

声波在低声速海底上的反射^[*]

Robert S. Winokur 和 Joyce C. Bohn

美国海军海洋局, 华盛顿, D. C. 20390

用爆炸声源进行了海底反射特性的测量, 获得了掠射角 2° 到 85° 之间的海底反射系数。应用一个多层的海底模型对海底反射系数进行了理论计算, 在这个模型中, 把最下层看成为固体的半无限空间。假设这些层是具有吸收的, 而且各层之间有一个相互平行的分界面。对现场采集的底质样品测量了沉积物的声速, 并应用于理论计算中, 表明这一海区的海底是低声速沉积物, 中间夹杂着一些薄的高声速层。在理论预言的一些角度上, 示波器记录到的海底反射信号相对于入射波相位发生反转。将反射系数的理论值与实验值在 1、2、和 4 千赫兹的频率上做了比较, 一般说来, 在整个范围内符合的较好。在贯穿角附近, 发现测得的反射系数随着频率有一个奇异的增加, 这大约可以用下层反射体的存在来解释。

引 论

当研究声波在海水中的传播时, 已经发现海底反射特性随着地区、掠射角、和频率的变化而发生很大的变化。在过去的几年中, 科学研究工作者们^[1-5]已经处理过这类问题。他们通过一个理论的海底模型计算海底反射系数随掠射角的变化。并且将理论予断值与实验测量的反射系数加以比较, 本文给出了这类问题的深海研究结果。在 1、2、和 4 千赫兹的频率上, 将低声速海底反射系数的理论值与实验值进行了比较。

I. 实验现场描述

在加伦比海尤克特恩海区水深约 2400 吋的地方获得了实验资料, 在实验期间从 12 千赫兹的回声测深仪的记录看出, 该海区海底是非常平坦的。实验用了两条船和 1.8 磅 TNT 炸药的炸弹, 一条船为接收船, 在海上漂流, 另一条船为发射船, 航行中在预定的距离上投弹。通过改变声源的爆炸深度以及声源与接收换能器的距离使海底反射信号的掠射角在 2° 到 85° 之间变化。在每个距离上投几枚炸弹, 而且两船之间的距离由雷达测出。图 1 是实验的示意图。源深为 1800 米时可获得较大的、中等的掠射角, 而在较远的距离上, 爆炸深度较深时得到了较小的掠射角。

直达声信号与反射信号由一个校准过的无方向性的换能器接收, 换能器下放深度约 90 米左右, 在感兴趣的频率范围内换能器的频率响应较平坦, 换能器的输出端同时送到三个相互独立的放大通道, 然后用录音机宽带记录。

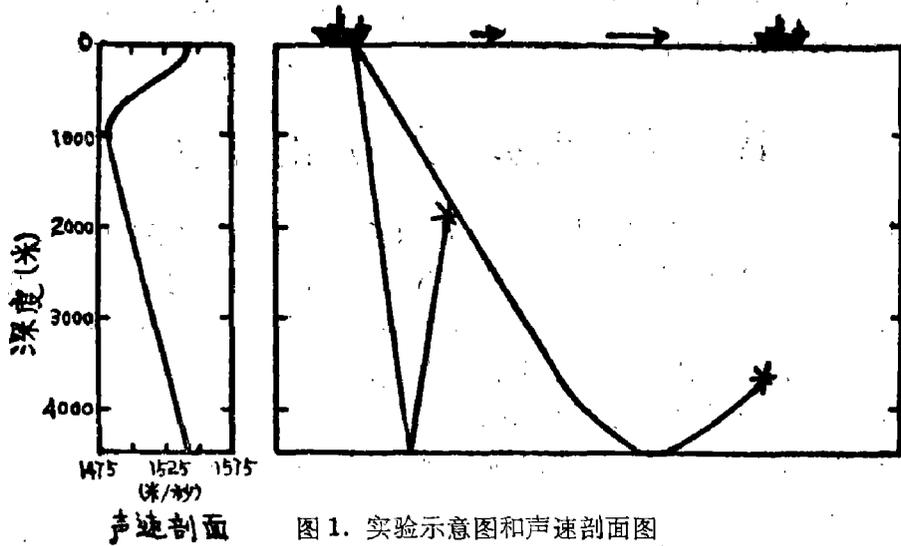


图 1. 实验示意图和声速剖面图

II. 数据分析

记录的信号通过倍频程滤波器进行回放，分析的频率为 1、2、和 4 千赫兹。信号由一个高速示波记录仪来显示，并且确定出海底反射信号最前面几个周期的峰值。在大掠射角情况下做声源级测量，并计算出平均声源级。对直达信号的峰值沿射线路径做球面扩展和海水吸收修正，就得到了距离声源一参考距离的声源级。用实验站位所采集的温度、盐度资料，根据 Wilson 方程^[6]做出声速剖面图。并借助于声线仪确定了海底反射信号的掠射角和声程。这一地区的声速剖面图示于图 1。

本文中，海底反射系数定义为在海底界面上的反射信号的峰值与入射信号的峰值之比，利用测得的声源级和确定的射线路径上经过球面扩展和海水吸收修正了的海底反射信号来确定这个比值。接着 Thorp 给出的低频衰减系数计算海水吸收^[7,8]。把测量的倍频程频带级转变成频谱级，并且对频带所复盖频率的斜率加以修正，就得到了海底反射系数。

III. 理论模型的描述

所使用的海底理论模型在文献 2、9 和 10 中已经描述过，假设一个多层的有吸收的底，其沉积层的厚度、声速、密度、吸收以及反射层的层数为任意值。把海洋看成是一个液态半无限空间，覆盖在一系列有限厚度的液态沉积层之上。沉积次序的最下层被视为半无限固体。就是说，在层内有一个纵波和一个横波传播。进一步假定这些层是有吸收的，而且其分界面是相互平行的。在二层之间的分界面上压力和质点速度连续。为了计算稳

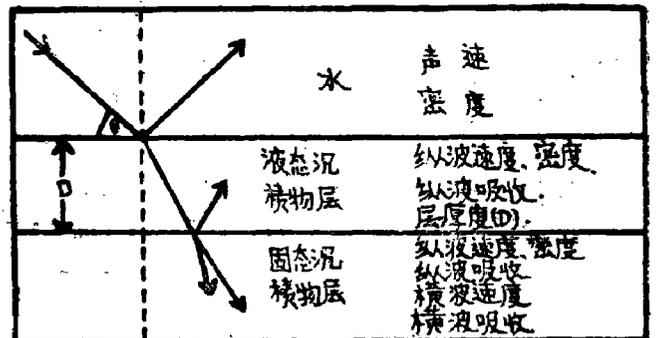


图 2. 理论模型的几何图型和输入参数

态的峰值反射系数和单频平面波的相移，机械的安排了这一海底模型。海底模型的几何图形和需要的输入参量表示在图 2 中。

IV. 声学 and 物理学性质的描述

理论计算的输入参量，由在实验点附近用 13 呎长的采泥管直接采集的泥芯来确定，沉积物的声速是借助于脉冲法^[11]沿着泥芯的长度在 10 厘米长的区间内测得的。沉积物的密度、孔隙度、颗粒大小和其他的物理上以及工程上的特性也在同一个区间内测得。对实验室测得的声速经过修正可以估计出现场值^[12]，这是根据实验室和现场在温度和压力两方面的差别，应用 Wilson 海水声速表^[6,18]做出这一修正的。

经过修正后的沉积物声速(用它近似现场值)和密度随深度的变化由图 3 所示。为了便于比较，靠近海底的海水声速也算在图上。能够看出这属于低声速海底，并在 90、290 和 350—390 厘米的深度上夹杂着薄的高声速层。一般说来，这一海区海底属于高孔隙度的石灰质沉积物，其平均孔隙度大约为 70%，碳酸钙的含量大约为 70%。高孔隙度沉积物的低声速性质其他人也证实过^[12,14,15]，因此并不奇怪。

显而易见，为理论模型选择适当的输入参数时，可以采用许多沉积物分层的组合方式。在判断的时候，下面的一般准则应做为考虑的因素：(1)无论确定哪一种可能的组合，应用一个简单的模型可以满意的预言已测得的反射系数，(2)无论采用哪一种组合，应用一沉积物模型能够预言所得到的三个频率的反射系数，(3)无论采用哪一种组合，应用海底较浅的几层沉积物能够预言穿透较浅的几层信号的反射系数。选取合适的沉积物模型的要求是，海底的结构应使得进入海底的信号能有效的穿透。

对于海底沉积物模型而言，考虑到上述的准则，考虑到使用的反射信号周期的个数以及相应于倍频程带宽滤波器的分辨能力，对所使用的模型层数的选择做些折衷是必要的。例如：

1 千赫兹的信号有效穿透力比 4 千赫兹信号强，所以有必要考虑较深的层。在确定层数时，也应该考虑如下的因素：(1)直到 80—90 厘米声速还没发生第一次显著的增加。(2)只有短的爆炸声脉冲信号最前面的几个周期的峰值有用，因此，实验资料代表了穿透海底浅层的反射。(3)在 80—90 厘米的较高声速层由于较深，对于测得的 2 千赫兹和 4 千赫兹的信号反射性能大概没有多大贡献。(4)在泥芯的 80—90 厘米的层对于 1 千赫兹的小掠射角的反射信号大概没多大贡献，因为在这一层中传播的时间增加了。

基于上述的原因，只有泥芯上

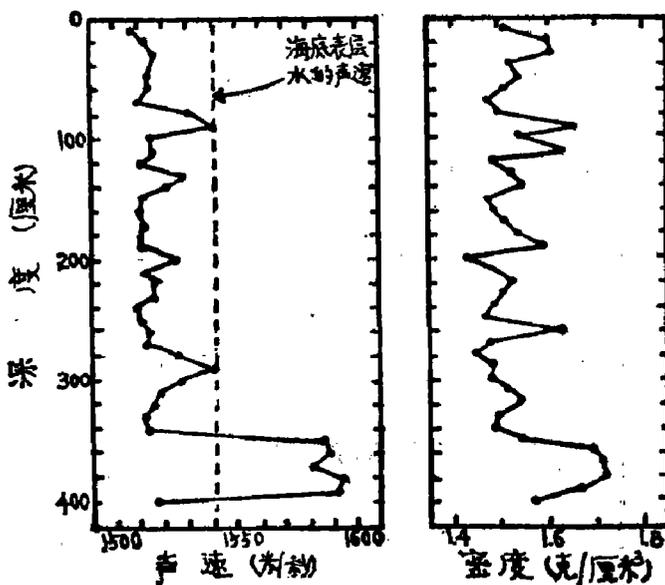


图 3. 沉积物的声速和密度随深度的变化

部 30 厘米厚的沉积物对理论计算有用处。所使用的分层结构代表了测量的密度和声速的配合，并且符合岩石学。这些层的边界对应于所测量的密度—声速(声阻抗)的变化，可以看出它们符合于地质结构的变化。应用图 2 和图 3 所提供的模型及参数进行理论计算。假定所选取的沉积物模型包含一个 10 厘米厚的薄液态沉积物层，覆盖在一个均匀的半无限弹性层上。泥芯上部 10 厘米厚的沉积物是石灰质的泥，里面散布着一些球房虫，从 10 厘米到 30 厘米深的沉积物构成了半无限层的基础，它也是些石灰质的泥，但是包含着石灰质细砂的薄晶片。

所使用的纵波吸收数据从 Shumway^[16] 的吸收与孔隙度关系的高频数据外推得到，并且假设与频率成一次方关系。假定固态层内的横波吸收为零。固态层内的横波声速借助于集合理论来计算，这一理论已被应用到悬浮液中^[17,18]，并且被应用到众所周知的弹性介质的纵波和横波的速度等问题上^[19]。应用碳酸钙占优势的沉积物的压缩系数与水的压缩系数的百分比，计算出集合的容积弹性模量。沉积物的压缩系数由参考文献 19 确定，而水的压缩系数用海底界面水的声速和密度来计算。利用集合的容积弹性模量，测得的沉积物声速、沉积物密度计算出切变模量，最后由切变模量决定出横波的速度。算出的横波速度大约是 206 米/秒，即约为纵波声速的 0.14 倍，这个值与 Langhton 的资料^[20] 给出的 0.5 倍的关系比较起来是相当低的，但是与 Hamilton 计算的是一致的^[18]。

V. 从低声速海底来的反射

从泥芯上部 30 厘米厚的沉积物测得的纵波速度大约比海底界面海水的声速低 2%。对这种低声速海底，声学理论预言到，其反射系数由垂直入射的值逐渐减小，在称为贯穿角的某一角度上变为零^[21]。理论上也预言到，当入射信号的掠射角比贯穿角还小的时候，反射信号的第一个波形相对于入射信号而言有一个 180° 的相位翻转。理论上预言的相位翻转从示波器的记录上可见到，是在 11.3° 和 11.4° 之间发生了翻转。在贯穿角附近发现的相位翻转及第一个波形振幅的减小由图 4 来表示。根据测得的沉积物声速和密度以及海水的声速和密度，理论预言的贯穿角为 11°，这与观察到的 11.3° 非常一致。由于理论计算取决于泥芯的数据，这个角度也可以用来检验实验室测得的并经过修正后的沉积物声速的正确性。

VI. 实验和理论结果的比较

在图 5—7 中，对 1、2、4 千赫兹的反射系数实验值与理论值做了比较，算在图上的是峰值反射系数的绝对值。图 5 表示 1 千赫兹实验值与理论值的比较，在整个范围内符合的很好，在每一个角度上有几个实验数据，理论曲线或者在那些角度上分散的实验数据范围之内，或者在测量值的大约 0.03 倍范围之内。图 6 表示 2 千赫兹的实验值与理论值的比较结果。一般讲，理论值构成了反射系数实验值的下限，在约

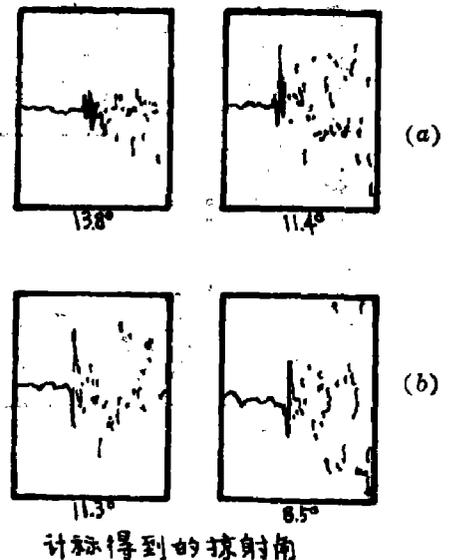


图 4. 在贯穿角(11.3°)附近相位的反转
(a) 在贯穿角之前的海底反射信号。
(b) 在贯穿角之后的海底反射信号—180°的相位反转。

40°至57°之间以及小于11°的那些掠射角上，理论值与实验值符合的最差。意思是说，在2千赫兹的频率上，理论预言的海底反射损失比实际测量值要高，一般说来，在大掠射角的情况下，相当于反射损失的偏差小于3分贝。角与图5进行比较，可以看出，在贯穿角11.3°附近的角度范围内产生了偏差，这种偏差在两条路径上发生，反射系数的实验值开始偏离理论值，而且随频率增加偏离越厉害。

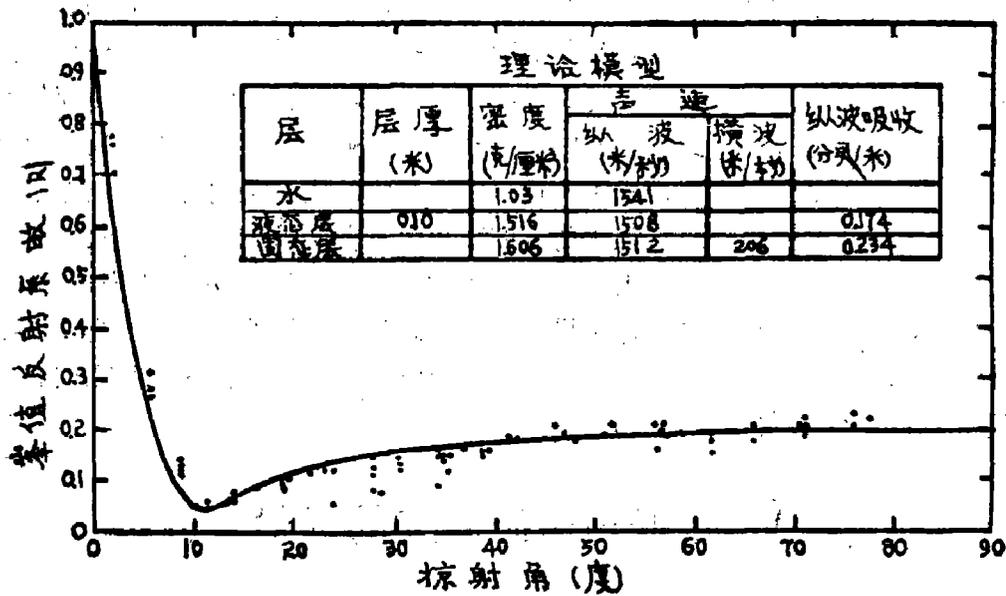


图5. 1千赫反射系数理论值与实验值的比较

—: 理论值。 ·····: 实验值。

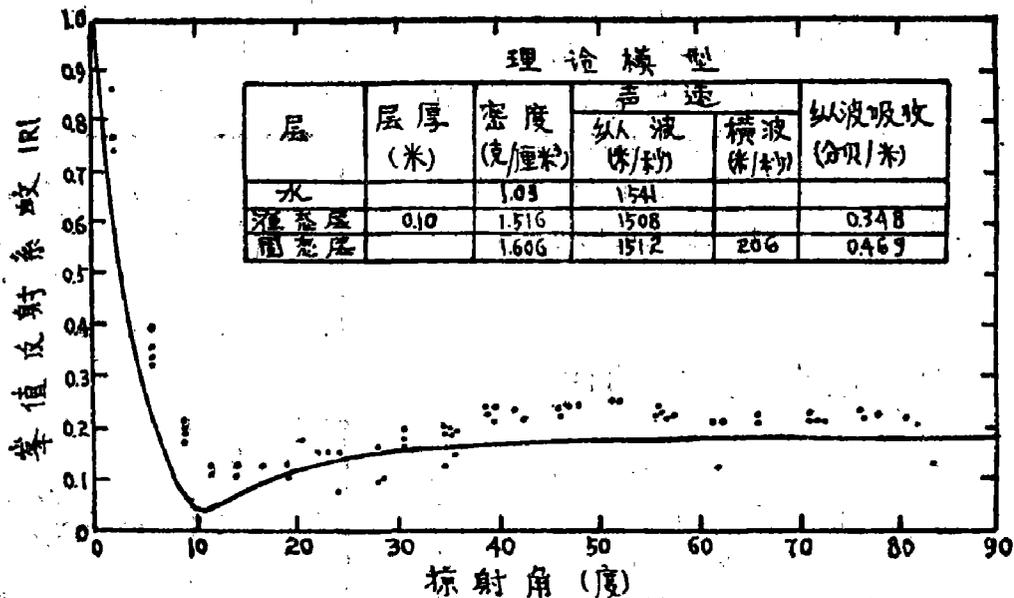


图6. 2千赫反射系数理论值与实验值的比较

—: 理论值。 ·····: 实验值。

图7是4千赫兹的反射系数实验值与理论值的比较。除贯穿角附近的角以外，在整个范围之内符合的较好。实验值随频率的变化更明显了，特别是在贯穿角附近。在这一角度上

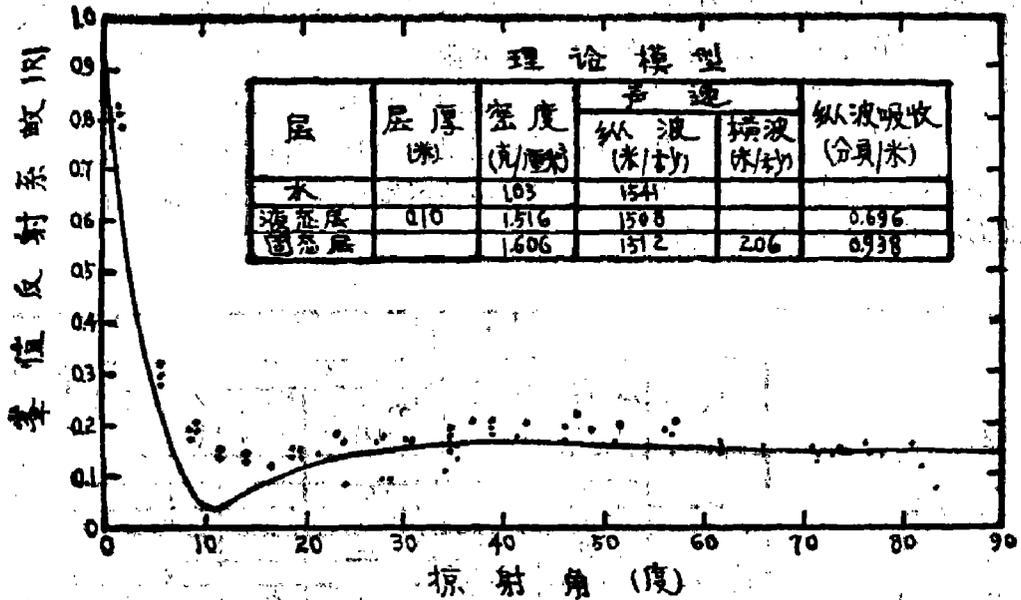


图 7. 4千赫反射系数理论值与实验值的比较

——: 理论值。: 实验值。

反射系数的实验值随频率而增加。这一结果与其他研究结果不一致，其他研究结果都表明随着频率的增加，海底反射损失增加或反射系数减小^[22,23]，而且称这一异常现象为频率倒转。

VII. 讨 论

在贯穿角附近所看到的频率反常现象有几个可能的解释。反射系数随频率而增加的原因之一，可能是应用倍频程滤波器分析的实验数据与基于单频模型的理论值进行比较的缘故。宽频带需要在三方面进行修正：(1)在频带内声源级随频率变化的斜率，(2)在频带内海水吸收随频率变化的斜率，(3)在频带内海底反射特性或沉积物衰减随频率变化的斜率。当频率和距离增加时，这些修正就更具有重要性了。海底反射系数的实验值可以在上述的(1)和(2)两方面做出修正，但是，不能在频带范围内对沉积物的衰减作用做出修正。由于在整个范围之内，实验值与理论曲线符合的很好，这可以看出，应用倍频程处理的资料是可信的。

在贯穿角附近，反射系数随频率的增加而增加这一异常现象另一个可能的原因是，由于海底下面一些薄的反射层存在的缘故。由于在贯穿角附近反射系数的实验值从不为零，可以假设记录到的峰值信号是由浅的下层反射层反射来的。这一反射层可能存在于速度增加的深度上，正如图 3 中看到的，即在 80—90 厘米深的地方。当初所选择的沉积物模型，曾经假设从较深的反射层反射来的信号不应该影响反射信号最前面的几个周期，从海底反射系数实验值与理论值符合的相当好这一观点来看，当初所选的模型是合适的，虽然，在贯穿角附近较深的层次可能是重要的。在反映海底下层贡献的实验资料中看不到干涉图象，这进一步证明了忽略深层影响的假设是合情理的。然而，由于应用倍频程做分析，与单频资料中所观察到的干涉图象进行比较有少数起伏发生是可能的。

为了确定一个更详细的沉积物模型，这一模型应包括能解释在贯穿角附近所观察到的奇异的频率效应的一切可能的下层反射层，根据在海底上部 90 厘米厚的沉积物中测得的密度和

声速,可建立一个6层的海底模型。图8—11表示,根据这个模型所做出的理论曲线以及与实验值的比较。一般说来,可以看出除了在贯穿角附近的角度以外,反射系数的实验值与理论值符合的很差。理论曲线上的振荡是由分层海底的干涉效应引起的,而且与图5—7中平滑的曲线形成了对照,在图5—7中,10厘米的层仅仅对理论曲线有轻微的影响。在整个范围内符合的不好,说明了这样一个详细的6层模型并不能对观测到的反射特性提供一个恰当的描述;然而,在贯穿角附近是有用的。

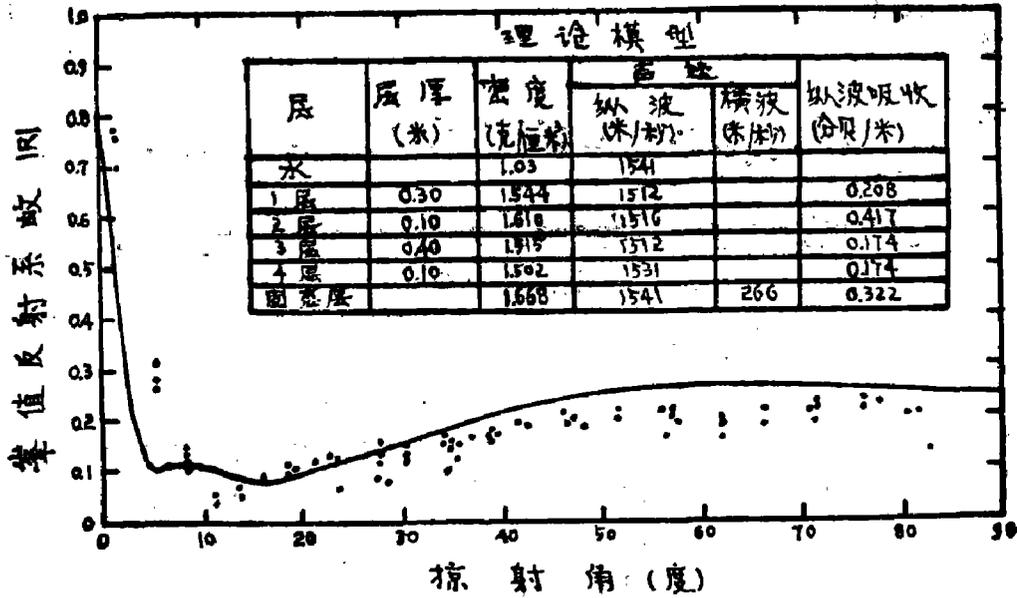


图8. 应用一个六层模型, 1千赫反射系数理论值与实验值的比较

—: 理论值。: 实验值。

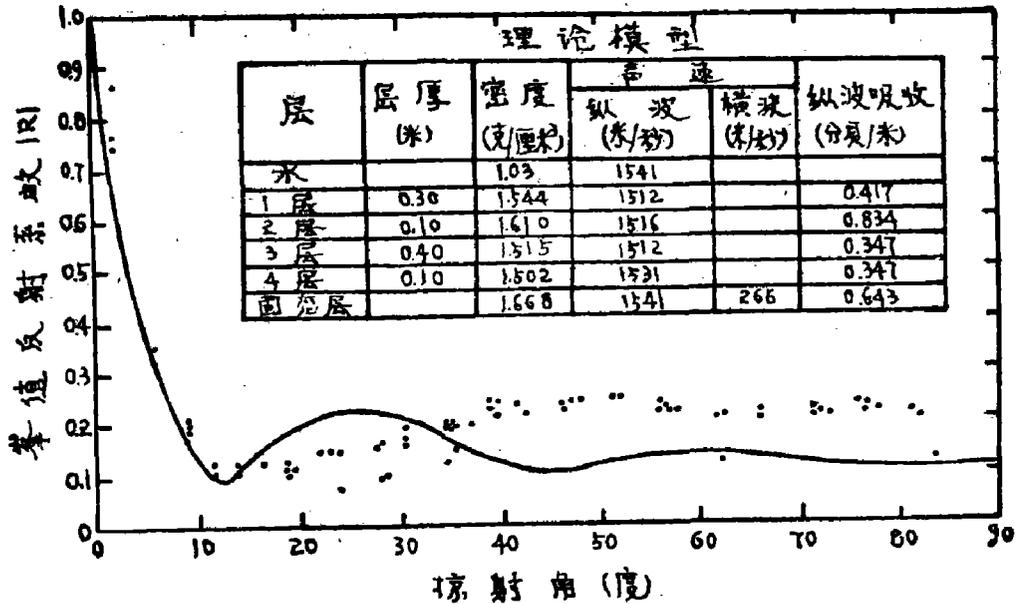


图9. 应用一个六层模型, 2千赫反射系数理论值与实验值的比较

—: 理论值。: 实验值。

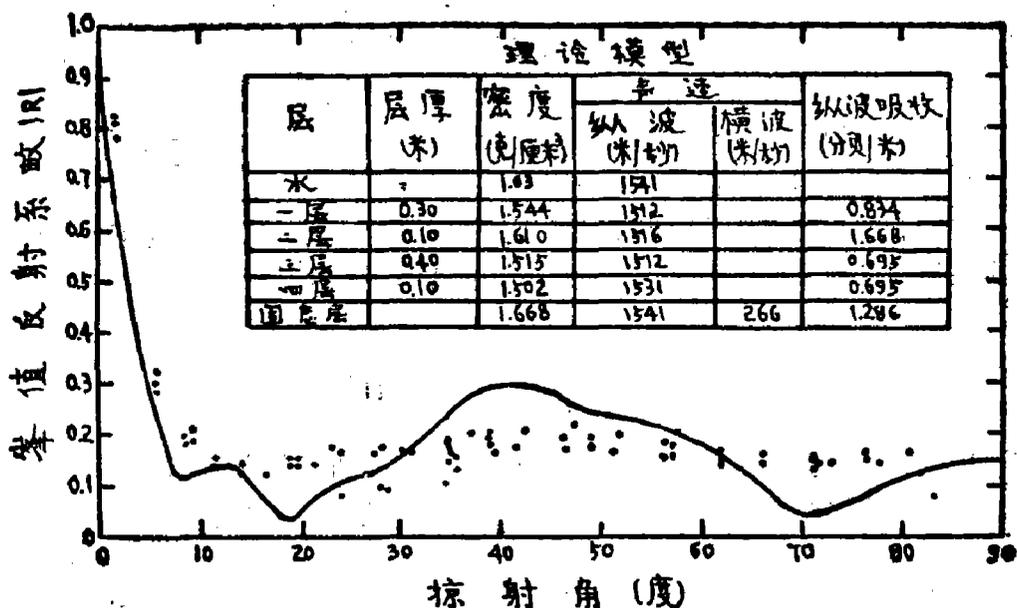


图 10. 应用一个六层模型, 4千赫反射系数理论值与实验值的比较
—: 理论值。 ·····: 实验值。

图11表示, 在贯穿角附近, 反射系数做为频率的函数其理论值与实验值的比较。正如前面所讨论过的, 实验值随频率的增加而增加。三层模型的理论值随频率增加而稍微下降, 6层模型的反射系数理论值随频率增加而增加, 而且在2千赫兹和4千赫兹与实验值符合的很好。从而看出, 在贯穿角附近的频率异常现象, 可部分的由下层反射体的存在以及它所引起的干涉效应得到解释。

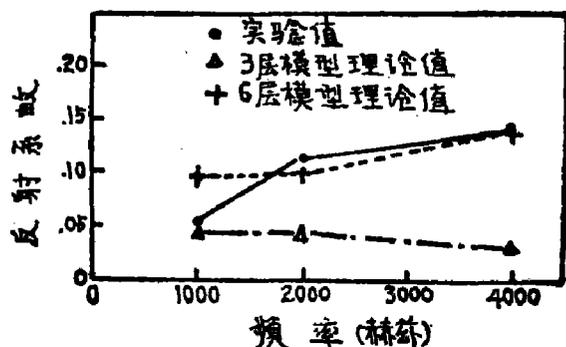


图 11 在贯穿角附近反射系数理论值与实验值的比较

在贯穿角附近, 反射系数理论值与实验值的不一致性, 一个可能的原因是吸收依赖于频率, 在这个范围内, 反射系数有一个与吸收有关的依赖频率的效应。发现当吸收按频率的 $2/3$ 次方而不是按一次方增加时, 应用一个三层模型, 其理论值与实验值符合的较好, 但是这些吸收值并不与按一次方外推得到的吸收常数一致。Cole^[23]从阿拉斯加湾的低声速海底的反射损失数据中发现, 在频率为100—900赫兹范围内, 主要是依赖频率的一次方, Wood和Weston^[24]在频率为4—50千赫兹范围内得到了一次方的关系式。尽管没有一个简单的理论能够解释沉积物吸收与频率成一次方关系, 假如对各种沉积物是正确的话, 那么也应该包括1到4千赫兹之间的频率。

造成测量值与理论值差异的一个决定因素, 可能是理论计算所应用的层的选取和组合的影响, 采样点附近到声线穿透的区域之间, 海底沉积物的横向变化也可能有影响。层和输入参数的选择通常是根据测量的和说明的资料相结合, 并且听凭个别观测者的判断和看法。海底的声学 and 物理性质往往是逐渐变化的, 而理论模型需要恰当层厚和层数。沉积物情况稍微有点变化, 有时能引起在所有掠射角上理论曲线随频率而变化。

可能的一个原因是，泥芯不是从声穿透的海底确切位置或范围采集的。泥芯只代表了一个离散的点，进行反射实验时，当声源与接收船距离变化时，在海底上的反射点也变化。在相当短的距离上，海底的结构可能是复杂的和变化的，这也是一个因素。文献2和25给出的结果指出，在一个小的水平距离上，存在着复杂的声学分层结构，因而用一个简单的泥芯做准确的理论计算是困难的。当初应用一个三层的理论模型，得到的反射系数理论值与实验值在整个范围内吻合的相当好，这一点就证实了这个区域表层的沉积物变化不大，而且，沉积物的分层和性质的变动或许对贯穿角附近所看到的差异贡献不大。

VIII. 摘要和结论

在本文中，把一组低声速海底的反射系数做为掠射角和频率的函数，将其实验值与理论计算值做了比较。应用测得的沉积物声速、泥芯的物理性质与多层海底数学模型相配合得到了反射系数的理论值。由于在分析资料时，仅仅应用了海底反射信号最前面的几个周期，所以得到的反射系数假定是穿透浅层海底的信号反射来的。因此仅仅泥芯上面30厘米的厚度对理论计算有用处。

将实验值与理论值在1、2和4千赫的频率上进行比较，看出在整个范围上吻合的较好。特别是得到的和理论预言的贯穿角极其相符，并且有相位反转。这种一致性进一步证实了Hamilton^[12]的结果，即实验室测得的沉积物声速可以根据现场条件在温度和压力方面进行修正。在贯穿角附近看到了一个奇异的依赖频率的关系，即反射系数随频率的增加而增加。假设在贯穿角测得的反射系数是由下面海底若干反射层产生的干涉效应引起的，那么，称为频率倒转的这一效应在2和4千赫兹就能得到解释。

本文中所给出的有限数据，其实验值与理论值符合的较好，这一结论不允许推广。从其结论看出，对这一特殊的海底，在1、2和4千赫兹的频率上，能够应用仅仅考虑海底上层30厘米厚的一个简单的三层模型，就可以预言其海底反射系数。而且假定信号是穿透浅层海底的反射。用一个考虑海底上层90厘米厚的复杂的六层模型做过比较，看出其结果与测得的反射系数缺乏一致性，然而，这一模型对预言贯穿角附近的频率倒转是有用的。

感 谢

作者衷心感谢美国海军水声实验室给予的支持，他们提供了经M. G. Karamargin改进并编了程序的理论模型。这一模型连同海军海洋局导出的计算模型一起被应用，对这次考察来讲是极其有价值的。作者对John E. Allen, Benjamin A. Watrous, James Cole, Paul M. Dunlap, Laurence C. Breaker, 和Wayne E. Renshow以及场方的其他成员是感激的，他们在收集和分析资料时分别给予了帮助。

参 考 文 献

- * A shorter version of this paper was presented at the 71st Meeting of the Acoustical Society of America (J. A. S. A. 39, 1241(A) (1966)).
- [1] G. R. Barnard, J. L. Bardin, and W. B. Hemphkins, "Underwater Sound Reflection

- from Layered Media," *J. A.S.A.* 36, 2119—2123 (1964).
- [2] F. R. Menotti, S. R. Santaniello, and W. R. Schumacher, "Studies of Observed and Predicted Values of Bottom Reflectivity as a Function of Incident Angle," *J. A. S. A.* 38, 707—714 (1965).
- [3] M. V. Brown and J. H. Rickard, "Interference Pattern Observed in Reflections from the Ocean Bottom," *J. A. S. A.* 37, 1033—1036 (1965).
- [4] H. P. Bucker, J. A. Whitney, G. S. Yee, and R. R. Gardner, "Reflection of Low-Frequency Sonar Signals from a Smooth Ocean Bottom," *J. A. S. A.* 37, 1037—1051 (1965).
- [5] R. S. Winokur, "Theoretical Computations of Sound Reflection from a Layered Ocean Bottom," U. S. Naval Oceanogr. Office IMR No.0-33-65 (Oct. 1965).
- [6] W. D. Wilson, "Speed of Sound in Sea Water as a Function of Temperature, Pressure and Salinity," *J. A. S. A.* 32, 641—644, 1357(L) (1960).
- [7] W. H. Thorp, "Deep-Ocean Sound Attenuation in the Sub- and Low-Kilocycle-per-Second Region," *J. A. S. A.* 38, 648—654 (1965).
- [8] W. H. Thorp, "Analytic Description of the Low-Frequency Attenuation Coefficient," *J. A. S. A.* 42, 270(L) (1967).
- [9] M. C. Karamargin, "A Treatment of Acoustic Plane Wave Reflection from an Absorbing Multi-Layered Liquid and Solid Bottom," U. S. Navy Underwater sound Lab. Tech. Memo. 913-91-62 (16 Jul. 1962).
- [10] M. C. Karamargin and B. J. Klein, "Some Theoretical Computations of Distortions at Reflection from an Absorbing Multi-Layered Liquid and Solid Bottom," U. S. Navy Underwater Sound Lab. Tech. Memo. 910-169-63 (27 Aug. 1963).
- [11] R. S. Winokur and S. Chanesman, "A Pulse Method for Sound Speed Measurements in Cored Ocean Bottom Sediments," U. S. Naval Oceanogr. Office IM No.66-5 (Aug. 1966).
- [12] E. L. Hamilton, "Sediment Sound Velocity Measurements Made In Situ from Bathyscaph Trieste," *J. Geophys. Res.* 68, 5991—5998 (1963).
- [13] W. D. Wilson, "Tables for the Speed of Sound in Distilled Water and in Sea Water," U. S. Naval Ordnance Lab. Rep. 6747 (1959).
- [14] S. Katz and M. Ewing, "Seismic Refraction Measurements in the Atlantic Ocean Part VII: Atlantic Ocean Basin, West of Bermuda," *Bull. Geol. Soc. Amer.* 67, 475—509 (1956).
- [15] J. C. Fry and R. W. Raitt, "Sound Velocities at the Surface of Deep-Sea Sediments," *J. Geophys. Res.* 66, 589—597 (1961).
- [16] G. Shumway, "Sound Speed and Absorption Studies of Marine Sediments by a Resonance Method—Parts I and II," *Geophysics* 25, 451—467(I), 659—682(II) (1960).
- [17] R. J. Urick, "A Sound Velocity Method for Determining the Compressibility of Finely Divided Substances," *J. Appl. Phys.* 18, 983—987 (1947).
- [18] E. L. Hamilton, "Geoacoustic Models of the Sea Floor. 1. Shallow Bearing Sea; 2. Mohole (Guadalupe Site)," U. S. Navy Electron. Lab. Rep. 1283 (19 Apr. 1965).
- [19] L. H. Adams, "Elastic Properties of Materials of the Earth's Crust," in *Internal Constitution of the Earth* B. Gutenberg, Ed. (Dover Publications, Inc., New York, 1951), 2nd ed., Chap. IV, pp.50—80.

- [20] A. S. Loughton, "Sound Propagation in Compacted Ocean Sediments," *Geophysics* 22, 233—260 (1957).
- [21] J. W. Strutt Lord Rayleigh, *The Theory of Sound* (Dover Publications, Inc., New York, 1945), 2nd ed., Vol.2, pp.78—82.
- [22] H. W. Marsh, T. G. Bell and C. W. Horton, *Reflection and Scattering of Sound by the Sea Bottom*, AVCO Marine Electron. Office, Ed. (AVCO Marine Electronics Office, New London, Conn., 1965), Part II, pp.29—40.
- [23] B. F. Cole, "Marine Sediment Attenuation and Ocean-Bottom-Reflected Sound," *J. Acust. Soc. Amer.* 38, 291—297 (1965).
- [24] A. B. Wood and D. E. Weston, "The Propagation of Sound in Mud," *Acustica* 14, 156—162 (1964).
- [25] J. J. Gallagher, "Variability in Derived Sediment Sound Velocity as a Function of Core Analysis and its Effect in Determining Theoretical Bottom Reflectivity," U. S. Navy Underwater Sound Lab. Tech. Memo. 2213-78-68 (20 Feb. 1968).

译自 J. A. S. A. Vol.44, No.4 1968 P.1130—1138

魏兴武译 李玉昕校

* ~~~~~ *

(上接第41页)

- [16] B. П. Глотов, "淡水和海水中硫酸镁电离度弛豫时间温度关系的计算"。水声学(水声译丛)第4期 31~35 (1966)。
- [17] J. Stuehr and E. Yeager, "The propagation of ultrasonic wave in electrolytic solutions" in *Physical Acoustics*, edited by W. P. Mason (Academic, New York, 1965), Vol.2. Part A, Chap. 6.
- [18] R. H. Mellen and Browning "Variability of low-frequency sound absorption in the ocean: pH dependence" *J. A. S. A.* 61, 704—706 (1977).
- [19] M. Schulkin, H. W. Marsh. "海水声吸收"水声学(声学译丛)第1期, 57—63 (1965)。
- [20] J. T. Shaw and G. R. Garrison, "Table of sound absorption in Sea Water" Tech. Note 1-77, Applied Physics Laboratory University of Washington, Seattle (1977).
- [21] R. C. Weast, Ed., *Handbook of Chemistry and Physics* (Chemical Rubber, Cleveland, 1975—1976), 56th ed., P. F49.
- [22] M. J. Sheehy and R. Halley, "Measurements of the Attenuation of Low Frequency Sound," *J. A. S. A.* 29, 464—469 (1957).

译自 *Jour. Acoust. Soc. Am.*, Vol.63, No. 1, 1978. p. 43—48

蒋济良 万世敏译 裘辛方校