声传播对信号处理的影响

R. Laval

（意大利SACLANT反潜研究中心）

一、引　　言

声传播的经典研究主要涉及能量传输因子。当然，在有背景噪声的情况下，任何设备的工作需要在接收器处有充分可利用的能量。但是，一旦设备包含了比较先进的信号处理技术，要去评价它或使其最佳化，能量传输因子就不够了。为此必须从通讯的观点，即从介质保持包含在传播信号中的信息的能力这样一种观点去研究传播。

已知水声通讯信道是非常复杂的、了解不充分的信道。多途效应、水中的不均匀性、边界的不平整、海面以及海底会引起不同类型的畸变，它们同时造成最佳信号处理工作的复杂化，并且降低整个设备的性能。显然，对任何用水声作为信息的物理载体的检测、分类、估值或通信设备的评价和最佳化，所有这些信道性质的全部知识是必不可少的。

具备预期通过此信道传输的载有“消息”的信息的种类和性质的很多知识也是很重要的。对于被动声纳，消息包含在目标的辐射噪声中。就主动声纳而言，它用目标的散射性质来表示。在诸如潜艇这样大而复杂的结构的情况下，这些散射性质可以预期是相当复杂的。

从发射信号、阵布局以及噪声与混响性质的观点致力于检测和估值的最佳处理业已做了大量的理论工作，由此可设计完善的检测、分类、跟踪或通信设备。然而，这些理论的大部分在被应用时对传播效应和目标性质都假设了相当简单的数学模型。作者认为，为了使今后所设计的设备取得技术进展的全部优点，这些模型的现实性必须从本质上有所改善。

但是问题并不简单，因为水声信道的一个主要特征是它随环境条件（位置、季节、天气等）和布局的显著可变性。

然而，使用数字计算机的可能性为信号处理打开了一个新的局面。现在可以用软件去实现一系列相当复杂的运算，这些运算在几年前则需建立巨大的硬设备。软件解决办法所得到的几乎是无限的灵活性提供了自适应处理的可能性，以便适应影响设备最佳化的环境条件的改变。

本文力图以相当扼要的形式阐述时变空变信道统计分析的原理，使得这些原理能以信号处理便于应用的形式来定义水声信道。

二、时变信道的表征

固定点源和接收器间的传播介质可视为对发射信号进行变换的一个滤波器[1,2]。除大

振幅信号外，可认为此变换是线性的。它可用其传输函数H(f)或脉冲响应h(τ)来定义；H(f)是等效滤波器的频率响应，h(τ)是H(f)的付里叶变换。对时变信道，传输函数（及脉冲响应）必须看做是与时间有关的函数。于是我们有：

与时间有关的传输函数：H(f,t)

与时间有关的脉冲响应：h(τ,t)

将H和h对t进行付里叶变换，得新变量Φ的两个新函数[2]：

双频函数：B(f,Φ)

扩展函数：S(τ,Φ)

H(f,t)、h(τ,t)、B(f,Φ)及S(τ,Φ)四个系统函数中的任何一个可用来完全确定源和接收器间的时变信道。若它能精确知道的话，则在接收机中可对所接收到的信号进行反变换来完全补偿介质的变换。然而实际上这一般是不可能的。传播介质的滤波功能是相当复杂的，因为它们表示大量不同物理因素的总效果。信号在声源和接收器间沿不同路径传播，各个路径对应于不同的到达时间和不同的畸变。由H(f,t)或其任何付里叶变换所定义的总变换可看成是很多子变换的组合，各子变换对应于每条路径使信号畸变的不同物理效果。

这些子变换可被分成两类：

（i）确定性变换：多途效应、平坦分层海底的反射、均匀波导（浅水或表面声道）的色散效应等。

正如我们已指出的那样，若（从理论模型或局部测量等）已知这些变换，则它们不减少信号的信息含量，因为原则上可对它们进行补偿，所付的代价只不过是增加了最佳接收机结构的复杂性。

(ii) 随机性变换：它们主要是由表征水介质和边界的那些小尺度不均匀性所引起的散射效应造成的（温度微结构、湍流、内波及海面、海底的不平整）。它们只能用统计的方法来描述，其效应不能在接收机中进行补偿，因此它们引起信息的减少。

三、随机时变信道的表征

当介质所进行的变换具有随机性时，上面所定义的四个系统函数变成随机函数。

按文献[2]和[3]，各系统函数可用四个变量的自相关函数作二阶表述：

$$R_H(f,f',t,t')=\overline{H(f,t)H^*(f',t')}$$

$$R_h(\tau,\tau',t,t')=\overline{h(\tau,t)h^*(\tau',t')}$$

$$R_B(f,f',\Phi,\Phi')=\overline{B(f,\Phi)B^*(f',\Phi')}$$

$$R_S(\tau,\tau',\Phi,\Phi')=\overline{S(\tau,\Phi)S^*(\tau',\Phi')}$$

式中一横表示系综平均。

对随机过程的性质引进一些限制性的假设后，它们可减化为仅有两个变量的函数。

这些限制涉及两件事[3]：

(i) 时间上的广义平稳：信道的自相关函数不随时间的平移而改变，故相关函数R_H和R_h仅取决于时间差Δt，而与绝对时间t和t'无关。因此当$\Phi\neq\Phi'$时相关函数R_B和R_S为零。

(ii) 非相关散射：当$\tau\neq\tau'$时，自相关（函数）R_h和R_S为零。因此，相关函数R_H和R_B仅取决于频率差Δf，而与绝对频率f及f′无关。这种情况可以说成是系统是广义频率平

稳的。

非相关（时间）散射等价于广义频率平稳的条件。

同理，广义时间平稳的条件等价于非相关频率散射的条件。

当这两个条件同时出现时，我们有广义平稳非相关散射信道（Wide Sense Stationary Uncorrelated Scattering Channel，即WSSUS 信道）。四个自相关函数减化成仅有两个变量的函数：

$R_H(\Delta f, \Delta t)$

$R_h(\tau, \Delta t)$

$R_B(\Delta f, \Phi)$

$R_s(\tau, \Phi)$

这四个函数互为付里叶变换。函数$R_H(\Delta f, \Delta t)$是所谓的时间频率相关函数。函数$R_s(\tau, \Phi)$是所谓的散射函数。基于如下原因，它在雷达和声纳中受到特别的注意：

在理想传播条件下，回声定位设备的距离和多普勒分辨力由发射信号x(t)的时间频率模糊度函数$G(\tau,\Phi)$所决定。$G(\tau,\Phi)$是与输入信号x(t)匹配的滤波器在时域移动τ和频率域移动Φ时的平方输出。

随机不均匀介质中同一设备的距离和多普勒分辨力则由表示信号和介质的联合效应的模糊度函数$E(\tau,\Phi)$来表示。$E(\tau,\Phi)$可看成是点目标的回波信号作输入时与x(t)匹配的滤波器的均方输出。

对窄带信号，基于信道是广义平稳非相关散射信道（WSSUS）的假设，可以证明，将（信号）模糊度函数和介质散射函数求卷积可得信号和介质的复合模糊度函数：

$$E(\tau,\Phi)=\iint G(\tau-\zeta,\ \Phi-\xi)R_s(\tau,\Phi)d\zeta d\xi$$

$R_s(\tau,\phi)$可视为另一模糊度函数，它表述在距离—多普勒空间中介质固有的分辨极限。

恒速点目标在距离—多普勒空间中不再被看成是一个点而是一团"云"。$R_s(\tau,\Phi)$定义此云的能量密度。

下面讨论散射函数的某些性质：

信号x(t)的信号模糊度函数已知有强的限制性性质。它是对τ和Φ对称的非负实函数，并对应于"不确定性原理"的条件：

$$G(0,0)=1 \qquad 0\leqslant G(\tau,\phi)\leqslant 1$$

$$\iint G(\tau,\Phi)d\tau d\Phi=1$$

甚至满足这些条件时，也只有有限类的两个变量的函数可当做信号可能的模糊度函数。

散射函数除了应是非负的实函数以外没有任何这些限制，因而它可取任意形状。

对理想传播条件，它简化成狄拉克脉冲（没有模糊）。信道则被说成是"完全相干"的。

常常遇到的是$R(\tau,\Phi)$为狄拉克脉冲$k\delta(\tau_0,\Phi_0)$与扩展函数$r(\tau,\Phi)$之和：

$$R(\tau,\Phi)=k\delta(\tau-\tau_0,\Phi-\Phi_0)+r(\tau,\Phi)$$

式中k是常数。此时信道被说成是部分相干的。这点以后要讨论。

二维散射函数$R(\tau,\Phi)$（或其三个付里叶变换的任一个）是WSSUS信道的完全的二阶统计描述。

为（实验或理论上）简便起见，常用两个一维函数组来代替它：

距离（时间）散射函数$R_\tau(\tau)$；

多普勒（频率）散射函数$R_\Phi(\Phi)$。

它们的定义为

$$R_\tau(\tau)=\int R(\tau,\ \Phi)\,d\Phi$$

$$R_\Phi(\Phi)=\int R(\tau,\ \Phi)\,d\tau$$

$R_\tau(\tau)$可看做是脉冲响应$h(\tau,\ t)$的均方值，它不再是t的函数：

$$R_\tau(\tau)=\overline{h^2(\tau,\ t)}$$

式中一横表示系综平均。

例如，平均可就时间间隔比信道的时间相关尺度大时所取的一系列平方脉冲响应来进行（回波与回波间脉冲响应平方包络的平均）。

$R_\Phi(\Phi)$可看做为双频函数$B(f,\ \Phi)$的均方值，它不再是f的函数：

$$R_\Phi(\Phi)=\overline{|B(f,\Phi)|^2}$$

当发射信号是频率为f_0的正弦信号时，接收信号的功率谱为

$$R(f_0+\Phi)$$

按理要统计地描述这种过程，两个函数$R_\tau(\tau)$及$R_\Phi(\Phi)$是不充分的。因为根据距离模糊$R_\tau(\tau)$和多普勒模糊$R_\Phi(\Phi)$的知识确实不能唯一地重建复合距离和多普勒模糊度函数$R(\tau,\ \Phi)$。

然而，实际上常常遇到的是$R_S(\tau,\ \Phi)$可合理地用$R_\tau(\tau)$和$R_\Phi(\Phi)$的乘积来近似：

$$R_S(\tau,\ \Phi)\approx R_\tau(\tau)\,R_\Phi(\Phi)$$

或者，在部分相干的情况下取下述近似：

$$R_S(\tau,\ \Phi)\approx k\delta(\tau_0,\ \Phi_0)+r_\tau(\tau)\,r_\Phi(\Phi)$$

然而，一般说来，这种简化仅适用于简单的相当确定的物理过程的散射，諸如体积或表面散射，对与多途信道相联系的总过程是无效的。

四、随机空变信道的表征

暂且不管时间关系，频率响应$H(f)$和脉冲响应$h(\tau)$显然是声源和接收器位置的函数。它们可写成

$$H(f,\ \vec{s},\ \vec{r})\text{ 及 }h(\tau,\ \vec{s},\ \vec{r})$$

式中$\vec{s}$和$\vec{r}$是点源和接收器的位置矢量。

类比于时变信道，这些函数可相对于空间变量作付里叶变换（和前节它们相对时间变量所做的变换一样[4]）。

首先假定声源或接收器沿座标x变化（不管x轴的方向如何），从而在空间上把问题简化成一维的。

与x有关的传输函数和脉冲响应为$H(f,\ x)$及$h(\tau,\ x)$，它们相对于x的变换分别是B

(f, U) 及 $S(\tau, U)$。空变信道的变量 U 对应于时变信道的 Φ（频率扩展变量）。

用沿 x 空间平稳的条件代替时间平稳的条件，我们可在空间上定义WSSUS信道，从而得一系统，其四个自相关函数互为付里叶变换，并仅与两个变量有关。特别是这些函数中的一个是散射函数

$$R_S(\tau, U)$$

变换可扩展到空间沿 x 及 y 座标二维变化的情况。

将 $H(f, x, y)$ 及 $h(\tau, x, y)$ 对 x 和 y 进行二维付里叶变换，我们得 u 和 v 的函数：

$B(f, u, v)$　等效于双频函数

$S(\tau, u, v)$　等效于扩展函数

我们也能定义等效的散射函数（将WSSUS信道推广到 x 及 y 二维）

$$R_S(\tau, u, v)$$

现在的问题是找出新变量 u 及 v 的物理意义。

我们假定：x 和 y 表示垂直于平均传播方向的平面中接收器之水平和铅垂座标。

传输函数 $H(f, x, y)$ 则描述频率为 f 的单色波在与 (x, y) 平面相交时振幅和相位的起伏。（我们仅考虑球面扩散可忽略的平面中的有限区域）。

平面波分解理论证明，$H(f, x, y)$ 可看成是无数子平面波与基阵相交的结果。

每一个子平面波由其方向 $\vec{\theta}$ 所确定（它可分解成水平和垂直方向 θ_H 和 θ_V）。这些子波的振幅和相位由指向性函数 $d(f, \theta_H, \theta_V)$ 给定。

已知 $H(f, x, y)$ 和 $d(f, \theta_H, \theta_V)$ 由付里叶变换关系相联系：

$$d(f, \theta_H, \theta_V) = \iint H\left(f, x, y\right) exp\left\{-2\pi i f\left[\frac{\sin\theta_H}{c}x + \frac{\sin\theta_V}{c}y\right]\right\} dxdy$$

这证明，作替换 $u = \frac{f}{c}\sin\theta_H$ 及 $v = \frac{f}{c}\sin\theta_V$，可把 $B(f, u, v)$ 和 $d(f, \theta_H, \theta_V)$ 视为同一的，于是

$$B(f, u, v) = B\left(f, \frac{f}{c}\sin\theta_H, \frac{f}{c}\sin\theta_V\right) \equiv d(f, \theta_H, \theta_V)$$

我们能以同样的方式定义空间散射函数（对应于时变信道的多普勒散射函数）：

$$R_{\vec{\theta}}(u, v) = \overline{|B(f, u, v)|^2}$$

它不再包含 f 作为分离变量的项。

$$R_{\vec{\theta}}(u, v) = R_{\vec{\theta}}\left(\frac{f}{c}\sin\theta_H, \frac{f}{c}\sin\theta_V\right) = |d(f, \theta_H, \theta_V)|^2$$

则表示声源发单频 f 时与 (x, y) 平面相交的波的角功率谱。

正如 $R_{\Phi}(\Phi)$ 是频率扩展域 Φ 中的模糊度函数一样，$R_{\vec{\theta}}$ 可看为角度域 $\vec{\theta}$ 中的模糊度函数。差别在于角模糊度函数的频率关系，因为 u 和 v 作为 θ_H 和 θ_V 的函数含有因子 f。我们确实能确定总的系统－介质角模糊度函数，它是介质模糊度函数和系统模糊度函数的组合。让我们把系统看成是 (x, y) 平面中的接收阵，此阵有指向性函数 $e(\theta_H, \theta_V)$，它与阵权重函

数w (x,y) 的关系是付里叶变换关系：

$$e(f,\theta_H,\theta_V)=\iint w(x,y)\exp\left\{-2\pi if\left[\frac{\sin\theta_H}{c}x'+\frac{\sin\theta_V}{c}y\right]\right\}dxdy$$

阵的功率指向性函数可写成形式：

$$|e(f,\theta_H,\theta_V)|^2=D\left(\frac{f}{c}\sin\theta_H,\ \frac{f}{c}\sin\theta_V\right)=D(u,v)$$

D表示角空间中阵的模糊度函数。

阵加介质的总的角模糊度函数是系统模糊度函数$D(u,v)$和介质模糊度函数$R_{\vec{\theta}}(u,v)$的卷积：

$$E_{\vec{\theta}}(u,v)=E_{\vec{\theta}}\left(\frac{f}{c}\sin\theta_H,\ \frac{f}{c}\sin\theta_V\right)=D(u,v)*R_{\vec{\theta}}(u,v)$$

换句话说，对于强指向性阵而言，一个点源已不再是一个点而是角空间的一团“云”。

$R_{\vec{\theta}}\left(\frac{f}{c}\sin\theta_H,\ \frac{f}{c}\sin\theta_V\right)$给出这团云的密度分布，其角度大小正比于$1/f$。

角散射函数$R_{\vec{\theta}}(u,v)=\int R_s(\tau,u,v)d\tau$

$R_s(\tau,u,v)$是介质的距离与角度模糊度函数。

系统在距离—角度空间中的模糊度函数G (τ,u,v) 则是两个独立模糊度函数的乘积：

$G(\tau,u,v)=R(\tau)\cdot D(u,v)$

式中$R(\tau)$是发射信号的距离模糊度函数，D是指向性阵的功率指向性函数。总的距离—角度模糊度函数系为系统和介质模糊度函数的卷积：

$E(\tau,u,v)=[R(\tau)\cdot D(u,v)]*R_s(\tau,u,v)$

一个点源在具有高距离—角度分辨力的设备看来则是三维空间的一团云。

形象地描述随机空变介质的另一途径是：介质随机性引起的扰动导致波阵面凹凸不平。

复传输函数H可写成

$H(f,x,y)=A(f,x,y)exp[i\varphi(f,x,y)]$

取一级近似，若在 (x,y) 平面中起伏的相关距离比波长大得多，则对应于频率f的波阵面是下述方程所确定的三维表面：

$$\varphi(f,x,y)-\frac{zf}{c}=0$$

式中z是沿传播轴的座标。对z解方程得$z(f,x,y)$。它表示给定频率的波阵面相对于 (x,y) 平面的偏离与座标x,y的关系。

我们规定不平整波阵面的局部法线是局部的传播方向$\vec{\alpha}(x,y)$。可把$\vec{\alpha}(x,y)$分解成水平方向α_H和垂直方向α_V。

人们可规定此局部传播方向的概率密度$p(f,\vec{\alpha})=p(f,\alpha_H,\alpha_v)$，一般说来它是$f$的函数。

$p(f,\alpha_H,\alpha_V)$与角散射函数$D(f/c\sin\theta_H,f/c\sin\theta_V)$不同。$p(\vec{\alpha})$ 与 $D(\vec{\theta})$的关系就如同被调制的时间信号的瞬时频率分布与其付里叶功率谱的关系一样。

五、时变空变随机信道

时变、空变随机信道可用传输函数$H(f,t,\vec{s},\vec{r})$或脉冲响应$h(\tau,t,\vec{s},\vec{r})$来描述。将空间座标减少成接收器所在的垂直于传播方向的平面中的二维座标x，y（与上节类同），我们可把距离、多普勒、角度模糊度函数定义成四个变量的散射函数：

$$R_s[\tau,\Phi,u,v] \qquad \text{其中}\ u=\frac{f}{c}\sin\theta_H$$

$$v=\frac{f}{c}\sin\theta_V$$

它把一个点源表示成距离、多普勒、角度四维空间的一团云。

六、源和(或)接收器运动的情况

在时变、空变信道最一般的情况中，传输函数和脉冲响应可写成

$H(f,t,\vec{s},\vec{r})$

$h(\tau,t,\vec{s},\vec{r})$

如果源及接收器是运动的，其相应的座标$\vec{s}$及$\vec{r}$变成时间的函数，因此随时间变化的声源—接收器信道可用$H[f,t,\vec{s}(t),\vec{r}(t)]$或$h[\tau,t,\vec{s}(t),\vec{r}(t)]$来表征。

为简化问题，让我们假设，介质仅系空变，接收器以恒速沿垂直于传播方向的水平座标x运动。

因此，脉冲响应$h(\tau, x)$可写成$h(\tau, vt)$。

$h(\tau, x)$相对于x的付里叶变换给出扩展函数：

$S(\tau, U)$

$h(\tau, vt)$对于t的付里叶变换给出$S(\tau, v\Phi)$。

距离-角度扩展函数变成距离-多普勒散射函数$S(\tau, v\Phi)$，散射函数$R_S(\tau,U)$同样简化成$R_S(\tau, v\Phi)$。

在动态場合中，诸如海底不平整的纯空变效应将会产生多普勒扩展。

对时变空变介质，时变引起的多普勒扩展和动态空变效应引起的多普勒扩展是复合在一起的。

给出这两个效应的相对量级的大小可能是有意义的：

对于表面散射及以数节速度运动的声源和/或接收器，两种效应是可以比拟的。

对于体积散射，除了很特殊的海况外，时变和水质量内部运动相联系，后者一般比漂移的（声纳）载体的最慢移动小很多，此时体积时变效应被动态空变效应所掩盖。

七、部分相干散射

我们业已了解到，无论是应用于时变信道、空变信道还是时、空变化信道，介质传输函数 $H(f)$ 可用复数形式来表示：

$$H(f)=A(f)e^{i2\pi\varphi(f)}$$

式中 $A(f)$ 和 $\varphi(f)$ 表示单色声場的振幅及相位起伏。传输函数可用一个调制向量来表示，它随时间、随空间或同时随时、空变化。

当随机相位函数 φ (f, t, x, y) 在 2π 内均匀分布时，则说过程是完全不相干的。

如果情况不是如此，则可确定一个平均相位值 $\overline{\varphi}$。当振幅 A 围绕其平均值 $\overline{A}$ 起伏时，相位 φ 则围绕平均值 $\overline{\varphi}$ 起伏。

可以把矢量 $Ae^{i\varphi}$ 分解成一个固定矢量 $\overline{A}e^{i\overline{\varphi}}$ 和一个相位均匀分布的、均方根振幅为 $\overline{\rho}$ 的矢量 ρ 之和。

换句话说，随机过程可划分为完全相干的确定性过程和完全不相干的随机过程两部分，这就叫做“部分相干”。

相干因子可定义成一系数：

$$\gamma=\frac{\overline{A}^2}{\overline{A}^2+\overline{\rho}^2} \qquad 0\leqslant\gamma\leqslant1$$

因此，散射函数 $R(\tau, \Phi, \theta_H, \theta_V)$ 由狄拉克脉冲加一密度分散的散射函数 r 所组成：

$$R(\tau, \Phi, \theta_H, \theta_V)=G[\gamma\delta(\tau_0-\tau, \Phi_0-\Phi, \theta_{OH}-\theta_H, \theta_{OV}-\theta_V)$$
$$+(1-\gamma)r(\tau, \Phi, \theta_H, \theta_V)]$$

式中 G 是信道的总的能量增益，$G\cdot\gamma$ 是相干增益。

部分相干散射过程的物理意义是：在距离-多普勒-角度空间中的点源不再被看成单是一个简单的点源，而是被扩散的晕所包围的一个点源。大气的光传播中常可观察到这个效应。

八、散射函数概念的有效性

我们业已了解，信道的距离-多普勒方位模糊度函数完全可用一个散射函数来表征，后者仅包含一个与距离模糊、多普勒模糊以及垂直与水平方位模糊有关的变量。

这样一个散射函数存在的条件为信道应是广义平稳非相关散射信道，其意思是说，随机传输函数在频率、时间及空间上必须是广义平稳的。

我们要问，对水声信道，这三个条件是否成立？

形式上说来，回答是否定的：平稳性的三个条件没有一个是严格满足的。

(i) 水声中我们所涉及的所有散射过程有很强的频率关系，因此与频散效应有关，故“非相干散射”条件就不再满足。

(ii) 信道特征随季节、日期、昼夜而异，与气候条件密切相连。

（iii）传播效应强烈地依赖于源及接收器的相对位置，故空间平稳条件不满足。

为了保留散射函数的概念，我们可力求用局部平稳的较弱的条件来代替广义平稳的苛刻条件。

在这种假设下，仅需要在有限的时间、空间和频率变化范围内来考虑平稳性条件。

应把时间—空间—频率域分解成许多子域，在这些子域中过程可视为WSSUS。对于各个子域，散射函数应是确定的。

与时间、频率及空间有关的散射函数定义了所有季节（及天气）、频带及所有源—接收器收发布局的介质模糊度函数，因此用它可表征某一已知海域的信道。

仅当证明了为实际应用所考虑的系统所有尺度比局部平稳域小时，这种概念才是有意义的。

窄频带、小基阵的主动声纳一般是这种情况。

对诸如被动声纳或爆炸波回声定位仪之类的宽带设备，频率平稳性条件是不满足的。

对大于局部平稳域的大尺寸基阵，空间平稳的条件可能不满足。具体说来，表面声道或浅水中的垂直基阵可出现这种情况，这些場合的传播条件随深度迅速变化。

此外，散射函数的想法是立足于假设传播为纯随机过程。

我们业已了解到，总的水声传播过程一般是几种物理现象的联合效应，它可分解成确定过程和随机过程。

声源和接收器间的某些确定的变换过程的存在，通常使非相关散射的条件不能得到满足，因此使用散射函数的概念必须更为谨慎。这就是下一章我们力图要加以说明的。

九、几个散射过程的组合

我们来讨论多途传播的简单典型情况（图1）。

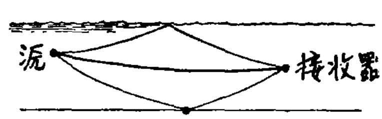

图1　多途传播的简单情况

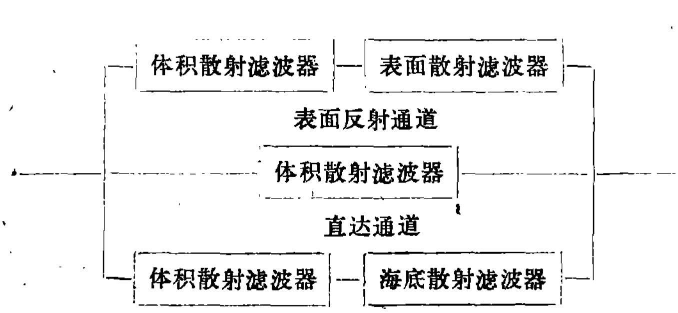

图2　相应于图1的复合滤波器

发射器和接收器由直达路径、海面反射路径和海底反射路径联系起来。直达路径经受体积散射的影响，海面反射路径同时经受体积散射和表面散射的影响，而海底反射路径同时经受体积散射和海底散射的影响。

整个信道可看成是一个复合滤波器（图２）。直达路径是一个“体积散射滤波器”。表面反射路径由“体积散射滤波器”和“表面散射滤波器”串联而成。海底反射路径由“体积散射滤波器”和“海底散射滤波器”串联而成。三组滤波器并联相接。我们把五个滤波器看成是独立的随机滤波器（因为声线是在不同的水域传播），体积和表面散射滤波器是时变和空变的，海底滤波器仅是空变的。

如果所有子滤波器是随机的、完全不相干的，将串联的滤波器传输函数求卷积，再加上并联通道的传输函数，则得复合滤波器的散射函数。

如果子滤波器是部分相干的，组合变得更复杂。每个滤波器可用由衰减器γ和非相干随机滤波器r相互并联而成的一个回路来表示，γ表示信道的相干传输损失，r表示单纯的非相干散射（图３）。

若一给定信道中所有串联的滤波器是部分相干的，则总的信道是部分相干的。信道的合成相干因子是串联滤波器相干因子元的乘积。然而，只要串联的滤波器有一个是完全不相干的，就足以使整个信道不相干。

如果有一个以上的并联通道是部分（或完全）相干的，总的脉冲响应会包含一个以上的、不同固定位置的狄拉克脉冲，这违反了非相关散射的条件，过程的总统计性质不能再单由散射函数来表示。

找出图３所示滤波器的一个等效复合滤波器可摆脱困境。此滤波器示于图４。

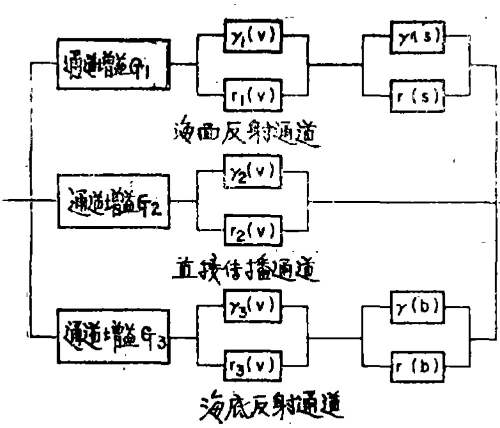

图３　图２所示的滤波器分割成相干及非相干回路

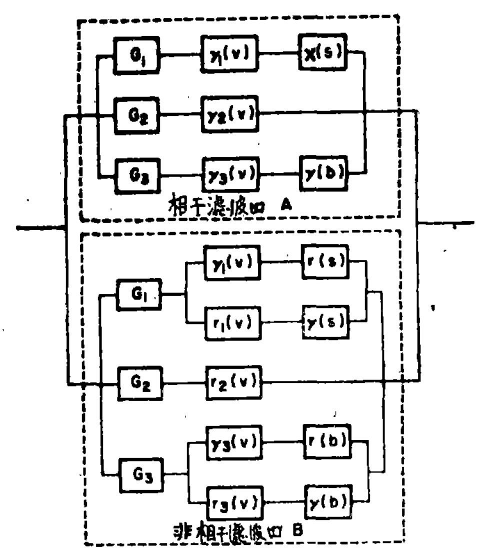

图４　图３的等效复合滤波器被分解成相干滤波器Ａ和非相干滤波器Ｂ

这个等效滤波器的串并组合被分成两个相互并联的主通道：

图上端的Ａ通道是仅包含γ项的串并组合，其脉冲响应简化为距离-角度空间不同位置的许多狄拉克脉冲（图中是三个）。Ａ通道是由多重狄拉克脉冲响应所表征的完全确定的滤波器。

下面的B通道是γ和r回路的串并组合。其特征是每个并联分支回路中至少有一个是随机非相干滤波器。

因此B通道是完全非相干随机滤波器，它可由其散射函数来统计确定。这个散射函数是和子滤波器有关的散射函数的相当复杂的串并组合（复杂性随各通道串联滤波器的数目迅速增长）。

到目前为止，我们仅讨论了γ项是常数的几个子随机过程的组合。随机过程和确定过程两者的组合可用类似的方法进行。为此将γ视为频率、时间和空间的确定性函数是充分的。

复合滤波器可分解成一个单纯的确定性滤波器A（可包括亦可不包括一些狄拉克脉冲）与一个完全不相干的随机滤波器B的并联。

事实上，确定性滤波器A表示描写信道的随机过程的平均值或一阶统计量。滤波器B表示过程对平均值的偏差或二阶统计量。

但是，随机过程和确定性过程间的区别并不总是明显的。表面声道或浅水中的传播可看成是大量声线（或简正波）的叠加。即使对非常简单的模型（如平坦海底、海面，恒声速梯度），它也会导致非常复杂的脉冲响应。这种脉冲响应随接收器深度和距离（x及z座标）变化很大，但不随沿垂直于传播方向的水平轴的变动而改变。因此将它处理为x和z的随机过程是方便的。

十、结　论

正如引言中所提到的，声传播的研究不应再局限于能量传输因子，而要把介质描述为通信信道。这种描述可采用这样一种形式，即定义一个与信道等效的复合时、空变化滤波器，该滤波器可被分解成一个确定性滤波器与一个完全不相干随机滤波器的并联。任何检测、估值或通信设备的评定或最佳化所必需的所有信息都包含在这个等效滤波器中。

这个滤波器的特征是，对各种可能的位置、季节、气候、频带和布局有相当大的事先不可能被精确定义的多变性。增进信道特征知识的方法可由三种不同的观点来考虑：科学方法、经验方法及局部估算法。

科学方法　这种方法在于实施一种研究方案，来解释传播中的物理过程。诸如表面散射、体积散射、海底反射及多途效应等不同性质的过程可先分别研究。然后总的信道性质可通过许多兼备各子过程影响的模型来确定。这种研究一般涉及理论工作和实验工作。SACLANT研究中心所进行的此种研究工作的几个例子将在这次讨论会报告期间提出。在文献〔5〕—〔11〕中读者可找到这些例子。

经验方法　这种方法在于收集大量与总的等效滤波器特征的直接测量有关的数据，目的是根据所有数据的统计分析提取一些经验规律。在评价现有设备的性能时，这种方法可能是有效的。一般说来，设备本身就构成了评价其自身性能的测量工具。

另一方面，当工作的目的是确定今后设备的最佳参量和特征时，它有固有的弱点。为了给设计者以有用的知识，测量设备必须提供的精度和参量变化范围要比最终设计的设备大些。因此测量设备必须比最终的设备更复杂。

现场估算法　它是在设备工作的同时收集很多测量，从测量估算信道的性质。现場估算法可被想象成两个相继的工作阶段：

a）把有关环境的测量（声速分布、风速、海底深度）作为预估信道性质的计算机模型的输入参量。

b）根据声学测量直接估算信道性质。当接收器处可利用的信号包含一定量的有关信道本身的信息时，通信中一般是这么做的。信道本身的信息可用来改进接收机，而逐步近似的全过程则导致“自适性处理”。在跟踪设备或分类设备中可找到类似的例子，对这些设备，回波与回波间的分析可逐步分别估算信道参量和目标参量。

随着数字计算机的发展，现場估算法大概代表了所有先进的信号处理设备的发展趋势。

参 考 文 献

1. Laval, R. (1964) "Transformation Aléatoire des Signaux par la Propagation", Paper Presented at NATO Advanced Study Institute on Signal Processing, Grenoble.
2. Sosttand, K. A. (1968) "Measurement of Coherence and Stability of Underwater Acoustic Transmissions", Paper Presented at NATO Advanced Study Institute on Signal Processing, Enschede 1968.
3. Bello, P. A. (1963) "Characterization of Randomly Time-Variant Linear Channels." IEEE CS-11, №4, 360—393.
4. Hovem, J. M. "Resolution Limitations of a Random Inhomogeneous Medium", SACLANCEN Technical Report in Prepatation.
5. Laval, R. et (1967) "Coherence Problems in Underwater Acoustic Propagation", Paper Presented at the NATO-Marina Italiana Advanced Study Institute on Stochastic Problems in Underwater Sound Propagation, Lerici, 1967. 9.
6. Fortuin, L. and Laval, R. "Wave Propagation in Random Media", SACLANTCEN Technical Report in Preparation.
7. Hastrup, O. F. (1970) "Digital Analysis of Acoustic Reflectivity in the Tyrrhenian Abyssal Plain." JASA 47, №1 (Part2) 181—190; Hastrup, O. F. (1968) "A Detailed Analysis of Acoustic Reflectivity in the Tyrrhenian Abyssal Plain", SACLANTCEN Technical Report №145; and Hastrup, O. F. (1968)" The Reflectivity of the Top Layer in the Naples and Ajaccio Abysxal Plains", SACLANTCEN Technical Repott №118.
8. Hovem, J. M. (1970) "Deconvolution for Removing the Effects of the Bubble Pulses of Explosive Charges. JASA 47, №1 (Part 2) 281—284; also Hovem, J. M. (1969)" Removing the Effect of the Bubble Pulses When Using Explosive Charges in Underwater Acoustics Experiment", SACLANTCEN Technical Report №140.
9. Laval, R. (1971) "General Considerations on Reflection and Forward Scattering from a Rough Surface", Paper Presented at Conference on Reflection and Scattering of Sound by the Sea Surface Held at SACLANTCEN, 1971. 3. 29—31.
10. Wijmans, W. (1971) "An Experimental Study of Sound Reflection and Forward Scattering from a Rough Surface", Paper Presented at Conference on Reflection and Scattering of Sound by the Sea Surface Held at SACLANTCEN, 1971. 3. 29—31.

11. Fortuin, L. (1971) "The Sea Surface as a Random Filter for Underwater Sound", Paper Presented at Conference on Reflection and Scattering of Sound by the Sea Surface Held at SACLANTCEN, 1971. 3. 29—31.

討　論

H. Mermoz：你说一个点源已被看成一团云而不再是一个点，它会降低大尺度的指向性阵的性能。你是否认为这种结果会影响水听器间的最佳间隔呢？是否还用$\frac{\lambda}{2}$的间隔呢？

答：这取决于要使什么最佳化。如果问题是在抗无方向性噪声情况下去检测这声源，则最佳水听器间隔仍为$\frac{\lambda}{2}$。当阵尺寸大于声源所产生的声場的空间相关距离时，其角度分辨力大于"云"的角直径。波束成形时，来自声源的信号能量不是集中在一个波束內，而是分散在几个相邻的波束內。另一方面，如果问题是估算声源的方向，又若为部分相干，即点源看起来象被晕所包围的一个点，人们必须立足于估计点的方向而把晕看成是背景的一部分（前向散射）。在这种情况下，如果水听器的总数N不变，为了使相干能量（来自点）相干叠加，非相干能量（来自晕）非相干叠加，间隔必须大于非相干声場的空间相关距离。N大时，晕则趋于消失。然而实际上这会导致建立很大尺寸的基阵。

S. B. Gardner：将声場分解成方向为θ的各种子平面波时，你是否考虑过θ角可为虚数的可能性？

答：虚角度大概对应于衰减系数很大的"旁侧波"。在实际水声传播中是否确实要考虑这种情况，我沒有把握，不过我沒有认眞考虑过这种情况。

（周纪浔译　任树初校）