

实际海洋中的多途径传播及它对 声纳设计和性能的影响

R.J.Urick

(美国海军水面武器中心)*

引 言

一般来讲,水声最重要的军事用途是在经费和技术条件许可的情况下,在尽可能远的距离内探测潜艇。现在,利用目标的辐射噪声进行探测的被动声纳,探测距离可达几百海里,利用目标回声进行探测的主动声纳,探测距离可达几十海里。这些量级的探测距离要求采用当前最高水平的信号处理、基阵设计和显示技术。

本文的目的在于说明,由于海洋介质的特殊的和不利的特性,使得应用这些技术——在获得合理增益和采用先进技术的程度上——受到了限制。这些特性是海洋中信号多途径传播存在的结果,即在声源和接收器之间经常存在着一个以上的声线(传播通道)。本文将指出在深海中多途传播的一些结果和它对阵增益和信号处理的限制。本文经简写以“在实际海洋中的声纳设计:多途效应对声纳性能的限制”为名曾在1976年4月IEEE“声学、语言和信号处理”国际会议上发表。

同雷达相比,声纳系统必须通过海中的多途径声传播到达一个远距离的目标。这些多途径是由于深海中的特殊的透镜(如速度结构或折射指数的剖面图)和海底与海面的存在引起的。一个深海声源的典型声线图如图1所示。实线代表从声源折射的声线,虚线代表从海洋界面反射回来的一条声线。在低频,一些反射声线可以穿透海底,然后再由海底分层折射或反射回来。同时还存在着许多其他的声线,也就是海底——海面多途通道,每一次海底反射有四条声线,它们携带着几乎相同的能量,而具有不同的传播时间。它们趋向于填满图1的影区,同时使深水声传播的声线图大大地变复杂了。

所有这些现象的结果是,在海中任何给定的一点接收到的声信号是通过许多传播途径传播的,各途径的信号载有不同数量的声能,并具有不同的传播时间。这些差别与声源、目标和海水本身有关,引起了接收信号的信号畸变、起伏、去相关和频移及频率模糊。

† 原文题目:“Multipath Propagation and Its Effects on Sonar Design and Performance in the Real Ocean.”

* 本文作者现在在美国 Tracor 公司。——原注

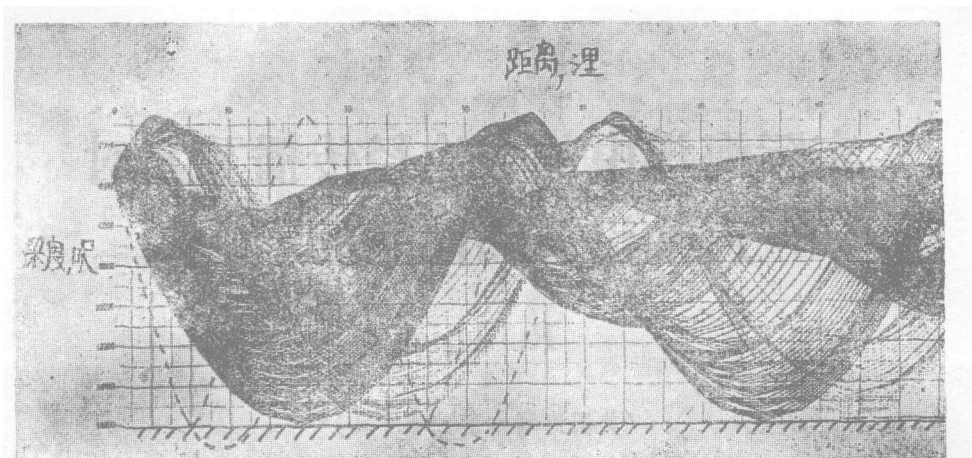


图1. 深海(声发)声道中的多途传输; 距离达 70 哩, 水深 16000 呎。虚线代表一条海底—海面反射途径。为避免混淆, 其他这类声线没表示出来。

信号畸变

一个短脉冲在海水中传播一段距离后, 由于多途传播在时间上拉长了(变宽)。一个典型的例子就是所谓的“声发”(SOFAR)信号, 它具有一个很慢的建立过程和突然终止的特性。图 2 示出在声源附近记录到的一个爆炸脉冲及其冲击波和气泡脉冲, 它只具有几个毫秒的持续时间。但是在远距离接收时, 可获得以秒计量的持续时间, 如图 3 的包络所示(参看文献[1])。极大的时间展宽的原因是沿各条折射声线(如图 1 所示)传播时间(或平均声速)的差别。平滑

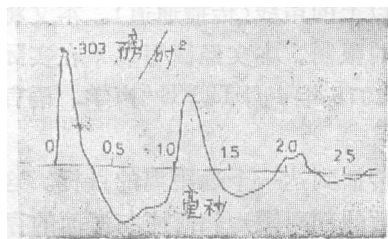


图2. 在 22000 呎深度, 1 磅炸药爆炸后, 在上方浅水处记录的的压力信号特征图。

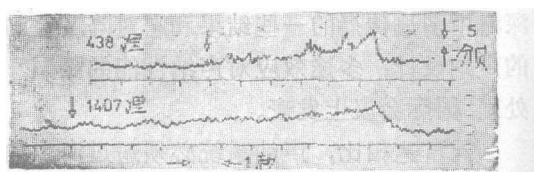


图3. 经过深海(声发)声道传播后的一个爆炸脉冲的包络。箭头示出的是接收到的信号开始的大约时间。

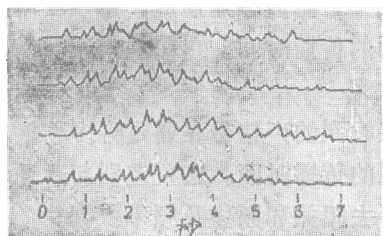


图4. 爆炸脉冲的包络。在百慕大群岛以南 10° , 600 哩处, 离开声道轴的一个圆周上接收。

的包络是由于声源和接收器都在声道轴线上时, 在同一传播时间内有大量的声线重迭而造成的。当声源或接收器, 或者两者都远离声道轴时, 包络就变得不规则了, 如图 4 所示, 图中声源深度为 800 呎, 接收器在 4000 呎声道轴上。利用这个几何布设, 多途径变得可分解了。包络的每一个突起(blob)代表一个离散的、可识别的多途到达信号。

目标本身也引起畸变（甚至在有传播影响的情况下），因为目标在距离上有延伸以及散射和反射在某种程度上是沿着整个目标产生的。图 5 示出一个 15 毫秒的脉冲的两个回波，它们是在一个短距离内（这时传播影响可忽略不计），从一个运动的潜艇上反射回来的，其时间相差 1 秒。在此，同样也出现时间延长。此外，在两个回波波形之间很少有相似之处，这是由于潜艇的舵手想把潜艇操纵得平稳一些，航向上有一点变化引起的。

来自一个潜艇的爆炸回波也表现出很大的畸变，甚至在正横方向上也是这样，如图 6 所示。这里主要的责任似乎归于是多途传播，它们使爆炸声源的典型的近场特征，在回波中变得难辨认了。

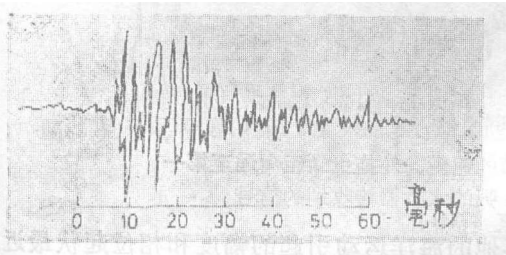


图6. 从潜艇近正横方位反射回的一个爆炸回波。

起伏

从一稳定声源来的信号到达一定距离外的接收器上时，会观察到起伏。起伏是由下列原因引起的：①多途径传输；②声源、目标和

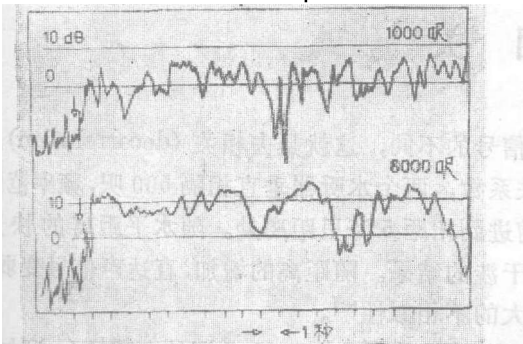


图7. 在两个深度上观察到的起伏；声源距离 5 哩，稳定连续波信号，1120 赫。

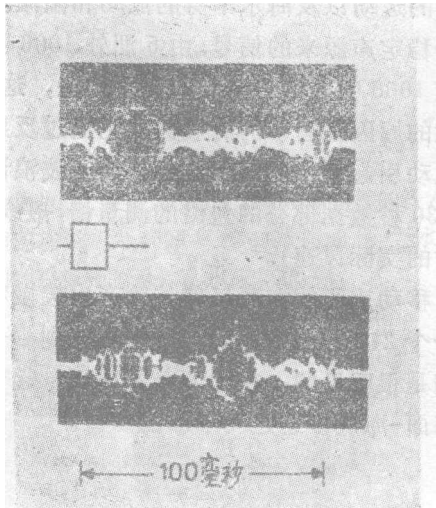


图5. 从一个近距离潜艇上反射回来的两个相隔 1 秒的回波的照片。两图中中间的矩形是由声源发出的脉冲的包络。

由于畸变，求接收信号形状和已知存储波形间的相关不再是声纳回声测距处理的有效方法了。脉冲波形不是一个平顶 (flat-topped) 正弦，或者线性调频信号时很难获得有益的增益。

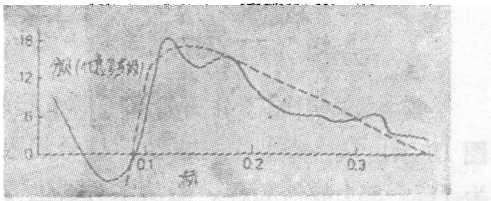


图8. 接收信号包络的调制谱；275 赫连续波声源以 2.7 节速度在 23 哩距离处拖曳；虚线是风速为 20 节时的 Neuman-Pier-son 波浪谱；分析带宽 0.02 赫。

海面的运动以及海水本身的流动和湍流。在全部冰冻的海洋中将没有起伏存在。图 7 示出, 从一稳定声源来的信号, 由 5 哩外 1000 呎和 8000 呎水听器接收到。在 8000 呎深度接收的信号较 1000 呎的信号要强些和平稳些, 这是因为在较深的深度下, 存在着直达声信道。引起起伏的原因是运动的海表面, 它通过反射和散射造成了多途干扰和相应的起伏信号。海水表面运动引起较快的起伏。起伏谱和波浪谱完全一样, 如图 8 所示。图中, 实线曲线是图 9 中 3—30 秒数据部分的包络的测量谱, 虚线是计算出的 Neuman-Pierson 波浪谱(风速为记录数据时的实际风速)。

移动声源的海底反射传输产生较慢和较大的起伏, 如图 9 所示。图中我们看到的起伏是当一个 275 赫稳定声源向外拖曳直到第一个会聚带时在两个深度下记录到的起伏^[2]。宽起伏频谱是很明显的。在这两个深度下, 起伏情况没有多少明显的相似。这是因为声源运动引起的海面-海底多途之间干涉的缘故。

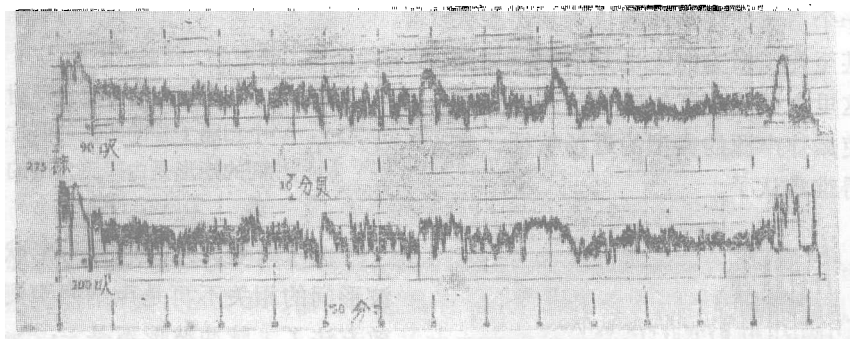


图9. 一个 275 赫连续波声源以 2.7 节的速度向外拖曳到距离远至第一会聚区时, 由深度为 90 呎和 300 呎的水听器接收到的信号

在一固定声源和接收器之间, 由于内波和其他的海洋运动引起的幅度和相位起伏最近受到理论上^[3]和实验上^[4,5]的注意。

总之, 不管引起起伏的原因是什么, 根据最近的研究^[6]看来, 幅度起伏遵循一修正过的瑞利(或“Rician”)分布, 并具有一个取决于多途干涉速率的时间标度^[7]。

起伏现象使目标在信号突起(Surge)时, 可被探测到, 但在信号衰落时, 会失去目标。它们阻碍了应用长时间积累来探测信号。

去 相 关

多途效应引起了分离的水听器上接收到的信号的不同, 这就是去相关 (decorrelation)。图 10 示出从一个船上发出的声信号的限幅相关系数, 两个水听器垂直相隔 500 呎, 频率范围为 117—354 赫倍频程。船从水听器上方向外前进到相距 5 海里距离处。随水平距离的快速去相关是从声源来的直达声和海底反射的多途干涉的结果。随距离的增加, 直达声信号变弱, 干涉场变强, 造成两个接收器接收波形之间较大的不相似性^[8]。

另一个例子示于图 11。图中示出, 当 1120 赫连续波声源进入 29.5 哩处会聚区(α)时在一个水听器上的电平级和在垂直相隔 2.2 呎的两个水听器之间的限幅相关系数。在会聚区中,

由于一个单一的和强的会聚通道的出现，信号的电平级和相干都比在较短距离内大。这样，在会聚区的一个垂直基阵的性能比在会聚区外要好。这是因为它不但有一个较高的信号级，同时还有一个较高的阵增益。

信号的去相关限制了在检测中利用基阵尺寸来增加信噪比或阵增益。换句话说， n 个阵元的阵的增益小于 $10\log n$ ，这个差值与不相关声信号在整个接收信号中所占的比数成正比。

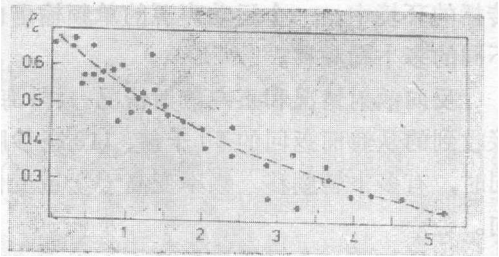


图 10. 带宽为 177—354 赫倍频程的浅水连续波声源在深度为 4000 呎和 4500 呎的两个水听器之间的限幅相关系数。水深 7000 呎。

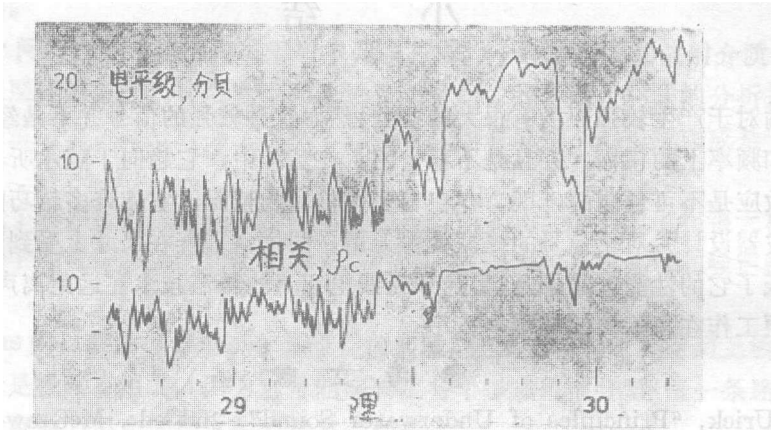


图 11. 信号电平级和相隔 2.2 呎的水听器之间的相干；一个 1120 赫连续波声源被拖曳进入一会聚区。

频率效应

由于多途传输，单频信号出现了边带，也就是说，产生了频率模糊。图 12 示出，由一个固定声源发出信号，用一个固定接收器在 19 哩的距离上接收的信号谱。边带 A 和 A' 是由不平整的运动海面造成的，后者调制接收到的信号并将自己的谱迭加到载频的谱上^[9]。在多途

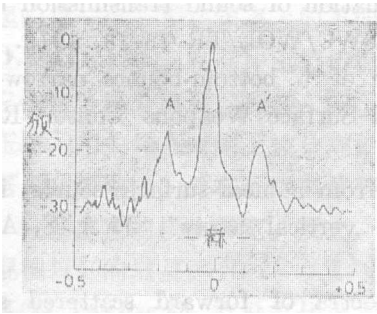


图 12. 浅水中，19 哩处，100 毫秒、1702 赫脉冲的前向散射的频率扩展。分析带宽 0.01 赫。美海军水下系统中心数据。

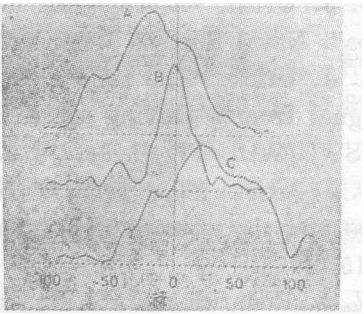


图 13. 60 千赫、110 毫秒脉冲的海面反向散射(混响)谱。A. 逆浪；B. 声源谱；C. 顺浪。30°掠射角。Igarashi 和 Stern 的数据。

传播的环境中, 一个运动声源的单频输出也将产生模糊, 这是由于沿着不同途径传播将产生不同的多卜勒频移。

反向散射情况和正向散射情况一样, 海面使谱变宽和频移。图 13 示出, 在掠射角 30° 时, 接收到的从海面返回的 60 千赫、110 毫秒脉冲的混响(反向散射)谱^[10]。源脉冲(B)的谱变宽, 同时, 有多卜勒频移。频率变高(C)或变低(A)依赖于声投射到海面上时是顺风向还是逆风向。

尽管频率效应较小, 但是它在水下通讯和被动探测中变得很重要, 因为它使得在信号接收时, 要求使用较宽的滤波频带。

小 结

多途传输对于产生较强声场有很大的益处, 然而这种较强的信号并不是经常可以利用的。它有时间上和频率上的模糊, 并且是不稳定的。在基阵中, 它趋向于随水听器间距而快速去相关。这些效应是不可预测的, 因为存在着多途传输的情况。它使许多精巧的技术(如求相关和匹配滤波器设计)对于信号的提高变得无用。同样, 基阵在尺寸上受到限制, 并由于多途传输而降低了它的性能。结果是, 雷达和无线电通讯的精湛技术在远距离声纳中是无用的, 因为声纳必须工作在多途传输环境中。

参 考 文 献

- [1] R. J. Urick, "Principles of Underwater Sound", 2nd ed., McGraw-Hill Book Co., New York, 1975, Fig. 6. 10, traces 6 and 16.
- [2] R. J. Urick, "Amplitude fluctuations of the sound from a moving source in the deep sea", Naval Ordnance Laboratory Report, NOLTR 74-156, 1974.
- [3] W. H. Munk and F. Zachariasen, "Sound propagation through a fluctuating stratified ocean", J. A. S. A. **59**, 818, 1976.
- [4] J. G. Clark and M. Kronengold, "Long period fluctuations in deep and shallow water," J. A. S. A. **56**, 1071, 1974.
- [5] R. M. Kennedy, "Phase and amplitude fluctuations in propagating through a layered ocean", J. A. S. A. **46**, 737, 1969.
- [6] R. J. Urick, "A statistical model for the fluctuation of sound transmission in the sea", Naval Surface Weapons Center Report NSWC/WOL/TR 75-18, 1975.
- [7] R. J. Urick, "The time scale of the fluctuation of a bottom-bounce narrow-band signal from a moving source in the sea", Naval Surface Weapons Center Report NSWC/WOL/TR 75-83, 1975.
- [8] R. J. Urick, "The vertical coherence of sound from a near-surface source in the sea and the effect on the gain of an additive vertical array", J. A. S. A. **54**, 115, 1973.
- [9] W. I. Roderick and B. F. Cron, "Frequency spectra of forward scattered sound from the ocean surface," J. A. S. A. **48**, 759, 1970.
- [10] Y. Igarashi and R. Stern, "Observations of wind-generated doppler shifts in surface reverberation," J. A. S. A. **49**, 802, 1971.

讨 论

K.G.Beauchamp 问: 我对声纳信号处理不太熟悉,但对地震波处理有些经验。利用延迟线的水听器基阵能在多大程度上把探测限制在一个特殊的方向上,以提高信噪比并使问题简化呢?地震信号处理方面的一个例子就是设在蒙大拿的 LASA 基阵,用于声纳上的基阵有和这相类似的吗?

答: 在声纳中最接近的型式是灵活的长线阵,它同地震拖缆相类似,但在形成波束时是在阵元输出处应用时间延迟。这些波束是应用 DIMUS 技术(包括限幅和移位寄存器时间延迟)同时形成的。

P.E.Cable 问: 在什么范围内可把海水介质考虑为一种非相关的散射介质? Bello 在一种点对点的对流层通讯联系中曾对这个问题进行了考察。我怀疑,同样的分析是否也可应用于水下直达声信道。在大部分情况下,水下海面散射通道可能不能被考虑成是非相关散射通道。

答: 我不太了解你所谈的工作,不过通过实验我们发现,表面通道在很大程度上是相干通道。传输的相干性可望取决于海况的频率。目前,对表面声道的信号和噪声的相干特性了解得不多。

L.Griffiths 问: 有没有作过多个传感器的实验,使多途传输可在空间上被分解。可能会发现,这种测量是极其有用的,因为它可能确定各个多途传输分量(每一条途径)有无足够的空间和时间稳定性,以允许把这些分量组合起来。

答: 据我所知不是这样,但我同意这样的测量将会是有用的。曾经用爆炸声作过许多研究工作,它们表明,一个单个的多途传输具有相当的空间和时间稳定性。但是在回声测距中,应用足够短的脉冲去分辨多途是困难的。在被动声纳中,实现一个只存在一个单途传输的几何布置也是困难的。

N.L.Owsley 问: 对于相干多途径的重新组合 (recombination),你预料有多大的成功机会?你是对于什么情况作的这个预测?

答: 这是关于所包括的每一个多途径的稳定性问题。如果重新组合可以在去相关时间限制内实现,那么当然有可能去作相干组合。但是在这个过程中,声源——接收器的相对运动所引起的每一个行程在频率上的不同,会是一个复杂的因数。

D.Saxton 问: 在脉冲压缩传输中,由多途径造成的接收信号去相关肯定是一种优点,因为它会使多途分离更容易些,即①直达声有好的相干性;②多途的相关很差。因此,由于脉冲压缩,相关峰在时间上被分离,而由于去相关,幅度降低。

答: 在声纳中,要在远距离分辨出多途传输,则要求脉冲长度非常短。短脉冲很难处理,同时,它要求宽的接收带宽。反之,在声纳中,利用长脉冲进行远距离探测,以便获得对噪声和混响较好的增益。

R. G. Taylor 问: 有没有什么方法使由多途和起伏引起的信号强度衰减,能通过宽带传输而得到平滑?

答: 频率分集 (diversity) 是使起伏平滑的一种方法。但是对远距离探测来说,起伏与其说是不期望的,倒不如说是所期望的,因为目标首先是在信号突起 (surge) 时被探测到。同时,

在声纳中，宽带频率分集是很困难和昂贵的，因为这时要求用多个声源。

C. Van Schooneveld 问：在文献中，分集(diversity)的概念出现于有关的信号起伏中。我想作以下说明：当信号起伏出现时，信噪比 SNR^* 以一定的带宽 σ 围绕平均值 $SNR_{平均}$ 有一概率分布。原则上讲，分集系统的目的是在保持 $SNR_{平均}$ 近似为一常数时降低 σ 。当 $SNR_{平均}$ 是个大值时，降低 σ 是所期望的，因为它可减少当 SNR 偶然为小值时，偶然漏报的概率（例如，在数据通讯系统中的比特探测）。另一方面，当 $SNR_{平均}$ 是低值时， σ 的降低是不希望的；在这种情况下，当 SNR 值偶然高时，起伏的降低会漏掉偶然的报警（例如，在远距离主动雷达或声纳系统中）。总而言之，是否希望抑制起伏取决于 SNR 的平均值。我觉得，这就是在数据通讯中利用分集系统和在雷达与声纳中不用它的原因。（为避免误解，需要补充一点，就是一些分集系统，不只能获得 σ 的降低，而且能增加 $SNR_{平均}$ 。例如，空间分集，其中第一个天线附加到第二个天线上时，探索区域就会增大。在这些情况下，很清楚，所给出的结论必须被修正。）

答：上面讲到的有关起伏的抑制和加强的看法，确实是很有说服力的和有道理的。我还要补充讲一点，除频率分集和空间分集作为降低起伏的工具外，还有一种更简单的和更为人们了解的方法，就是时间分集或平滑（如在后检平均器中）。同样，它需要依赖于平均信噪比：在信噪比高时，为避免丢失目标的检测，使用长时间平均；在信噪比低时，使用短时间平均，以利用信号的突起的优点。至于怎样算“短”时间，怎样算“长”时间，要依赖于相干时间，或信噪比自相关函数曲线接近于零点的延迟。但在声纳的实际情况中，这些还不太清楚。

（顾保缺译 徐为方校）

* 原文为 SMR，疑有误。——译校注