

# **BELLHOP**

## **使用指南**

### **V2.2**

2011-12-21

贾方坤

## 修改记录

1. 修改 V2.1 版本中第六章波形文件的波形文件的验证图。
2. 修改 V2.1 版本中第三章的“其他参数”。
3. 增加第六章中 BELLHOP 与射线模型的对比。
4. 增加第七章中 BELLHOP 的时变特性的改进。

## 注意事项

- 【1】本指南中所涉及相关参数的设置仅为仿真实例，不具有—般性。
- 【2】本指南仅使用 AcTUP( Acoustic Toolbox User-interface & Post-processor )  
V2.21. 中的一个水声信道计算模型 BELLHOP，其他信道模型 Kraken,  
KrakenC&Field 还在后续的学习和实验中继续深入了解。
- 【3】由于本人时间和水平有限，本文档仅供参考，如有错误请老师和同学们批评指正！

# 目 录

第一章 BELLHOP 模型理论原理 .....	- 3 -
第二章 BELLHOP 结构 .....	- 5 -
一、输入文件 .....	- 5 -
二、输出文件 .....	- 6 -
第三章 BELLHOP 环境文件 .....	- 8 -
一、TITLE .....	- 8 -
二、OPTION1 .....	- 8 -
1. OPTIONS1(1).....	- 8 -
2. OPTIONS1(2).....	- 9 -
3. OPTIONS1(3).....	- 9 -
4. OPTIONS1(4).....	- 9 -
5. OPTIONS1(5).....	- 9 -
三、OPTIONS2 .....	- 10 -
1. OPTIONS2(1).....	- 10 -
2. OPTIONS2(2).....	- 10 -
四、OPTIONS3 .....	- 11 -
1. OPTIONS3(1).....	- 11 -
2. OPTIONS3(2).....	- 11 -
3. OPTIONS3(3).....	- 11 -
4. OPTIONS3(4).....	- 12 -
5. OPTIONS3(5).....	- 12 -
五、OPTIONS4 .....	- 12 -
1. OPTIONS4(1).....	- 12 -
2. OPTIONS4(2).....	- 12 -
六、其他参数 .....	- 13 -
第四章 BELLHOP (Matlab_GUI) 实例一.....	- 15 -
一、准备工作 .....	- 15 -

二、运行 BELLHOP .....	- 15 -
三、配置水体环境参数 .....	- 16 -
四、配置与代码不相关的传播参数 .....	- 24 -
五、配置与代码相关的传播参数 .....	- 25 -
六、运行计算模型 .....	- 28 -
七、数据的处理及分析 .....	- 28 -
八、BELLHOP 画图工具选项 .....	- 31 -
第五章 BELLHOP (Command 版) 实例二 .....	- 33 -
一、设置运行环境 .....	- 33 -
二、编辑环境文件 .....	- 33 -
三、仿真和画图 .....	- 33 -
1. 声线图 .....	- 33 -
2. 传播损失 .....	- 35 -
3. 冲激响应 .....	- 35 -
第六章 BELLHOP 模型应用 .....	- 37 -
一、    输入波形验证 .....	- 37 -
1. 波形文件 .....	- 37 -
2. 声音文件 .....	- 41 -
3. 结论 .....	- 42 -
二、BELLHOP 模型与射线模型对比 .....	- 42 -
1. 传统射线理论模型 .....	- 42 -
2. 基于传统射线理论的 N 径确定性模型 .....	- 43 -
三、仿真对比 .....	- 46 -
1. 声线图 .....	- 46 -
2. 冲激响应图 .....	- 47 -
3. 输入信号 .....	- 48 -
4. 卷积后波形 .....	- 48 -
四、BELLHOP 的特色 .....	- 49 -
第七章 BELLHOP 的改进 .....	- 50 -

参考文献..... - 56 -

## 第一章 BELLHOP 模型理论原理

BELLHOP 模型是通过高斯波束跟踪方法 (Porter 和 Bueker, 1987 年), 计算水平非均匀环境中的声场。BELLHOP 模型是通过高斯波束跟踪方法, 计算水平非均匀环境中的声场。高斯波束跟踪方法对于高频水平变化问题特别有吸引力, 这是简正波、波数积分和抛物线模型不可替代的。高斯束射线跟踪法的基本思想是将高斯强度分布与每条声线联系起来, 该声线为高斯声束的中心声线, 这些声线能较平滑的过渡到声影区, 也能较平滑的穿过焦散线, 所提供的结果与全波动模型的结果更为一致。在频率范围为 600Hz-30kHz 时与实验数据及理论模型符合得很好, 被指定为美国海军预报海洋 10-100kHz 频带声传播的标准模型, 而且它已获批准可用于频率低至 600Hz 的军舰中。

BELLHOP 对决定声束宽度和曲率的两个微分方程与标准射线方程一起进行积分, 就可计算出声束内中心声线附近的声束场。高斯束射线跟踪给定源点的初始束宽和曲率, 允许在离开声源向外传播时增大和减小曲率, 声束的演变过程由参数  $p$  和  $q$  决定, 波束宽度  $P(s)$  和波束曲率  $q(s)$  由下面的一对微分方程控制。

$$\frac{dq}{ds} = c(s)p(s) \quad (1-1)$$

$$\frac{dp}{ds} = -\frac{c_m}{c^2(s)}q(s) \quad (1-2)$$

其中  $c_m$  是声速  $c(r, s)$  在声线路径法线方向上的二阶导数, 可写为

$$\begin{aligned} c_m &= c_{rr} \left( \frac{dr}{dn} \right)^2 + 2c_{rz} \left( \frac{dr}{dn} \right) \left( \frac{dz}{dn} \right) + c_{zz} \left( \frac{dz}{dn} \right)^2 \\ &= c_{rr} (N_{(r)})^2 + 2c_{rz} (N_{(r)})(N_{(z)}) + c_{zz} (N_{(z)})^2 \end{aligned} \quad (1-3)$$

其中  $(N_{(r)})(N_{(z)})$  是单位法线, 可写为

$$(N_{(r)})(N_{(z)}) = \left( \frac{dz}{ds}, -\frac{dr}{ds} \right) = c(s)[\zeta(s), -\rho(s)] \quad (1-4)$$

因此波束可以定义为

$$u(s, n) = A \sqrt{\frac{c(s)}{rq(s)}} \exp(-i\omega\{\tau(s) + 0.5[p(s)/q(s)]n^2\}) \quad (1-5)$$

其中  $A$  是任意常数,  $n$  是垂直与主声线的距离,  $\omega$  是声源的角频率。

为使上述方程具有能量以中心声线为中心的声束形式，选择  $p$  和  $q$  为复数。这样， $p/q$  的实部和虚部就可通过下式与束宽  $L(s)$  和曲率  $K(s)$  联系起来：

$$L(s) = \sqrt{-2/\{\omega \operatorname{Im}[\frac{p(s)}{q(s)}]\}} \quad (1-6)$$

$$K(s) = -c(s) \operatorname{Re}[\frac{p(s)}{q(s)}] \quad (1-7)$$

其中，波束半径  $L(s)$  是离开主声线的波束幅度是其最大值的  $1/e$  时的法向距离。于是，(1-5) 和 (1-6) 就可以简单地用代表初始波束半径和曲率的复数初始条件求解。

最后，把所有声束加起来，求得复合声压。各个声束的加权按照均匀介质中的标准点源问题确定。对于点源，声束的相应加权为：

$$A(s) = \delta\alpha \left(\frac{1}{c_0}\right) \sqrt{\frac{q(s)\omega \cos \alpha}{2\pi}} \exp\left(\frac{i\pi}{4}\right) \quad (8)$$

式中  $\delta\alpha$  是声束之间的夹角。

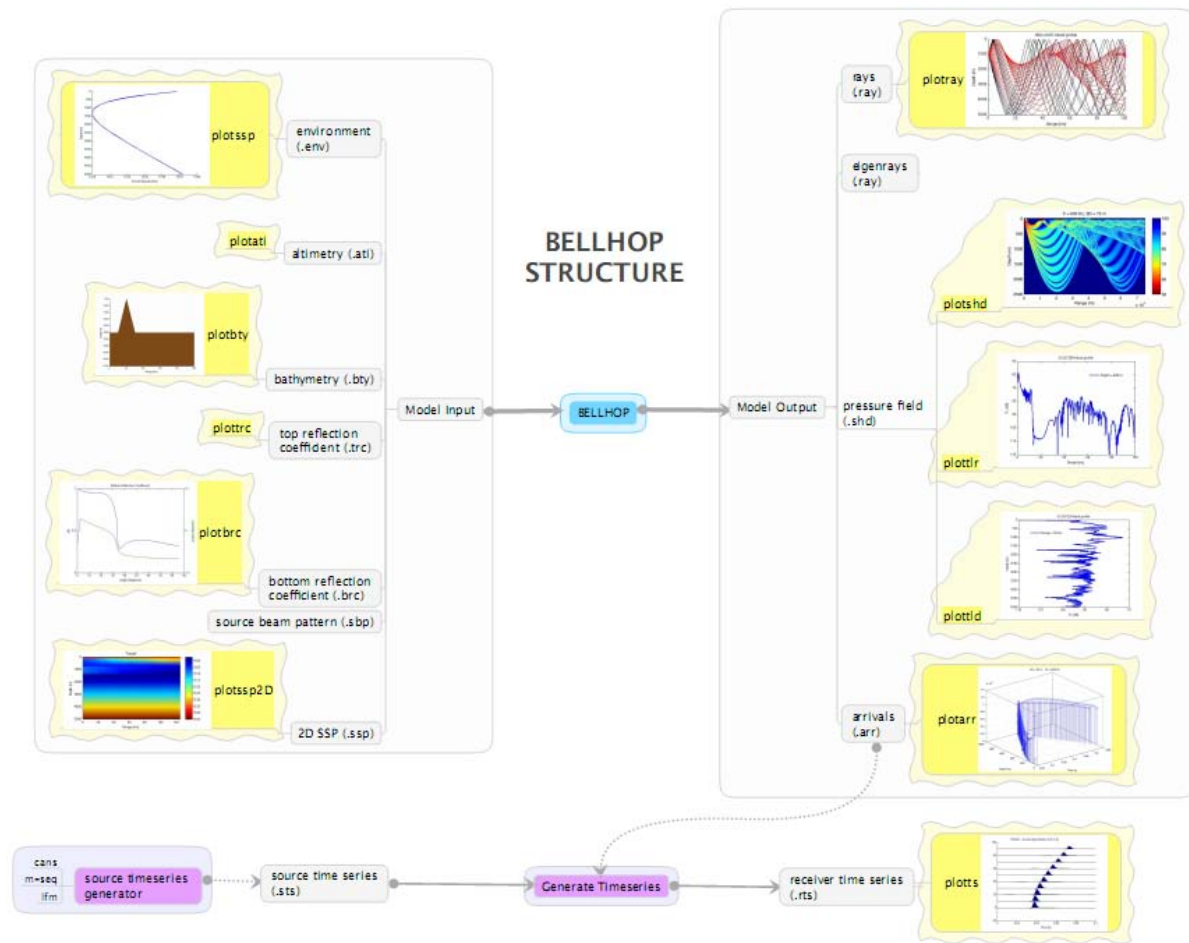
BELLHOP 程序采用四阶龙格-库塔法求解这类初值问题，用这种方法求解射线方程存在两个主要问题。首先，声速剖面的简单解析形式不容易得到，一般只能得到采样数据，对数据的内插会导致计算误差，这种误差比数值积分方法本身带来的误差更严重。其次，当海底边界不规则时，射线到达并从边界反射，对射线进行积分的过程中段再开始的这一处理过程会变得十分复杂。

BELLHOP 利用高斯波束跟踪方法代替几何波束跟踪方法是该模型与传统射线模型的主要区别。它克服传统射线模型中声影区强度为 0 和焦散线截面为 0 处声强度为无穷大的缺陷。缺点：确定性模型，不能反映系统的时变特性，不能处理水平变化的声速问题。

目前 BELLHOP 可以用 Fortran、MATLAB 和 Python 实现，并可以用于（MAC，Windows 和 Linux）的多种平台。我们在 BELLHOP（MATLAB GUI）中输入海洋环境参数：信道几何结构、声速剖面、海底地形、界面反射损失等得出多径的数目  $N$ ，入射角、幅度和延时，进而可以给出系统的冲激响应，从而可以在后续的信道建模的修正及信道估计领域应用提供有效的参照。



## 第二章 BELLHOP 结构



### 一、输入文件

BELLHOP 的整体结构图如图 1，各种文件的必须可以描述发送端和接收端的环境和几何特性。在最简单的例子中，同时也是最典型的，就是只用一个文件。它指的是作为一个环境文件 (\*.env)，包括声速剖面、以及有关海洋底部的信息。但是，如果有一个变化范围的底部，那么就必须添加一个水深文件用来确定水深 (\*.bty)。同理，如果有一个变化范围的声速，那么就必须添加一个 **SSP** (Sound Speed Profile) 文件把声速列成规范的列表。此外，如果要指定一个任意底部反射系数来表征的底部，然后就必须提供一个底部反射系数文件 (\*.brc) 来定义反射角度。

BELLHOP 在通过相关命令来读取这些文件。mallab 画图程序(plotssp, plotbty, plotbrc, etc.) 用来显示每一个输入文件。

总结，输入文件有以下几个：

- \*.env：描述水体环境，**必选**。
- \*.ati：描述海面形状，可选。
- \*.bty：描述海底形状，可选。
- \*.trc：描述顶部反射系数，可选。
- \*.brc：描述底部反射系数，可选。
- \*.ssp：**描述声速剖面图**，可选。

## 二、输出文件

BELLHOP 在整体环境文件中通过相关选项来产生不同的输出文件。

通常我们开始于射线跟踪选项，用来产生一个文件来包含从声源源产生的一系列扇状的声线。如果本征声线的选项被选中，那么这扇状射线只能选择包括在指定的接受器的射线。文件的格式与那些用于标准声线跟踪选项中的是一样的。声线文件 (\*.ray) 通常用于获取在信道中传播的能量感应。**matlab 程序 plotray 是用于画出声线图**。

通常我们感兴趣于计算一个声调源的传播损失（或在很宽的波形的单个声调源）。由于单位能量源的作用，传播损失主要是影响声音的强度。我们将传播损失的有关信息写入文件 (\*.shd)，用 plotshd 来描述一个二维的图形，分别用 plottlr 和 plottld 来描述范围和深度部分。

如果由于声调源的缘故，我们不仅仅想得到强度，而是整个时间序列 (\*.arr)，然后选择一个到达算法。由此产生的达到文件包含着确定强度的幅度延迟和信道中每个回声的延迟。这些信息也可以用 plotarr 来画出每个回声的模式。另外它可以被传递给一个卷积，其中总结了一个特定的源时序的回声用来产生接收时间序列。

总结，输出文件有以下几个：

- \*.ray：描述声线和本征声线；
- \*.shd：描述声线的传播损失；
- \*.arr：描述声线到达的时间-幅度序列等参数

总结一下，BELLHOP 的结构可以用下图直观的进行表示出来。

- \*.env: 描述水体环境, **必选**。
- \*.ati: 描述海面形状, 可选。
- \*.bty: 描述海底形状, 可选。
- \*.trc: 描述顶部反射系数, 可选。
- \*.brc: 描述底部反射系数, 可选。
- \*.ssp: 描述声速剖面图, 可选。

BELLHOP

- \*.ray: 描述声线和本征声线;
- \*.shd: 描述声线的传播损失;
- \*.arr: 描述声线到达的时间序列;

;

## 第三章 BELLHOP 环境文件

不管手动用记事本等编辑器编辑还是用 MATLAB 版的 GUI 界面的次次点击，最后形成的文件都是 \*.env 的形式，下面主要介绍以下环境文件的结构以及简要说明。

\*.env 文件主要有 TITLE 和 OPTIONS1 至 OPTIONS5，各个部分相互独立并完成对水体环境不同方面的描述。在介绍该文件可以结合附录的一个例子来了解。

### 一、TITLE

TITLE 主要描述了声波的频率和传播介质的个数。

声波的频率对其轨迹来说并不是非常重要，因为它是频率无关的，但是频率对声线步长会产生影响，所以 BELLHOP 在声波更高频率时需要更精确的声线轨迹。

在 BELLHOP 中传播介质的个数总是设置为 1 (NMEDIA<20)，这个虚参数的设置是为了 Acoustics Toolbox 中其他模型 (KRAKEN) 处理多层问题。

例子中的声波频率是 50Hz，传播介质个数为 1。

### 二、OPTION1

OPTION1 是单引号中的五个字母组成的，下面我们分别介绍其含义，

#### 1. OPTIONS1(1)

注：OPTIONS1 (1) 所指为 OPTIONS1 的第一个字母

主要描述了 BELLHOP 为了计算声速以及沿着声线相关的其他参数而采用的一些插值方法，下面是为声速剖面进行插值，所包括的字母如下：

- 'S': cubic spline interpolation, 三次样条插值（推荐）

注：样条拟合产生外表更光滑的声线轨迹图

- 'C': C-linear interpolation, C 型线性插值
- 'N': N2-linear interpolation, N2 线性插值

● 'A': analytic interpolation, 分析插值，需要 ssp 子程序的调整和模型的进一步重编译。

- 'Q': 声场的二次逼近，需要另外编写 \*.ssp 文件。

## 2. OPTIONS1(2)

主要描述海水表面的类型

- 'V': vacuum above surface , 表面真空。
- 'R': perfectly rigid media above surface , 表面完全刚性的硬物。
- 'A': acoustic half-space, 声学半空间; SURFACE-LINE 格式如下。

z-surface	cp-surface	cs-surface	density-surface	AP-surface	AS-surface /
深度	纵波声速	横波声速	表面密度	纵波吸收系数	横波吸收系数

如果不选'A', BELLHOP 只用到前两个参数 (每行要以“/” 结尾, 其余参数用默认的), 后面的参数是其他模型使用的。

- 'F': 从一个\*.brc 文件读入反射系数。

## 3. OPTIONS1(3)

描述底部的衰减所用的单位。

- 'F': (dB/m) kHz;
- 'L': attenuation units correspond to the parameter loss;
- 'M': dB/m;
- 'N': Nepers/m;
- 'Q': Q-factor;
- 'W': dB/wavelength;

## 4. OPTIONS1(4)

可选参数, 如果描述声音的 Thope Volume 衰减, 要设置为 “T”

## 5. OPTIONS1(5)

可选参数, 用\*.ati 文件来描述海面边界形状要设置为' \*', 如可以描述为高斯波浪等所需的海面形状。

```

interpolation type
npoints
r(1)      z(1)
r(2)      z(2)
.          .
.          .
.          .
r(npoints) z(npoints)

```

其中 interpolation type 为字母，' L' 为表面线性插值，' C' 为曲线插值。

深度用 m，声速用 m/s。

### 三、OPTIONS2

由但括号内的两个字母组成，用来描述水柱下面的环境状况。

#### 1. OPTIONS2(1)

描述水柱下面的介质类型

- 'V': vacuum below watercolumn ，水柱下为真空；
- 'R': rigid below watercolumn ；刚性物质；
- 'A': acoustic half-space，声学半空间，BOTTOM-LINE 格式如下，

z-surface	cp-bottom	cs- bottom	density-s bottom	AP- bottom	AS- bottom /
深度	纵波声速	横波声速	底部密度	纵波吸收系数	横波吸收系数

- 'F': 从一个\*.brc 文件读入反射系数。

#### 2. OPTIONS2(2)

如果为空则认为海底平坦，如用\*.bty 文件来描述海底边界形状要设置为' \*'，如可以描述为高斯海山、狄更斯海山等所需的海底地形。格式如下，

interpolation type	
npoints	
r(1)	z(1)
r(2)	z(2)
.	.
.	.
.	.
r(npnts)	z(npnts)

## 四、OPTIONS3

用五个字母来描述输出选项，很重要！！

### 1. OPTIONS3(1)

从根本上来说，源代码简单的解决了波动方程，所有任何自己指定的单位都可以使用。

- 'A': write amplitudes and travel times, 幅度和传播时间;
- 'E': write eigenray coordinates, 本征声线坐标;
- 'R': write ray coordinates, 声线坐标;
- 'C': write coherent acoustic pressure, 相干声压;
- 'I': write incoherent acoustic pressure, 非相干声压;
- 'S': write semi-coherent acoustic pressure, 半相干声压;

### 2. OPTIONS3(2)

描述计算声压的近似方法

- 'G': use geometric beams , 几何波束(default);
- 'C': use Cartesian beams, 笛卡尔波束;
- 'R': use ray-centered beams, 声线中心波束;
- 'B': use Gaussian beam bundles, 高斯波束;

### 3. OPTIONS3(3)

描述波束的移位效应。

- ' ' : 波束的移位效应 (default);
- ' S' : 包括波束的移位效应;
- ' \*' : 使用一个波束类型文件\*. sbp, 格式与\*. ati 和\*. bty 一样。

#### **4. OPTIONS3(4)**

描述声源的类型。

- ' R' : 圆柱坐标系中的点声源 (default);
- ' X' : 笛卡尔坐标系中的线声源;

#### **5. OPTIONS3(5)**

- ' R' : 直线网络的接收器;
- ' I' : 不规则网络的接收器;

### **五、OPTIONS4**

如果 OPTIONS3 只有一个字母的话, 就没有必要在\*. env 文件继续写内容了. 否则就要多加两行用来包含波束特性的额外信息, 下面为字母说明,

#### **1. OPTIONS4(1)**

描述波束的类型

- ' C' : Cervený type;
- ' F' : space-filling, 空间填充;
- ' M' : minimum width, 最小宽度;
- ' W' : WKB beams, WKB 波束;

#### **2. OPTIONS4(2)**

描述波束曲率的类型

- ' D' : use curvature doubling, 曲率翻倍;



- 'S': use standard curvature, 标准曲率;
- 'Z': use zeroing curvature, 零曲率;

## 六、其他参数

- NSD: The number of source depths, 声源在垂直方向上个数(<51)。

超过 50 个声源, 声线图将会变得杂乱无章;

- SD(): The source depths (m), 声源的深度;

- NRD: The number of receiver depths, 接收水听器的垂直方向上个数(<101 and  $NR * NRD \leq 52000$ );

- RD(): The receiver depths (m), 接收水听器的深度;

- NR: The number of receiver ranges, 接收水听器的水平方向上个数; 相当于 BELLHOP (GUI) 中的 Number of range slices (#steps+1), 即水平方向上各等距离分段点所测的数据结果, 如幅度和时延等。( $NR < 1001$  and  $NR * NRD \leq 50000$ )

- R(): The receiver ranges (km), 接收水听器的水平接收范围;

- STEP: The step size used for tracing the rays (m), 声线跟踪的步长;

所需步长的大小依赖于很多因素, 这包括频率, SSP 中的尺寸大小特性 (如表面波导), 是否需要画出相干或非相干的传播损失图。如果你把 STEP 设置为零, 那么 BELLHOP 会用一个默认的步长然后告诉你结果。你尝试地把步长减半直到结果收敛到你所需的精度。为了得到一个光滑的声线, 你应该对 SSP 进行样条插值, 所用的步长也应该要比 SSP 两点的的结果要小得多。声速剖面通常控制声线的步长。如果你提供的声速点要多于所需的点, 那么 BELLHOP 的运行也就相应的变慢了。另一方面, 对于一个给定采样的声速剖面, 声速剖面所指定的步长比默认值要小, 你就能够获得更精细的声线图。

- ZBOX: The maximum depth to trace a ray (m), 接收水听器的最大深度;

- RBOX: The maximum range to trace a ray (km), 接收水听器与声源的最大水平距离;

```

'Munk profile'      ! TITLE
50.0                ! FREQ (Hz)
1                  ! NMEDIA
'CVF'              ! SSOPT (Analytic or C-linear interpolation)
51 0.0 5000.0      ! DEPTH of bottom (m)
0.0 1548.52 /
200.0 1530.29 /
250.0 1526.69 /
400.0 1517.78 /
600.0 1509.49 /
800.0 1504.30 /
1000.0 1501.38 /
1200.0 1500.14 /
1400.0 1500.12 /
1600.0 1501.02 /
1800.0 1502.57 /
2000.0 1504.62 /
2200.0 1507.02 /
2600.0 1512.55 /
2800.0 1515.56 /
3000.0 1518.67 /
3200.0 1521.85 /
3400.0 1525.10 /
3600.0 1528.38 /
3800.0 1531.70 /
4000.0 1535.04 /
4200.0 1538.39 /
4400.0 1541.76 /
4600.0 1545.14 /
4800.0 1548.52 /
5000.0 1551.91 /
'A' 0.0
5000.0 1600.00 0.0 1.0 /
1                ! NSD
1000.0 /         ! SD(1:NSD) (m)
51              ! NRD
0.0 5000.0 /     ! RD(1:NRD) (m)
1001            ! NR
0.0 100.0 /      ! R(1:NR) (km)
'R'             ! 'R/C/I/S'
39              ! NBeams
-14.0 14.0 /     ! ALPHA1,2 (degrees)
0.0 5500.0 101.0 ! STEP (m), ZBOX (m), RBOX (km)

```

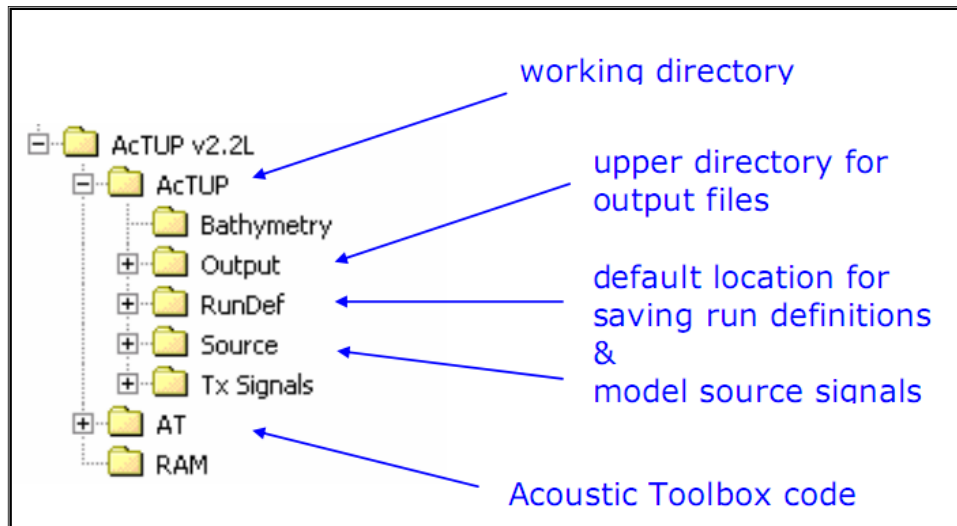
BELLHOP  
不用

## 第四章 BELLHOP (Matlab\_GUI) 实例一

### 一、准备工作

【1】 AcTUP V2.2L 需要 MATLAB 6 或更高的版本支持，本指南使用 Matlab 7.6--2008a。

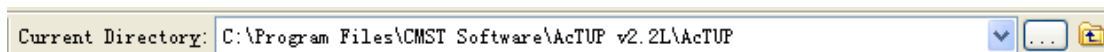
【2】 将压缩包解压至 “C:\Program Files\” 文件夹下，生成 “CMST Software” 文件夹，其下各子文件夹说明如下。



【3】 不要随意的编辑并删除安装的文件夹及路径名。

### 二、运行 BELLHOP

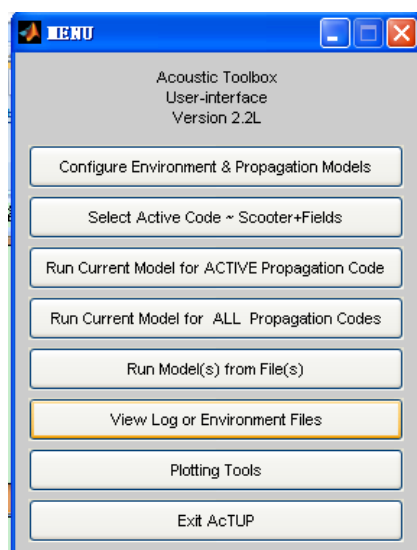
1. 运行 Matlab 7.6--2008a（至少 MATLAB 6 或更高版本），将目标文件夹按如下选择后



2. 命令行键入：

```
>> actup
```

运行界面如下：

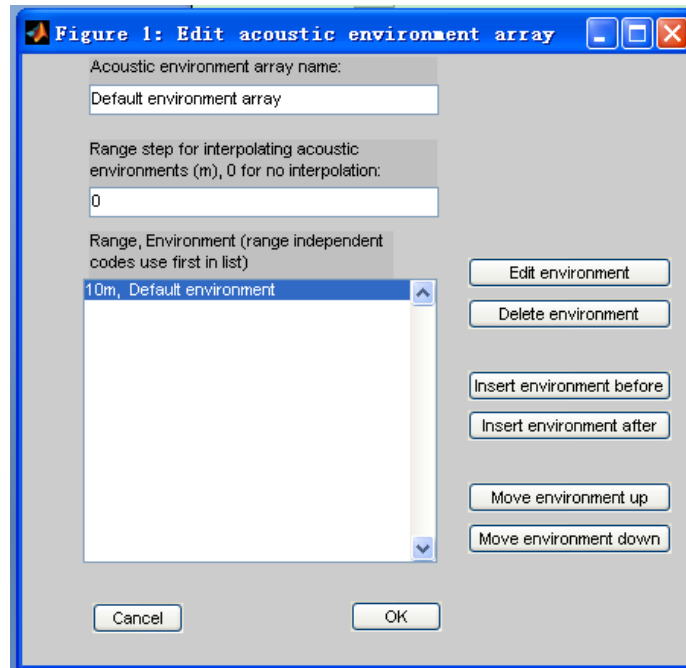


### 三、配置水体环境参数

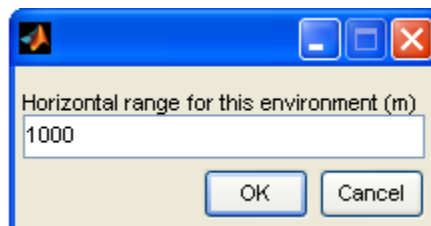
#### 1. 点击 “Configure Environment&Propagation Models”



#### 2. 点击 “Edit Environment”

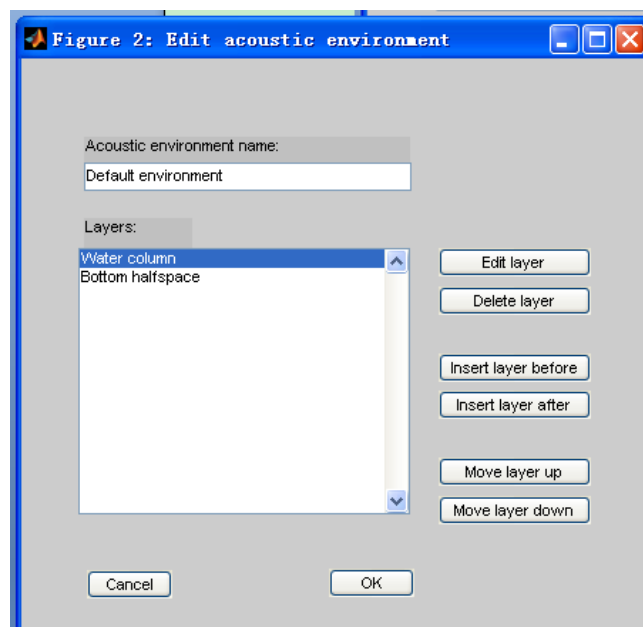


3. 点击 “Edit environment” →

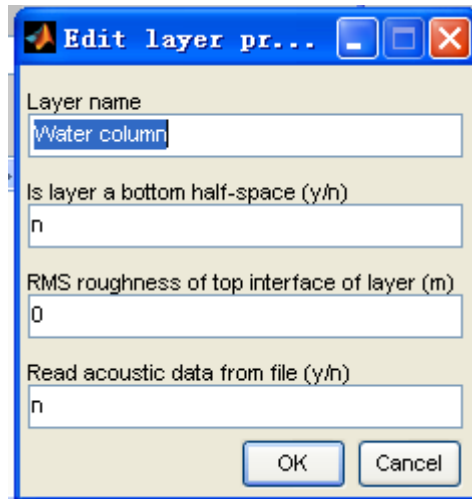


声源和接收水听器的水平距离，我们设置 1000m。

4. 点 “OK”



5. 选择 “Water column” → 点击 “Edit layer”



Is layer a bottom half-space=n（是否为底部声学半空间，声学半空间的特点是声速不变，均匀密度，而海水环境中声速会按照下表的规律发生变化。）

	冬（正）			春				夏（负）		
深度 (m)	0~20	20~40	40~55	0~10 (负)	10~20 (正)	20~40（正）	40~55	0~20	20~40	40~55
声速 (m/s)	1517~ 1518	1518~ 1519	1519~ 1519.5	1521.3~ 1521	1521~ 1521.6	1521.6~ 1522	1522	1540~ 1543	1543~ 1546	1546~ 1549

表 1 声速随深度的变化

（注：负表示 ssp 为递减，正表示递增）

经相关的资料查阅，得出表 1 为常见的海面粗糙度参数：

风级	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
名称	无风	轻风	轻风	微风	和风	清劲风	强风	疾风	大风	烈风	狂风	暴风	飓风
浪高 (m)	0	0.1	0.2	0.6	1	2	3	4	5.5	7	9	11.5	14(或以上)

表 2 常见的海面粗糙度参数

我们这里取清劲风，RMS roughness of top interface of layer(m)=2.0（表面粗糙度的均方根值，单位为 m）

Read acoustic data from file=n（不需要从外部文件读取声学数据）

6. 点击“OK”弹出如下界面

我们的参数取值如下：（注：[]中的每一项一一对应）

Vector of Z coordinates=[0 20]（深度范围，距海平面的垂直距离）

Vector of compressional sound speed=[1540 1543]（横波声速，取值为表 1 中 0-20 的夏天）

Vector of densities=[1021 1021]（该层海水的密度：冬：1023.5-1024 千克/立方米，夏：1021-1021.5 千克/立方米, 这里我们取值为夏季海水的密度）

Vector shear sound speed=[]（纵波声速）

Vector of compressional wave absorption=[69.2912 69.4261]（横波吸收系数）

注：计算如下，  
 下面的 Thorp 公式可得 中  $\alpha$  约为 0.0045，  
 通过  $W = \alpha * c / f$  计算可得  
 $W1 = \alpha * c1 / f = 0.0045 * 1540 / 100 = 69.2912$   
 $W2 = \alpha * c2 / f = 0.0045 * 1543 / 100 = 69.4261$   
 （其中 f 由四、配置与代码不相关的传播参数中的 ‘Frequency (s)’ 这一项所确定）

Vector of shear wave absorption=[]（纵波吸收系数）

对于海水的吸收特性，BELLHOP 采用 **Thorp 公式**：

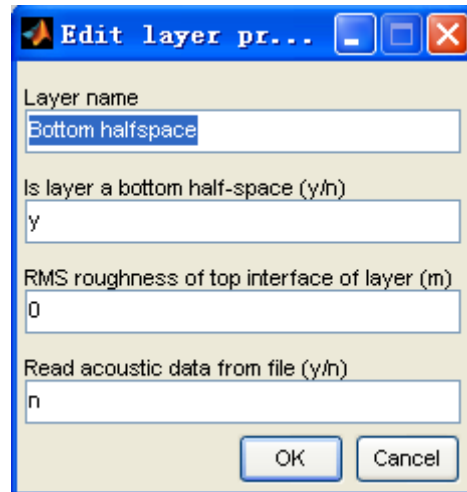
$$\alpha(f) = \frac{0.11f^2}{1+f^2} + \frac{44f^2}{4100+f^2} + 0.0003 \times f^2 + 0.0033$$

其中  $f$  为工作频率，单位为 kHz， $\alpha(f)$  为吸收因子，单位为 dB/km。

$W = \alpha * c / f$  (其中  $w$  单位为 db/wavelength;  $c$  为声速，单位 m/s;  $f$  单位取 Hz)

点击“OK”返回上一层界面。

#### 7. 选择 Bottom halfspace → 点击“Edit Layer”



设置如下：

Is layer a bottom half-space=y (是否为底部半空间)

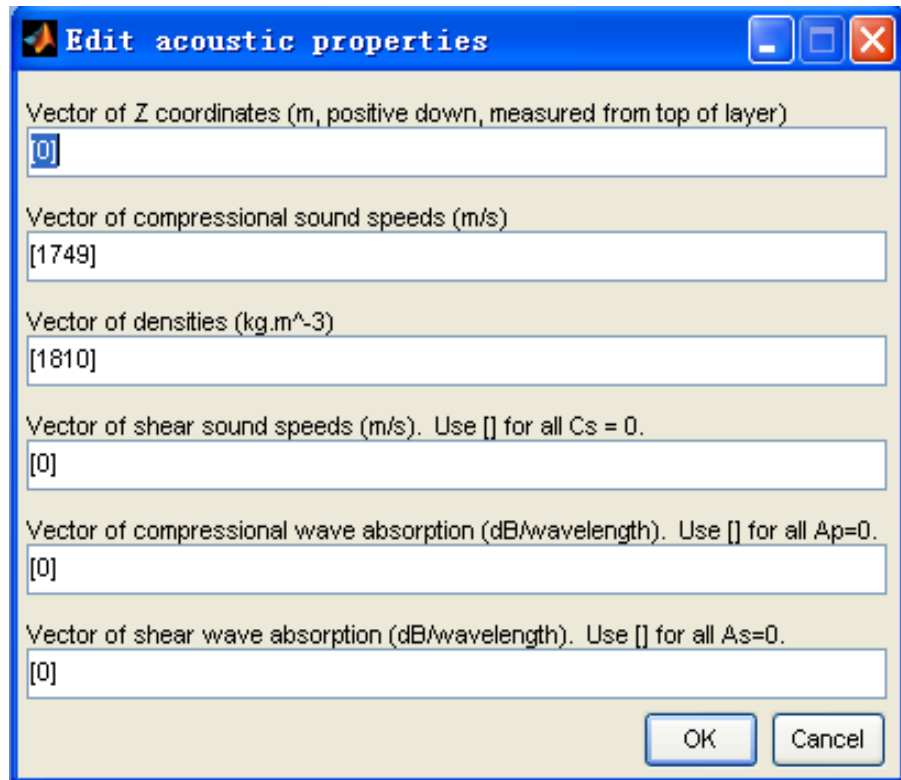
**BELLHOP 把海底建模为声学弹性半空间，其特点是声速不变，均匀密度。**

RMS roughness of top interface of layer=0 (底部水体表面的粗糙度一般忽略)

Read acoustic data from file=n (不需要从外部文件读取声学数据)

#### 8. 点击“OK”弹出如下界面，





**Edit acoustic properties**

Vector of Z coordinates (m, positive down, measured from top of layer)  
[0]

Vector of compressional sound speeds (m/s)  
[1749]

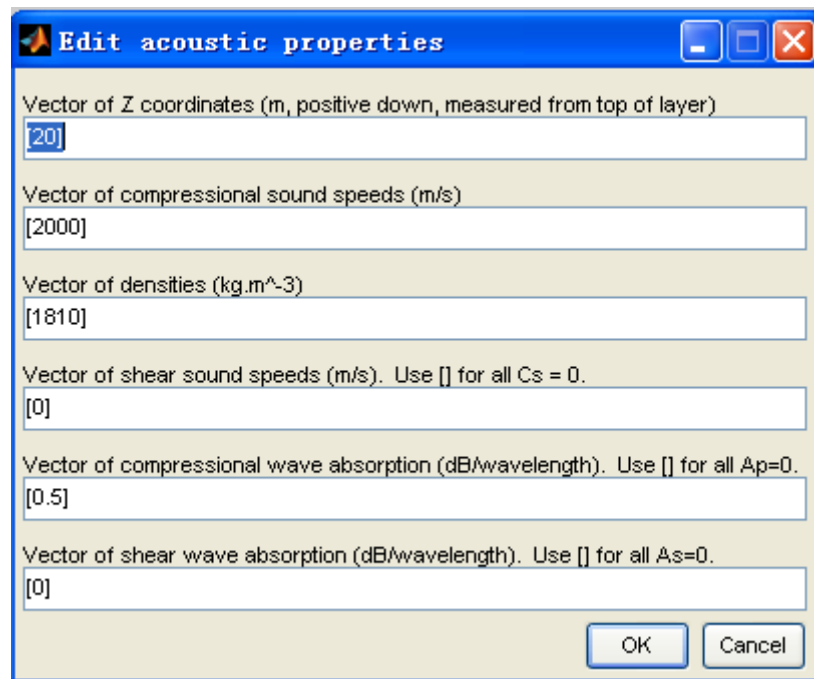
Vector of densities (kg.m<sup>-3</sup>)  
[1810]

Vector of shear sound speeds (m/s). Use [] for all Cs = 0.  
[0]

Vector of compressional wave absorption (dB/wavelength). Use [] for all Ap=0.  
[0]

Vector of shear wave absorption (dB/wavelength). Use [] for all As=0.  
[0]

OK Cancel



**Edit acoustic properties**

Vector of Z coordinates (m, positive down, measured from top of layer)  
[20]

Vector of compressional sound speeds (m/s)  
[2000]

Vector of densities (kg.m<sup>-3</sup>)  
[1810]

Vector of shear sound speeds (m/s). Use [] for all Cs = 0.  
[0]

Vector of compressional wave absorption (dB/wavelength). Use [] for all Ap=0.  
[0.5]

Vector of shear wave absorption (dB/wavelength). Use [] for all As=0.  
[0]

OK Cancel

参数设计如下：

Vector of Z coordinates=20（沉积物层的深度）

Vector of compressional sound speed=[2000]（沉积物层的声速取 2000m/s）

Vector of densities=[1810]（泥沙密度：1810 kg/ m<sup>3</sup>）

Vector of shear sound speed=[]（纵波的速度）

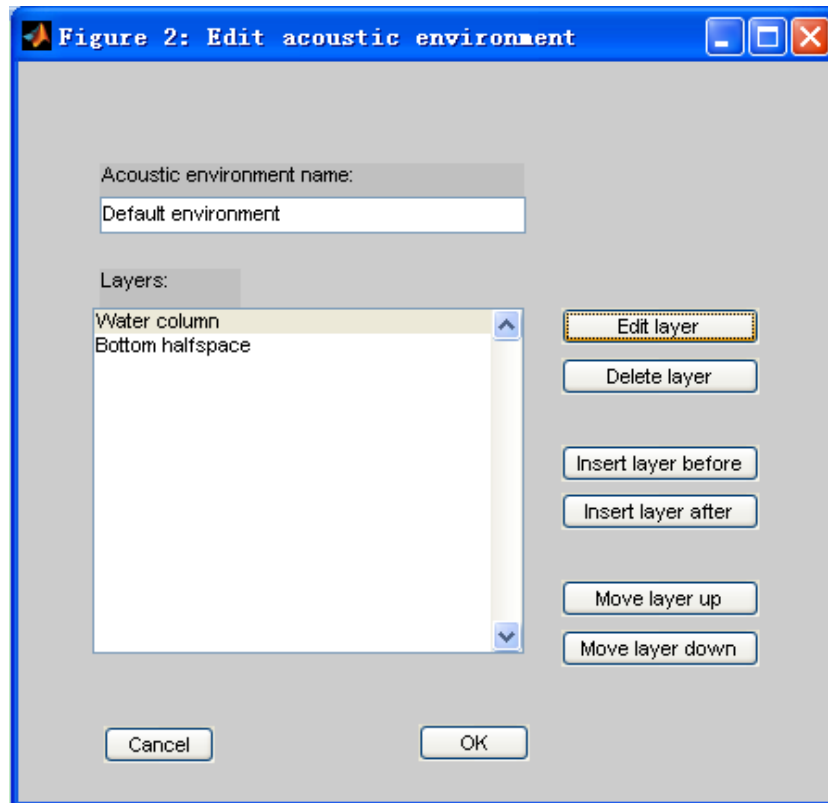
Vector of compressional wave absorption=[0.5]（横波吸收系数）

注：沉积物的衰减系数 $\alpha$ 根据 Hamilton 近似为  $0.25f$  (DB/m) 其中  $f$  以 kHz。可通过上面公式得到  $W3$ 。

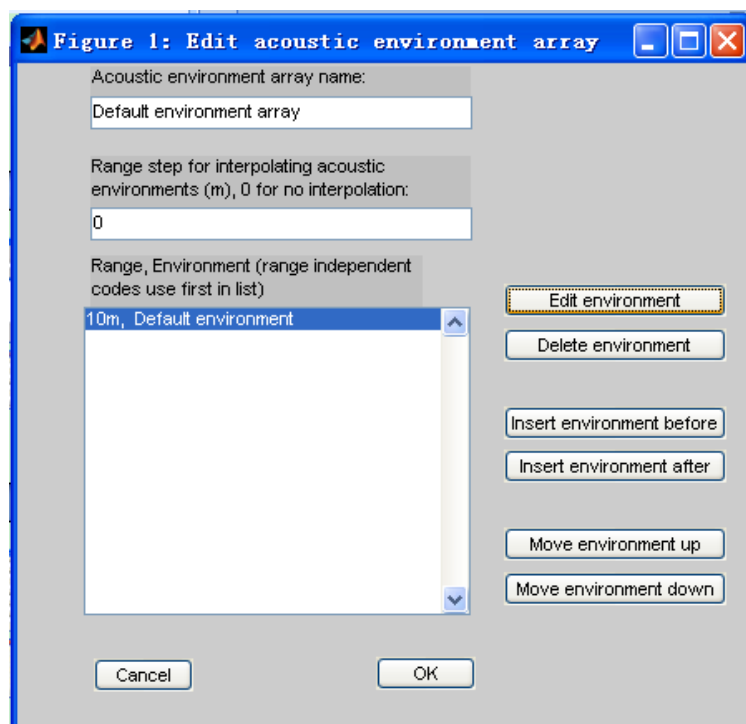
$$W3 = \alpha \cdot c^3 / f = 0.25 \cdot 0.1 \cdot 2000 / 100 = 0.5$$

Vector of shear wave absorption=[]（纵波吸收系数）

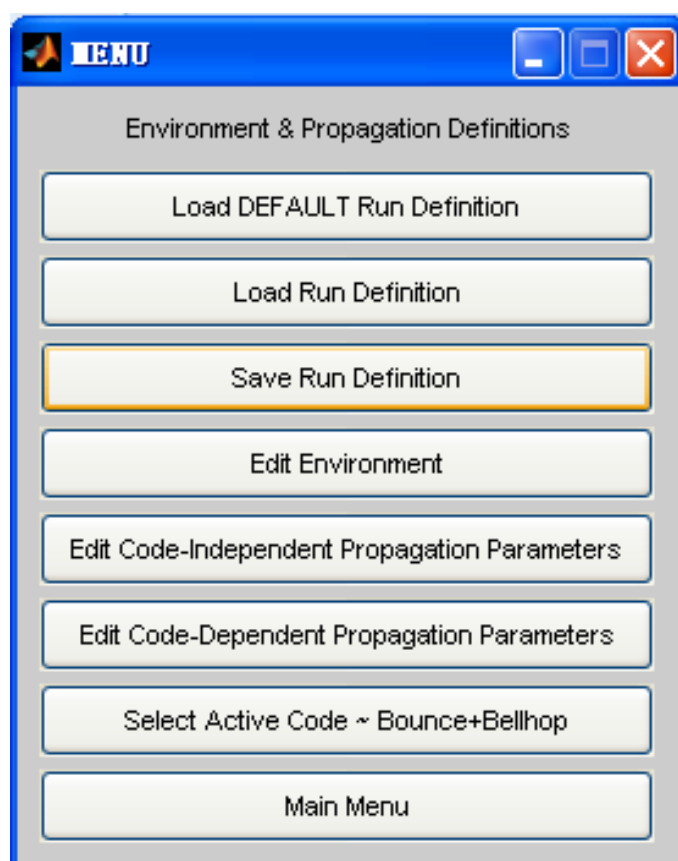
点击“OK”返回上一层界面，



9. 点击“OK”



10. 点击“OK”返回上一层界面，



11. 点击 Save Run Definition, 成功保存。

## 四、配置与代码不相关的传播参数

### 1. 点击 “Edit Code-Independent Propagation Parameters”

参数设置如下：

Frequency (s) =100（声波的频率，Hz）

Source depth=10（声源的深度，m）-----SD

Receiver depth=10（接收水听器的深度，m）-----RD

Minimum range=100（接收水听器的水平方向上接收范围最小值，m）----R

Maximum range=1000（接收水听器的水平方向上接收范围最大值，m）---RB

Number of range slices=50（接收水听器的水平方向上个数）-----NR。即水平方向上各等距离分段点所测的数据结果，如幅度和时延等。

Sub directory for output files=

Filename prefix for output files=Test20111025

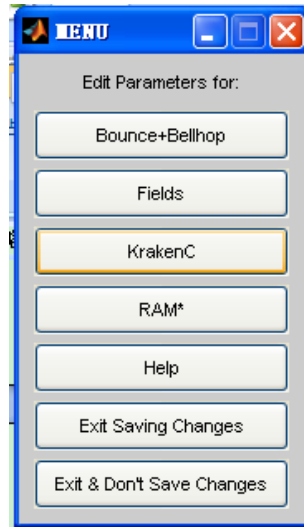
Use bathymetry file where supported=n（使用描述水体深度的文件）

Allow manual edit environment file(y/n)=y（环境文件是否可以编辑？）

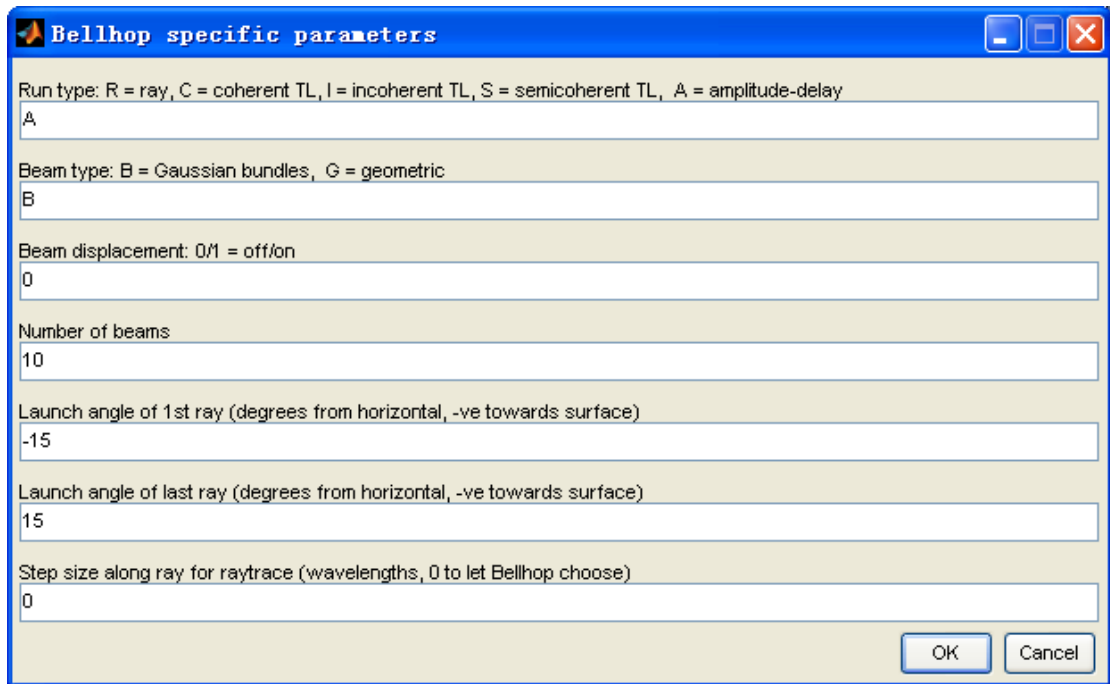
### 2. 点击 “OK” 返回上一层菜单

## 五、配置与代码相关的传播参数

### 1. 点击 “Edit Code-dependent Propagation Parameters”



### 2. 点击 “Bounce+Bellhop”



参数设

置如下：

Run type=A(这里我们需要得到冲激响应，所以选 A= amplitude-delay)

Beam type=B（高斯波束）

Beam displacement=0（波束移位效应）

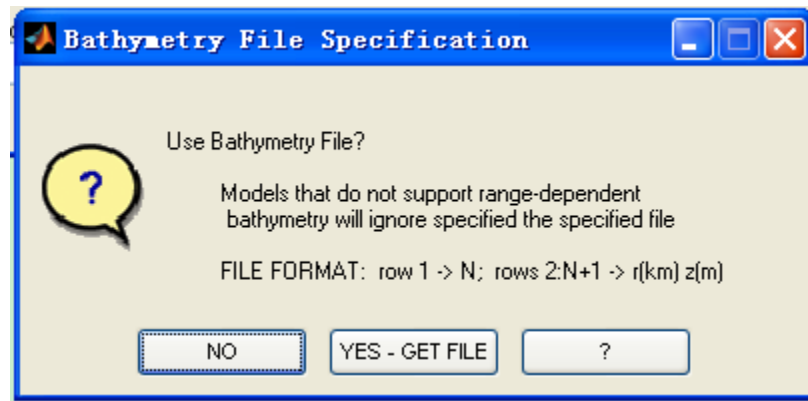
Number of beams=10（声线的个数）

Launch angle of 1st ray=-15（第一个声线的到达角度）

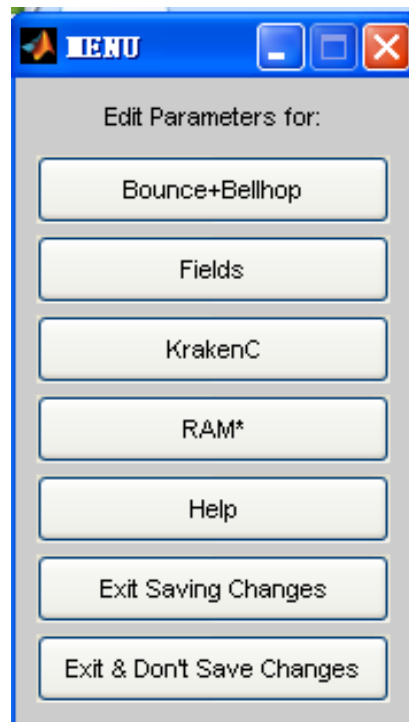
Launch angle of last ray=15（最后一个声线的到达角度）

Step size along ray for raytrace=0

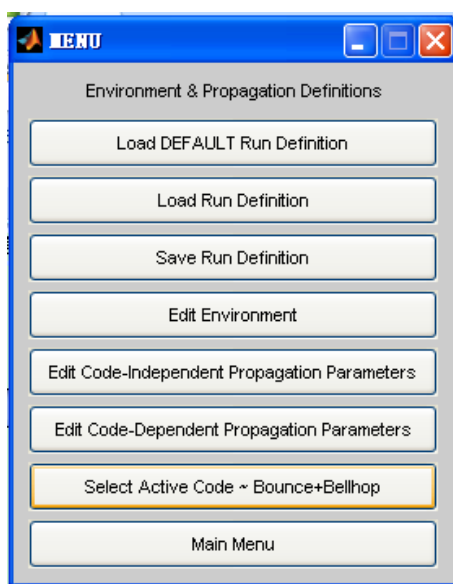
3. 点击“OK”



4. 选择“NO”



5. 点击“Exit Saving Changes”

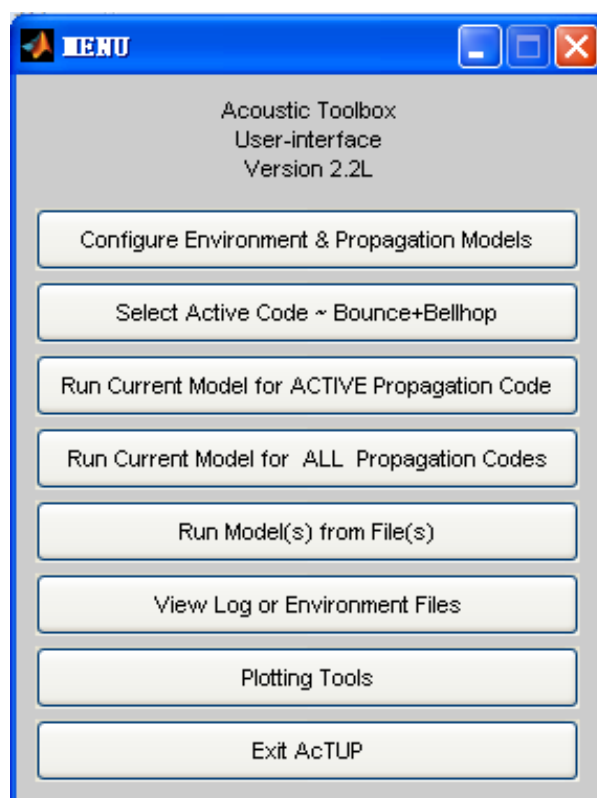


6. 点击 “Select Active Code~Bounce+Bellhop”

7. 选择 “Bounce+Bellhop”

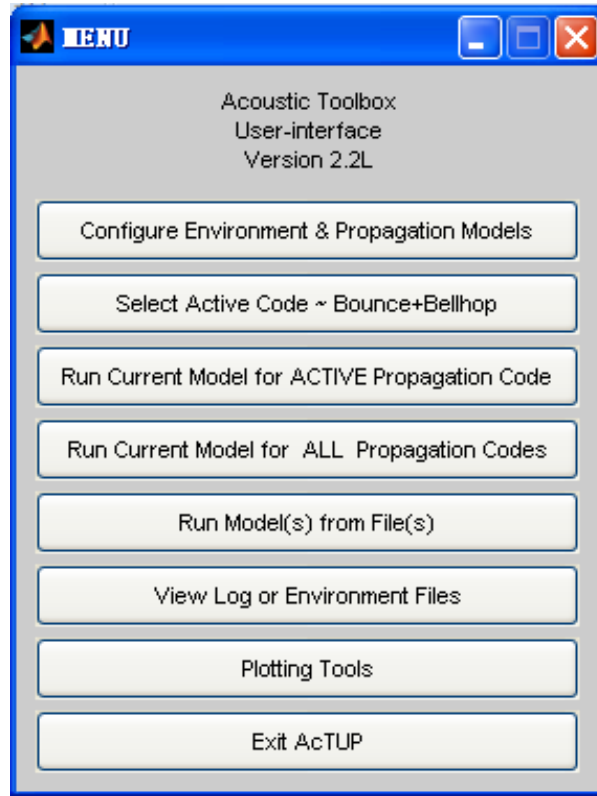
8. 点击 Save Run Definiton, 保存

9. 点击 “Main Menu



## 六、运行计算模型

点击“Run Current Model for ACTIVE Propagation”



稍等片刻，待程序处理完毕，点击 Exit AcTUP 退出程序。

## 七、数据的处理及分析

1. 本步骤通过自己编写的数据处理程序 BELLHOPdata.m（将 ASCII 转为十进制）和 BELLHOPchannel.m（将所需的数据进行处理并画图比较）实现。

2. 在 C:\Program Files\CMST Software\AcTUP v2.2L\AT\Matlab 文件夹下找到 BELLHOPdata.m 并运行，其中

```
read_arrivals_asc('C:\Program Files\CMST Software\AcTUP
v2.2L\AcTUP\Output\Bounce+Bellhop\Test20111025_10000.arr')
```

里的文件名“Test20111025\_10000.arr”要正确无误，最好不要嫌麻烦的找到这个文件，这个文件由 BELLHOP 产生幅度值和声线传播时间以及其他的声线参数，格式为 ASCII。

3. 运行结果：

例程 1：



各参数按本指南步骤设置，结果如下

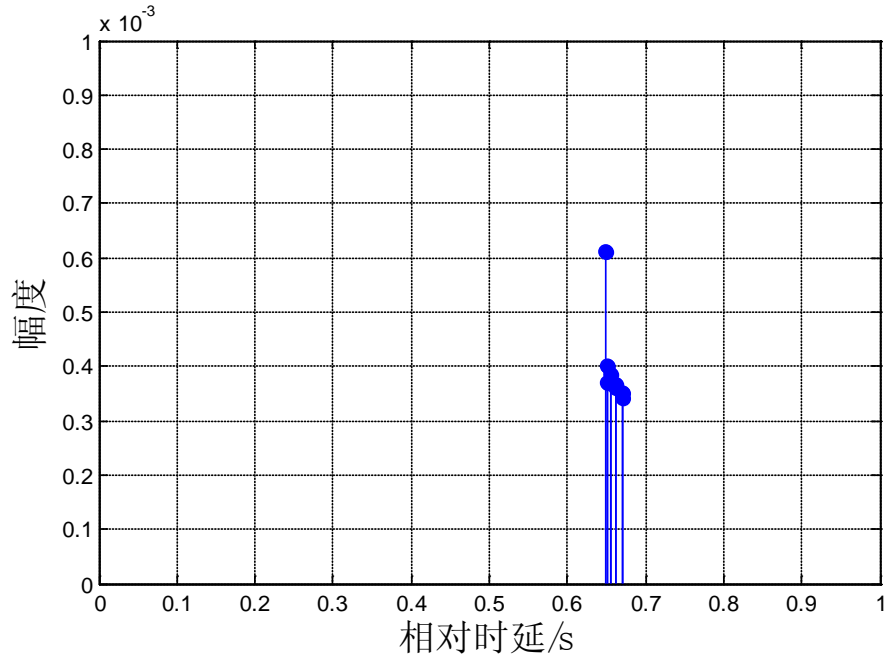


图 1 冲激响应

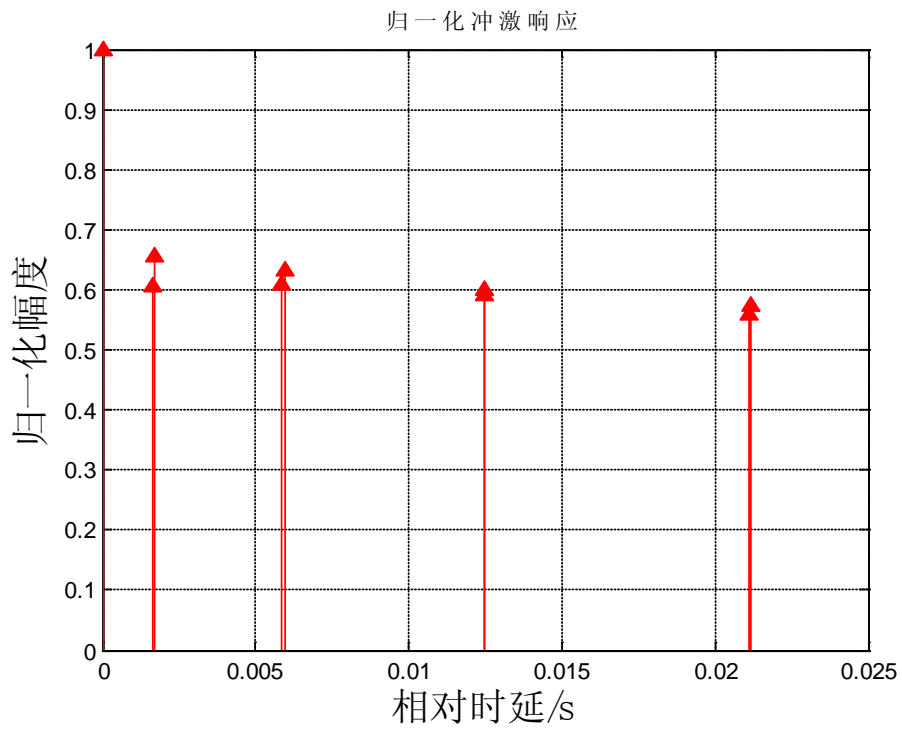


图 2 归一化冲激响应

例程 2: 接收机和发射机水平距离 1KM, 整个水体平均水深 100M, 发射机深度 40M, 接收机深度 60M, 声线数 30, 其他参数和例程 1 相同, 结果如下。

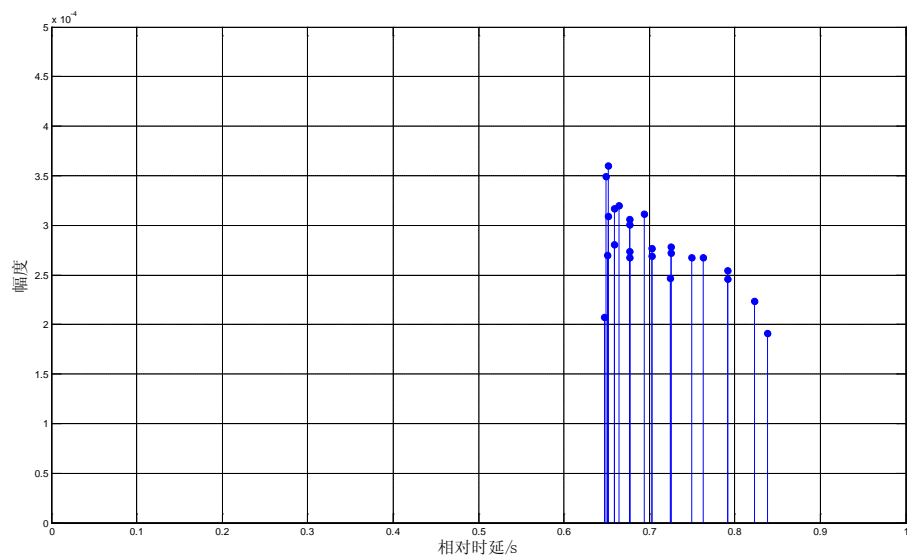


图 3 冲激响应

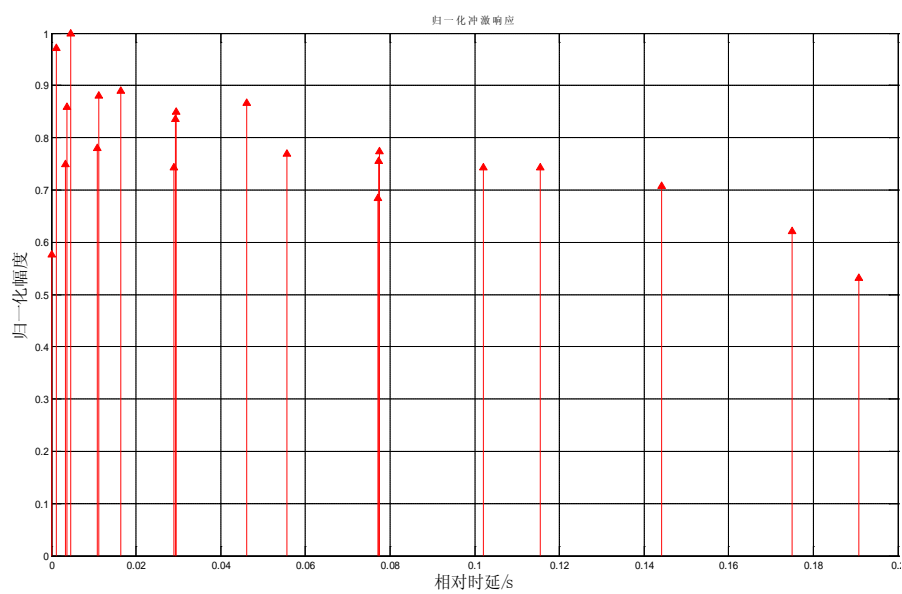
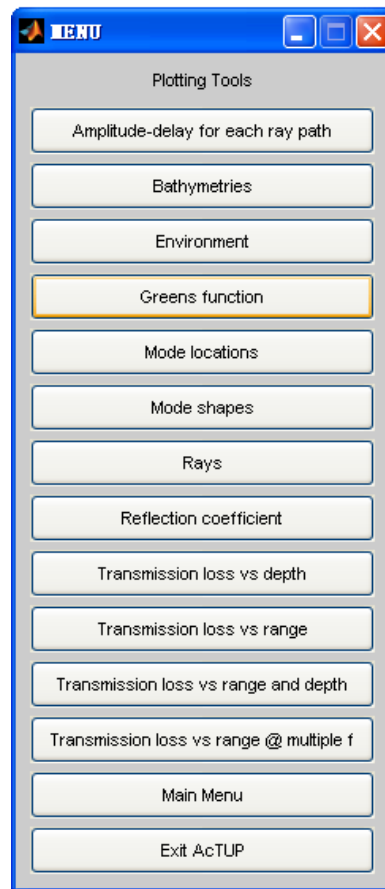


图 4 归一化的冲激响应

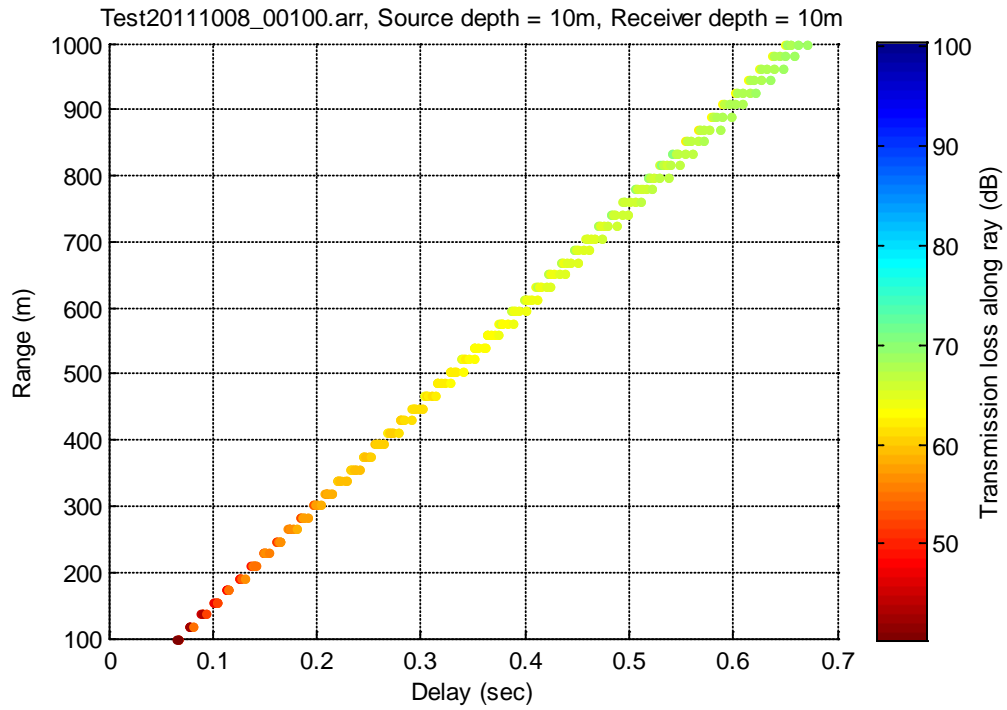
## 八. BELLHOP 画图工具选项



如图所示，BELLHOP 画图工具选项介绍如下：

- **Amplitude-delay for each ray path**: 在“A”模式下画出“.arr”文件的输出数据，即每条声线路径的幅度—时延图。
- **Bathymetry**: 画出水深数据
- **Environment**: 画出当前加载的环境模型的海水、海底物理和声学参数
- **Green’s function**: 画出 Scooter 的仿真结果（.grn 文件）
- **Mode locations** 和 **Mode shapes**: 使用 Kraken&KrakenC 的仿真结果
- **Rays**: 在“R”模式下画出 BELLHOP 的仿真后的声线路径图
- **Reflection coefficient**: 画出 Bounce 计算后的海底反射系数
- **All Transmission loss plots**: 若干传播损失图

点击“Amplitude-delay for each ray path”，选择 BELLHOP 运行后产生的\*.arr 文件，得出如下的图。



该图为 BELLHOP 模型中，在发射换能器和接收水听器之间（可手工改动范围）通过多个等距离的测量，在每个点测出每个声线的时延和幅度、发射角度和到达角度、传播损失等数据。该图在 1000 米的收发距离中分等距离的 50 段来测数据。

## 第五章 BELLHOP (Command 版) 实例二

第三章我们用 BELLHOP 的 Matlab 的 GUI 界面编辑\*.env 文件,然后再运行出所要的相关输出文件,本章我们通过手动编辑\*.env 文件,然后再 Matlab 的命令行窗口完成仿真和画图的相关工作。

### 一、设置运行环境

本文档在 Matlab 7.6--2008a (至少 MATLAB 6 或更高版本) 测试, 选择 File->Set Path ->Add with Subfolders

将 AcTUP V2.2L 的文件夹下 at/bin 和 at/matlab 添加到 matlab 的运行路径

这一步很重要, 如果没有设置成功, 在后续的命令行操作就会不断报错哈! (本人所经历的深刻教训)

### 二、编辑环境文件

按照第二章我们介绍的环境文件的例程用文档编辑器完成输入文件的编辑, 并保存为“flatwav.env”。

### 三、仿真和画图

#### 1. 声线图

在 matlab 的运行路径中找到“flatwav.env”, 在命令行操作如下,

```
>> bellhop 'flatwav' <ENTER>
```

生成两个文件, flatwav.prt (关于波导特性的信息、到达角度数、计算到达时间等) 和 flatwav.ray (声线文件)。

```
>> plotray( 'flatwav' ) <ENTER>
```

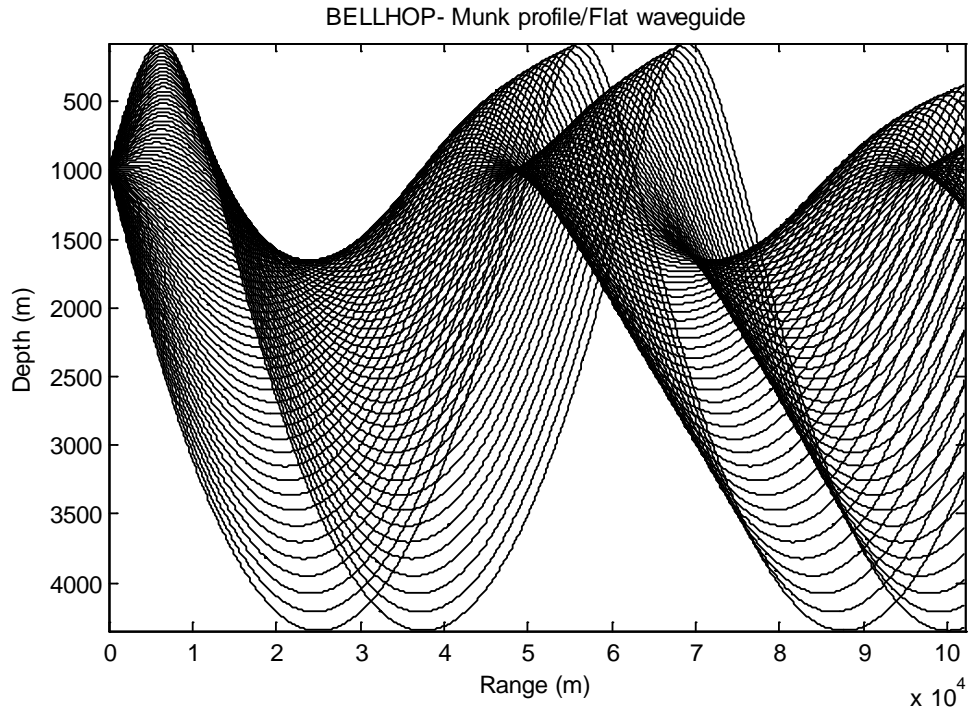


图 4.1 BELLHOP 在平坦的深水波导中产生的声线图

通过可选的\*.bty 和\*.ati 文件，可以分别描述波导的底部和顶部的边界形状，下图是底部是高斯海山，顶部是波浪形，BELLHOP 处理后声线图如图 4.2，

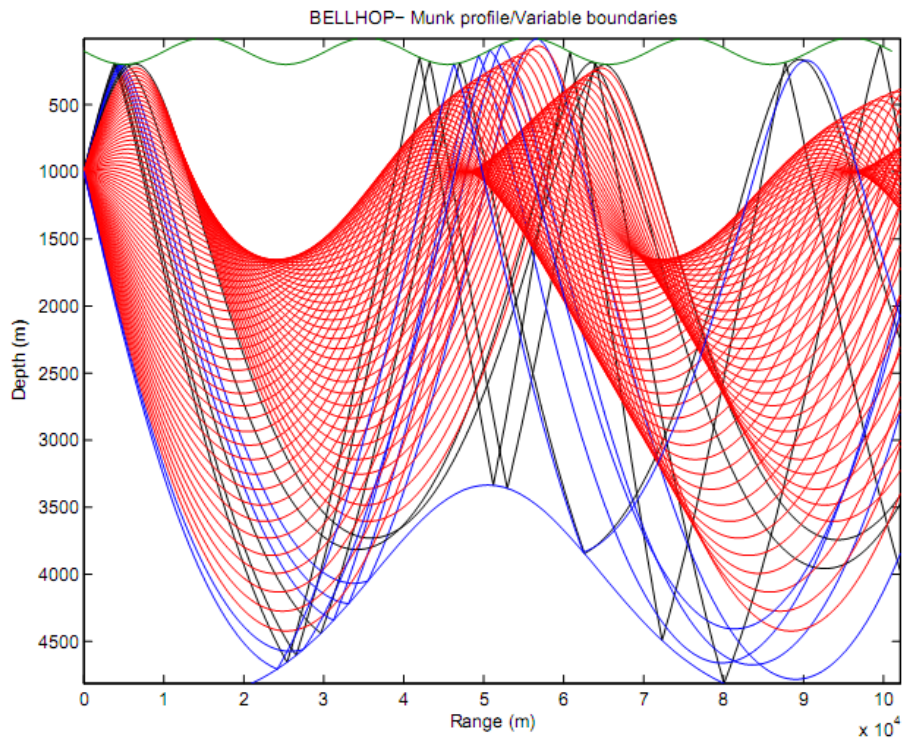


图 4.2 可变边界的声线图

## 2. 传播损失

打开“flatwav.env”稍作修改：‘R’改为‘C’并将波束的个数改为 10 并保存。

在 matlab 的运行路径中找到“flatwav.env”，在命令行操作如下，

```
>> bellhop 'flatwav' <ENTER>
```

```
>> plotshd( 'flatwav.shd' ) <ENTER>
```

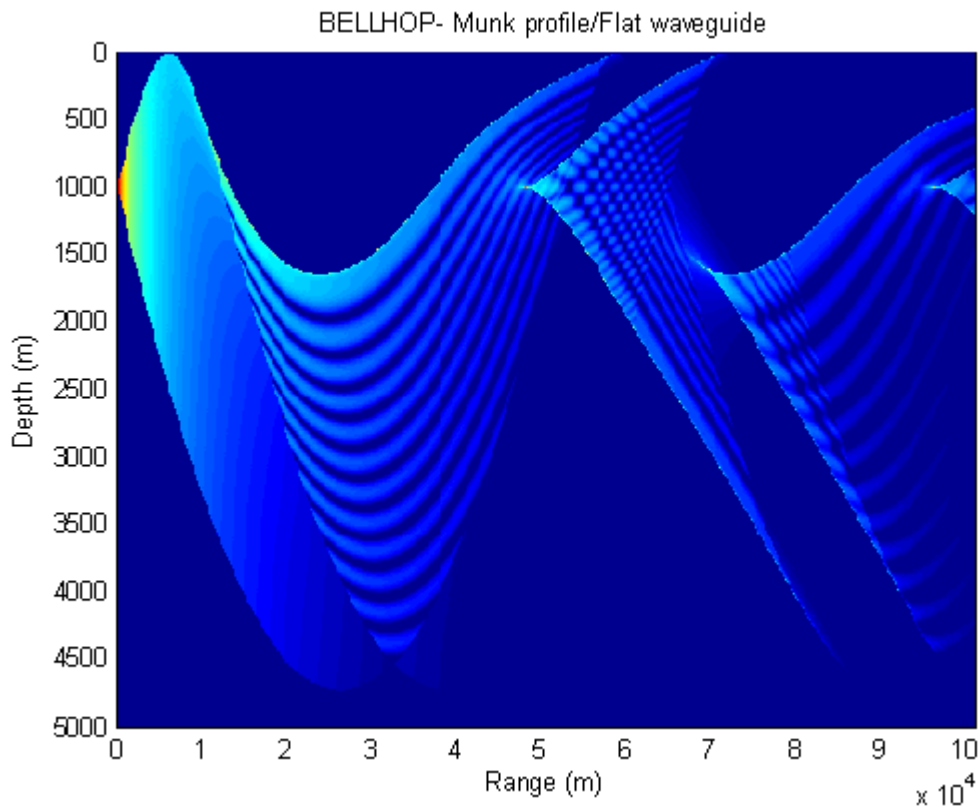


图 4.3 BELLHOP 计算产生的相干传播损失

## 3. 冲激响应

打开“flatwav.env”稍作修改：‘R’改为‘A’并将波束的个数改为 15 并保存。

在 matlab 的运行路径中找到“flatwav.env”，在命令行操作如下，

```
>> bellhop 'flatwav' <ENTER>
```

然后在按照第四章的数据的处理和分析的方法画出冲激响应。

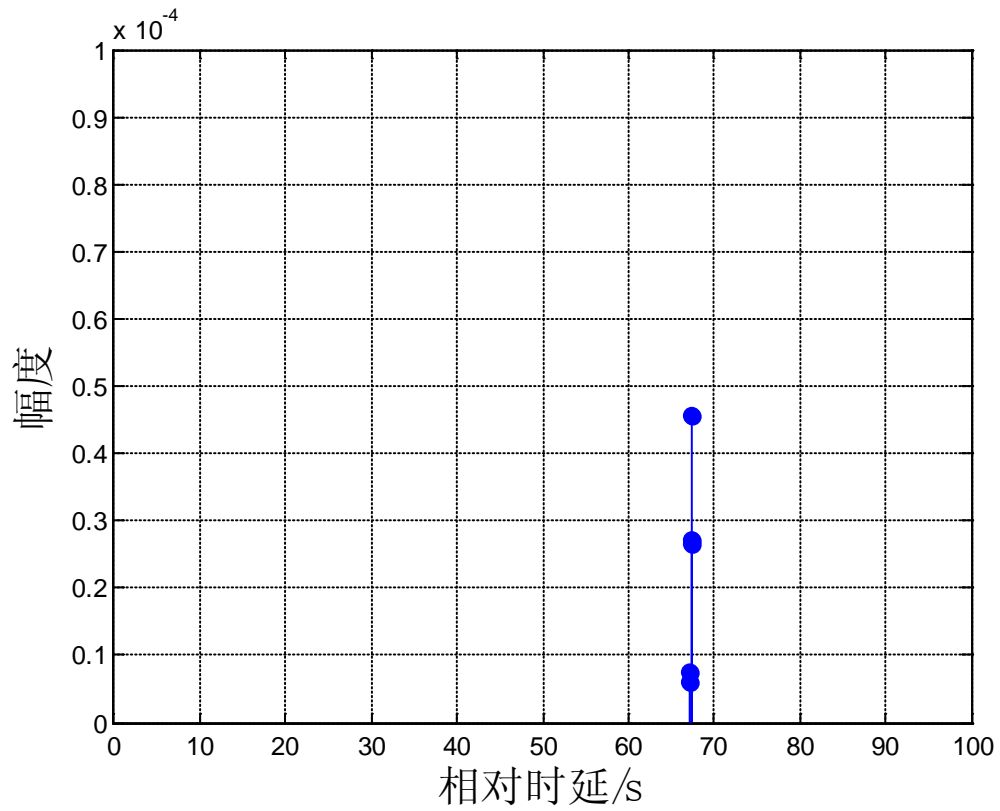


图 4.4 冲激响应

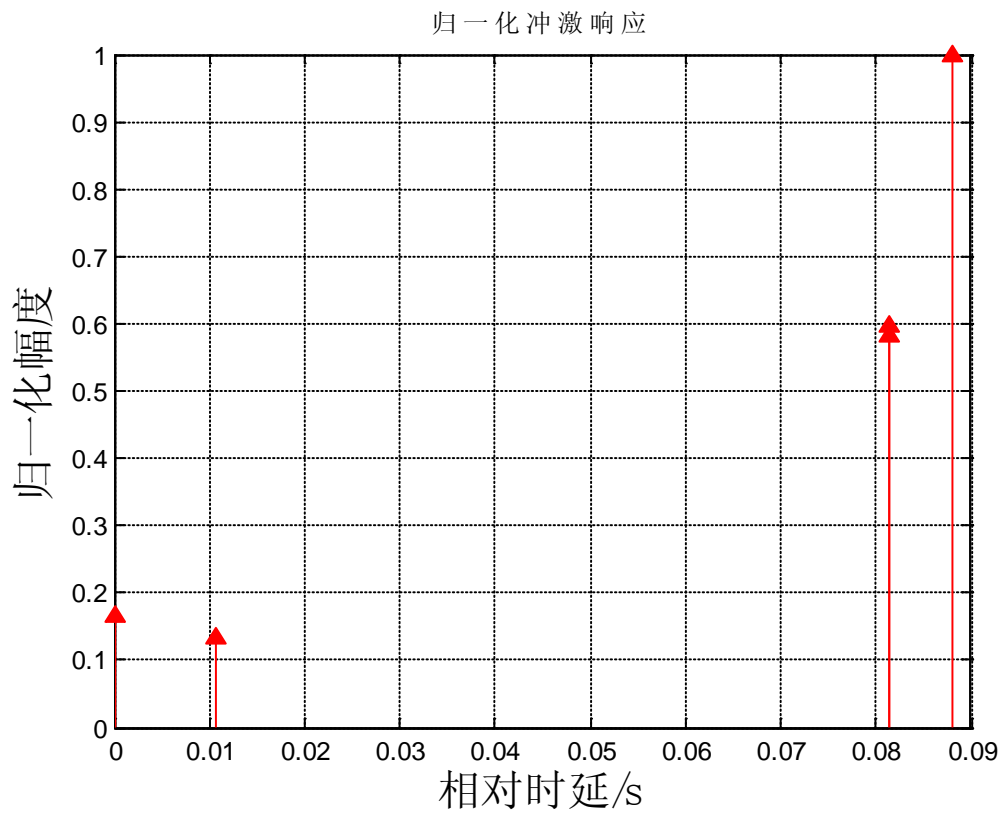


图 4.5 归一化的冲激响应



## 第六章 BELLHOP 模型应用

从信道估计的角度出发，发射信号  $x(p, t, f)$  相当于信道的输入信号，把水声信道看作一滤波器，其冲击相应函数为  $h(p, t, f)$ ，接收信号  $y(p, t, f)$  相当于信道的输出信号。这里用  $p$  代表空间位置， $t$  代表时间， $f$  代表频率。将海洋环境看作水声信道的原理图如图 6-1 所示。



图 6-1 水声信道原理图

信道的输入于输出可以由卷积运算结合起来，即：

$$y(p, t, f) = \int_{-\infty}^t h(p, t - \tau, f) x(p, \tau, f) d\tau$$

从这个观点看，声波信号在水声信道传播过程中所受的影响都由信道的冲击响应函数  $h(p, t, f)$  来决定。因此，只要取得发射信号  $x(p, t, f)$  和接收信  $y(p, t, f)$ ，就有可能通过一定的数学运算来求解  $h(p, t, f)$ ，从而掌握水声信道的性质，也即掌握了声波在海洋中传播的规律。反过来，只要掌握了反映水声信道特性的脉冲响应函数  $h(p, t, f)$ ，就有可能通过解卷积等数学运算从接收信号  $y(p, t, f)$  中恢复出发射信号  $x(p, t, f)$ ，从而解决了水声通信、水声信号探测、识别等诸多问题。

同理，这里我们通过配置海水信道的环境参数，通过 BELLHOP 模型计算出水声信道的冲激响应函数  $h(p, t, f)$ ，从而可以通过  $x(p, t, f)$  和  $h(p, t, f)$  的卷积得到接收信号  $y(p, t, f)$ 。

下面我们通过 MATLAB 工具来通过  $x(p, t, f)$  和  $h(p, t, f)$  的卷积得到接收信号  $y(p, t, f)$ 。

### 一、输入波形验证

#### 1. 波形文件

首先我们通过第四章的叙述（有 100 多条声线），编写 BELLHOP\_signal.m 计算得出水声信道的冲激响应，

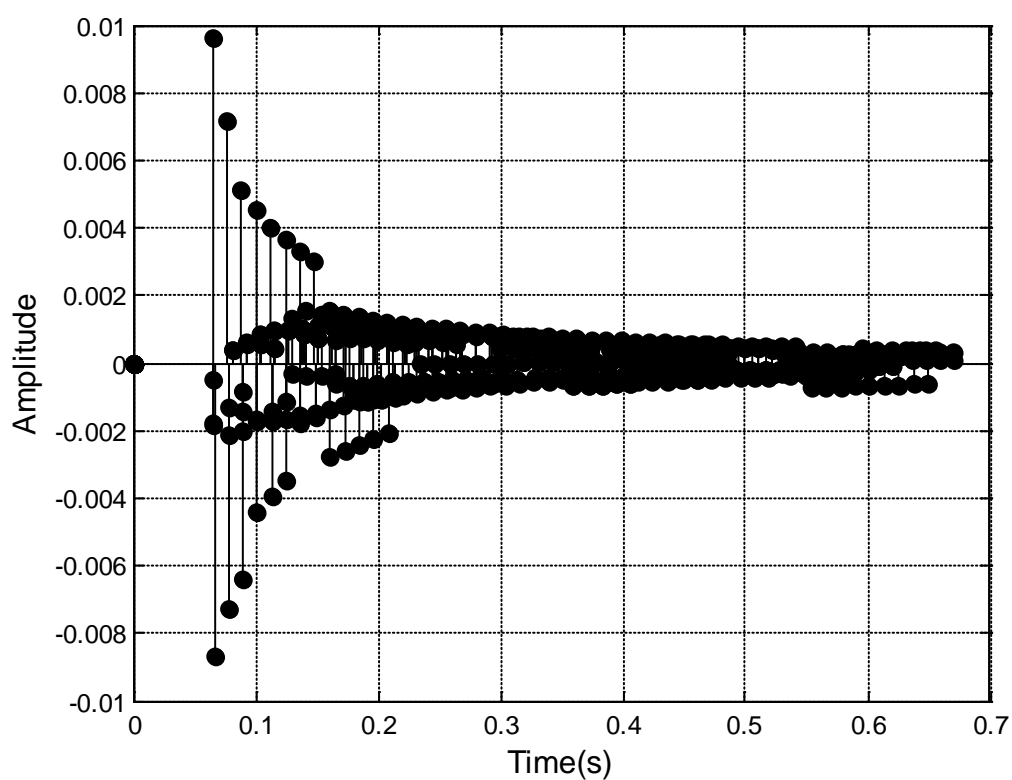


图 6-2 信道冲激响应

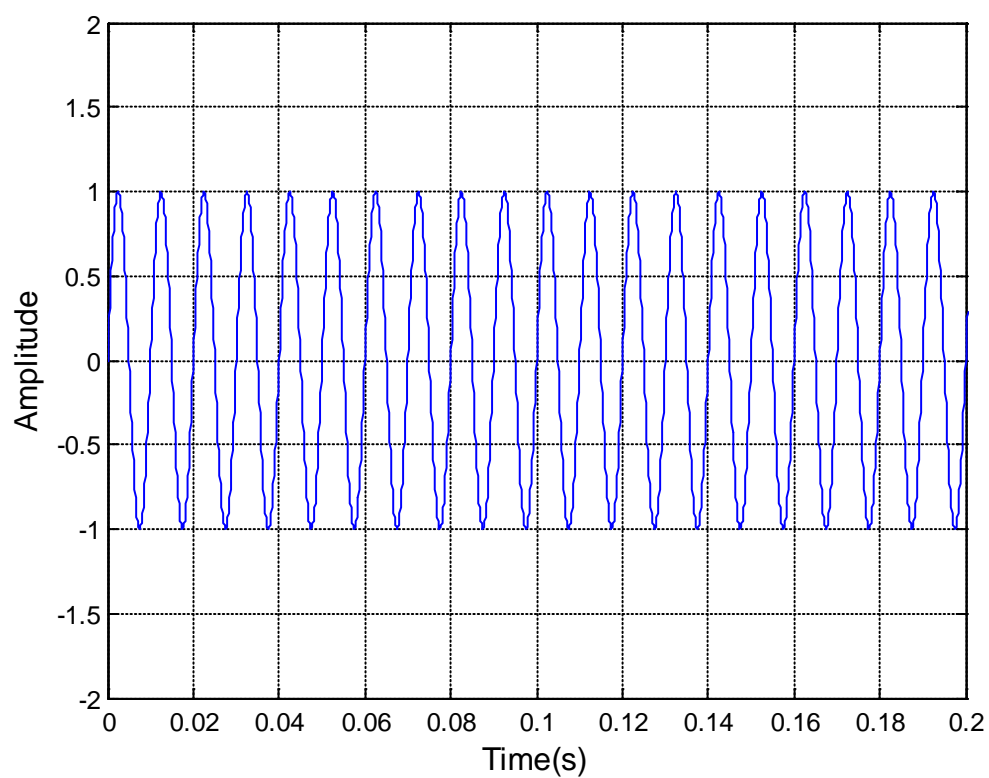


图 6-3 单频 Sin 信号

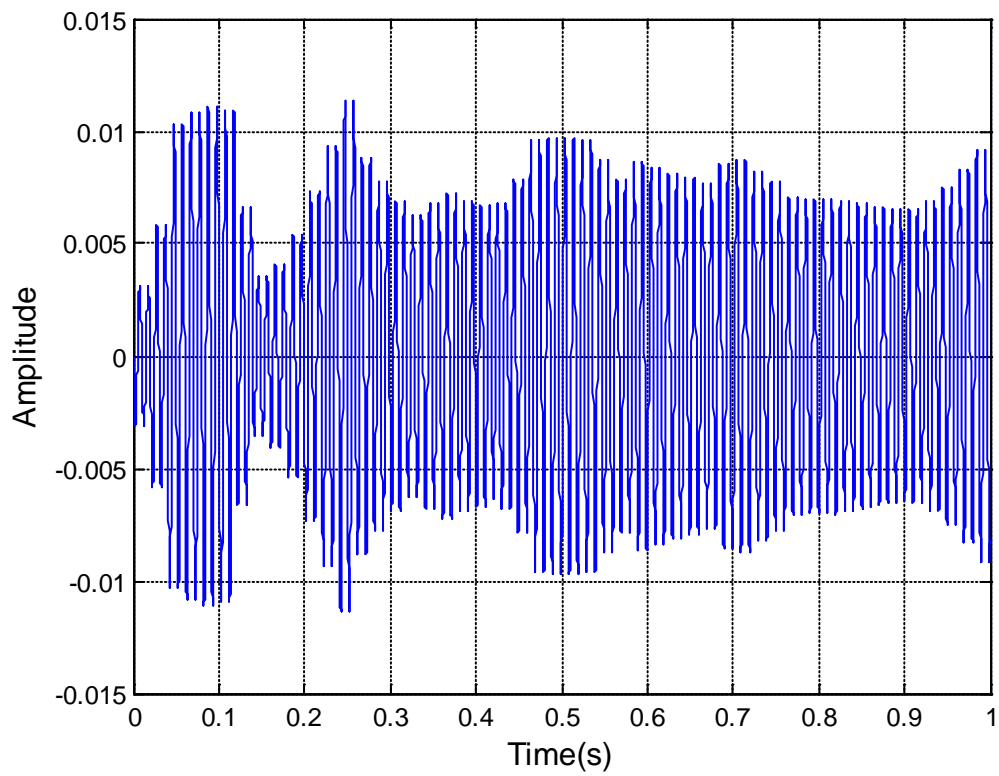


图 6-4 卷积后的单频 Sin 信号（时间序列）

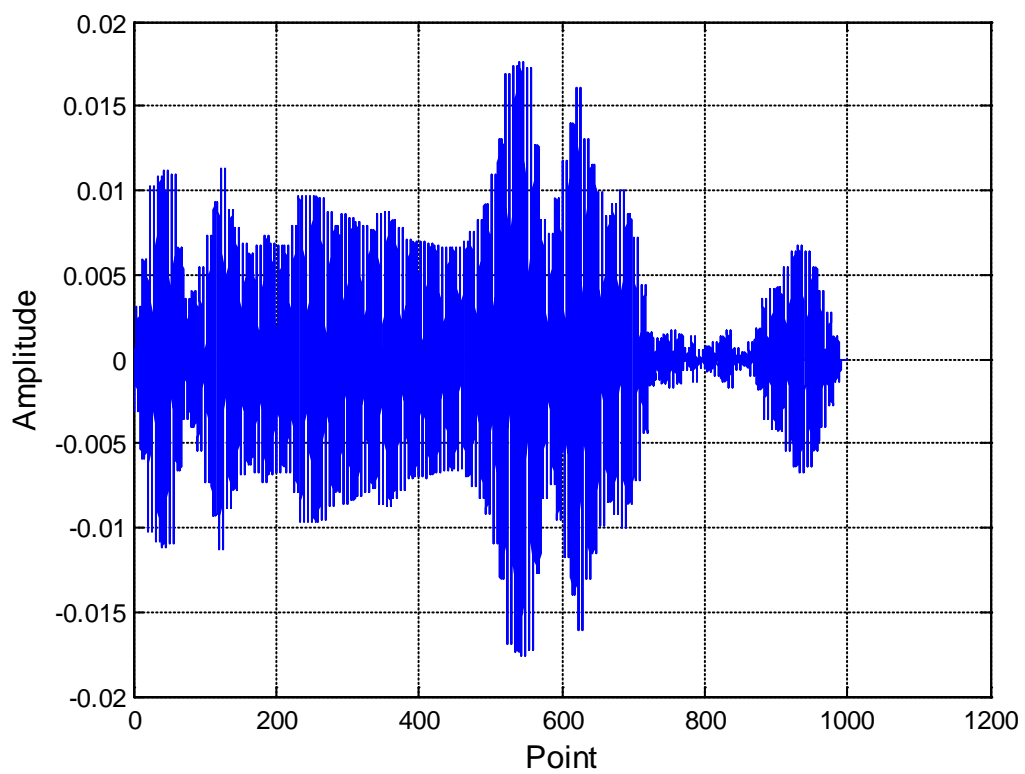


图 6-5 卷积后的单频 Sin 信号（卷积点）

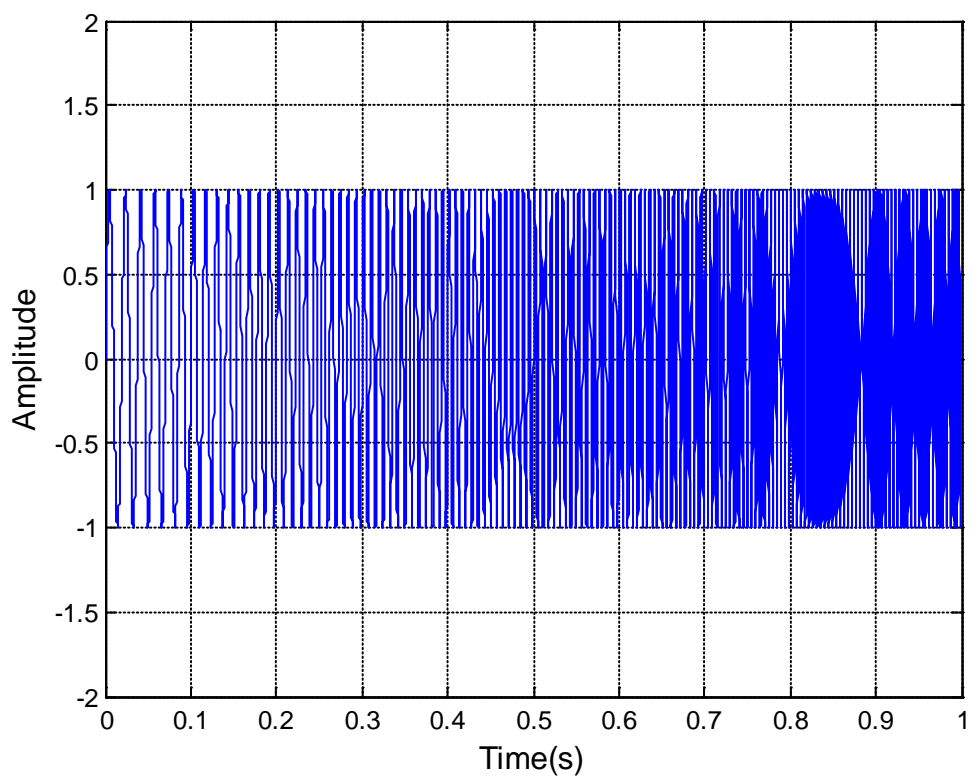


图 6-6 LFM 信号

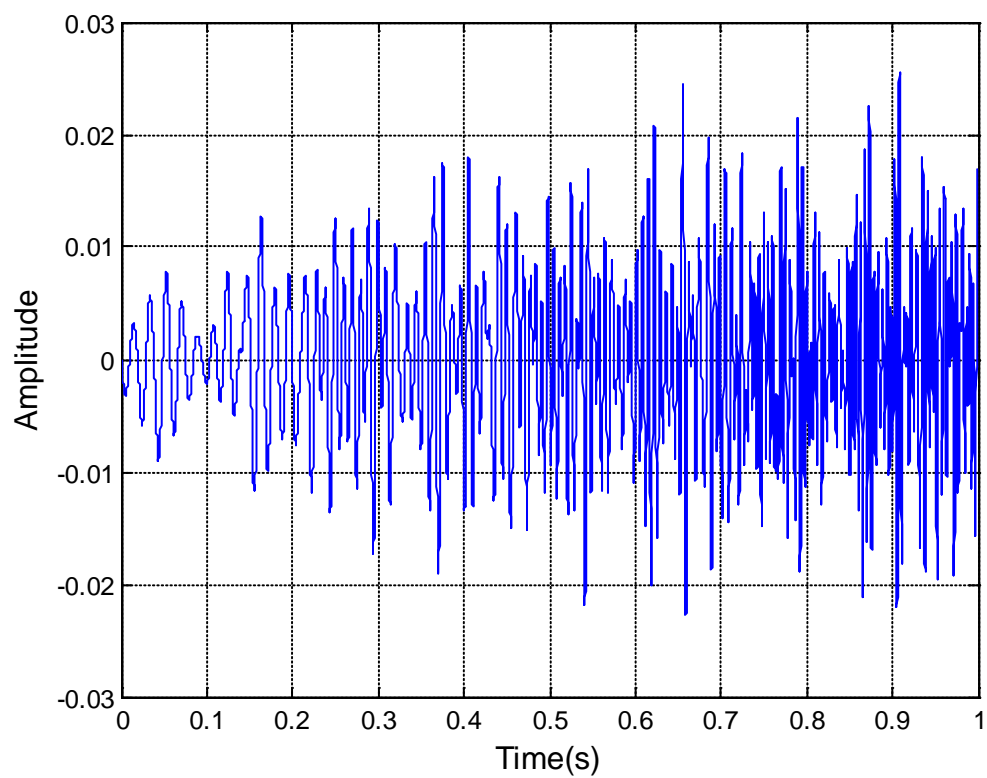


图 6-7 卷积后的 LFM 信号（时间序列）

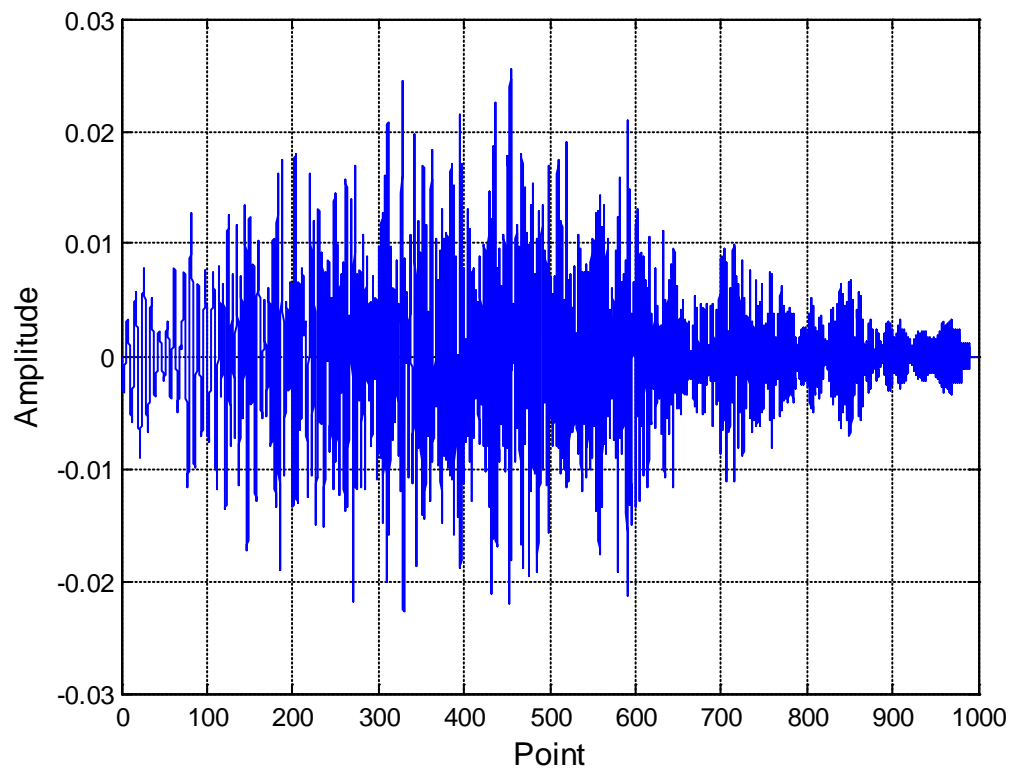


图 6-7 卷积后的 LFM 信号（卷积点）

## 2. 声音文件

从 Matlab 自带的 Audio 文件夹下的 Handel.mat 转化为 WAV 格式的文件,通过编写相关程序, 以下为频谱图

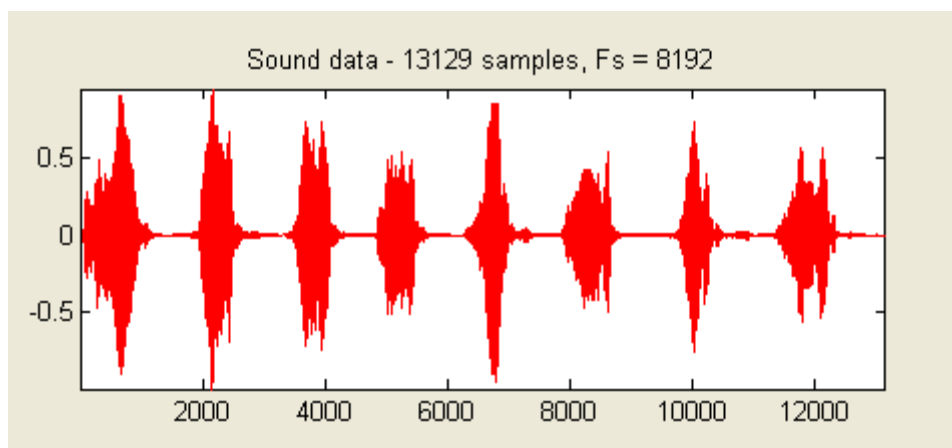


图 6-8 Handel.wav

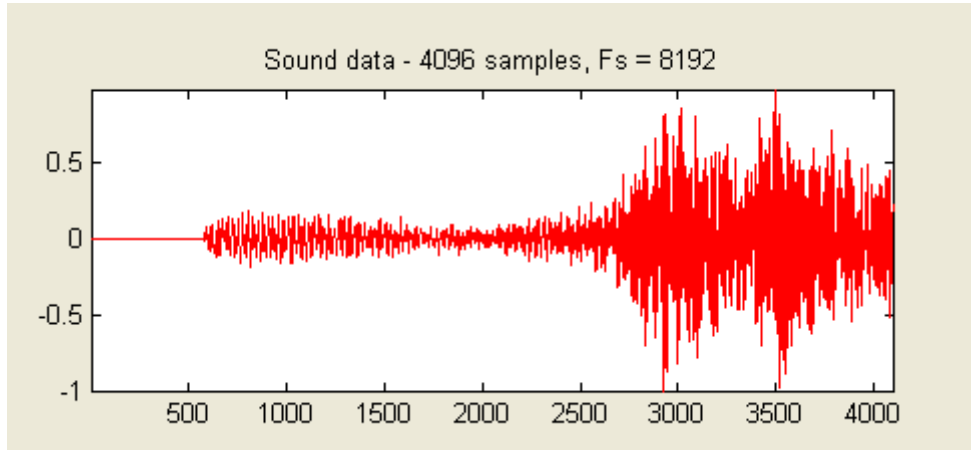


图 6-9 卷积后的 Handle.wav

### 3. 结论

通过单频 Sin 信号、LFM 信号和 Wav 文件的测试，通过与信道的冲激响应卷积后得到的结果与实际经验接收信号大体一致，有一定的时间延迟。在接下来的过程中，通过相关的水池实验和实际中几种典型浅海信道下声场的分布及传播损失进行仿真，并对仿真结果进行分析，为水下通信系统设计提供参考和依据。

## 二、BELLHOP 模型与射线模型对比

### 1. 传统射线理论模型

射线理论是严格的波动方程理论在一定条件下的近似。在射线理论下，对声场的描述是通过声线进行的。由声源辐射的声能量沿声线向四周传播，其中部分声线按一定路径传播而到达接收点，这些声线称为本征声线，接收点处的声场是所有这些本征声线的叠加结果。每一条声线都有一定的传播途径，相应的有一定的到达时间，所有这些由声线理论中的程函方程决定。此外，每根声线都携带了一部分的声能量。在不考虑声吸收的条件下，声线管携带的能量守恒。射线理论起始于 Helmholtz 方程。假定波动方程的解是声压幅度函数  $A = A(x, y, z)$  和相位函数  $P = P(x, y, z)$  的乘积，即  $\Phi = Ae^{iP}$ ， $P$  通常称为程函数。将这个解带 Helmholtz 方程，并将实部和虚部项分开，就得到：

$$\frac{1}{A} \nabla^2 A - \{\nabla P\}^2 + k^2 = 0 \quad (6-1)$$

$$2[\nabla A \bullet \nabla P] + A \nabla^2 P = 0 \quad (6-2)$$

在方程 (6-1) 中, 如果满足

$$\frac{1}{A} \nabla^2 A \ll k^2 \quad (6-3)$$

方程 (6-1) 简化为:

$$[\nabla P]^2 = k^2 \quad (6-4)$$

此为声线理论的第一个基本方程即程函方程, 由它来确定声线的走向。式 (6-3) 是射线理论成立的基本条件, 即在一个波长内声速不能有很大的变化。在高频条件下, 这个条件是很容易满足, 但在焦散区、声影区或处理低频声场时就不宜使用射线理论。(6-3) 式是射线理论的第二个基本方程即强度方程, 也称迁移方程, 由它确定声线的强度。

## 2. 基于传统射线理论的 N 径确定性模型

针对浅海水声信道, 在建立浅海水声信道 N 径确定性传播模型之前, 先假设几个理想条件:

(1) 水深为常数;

(2) 当声线掠射角小于  $5^\circ$ 、载波频率小于 50KHz 和海底介质的密度大  $1.4g/cm^3$  (例如 沙, 淤泥, 粘土等介质) 时, 海底的反射系数  $r_b$  近似为 1, 同时相位偏移为  $180^\circ$ , 考虑到浅海海底介质一般由细沙和淤泥构成, 同时掠射角总是大于  $0^\circ$ , 无论怎样, 声波由海底反射时, 声能总是有所损失的, 而且随着掠射角的增大而增加, 在这里假设海底的反射系数等于 0.9;

(3) 海面的粗糙程度可以用瑞利参数 R 来描述:

$$R = \frac{2\pi f}{c} \sigma \sin(\varphi) \quad (6-5)$$

其中,  $f$  为工作频率,  $c$  为声速,  $\sigma$  为海面波浪高度 (波峰到波谷) 的均方根值,  $\varphi$  为声线掠射角。经验数据表明, 当瑞利参数  $R \ll 1$ , 海面可以被认为是平滑的; 当瑞利参数  $R \gg 1$ , 则海面被认为是剧烈起伏不定的。

对于小掠射角, 海面的反射系数只与海面的风速和载波频率有关, 并且海面的反射系数  $r_s$  可以由下式给出:

$$r_s = \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{f}{f_1}\right)^2}{1 + \left(\frac{f}{f_2}\right)^2}} \quad (6-6)$$

其中  $f_2 = 378w^{-2}$ ,  $f_1 = \sqrt{10}f_2$ ,  $f$  为载波频率, 单位是kHz,  $w$  为风速, 单位是节(knots)。

假设使用的载波频率  $f = 10\text{kHz}$ , 当风速为 10knots 时, 海面反射系数  $r_s = 0.461$ ;

由于浅海的发射端和接收端的水平距离远大于海水深度, 即  $L \gg H$ , 传播中弯曲的声线弧线可以近似用直线代替; 从发射端到接收端, 直达路径所能到达的最远距离可以根据下式计算:

$$D_{\max} = 2\sqrt{\frac{2a}{gr}} \quad (6-7)$$

其中  $a$  为发射端距离海底的高度,  $gr$  为声速梯度且  $gr = 1.2 \times 10^{-5} \text{米}^{-1}$ ,  $D_{\max}$  称为相邻两次反射之间的最大跨距。

把发射端发出的声射线分成五种类型, 图中各种声线的标志及其代表的声线类型如下表 6-1 所示。下标  $n$  代表经过海底反射的次数, 图中只标出  $n=1$  的声线。

表 6-1 各种声线的标志及其代表的声线类型

标志	声线类型
$D$	直达声线
$SS_n$	从发射端出发第一次反射经由海面, 到达接收端时又经过海面反射而来的声线
$SB_n$	从发射端出发第一次反射经由海面, 到达接收端时经过海底反射而来的声线
$BS_n$	从发射端出发第一次反射经由海底, 到达接收端时经过海面反射而来的声线
$BB_n$	从发射端出发第一次反射经由海底, 到达接收端时又经过海底反射而来的声线

定义  $D_{\max}$  为直达路径所能到达的最远距离, 则在不考虑浅海水声信道的时变因素和环境噪声的情况下, 在接收端可得到接收信号表示如下:

当  $L \leq D_{\max}$  时,



$$r(t) = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} a_{SS_n} e^{-\tau_{SS_n}} + a_{BB_n} e^{-\tau_{BB_n}} + a_{SB_n} e^{-\tau_{SB_n}} + a_{BS_n} e^{-\tau_{BS_n}} \quad (6-8)$$

当  $L > D_{mzx}$  时，为远距离通信，无直达信号，则：

$$r(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_{SS_n} e^{-\tau_{SS_n}} + a_{BB_n} e^{-\tau_{BB_n}} + a_{SB_n} e^{-\tau_{SB_n}} + a_{BS_n} e^{-\tau_{BS_n}} \quad (6-9)$$

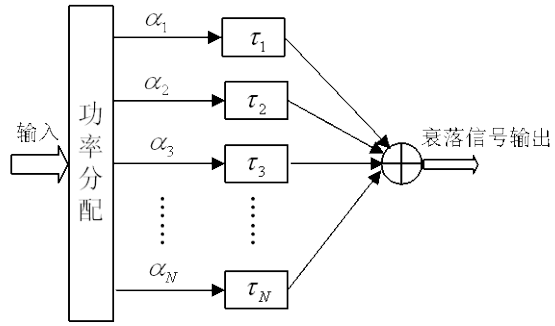
其中  $\alpha_{SS_n} = \frac{D}{SS_n} R_{SS_n} \alpha$ ， $\alpha_{BB_n} = \frac{D}{BB_n} R_{BB_n} \alpha$ ， $\alpha_{SB_n} = \frac{D}{SB_n} R_{SB_n} \alpha$ ， $\alpha_{BS_n} = \frac{D}{BS_n} R_{BS_n} \alpha$ ， $\alpha$  为海水

吸收系数，上述式子中各符号的定义如上表， $r_s$  为海面反射系数。下表 6-2 给出了不同路径的延迟及海面和海底反射的联合衰减系数。

表 6-2 不同路径的延迟及海面和海底反射的联合衰减系数

不同路径	声线经过每条路径的延迟	海面和海底反射的联合衰减系数
$D$	$\tau_D = \frac{D}{c}$	
$SS_n$	$\tau_{SS_n} = \frac{SS_n}{c}$	$R_{SS_n} = -0.9^{(n-1)} (r_s)^n$
$BB_n$	$\tau_{BB_n} = \frac{BB_n}{c}$	$R_{BB_n} = -0.9^n (r_s)^{n-1}$
$SB_n$	$\tau_{SB_n} = \frac{SB_n}{c}$	$R_{SB_n} = 0.9^n (r_s)^n$
$BS_n$	$\tau_{BS_n} = \frac{BS_n}{c}$	$R_{BS_n} = 0.9^n (r_s)^n$

浅海水声信道  $N$  径确定性模型如下图所示。这个模型是在一定信噪比的条件下不考虑环境噪声的影响。影响水声通信系统性能的主要因素是多途引起的幅度衰落和码间干扰。其中  $\alpha_i$  是接收到的第  $i$  路径接收信号对直达路径信号 ( $i=1$ ) 的归一化幅度。 $\tau_i$  是直达路径 ( $i=1$ ) 与反射路径 ( $i \neq 1$ ) 的到达时间之差。发射端的信号经过直达路径和自多途路径在接收端叠加

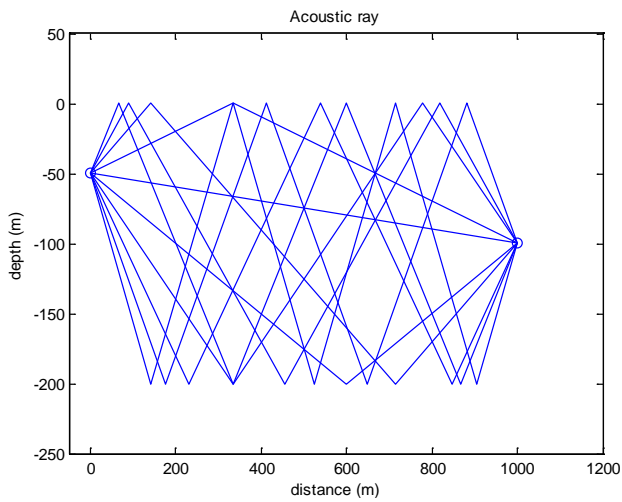


浅海水声信道 N 径确定性模型

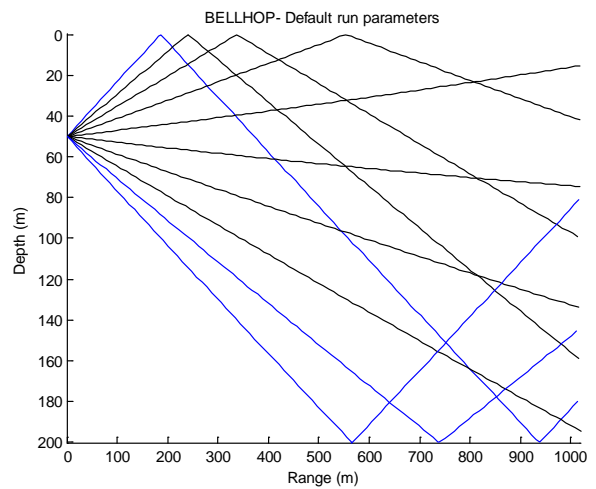
### 三、仿真对比

在一定条件类似的条件下,对比 N 径射线模型和 BELLHOP 的声线图 and 信道冲激响应以及同一输入信号卷积后的输出波形。

#### 1. 声线图

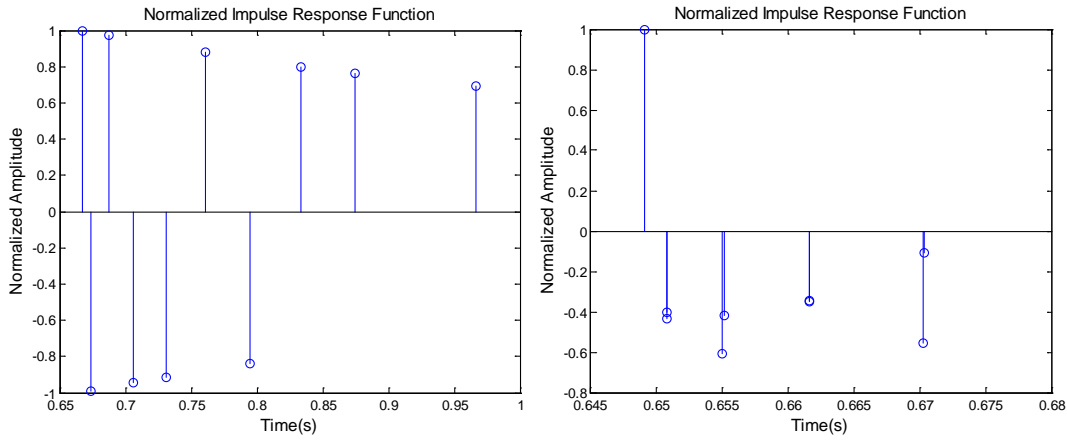


射线模型



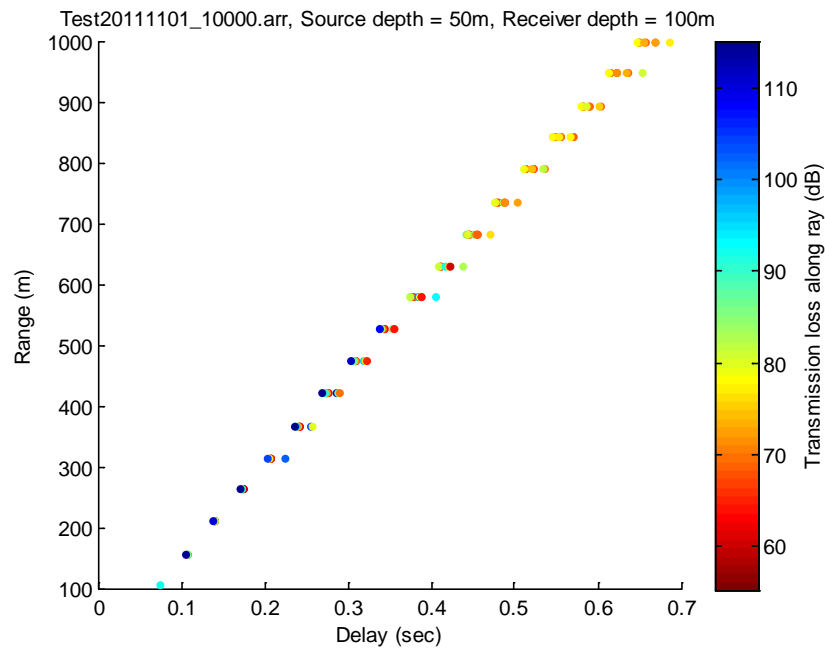
BELLHOP 模型

## 2. 冲激响应图



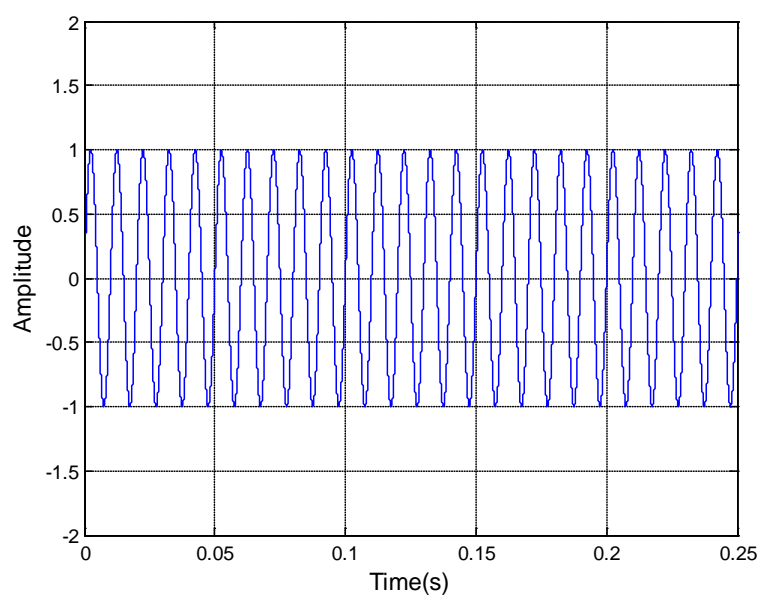
N 径射线模型

BELLHOP 模型

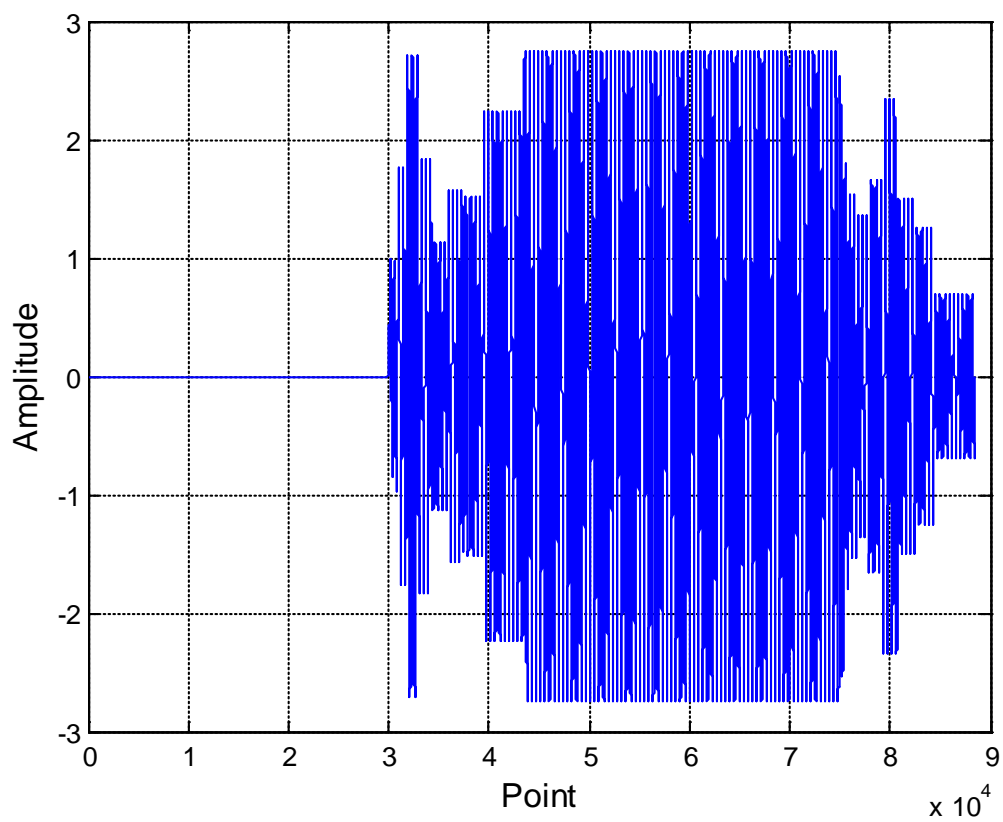


为 BELLHOP 模型中，在发射换能器和接收水听器之间（可手工改动范围）通过多个等距离的测量，在每个点测出每个声线的时延和幅度、发射角度和到达角度、传播损失等数据。该图在 1000 米的收发距离中分 20 段来测数据。

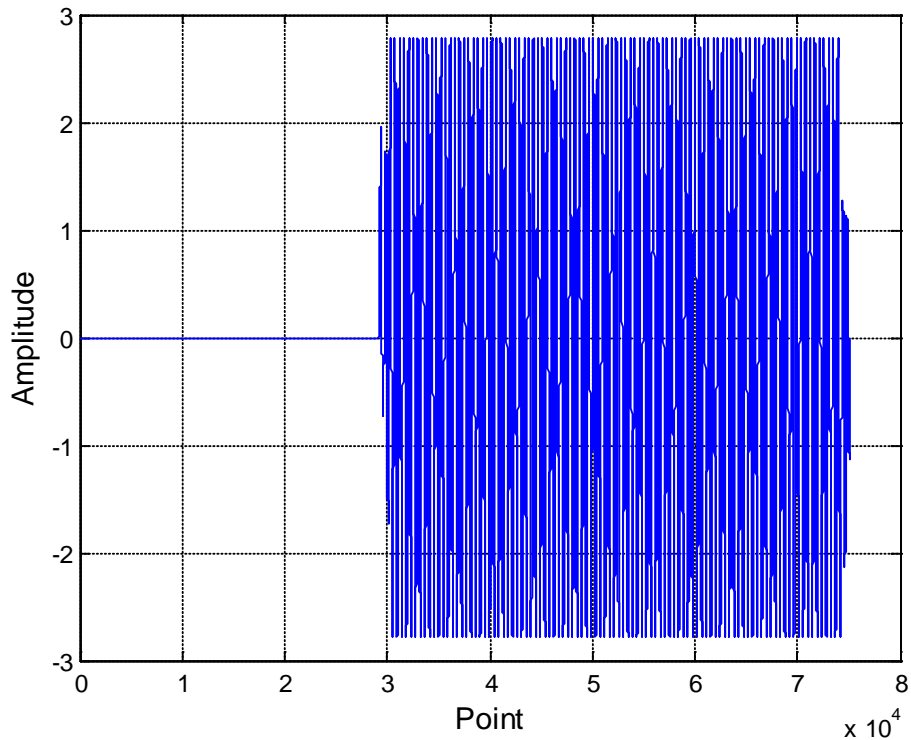
### 3. 输入信号



### 4. 卷积后波形



N 径确定射线模型



BELLHOP 模型

#### 四、BELLHOP 的特色

常规射线理论结果的典型特征是存在声影区及焦散线，声影区里没有声线通过，因此声压场等于零，而焦散线上声线管的横截面积为零，因而预报基于 BELLHOP 射线模型的浅海水声信道传播特性研究的强度为无限大。为了避免射线理论的这些缺点，引入了基于高斯束射线跟踪的 BELLHOP 模型方法。

高斯束射线跟踪法把声束内的每根声线与垂直于该声线的高斯型强度剖面联系起来，只要对决定声束宽度和曲率的两个微分方程与标准射线方程一起进行积分，就可以计算出声束内中心声线附近的声束场。高斯波束技术不局限于水平分层介质，也适合于处理声源具有一定指向性的情况，而且，这一技术对于与距离有关的高频应用很有吸引力，因为在这种场合下，应用波动理论就不太实际了。

## 第七章 信道模型时变特性的改进

### 一、浅海水声信道时变多径模型的仿真与分析

#### 1. 广义平稳非相关散射信道（WSSUS 信道）

如果信道冲激响应的自相关函数与绝对时间  $t$  无关，只与时间差  $\Delta t = t_2 - t_1$  有关，则称这种信道在时间域上是广义平稳的，则有：

$$R_h(t_1, t_2; \tau_1, \tau_2) = R_h(t_1, t_1 + \Delta t, \tau_1, \tau_2) = R_h(\Delta t, \tau_1, \tau_2) \quad (7-1)$$

另一种是在频率域上广义平稳的在时延域上非相关散射信道，简称US信道。这种信道是由大量的相互独立的散射体组成的，由于这些散射信号都是相互独立的，因而它们的叠加不会产生尖锐的频率特性，故总的散射能量没有显著的频率选择性，即在频率域上是广义平稳的。这意味着，

$$R_h(t_1, t_2; \tau_1, \tau_2) = R_h(t_1, t_2, \tau_1) \delta(\tau_1 - \tau_2) \quad (7-2)$$

从以上2个假设，可以得出WSSUS 信道具有如下特点：

- ①时延域  $S$  上和多普勒频移域  $\nu$  上具有非相关特性；
- ②在时间域  $t$  上和频率域  $f$  上具有广义平稳特性；
- ③WSSUS 信道二阶统计特性可由散射函数  $P_s(\nu, \tau)$  等完全确定，其定义式如下：

$$R_s(\nu, \nu_2; \tau, \tau_2)_{WSSUS} = P_s(\nu; \tau) \delta(\tau_2 - \tau) \delta(\nu_2 - \nu) \quad (7-3)$$

N径确定性模型和BELLHOP模型都是确定性信道模型，不能反映出信道的时变特性，我们建立N径确定性信道后，结合BELLHOP，引入广义平稳非相干散射(WSSUS)思想，建立起测试系统性能的线性时变水声信道模型，常用的广义平稳非相关散射信道仿真方法有2种：调幅衰落仿真器和调相衰落仿真器。

这里我们调幅衰落仿真器，其数学表达式如下：

$$h(t, \tau) = \sum_{n=1}^N \alpha_n(t) e^{-j2\pi f_c \tau_n} \delta(\tau - \tau_n) \quad (7-4)$$

在 BELLHOP 模型中，其中  $N$  为多途数目，由信道模型确定， $\tau_n$  为第  $n$  条路径的延时，是均

值由 BELLHOP 确定性信道模型确定的高斯随机变量； $\alpha_n(t)$  为第  $n$  条路径的幅度衰减因子，服从瑞利衰落，均值由 BELLHOP 确定性信道模型确定，瑞利衰落因子利用无线移动信道仿真常用的多普勒成型滤波器法产生。

## 2.射线模型的时变特性

在建立  $N$  径确定性模型后，我们按照表 1 先画出收发距离在 1000m 的本征声线图，分别设置通信距离 100m 和 1000m，并得到信道冲激响应和时变信道冲激响应。

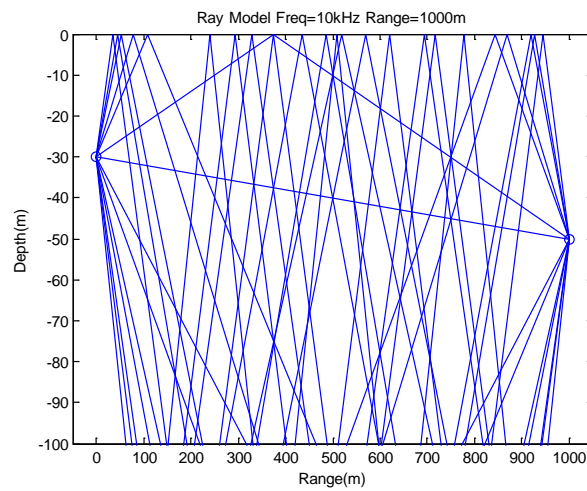


图 7-1 本征声线图 Range=100m

表 1 信道仿真参数表

仿真参数	仿真值
声源深度/m	30
接收水听器深度/m	50
海深/m	100
收发距离/m	100/1000
信号载波频率/kHz	10

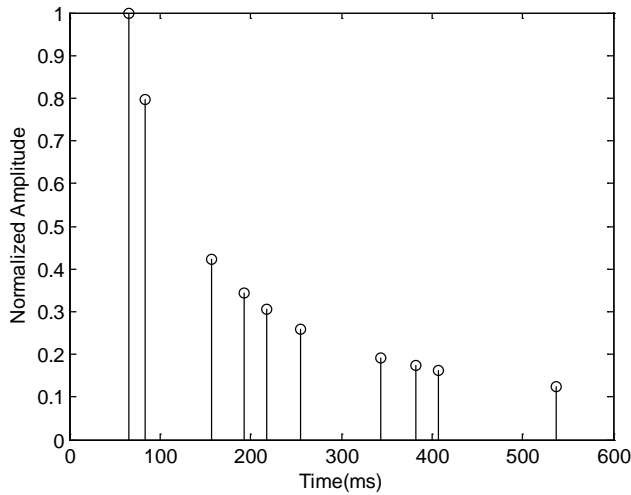


图 7-2 冲激响应 Range=100m

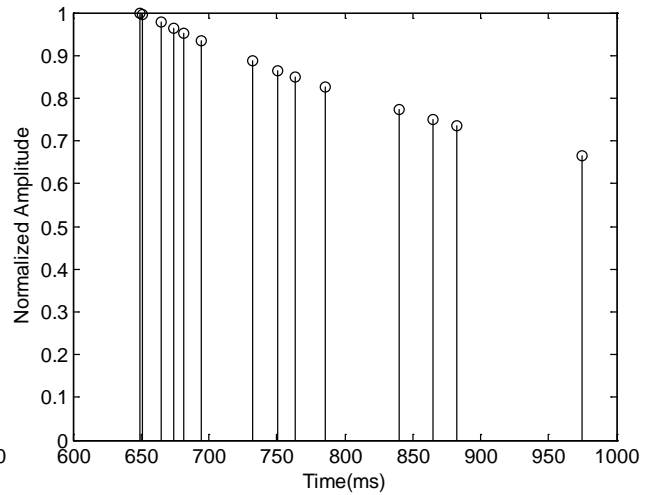


图 7-3 冲激响应 Range=1000m

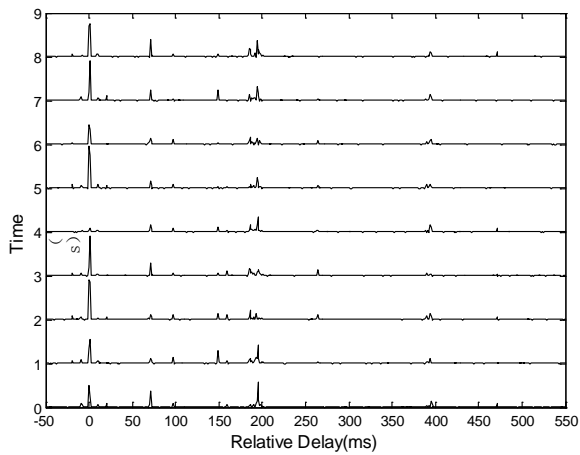


图 7-4 时变冲激响应 Range=100m

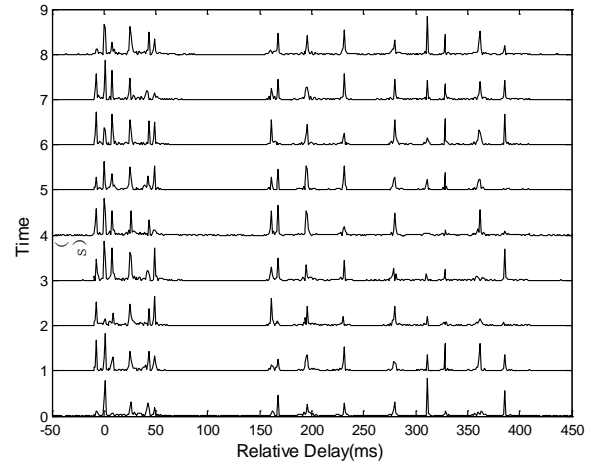


图 7-5 时变冲激响应 Range=1000m

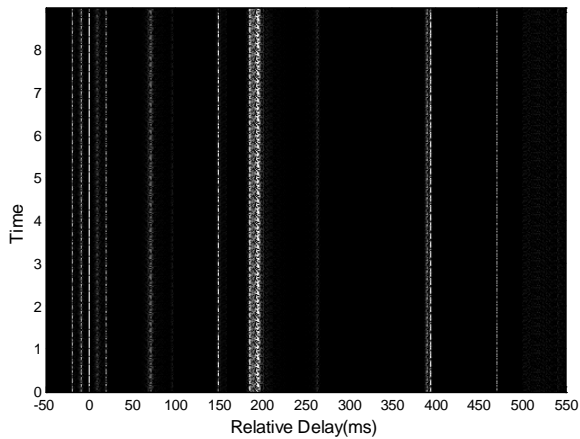


图 7-6 时变冲激响应 Range=100m

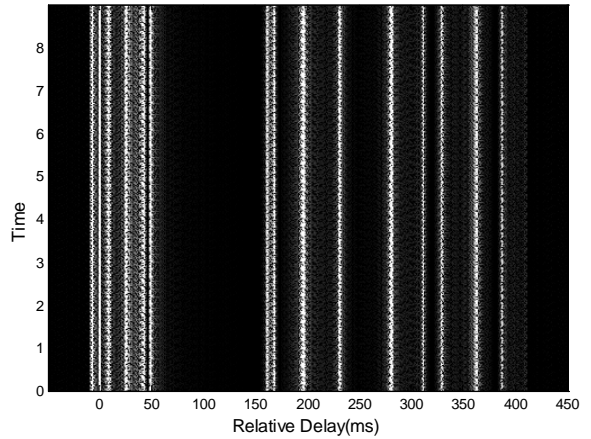


图 7-7 时变冲激响应 Range=1000m

从我们所建立的 N 径射线模型来看, 射线模型可准确、快速的搜索出各条本征声线, 并提供浅海传播多途特征的信息, 即每一条传播路径的时间扩展和传播损失, 这样可用



该模型来模拟浅海海洋环境，获取信道冲激响应，经过引入 WSSUS 后，可以近似的反映信道的时变特性。

### 3.BELLHOP 的时变特性

BELLHOP 是从物理角度进行水声信道建模，编辑 BELLHOP 水体环境文件 (\*.env)，其参数的设置在表 1 的基础上，其他设置如下，

假设海水表面为清劲风，海面波浪高的均方根值 (RMS) 2m。对于海水的吸收特性，BELLHOP 采用 Thorp 公式：

$$\alpha(f) = \frac{0.11f^2}{1+f^2} + \frac{44f^2}{4100+f^2} + 0.0003f^2 + 0.0033 \quad (20)$$

其中  $f$  为工作频率，单位为 kHz。

这里我们引入一个声学半空间的概念，其特点是声速不变，均匀密度，我们将海底看做一个声学半空间，声速 1810m/s 海底底质为泥沙，其密度为 1810 kg/ m<sup>3</sup>，当然这是有点理想化。为仿真方便，选取台湾海峡中北部海域典型的负声速梯度（9838 站）作为仿真声速剖面图 7-9。首先我们画出收发距离为 1000m 的声线图，在射线模型中，对声线没有插值，这里我们采用三次样条插值，这样会产生光滑的声线轨迹图。

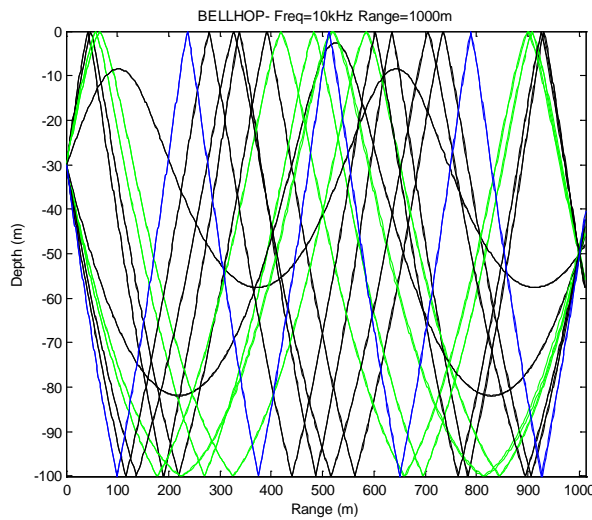


图 7-8 本征声线图

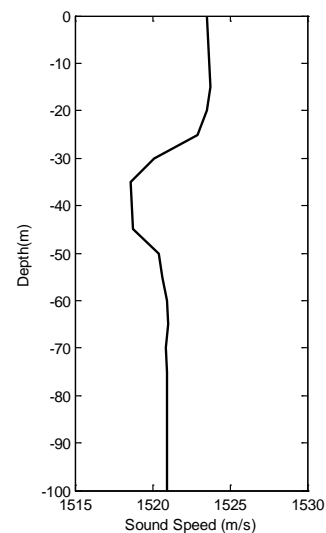


图 7-9 SSP 图

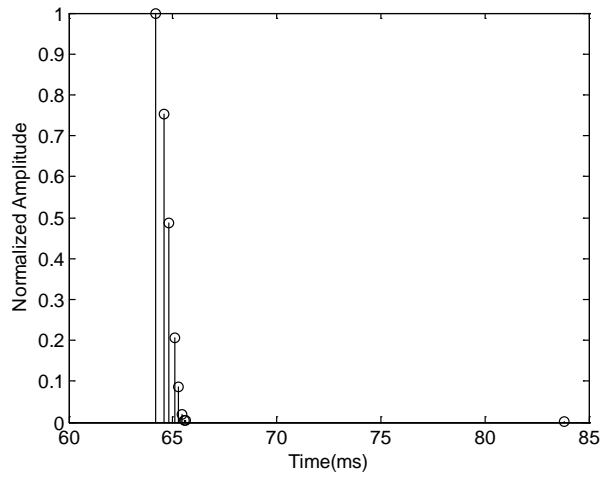


图 7-10 BELLHOP Range=100m

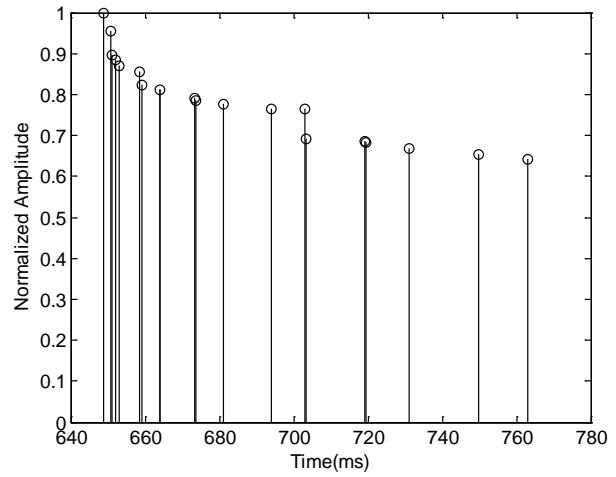


图 7-11 BELLHOP Range=1000m

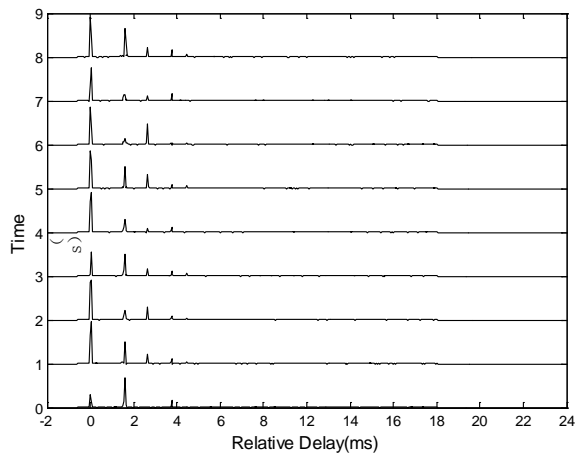


图 7-12 时变信道冲激响应 Range=100m

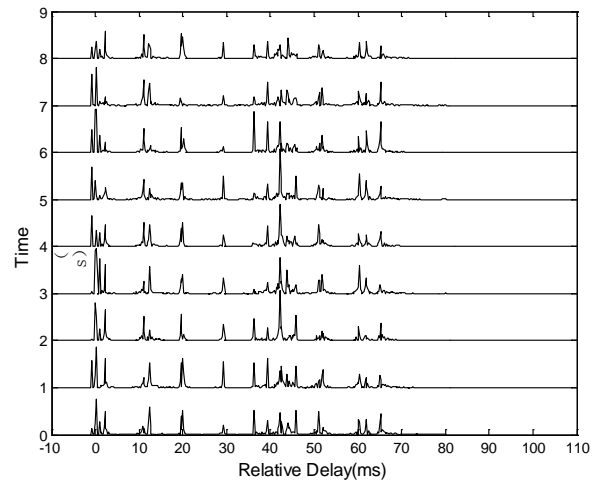


图 7-13 时变信道冲激响应 Range=1000m

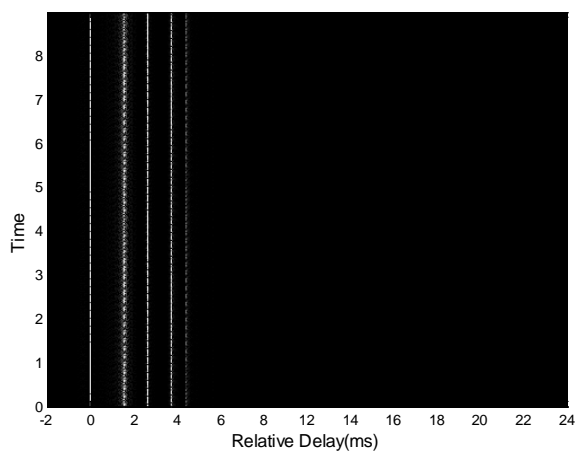


图 7-14 时变信道冲激响应 Range=100m

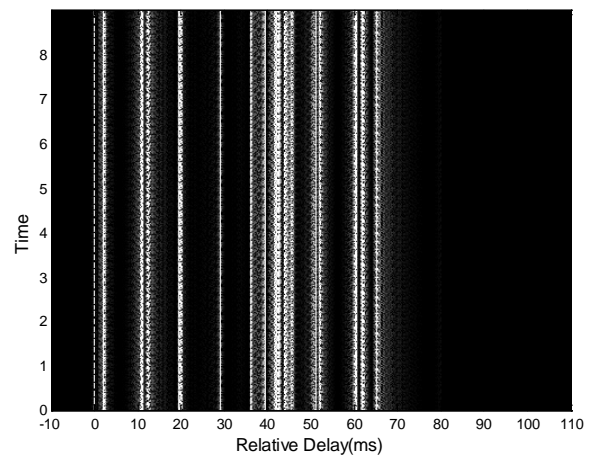


图 7-15 时变信道冲激响应 Range=1000m

从图 7-10、7-11 看出, BELLHOP 模型中收发通信距离在 100m 时, 多途扩展在 6ms 左右, 多径相对集中, 通信距离在 1km 的时候, 多径相对分散, 多途扩展可达 70ms。

图 7-14 和图 7-15 分别是 BELLHOP 收发距离为 100m 和 1000m 的时变冲激响应的灰度示意图，其中越明亮的部分说明该时刻的接收信号的幅度值越大，冲激响应效果越明显，横轴为不同时刻所对应的冲激响应。

在一定的有效通信距离内，水平距离增大时，各声线的相对延时增加，多径效应越明显，对水声通信的质量影响就越大。

## 二、小结

通过建立时变多径模型，我们可以看出相比于确定性模型如 N 径确定性模型、BELLHOP 模型等更容易理解、更直观、更真实。影响水声传输系统性能的因素是多样的，文中给出的模型和结论能够为实验提供一定的参考和依据。浅海水声时变信道模型只是是对浅海环境的近似模拟，有其使用的局限性，要建立完善的模型需要进一步深入研究。

## 参考文献

- [1] En-Cheng, Research on Underwater Acoustic Email Transmission, 2006.05
- [2] Kilfoyle D B, Baggeroer A B. The state of the art in underwater acoustic telemetry. IEEE Journal of Oceanic Eng, 2000, 25(1) : 4227.
- [3] Zielinski A, Young Hoon Y, Wu L X. Performance analysis of digital acoustic communication in a shallow water channel. IEEE Journal of Oceanic Eng, 1995, 20 (4) : 2932-299.
- [4] Porter M.B. and Bucker H.P. Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields. J. Acoust. Soc. America, 82(4):1349-1359, 1987
- [5] Daniel B. Kilfoyle and Arthur B. Baggeroer, the State of the Art in Underwater Acoustic Telemetry, IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING, VOL. 25, NO. 1, JANUARY 2000
- [6] Peter King, Ramachandran Venkatesan, and Cheng Li, An Improved Communications Model for Underwater Sensor Networks, IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 08)[ New Orleans]
- [7] Francois-Xavier Socheleau, Christophe Laot, and Jean-Michel Passerieux, Stochastic Replay of Non-WSSUS Underwater Acoustic Communication Channels Recorded at Sea, IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING, VOL. 59, NO. 10, OCTOBER 2011
- [8] M. Porter, "Ocean acoustics library," Online, Jan. 2010. [Online]. Available: <http://oalib.hlsresearch.com/Rays/index.html>
- [9] J. Preisig, "Acoustic propagation considerations for underwater acoustic communications network development." Mobile Computing Communications Review, vol. 11, no. 4, pp. 2-10, October 2006.
- [10] Chen Dong-Sheng, etc Distributive features of sound velocity in middle and northern Taiwan Strait in February and March, 1998, JOURNAL OF OCEANOGRAPHY IN TAIWAN STRAIT, 2000, 19 (3) : 288-292.
- [11] C. Bjerrum-Niese and R. Lutzen, "Stochastic simulation of acoustic communication in turbulent shallow water," IEEE J. Ocean. Eng., vol. 25, no. 4, pp. 523-532, 2000.
- [12] J. J. Zhang, A. Papandreou-Suppappola, B. Gottin, and C. Ioana, "Time-frequency characterization and receiver waveform design for shallow water environments," IEEE Trans. Signal Process., vol. 57, no. 8, pp. 2973-2985, 2009.
- [13] M. B. Porter and H. P. Bucker. Gaussian Beam Tracing Computing Ocean Acoustic Fields[J]. J. A. S. A., 1987, 82(4), 1349-1359.
- [14] M. D. Collins. A Split-Step Pade Solution for the Parabolic Equation Method[J]. J. A. S. A., 1993, 93:1936-1942.
- [15] F. B. Jensen W. A. Kuperman M. B. Porter H. Schmidt Computational Ocean Acoustics Problems and Exercises February 26, 1996
- [16] Alec J Duncan, Amos L Maggi, Consistent. User Friendly Interface for Running a Variety of Underwater Acoustic Propagation Codes Proceedings of ACOUSTIC 2006 20-22 November, Christchurch, New Zealand