nout,1);
noutv(1:nout) = 0:nlay;
% viewing zenith angles
nzout = 40;
muo = zeros(nzout,1);
for i=1:36
    muo(i)=(i-1)*2.5;
end
for i=37:40
    muo(i)=88.0+(i-37)*0.5;
end
```

图 13 观测层级数和观测天顶角设定。

观测层级数和观测天顶角设定如图 13 所示, nout 和 noutv(nout)分别为观测的总层级数以及具体的观测层级数; nzout 和 muo(nzout)分别为观测天顶角个数以及具体的观测天顶角。

```
%% call adding_doubling_prelim function
% expansion coefficients of azimuth-independent phase functions
muo=cosd(muo);
[zpfpp,zpfpm,zpfppo,zpfpmo]=adding_doubling_prelim(quadf,nquad,muo,ncoef,coef1,coef2);
% Preliminary save of azimuth-independent phase functions
save('..fprelim/zpfpp.mat','zpfpp','zpfppo');
save('..fprelim/zpfpm.mat','zpfpm','zpfpmo');
save('..fprelim/muo.mat','muo');
save('..fprelim/quadf.mat','quadf');
save('..fprelim/nquad.mat','nquad');
```

(a)

```
%% call adding_doubling_profile function
% load azimuth-independent phase function
load('..fprelim/zpfpp.mat');
load('..fprelim/zpfpm.mat');
load('..fprelim/muo.mat');
load('..fprelim/quadf.mat');
load('..fprelim/nquad.mat');

% call adding_doubling_profile
[upout,dnout,fluxup,fluxdn,afluxup,afluxdn]=...
    adding_doubling_profile(v1,v2,quadf,nquad,muo,...
        cmb,cmbt,srf_emission,srft,somega,...
        nlay,noutv,layf,rave,temp,cod,ssa,...
        indexpf,zpfpp,zpfpm,zpfppo,zpfpmo);
```

(b)

图 14 倍加累加子程序调用(组合调用方式)。先调用预处理函数来计算方位平均的相函数然后保存, 如图(a)所示; 再调用倍加累加计算函数对辐射传输进行计算, 在调用前先读取保存的方位平均相函数, 如图(b)所示。

```

%% call adding_doubling_prelim_profile function
muo = cosd(muo);
[upout,dnout,fluxup,fluxdn,afluxup,afluxdn]=...
    adding_doubling_prelim_profile(v1,v2,quadf,nquad,muo,...
        cmb,cmbt,srf_emission,srft,somega,...
        nlay,noutv,layf,rave,temp,cod,ssa,...
        indexpf,ncoef,coef1,coef2);

```

图 15 倍加累加子程序调用(直接调用方式)。

倍加累加子程序调用如图 14 和 15 所示，圆括号内为输入参数，方括号内为输出参数。图 14 为组合调用方式，(a)为方位角平均的散射相函数的计算并保存，(b)为倍加累加子程序的调用计算。图 15 为直接调用方式。

```

% Uncomment for Screen Print of (Actinic) Fluxes
fprintf('%s\n','*****')
for i=1:nout
    % (actinic) fluxes
    fprintf('%s2d%s %.5e %.5e\n','Upward and Downward Flux at Level ',...
        noutv(i),':',fluxup(i),fluxdn(i));
    fprintf('%s2d%s %.5e %.5e\n','Actinic Upward and Downward Flux of Level ',...
        noutv(i),':',afluxup(i),afluxdn(i));
    fprintf('%s\n','*****')
end

```

图 16 辐射通量和光化通量屏幕输出。

辐射通量和光化通量的屏幕输出如图 16 所示，输出所有观测层级数的通量，如无输出需求可注释掉此部分。

```

% .txt
vzag = acosd(muo);
nzout = size(muo,1);
fid = fopen('../foutput/upout.txt','w');
c={'%16.8e ' '%16.8e';'\n'};
for i=1:nzout
    fprintf(fid,[c{[ones(1) 2*ones(1,nout) 3]}],vzag(i),upout(i,:));
end
fclose(fid);

fid = fopen('../foutput/dnout.txt','w');
c={'%16.8e ' '%16.8e';'\n'};
for i=1:nzout
    fprintf(fid,[c{[ones(1) 2*ones(1,nout) 3]}],vzag(i),dnout(i,:));
end
fclose(fid);

fid = fopen('../foutput/flux.txt','w');
c={'%7.3f ' '%16.8e';'\n'};
for i=1:nout
    fprintf(fid,[c{[ones(1) 2*ones(1,4) 3]}],prof(noutv(i)+1),...
        fluxup(i),fluxdn(i),afluxup(i),afluxdn(i));
end
fclose(fid);

```

(a)

```

% .mat
save('../foutput/fmat/vrange.mat','v1','v2');
save('../foutput/fmat/ptemp.mat','temp','srft','srf_emission');
save('../foutput/fmat/pssa.mat','ssa','somega');
%
save('../foutput/fmat/vzag.mat','vzag');
save('../foutput/fmat/radi.mat','upout','dnout');
save('../foutput/fmat/prof.mat','prof');
save('../foutput/fmat/flux.mat','fluxup','fluxdn');
save('../foutput/fmat/aflux.mat','afluxup','afluxdn');

```

(b)

图 17 文件保存示例，图(a)和(b)分别保存为文本文件和 Matlab 文件。

图 17 为文件保存部分设定，其中图(a)为文本文件输出示例，图(b)为 Matlab 文件输出示例，此部分可以注释掉或者改成其它方式的输出。



图 18 程序所在的文件夹总览。

图 18 为 STRADM 程序的文件夹总览。所有的 STRADM 算法的源函数在 src_v1.0 文件夹，所有的计算和操作都在此文件夹下计行；高斯点的计算和文件读取函数为开源的 Matlab 源文件，保存在 aux_v1.0 文件夹，实际计算时可以把此文件夹的位置添加到 Matlab 的路径中，也可以把此文件夹中的文件直接拷贝到 src_v1.0 文件夹下进行计算；doc 为程序所使用算法细节的文章；fapp 为结果应用相关的文件存放位置；finput 为输入文件的存放位置，例如散射相函数和温度廓线等；foutput 为输出文件的存放位置，其中文本文件直接存放在此文件夹下，Matlab 文件存放在此目录的 fmat 文件夹下；fprelim 为方位平均的散射相函数存放位置，注意仅在组合调用时如图 14 所示会保存此相函数，否则不保存。

5.4. 输入输出辅助程序

表 3 输入输出辅助程序

辅助程序名		辅助功能
call_phasef_coef.m	coef_phasef.m	相函数和展开系数转换
	phasef_coef.m	
output_plot.m		输出结果画图(可视化)

输入输出的辅助程序包括相函数和展开系数的转换程序以及输出结果画图程序，如表 3 所示。

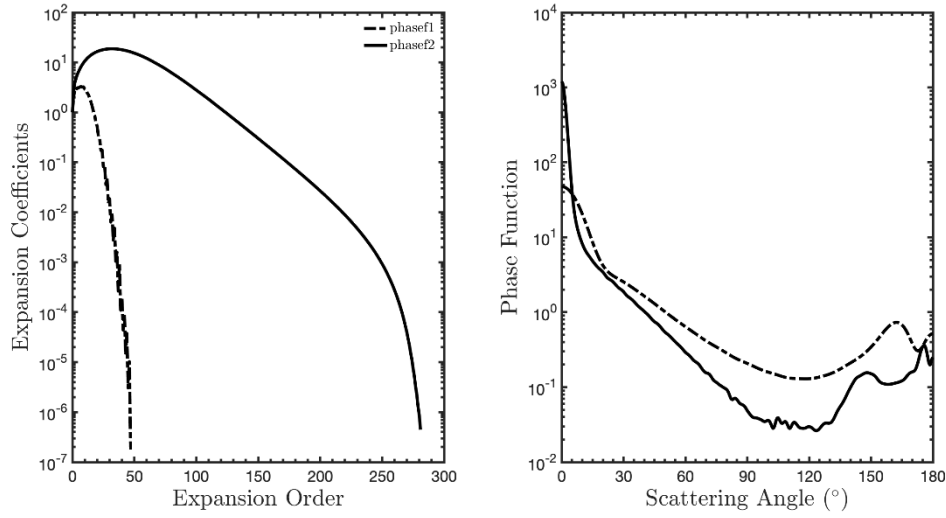


图 12 output_plot.m 程序绘图选项。

由于 STRADM 程序中相函数的输入实际为 Legendre 展开系数, 由此表 1 中的函数 coef_phasef.m 和 phasef_coef.m 分别实现展开系数转换为相函数以及相函数转换为展开系数功能, call_phasef_coef.m 辅助程序可以直接调用上述转换函数并进行画图, 图 19 为展开系数与相应的相函数示例, 可以使用此辅助程序进行相互转换, 其中图示的两个相函数 phasef1 和 phasef2 展开系数分别来自于程序文件夹下 finput 文件夹的 LegenCoef1.dat 和 LegenCoef2.dat。

```
%% Plot Option
% 1 for (actinic) flux profile
% 2 for (net) radiance profile
% 3 for brightness temperature profile
% 4 for user defined plot
% Note:
%(1): cases 1-3 are only for profile plots; non-profile outputs should
%       directly go to case 4.
%(2): programs for cases 1-3 are ready to plot; program for case 4 is
%       for user-defintion.
%(3): cases 3 is shown better for non-zero surface albedo or/and
%       surface emission on;
```

图 20 output_plot.m 程序可视化选项。

output_plot.m 可以对输出结果进行可视化, 选择如图 20 所示, 可以进行通量廓线、辐射强度廓线、温度和亮温廓线的可视化等。

6. 个例展示

6.1. 初始设定

根据图 9-13 的示例输入设定，23 层大气温度设定为图 21，来自于程序文件夹下 finput 文件夹下的 Temp.dat 文件；相函数使用图 19 所示的 phase1 和 phase2 两种相函数，其中各层的相函数索引如图 12 的 indexpf 数组所示。观测层级数为所有 24 层的层级数辐射强度和通量等，观测天顶角为 40 个预定义的天顶角。个例展示部分使用图 15 的直接调用方式。

Height(km)	Temp. (K)
55	260.8
50	270.7
40	250.4
35	236.5
30	226.5
27	224.0
24	220.6
22	218.6
20	216.7
18	216.7
16	216.7
14	216.7
12	216.7
10	223.3
9	229.7
8	236.2
7	242.7
6	249.2
5	255.7
4	262.2
3	268.7
2	275.2
1	281.7
0	288.2

图 21 大气温度廓线。

6.2. 程序调用

设定好各层参数以及边界条件后通过调用子程序即可完成辐射量及通量计算。在 windows 操作下 Matlab 编辑器中点击运行，即可进行计算。在命令行窗口和对应路径下可以看到结果输出以及辐射量输出文件。

6.3. 屏幕输出展示

屏幕输出结果如图 22 所示，图(a)首先输出使用在所有层内部普朗克函数随光学厚度的变化近似(此个例使用线性近似)，其次判断所用流数是否满足预定义的精

度(精度设定为 $1.0\text{e-}3$) 精确度控制, 图(b)输出所有层级数的上下行辐射通量和光化通量的结果。

Linear Approximation Used:

Summation of zenith-independent phase function (theoretically they should be one):

Max and Min values: 1.0000000e+00 1.0000000e+00

Check for 1.0E-03 Accuracy Is Passed!

Max and Min values: 1.0000000e+00 1.0000000e+00

Check for 1.0E-03 Accuracy Is Passed!

(a)

```
*****
Upward and Downward Flux at Level 0: 7.04993e-04 0.00000e+00
Actinic Upward and Downward Flux of Level 0: 1.06295e-04 0.00000e+00
*****
Upward and Downward Flux at Level 1: 8.23427e-04 4.74046e-04
Actinic Upward and Downward Flux of Level 1: 1.36991e-04 1.27971e-04
*****
Upward and Downward Flux at Level 2: 3.12592e-04 4.91687e-04
Actinic Upward and Downward Flux of Level 2: 5.11354e-05 7.26691e-05
*****
Upward and Downward Flux at Level 3: 1.36252e-04 1.75883e-04
Actinic Upward and Downward Flux of Level 3: 2.20707e-05 2.68177e-05
*****
Upward and Downward Flux at Level 4: 7.33165e-05 8.34216e-05
Actinic Upward and Downward Flux of Level 4: 1.17260e-05 1.29199e-05
*****
Upward and Downward Flux at Level 5: 6.09311e-05 6.32039e-05
Actinic Upward and Downward Flux of Level 5: 9.74389e-06 1.00151e-05
*****
Upward and Downward Flux at Level 6: 4.80703e-05 4.96630e-05
Actinic Upward and Downward Flux of Level 6: 7.66934e-06 7.85843e-06
*****
Upward and Downward Flux at Level 7: 4.14057e-05 4.22087e-05
Actinic Upward and Downward Flux of Level 7: 6.60438e-06 6.70034e-06
*****
Upward and Downward Flux at Level 8: 3.61673e-05 3.65206e-05
Actinic Upward and Downward Flux of Level 8: 5.75680e-06 5.79846e-06
*****
Upward and Downward Flux at Level 9: 3.61548e-05 3.61548e-05
Actinic Upward and Downward Flux of Level 9: 5.75421e-06 5.75421e-06
*****
Upward and Downward Flux at Level 10: 3.61548e-05 3.61548e-05
Actinic Upward and Downward Flux of Level 10: 5.75421e-06 5.75421e-06
*****
Upward and Downward Flux at Level 11: 3.61548e-05 3.61548e-05
Actinic Upward and Downward Flux of Level 11: 5.75421e-06 5.75421e-06
*****
Upward and Downward Flux at Level 12: 3.69901e-05 3.61651e-05
Actinic Upward and Downward Flux of Level 12: 5.85637e-06 5.75675e-06
*****
Upward and Downward Flux at Level 13: 6.02873e-05 5.82588e-05
Actinic Upward and Downward Flux of Level 13: 9.54654e-06 9.30500e-06
*****
Upward and Downward Flux at Level 14: 9.40343e-05 9.12748e-05
Actinic Upward and Downward Flux of Level 14: 1.49059e-05 1.45761e-05
*****
Upward and Downward Flux at Level 15: 1.44647e-04 1.40835e-04
Actinic Upward and Downward Flux of Level 15: 2.29304e-05 2.24764e-05
*****
Upward and Downward Flux at Level 16: 2.16743e-04 2.11704e-04
Actinic Upward and Downward Flux of Level 16: 3.43880e-05 3.37859e-05
*****
Upward and Downward Flux at Level 17: 3.19010e-04 3.12320e-04
Actinic Upward and Downward Flux of Level 17: 5.06145e-05 4.98177e-05
*****
Upward and Downward Flux at Level 18: 4.59229e-04 4.50645e-04
Actinic Upward and Downward Flux of Level 18: 7.29074e-05 7.18819e-05
*****
Upward and Downward Flux at Level 19: 6.50885e-04 6.39822e-04
Actinic Upward and Downward Flux of Level 19: 1.03334e-04 1.02016e-04
*****
Upward and Downward Flux at Level 20: 9.05223e-04 8.91389e-04
Actinic Upward and Downward Flux of Level 20: 1.43782e-04 1.42129e-04
*****
Upward and Downward Flux at Level 21: 1.24200e-03 1.22463e-03
Actinic Upward and Downward Flux of Level 21: 1.97270e-04 1.95200e-04
*****
Upward and Downward Flux at Level 22: 1.67653e-03 1.65528e-03
Actinic Upward and Downward Flux of Level 22: 2.66389e-04 2.63851e-04
*****
Upward and Downward Flux at Level 23: 2.93375e-03 2.23845e-03
Actinic Upward and Downward Flux of Level 23: 4.66921e-04 3.59036e-04
*****
```

(b)

图 22 命令行窗口结果输出。

6.4. 结果可视化展示

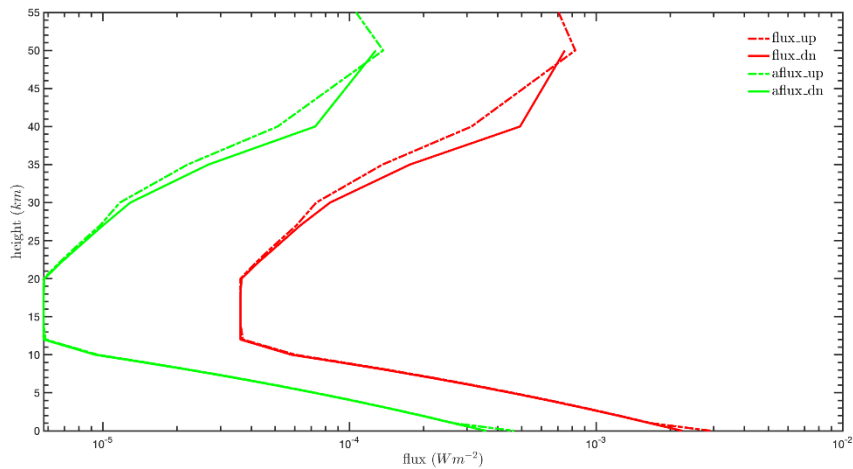


图 23 通量廓线可视化。output_plot.m (npo=1)。

图 23 的通量廓线可视化可以通过直接调用 `output_plot.m` 且把画图选择设为第 1 种直接运行即可得到所示结果，其中图例中“flux”指辐射通量，“aflux”指光化通量，“_up”和“_dn”分别指上行和下行量。

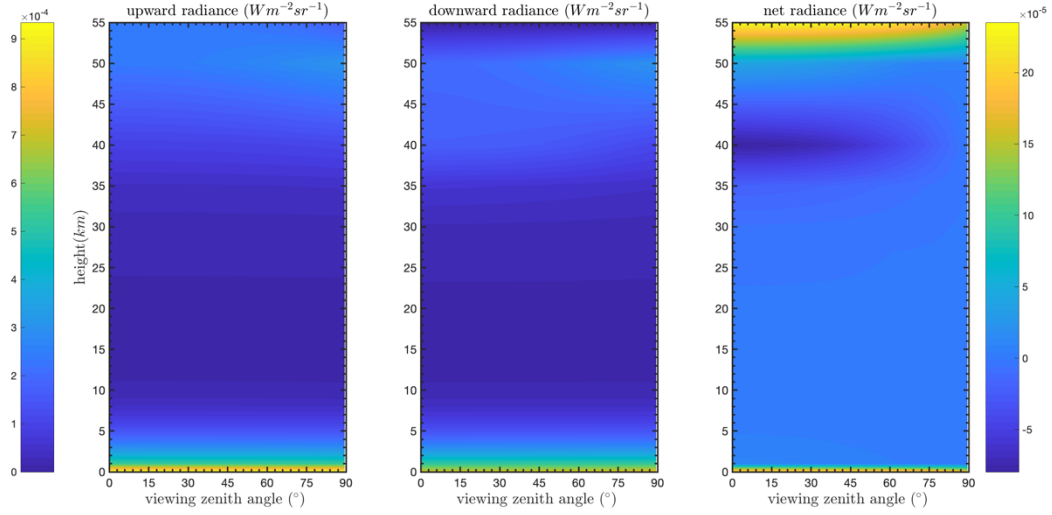


图 24 辐射强度廓线可视化。`output_plot.m` (npo=2)。

图 24 的辐射强度廓线可视化可以通过直接调用 `output_plot.m` 且把画图选择设为第 2 种直接运行即可得到所示结果，上行和下行的辐射强度廓线使用左边的色标，净辐射强度廓线(定义为上行减去下行)使用右边的色标。

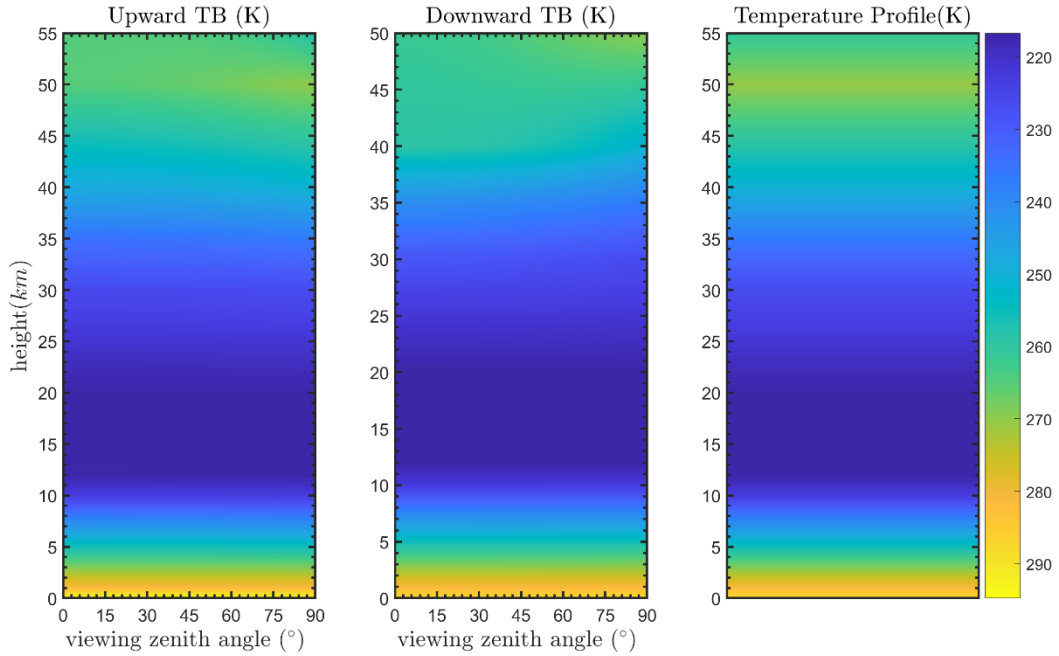


图 25 亮温廓线可视化。`output_plot.m` (npo=3)。

图 25 的亮温廓线可视化可以通过直接调用 `output_plot.m` 且把画图选择设为第 3 种直接运行即可得到所示结果，从左到右依次为上行亮温廓线、下行亮温廓线以及输入的温度廓线。

7. 总结

本程序为使用 Matlab 软件编译的标量热辐射倍加累加辐射传输计算程序，以下几个地方做了严格处理：

- 普朗克函数在波数光谱区间 ν_1 和 ν_2 进行了解析的积分。
- 单层普朗克函数和光学厚度可以使用线性、指数以及常数近似。
- 观测角的辐射量进行了严格的数值计算。

程序可以完成多层多观测角下的严格辐射传输数值求解，可以作为大气辐射科学研究和辐射传输求解的有效工具。

8. 注

该程序的细节理论推导、验证以及示例请参考文章：

Bingqiang Sun, Chenxu Gao, and Robert Spurr, “Scalar thermal radiation using the adding-doubling method,” *Optics Express*, 30, 37769-37785, (2022).