

# KRAKEN 简正波程序

Michael B. Porter

SACLANT 水下研究中心

2001 年 5 月 17 日

湛江 吴开明 编译 2018 年 12 月

# 目 录

声学工具箱的程序运行.....	3
KRAKEN 模型的结构.....	4
主要程序 (Main Program) .....	6
概述 notes.hlp.....	6
第一组：模式计算.....	6
第二组：基本绘图子程序.....	7
第三组：声场计算.....	7
第四组：对第三组程序的输出进行绘图的子程序.....	7
***** 安装说明 *****.....	8
***** 如何运行 KRAKEN *****.....	9
模式计算 kraken.hlp.....	10
输入说明.....	12
打印输出示例.....	21
声场计算 field.hlp .....	24
测试算例.....	27
作业.....	28
PEKERIS (液态半空间海底) .....	29
TWERSKY (流冰散射) .....	34
DOUBLE (双波导) .....	38
SCHOLTE (弹性半空间海底的表面波) .....	42
FLUSED (流体沉积层) .....	46
ELSED (弹性沉积层) .....	50
ATTEN (体积衰减) .....	54
NORMAL (归一化) .....	58
ICE (冰层) .....	62

## 声学工具箱的程序运行

KRAKEN 程序实际上是一个完整的模拟工具包的一部分，该工具包称为声学工具箱，其结构如图 4.1 所示。除 KRAKEN 简正波模型之外，还有 1) 射线/波束追踪模型，BELLHOP，2) FFP（谱积分）模型，SCOOTER，和 3) 时域 FFP 模型，SPARC。

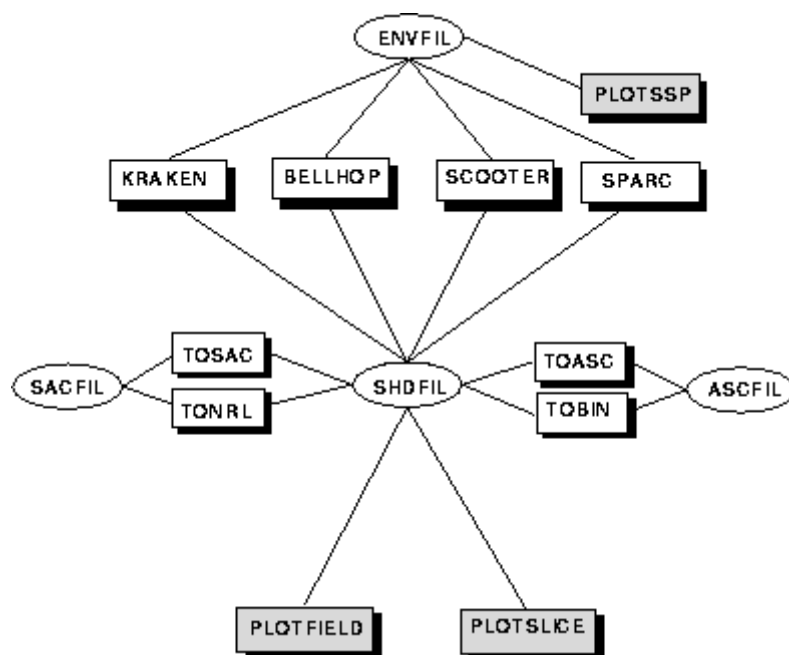


图 4.1：声学工具箱的结构

这些模型以用户提供的环境文件（ENVFIL）作为输入。环境文件描述了打靶解算的问题。对于所有模型而言，环境文件均采用相同格式。可以用 PLOTSSP 来绘制环境文件中定义的声速剖面。

然后，这些模型生成一个二进制“渲染”文件（SHDFIL），该文件包含算出的声压场。可使用 PLOTFIELD 将声压转换为传播损失，并在距离和深度（平面）上生成传播损失的彩图或灰度图。程序 PLOTSLICE 用于绘制沿固定接收深度的声场切片。其他附加程序可用于应用渲染文件进行匹配场处理、计算检测概率或检测半径等。

有一些实用工具可将 ~~NRL~~ 的“渲染”文件格式和 ~~SACLANTCEN~~ 格式（~~TONRL~~ 和 ~~TOSAC~~）进行相互转换。这就让 ~~SACLANTCEN~~ 的模型也可用 PLOTFIELD 和 PLOTSLICE 来绘图，并在模型之间进行对比。还有一些工具可以将“渲染”文件转换为 ~~ASCII~~ 格式（~~TOASC~~），或作反向转换，还原为最初

的二进制格式 (TOBIN)。这些程序能让您通过传输 ASCII 文件,来解决计算机之间二进制文件相互不兼容的问题。

在图 4.1 的基本结构中,每种模型都有自己独有的绘图程序。例如,BELLHOP 射线模型算出射线,因此它有射线绘图程序,而 KRAKEN 简正波模型算出模式,因此它有模式绘图程序。在本章中,我们将重点说明 KRAKEN 模型,不过,对其他模型也会作简要描述。

本程序包的大多数开发工作都是在 VAX 上使用 VMS Fortran 来完成的,但对它的移植性也作了仔细的考虑。要在 Unix 下使用 f77 编译器来运行 KRAKEN,需要作出以下更改:

1. 修改打开文件所用的逻辑记录长度。VMS 使用的是长字(4 个字节),其他大多数系统好像都使用的是字节。

2. 修改计时子程序 TIME.FOR。

3. 修改 SLATECBESSEL.FOR 中的机器常数。或者用 TWERSKYFUSE.FOR 替换 TWERSK.FOR,来消掉 Twersky 海冰散射选项。TWERSKYFUSE.FOR 不再需要与 SLATECBESSEL 与 MATHIEU 作链接。

4. 显然,Unix 系统无法自动检索出文件的记录长度。您需要修改模式文件的格式,在其中包括记录的长度,并通过初次读取获得记录的长度,然后再用正确的记录长度重新打开文件。

5. 如果您有“空间”问题,请修改参数 MAXN,该参数控制深度网格的最大数目。在 KRAKEN 中,该参数与其他参数一起,定义在头文件 COMMON.FOR 中。KRAKENC、SCOOTER、SPARC 和 BELLHOP 也有类似的头文件。

## KRAKEN 模型的结构

KRAKEN 的程序结构如图 4.2 所示。在第一级,我们看到 KRAKEN 实际上包括三个不同的模型(KRAKEN、KRAKENC 和 KRAKEL)。KRAKENC 和 KRAKEL 是为更有经验的用户和特定的需求而准备的。其差异在后面的 KRAKEN.HLP 文件中有详细的说明。

计算传播损失要经历两个步骤:1) 用 KRAKEN 计算模式,2) 用 PLOTTLR

或 PLOTTLD 叠加模式，并绘制 TL 随距离或深度的变化图。此外，还可以用 PLOTMODE 来查看单个模式，用 PLOTGRN 来计算 Green 函数。

生成传播损失的彩图或灰度图包括三个步骤：1) 用 KRAKEN 计算模式，2) 用 FIELD 叠加模式并计算声压场，3) 用 PLOTFIELD 绘制计算结果。

三维计算遵循类似的历程，但在叠加模式时，用 FIELD3D 来代替 FIELD。如第二章所述，三维计算采用海底三角拼图，这在声场参数的输入文件 (FLPFIL) 中予以定义。PLOTTRI 用于绘制三角拼图。除了三维声压场外，FIELD3D 还能计算水平散射，其输出可用 PLOTAYXY 进行绘制。

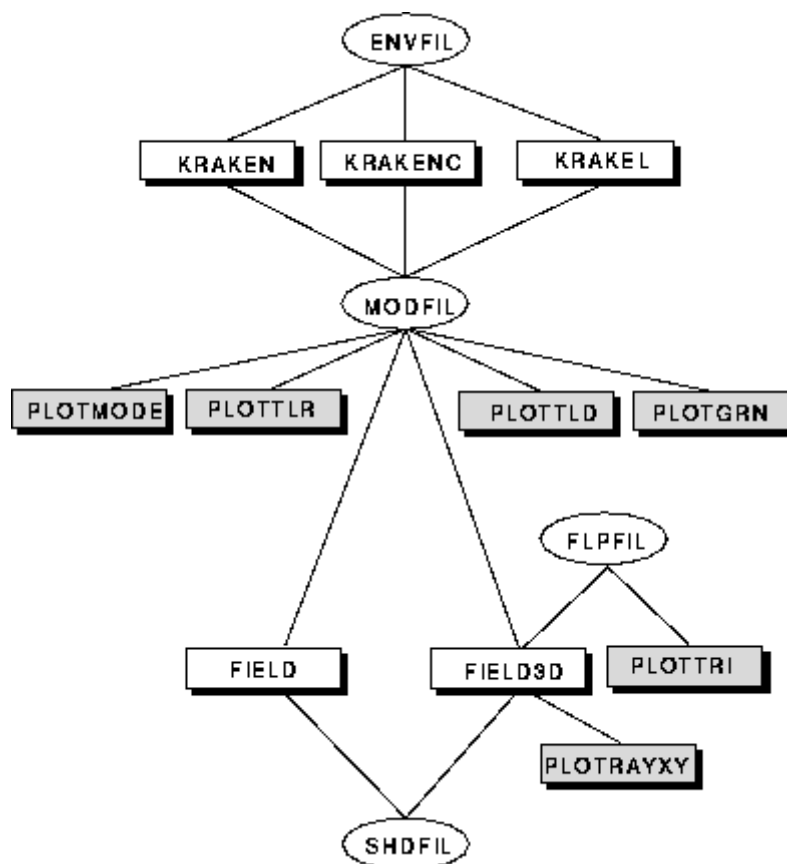


图 4.2: KRAKEN 模型的结构

关于如何运行 KRAKEN 的详细信息包含在一系列随源代码一起提供的帮助文件中。下面复制了这些帮助文件。请注意，所有的绘图程序都需要几行代码来提供数轴信息（最小值、最大值、刻度标记间隔和数轴长度）。此信息可从文件读取，但是通常将这些数据直接地放在执行程序的命令文件中。针对 VAX 平台，程序包提供了这些命令文件（扩展名为'.com'）。

# 主要程序 (Main Program)

## 概述 notes.hlp

KRAKEN 是一套简正波程序。适用于随距离变化的环境，采用笛卡尔坐标（线源）或圆柱坐标（点源）解算。以下文献对其基本方法作了描述。

~~Porter, Michael B. and Reiss, Edward L., "A numerical method for ocean acoustic normal modes", JASA 76, 244-252 (1984).~~

~~Porter, Michael B. and Reiss, Edward L., "A numerical method for bottom interacting ocean acoustic normal modes", JASA 77, 1760-1767 (1985).~~

~~可选绝热或耦合模式理论来求解随距离变化的环境中的解。~~  
~~以下各模块是程序包的各个组成部分。~~

### 第一组：模式计算

第一组：模式计算	
KRAKEN	计算模式，并将其写入磁盘。可以处理弹性介质，但忽略弹性介质中的材料衰减。
KRAKENC	它是 KRAKEN 的一个版本，在复平面上求解本征值。KRAKEN 利用微扰理论得到本征值的虚部，KRAKENC 则精确地计算复数本征值。
	KRAKENC 运行速度慢了 3 倍，但对泄漏模式或包含弹性介质材料衰减的计算是必要的。KRAKENC 内部用等效反射系数代替弹性层。因此，不能应用 KRAKENC 来查看弹性层中的声场。
KRAKEL	类似于 KRAKENC，但能计算弹性介质的弹性位移和应力。 KRAKEL 很少被使用，因此没能与时更新。

**第二组：基本绘图子程序**

第二组：基本绘图子程序	
PLOTSSP	绘制声速剖面。
PLOTMODE	绘制所选模式。
PLOTGRN	绘制特定声源/接收器组合的格林函数，其波动方程求解采取深度变量分离。
PLOTTLR	绘制传播损失随距离的变化。
PLOTTLD	绘制传播损失随深度的变化。
PLOTTRI	绘制用于三维声场计算的三角形单元。

**第三组：声场计算**

第三组：声场计算	
FIELD	对于一系列声源深度，计算指定距离处、垂直阵列上的声场。阵列中的单个阵元可以偏离垂直方向。环境随距离的变化由绝热或单向模式耦合理论来处理。
FIELD3D	采用绝热模式理论针对三维变化的 SSP 计算声场。

**第四组：对第三组程序的输出进行绘图的子程序**

第四组：对第三组程序的输出进行绘图的子程序	
PLOTFIELD	绘制水平面或垂直面上的传播损失，即(x, y)绘图或(r, z)绘图。
PLOTSLICE	通过从几个“渲染”文件中抽取切片，来绘制传播损失随距离变化的曲线。
PLOTTRAYXY	绘制在三维声场计算中产生的高斯波束的声线路径。
用于声场计算（第三组）的各个程序仅需用于 PLOTFIELD 或用于特殊的用户程序（例如模糊度面）。PLOTTLR 和 PLOTTLD 在自身内部计算声场，因此不需要运行 FIELD 来生成“渲染”文件。	

以下扩展名文件与这些程序一起使用：

.FOR	fortran 源代码
.HLP	模块的帮助文件文档
.COM	运行模块的命令文件
.LNK	执行链接的命令文件

在所有模块中，所有的用户输入都采用列表 I/O 进行读取。因此这些数据在输入时可以使用各种自由格式（比如空格、制表符、逗号或斜杠等）作为间隔符。字符输入时应以单引号括起来，如'CHARACTER INPUT（字符输入）'。

您会在许多输入文件中看到“/”字符。这个符号表示终止该行输入，程序使用默认值。

-----

**\*\*\*\*\* 安装说明 \*\*\*\*\***

该程序包中的每个程序都有一个命令文件，命令文件给该程序使用的适当的 Fortran 单元号分配必要的输入文件。为简化安装，这些命令文件对某些文件夹使用逻辑名称。这些逻辑名称依次在 AT\_INIT.COM 文件中予以定义，这是“唯一”需要为新安装定制的文件。

与 KRAKEN 命令文件一起使用的目录的符号和逻辑名称如下：

AT	这是声学工具箱目录，其中包含运行 KRAKEN 和工具箱中其他模型的命令文件。
KRAK	KRAKEN 的源代码
MISC	各种科学子程序，例如根查找器、线性方程求解器、...
GLOB	全局子程序，即对“渲染”文件进行操作的子程序。这些子程序用于处理 KRAKEN、FSTFLD、BELLHOP、SCOOTER 和 SPARC 等多种不同传播程序的输出。
SCR	草稿文件目录。
DISSPLA	指向 DISSPLA 绘图库的符号。



下面是在 VAX VMS 操作系统下如何定义这些内容的示例：

```
$ DEFINE AT US:[PORTER.AT]
$ DEFINE BELL US:[PORTER.AT.BELLHOP]
$ DEFINE GLOB US:[PORTER.AT.GLOBAL]
$ DEFINE KRAK US:[PORTER.AT.KRAKEN]
$ DEFINE MAN US:[PORTER.AT.MANUAL]
$ DEFINE MISC US:[PORTER.AT.MISC]
$ DEFINE SCO US:[PORTER.AT.SCOOTER]
$ DEFINE SCR US:[PORTER.SCR]
$ !
$ DISPLA == "[DIS11.LIB]DISLIB/L, INTLIB/L, DISLIB/L, HCBS/L"
```

-----

### \*\*\*\*\* 如何运行 KRAKEN \*\*\*\*\*

0. 是初次开始吧？先看看编译和链接整个软件包的 CLINK.COM。
1. 按照 KRAKEN.HLP 中的说明创建您的问题的环境文件。
2. 运行 KRAKEN（或 KRAKENC）。在 VAX 系统，其实现须键入

@KRAKEN filename

或者

SUBMIT KRAKEN/PAR=filename

其中“filename”是环境文件。KRAKEN.HLP 文件详细说明了 KRAKEN 和 KRAKENC 之间的区别。

3. 您现在有几种选择（所有第二组程序）：

- a. 绘制传播损失：

@PLOTTLR filename

- b. 绘制模式：

@PLOTMODE filename

- c. 绘制声速剖面图（实际上，这可以在运行 KRAKEN 之前完成）：

@PLOTSSP filename

d. 将声压场绘制成距离和深度的函数。这须两步完成：

@FIELD filename

@PLOTFIELD filename

通常，在每个命令文件运行之前，您必须做些修改，以便给每个程序提供相应的输入。在帮助文件中对这些输入分别作了说明。

一旦运行 KRAKEN 或 KRAKENC 创建模式之后，您就可以随心所欲，随便以任何顺序或者任意频次运行以上绘图程序。

## 模式计算 kraken.hlp

KRAKEN 是主程序。它接受环境文件，计算模式，并将其写入磁盘供其他模块使用。它还生成一个打印文件，回显用户输入。

KRAKENC 是 KRAKEN 的复数算法版本（因此 KRAKENC 有 C）。通过在复数域计算，不采用“微扰”算法，诸如海冰散射和材料吸收等损失机制均可“精确”算出。此外，也能够计算泄漏模式。这种“非微扰”处理的代价就是速度减慢将近 4 倍。这个倍数也代表了复数和实数算法之间的主要差别。

在 KRAKENC 中应用“Twersky 散”射选项时，速度会进一步减慢 2 倍或者更多。Twersky 散射函数的计算需要占用大量的 CPU 时间；它实际上已占模式计算所耗时间的主要部分。KRAKEN 以微扰方法合并散射，对 Twersky 散射的时间开销并不敏感。

由于材料衰减，KRAKEN 并不允许计算弹性介质中的传播损失。因此，对于衰减的弹性介质，应使用 KRAKENC。

文件	名称	单位	说 明
输入	*.ENV	1	环境数据（ENVironmental data）
	*.BRC	10	底端反射系数（可选）（Bottom Refl. Coef. (optl)）
	*.TRC	11	顶端反射系数（可选）（Top Refl. Coef. (optl)）
	*.IRC	12	内部反射系数（可选）（Internal Refl. Coef. (optl)）
输出	*.PRT	6	打印（反馈）文件（PRinT file）

	*.MOD	20	模式文件 (MODE file)
--	-------	----	------------------

ENV 文件示例和说明:

'FRAMIV Twersky S/S ice scatter'	! TITLE
50.0	! FREQ (Hz)
4	! NMEDIA
'NSF'	! OPTIONS
0.0092 8.2 5.1	! BUMDEN (1/m) ETA (m) XI (m)
750 0.0 3750.0	! NMESH SIGMA (m) Z(NSSP)
0.0 1436.0 0.0 1.03/	! Z(m) CP CS(m/s) RHO(gm/cm3)
30.0 1437.4 /	
50.0 1437.7 /	
80.0 1439.5 /	
100.0 1441.9 /	
125.0 1444.6 /	
150.0 1450.0 /	
175.0 1456.1 /	
200.0 1458.4 /	
250.0 1460.0 /	
300.0 1460.5 /	
350.0 1460.6 /	
400.0 1461.0 /	
450.0 1461.5 /	
500.0 1462.0 /	
600.0 1462.9 /	
700.0 1463.9 /	
800.0 1464.8 /	
900.0 1465.8 /	
1000.0 1466.7 /	
1100.0 1467.0 /	
1200.0 1469.0 /	
1300.0 1469.5 /	
1400.0 1471.8 /	
1600.0 1474.5 /	
1800.0 1477.0 /	
2000.0 1479.6 /	
2500.0 1487.9 /	
3750.0 1510.4 /	
35 0.0 3808.33	
3750.0 1504.6 0.0 1.50 .15 0.0	
3808.33 1603.07 /	
35 0.0 3866.66	
3808.33 1603.07 0.0 1.533 .15 0.0	

```

3866.66 1701.53 /
35 0.0 3925.0
3866.66 1701.53 0.0 1.566 .15 0.0
3925.0 1800.0 /
'A' 0.0 ! BOTOPT SIGMA (m)
3925.0 1800.0 0.0 1.60 .15 0.0
0.0 1504.0 ! CLOW CHIGH (m/s)
300.0 ! RMAX (km)
1 100.0 / ! NSD SD(1:NSD) (m)
1 200.0 / ! NRD RD(1:NRD) (m)

```

### 输入说明

## 主体结构表

条目	内 容	说 明	版块
1	TITLE	本算例主旨	总体信息
2	FREQUENCY	声波频率	
3	NUMBER OF MEDIA	介质分层数	
4	OPTIONS	OPT(1:1): SSP 插值方法; OPT(2:2): 上端边界状况; OPT(3:3): 衰减所用单位; OPT(4:4): 慢速/稳健的求根器。	上端选项
5	MEDIUM INFO	水体介质的信息	水体
6	BOTTOM BOUNDARY CONDITION	底部边界条件	海底
7	PHASE SPEED LIMITS	相速度界限	模式边界
8	MAXIMUM RANGE	最大声场计算距离	阵列
9	SOURCE/RECEIVER DEPTH INFO	声源/接收器深度信息	

(1) - (3) 总体版块

“总体版块”说明表

条目	语 法	说 明
1	TITLE	以单引号括起来的演算主题
2	FREQ	声波频率，单位：Hz
3	NMEDIA(<20)	介质分层数 将演算的问题划分为几层介质空间。在每层介质空间内部，假定材料属性变化平滑。在流体/弹性界面或者密度变化不连续的界面引入新的介质空间。问题中定义的介质空间数量不包括上半空间和下半空间。

(4) 上端选项板块

“上端选项”版块设置说明表

条目	设置	说 明
OPT(1:1)	SSP 插值方法	
	C	C-线性插值
	N	N2-线性插值（n 是折射率）
	S	三次样条插值
	A	解析值
		用户必须先修改 PROFIL.FOR 中的解析公式，然后再作编译和链接。
	如果您不确定选择哪个选项，建议您使用‘C’或‘N’。实际上，两者您可以任选其一：已经用该选项完成了精确的模型之间的比较。	
	选项‘S’有点危险，因为样条插值对某些类型的曲线拟合较差，比如急弯曲线。如果您坚持要使用样条插值，您可以在急弯处将水体划分为两层“介质空间”，以解决拟合不佳的问题。	

	运行 PLOTSSP 来查看 SSP 是否像您心中的模样。除了潜在的排版错误，还能展示拟合的问题。	
OPT(2:2)	上端边界条件类型	
	V	顶端以上为真空
	A	声学-弹性半空间。需要另添一行予以描述，参照 4a 的说明。
	R	完全刚性
	F	从文件读取反射系数（只用于 KRAKENC）。需要额外的行，参照 4b 的说明。
	S	用于“软层（Soft-boss）”Twersky 散射
	H	用于“硬层（Hard-boss）”Twersky 散射
	T	只用于“软层（Soft-boss）”Twersky 散射的幅度
	I	只用于“硬层（Hard-boss）”Twersky 散射的幅度
		Twersky 散射选项需要另添一行予以描述，参照 4c 的说明。助记符 T、I 选项是字母表中 S、H 之后的字母。当前的智慧是，选项 T 最适合计算海冰散射。
	对于开阔海洋问题，顶端边界应设置为“V”选项。Twersky 选项是为冰下模拟而设计的。	
OPT(3:3)	水体衰减所用单位	
	N	Nepers/m
	F	dB/(kmHz)，F 指与频率相关（Freq. dependent）。
	M	dB/m，M 指每米（per Meter）。
	W	dB/λ，W 指波长（Wavelength）
	Q	品质因子
	T	Thorp 衰减公式。该项覆盖任何其他指定的衰减项。
	KRAKEN 忽略了弹性介质的材料衰减，KRAKENC 对此处理得很好。	
OPT(4:4)	慢速/稳健的求根器	
	!	就像：我想求解所有模式，我并不在乎要花多长时间。（只

		用于 KRAKENC)。
	众所周知，在弹性层的某些问题中，旧求根器会跳模式。	

表 4a 上半空间属性表

语法	ZT CPT CST RHOT APT AST	
说明	ZT	深度 (m)
	CPT	上半空间压缩波速 (m/s)
	CST	上半空间切向波速 (m/s)
	RHOT	上半空间密度 ( $g/cm^3$ )
	APT	上半空间压缩波衰减 (单位由 Option(3:3)给出)
	AST	上半空间剪切波衰减 (单位由 Option(3:3)给出)
只有在用户设定上端边界条件为均匀半空间，即 TOPOPT(2:2)='A'的情况下，才包含此行。		

表 4b 上端反射系数表

语法	NTHETA		
	THETA(1)	RMAG(1)	RPHASE(1)
	THETA(2)	RMAG(2)	RPHASE(2)
	.		
	.		
	.		
	THETA(NTHETA) RMAG(NTHETA) RPHASE(NTHETA)		
说明	NTHETA	角度数	
	THETA( )	角度	
	RMAG( )	反射系数幅度	
	RPHASE( )	反射系数相位（度(°)）	
举例	3		
	0.0	1.00	180.0

	<p>45.0 0.95 175.0</p> <p>90.0 0.90 170.0</p>
	<p>这些行应该包含在单独的‘.TRC’文件中。只有在 OPT(2: 2)=‘F’时才需要此文件，即用户指定上端边界条件从‘.TRC’（上端反射系数）文件中读取。</p>
	<p>“列表反射系数”选项在此有点实验的味道。我并不担心相位函数的多值特性：选择好您的参考值，确保相位连续变化（即可）。复杂的反射系数很可能会给模式求解器带来问题。</p>

表 4c Twersky 散射参数表

语法	BUMDEN ETA XI	
说明	BUMDEN	凸起（bump）密度(脊/公里)
	ETA	主半径 1(m)
	XI	主半径 2(m)
只有在设定了 “Twersky 散射” 选项时，才应包括这一行。		

(5) 水体介质信息

语法	NMESH SIGMA Z(NSSP)	
说明	NMESH	初始化时使用的网格点数目。
		在声学介质中，网格点数目应每垂向波长取 10 点左右。在弹性介质中，所需数目可能更大：合理的起点是每波长取 20 点。
		允许的最大网格点数由“维度语句”中的‘MAXN’给出，目前‘MAXN’值为 50000。所采用的网格点数取决于初始网格的数目及其精细化的倍数。根据后面的 RMAX 参数说明，网格点数的倍数可以从 1 到 5 不等。
		如果网格点数输入为 0，程序将自动计算 NMESH。
	SIGMA	界面的均方根（RMS）粗糙度。
	Z(NSSP)	介质底端的深度(m)。
		在读取随后的声速剖面时，该值用来查验最后一个 SSP 点。



表 5a 声速剖面

语法	Z(1) CP(1) CS(1) RHO(1) AP(1) AS(1)					
	Z(2) CP(2) CS(2) RHO(2) AP(2) AS(2)					
	.					
	.					
	.					
	Z(NSSP) CP(NSSP) CS(NSSP) RHO(NSSP) AP(NSSP) AS(NSSP)					
说明	Z()	深度（M）				
		海面从给出的第一个深度点开始。因此，如果您说，XBT 数据是从海面以下 50m 处开始的，那么您必须在 0m 处设定一个 SSP 点，否则自由表面将置于 50m 处，从而导致错误的结果。Z(1) 和 Z(Nssp)分别对应于介质之间界面的深度。				
	CP()	P 波速度（m/s）。				
	CS()	S 波速度（m/s）。				
	RHO()	密度（ $g/cm^3$ ）。目前，忽略声学介质的密度变化。				
	AP()	纵波衰减（版块 2 中给出单位）				
	AS()	横波衰减（版块 2 中给出单位）				
当采用‘A’选项时（表示由用户编写的子程序提供解析剖面），这些行应该省略。						
字符’/’表示该行的其余数据与“前一行”的 SSP 数据相同。如果第一行（默认值）或“前一行”是：						
0.0 1500.0 0.0 1.0 0.0 0.0						
则后续每行介质参数均以此重复。						

(6) 底端边界条件

语法	BOTOPT SIGMA	
说明	BOTOPT	底部边界条件类型
		V 底端以下为真空

		A	声学-弹性半空间。
			需要另起一行描述半空间参数。其格式与上端半空间边界条件的格式相同。
			选项‘A’通常用来模拟海底。
		R	完全刚性。
		F	从文件读取反射系数（只用于 KRAKENC）。需要一个扩展名为'.BRC'的底端反射系数文件。其格式与顶端反射系数的格式相同。
		P	从文件读取预先算好的内反射系数。该文件用 BOUNCE 程序生成，只用于 KRAKENC。
	SIGMA	界面粗糙度（m）。	

#### （7）相速度界限

语法	CLOW CHIGH	
说明	CLOW	相速度下限（m/s）。
		如果将 CLOW 设置为零，程序会自动计算 CLOW。当然，若使用非零 CLOW，就可以跳过较慢模式的计算。这主要用于排除界面模式(例如 SCHOLTE 波)。要收敛到这些界面模式，寻根器运行特别慢。当声源和接收器离界面足够远时，界面模式可以忽略。
	CHIGH	相速度上限（m/s）。
		CHIGH 越大，计算的模式就越多，执行时间也越长。因此 CHIGH 应该设置得尽可能小，以便执行时间减到更短。
		另一方面，CHIGH 控制了随后声场计算中的最大射线角--其声线路径的反转深度对应于 SSP 中 CHIGH 的深度。因此，更大的 CHIGH 意味着声线的穿透深度更深。
		因此，CHIGH 的设定取决于经验。在远场和高频情况下，海底传播的声线会严重衰减，可以设置海底处的声速为 CHIGH。

		在近场、低频情况下，海底折射的声线可能对声场贡献很大，设定 CHIGH 时，应须包含这些声线路径。
		必要时，可以减小 CHIGH，以便让 KRAKEN 只计算声道捕获的不泄漏的模式。
		当 CHIGH 超过半空间中 S 波或 P 波速度的相速度时，KRAKENC 会尝试计算泄露模式。此时泄露模式的计算具有实验意义。

### （8）最远距离

语法	RMAX
说明	最远距离（km）
	此参数应设置为想要计算声场的最远距离。
<p>模式计算期间，网格连续加倍，直到本征值在此距离上足够精确。如果把它设置为零，网格就不会加倍。毋需太担心此参数--即使将它设置为零，结果通常也会合理。</p>	

### （9）声源/接收器深度信息

语法	NSD SD(1:NSD) NRD RD(1:NRD)	
说明	NSD	声源深度的数目
	SD()	声源深度（m）
	NRD	接收器深度的数目
	RD()	接收器深度（m）
<p>这些数据使用列表导向的 I/O 读取，因此可用任意方式写入，比如只写成一行或拆成几行。此外，如果深度间隔相等，那么可以只写入第一个和最后一个深度，后面跟着一个‘/’，中间的深度值将自动生成。</p>		
<p>CPU 时间基本上与声源和接收器的数量无关，因此可以随意设置多达 4095 个深度。当然，对于高频，模式文件可能会占用较多的存储。</p>		

计算中会先对声源/接收器的深度进行排序和组合，然后再根据两组深度的组合来计算模式。因此，即使将声源/接收器深度混合也没关系。此外，仅在该行应用’/’，就能详细列出声源或接收器位置（但不能同时使用）。

声源和接收器不能放置在半空间。

如果要进行模式耦合计算，就必须设定大量的接收器深度，并且贯穿整个水深（向下直到半空间）。耦合积分的精确计算需要精细的采样(大约 10 点/波长)。

# 打印输出示例

本板块的打印输出示例如下：

KRAKEN- FRAMIV Twersky S/S ice scatter					
Frequency = 20.00 NMEDIA = 4					
N2-LINEAR approximation to SSP					
Attenuation units: dB/mkHz					
TWERSKY SOFT BOSS surface scatter model					
Twersky ice model parameters:					
Bumden = 0.920000E-02 Eta = 8.20 Xi = 5.10					
Z	ALPHAR	BETAR	RHO	ALPHAI	BETAI
( Number of pts = 750 RMS roughness = 0.000E+00 )					
0.00	1436.00	0.00	1.03	0.0000	0.0000
30.00	1437.40	0.00	1.03	0.0000	0.0000
50.00	1437.70	0.00	1.03	0.0000	0.0000
80.00	1439.50	0.00	1.03	0.0000	0.0000
100.00	1441.90	0.00	1.03	0.0000	0.0000
125.00	1444.60	0.00	1.03	0.0000	0.0000
150.00	1450.00	0.00	1.03	0.0000	0.0000
175.00	1456.10	0.00	1.03	0.0000	0.0000
200.00	1458.40	0.00	1.03	0.0000	0.0000
250.00	1460.00	0.00	1.03	0.0000	0.0000
300.00	1460.50	0.00	1.03	0.0000	0.0000
350.00	1460.60	0.00	1.03	0.0000	0.0000
400.00	1461.00	0.00	1.03	0.0000	0.0000
450.00	1461.50	0.00	1.03	0.0000	0.0000
500.00	1462.00	0.00	1.03	0.0000	0.0000
600.00	1462.90	0.00	1.03	0.0000	0.0000
700.00	1463.90	0.00	1.03	0.0000	0.0000
800.00	1464.80	0.00	1.03	0.0000	0.0000
900.00	1465.80	0.00	1.03	0.0000	0.0000
1000.00	1466.70	0.00	1.03	0.0000	0.0000
1100.00	1467.00	0.00	1.03	0.0000	0.0000
1200.00	1469.00	0.00	1.03	0.0000	0.0000
1300.00	1469.50	0.00	1.03	0.0000	0.0000
1400.00	1471.80	0.00	1.03	0.0000	0.0000
1600.00	1474.50	0.00	1.03	0.0000	0.0000
1800.00	1477.00	0.00	1.03	0.0000	0.0000

2000.00	1479.60	0.00	1.03	0.0000	0.0000
2500.00	1487.90	0.00	1.03	0.0000	0.0000
3750.00	1510.40	0.00	1.03	0.0000	0.0000

( Number of pts = 35 RMS roughness = 0.000E+00 )

3750.00	1504.60	0.00	1.50	0.1500	0.0000
3808.33	1603.07	0.00	1.50	0.1500	0.0000

( Number of pts = 35 RMS roughness = 0.000E+00 )

3808.33	1603.07	0.00	1.53	0.1500	0.0000
3866.66	1701.53	0.00	1.53	0.1500	0.0000

( Number of pts = 35 RMS roughness = 0.000E+00 )

3866.66	1701.53	0.00	1.57	0.1500	0.0000
3925.00	1800.00	0.00	1.57	0.1500	0.0000

ACOUSTO-ELASTIC half-space, ( RMS roughness = 0.000E+00 )

3925.00	1800.00	0.00	1.60	0.1500	0.0000
---------	---------	------	------	--------	--------

CLOW = 0.00000E+00 CHIGH = 1504.0

RMAX = 300.00000000000000

Number of sources = 1  
100.0000

Number of receivers = 1  
200.0000

Mesh multiplier	CPU seconds
1	16.4
2	15.1

I	K	ALPHA	PHASE SPEED
1	0.8625082052E-01	-0.8519020992E-06	1456.956646
2	0.8582849772E-01	-0.1302695655E-06	1464.125663
3	0.8562855085E-01	-0.1059327457E-06	1467.544468
4	0.8545402623E-01	-0.1136748056E-06	1470.541667
5	0.8527187871E-01	-0.1192384459E-06	1473.682861
6	0.8510445198E-01	-0.1156165482E-06	1476.582050
7	0.8495255965E-01	-0.1130917467E-06	1479.222129
8	0.8479984039E-01	-0.1185453302E-06	1481.886116
9	0.8465149335E-01	-0.1314814525E-06	1484.483039
10	0.8450452348E-01	-0.1255743704E-06	1487.064845
11	0.8435857532E-01	-0.1276318031E-06	1489.637606

12	0.8421637950E-01	-0.1377681231E-06	1492.152796
13	0.8407780307E-01	-0.1377169389E-06	1494.612151
14	0.8393959060E-01	-0.1339925824E-06	1497.073136
15	0.8380370528E-01	-0.1378254389E-06	1499.500598
16	0.8367091002E-01	-0.1450063419E-06	1501.880476
-----			

如果程序以某种方式中止，请检查生成的打印文件。通常是（因为）省略了某预期的行，因此就曲解环境文件。

当 KRAKEN 需要超过 500 次迭代才收敛到某个模式时，会出现“FAILURE TO CONVERGE IN SECANT（割线收敛失败）”的消息。通常只需不到 20 次迭代（就能收敛），但要收敛到界面模式（Scholte 波或 Stoneley 波）可能就会特别慢，特别是对于较高的频率。最简单的方案是将问题的相速度下限设置为 P 波速度的最小值，就排除了界面模式。或者，可以增加 MAXNIT 的值，该值控制寻根器中的最大迭代次数。

# 声场计算 field.hlp

FIELD 程序应用 KRAKEN 算出的模式，生成一个渲染文件，该文件包含了一系列作为距离与深度函数的声场快照。对用户设定的每个深度的声源也会生成一张声场快照。

相关文件	名 称	单 位	说明
输 入	*.FLP	5	声场参数（FieLd Parameters）
	*.MOD	30-99	模式文件（MODE files）
输 出	*.PRT	6	打印文件（PRinT file）
	*.SHD	25	渲染文件（SHaDe file）

FLP 文件的示例与说明：

*.FLP 示 例	
/,	! TITLE
'RA'	! OPT 'X/R', 'C/A'
9999	! M （包含的模式数）
1 0.0	! NPROF RPROF(1:NPROF) (km)
501 200.0 220.0 /	! NR R(1:NR) (km)
1 500.0 /	! NSD SD(1:NSD) (m)
1 2500.0 /	! NRD RD(1:NRD) (m)
1 0.0 /	! NRR RR(1:NRR) (m)

## （1）标题（TITLE）

语法	TITLE
说明	此标题将被写入“渲染”文件。如果键入 '/', 将从第一个模式文件提取标题。

## （2）选项（OPTIONS）

语法	OPTION	
说明	OPTION(1:1)	声源类型
		R 点源（圆柱形(R-Z)坐标）



		X	线源（笛卡尔(X-Z)坐标）
	OPTION(2:2)	选择耦合或绝热模式理论。	
		C	耦合模式理论
		A	绝热模式理论（默认）
要选择耦合模式运行，您*** <b>必须</b> ***确保贯穿整个水体对模式进行精细采样，以便 <b>FIELD</b> 能够精确地计算耦合积分。这可以通过在运行 <b>KRAKEN</b> 时设置大量的接收器深度（NRD）来完成。这个数目应该设置为大约 10 点/波长。			

### （3）模式数目（NUMBER OF MODES）

语法	M
说明	声场计算中使用的模式数。如果设定的模式数超过了计算出的数量，程序会使用计算得到的所有模式。

### （4）剖面距离（PROFILE RANGES）

语法	NPROF RPROF(1:NPROF)	
说明	NPROF	剖面数量，亦即换用新模式集的距离数目。
	RPROF()	每个观测剖面所在的距离点（km）。在与距离无关的问题中，就只有一个剖面文件，它的距离也是任意的。每个新剖面的距离点必须有一个模式文件，并按顺序依次命名，如 30, 31, ...。最后一组 SSP 的模式以与距离无关的方式扩展到无穷远，因此 RMAX 可以超过 RPROF(NPROF)。
		*** 注意：RPROF(1)必须为 0.0 ***

### （5）声源/接收器位置（SOURCE/RECEIVER LOCATIONS）

语法	NR	R(1:NR)
	NSD	SD(1:NSD)
	NRD	RD(1:NRD)
	NRR	RR(1:NRR)

说明	NR	接收器距离的数目。(NR<4094 且 NR*NRD<=210000)
	R()	接收器距离(km)
	NSD	声源深度的数目(<51)
	SD()	声源深度(m)
	NRD	接收器深度的数目(<201 和 NR*NRD<210000)
	RD()	接收器深度(m)
	NRR	接收器距离-偏移的数目，必须等于 NRD。（是的，此乃多余）
	RR()	接收器偏移（m）。对于完全垂直的阵列，该向量全为零值。 在计算阵列的声场之前，先将 R(1:NR)加上距离偏移 RR()，再通过步进算出声场。当接收阵列倾斜或扭曲时，该向量为非零值，从而可以模拟当海洋中部署的阵列发生扭曲时的声场。
<p>声源/接收器信息的格式是一个整数，它表示声源（接收器）的数目。随后的实数表示每个声源/接收器的深度（距离）。由于这些数据采用表式 I/O 读取，所以您可以采用任何方式写入，比如，写成一行或拆成几行。此外，如果深度间隔相等，您可以只写入第一个和最后一个深度，随后写上‘/’，中间的深度就会自动生成。</p>		

## 测试算例

我们设计了多种类型的场景来验证模型，描述了各类场景所需的输入结构，对程序各个组成部分进行了测试。简单来说，有下列测试算例：

PEKERIS	简单的（双层）Pekeris 波导。
TWERSKY	表面粗糙的 Pekeris 波导。证实 Twersky 散射运行正常。
SCHOLTE	弹性底层，Scholte 波被激发的双层波导。证实弹性半空间条件函数能正确运行。
DOUBLE	双波导问题，验证能够正确处理多个梯度。
FLUSED	涵盖海洋、沉积层和基底半空间的三层问题。展示对多层介质的正确处理。
ELSED	沉积层有剪切属性的三层问题。展示能够正确处理弹性介质。
ATTEN	体积衰减的双层问题。展示可以正确地处理衰减。
NORMAL	密度多次变化的问题，检验复杂场景下的模态归一化。
ICE	弹性冰层问题，展示也能正确处理水体上方的弹性层。

对于每类场景，我们均提供环境文件，并由 KRAKEN 打印输出。输出的 CPU 时间是指在一台每秒 50 万次浮点运算的工作站上的计算耗时。

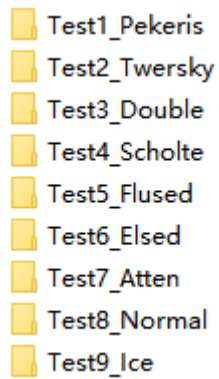
在所有算例中，频率均设为 **10Hz**，声源/接收机深度分别为 500m 和 2500m。传播损失图层叠了 KRAKEN（实线）、KRAKENC（点线）和 SCOOTER（虚线）的计算结果。还将这些结果与 NRL FSTFLD 模型的结果进行了查验，全部吻合，相差均在 1dB 之内（通常而言，这算很小的啦！！！）。

# 作业

在 64 位的 windows 平台上的 Matlab 软件中跑完 Kraken 的 9 个测试算例，感悟简正波海洋传播声场模拟可能面对的多种场景及其解算效果。

升级突破：改变您想改变的输入的海洋环境参数，反复实验！！

作业文件夹：



温馨提示：将本程序包的文件夹添加在 matlab “设置路径” 的 “添加并包含子文件夹”。

# PEKERIS (液态半空间海底)

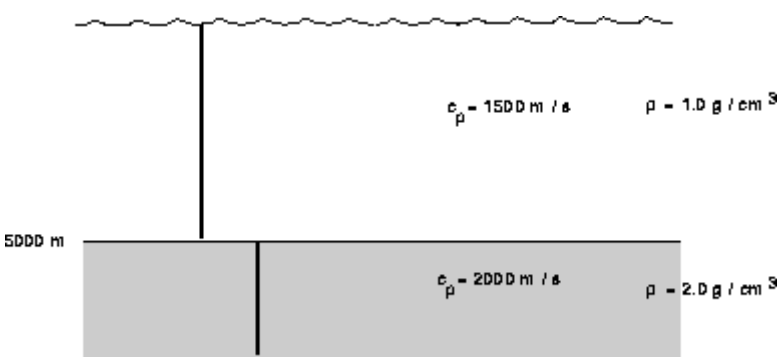


图 5.1: PEKERIS 问题原理图。

PEKERIS 问题描述为：均匀流体层声速 1500m/s，其下是密度  $2.0 \text{ g/cm}^3$ ，声速 2000m/s 的较快声速的海底。

PEKERIS 问题	
KRAKEN 与 KRAKENC 的.env 环境文件: Pekeris.env	
'Pekeris problem' 10.0 1 'NVF' 500 0.0 5000.0 0.0 1500.0 / 5000.0 1500.0 / 'A' 0.0 5000.0 2000.0 0.0 2.0 / 1400.0 2000.0 250.0 ! RMAX (km) 1 ! NSD 500.0 / ! SD(1:NSD) 1 ! NRD 2500.0 / ! RD(1:NRD)	
FIELD 的输入配置文件: Pekeris.flp	
/, ! TITLE 'RA' ! OPT 'X/R' (coords), 'C/A' (couple/adiab) 9999 ! M (number of modes to include) 1 ! NPROF 0.0 ! RPROF(1:NPROF) (km) 501 ! NR 200.0 220.0 / ! RMIN, RMAX (km) 1 ! NSD, 500.0 / ! SD(1:NSD) (m)	

1	!	NRD	
2500.0 /	!	RD(1:NRD)	(m)
1	!	NRR	
0.0 /	!	RR(1:NRR)	(m)

SCOOTER 的配置文件:

1. **PekerisS.env** 与 **Pekeris.env** 完全一样。
2. **PekerisS.flp** 如下表:

SCOOTER 模型声场计算时 Fields 的输入配置文件: <b>PekerisS.flp</b>			
'RP'	!	'R/X (coord), Lin/DB, Pos/Neg/Both'	
501	!	NR	
200.0 220.0 /	!	RMIN, RMAX	! Remember the '/'

计算后生成的打印文件如下:

PEKERIS 问题回显的输出文件: <b>Pekeris.prt</b>																													
<hr/> KRAKEN- Pekeris problem Frequency = 10.00 Hz NMedia = 1  N2-Linear approximation to SSP Attenuation units: dB/mkHz VACUUM  <table> <tr> <th>z (m)</th><th>alphaR (m/s)</th><th>betaR</th><th>rho (g/cm^3)</th><th>alphaI</th><th>betaI</th></tr> </table> ( # mesh points = 500 RMS rough = 0.00 ) <table> <tr> <td>0.00</td><td>1500.00</td><td>0.00</td><td>1.00</td><td>0.0000</td><td>0.0000</td></tr> <tr> <td>5000.00</td><td>1500.00</td><td>0.00</td><td>1.00</td><td>0.0000</td><td>0.0000</td></tr> </table> ( RMS rough = 0.00 ) ACOUSTO-ELASTIC half-space <table> <tr> <td>5000.00</td><td>2000.00</td><td>0.00</td><td>2.00</td><td>0.0000</td><td>0.0000</td></tr> </table> cLow = 1400.0 m/s      cHigh = 2000.0 m/s RMax = 250.00000000000000 km  <hr/> Number of source depths = 1 Source depths (m) 500.000						z (m)	alphaR (m/s)	betaR	rho (g/cm^3)	alphaI	betaI	0.00	1500.00	0.00	1.00	0.0000	0.0000	5000.00	1500.00	0.00	1.00	0.0000	0.0000	5000.00	2000.00	0.00	2.00	0.0000	0.0000
z (m)	alphaR (m/s)	betaR	rho (g/cm^3)	alphaI	betaI																								
0.00	1500.00	0.00	1.00	0.0000	0.0000																								
5000.00	1500.00	0.00	1.00	0.0000	0.0000																								
5000.00	2000.00	0.00	2.00	0.0000	0.0000																								

Number of receiver depths = 1  
Receiver depths (m)  
2500.00

Mesh multiplier CPU seconds  
--- Number of modes = 44  
1 0.00 s  
--- Number of modes = 44  
2 0.156E-01s

I	k (1/m)	alpha (1/m)	Phase Speed (m/s)	Group Speed (m/s)
1	0.4188332253E-01	0.000000000	1500.164010	1499.846663
2	0.4186958032E-01	0.000000000	1500.656385	1499.386357
3	0.4184666447E-01	0.000000000	1501.478167	1498.618207
4	0.4181455674E-01	0.000000000	1502.631092	1497.540780
5	0.4177323161E-01	0.000000000	1504.117605	1496.152119
6	0.4172265636E-01	0.000000000	1505.940862	1494.449794
7	0.4166279103E-01	0.000000000	1508.104751	1492.430954
8	0.4159358848E-01	0.000000000	1510.613904	1490.092380
9	0.4151499439E-01	0.000000000	1513.473722	1487.430547
10	0.4142694720E-01	0.000000000	1516.690399	1484.441673
11	0.4132937809E-01	0.000000000	1520.270954	1481.121768
12	0.4122221089E-01	0.000000000	1524.223270	1477.466671
13	0.4110536194E-01	0.000000000	1528.556132	1473.472083
14	0.4097873993E-01	0.000000000	1533.279285	1469.133581
15	0.4084224568E-01	0.000000000	1538.403485	1464.446638
16	0.4069577186E-01	0.000000000	1543.940567	1459.406623
17	0.4053920272E-01	0.000000000	1549.903522	1454.008792
18	0.4037241363E-01	0.000000000	1556.306582	1448.248290
19	0.4019527072E-01	0.000000000	1563.165317	1442.120123
20	0.4000763035E-01	0.000000000	1570.496741	1435.619151
21	0.3980933859E-01	0.000000000	1578.319442	1428.740061
22	0.3960023053E-01	0.000000000	1586.653720	1421.477346
23	0.3938012967E-01	0.000000000	1595.521741	1413.825287
24	0.3914884708E-01	0.000000000	1604.947725	1405.777927
25	0.3890618058E-01	0.000000000	1614.958141	1397.329056
26	0.3865191380E-01	0.000000000	1625.581942	1388.472195
27	0.3838581509E-01	0.000000000	1636.850824	1379.200592
28	0.3810763645E-01	0.000000000	1648.799530	1369.507216
29	0.3781711221E-01	0.000000000	1661.466183	1359.384781
30	0.3751395766E-01	0.000000000	1674.892680	1348.825780
31	0.3719786754E-01	0.000000000	1689.125136	1337.822554
32	0.3686851438E-01	0.000000000	1704.214399	1326.367413

33	0.3652554677E-01	0.000000000	1720.216633	1314.452841
34	0.3616858743E-01	0.000000000	1737.194000	1302.071824
35	0.3579723130E-01	0.000000000	1755.215440	1289.218406
36	0.3541104368E-01	0.000000000	1774.357560	1275.888626
37	0.3500955866E-01	0.000000000	1794.705659	1262.082168
38	0.3459227830E-01	0.000000000	1816.354868	1247.805383
39	0.3415867360E-01	0.000000000	1839.411384	1233.077220
40	0.3370818983E-01	0.000000000	1863.993688	1217.941877
41	0.3324026217E-01	0.000000000	1890.233379	1202.499314
42	0.3275436107E-01	0.000000000	1918.274423	1186.993323
43	0.3225014368E-01	0.000000000	1948.265834	1172.152918
44	0.3172824619E-01	0.000000000	1980.312832	1161.657029

---

End of environmental file

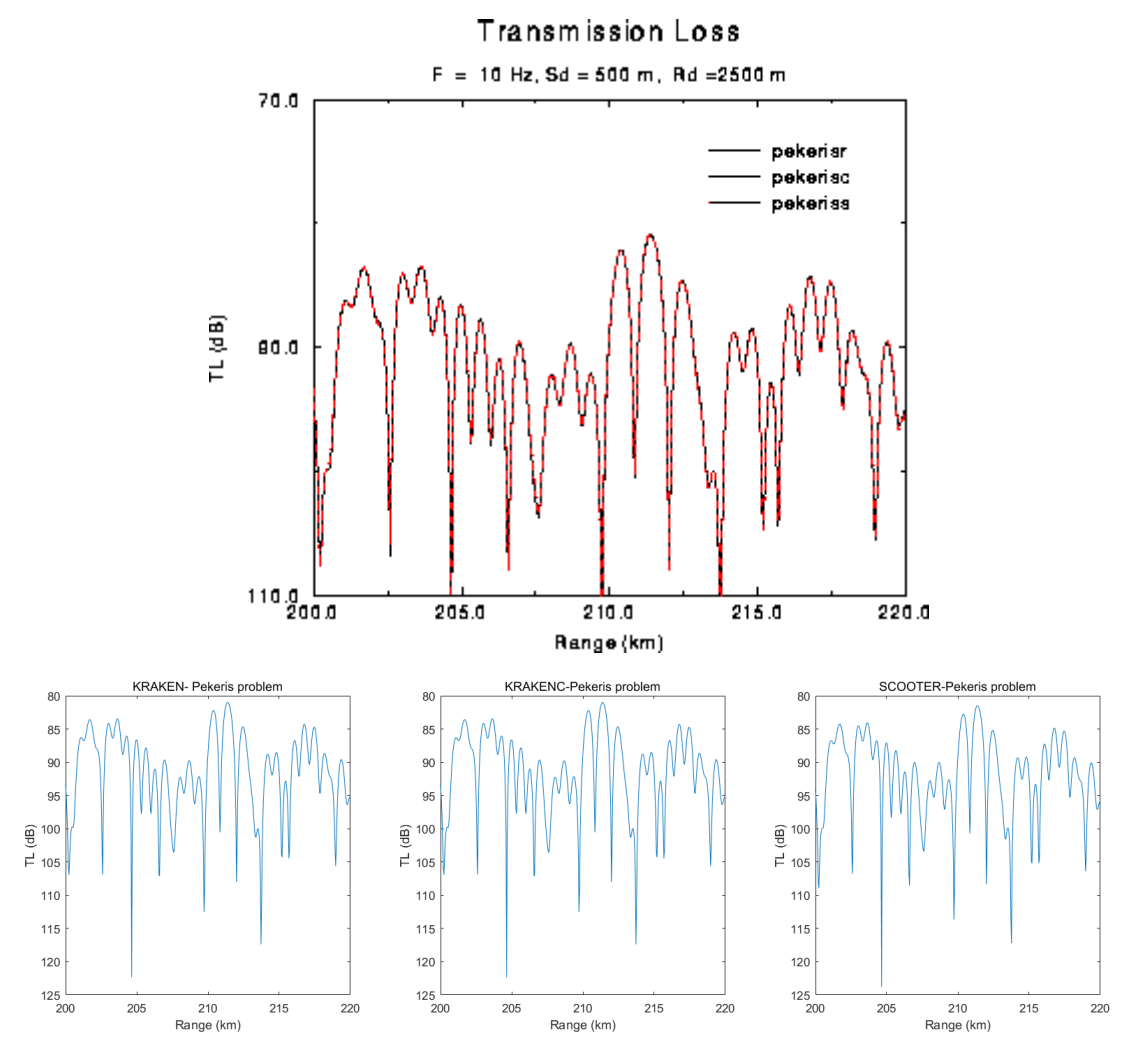
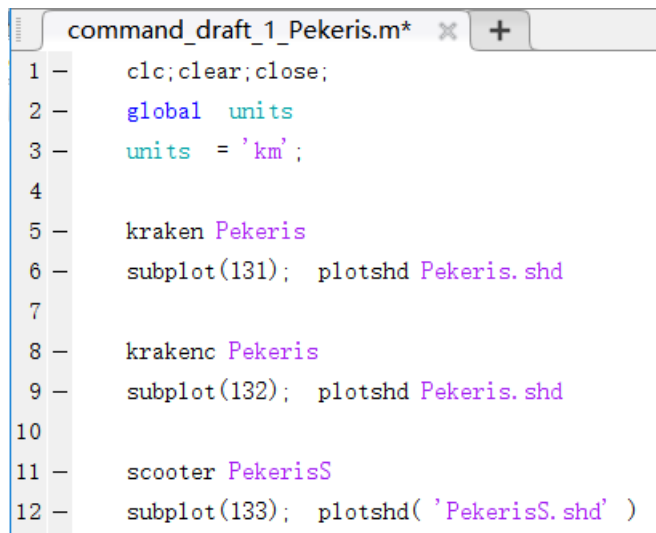


图 5.2: PEKERIS 问题的传播损失。

Matlab 演算脚本: command\_draft\_1\_Pekeris.m





The image shows a MATLAB script editor window with a single tab titled "command\_draft\_1\_Pakeris.m\*". The script contains 12 lines of code, with line numbers 1 through 12 on the left margin. The code is as follows:

```
1 -   clc;clear;close;
2 -   global  units
3 -   units = 'km';
4
5 -   kraken Pakeris
6 -   subplot(131); plotshd Pakeris.shd
7
8 -   krakenc Pakeris
9 -   subplot(132); plotshd Pakeris.shd
10
11 -  scooter PakerisS
12 -  subplot(133); plotshd( 'PakerisS.shd' )
```

后续各类场景的 Matlab 演算脚本与此类似，在各自的文件夹中。

# TWERSKY (流冰散射)

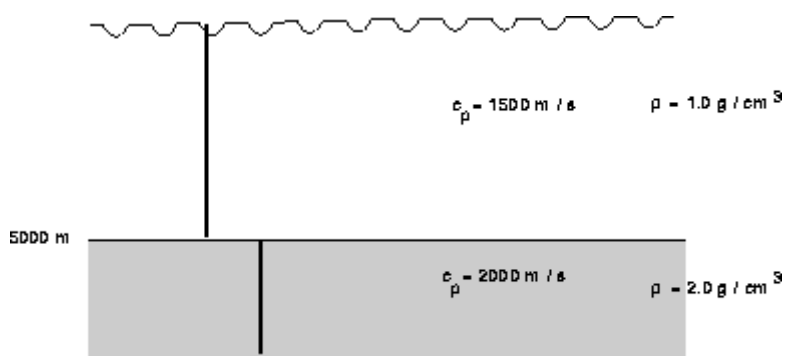


图 5.3: TWERSKY 问题原理图。

本算例通过添加表面散射，来对前面的 **Pekeris** 问题进行修改。粗糙表面设定为凸峰宽 8.2m、高 5.1m、密度 0.092 个凸峰/公里 (bosses/km)。注意，**KRAKEN** 的结果不同于 **KRAKENC** 和 **SCOOTER** 的结果。这反映出使用微扰理论产生的误差，但是考虑到散射模型的近似，该误差可以忽略不计（在后续版本中，此误差已被修正）。

TWERSKY 问题的.env 环境文件（三个模型相同）：Twersky.env	
<pre>'Pekeris problem with Twersky ice scatter' 10.0 1 'NSF' 0.092  8.2  5.1 500  0.0  5000.0       0.0  1500.0 /       5000.0  1500.0 / 'A'  0.0 5000.0  2000.0  0.0  2.0 / 1400.0  2000.0 250.0                                ! RMAX (km) 1                                    ! NSD 500.0 /                             ! SD(1:NSD) 1                                    ! NRD 2500.0 /                             ! RD(1:NRD)</pre>	
Field 与 Fields 声场计算时的.flp 配置文件与 Pekeris 问题相同。	

计算后生成的打印文件如下：

# TWERSKY 问题回显的输出文件: Twersky.prt

KRAKENC-Pekeris problem with Twersky ice scatter

Frequency = 10.00 Hz

NMedia = 1

N2-Linear approximation to SSP

Attenuation units: dB/mkHz

Twersky SOFT BOSS scatter model

Twersky ice model parameters:

Bump Density = 0.920000E-01 Eta = 8.20 Xi = 5.10

z (m)	alphaR (m/s)	betaR	rho (g/cm^3)	alphaI	betaI
-------	--------------	-------	--------------	--------	-------

( # mesh points = 500 RMS rough = 0.00 )

0.00	1500.00	0.00	1.00	0.0000	0.0000
5000.00	1500.00	0.00	1.00	0.0000	0.0000

( RMS rough = 0.00 )

ACOUSTO-ELASTIC half-space

5000.00	2000.00	0.00	2.00	0.0000	0.0000
---------	---------	------	------	--------	--------

cLow = 1400.0 m/s cHigh = 2000.0 m/s

RMax = 250.00000000000000

Number of source depths = 1

Source depths (m)

500.000

Number of receiver depths = 1

Receiver depths (m)

2500.00

Mesh multiplier CPU seconds

Max. number of restarts in root finder, MaxTries = 1

1 0.00 s

Max. number of restarts in root finder, MaxTries = 1

2 0.00 s

I	k (1/m)	alpha (1/m)	Phase Speed (m/s)	Group Speed (m/s)
1	0.4188332253E-01	0.000000000	1500.164010	1499.840670
2	0.4186958032E-01	0.000000000	1500.656385	1499.362480
3	0.4184666447E-01	0.000000000	1501.478167	1498.564836
4	0.4181455674E-01	0.000000000	1502.631092	1497.446760
5	0.4177323161E-01	0.000000000	1504.117605	1496.006904
6	0.4172265636E-01	0.000000000	1505.940862	1494.243574
7	0.4166279103E-01	0.000000000	1508.104751	1492.154756
8	0.4159358848E-01	0.000000000	1510.613904	1489.738134
9	0.4151499439E-01	0.000000000	1513.473722	1486.991124
10	0.4142694720E-01	0.000000000	1516.690399	1483.910890
11	0.4132937809E-01	0.000000000	1520.270954	1480.494370
12	0.4122221089E-01	0.000000000	1524.223270	1476.738285
13	0.4110536194E-01	0.000000000	1528.556132	1472.639154
14	0.4097873993E-01	0.000000000	1533.279285	1468.193300
15	0.4084224568E-01	0.000000000	1538.403485	1463.396849
16	0.4069577186E-01	0.000000000	1543.940567	1458.245729
17	0.4053920272E-01	0.000000000	1549.903522	1452.735660
18	0.4037241363E-01	0.000000000	1556.306582	1446.862143
19	0.4019527072E-01	0.000000000	1563.165317	1440.620448
20	0.4000763035E-01	0.000000000	1570.496741	1434.005594
21	0.3980933859E-01	0.000000000	1578.319442	1427.012331
22	0.3960023053E-01	0.000000000	1586.653720	1419.635117
23	0.3938012967E-01	0.000000000	1595.521741	1411.868096
24	0.3914884708E-01	0.000000000	1604.947725	1403.705077
25	0.3890618058E-01	0.000000000	1614.958141	1395.139505
26	0.3865191380E-01	0.000000000	1625.581942	1386.164440
27	0.3838581509E-01	0.000000000	1636.850824	1376.772535
28	0.3810763645E-01	0.000000000	1648.799530	1366.956011
29	0.3781711221E-01	0.000000000	1661.466183	1356.706644
30	0.3751395766E-01	0.000000000	1674.892680	1346.015752
31	0.3719786754E-01	0.000000000	1689.125136	1334.874200
32	0.3686851438E-01	0.000000000	1704.214399	1323.272420
33	0.3652554677E-01	0.000000000	1720.216633	1311.200463
34	0.3616858743E-01	0.000000000	1737.194000	1298.648113
35	0.3579723130E-01	0.000000000	1755.215440	1285.605084
36	0.3541104368E-01	0.000000000	1774.357560	1272.061398
37	0.3500955866E-01	0.000000000	1794.705659	1258.008062
38	0.3459227830E-01	0.000000000	1816.354868	1243.438364
39	0.3415867360E-01	0.000000000	1839.411384	1228.350445
40	0.3370818983E-01	0.000000000	1863.993688	1212.752854
41	0.3324026217E-01	0.000000000	1890.233379	1196.677957
42	0.3275436107E-01	0.000000000	1918.274423	1180.220577
43	0.3225014368E-01	0.000000000	1948.265834	1163.686827

44	0.3172824619E-01	0.000000000	1980.312832	1148.656213
End of environmental file				

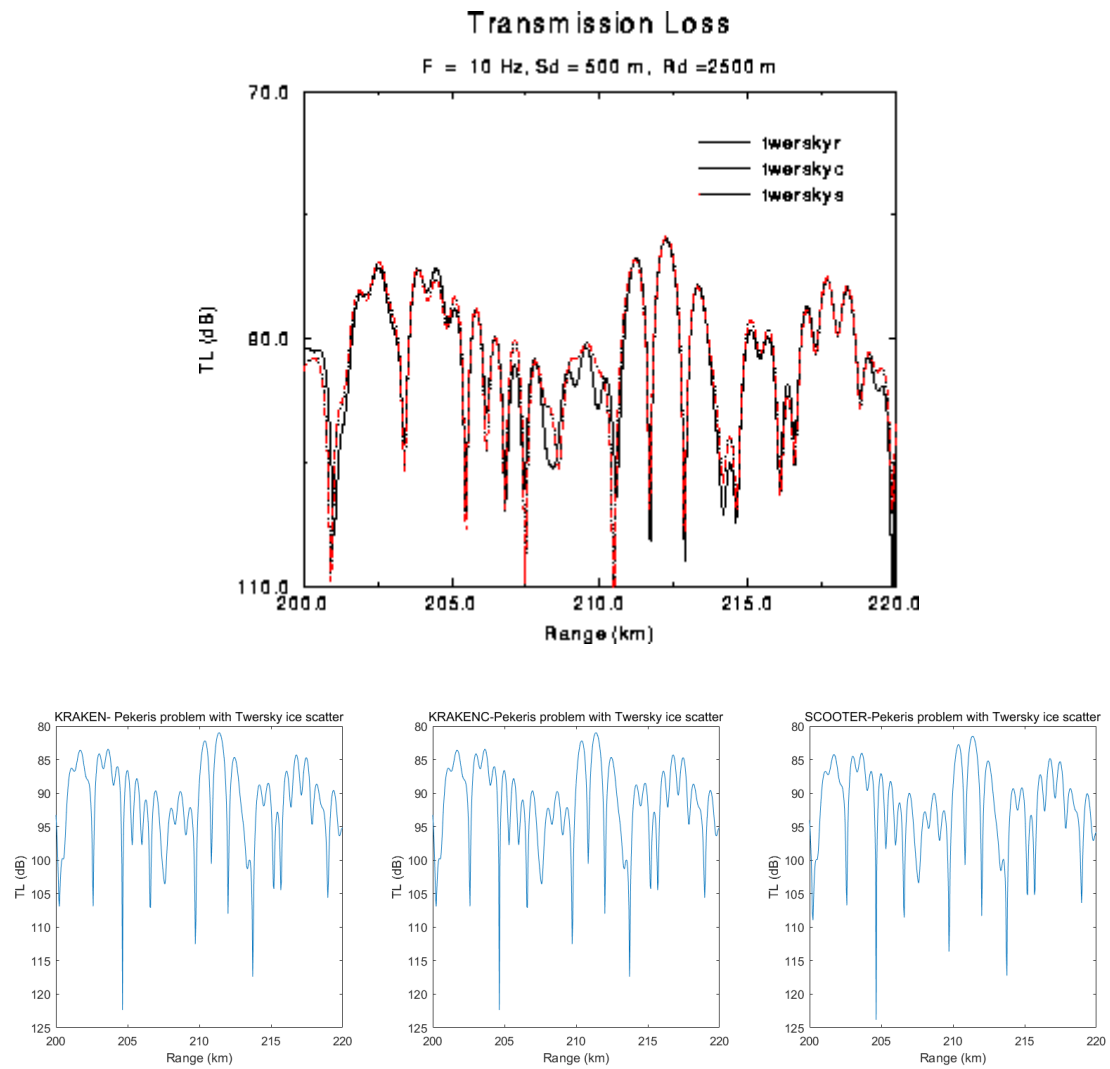


图 5.4: TWERSKY 问题的传播损失。

# DOUBLE (双波导)

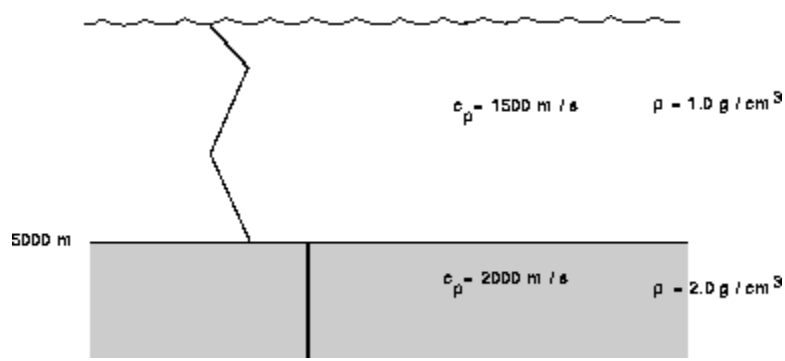


图 5.5：双波导问题原理图。

将海洋（声速）剖面转换成三段分段线性的剖面，就定义了一个双波导（海洋）剖面。

双波导问题的 .env 环境文件（三个模型相同）：Double.env	
<pre>'Double-duct problem' 10.0 3 'NVF' 100 0.0 1000.0     0.0 1500.0 /   1000.0 1550.0 / 200 0.0 3000.0   1000.0 1550.0 /   3000.0 1500.0 / 200 0.0 5000.0   3000.0 1500.0 /   5000.0 1550.0 / 'A' 0.0 5000.0 2000.0 0.0 2.0 / 1400.0 2000.0 1000.0                ! RMAX (km) 1                    ! NSD 500.0 /              ! SD(1:NSD) 1                    ! NRD 2500.0 /             ! RD(1:NRD)</pre>	
Field 与 Fields 声场计算时的 .flp 配置文件与 Pekeris 问题相同。	

计算后生成的打印文件如下：

双波导问题回显的输出文件：Double.prt					
<hr/>					
KRAKENC-Double-duct problem					
Frequency = 10.00 Hz					
NMedia = 3					
N2-Linear approximation to SSP					
Attenuation units: dB/mkHz					
VACUUM					
z (m)	alphaR (m/s)	betaR	rho (g/cm^3)	alphaI	betaI
( # mesh points = 100 RMS rough = 0.00 )					
0.00	1500.00	0.00	1.00	0.0000	0.0000
1000.00	1550.00	0.00	1.00	0.0000	0.0000
( # mesh points = 200 RMS rough = 0.00 )					
1000.00	1550.00	0.00	1.00	0.0000	0.0000
3000.00	1500.00	0.00	1.00	0.0000	0.0000
( # mesh points = 200 RMS rough = 0.00 )					
3000.00	1500.00	0.00	1.00	0.0000	0.0000
5000.00	1550.00	0.00	1.00	0.0000	0.0000
( RMS rough = 0.00 )					
ACOUSTO-ELASTIC half-space					
5000.00	2000.00	0.00	2.00	0.0000	0.0000
cLow = 1400.0 m/s cHigh = 2000.0 m/s					
RMax = 1000.00000000000000					
<hr/>					
Number of source depths = 1					
Source depths (m)					
500.000					
Number of receiver depths = 1					
Receiver depths (m)					
2500.00					

Mesh multiplier    CPU seconds

Max. number of restarts in root finder, MaxTries = 1

1                    0.00    s

Max. number of restarts in root finder, MaxTries = 1

2                    0.156E-01s

I	k (1/m)	alpha (1/m)	Phase Speed (m/s)	Group Speed (m/s)
1	0.4171018652E-01	0.000000000	1506.391084	1502.113504
2	0.4147891740E-01	0.000000000	1514.790091	1504.847988
3	0.4131862874E-01	0.000000000	1520.666464	1506.728450
4	0.4123681174E-01	0.000000000	1523.683583	1507.694936
5	0.4117017415E-01	0.000000000	1526.149801	1508.460615
6	0.4104029641E-01	0.000000000	1530.979515	1509.962911
7	0.4091561041E-01	0.000000000	1535.645013	1511.380202
8	0.4080128302E-01	0.000000000	1539.947973	1513.035457
9	0.4074949725E-01	0.000000000	1541.904988	1515.079438
10	0.4068324597E-01	0.000000000	1544.415928	1511.121382
11	0.4057281144E-01	0.000000000	1548.619650	1510.439723
12	0.4046123964E-01	0.000000000	1552.889967	1508.038856
13	0.4035440690E-01	0.000000000	1557.001029	1502.792406
14	0.4024224926E-01	0.000000000	1561.340487	1495.681667
15	0.4011172669E-01	0.000000000	1566.421051	1489.822305
16	0.3996592323E-01	0.000000000	1572.135660	1484.324873
17	0.3980769235E-01	0.000000000	1578.384713	1478.343476
18	0.3964207800E-01	0.000000000	1584.978796	1471.763763
19	0.3946677171E-01	0.000000000	1592.019067	1464.687126
20	0.3927946746E-01	0.000000000	1599.610614	1457.426234
21	0.3907987820E-01	0.000000000	1607.780166	1449.914243
22	0.3886748929E-01	0.000000000	1616.565778	1442.044508
23	0.3864545686E-01	0.000000000	1625.853546	1433.715948
24	0.3841222010E-01	0.000000000	1635.725634	1424.919880
25	0.3816711818E-01	0.000000000	1646.229951	1415.770263
26	0.3790948500E-01	0.000000000	1657.417743	1406.225970
27	0.3763853318E-01	0.000000000	1669.349142	1396.279898
28	0.3735627690E-01	0.000000000	1681.962398	1385.861581
29	0.3706135033E-01	0.000000000	1695.347107	1374.962462
30	0.3675356291E-01	0.000000000	1709.544548	1363.633412
31	0.3643204686E-01	0.000000000	1724.631430	1351.837636
32	0.3609604877E-01	0.000000000	1740.685067	1339.584359
33	0.3574683553E-01	0.000000000	1757.689937	1326.819185
34	0.3538311960E-01	0.000000000	1775.757869	1313.537232
35	0.3500480248E-01	0.000000000	1794.949511	1299.764592
36	0.3461083089E-01	0.000000000	1815.381239	1285.470405
37	0.3420046728E-01	0.000000000	1837.163585	1270.674138



38	0.3377442369E-01	0.000000000	1860.338274	1255.346877
39	0.3333144286E-01	0.000000000	1885.062502	1239.519646
40	0.3287145204E-01	0.000000000	1911.441362	1223.288627
41	0.3239342265E-01	0.000000000	1939.648482	1206.836762
42	0.3189739326E-01	0.000000000	1969.811532	1191.050958
End of environmental file				

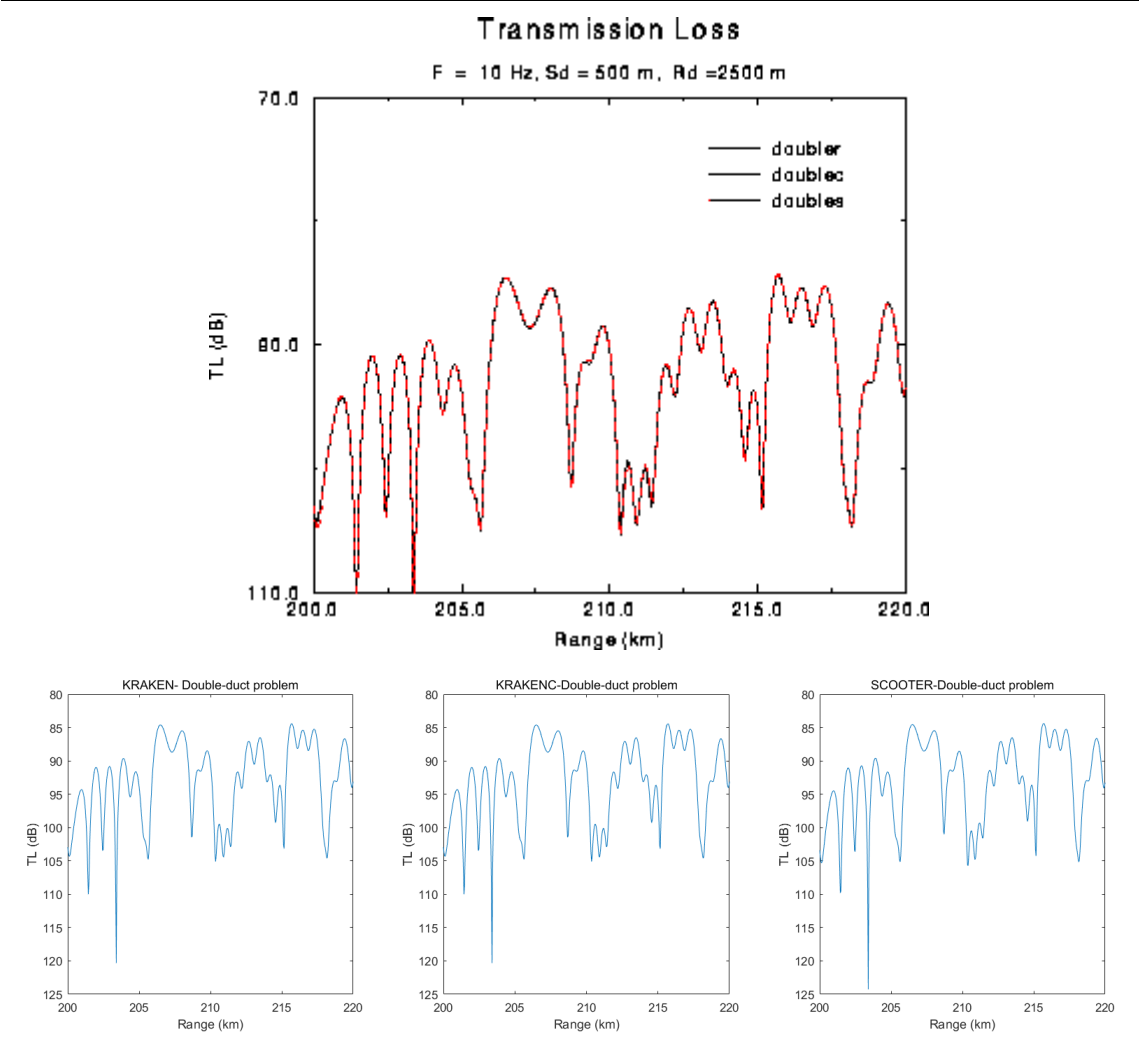


图 5.6：双波导问题的传播损失。

SCHOLTE (弹性半空间海底的表面波)

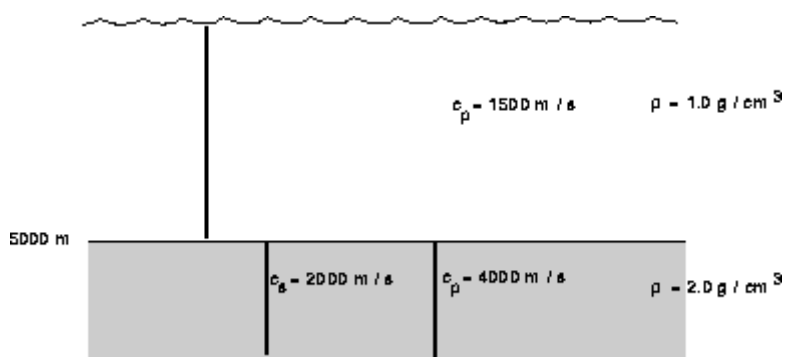


图 5.7: SCHOLTE 问题原理图。

这是 Pekeris 波导问题的另一个版本，底部为弹性半空间。这类问题会产生 Scholte 模式，其相速度小于问题中的最慢速度。（由于声源和接收器与界面间距离是波长的很多倍，所以在实际中 Scholte 模式对传播损失的计算并不重要。）

SCHOLTE 问题的.env 环境文件（三个模型相同）：Scholte.env	
<pre>'Scholte waveguide' 10.0 1 'NVM' 500  0.0  5000.0       0.0  1500.0 /       5000.0  1500.0 / 'A'  0.0 5000.0  4000.0  2000.0  2.0 / 1400.0  2000.0 1000.0                                ! RMAX (km) 1                                      ! NSD 500.0 /                               ! SD(1:NSD) 1                                      ! NRD 2500.0 /                              ! RD(1:NRD)</pre>	
Field 与 Fields 声场计算时的.flp 配置文件与 Pekeris 问题相同。	

计算后生成的打印文件如下：

SCHOLTE 问题回显的输出文件：Scholte.prt

KRAKENC-Scholte waveguide

Frequency = 10.00 Hz

NMedia = 1

N2-Linear approximation to SSP

Attenuation units: dB/m

VACUUM

z (m)	alphaR (m/s)	betaR	rho (g/cm <sup>3</sup> )	alphaI	betaI
-------	--------------	-------	--------------------------	--------	-------

( # mesh points = 500 RMS rough = 0.00 )

0.00	1500.00	0.00	1.00	0.0000	0.0000
------	---------	------	------	--------	--------

5000.00	1500.00	0.00	1.00	0.0000	0.0000
---------	---------	------	------	--------	--------

( RMS rough = 0.00 )

ACOUSTO-ELASTIC half-space

5000.00	4000.00	2000.00	2.00	0.0000	0.0000
---------	---------	---------	------	--------	--------

cLow = 1400.0 m/s cHigh = 2000.0 m/s

RMax = 1000.0000000000000

---

Number of source depths = 1

Source depths (m)

500.000

Number of receiver depths = 1

Receiver depths (m)

2500.00

Mesh multiplier CPU seconds

Max. number of restarts in root finder, MaxTries = 1

1 0.00 s

Max. number of restarts in root finder, MaxTries = 1

2 0.156E-01s

Max. number of restarts in root finder, MaxTries = 1

4 0.156E-01s

I	k (1/m)	alpha (1/m)	Phase Speed (m/s)	Group Speed (m/s)
1	0.4400982929E-01	0.000000000	1427.677728	1974.154010
2	0.4188306870E-01	0.000000000	1500.173101	1499.842178
3	0.4186856672E-01	0.000000000	1500.692715	1499.368398
4	0.4184439022E-01	0.000000000	1501.559773	1498.577737

5	0.4181052921E-01	0.000000000	1502.775838	1497.468711
6	0.4176696933E-01	0.000000000	1504.343123	1496.039363
7	0.4171369148E-01	0.000000000	1506.264510	1494.287358
8	0.4165067147E-01	0.000000000	1508.543581	1492.210092
9	0.4157787955E-01	0.000000000	1511.184643	1489.804801
10	0.4149527997E-01	0.000000000	1514.192774	1487.068659
11	0.4140283053E-01	0.000000000	1517.573853	1483.998861
12	0.4130048217E-01	0.000000000	1521.334613	1480.592695
13	0.4118817854E-01	0.000000000	1525.482682	1476.847594
14	0.4106585562E-01	0.000000000	1530.026639	1472.761174
15	0.4093344142E-01	0.000000000	1534.976071	1468.331274
16	0.4079085559E-01	0.000000000	1540.341632	1463.555974
17	0.4063800914E-01	0.000000000	1546.135118	1458.433637
18	0.4047480418E-01	0.000000000	1552.369538	1452.962941
19	0.4030113364E-01	0.000000000	1559.059197	1447.142934
20	0.4011688100E-01	0.000000000	1566.219793	1440.973114
21	0.3992192010E-01	0.000000000	1573.868514	1434.453527
22	0.3971611492E-01	0.000000000	1582.024153	1427.584922
23	0.3949931943E-01	0.000000000	1590.707232	1420.368944
24	0.3927137754E-01	0.000000000	1599.940135	1412.808407
25	0.3903212305E-01	0.000000000	1609.747258	1404.907659
26	0.3878137986E-01	0.000000000	1620.155170	1396.673079
27	0.3851896232E-01	0.000000000	1631.192776	1388.113734
28	0.3824467597E-01	0.000000000	1642.891500	1379.242285
29	0.3795831866E-01	0.000000000	1655.285463	1370.076205
30	0.3765968244E-01	0.000000000	1668.411654	1360.639434
31	0.3734855636E-01	0.000000000	1682.310086	1350.964636
32	0.3702473075E-01	0.000000000	1697.023903	1341.096247
33	0.3668800348E-01	0.000000000	1712.599409	1331.094546
34	0.3633818906E-01	0.000000000	1729.085975	1321.040940
35	0.3597513167E-01	0.000000000	1746.535736	1311.044410
36	0.3559872314E-01	0.000000000	1765.002998	1301.248251
37	0.3520892659E-01	0.000000000	1784.543272	1291.834198
38	0.3480580404E-01	0.000000000	1805.211941	1283.016111
39	0.3438954040E-01	0.000000000	1827.062890	1275.005703
40	0.3396044231E-01	0.000000000	1850.148255	1267.918647
41	0.3351886824E-01	0.000000000	1874.521915	1261.587962
42	0.3306503451E-01	0.000000000	1900.250643	1255.331905
43	0.3259872074E-01	0.000000000	1927.433091	1248.030163
44	0.3211925126E-01	0.000000000	1956.205410	1239.628028
45	0.3162787575E-01	0.000000000	1986.597316	1241.485345

---

End of environmental file

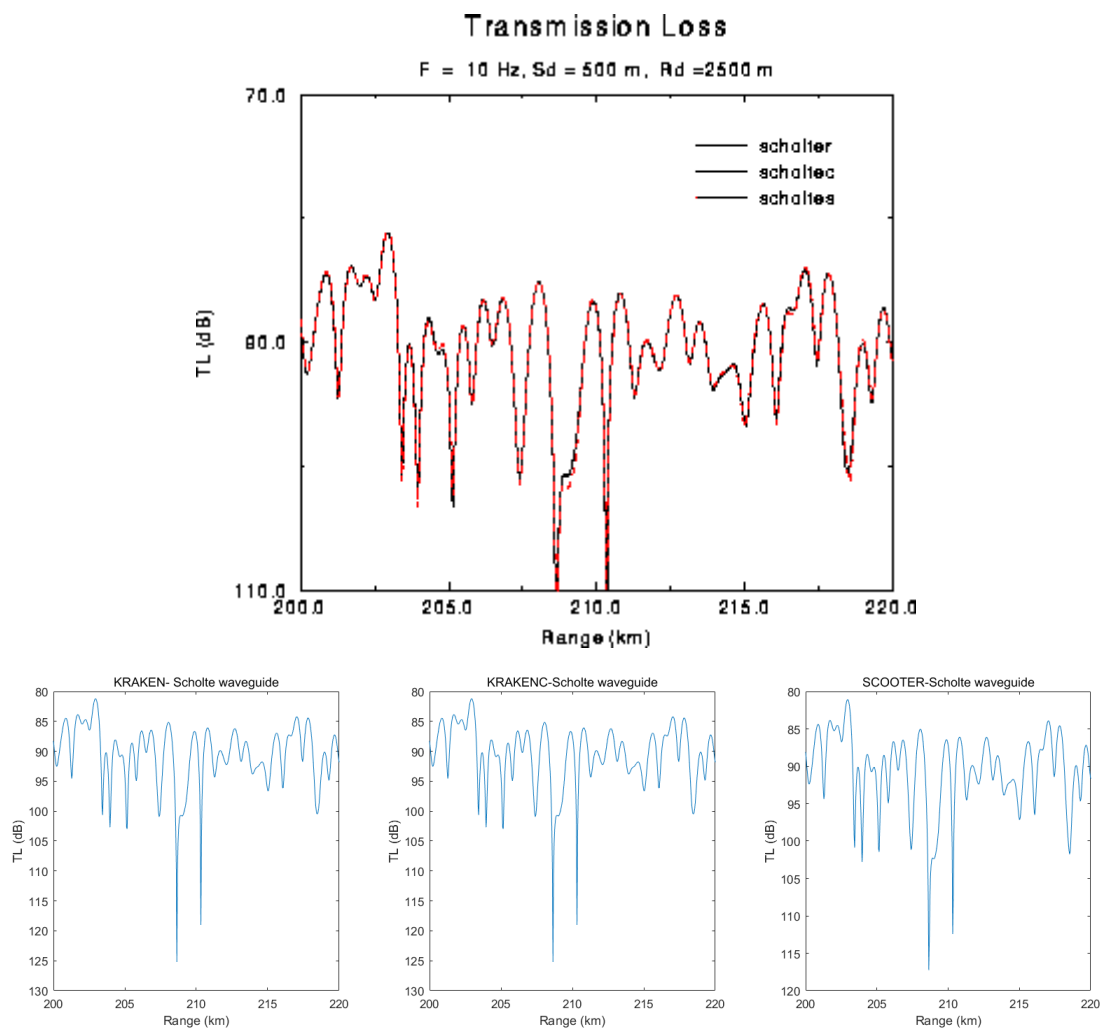


图 5.8: Scholte 问题的传播损失。

# FLUSED (流体沉积层)

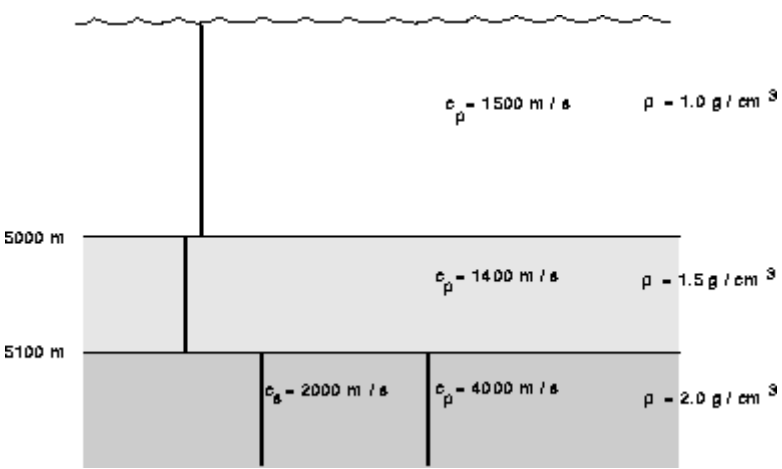


图 5.9：流体沉积层原理图。

本问题是指在海底半空间和海洋之间插入一层流体沉淀层。

流体沉积层问题.env 的环境文件（三个模型相同）：Flused.env
'Fluid sediment problem' 10.0 2 'NVF' 500 0.0 5000.0 0.0 1500.0 / 5000.0 1500.0 / 200 0.0 5100.0 5000.0 1400.0 0.0 1.5 / 5100.0 1400.0 0.0 1.5 / 'A' 0.0 5000.0 4000.0 2000.0 2.0 / 1400.0 2000.0 1000.0 ! RMAX (km) 1 ! NSD 500.0 / ! SD(1:NSD) 1 ! NRD 2500.0 / ! RD(1:NRD)
Field 与 Fields 声场计算时的.flp 配置文件与 Pekeris 问题相同。

计算后生成的打印文件如下：

流体沉积层问题回显的输出文件：Flused.prt

---

KRAKENC-Fluid sediment problem

Frequency = 10.00 Hz

NMedia = 2

N2-Linear approximation to SSP

Attenuation units: dB/mkHz

VACUUM

z (m)	alphaR (m/s)	betaR	rho (g/cm <sup>3</sup> )	alphaI	betaI
-------	--------------	-------	--------------------------	--------	-------

( # mesh points =	500	RMS rough =	0.00	)	
-------------------	-----	-------------	------	---	--

0.00	1500.00	0.00	1.00	0.0000	0.0000
5000.00	1500.00	0.00	1.00	0.0000	0.0000

( # mesh points =	200	RMS rough =	0.00	)	
-------------------	-----	-------------	------	---	--

5000.00	1400.00	0.00	1.50	0.0000	0.0000
5100.00	1400.00	0.00	1.50	0.0000	0.0000

( RMS rough =	0.00	)			
---------------	------	---	--	--	--

ACOUSTO-ELASTIC half-space

5000.00	4000.00	2000.00	2.00	0.0000	0.0000
---------	---------	---------	------	--------	--------

cLow = 1400.0 m/s cHigh = 2000.0 m/s

RMax = 1000.0000000000000

---

Number of source depths = 1

Source depths (m)

500.000

Number of receiver depths = 1

Receiver depths (m)

2500.00

Mesh multiplier CPU seconds

Max. number of restarts in root finder, MaxTries = 1

1 0.156E-01s

Max. number of restarts in root finder, MaxTries = 1

2 0.156E-01s

Max. number of restarts in root finder, MaxTries = 1

4 0.00 s

I	k (1/m)	alpha (1/m)	Phase Speed (m/s)	Group Speed (m/s)
1	0.4188346068E-01	0.000000000	1500.159062	1499.859737
2	0.4187012980E-01	0.000000000	1500.636692	1499.437631
3	0.4184788935E-01	0.000000000	1501.434219	1498.729894
4	0.4181670690E-01	0.000000000	1502.553829	1497.730740
5	0.4177653892E-01	0.000000000	1503.998529	1496.433034
6	0.4172733229E-01	0.000000000	1505.772107	1494.829001
7	0.4166902579E-01	0.000000000	1507.879099	1492.910863
8	0.4160155146E-01	0.000000000	1510.324756	1490.671330
9	0.4152483561E-01	0.000000000	1513.115035	1488.103901
10	0.4143879960E-01	0.000000000	1516.256592	1485.203007
11	0.4134336028E-01	0.000000000	1519.756804	1481.964022
12	0.4123843012E-01	0.000000000	1523.623787	1478.383176
13	0.4112391723E-01	0.000000000	1527.866441	1474.457439
14	0.4099972512E-01	0.000000000	1532.494496	1470.184380
15	0.4086575242E-01	0.000000000	1537.518566	1465.562036
16	0.4072189248E-01	0.000000000	1542.950223	1460.588815
17	0.4056803298E-01	0.000000000	1548.802061	1455.263412
18	0.4040405548E-01	0.000000000	1555.087783	1449.584778
19	0.4022983500E-01	0.000000000	1561.822291	1443.552110
20	0.4004523962E-01	0.000000000	1569.021778	1437.164892
21	0.3985013007E-01	0.000000000	1576.703839	1430.422972
22	0.3964435943E-01	0.000000000	1584.887585	1423.326693
23	0.3942777282E-01	0.000000000	1593.593769	1415.877082
24	0.3920020727E-01	0.000000000	1602.844919	1408.076123
25	0.3896149169E-01	0.000000000	1612.665490	1399.927125
26	0.3871144699E-01	0.000000000	1623.082007	1391.435238
27	0.3844988658E-01	0.000000000	1634.123236	1382.608158
28	0.3817661723E-01	0.000000000	1645.820338	1373.457105
29	0.3789144053E-01	0.000000000	1658.207030	1363.998197
30	0.3759415522E-01	0.000000000	1671.319723	1354.254367
31	0.3728456086E-01	0.000000000	1685.197616	1344.258090
32	0.3696246329E-01	0.000000000	1699.882732	1334.055245
33	0.3662768288E-01	0.000000000	1715.419817	1323.710597
34	0.3628006674E-01	0.000000000	1731.856050	1313.315453
35	0.3591950651E-01	0.000000000	1749.240432	1302.998013
36	0.3554596369E-01	0.000000000	1767.622721	1292.936208
37	0.3515950373E-01	0.000000000	1787.051761	1283.370269
38	0.3476033671E-01	0.000000000	1807.573200	1274.604905
39	0.3434885122E-01	0.000000000	1829.227204	1266.973326
40	0.3392560097E-01	0.000000000	1852.048343	1260.703526
41	0.3349115770E-01	0.000000000	1876.072892	1255.608611
42	0.3304572535E-01	0.000000000	1901.360990	1250.657475



43	0.3258859158E-01	0.000000000	1928.032174	1244.025357
44	0.3211807600E-01	0.000000000	1956.276991	1235.089052
45	0.3163420400E-01	0.000000000	1986.199908	1234.679589

---

End of environmental file

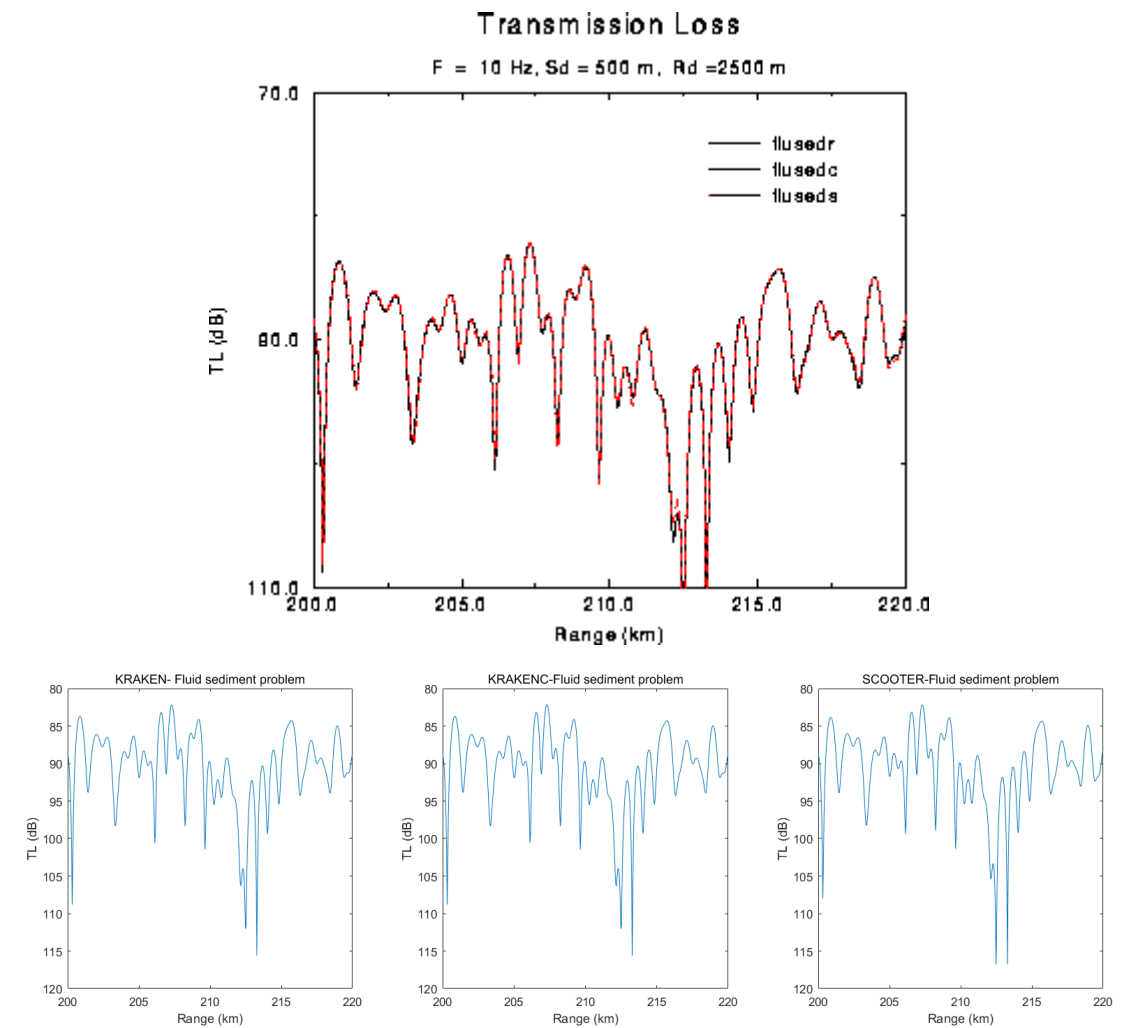


图 5.10：流体沉积层问题的传播损失。

# ELSED（弹性沉积层）

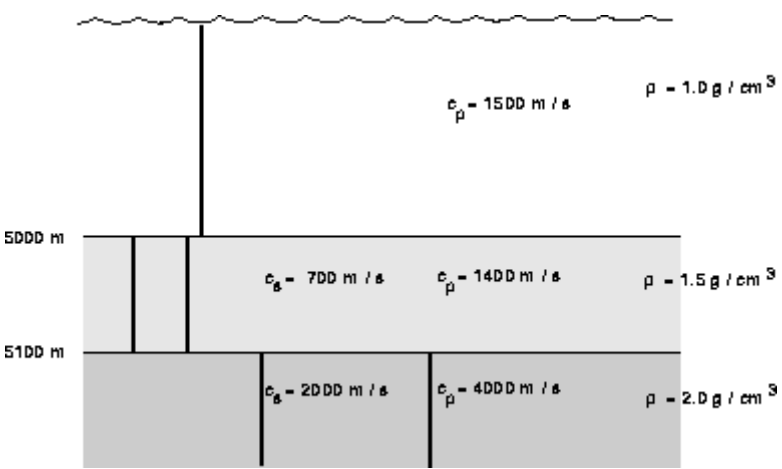


图 5.11：弹性沉积层原理图。

本算例对前一问题(FLUSED)作了修改，在沉积层中包含了剪切特性。本问题中有几个界面模式，它们的相速度小于 1300m/s，在计算时已被排除在外。

弹性沉积层.env 环境文件（三个模型相同）：Elsed.env	
<pre>'Elastic sediment problem' 10.0 2 'NVF' 500  0.0  5000.0       0.0  1500.0 /       5000.0  1500.0 / 200 0.0 5100.0       5000.0 1400.0  700.0 1.5 /       5100.0 1400.0  700.0 1.5 / 'A'  0.0 5000.0  4000.0  2000.0  2.0 / 1300.0  2000.0 1000.0                                ! RMAX (km) 1                                      ! NSD 500.0 /                               ! SD(1:NSD) 1                                      ! NRD 2500.0 /                              ! RD(1:NRD)</pre>	
Field 与 Fields 声场计算时的.flp 配置文件与 Pekeris 问题相同。	

计算后生成的打印文件如下：

弹性沉积层问题回显的输出文件: Elsed.prt

---

KRAKENC-Elastic sediment problem

Frequency = 10.00 Hz

NMedia = 2

N2-Linear approximation to SSP

Attenuation units: dB/mkHz

VACUUM

z (m)	alphaR (m/s)	betaR	rho (g/cm <sup>3</sup> )	alphaI	betaI
-------	--------------	-------	--------------------------	--------	-------

( # mesh points = 500 RMS rough = 0.00 )

0.00	1500.00	0.00	1.00	0.0000	0.0000
5000.00	1500.00	0.00	1.00	0.0000	0.0000

( # mesh points = 200 RMS rough = 0.00 )

5000.00	1400.00	700.00	1.50	0.0000	0.0000
5100.00	1400.00	700.00	1.50	0.0000	0.0000

( RMS rough = 0.00 )

ACOUSTO-ELASTIC half-space

5000.00	4000.00	2000.00	2.00	0.0000	0.0000
---------	---------	---------	------	--------	--------

cLow = 1300.0 m/s cHigh = 2000.0 m/s

RMax = 1000.0000000000000

---

Number of source depths = 1

Source depths (m)

500.000

Number of receiver depths = 1

Receiver depths (m)

2500.00

Mesh multiplier CPU seconds

Max. number of restarts in root finder, MaxTries = 1

1 0.312E-01s

Max. number of restarts in root finder, MaxTries = 1

2 0.156E-01s

I	k (1/m)	alpha (1/m)	Phase Speed (m/s)	Group Speed (m/s)
1	0.4271788618E-01	0.000000000	1470.855857	72355.90487
2	0.4188323798E-01	0.000000000	1500.167038	1499.881423
3	0.4186924441E-01	0.000000000	1500.668425	1499.523202
4	0.4184591718E-01	0.000000000	1501.504981	1498.918497
5	0.4181324891E-01	0.000000000	1502.678091	1498.057778
6	0.4177122866E-01	0.000000000	1504.189728	1496.930969
7	0.4171984138E-01	0.000000000	1506.042473	1495.529456
8	0.4165906753E-01	0.000000000	1508.239545	1493.847522
9	0.4158888289E-01	0.000000000	1510.784823	1491.883057
10	0.4150925843E-01	0.000000000	1513.682861	1489.637645
11	0.4142016032E-01	0.000000000	1516.938916	1487.116226
12	0.4132155011E-01	0.000000000	1520.558955	1484.326583
13	0.4121338489E-01	0.000000000	1524.549688	1481.278788
14	0.4109561752E-01	0.000000000	1528.918577	1477.984718
15	0.4096819680E-01	0.000000000	1533.673873	1474.457635
16	0.4083106766E-01	0.000000000	1538.824642	1470.711803
17	0.4068417123E-01	0.000000000	1544.380804	1466.762062
18	0.4052744476E-01	0.000000000	1550.353185	1462.623259
19	0.4036082144E-01	0.000000000	1556.753575	1458.309442
20	0.4018422979E-01	0.000000000	1563.594808	1453.832682
21	0.3999759286E-01	0.000000000	1570.890861	1449.201445
22	0.3980082677E-01	0.000000000	1578.656982	1444.418450
23	0.3959383877E-01	0.000000000	1586.909858	1439.478063
24	0.3937652458E-01	0.000000000	1595.667818	1434.363454
25	0.3914876508E-01	0.000000000	1604.951087	1429.043952
26	0.3891042253E-01	0.000000000	1614.782081	1423.473331
27	0.3866133664E-01	0.000000000	1625.185742	1417.589957
28	0.3840132111E-01	0.000000000	1636.189883	1411.319681
29	0.3813016132E-01	0.000000000	1647.825524	1404.582004
30	0.3784761400E-01	0.000000000	1660.127190	1397.299201
31	0.3755340932E-01	0.000000000	1673.133125	1389.407071
32	0.3724725578E-01	0.000000000	1686.885430	1380.865167
33	0.3692884747E-01	0.000000000	1701.430111	1371.664185
34	0.3659787314E-01	0.000000000	1716.817063	1361.828953
35	0.3625402627E-01	0.000000000	1733.100004	1351.416643
36	0.3589701555E-01	0.000000000	1750.336403	1340.511026
37	0.3552657515E-01	0.000000000	1768.587397	1329.214013
38	0.3514247440E-01	0.000000000	1787.917730	1317.635220
39	0.3474452577E-01	0.000000000	1808.395759	1305.879167
40	0.3433258869E-01	0.000000000	1830.093665	1294.028742
41	0.3390656461E-01	0.000000000	1853.088150	1282.124870
42	0.3346637756E-01	0.000000000	1877.462028	1270.151249
43	0.3301194133E-01	0.000000000	1903.306820	1258.064531

44	0.3254315545E-01	0.000000000	1930.724056	1246.019037
45	0.3206016806E-01	0.000000000	1959.810471	1235.508210
46	0.3156608684E-01	0.000000000	1990.485973	1241.075278

---

End of environmental file

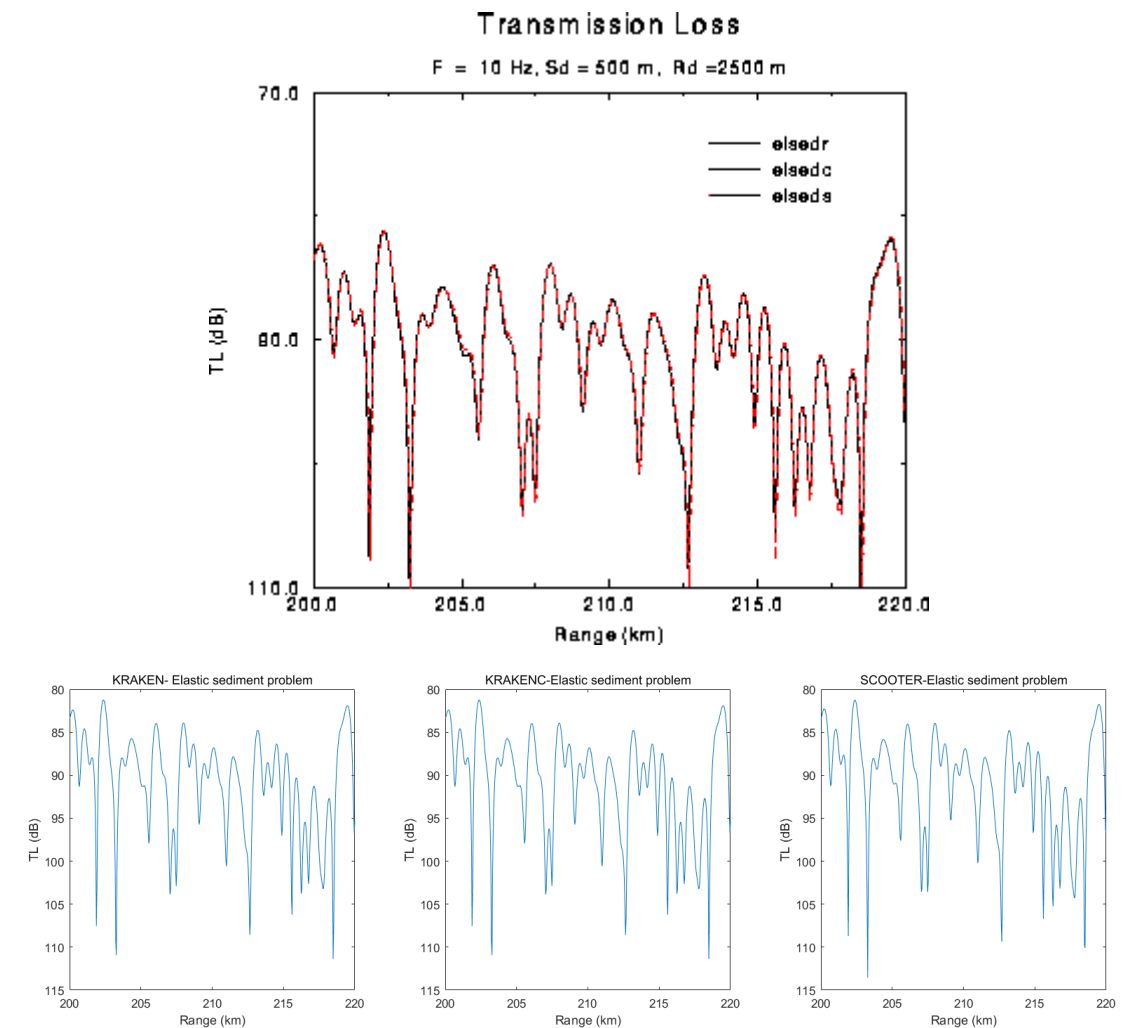


图 5.12：弹性沉积层问题的传播损失。

ATTEN (体积衰减)

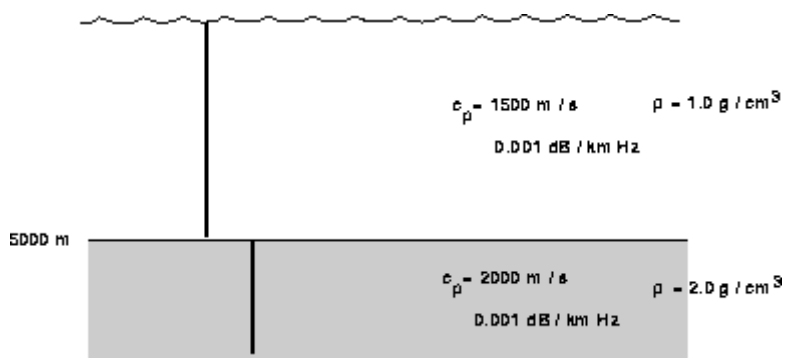


图 5.13：体积衰减原理图。

对海洋和海底半空间均添上体积衰减。

体积衰减问题. env 环境文件（三个模型相同）：Atten. env	
'Attenuation test .001dB/kmHz'	
10.0	
1	
'NVF'	
500 0.0 5000.0	
0.0 1500.0 0.0 1.0 0.001 0.0	
5000.0 1500.0 0.0 1.0 0.001 0.0	
'A' 0.0	
5000.0 2000.0 0.0 2.0 0.001 0.0	
1400.0 2000.0	
1000.0 ! RMAX (km)	
1 ! NSD	
500.0 / ! SD(1:NSD)	
1 ! NRD	
2500.0 / ! RD(1:NRD)	
Field 与 Fields 声场计算时的. flp 配置文件与 Pekeris 问题相同。	

计算后生成的打印文件如下：

体积衰减问题回显的输出文件：Atten. prt	
<hr/>	
KRAKENC-Attenuation test .001dB/kmHz	
Frequency =	10.00 Hz
NMedia =	1

N2-Linear approximation to SSP

Attenuation units: dB/mkHz

VACUUM

z (m)	alphaR (m/s)	betaR	rho (g/cm <sup>3</sup> )	alphaI	betaI
( # mesh points = 500 RMS rough = 0.00 )					
0.00	1500.00	0.00	1.00	0.0010	0.0000
5000.00	1500.00	0.00	1.00	0.0010	0.0000

( RMS rough = 0.00 )

ACOUSTO-ELASTIC half-space

5000.00	2000.00	0.00	2.00	0.0010	0.0000
---------	---------	------	------	--------	--------

cLow = 1400.0 m/s cHigh = 2000.0 m/s

RMax = 1000.0000000000000

---

Number of source depths = 1

Source depths (m)

500.000

Number of receiver depths = 1

Receiver depths (m)

2500.00

Mesh multiplier CPU seconds

Max. number of restarts in root finder, MaxTries = 1

1 0.00 s

Max. number of restarts in root finder, MaxTries = 1

2 0.156E-01s

I	k (1/m)	alpha (1/m)	Phase Speed (m/s)	Group Speed (m/s)
1	0.4188332250E-01	-0.1151416388E-05	1500.164011	1499.840670
2	0.4186958029E-01	-0.1151788193E-05	1500.656387	1499.362480
3	0.4184666444E-01	-0.1152408844E-05	1501.478168	1498.564836
4	0.4181455671E-01	-0.1153279803E-05	1502.631094	1497.446760
5	0.4177323158E-01	-0.1154403118E-05	1504.117606	1496.006904
6	0.4172265632E-01	-0.1155781421E-05	1505.940863	1494.243574
7	0.4166279100E-01	-0.1157417930E-05	1508.104752	1492.154756
8	0.4159358845E-01	-0.1159316447E-05	1510.613905	1489.738134
9	0.4151499436E-01	-0.1161481394E-05	1513.473723	1486.991124

10	0.4142694717E-01	-0.1163917767E-05	1516.690400	1483.910890
11	0.4132937806E-01	-0.1166631209E-05	1520.270955	1480.494370
12	0.4122221086E-01	-0.1169628002E-05	1524.223271	1476.738285
13	0.4110536191E-01	-0.1172915099E-05	1528.556134	1472.639154
14	0.4097873990E-01	-0.1176500161E-05	1533.279287	1468.193300
15	0.4084224564E-01	-0.1180391594E-05	1538.403486	1463.396850
16	0.4069577183E-01	-0.1184598598E-05	1543.940568	1458.245729
17	0.4053920269E-01	-0.1189131224E-05	1549.903523	1452.735660
18	0.4037241360E-01	-0.1194000436E-05	1556.306584	1446.862143
19	0.4019527068E-01	-0.1199218187E-05	1563.165318	1440.620448
20	0.4000763032E-01	-0.1204797497E-05	1570.496742	1434.005595
21	0.3980933855E-01	-0.1210752554E-05	1578.319443	1427.012331
22	0.3960023050E-01	-0.1217098809E-05	1586.653721	1419.635117
23	0.3938012964E-01	-0.1223853106E-05	1595.521743	1411.868096
24	0.3914884705E-01	-0.1231033806E-05	1604.947727	1403.705077
25	0.3890618055E-01	-0.1238660941E-05	1614.958142	1395.139505
26	0.3865191376E-01	-0.1246756380E-05	1625.581943	1386.164441
27	0.3838581506E-01	-0.1255344017E-05	1636.850826	1376.772535
28	0.3810763642E-01	-0.1264449986E-05	1648.799531	1366.956011
29	0.3781711218E-01	-0.1274102894E-05	1661.466184	1356.706644
30	0.3751395763E-01	-0.1284334092E-05	1674.892681	1346.015752
31	0.3719786751E-01	-0.1295177963E-05	1689.125138	1334.874200
32	0.3686851435E-01	-0.1306672254E-05	1704.214400	1323.272420
33	0.3652554674E-01	-0.1318858427E-05	1720.216634	1311.200464
34	0.3616858740E-01	-0.1331782029E-05	1737.194002	1298.648113
35	0.3579723127E-01	-0.1345493059E-05	1755.215441	1285.605085
36	0.3541104365E-01	-0.1360046277E-05	1774.357562	1272.061399
37	0.3500955864E-01	-0.1375501348E-05	1794.705661	1258.008063
38	0.3459227827E-01	-0.1391922573E-05	1816.354869	1243.438364
39	0.3415867357E-01	-0.1409377644E-05	1839.411385	1228.350446
40	0.3370818980E-01	-0.1427933602E-05	1863.993689	1212.752855
41	0.3324026214E-01	-0.1447646299E-05	1890.233381	1196.677958
42	0.3275436104E-01	-0.1468525066E-05	1918.274424	1180.220578
43	0.3225014365E-01	-0.1490387692E-05	1948.265836	1163.686827
44	0.3172824616E-01	-0.1511668769E-05	1980.312834	1148.656210

---

End of environmental file



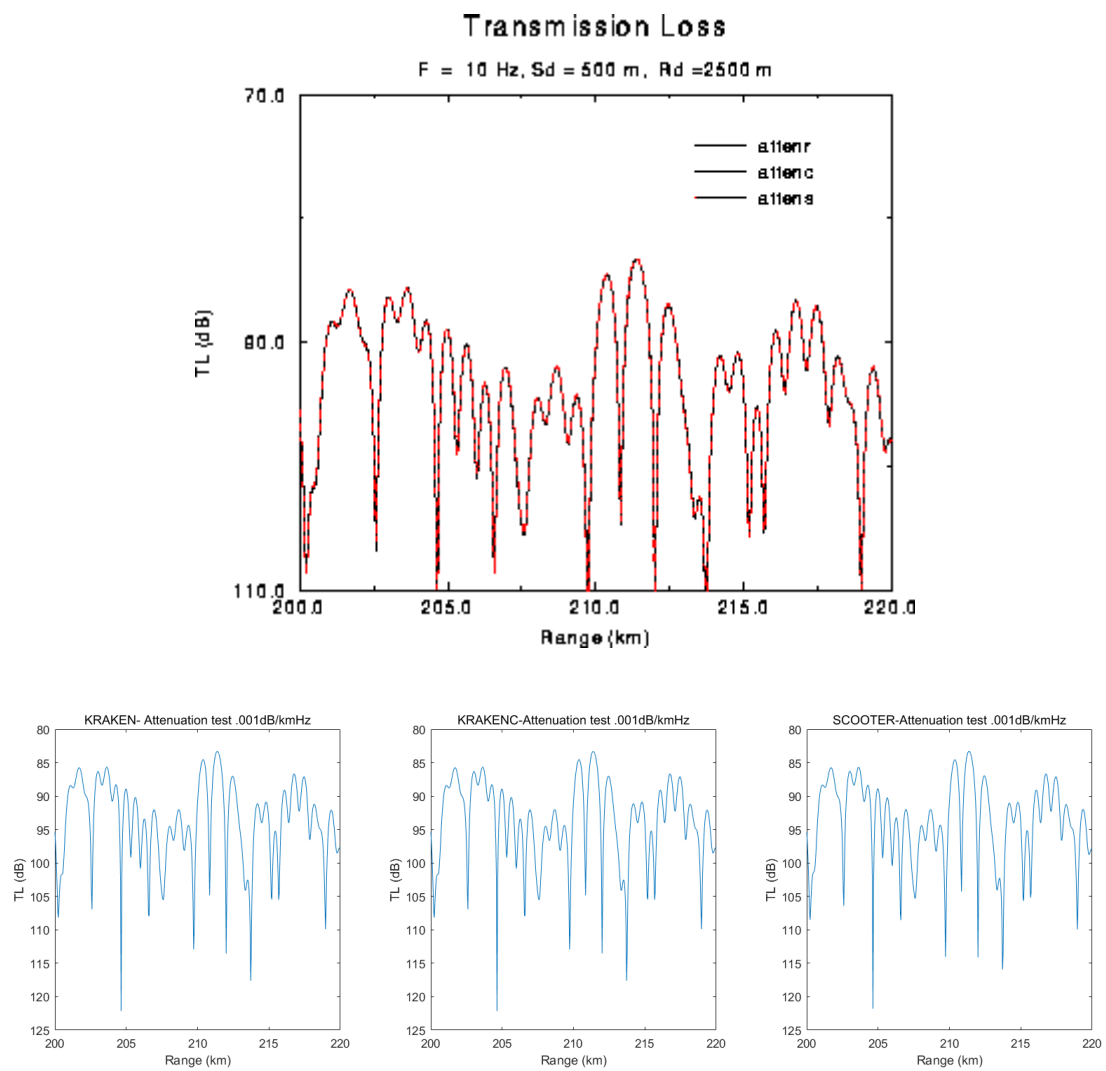


图 5.14: 衰减问题的传播损失。

# NORMAL (归一化)

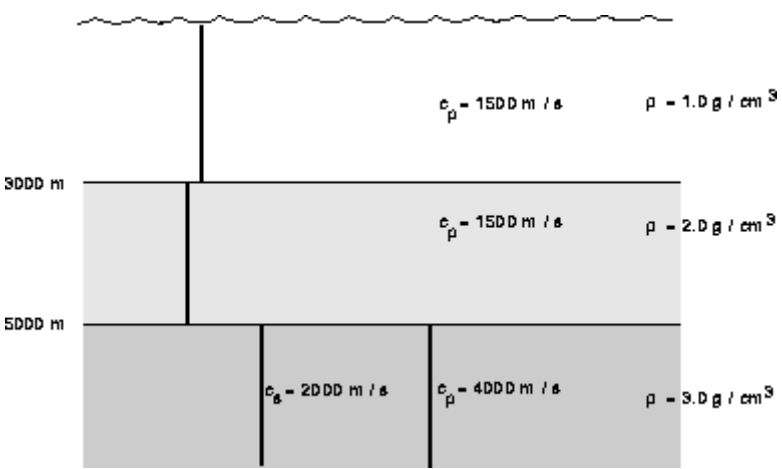


图 5.15：归一化问题原理图。

利用几层密度的变化来检验模式归一化。由于下半空间的剪切特征，存在一个 Scholte 波，相速度约为 1393m/s。在计算中，该波已被排除在外。

归一化问题的.env 环境文件（三个模型相同）：Normal.env	
<pre>'Mode normalization test' 10.0 2 'NVF' 300 0.0 3000.0     0.0 1500.0 /     3000.0 1500.0 / 200 0.0 5000.0     3000.0 1500.0    0.0 2.0 /     5000.0 1500.0    0.0 2.0 / 'A' 0.0 5000.0 4000.0 2000.0 3.0 / 1400.0 2000.0 1000.0          ! RMAX (km) 1              ! NSD 500.0 /         ! SD(1:NSD) 1              ! NRD 2500.0 /        ! RD(1:NRD)</pre>	
Field 与 Fields 声场计算时的.flp 配置文件与 Pekeris 问题相同。	

计算后生成的打印文件如下：

归一化问题回显的输出文件: Normal.prt

---

KRAKENC-Mode normalization test

Frequency = 10.00 Hz

NMedia = 2

N2-Linear approximation to SSP

Attenuation units: dB/mkHz

VACUUM

z (m)	alphaR (m/s)	betaR	rho (g/cm <sup>3</sup> )	alphaI	betaI
-------	--------------	-------	--------------------------	--------	-------

( # mesh points = 300 RMS rough = 0.00 )

0.00	1500.00	0.00	1.00	0.0000	0.0000
3000.00	1500.00	0.00	1.00	0.0000	0.0000

( # mesh points = 200 RMS rough = 0.00 )

3000.00	1500.00	0.00	2.00	0.0000	0.0000
5000.00	1500.00	0.00	2.00	0.0000	0.0000

( RMS rough = 0.00 )

ACOUSTO-ELASTIC half-space

5000.00	4000.00	2000.00	3.00	0.0000	0.0000
---------	---------	---------	------	--------	--------

cLow = 1400.0 m/s cHigh = 2000.0 m/s

RMax = 1000.0000000000000

---

Number of source depths = 1

Source depths (m)

500.000

Number of receiver depths = 1

Receiver depths (m)

2500.00

Mesh multiplier CPU seconds

Max. number of restarts in root finder, MaxTries = 1

1 0.00 s

Max. number of restarts in root finder, MaxTries = 1

2 0.156E-01s

Max. number of restarts in root finder, MaxTries = 1

I	k (1/m)	alpha (1/m)	Phase Speed (m/s)	Group Speed (m/s)
1	0.4188367900E-01	0.000000000	1500.151242	1499.855598
2	0.4186658699E-01	0.000000000	1500.763678	1499.290666
3	0.4184753177E-01	0.000000000	1501.447049	1498.663596
4	0.4180919493E-01	0.000000000	1502.823797	1497.302241
5	0.4176674150E-01	0.000000000	1504.351329	1496.063325
6	0.4171909765E-01	0.000000000	1506.069321	1494.236992
7	0.4164470397E-01	0.000000000	1508.759748	1491.849013
8	0.4158680917E-01	0.000000000	1510.860158	1490.054824
9	0.4149472381E-01	0.000000000	1514.213069	1486.487775
10	0.4140185763E-01	0.000000000	1517.609515	1484.124113
11	0.4131280307E-01	0.000000000	1520.880899	1480.381180
12	0.4117924682E-01	0.000000000	1525.813557	1476.088583
13	0.4108058576E-01	0.000000000	1529.478022	1473.333147
14	0.4093552018E-01	0.000000000	1534.898123	1467.202003
15	0.4078858493E-01	0.000000000	1540.427381	1463.900118
16	0.4065836697E-01	0.000000000	1545.360961	1458.082640
17	0.4046343001E-01	0.000000000	1552.805905	1451.719964
18	0.4032142497E-01	0.000000000	1558.274617	1448.253133
19	0.4012239980E-01	0.000000000	1566.004361	1439.157733
20	0.3991798210E-01	0.000000000	1574.023780	1435.155015
21	0.3974491332E-01	0.000000000	1580.877849	1427.057196
22	0.3948540371E-01	0.000000000	1591.267840	1418.501273
23	0.3929733220E-01	0.000000000	1598.883424	1414.643053
24	0.3904083516E-01	0.000000000	1609.388037	1402.039830
25	0.3877585468E-01	0.000000000	1620.386026	1397.916523
26	0.3855610943E-01	0.000000000	1629.621194	1387.045374
27	0.3822733064E-01	0.000000000	1643.636948	1376.400684
28	0.3799085539E-01	0.000000000	1653.867817	1372.693279
29	0.3766977091E-01	0.000000000	1667.964831	1355.659200
30	0.3734233184E-01	0.000000000	1682.590507	1353.039116
31	0.3706900744E-01	0.000000000	1694.996910	1338.064032
32	0.3666482678E-01	0.000000000	1713.681983	1326.347836
33	0.3637907870E-01	0.000000000	1727.142504	1323.737098
34	0.3598056675E-01	0.000000000	1746.271911	1300.660417
35	0.3559408137E-01	0.000000000	1765.233169	1304.407723
36	0.3525354551E-01	0.000000000	1782.284652	1281.215711
37	0.3477030998E-01	0.000000000	1807.054729	1274.095917
38	0.3443753112E-01	0.000000000	1824.516771	1272.116140
39	0.3393983898E-01	0.000000000	1851.271395	1242.359884
40	0.3351944923E-01	0.000000000	1874.489424	1265.880571
41	0.3307617837E-01	0.000000000	1899.610419	1220.829819

42	0.3254372213E-01	0.000000000	1930.690436	1248.732645
43	0.3214824698E-01	0.000000000	1954.441034	1219.272051
44	0.3155272679E-01	0.000000000	1991.328784	1247.118272

---

End of environmental file

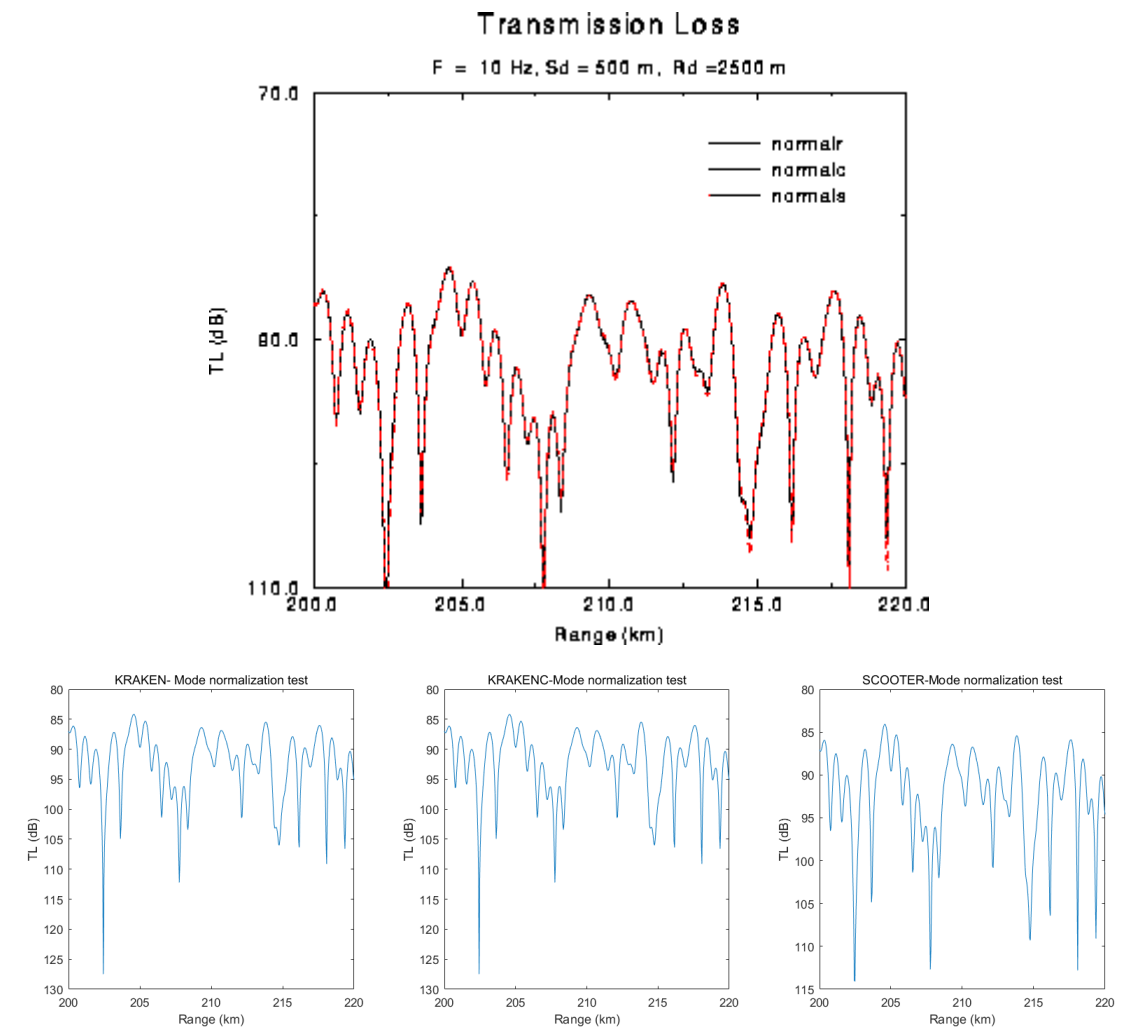


图 5.16：归一化问题的传播损失。

# ICE (冰层)

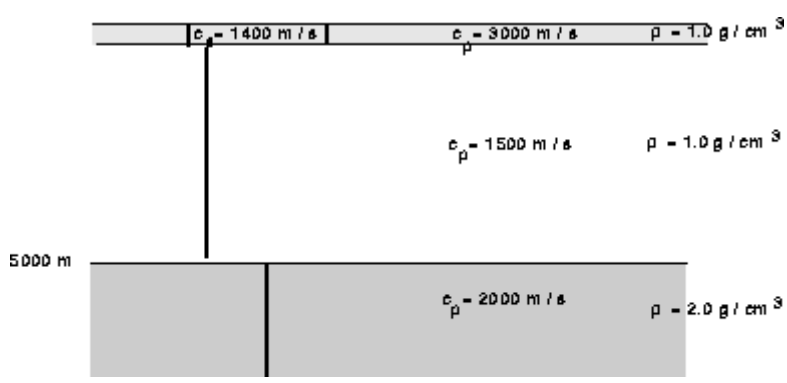


图 5.17: 冰层问题原理图。

本问题基于北极的弹性冰盖场景。即，弹性介质位于声学介质之上。请注意，KRAKEN 的计算结果与 KRAKENC 和 SCOOTER 都不一致，这是因为 KRAKEN 忽略了弹性介质中的衰减。

冰层问题的 .env 环境文件（三个模型相同）：Ice.env	
<pre>'Ice problem' 10.0 2 'NVW' 50 0.0 30.0     0.0 3000.0 1400.0 1.0 0.3 1.0     30.0 3000.0 1400.0 1.0 0.3 1.0 500 0.0 5000.0     30.0 1500.0    0.0 1.0 0.0 0.0     5000.0 1500.0    0.0 1.0 0.0 0.0 'A' 0.0     5000.0 2000.0    0.0 2.0 0.0 0.0 1400.0 2000.0 1000.0          ! RMAX (km) 1              ! NSD 500.0 /        ! SD(1:NSD) 1              ! NRD 2500.0 /       ! RD(1:NRD)</pre>	
Field 与 Fields 声场计算时的 .flp 配置文件与 Pekeris 问题相同。	

计算后生成的打印文件如下：

# 冰层问题回显的输出文件：Ice.prt

KRAKENC-Ice problem

Frequency = 10.00 Hz

NMedia = 2

N2-Linear approximation to SSP

Attenuation units: dB/wavelength

VACUUM

z (m)	alphaR (m/s)	betaR	rho (g/cm <sup>3</sup> )	alphaI	betaI
-------	--------------	-------	--------------------------	--------	-------

( # mesh points = 50 RMS rough = 0.00 )

0.00	3000.00	1400.00	1.00	0.3000	1.0000
------	---------	---------	------	--------	--------

30.00	3000.00	1400.00	1.00	0.3000	1.0000
-------	---------	---------	------	--------	--------

( # mesh points = 500 RMS rough = 0.00 )

30.00	1500.00	0.00	1.00	0.0000	0.0000
-------	---------	------	------	--------	--------

5000.00	1500.00	0.00	1.00	0.0000	0.0000
---------	---------	------	------	--------	--------

( RMS rough = 0.00 )

ACOUSTO-ELASTIC half-space

5000.00	2000.00	0.00	2.00	0.0000	0.0000
---------	---------	------	------	--------	--------

cLow = 1400.0 m/s cHigh = 2000.0 m/s

RMax = 1000.0000000000000

Number of source depths = 1

Source depths (m)

500.000

Number of receiver depths = 1

Receiver depths (m)

2500.00

Mesh multiplier CPU seconds

Max. number of restarts in root finder, MaxTries = 1

1 0.156E-01s

Max. number of restarts in root finder, MaxTries = 1

2 0.312E-01s

I	k (1/m)	alpha (1/m)	Phase Speed (m/s)	Group Speed (m/s)
1	0.4188333132E-01	-0.1636049540E-08	1500.163695	1499.843485
2	0.4186961546E-01	-0.6538272226E-08	1500.655126	1499.373721
3	0.4184674348E-01	-0.1468895863E-07	1501.475332	1498.590059
4	0.4181469710E-01	-0.2605865449E-07	1502.626049	1497.491423
5	0.4177345072E-01	-0.4060639476E-07	1504.109715	1496.076338
6	0.4172297150E-01	-0.5827993429E-07	1505.929487	1494.342941
7	0.4166321936E-01	-0.7901611505E-07	1508.089246	1492.289014
8	0.4159414697E-01	-0.1027413506E-06	1510.593621	1489.912006
9	0.4151569977E-01	-0.1293722289E-06	1513.448007	1487.209063
10	0.4142781593E-01	-0.1588163082E-06	1516.658594	1484.177051
11	0.4133042630E-01	-0.1909730262E-06	1520.232398	1480.812579
12	0.4122345429E-01	-0.2257348295E-06	1524.177295	1477.112017
13	0.4110681578E-01	-0.2629884594E-06	1528.502072	1473.071512
14	0.4098041889E-01	-0.3026165804E-06	1533.216467	1468.686994
15	0.4084416379E-01	-0.3444991372E-06	1538.331238	1463.954188
16	0.4069794244E-01	-0.3885158118E-06	1543.858223	1458.868605
17	0.4054163819E-01	-0.4345477266E-06	1549.810414	1453.425551
18	0.4037512551E-01	-0.4824800212E-06	1556.202050	1447.620111
19	0.4019826945E-01	-0.5322044473E-06	1563.048706	1441.447146
20	0.4001092521E-01	-0.5836222744E-06	1570.367412	1434.901278
21	0.3981293755E-01	-0.6366475031E-06	1578.176767	1427.976882
22	0.3960414018E-01	-0.6912104064E-06	1586.497088	1420.668064
23	0.3938435506E-01	-0.7472617158E-06	1595.350564	1412.968650
24	0.3915339165E-01	-0.8047767746E-06	1604.761438	1404.872171
25	0.3891104602E-01	-0.8637611123E-06	1614.756207	1396.371842
26	0.3865709998E-01	-0.9242563086E-06	1625.363856	1387.460554
27	0.3839132001E-01	-0.9863471753E-06	1636.616117	1378.130855
28	0.3811345613E-01	-0.1050170371E-05	1648.547769	1368.374948
29	0.3782324070E-01	-0.1115924959E-05	1661.196976	1358.184685
30	0.3752038705E-01	-0.1183885589E-05	1674.605675	1347.551579
31	0.3720458801E-01	-0.1254419227E-05	1688.820020	1336.466829
32	0.3687551437E-01	-0.1328006784E-05	1703.890892	1324.921374
33	0.3653281315E-01	-0.1405271520E-05	1719.874482	1312.905988
34	0.3617610587E-01	-0.1487016961E-05	1736.832961	1300.411448
35	0.3580498680E-01	-0.1574278340E-05	1754.835253	1287.428814
36	0.3541902130E-01	-0.1668393478E-05	1773.957912	1273.949908
37	0.3501774457E-01	-0.1771102029E-05	1794.286121	1259.968149
38	0.3460066128E-01	-0.1884686482E-05	1815.914805	1245.480069
39	0.3416724722E-01	-0.2012174988E-05	1838.949818	1230.488197
40	0.3371695541E-01	-0.2157634453E-05	1863.509095	1215.007064
41	0.3324923303E-01	-0.2326584852E-05	1889.723381	1199.077232
42	0.3276356815E-01	-0.2526511779E-05	1917.735357	1182.804514



43	0.3225964097E-01	-0.2766941176E-05	1947.692261	1166.507337
44	0.3173809106E-01	-0.3051486872E-05	1979.698557	1151.741326
End of environmental file				

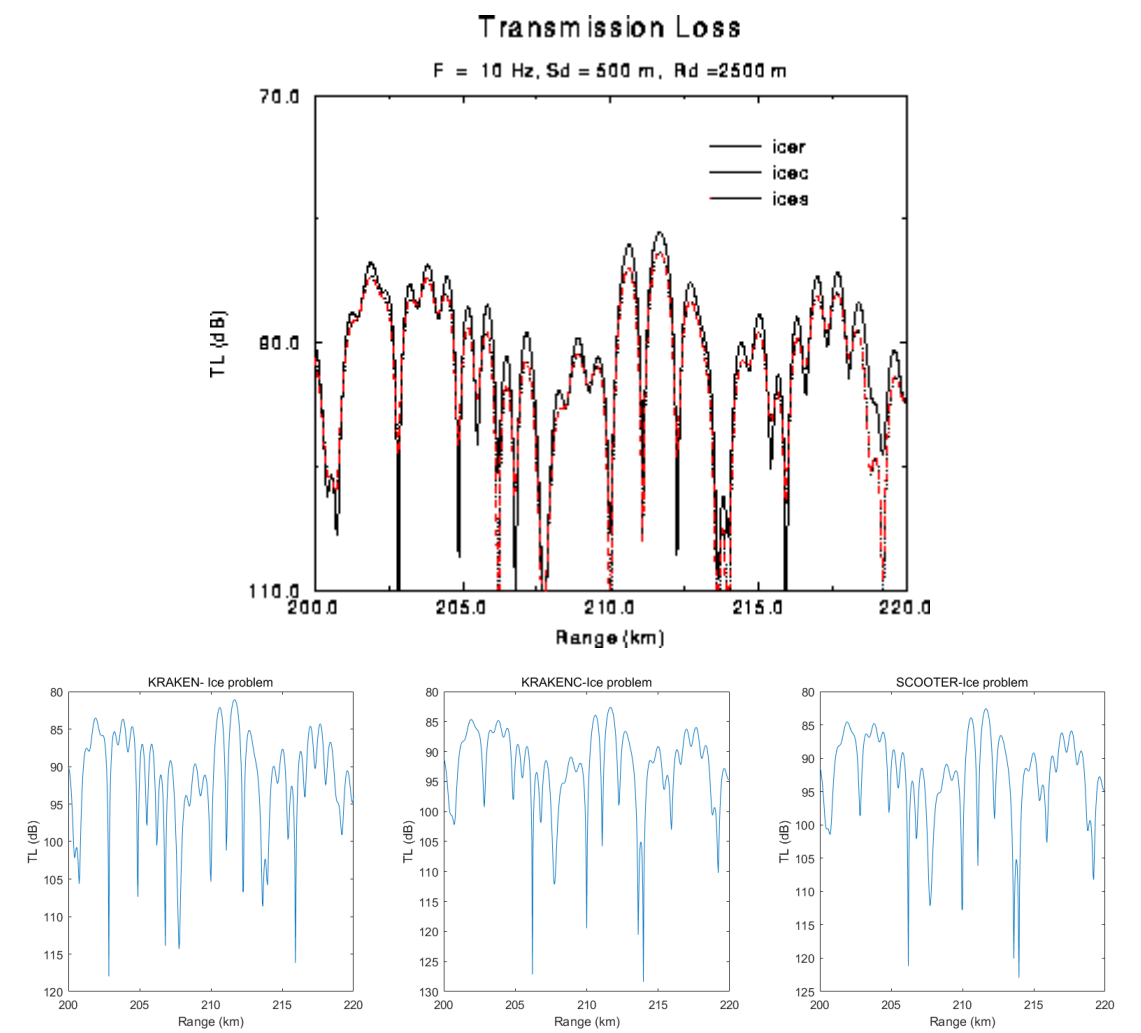


图 5.18: 冰层问题的传播损失。

## 参考文献

- 1 C. L. Pekeris, Theory of propagation of explosive sound in shallow water, Geol. Soc. Amer. Mem. **27** (1948).
- 2 A. O. Williams, Normal-mode methods in propagation of underwater sound, in *Underwater Acoustics*, ed. R. W. B. Stephens, (Wiley-Interscience, New York, 1970).
- 3 F. B. Jensen and M. C. Ferla, SNAP: The SACLANTCEN normal-mode acoustic propagation model, SACLANTCEN Memorandum SM-121 (1979).
- 4 D. F. Gordon, Underwater sound propagation loss program, Naval Ocean Systems Center TR 393 (1979).
- 5 B. A. Leverman, User's guide to the normal mode propagation-loss package PROLOS, Defence Research Establishment Atlantic (informal communication) Research Note 82/3 (1982).
- 6 D. D. Ellis, A two-ended shooting technique for calculating normal modes in underwater acoustic propagation, Defence Research Establishment Atlantic report 85/105 (1985).
- 7 C. L. Bartberger, The computation of complex normal mode eigenvalues in underwater acoustic propagation, in *Computational Acoustics: Algorithms and Applications*, ed. D. Lee et al., Elsevier (1988).
- 8 A. V. Newman and F. Ingenito, A normal mode computer program for calculating sound propagation in shallow water with an arbitrary velocity profile, Naval Research Laboratory Memorandum Report 2381 (1972).
- 9 H. M. Beisner, Numerical calculation of normal modes for underwater sound propagation, IBM J. Res. Develop. **18**, 53--58 (1974).
- 10 R. Gonzalez, The numerical solution of the depth separated acoustic wave equation, Univ. of Texas at Austin, Master's thesis (1979).
- 11 D. C. Stickler, Normal-mode program with both the discrete and branch line contributions, J. Acoust. Soc. Am. **57**, 856--861 (1970).
- 12 A. Nagl, G. L. Zarur and H. Überall, A FORTRAN code for the calculation of sound propagation in a range-dependent ocean, Catholic Univ. report (1977).
- 13 M. B. Porter, A numerical method for computing ocean acoustic modes, Ph.D. dissertation, Northwestern Univ. (1984).

14

M. B. Porter and E. L. Reiss, A numerical method for ocean acoustic normal modes, J. Acoust. Soc. Am. **76**, 244--252 (1984).

15

M. B. Porter and E. L. Reiss, A numerical method for bottom interacting ocean acoustic normal modes, J. Acoust. Soc. Am. **77**, 1760--1767 (1985).

16

M. B. Porter and E. L. Reiss, A Numerical Method for Acoustic Normal Modes for Shear Flows, J. Sound and Vibration, **100**, 91--105 (1985).

17

W. A. Kuperman, M. B. Porter, J. S. Perkins and R. B. Evans, Rapid computation of acoustic fields in three-dimensional ocean environments, J. Acoust. Soc. Am. **89**, 125--133 (1991).

18

J. S. Perkins, W.A. Kuperman, F. Ingenito and J. Glattetre, Modeling ambient noise in three-dimensional ocean environments, J. Acoust. Soc. Am. in preparation, (1992).

19

F. M. Labianca, Normal modes, virtual modes, and alternative representations in the theory of surface-duct sound propagation, J. Acoust. Soc. Am. **53**, 1137--1147 (1973).

20

S. T. McDaniel, Mode coupling due to interaction with the seabed, J. Acoust. Soc. Am. **72**, 916--923 (1982).

21

S. K. Mitchell and K. C. Focke, The role of the seabottom attenuation profile in shallow water acoustic propagation, J. Acoust. Soc. Am. **73**, 465--473 (1983).

22

S. R. Rutherford and K. E. Hawker, An examination of the influence of the range dependence of the ocean bottom on the adiabatic approximation, J. Acoust. Soc. Am. **66**, 1145--1151 (1979).

23

S. R. Rutherford and K. E. Hawker, Effects of density gradients on bottom reflection loss for a class of marine sediments, J. Acoust. Soc. Am. **63**, 750--757 (1978).

24

S. R. Rutherford, An examination of multipath processes in a range dependent ocean environment within the context of adiabatic mode theory, J. Acoust. Soc. Am. **66**, 1482--1486 (1979).

25

D. M. Milder, Ray and wave invariants for SOFAR channel propagation, J. Acoust. Soc. Am. **46**, 1259--1263 (1969).

26

M. C. Ferla, F. B. Jensen and W. A. Kuperman, High-frequency mode calculations in deep water, J. Acoust. Soc. Am. **72**, 505--509 (1982).

27

- 28 N. S. Ageeva and V. D. Krupin, Structure of an infrasonic field in a shallow sea, Sov. Phys.-Acoustics **25**, 192--195 (1979).
- 29 C. A. Boyles, *Acoustic Waveguides*, (Wiley, New York, 1984).
- 30 C. A. Boyles, Coupled mode solution for a cylindrically symmetric oceanic waveguide with range and depth dependent refractive index, J. Acoust. Soc. Am. **73**, 800--805 (1983).
- 31 R. H. Ferris, Comparison of measured and calculated normal-mode amplitude functions for acoustic waves in shallow water, J. Acoust. Soc. Am. **52**, 505--509 (1972).
- 32 F. Ingenito, Measurement of mode attenuation coefficients in shallow water, J. Acoust. Soc. Am. **53**, 858--863 (1973).
- 33 C. T. Tindle, Virtual modes and mode amplitudes near cutoff, J. Acoust. Soc. Am. **65**, 1423--1428 (1979).
- 34 C. T. Tindle, K. M. Guthrie, G. E. J. Bold, M. D. Johns, K. O. Dixon and T. G. Birdsall, Measurements of the frequency dependence of normal modes, J. Acoust. Soc. Am. **64**, 1178--1185 (1978).
- 35 C. T. Tindle, Attenuation parameters from normal mode measurements, J. Acoust. Soc. Am. **71**, 1145--1148 (1982).
- 36 A. O. Williams, Hidden depths: Acceptable ignorance about ocean bottoms, J. Acoust. Soc. Am. **59**, 1175--1179 (1976).
- 37 H. R. Krol, Some numerical considerations concerning eigenvalue problems in the theories of underwater sound and internal waves, SACLANTCEN Memorandum SM-40 (1974).
- 38 L. B. Dozier and F. D. Tappert, Statistics of normal mode amplitudes in a random ocean, J. Acoust. Soc. Am. **64**, 533--547 (1978).
- 39 I. Tolstoy, Guided waves in a fluid with continuously variable velocity overlying an elastic solid, J. Acoust. Soc. Am. **32**, 81--87 (1960).
- 40 I. Tolstoy and J. May, A numerical solution for the problem of long-range sound propagation in continuously stratified media, with applications to the deep ocean, J. Acoust. Soc. Am. **32**, 655--660 (1960).
- 41 E. L. Ince, *Ordinary Differential Equations*, (Dover, New York, 1926).

- 42 I. Stakgold, *Green's Functions and Boundary Value Problems*, (Wiley, New York, 1979).
- 43 W. M. Ewing, W. S. Jardetzky and F. Press, *Elastic Waves in Layered Media*,  
(McGraw-Hill, New York, 1957).
- 44 H. P. Buckner, Sound propagation in a channel with lossy boundaries, J. Acoust. Soc. Am.  
48, 1187--1194 (1970).
- 45 H. P. Buckner, Wave propagation in a duct with boundary scattering (with application to  
surface duct), J. Acoust. Soc. Am. 68, 1768--1772 (1980).
- 46 A. Haug, R. D. Graves and H. Überall, Normal-mode theory of underwater sound  
propagation from directional multipole sources, J. Acoust. Soc. Am. 56, 387--391 (1974).
- 47 A. Nagl, H. Überall, A. J. Haug and G. L. Zarur, Adiabatic mode theory of underwater  
sound propagation in a range-dependent environment, J. Acoust. Soc. Am. 63, 739--749  
(1978).
- 48 W. H. Munk, Sound channel in an exponentially stratified ocean with applications to  
SOFAR, J. Acoust. Soc. Am. 55, 220--226 (1974).
- 49 C. M. Bender and S.A. Orszag, *Advanced Mathematical Methods for Scientists and  
Engineers* (McGraw-Hill, New York, 1978).
- 50 W. A. Kuperman and F. Ingenito, Attenuation of the coherent component of sound  
propagating in shallow water with rough boundaries, J. Acoust. Soc. Am. 61, 1178--1187  
(1977).
- 51 K. Aki and P. G. Richards, *Quantitative Seismology: Theory and Methods*, (Freeman,  
New York, 1980).
- 52 O. I. Diachok, Effects of sea-ice ridges on sound propagation in the Arctic Ocean, J.  
Acoust. Soc. Am. 59, 1110--1120 (1976).
- 53 S. C. Wales, The NRL FSTFLD program: Operating instructions / User's manual, Naval  
Research Laboratory internal documents, (1986).
- 54 R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, (McGraw-Hill, New York, 1983).
- 55 A. D. Pierce, Extension of the method of normal modes to sound propagation in an  
almost-stratified medium, J. Acoust. Soc. Am. 37, 19--27 (1965).
- H. Weinberg and R. Burridge, Horizontal ray theory for ocean acoustics, J. Acoust. Soc.  
Am. 55, 63--79 (1974).

56

E. A. Lord and C. B. Wilson, *The Mathematical Description of Shape and Form*, (Wiley, New York, 1985).

57

J. S. Perkins and R. N. Baer, An approximation to the three-dimensional parabolic-equation method for acoustic propagation, *J. Acoust. Soc. Am.* **72**, 515--522 (1982).

58

O. C. Zienkiewicz, *The Finite Element Method*, McGraw-Hill, London, 1985.

59

M. B. Porter and H. P. Bucker, Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields, *J. Acoust. Soc. Am.* **82**, 1349--1359 (1987).

60

V. Cervený, M. M. Popov and I. Psencík, Computation of wave fields in inhomogeneous media--- Gaussian beam approach, *Geophys. J. R. astr. Soc.* **70**, 109--128 (1982).

61

K. Yomogida, Gaussian Beams for surface waves in laterally slowly-varying media, *Geophys. J. R. astr. Soc.* **82**, 511--533 (1985).

62

J. H. Wilkinson, *The Algebraic Eigenvalue Problem*, Oxford University Press, (1965).

63

R. P. Brent, An algorithm with guaranteed convergence for finding a zero of a function, *Comp. J.* **14**, 422--425 (1971).

64

H. B. Keller, Accurate difference methods for linear ordinary differential systems subject to linear constraints, *SIAM J. Numer. Anal.*, **6**, 8--30 (1969).

65

R. B. Evans, A coupled mode solution for acoustic propagation in a waveguide with stepwise depth variations of a penetrable bottom, *J. Acoust. Soc. Am.* **74**, 188--195 (1983).

66

R. B. Evans and K. E. Gilbert, The periodic extension of stepwise coupled modes, *J. Acoust. Soc. Am.* **77**, 983--988 (1985).

67

M. B. Porter, F. B. Jensen and C. M. Ferla, The problem of energy conservation in one-way models, *J. Acoust. Soc. Am.* **89**, 1058--1067 (1991).

68

E. Ammicht and D. C. Stickler, Uniform asymptotic evaluation of the continuous spectrum contribution for a stratified ocean, *J. Acoust. Soc. Am.* **76**, 186--191 (1984).

69

R. A. Koch, P. J. Vidmar and J. B. Lindberg, Normal mode identification for impedance boundary conditions, *J. Acoust. Soc. Am.* **73**, 1567--1570 (1983).

70

- 71 R. A. Koch, C. Penland, P. J. Vidmar and K. E. Hawker, On the calculation of normal mode group velocities and attenuation, *J. Acoust. Soc. Am.* **73**, 820--825 (1983).
- 72 M. B. Porter and E. L. Reiss, A Note on the Relationship Between Finite-Difference and Shooting Methods for ODE Eigenvalue Problems, *SIAM J. Numerical Analysis* **23**, 1034--1039 (1986).
- 73 D. M. F. Chapman and D. D. Ellis, The group velocity of normal modes, *J. Acoust. Soc. Am.* **74**, 973--979 (1983).
- 74 M. A. Pedersen and D. F. Gordon, Normal-mode and ray theory applied to underwater acoustic conditions of extreme downward refraction, *J. Acoust. Soc. Am.* **51**, 323--368 (1972).
- 75 M. A. Pedersen and D. F. Gordon, Normal-mode theory applied to short-range propagation in an underwater acoustic surface duct, *J. Acoust. Soc. Am.* **37**, 105--118 (1965).
- 76 M. Hall, D. F. Gordon and D. White, Improved methods for determining eigenfunctions in multi-layered normal-mode problems, *J. Acoust. Soc. Am.* **73**, 153--162 (1983).
- 77 K. E. Hawker and T. L. Foreman, A plane wave reflection loss model based on numerical integration, *J. Acoust. Soc. Am.* **64**, 1470--1477 (1978).
- 78 M. D. Duston, G. R. Verma, D. H. Wood and R. P. Gilbert, Direct generation of normal modes by transmutation theory, in *Computational Acoustics: Algorithms and Applications* (Proceedings of the 1st IMACS Symposium on Computational Acoustics, Yale), ed. D. Lee, R. L. Sternberg and M. H. Schultz, (North-Holland, pp. 389--402, 1990).
- 79 R. F. Henrick and J. R. Brannan, The uniform WKB modal approach to pulsed and broadband propagation, Johns Hopkins Univ.-Appl. Phys. Lab. STD-N-139 (1983).
- 80 D. H. Wood, M. D. Duston and G. R. Verma, Bottom interaction effects on normal modes: an algebraic approach, in *Ocean Seismo-Acoustics*, ed. T. Akal and J. Berkson (Plenum Press, New York, 1986).
- M. B. Porter, The time-marched FFP for modeling acoustic pulse propagation, *J. Acoust. Soc. Am.* **87**, 2013--2023 (1990).