

浅海声传播的强度—距离关系

Edward Murphy Ole V.Oleson

(SACLANT ASW Research Centre)

引言

浅海传播是比较复杂的,因此常用简单的半经验的衰减规律来表达传播损失。(参见1—),衰减规律是指声强随距离的衰降关系,有两种衰减形式具有特别的意义,一是 $R^{-3/2}$,一是 $R^{-1}e^{-\alpha R}$ 。后者乃是具有指数衰减的柱面扩散,适用于只有一个简正波的情况,关于这些衰减规律的详细情况 Weston 曾做过综述。

最初人们在表达传播的衰减规律时(如参考6),由于数据的有限性,很难由数据来肯定一种或否定一种特定的规律,事实上,同一组数据用不同形式的规律来表达,有时它的效果是一样的。同样,有时从理论上估算的一种形式不见得比另外一种形式更符合于实验点子。Weston 对这种明显的矛盾问题曾做过讨论(见7)。

任何理论的或是半经验的衰减规律表达式可由下一组公式来概括。

- | | |
|-------------|--------------------------|
| 1. 球面扩散 | $-R^{-2}$ |
| 2. 2/3次方律 | $-R^{-3/2}$ |
| 3. 柱面扩散 | $-R^{-1}$ |
| 4. 2/3次方带吸收 | $-R^{-3/2}e^{-\alpha R}$ |
| 5. 柱面扩散带吸收 | $-R^{-1}e^{-\alpha R}$ |

这里假设体积吸收已经考虑在内了,而指数因子相应于其它的吸收(即边界损耗),不同衰减中的差别是很大的,例如在 $3/2$ 次方 $R^{-3/2}=R^{-1}R^{-1/2}$ 与单个简正波形式 $R^{-1}e^{-\alpha R}$ 之间的

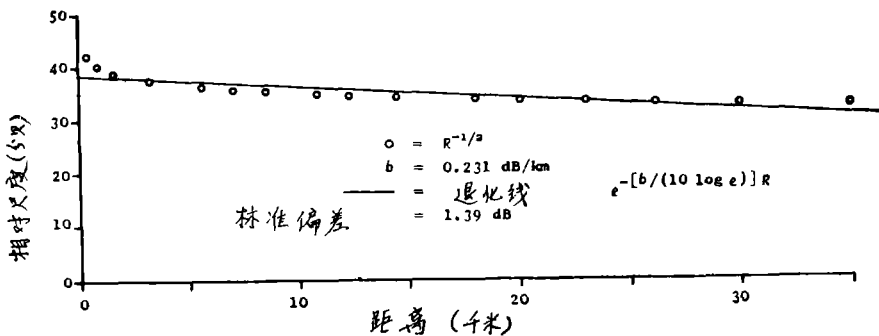


图1 确定等效吸收 $b = \alpha \log e$ 以使 $e^{-\alpha R}$ 按最小二乘法逼近 $R^{-1/2}$ 律
($R^{-1/2}$ 的实验点子是某次实验所得)

差别是 R^{-1} 和 $e^{-\alpha R}$ 因子，在平海底上的浅海传播实验，一般测到 30 或 40 公里，在图 1 中，在这样大小的距离范围内比较了这两种因子 R^{-1} 与 $e^{-\alpha R}$ 。图 1 中的 \cdot 是 R^{-1} 规律的实验点，是一次实验中所测得的， R^{-1} 的实验点子是用了一个退化曲线去弥合，即用指数形式来弥合

$$e^{-\alpha R} = e^{-[b/10 \log_{10} R]}$$

其中 b 为 (db/公里) 的吸收，由这种最小二乘法弥合出来的吸收为 0.231db/公里它的标准偏差为 1.39 分贝。

因为过去被考虑的浅海传播数据是近距离的，并且起伏大于数分贝，因此用这些数据去验证给定的理论规律就会产生很大的矛盾，可以料想如果有很多平滑的数据是不是将会解决这些矛盾？但我们将会看到事情并不是这样的。

I、Elba 附近的实验

浅海宽带声传播实验是在 Elba 岛附近做的 (参见 8) 应当恰当地指出，在这个海区有一些不太大的生物活动 (参见 7)，在水深的一半使声源爆炸，在 0.1 至 8kc 接收。对数据作数字记录，并在 1/3 倍频程内分析了传播衰减。接收用的垂直阵由一个圆形浮筒挂下去，其上挂有五个，或六个水听器分布在水深 110 米之间。海底是平的泥底和沙，表层的声速很高，较之在水中大了 103%。夏季与冬季的水文分布如图 2 所示，经过多次重复实验后把结果整理了出来。

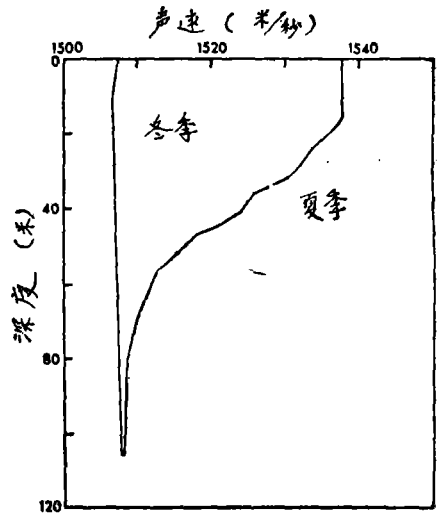


图 2

衰减规律的离散通常包含了这样的假设，这些假设意味着以某种形式按深度取平均，不是对声源就是对水听器，或者对两者都可。当 Elba

数据按六个或五个水听器作平均后，最后的按深度平均的传播损失 (ATL) 通常是一个在 35 公里以内为平滑的距离函数。图 3 中的细线是单个水听器收到的曲线，粗线是按深度平均的。(为了简化起见，每根曲线未予注明水听器号数)。曲线上边的换能器串就是获得这些数据时水听器的布设形式。当单个水听器测出的传播衰减随距离的曲线起伏大时，则 ATL (按深度平均的传播衰减) 曲线比较平滑，这样可以把问题分为两方面，一是研究“平均衰减规律”，一是起伏的统计研究。

在 1969—1971 年夏季、冬季对 Elba 数据的广泛蒐集，为评价各种衰减规律以及评价实验数据互相一致性的质量提供了一个很好的机会。

II、(2/3) 次方规律的验证

图 4 是冬季 (等温层) 在 Elba 以北海区，进行的用 20 个 1/3 倍频程记录的一个航程的 ATL 的实验结果。它的衰减形式我们认为属于“2/3 次方异常”，用符号 $AN_{3/2}$ 表之，

$$AN_{3/2} = ATL - 15 \log R - \nu R$$

从 ATL 中扣除 $15 \log R$ 一项的损失是由于 3/2 次方扩展规律所引起的，从 ATL 中扣除 νR 一项的损失是由体积吸收所引起的，这里我们假定体积吸收系数 ν 可以由深海测量数据得到 (例如我们用参考 9)，图 4 给出 Elba 实验海区的最终的简化衰减规律，它可以给出对上述假定的某些间接证明。

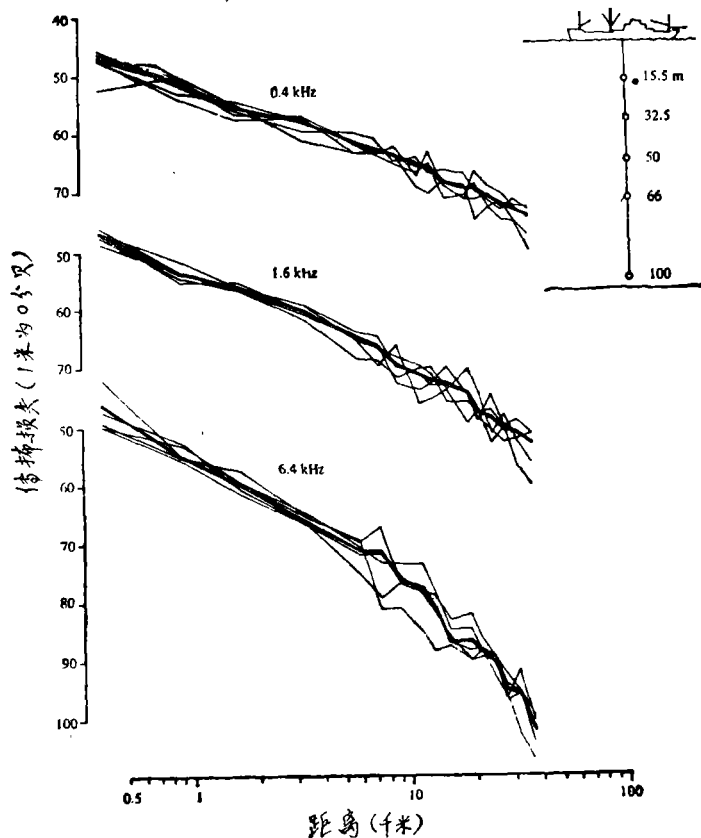


图 3

如果数据确实遵从 $3/2$ 次方规律，并且，如果深海的 ν 值也是恰当的话，那么所有的距离关系考虑在内之后 $AN^{3/2}$ 应当与距离无关。

图 4 的结果表明，在很宽的距离范围内和在很宽的频率范围内， $AN^{3/2}$ 为一常数，最多差 1 至 2 分贝。事实上，从近处数公里至远处最大距离，对实验作退化分析后，知标准方差小于 1 分贝，因此可以认为这是符合于 $3/2$ 次方规律的令人信服的实验证明。

在低频下，在较近的距离范围内，传播情况较之 $3/2$ 次方为好 ($15\log R$ 补偿过多) 这一情况可用 R^{-1} 来表达，或者说是柱面扩展，就是 Weston 所予示的在近距离内球面扩展 (R^{-2}) 出现之后，在 $3/2$ 次方规律出现之前的那一段距离内的特征。这种近距离特征在图 5(a) 中已详细地绘出，其中 $AN^{3/2}$ 与图 4 中的是属同一次实验的数据，这是用对数距离坐标绘出，在这次实验中的第一发爆炸声记录中，海面反射声线非常大，已较直达信号大了两倍，这一现象并不稀奇，(例如参见 10, 11) 这就造成该发爆炸声的深度平均数据在高频(数千赫)下增大 2 或 3 分贝，因而在图 5(a) 中有证据表明：随距离的增加按 $AM^{3/2}$ 衰降，在近距离可能是球面扩展区。

这些结果可以总结到一个如图 6 所示的衰减规律“地图”中去。在频率—距离平面内，绘出一些轮廓线以表明在给定的频率下由一种衰减规律过渡到另一种的规律，虽然球面扩展的区域范围还不是确定得那么清楚。在夏季负梯度水文条件下也做过测量，在 Elba 以北的一次秋

季航程给出的结果示于图 7 中和图 5(6)中, 其中距离分别是线性的和对数的。在低频部分, 夏季结果与冬季结果相类似, 即在长波情况下声速结构的影响很小, 在近距离, 随着频率的增高, 夏季数据呈现出系统地变化, 这和冬季数据的情况相类似。关于 $3/2$ 次方规律, 我们可以相信我们自己的数据, 即在中间距离范围内在频率低于数千赫时 $AN_{3/2}$ 为一常数。在远距离在高频下, 衰减很快, 这就是 $R^{-1}e^{-\alpha R}$ 的区域。一个衰减规律图如图 (8) 中的曲线, 可以使我们看出一些情况来, 这里和冬季情况不同, 我们多多少少地硬把衰减规律的表达形式归于预期的形式了。

III、单个简正波表达形式

现在我们考虑换一种对冬季和夏季数据的表达形式, 即在相当的距离内试图用 $R^{-1}e^{-\alpha R}$ 来表示, 这一形式是常常用于只有一个简正波时使用的, 我们不期望它能符合较多的数据, 特别是冬季的数据, 对于这些实验的条件, 只有在远距离, 或是只有在夏季, 能得到单个简正波的区域。

现在, 我们使用“柱面异常” AN_1 如下:

$$AN_1 = ATL - 10 \log R - \nu R$$

其中用 $10 \log R$ 而不是用 $15 \log R$ 从 ATL 中扣除传播损失。如果数据确实遵守 $R^{-1}e^{-\alpha R}$ 律, 当计入体积吸收后, 则 AN_1 将在线性距离坐标中为一直线, 该线的斜率为吸收系数 b

$$b = \alpha 10 \log e$$

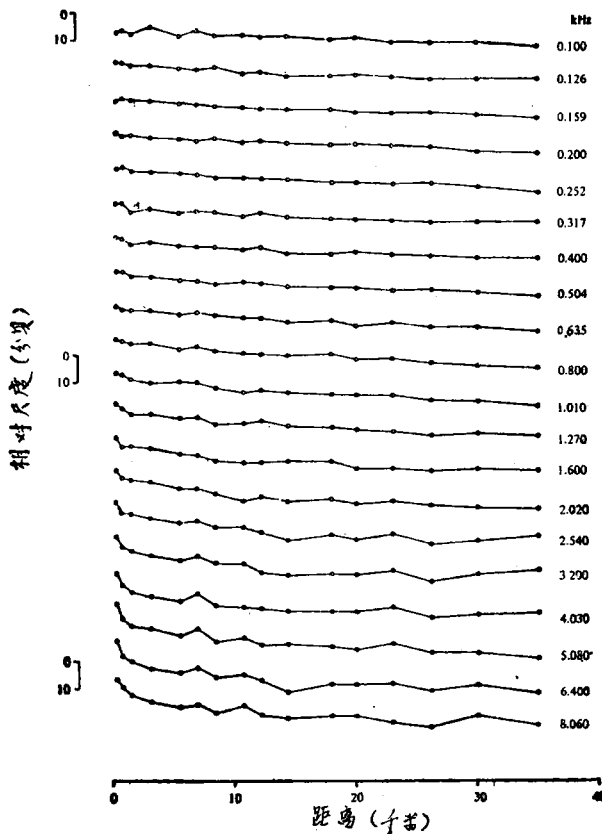


图 4

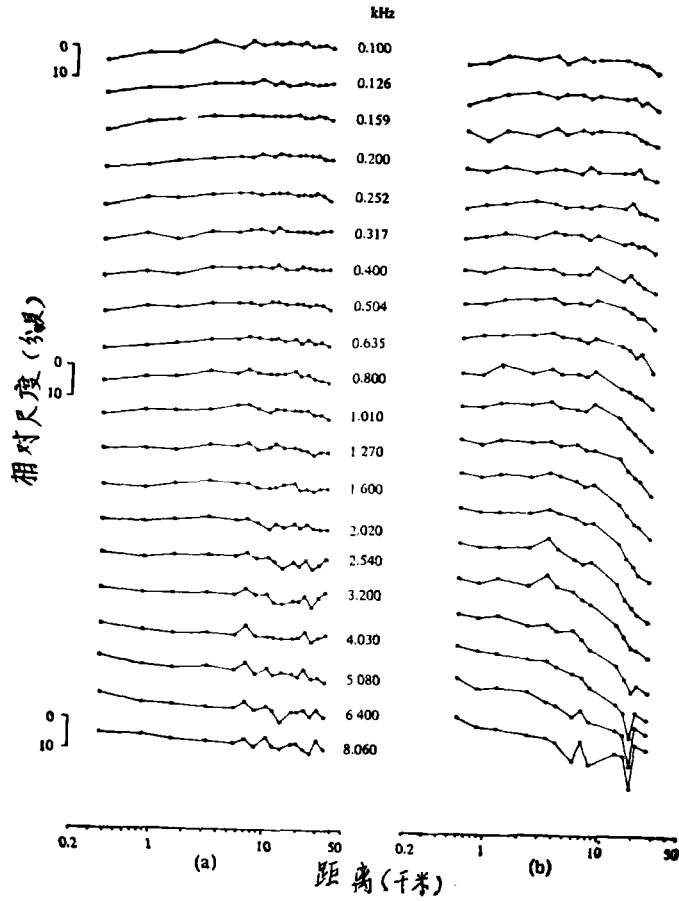


图 5. $3/2$ 次方异常规律 $AN_{3/2}$, 对数距离坐标,
 (a) 冬季等温层(和图 4 的数据相同) (b) 夏季负梯度(和图 7 的数据同)

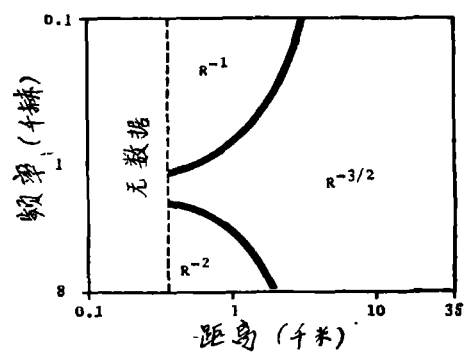


图 6 由图 4 和图 5(a) 的数据得出的表示由一种衰减规律过渡成另一衰减规律的冬季数据的衰减规律图

单位为 db/公里, 按此方法在图 9 中给出冬季的在图 10 中给出夏季的 AN_1 数据, 请看, 这个表达式是多么普遍地与实验数据符合! 在频率低于数千赫的情况下, AN_1 几乎在一个航

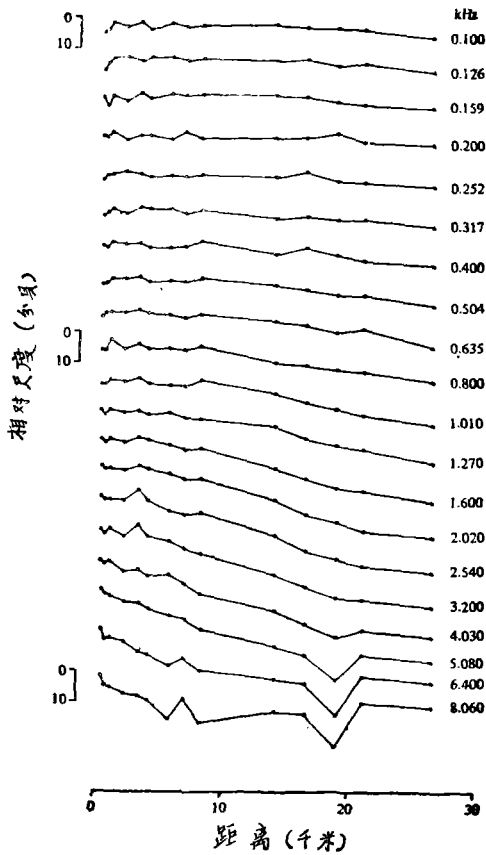


图7 夏季负梯度情况下一个航程的记录, 20个 $1/3$ 倍频程, 线性距离, $3/2$ 次方异常规律 $AN_{3/2}$

程的全部距离上是一直线, 顶多差 1, 2 分贝, 这种表达式的衰减规律图绘于图 11 和 12 中, 水文分布分别是冬季的和夏季的。

IV、讨论

我们注意到在图 9 中的一个特点: 多数的曲线具有相同的斜率, 这说明吸收系数对频率的变化不敏感。吸收系数数值介于 0.2 与 0.3 分贝/公里之间。这可解释为冬季数据的模糊度, 因为用 $e^{-\alpha R}$ 人为地去凑合一个与频率无关 $R^{-1/2}$ 所引起。图 1 的结果表明在 1 至 35 公里范围内, 用最小二乘法使 $R^{-\alpha R}$ 逼近 $R^{-1/2}$ 后给出的“吸收”为 0.231 分贝/公里。另一方面, 对于夏季数据, 由图 10 的 AN_1 所提供的吸收则强烈地与频率有关, 然而, 在低于数百赫时, 所有的值近于 0.3 分贝/公里, 因此, 可以很好地符合于 R^{-1} 规律。在低频下, 事实上也是单个简正波的情况。

因此, 在模糊度之内, 用予期的和未予期的衰减规律表达实验数据具有同样质量, 这是一个偶然的情况。在常规实验所能复盖的各种类型的距离区间内, 在某些频段上由实验数据外推的吸收类型说明, 同样的数据既适合于 R^{-1} 又适合于 $e^{-\alpha R}$ 规律。

V、总结

尽管这里有提供的数据这一事实, 但当画成各种异常的形式时, 在相当大的距离范围内,

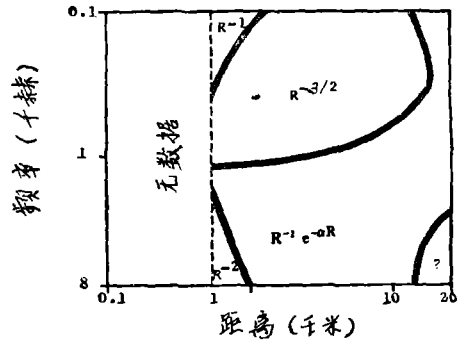


图8 由图 7 和图 5(b) 中的数据得出的表示由一种衰减规律过渡成另一衰减规律的夏季衰减规律图

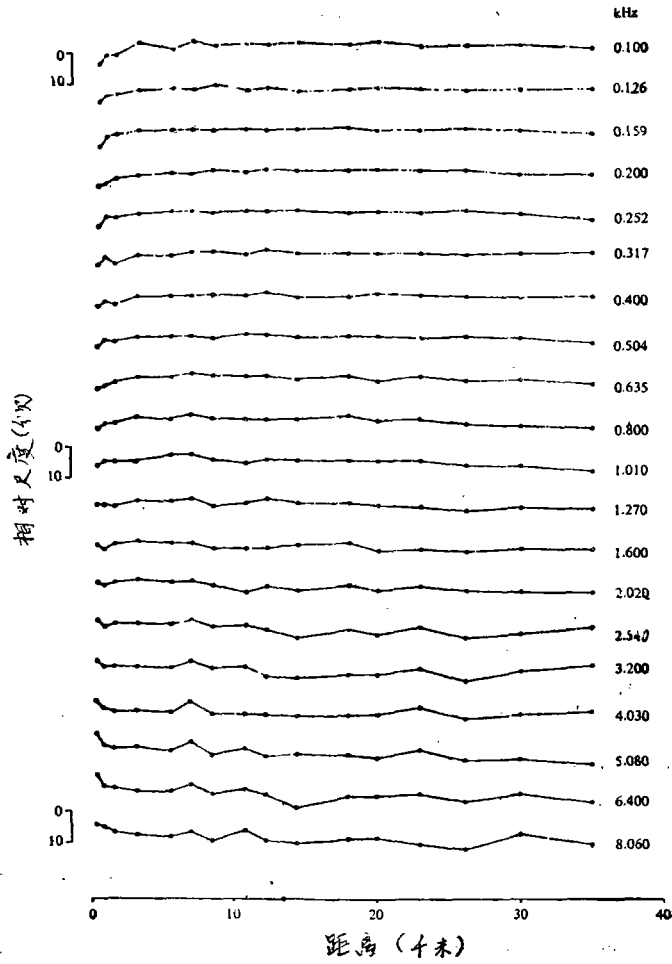


图9 柱面异常 AN₁, 线性距离坐标, 20 个 1/3 倍频程带宽, 冬季均匀层的一个传播航程记录 [与图 4, 5(a) 的数据同]

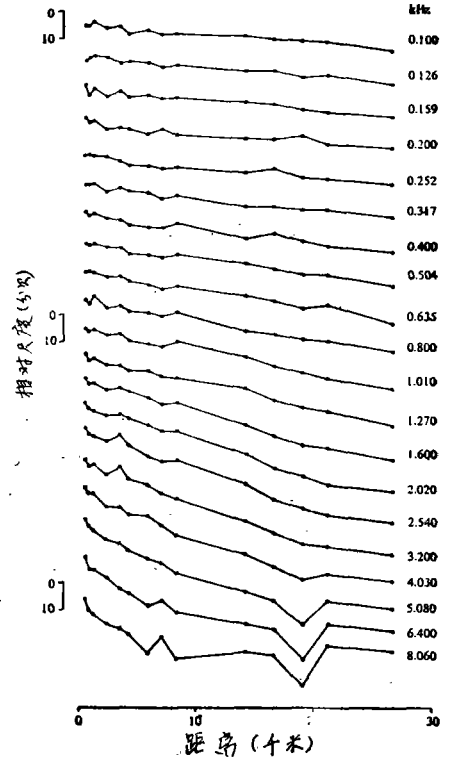


图10 柱面异常 AN₁, 线性距离坐标, 20 个 1/3 倍频程带宽, 夏季负梯度条件下的一个传播航程记录 [与图 7 和 5(b) 的数据同]

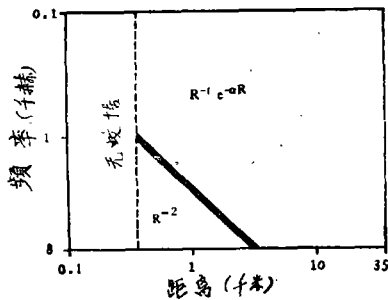


图11 由图 9 冬季数据得出的由一种衰减规律过渡成另一种规律的衰减规律图

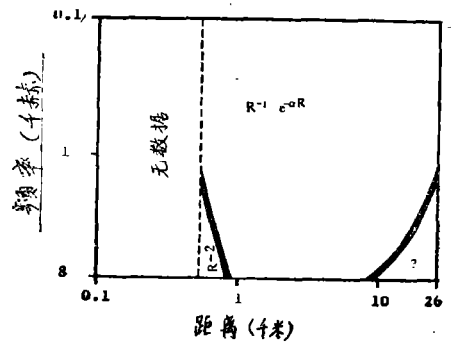


图12 由图 10 夏季数据得出的由一种衰减规律过渡为另一种规律的衰减规律图

相对于某一常数或直线可能会有较小的偏离，由于数据的模糊度，不一致性等，很可能另外一种衰减规律的表达形式对数据的符合程度和头一种规律的符合程度具有同样的质量。

当衰减规律能够用来简单地表达数据时，重要的一点是确认出由一种规律过渡成另一种规律的过渡距离。衰减规律图可以是频率的、折射条件的以及海区的复杂函数，因此就需要做更多的工作和更多的环境认识，以便从射线或简正波计算方面进行预报。继续研究衰减规律图也是具有学术意义的一项工作。

参 考 文 献

- [1] H. W. Marsh and M. Schulkin, "Shallow-Water Transmission," J. Acoust. Soc. Am. 34, 863-864 (1962).
- [2] D. E. Weston, "Intensity-Range Relations in Oceanographic Acoustic," J. Sound Vib. 18(2), 271-287 (1971).
- [3] R. N. Denham, "Intensity-Decay Laws for Sound Propagation in Shallow Water of Variable Depth," J. Acoust. Soc. Am. 39, 1170-1173 (1966)
- [4] J. D. Macpherson and M. J. Daintith, "Practical Model of Shallow-Water Acoustic Propagation," J. Acoust. Soc. Am. 41, 850-854 (1967).
- [5] R. J. Urick, "Intensity Summation of Modes and Images in Shallow-Water Sound Transmission," J. Acoust. Soc. Am. 46, 780-788 (1969).
- [6] D. W. Weston, "Propagation of Sound in Shallow Water," J. Br. IRE 26, 319-327 (1963).
- [7] D. E. Weston, "Contradiction Concerning Shallow-Water Sound Attenuation." J. Acoust. Soc. Am. 42, 526-527 (1967).
- [8] E. Murphy and O. V. Olesen, "Broadband sound Propagation Trials in Shallow Water near the Island of Elba," SACLANTCEN Memo. SM-39 (15 March 1974). (AD 782 326.)
- [9] A. Skretting and C. Leroy, "Sound Attenuation Between 200 hz and 10 kHz," SACLANTCEN Tech. Rep. No. 157(1969). (AD 861 117).
- [10] L. N. Liebermann, "Reflection of Underwater Sound from The Sea Surface," J. Acoust. Soc Am. 20, 498-503 (1948).
- [11] R. J. Urick and H. L. Saxton, "Surface Reflection of Short Supersonic Pulses in the Ocean," J. Acoust. Soc Am. 19, 8-12 (1947).

译自 J. Acoust. Soc. Am.; 1976. 59 (2), P305-311

丁东译校