设计文档

组号：01组
完成人：黄瑾、潘宗龙

一、 数据预处理

选用中国 Argo 资料中心发布的全球 Argo 资料 数据集，数据时间范围为 2015 年 1 月–2020 年 12 月时间间隔为一个月，挑选出研究海区（南海中部海区——12.5°N 115.5°E） 的所有观测剖面，然后对观测剖面的数据进行解析与质量检查，并确认无误。

采用比较适合我国海区的 Wilson 声速的经验公式，利用 Argo 观测的压强、温度、盐度剖面数据计算得出声速剖面，然后利用 Akima 插值法，将声速剖面插值到垂直标准层进行 EOF 分析，标准层深度为 0、10、20、30、50、75、100、125、150、200、250、300、400、500、600、700、800、900、1000、1100、1200、1300、1400、1500、1750、2000m。

二、解题思路

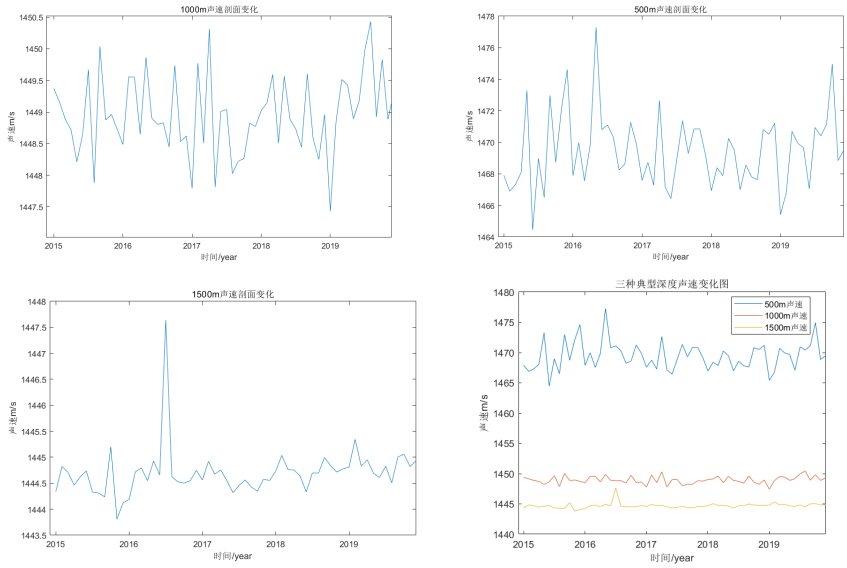
2.1 声速分布特征

对声速分布特征的分析先是对该海域声速剖面图进行直观观察，然后利用 EOF（经验正交函数）分析法具体的分析该海域的声速分布特征。

2.1.1 经验观测

a.直接观测

通过对不同深度声速的对比可知，随着深度的的增加声速随之降低，值得注意的是，在时间变化方面，随着深度的增加，声速的变化幅度愈来愈小，通过推测可得，产生这种现象的原因主要是因为水面所受季节气候等周期性变化的影响较大，在随着深度的变化，外界的周期性变化对其温盐深特性的影响越来越小，使声速在时间维度的变化趋于稳定。



b.具体分析

求得该海域一年的声速剖面并绘制出剖面图，首先观察声速剖面图的结构，然后观察一年内不同月份声速剖面图的变化，通过观察，确定具体观察的某一深度（50/500/1000/1500m）在两年中不同月份的变化。

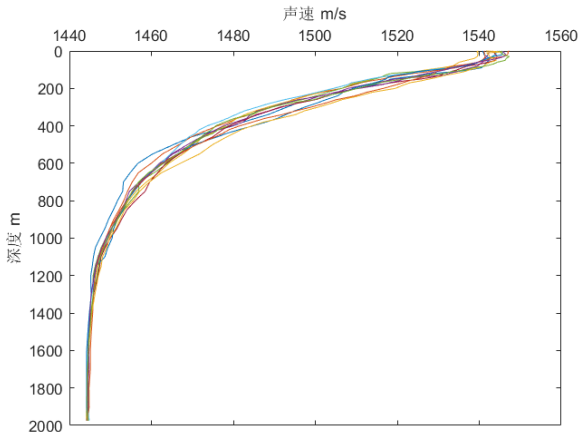


图 1

观察得出的声速剖面图（图 1）可知，该声速剖面是典型的深海声速剖面，深海声速剖面主要分为 3 层（刘芳兰等 ，2010）：表面层（混合层）、跃变层和深海等温层，其中跃变层又可分为季节性跃层和主跃层。混合层是指由于处在海表面,受日照、风雨、浪潮对流影响比较激烈，往往形成一层等温层即温度均匀不变。声速主要取决于随海深增加的压力,故声速可能出现微弱的增加，恰好大致对应图中的 0–50m 的深度范围内声速的变化。跃变层是指在表面层以下往往会出现温度激烈变化(减低)的水层,即产生温度跃变,故称为跃变层。这时声速主要受温度控制,由于主跃层离海面较深，不受日照等影响,相对比较稳定，便出现声速随温度降低而减小，图中 50–1400m 深度范围内的声速变化比较明显的体现了该种特征，在该深度范围内声速随深度增加减小。深海等温层是指在跃变层以下直至海底，一般是等温层，声速随着压力的增加而提升，出现正声速梯度。在负主跃层和深海等温层之间会出现一个声速最小的水层，图中深度大于 1400 米的范围内声速的变化慢慢趋于0，而后减小，但由于从 argo 浮标获取数据最大深度小于 2000 米所以只能观察到深海等温层的一小部分变化。

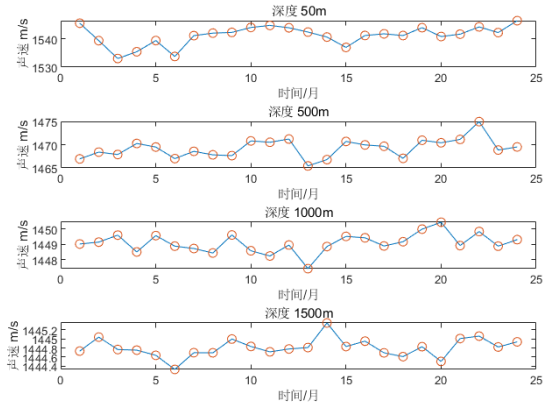


图 2

图 2 为 2018–2020 年（24 个月）内，深度 50、500、1000、1500 米处的声速变化，通过观察图像可知，同一深度的声速随时间的变化大体呈现出年周期性，而不同的声速剖面层在这一年的周期内有着不同的变化。深度 50m 处的声速变化代表了混合层的变化，5–10 月声速呈现出增加的趋势，而 11–4 月声速呈现出减小的趋势，声速的最小值大约位于 3–4 月份，而声速的最大值点大约位于 9–10 月份。深度 500 米和深度 1000 米处的声速随时间变化的趋势基本一致代表了跃变层的声速变化，与混合层的变化恰好反向，于 5–10 月声速呈现出减小的趋势，11–4 月呈现出声速增加的趋势。

通过观察图像还可发现随着深度的增加，声速在一年内的变化量值越来越小，特别是到了 1500 米，一年内声速的差距更小。可以看出声速的变化主要集中在混合层和跃变层深度较浅部分，而且呈现出了季节性的变化

2.1.2经验正交函数分析

Le 等（1980）指出经验正交函数（EOF）是描述声速剖面最有效的基函数，Tolstooy 等（1991）证明了利用 EOF 描述深海声速剖面的可行性，沈远海等（2000；1999）证明了利用 EOF 描述浅水声速剖面的可行性和对声速剖面的分层经验正交函数（EOF）表示，何利等（2006）对东中国海声速剖面进行了 EOF 分解和匹配场反演，研究了该海域声速剖面用经验正交函数表示的可行性。所以通过直观观察总结出声速分布特征之后，可再使用经验正交函数对该海域的声速剖面结构进行表示并加以分析验证。

a.原理概述

经验正交函数分析方法（empirical orthogonal function，缩写为 EOF），也称特征向量分析（eigenvector analysis），是一种分析矩阵数据中的结构特征，提取主要数据特征量的一种方法。Lorenz 在 1950 年代首次将其引入气象和气候研究，现在得到了非常广泛的应用。特征向量对应的是空间样本，也称空间特征向量或者空间模态（EOF），在一定程度上反映要素场的空间分布特点；主成分对应的是时间变化，也称时间系数（PC），反映相应空间模态随时间的权重变化。因此称 EOF 分析为时空分解，即$X=EOF_{m\times m}\times PC_{m\times n}$，m 为站点数，n 为年数。

EOF 分析可以用于任意海域声速剖面集合的简化。该方法可以减少声速剖面集合的维数，同时保留声速剖面集合中对方差贡献最大的特征，即保留低阶主成分，忽略高阶成分，这样就可以在保证一定精度的前提下用尽量少的参数来表示复杂的声场环境。

算法如下：

1. 将声速剖面采样层设置为 Zi （i=1,2....N）= 0、10、20、30、50、75、100、125、150、200、250、300、400、500、600、700、800、900、1000、1100、1200、1300、1400、1500、1750、2000m，将以时间变化L为列向量，构建N*L的X矩阵如下所示

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1L} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2L} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{N1} & c_{N2} & \cdots & c_{NL} \end{bmatrix}$$

2. 对X矩阵进行 $X = X - \bar{X}$ 处理，形成距平形式。
3. 用X矩阵即可计算协方差矩阵C

$$C_{NN} = \frac{1}{N} \times X \times X^T$$

4. 通过特征分解来计算方程C的特征根E和特征向量EOF

$$[EOF, E] = eig(C)$$

三者之间满足如下关系：

$$C_{N,N} \times EOF_{N,N} = EOF_{N,N} \times E_{N,N}$$

E为N*N维的对角阵，

$$E = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_N \end{bmatrix}$$

将特征根 λ 从大到小排序，即，满足 $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 > \cdots > \lambda_N$，在本题目中，只需要对求出的E阵进行沿着副对角线翻折即可获得附合要求的矩阵。此时每一个非0的特征根对应一列特征向量值（EOF），其中 λ_1 所对应的这张向量值称为第一个EOF模态，也就是E的第一列。

5. 计算主成分，即将所得到的EOF投影到原始资料矩阵上，得到所有空间特征向量对应的时间系数（主成分），其公式如下：$PC_{N\times L} = V^T_{N\times N} \times X_{N\times L}$
6. 计算贡献率：矩阵X的方差大小可以简单的用特征根的大小表示，λ 越高说明其对应的模态越重要面对总方差的贡献越大。第k个模态对总的方差解释率为：

$$\frac{\lambda_k}{\sum_{i=1}^{N} \lambda_i} \times 100\%$$

7. 声速模态拟合，任一点的声速可以用 $C = \bar{C} + \sum_{k=1}^{N} \alpha_k EOF_k$ 求得，通过对模态的叠加，使模型结果愈发接近真实情况。

b.模型建立

模态拟合的方差贡献

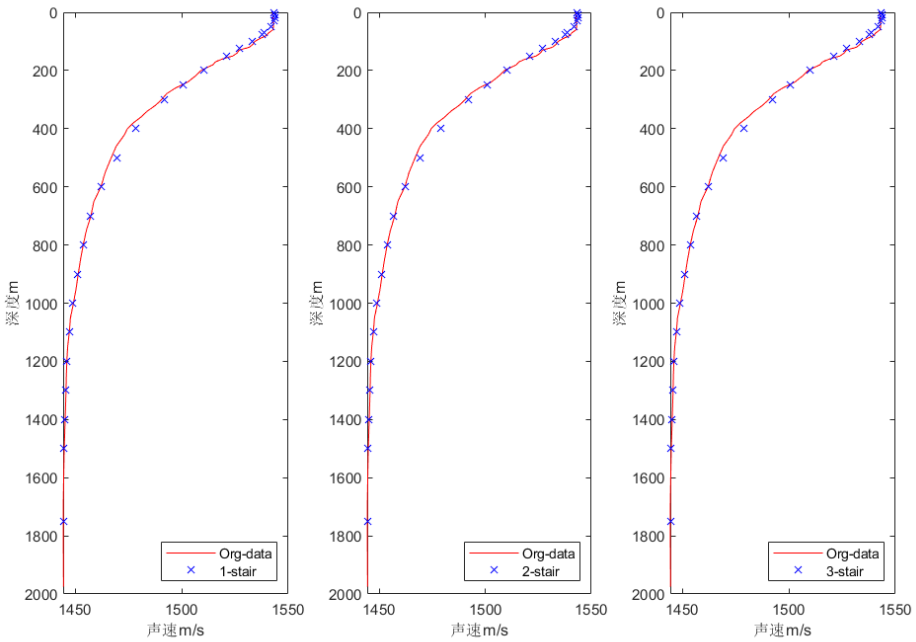
EOF 模态	方差贡献率	累计方差贡献率
1	0.6429	0.6429

2	0.1515	0.7944
3	0.0649	0.8593
4	0.0419	0.9012
5	0.0307	0.9319
6	0.0173	0.9492

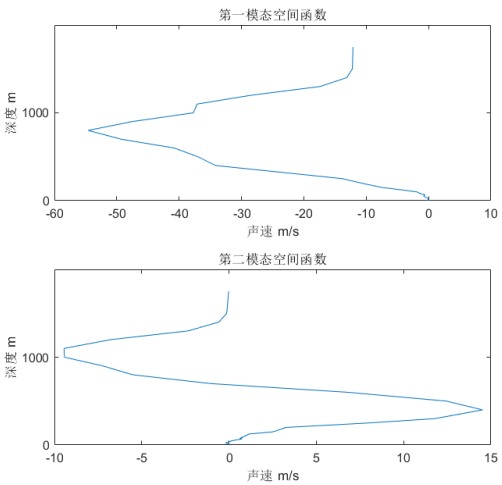
对标准层的声速剖面进行 EOF 分解，得到时间函数和空间函数，计算的得出了 EOF 各模态方差贡献率和累计方差贡献率。由表可知前六个方差的贡献率可达到 94.92%，可以完全反映出海区内声速剖面的主要变化。

c.模型拟合

模态拟合结果如下图所示



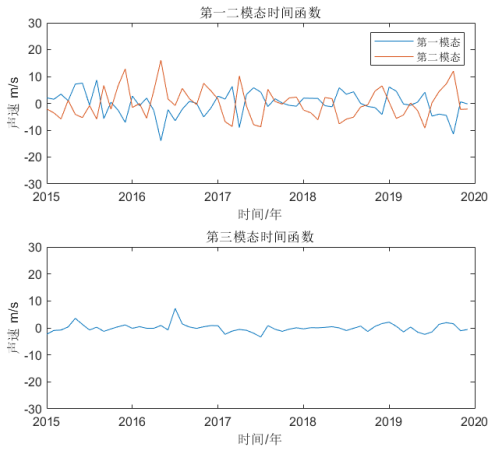
d.空间函数



从上文第一模态拟合图已知， 第一 模态可以反映出声速整体变化 的趋势，表层变化大，深层变化小；第一模态空间函数也表明从海水表层至深层声速都在减小，直至深度越来越大时，声速的减小量逐渐变为0。第二模态空间函数随着深度的增加出现正、负变化。表明表层与次表层呈反位相变化，但之后随着深度的增加，第二模态空间函数的值也趋近于0，可知第

2模态主要对次表层起调制作用。从两个主要模态的空间函数都可以看出，声速变化主要集中在深度较浅的水层，深层变化很小。

c.时间函数



从时间函数可以看出，第一模态具有明显的年周期变化特征：正值一般在每年的5–10月，最大值位于9–10月，11–4月为负值，最小值位于3–4月，与季节变换对应较好，春季、夏季海洋升温，声速不断增大，秋季、冬季声速逐渐减小，主要是受海洋混合层季节变化的影响。第二模态时间函数也呈现出一定年周期变化，与第一模态时间函数具有明显的反向变化特征，峰值超前第1模态1–2月。第3模态空间函数不同于前两个模态以及4–6模态时间函数都比较复杂，没有明显的周期变化。

2.2 声传播特性

1. 数据处理与假设：

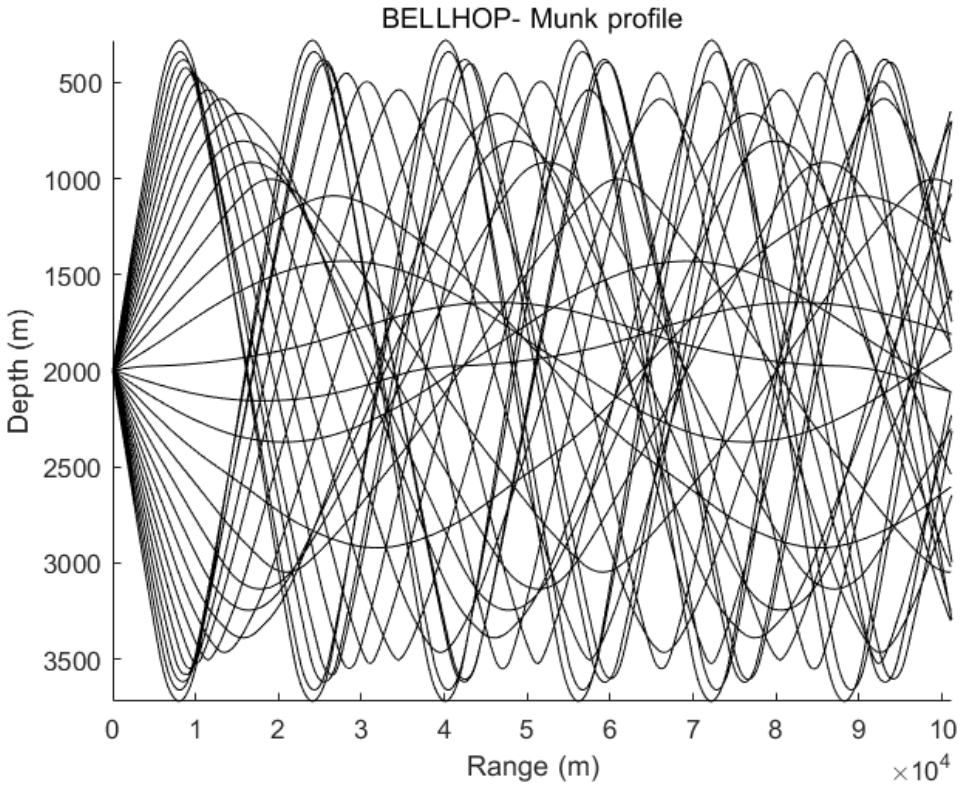
由于ARGO数据所能获得数据仅在2km左右，在这段数据中无法形成已知的声道轴，因此需要对ARGO数据中2000米以内进行插值处理，对超过2000米的数据进行外推。采用akima对数据进行插值，同时模拟了海底声速增加的情况，设立假想海底面为4km、声道轴为2km，以此为前提计算声传播特性。

2. 声线绘制环境

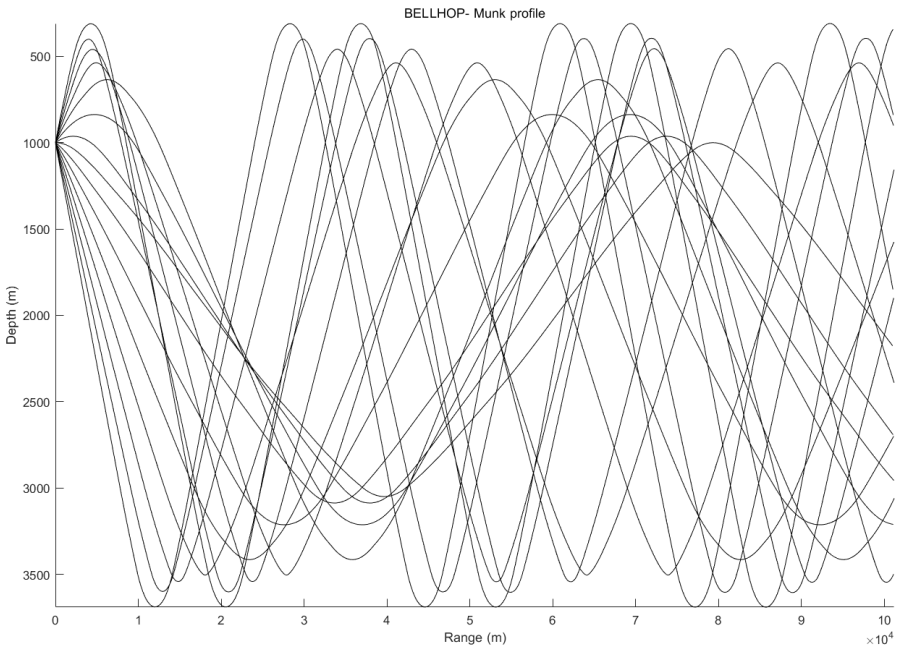
采用BELLHOP工具箱，在MATLAB中进行绘制

3. 典型声线绘制结果

下图为换成器位于声道轴时所绘制出的典型声线

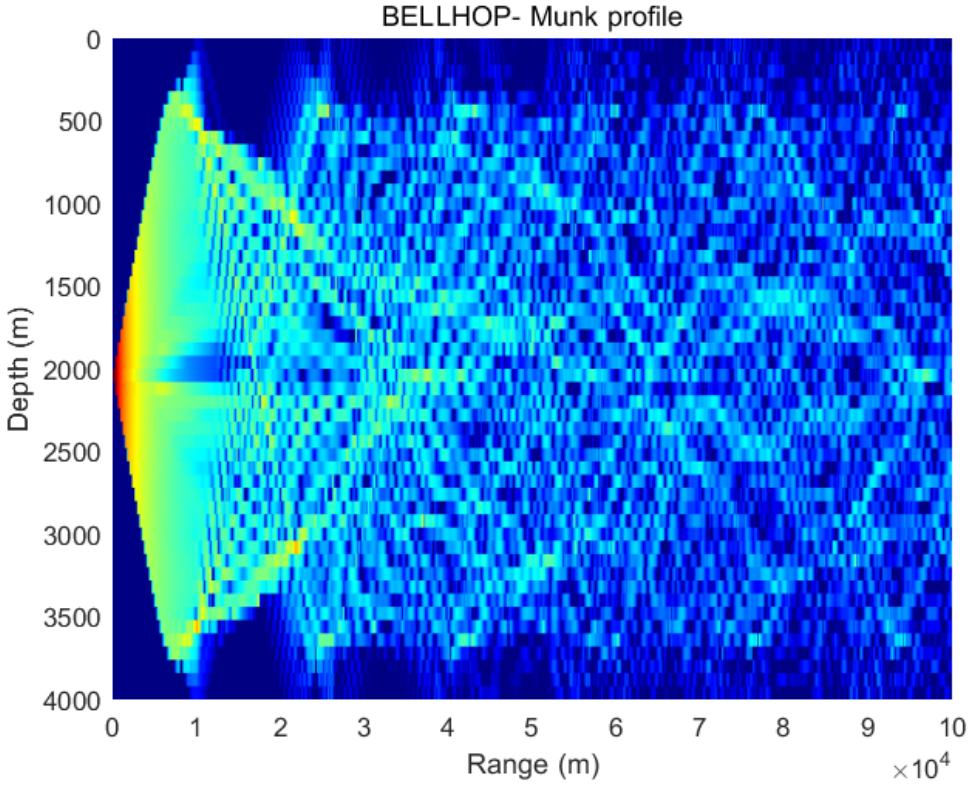


下图为换成器位于1000米时所绘制出的典型声线

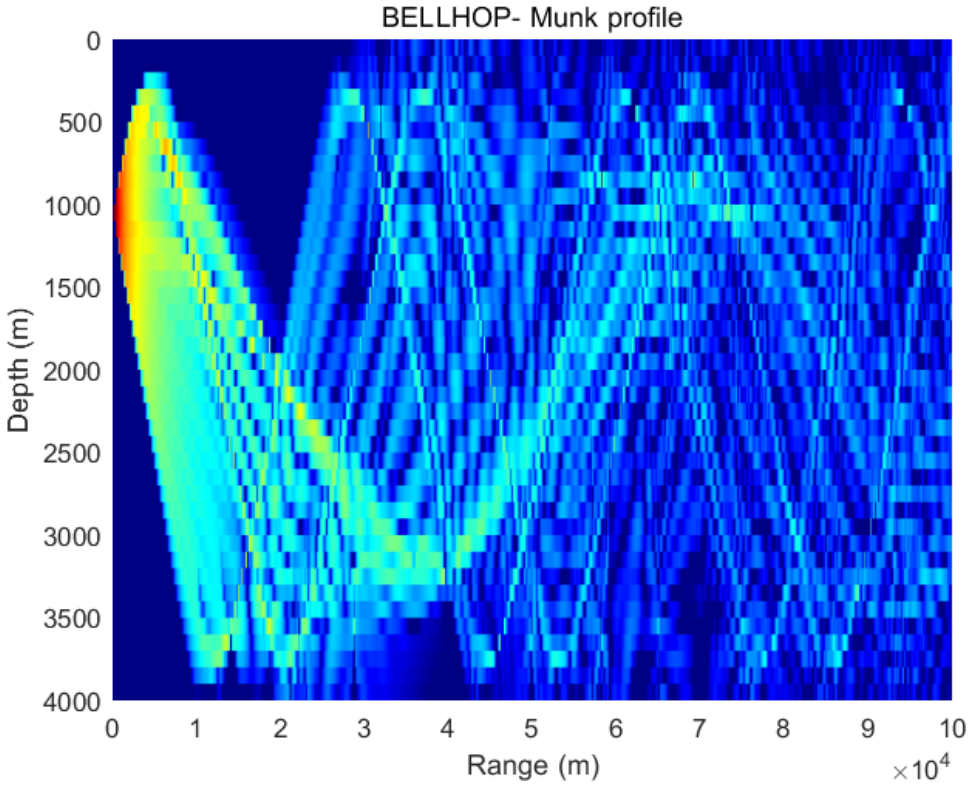


4. 传播损失图像结果

下图为换成器位于声道轴时所绘制出的传播损失图像



下图为换成器位于1000米时所绘制出的传播损失图像



根据上方声速时空分布特征的分析结论与所绘制出的声线以及传播损失图，对该海域声传播特性做出如下分析：

当接收器深度位于南海深海海底附近而声源深度较浅时，直达声区水平宽度可达３０ｋｍ，传播损失相对影区来说较小，有利于水下声源探测；直达声区的直达波与海底－海面反射波的到达时延差随着收发距离的增大单调减小，可被用于水下声源距离估计。最大声传播损失约为 85 dB。与接收深度较浅处相比，大深度处深海会聚 区和影区位置不同。在深海远程声传播过程中，随 着水平距离的增加，会聚区展宽。

三、程序设计

整个课程设计所编写程序如下图所示:

EOF 运算代码:

```
%运用 EOF 分析法分解出声速剖面的空间函数与时间函数，并进行拟合
clear;
clc;
tic;
%% 标准参数
Standard_deep =
[0,10,20,30,50,70,75,100,125,150,200,250,300,400,500,600,700,800,900,1000,
1100,1200,1300,1400,1500,1750];
%% 数据读取变换,读取某一个点的数据，使之形成横轴为时间变化，纵轴为深度变化的二维矩阵
matrix_c = zeros(0,0);
for year = 2015:2019
    for month = 1:12

[Salt,Temp,Deep]=read_mat_data(year,month,12.5,12.5,115.5,115.5,'N','E');
        [C_org,A] = sound_speed(Salt,Temp,Deep);
        matrix_c = [matrix_c data2line(C_org(1,1,:))];
    end
end
[N,L] = size(matrix_c);
% 对数据进行插值
[~,stdN] = size(Standard_deep);
std_mat = zeros(stdN,L);
for i = 1:1:L
    std_mat(:,i) = akima(Deep',matrix_c(:,i)',Standard_deep);
end
% 对 C 矩阵进行距平
X = std_mat - mean(std_mat,2)*ones(1,L);
C = X*X'/L;
[EOF,E] = eig(C);
E = fliplr(flipud(E));       %特征根
EOF = fliplr(flipud(EOF));   %空间特征向量
PC = EOF'*X;                 %空间特征向量对应的时间系数（主成分）
mean_c = mean(std_mat,2);    %平均声速（1 列）
mean_c = flipud(mean_c);
alphi = inv(EOF)*(fliplr(flipud(std_mat))-mean_c*ones(1,L));
approx_c_1 = mean_c ;
approx_c_2 = mean_c + alphi(:,1).*EOF(:,1)+alphi(:,2).*EOF(:,2);
```

```
approx_c_3 = mean_c + alphi(:,1).*EOF(:,1)+alphi(:,2).*EOF(:,2)+alphi(:,3).*EOF(:,3);
toc;
```

声速计算函数：

```
function [c,A] = sound_speed(temper,salt,deep)
%-------声速计算------
%   输入：温度（n x n）、盐度（n x n）、深度（n x n）、矩阵纬度 ( n )
%   输出：声速矩阵 c（n x n）
%-----------END-----------
%% 常数确定
g = 9.8;         %重力常数
P0 = 101300;     %标准大气压
[row_num,column_num,deepth_num] = size(temper);
c = zeros(row_num,column_num,deepth_num);
%% 计算声速
% 计算压强
for i=1:1:deepth_num
    pressure = (deep(i)./100.*P0 + P0)./P0;
    % 三参数模型
    ct = 4.6233.*temper(:,:,i) - 0.054585*power(temper(:,:,i), 2) + 0.0002822*power(temper(:,:,i), 3) + 5.07*power(10, -7)*power(temper(:,:,i), 4);
    cp = 0.160518*pressure + 1.0279*power(10, -5)*pressure .* pressure + 3.451*power(10, -9)*power(pressure, 3) - 3.503*power(10, -12)*power(pressure, 4);
    cs = 1.391*(salt(:,:,i) - 35) - 0.078*(salt(:,:,i) - 35).*(salt(:,:,i) - 35);
    cstp = (salt(:,:,i) - 35).*(-1.197*power(10, -3)*temper(:,:,i) + 2.61*power(10, -4)*pressure - 1.96*power(10, -7)*power(pressure, 2) - 2.09*power(10, -6)*pressure .* temper(:,:,i)) + pressure .* (-2.796*power(10, -4).*temper(:,:,i) + 1.3302*power(10, -5).*temper(:,:,i) .* temper(:,:,i) - 6.644*power(10, -8)*power(temper(:,:,i), 3)) + pressure .* pressure .* (-2.39*power(10, -7).*temper(:,:,i) + 9.286*power(10, -10).*temper(:,:,i) .* temper(:,:,i)) - 1.745*power(10, -10)*power(pressure, 3).*temper(:,:,i);
    c(:,:,i) = 1449.22 + ct + cs + cp + cstp;
end
%% 计算声速梯度
A = zeros(row_num,column_num,deepth_num - 1);
for i=2:1:deepth_num
   A(:,:,i - 1) = (c(:,:,i) - c(:,:,i-1))./  c(:,:,i) * (deep(i) - deep(i-1));
end
end
```