

# 浅海远程声场的空间相关性与时间稳定性\*

张仁和 张双荣 肖金泉 孙庚辰 王孟新

(中国科学院声学研究所)

本文介绍浅海远程声场空间相关的一些实验结果。实验研究了不同距离、频率与带宽的空间相关,测量数据具有明显的距离与频率依赖关系。实验结果表明,在 55 至 130 公里的传播距离上跃变层之下的低频声场有较强的空间相关性与时间稳定性。

## 一、引 言

随着声呐信号处理技术的发展,对声场空间相关性与时间稳定性的研究日益受到人们重视。为了改进声呐的角度分辨和提高信号处理的空间增益,必须充分了解声场的空间相关性。声场的空间相关性是设计大尺寸声呐接收阵的物理基础。

在无界的均匀介质中,从一点发出的声信号,将无畸变地传至各处,任何两点接收的信号都是相关的。但在实际海中由于海水介质及其边界在时间上与空间上存在着有规的与随机起伏的变化,使声场的空间相关性降低。

近二十多年来已有大量的理论与实验用于研究海中声场的统计性质<sup>[1-3]</sup>,其中包括声场起伏(即散射场)的空间相关。很久以来人们把注意力集中在散射场的统计特性上,而对总声场的空间相关却研究得较少,直到最近几年才发表了一些声场空间相关的测量结果<sup>[4-7]</sup>。文[5,7]在浅海中用数十米长的线列阵测量了数公里以内的横向空间相关,所得到的横向空间相关半径很小( $kd \sim 20$ ),声场的水平角度扩展较大( $\Delta\theta > 1^\circ$ )。我们认为,这些在近距离得到的结果不能外推到较远的距离上。

海面波浪与海水介质起伏是降低声场横向空间相关的主要因素。在比较近的距离上,主要传播路径在海面的掠射角较大,海面波浪使声场的空间相关性显著降低。在比较远的距离上,主要传播路径在海面的掠射角较小,因此海面波浪的影响较小。此外,根据海水温度微结构的数据计算,对于几千赫以下的低频,在几十公里至上百公里的距离上声场可能具有很强的空间相关性。基于这种设想,我们于 1974 年与 1975 年在浅海区域进行了远距离、大间距的声场空间相关实验,得到了最远距离达 130 公里、最大水听器间距为 420 米的空间相关数据。实验结果表明,浅海中低频远程声场的确有较强的空间相关性与时间稳定性。不久前发表的 Scholz<sup>[6]</sup>用 74 米长的线列阵测量得到的空间相关数据(距离范围从 2 公里至 50 公里)也表明远程声场的空间相关较强。

\* 本文 1979 年 8 月 31 日收到。

## 二、第一次实验

第一次实验主要测量跃变层之上脉冲声场的纵向相关,实验于1974年8月28日在38米深的海区进行.实验期间海况4级,声速剖面如图1.用木柄手榴弹作为爆炸声源,爆炸深度约7米.投弹船沿固定航向间隔一定的距离投弹.接收船抛锚固定,水听器置于6米深度,接收信号用磁带记录,在实验室进行回放处理.

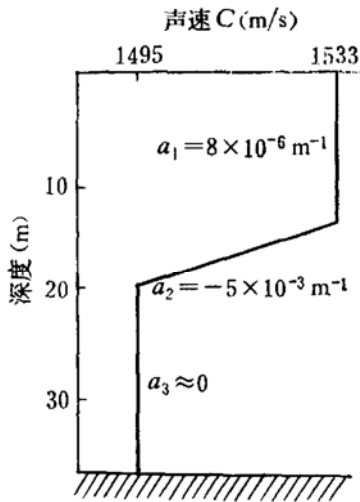


图1 第一次实验的声速分布  
Velocity profile for the first experiment

如所熟知,对传播至接收点的爆炸声信号进行带通滤波,等价于带通信号的传播.爆炸声在爆炸点附近近似于指数形的宽带脉冲信号,对带通滤波处理来说,各个手榴弹的爆炸脉冲波形可认为是相同的.但由于水下爆炸所产生的气泡辐射二次压力波,且气泡脉动的周期不稳定,它将使实验结果产生误差.为了消除二次压力波的影响,数据处理时我们用时间选通门预先滤去了二次压力波.

对于分别在距离  $r$ 、时刻  $T$  与距离  $r + \Delta r$ 、时刻  $T + \Delta T$  发出的脉冲,接收信号的波形分别表为  $p(t, r, T)$  与  $p(t, r + \Delta r, T + \Delta T)$ . 我们按下列公式计算纵向相关系数  $\rho_{st}$ :

$$\rho_{st}(\Delta r, \Delta T) = \frac{\text{Max} \left| \int_{-\infty}^{\infty} p(t - \tau, r, T) p(t, r + \Delta r, T + \Delta T) dt \right|}{\left[ \int_{-\infty}^{\infty} p^2(t, r, T) dt \int_{-\infty}^{\infty} p^2(t, r + \Delta r, T + \Delta T) dt \right]^{1/2}}, \quad (1)$$

图2给出频率1千赫、带宽12%的信号在1.4、6.4、16公里三个距离上的纵向相关曲线.从图中看出,纵向相关与距离有明显的关系,距离越远纵向相关越强.

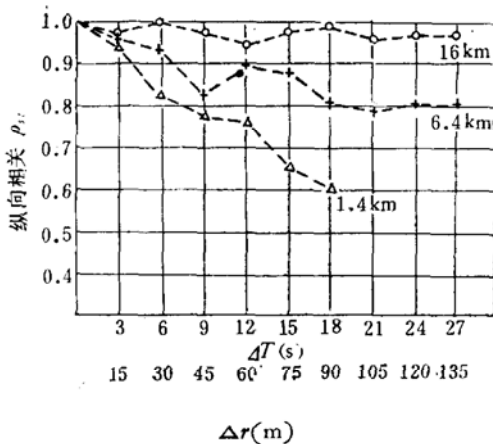


图2 三个距离上的纵向相关  
频率  $f_0, 1.0\text{kHz}$ ; 带宽  $\Delta f/f, 12\%$

Longitudinal correlations at three distances

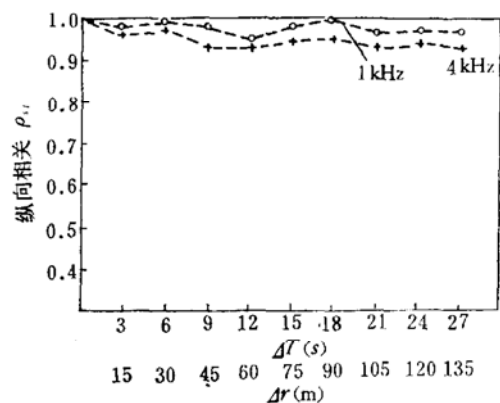


图3 二个频率的纵向相关(间距小于150m)  
距离  $r, 16\text{km}$ ; 带宽  $\Delta f/f, 12\%$

Longitudinal correlations at two frequencies ( $\Delta r < 150\text{m}$ )

图3与图4给出距离16公里、带宽12%、频率分别为1千赫与4千赫的纵向相关曲线,其中图3中间距  $\Delta r$  以米为单位,图4中间距  $\Delta r$  以公里为单位.从图上看出,纵向相关与

频率有明显关系,低频(1千赫)的纵向相关显著大于高频(4千赫)的纵向相关。

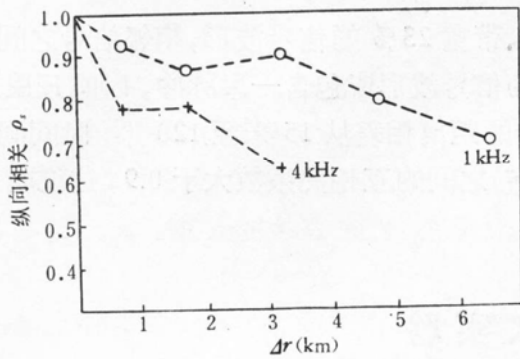


图4 二个频率的纵向相关(间距大于150 m)  
距离  $r, 16\text{km}$ ; 带宽  $\Delta f/f, 12\%$

Longitudinal correlations at two frequencies ( $\Delta r > 150\text{m}$ ).

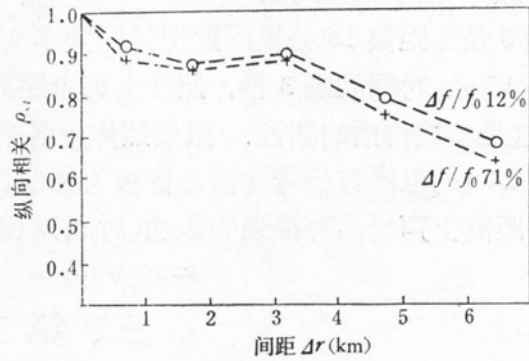


图5 二种带宽的纵向相关  
距离  $r, 16\text{km}$ ; 频率  $f_0, 1\text{kHz}$

Longitudinal correlations for two bandwidths

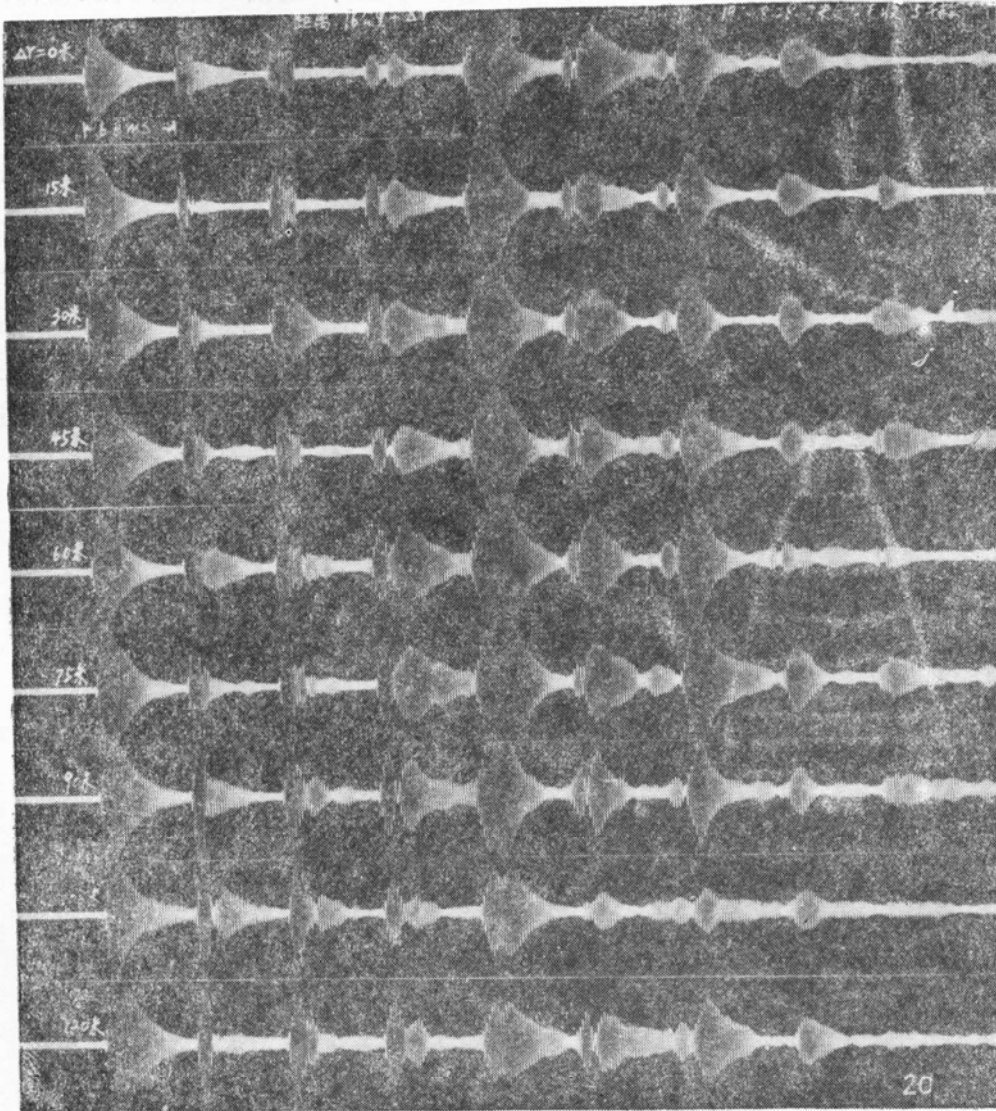


图6 距离16 km附近的波形记录

Osillographic recordings in the neighborhood of 16km,  $f_0: 5\text{kHz}$ ;  $\Delta f/f: 23\%$ ;  $\Delta r: 0-120\text{m}$

图 5 为距离 16 公里、频率 1 千赫、带宽 12% 与 71% 的信号纵向相关曲线,两种带宽的信号纵向相关相差不大。

图 6 是在距离 16 公里附近记录的频率 5 千赫、带宽 23% 的信号波形,相邻信号之间的距离相差 15 米,时间间隔 3 秒。照片上每个距离上的信号波形皆包含一串脉冲,时间延展达 60 毫秒,这是多途传播的明证。虽然照片上各个信号的距离相差从 15 米至 120 米,时间间隔从 3 秒至 24 秒,但所有信号的波形皆极为相似,各信号之间的互相关系数大于 0.9,这说明在 16 公里的距离上声场具有很强的多途(时间)稳定性。

### 三、第二次实验

第二次实验主要测量跃变层之下的远场空间相关,包括横向相关与纵向相关。实验于 1975 年 8 月 11 日在 60 米深的海区进行,海底较平坦,底质为沙泥。实验期间海况 3—4 级,声速剖面如图 7,跃变层位于 13—22 米。

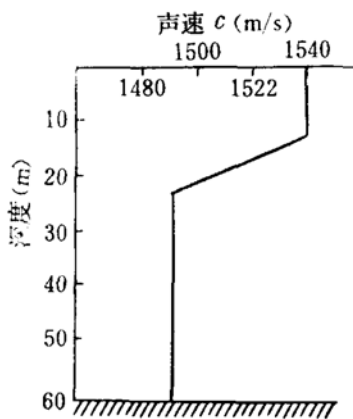


图 7 第二次实验的声速分布  
Velocity profile for the second experiment

实验布设: 实验用 3 条船进行,其中一条为投弹船,另二条分别作主、辅接收船。为了研究跃变层之下的空间相关,我们用 25 米-38 克与 30 米-1000 克的水声信号弹作为爆炸声源。投弹船至实验点 (55, 93, 130 公里)先抛锚投弹若干枚,然后依次沿横向与纵向以 10 节航速、间隔 15 米 1 发投弹若干枚。两接收船相距数百米抛锚,分别将两水听器沉放于海底。两船之间布设有钢丝铠装电缆,辅接收船水听器的信号经前放并通过电缆送至主接收船,与主接收船水听器的信号一起记录在磁带上,然后回实验室进行处理。实验布设如图 8 所示。

数据处理: 对于抛锚投弹的每一个爆炸波,我们利用两个水听器所接收的信号来测量固

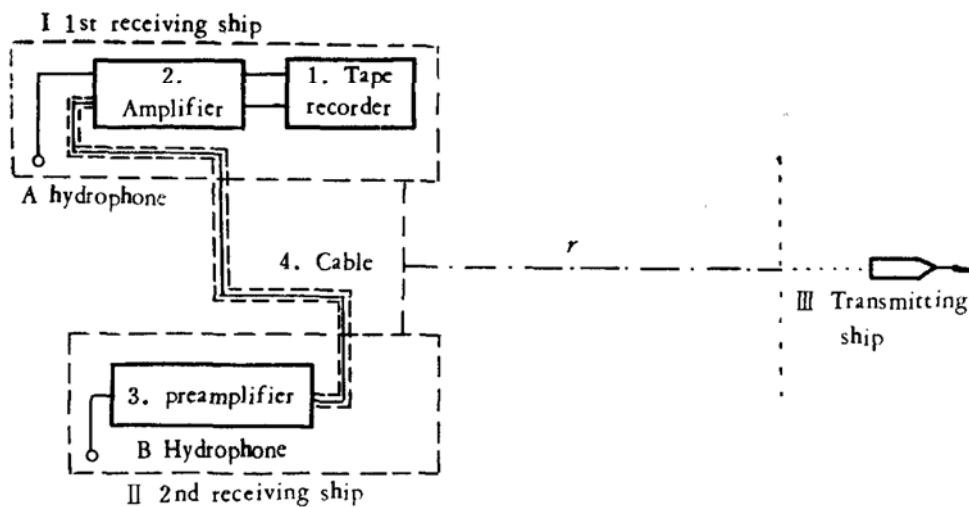


图 8 第二次实验布设图  
I. 主接收船; II. 辅接收船; III. 投弹船 1.录音机; 2.放大器; 3.前放; 4.电缆 A, B, 水听器  
Arrangement for the second experiment

定间距的空间相关系数  $\rho_s$  与延迟时间  $\tau_s$ 。设位置  $\mathbf{r}_1$  与  $\mathbf{r}_2$  接收的信号波形为  $p(t, \mathbf{r}_1)$  与  $p(t, \mathbf{r}_2)$ , 相关系数  $\rho_s$  定义为:

$$\rho_s(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \frac{\text{Max} \left| \int_{-\infty}^{\infty} p(t - \tau, \mathbf{r}_1) p(t, \mathbf{r}_2) dt \right|}{\left[ \int_{-\infty}^{\infty} p^2(t, \mathbf{r}_1) dt \int_{-\infty}^{\infty} p^2(t, \mathbf{r}_2) dt \right]^{1/2}}, \quad (2)$$

延迟时间  $\tau_s$  定义为互相关  $\left| \int_{-\infty}^{\infty} p(t - \tau, \mathbf{r}_1) p(t, \mathbf{r}_2) dt \right|$  达到最大值的  $\tau$ 。根据每个信号弹所得到的  $\rho_s$  与  $\tau_s$ , 再计算出相关系数的统计平均值  $\bar{\rho}_s$  以及延迟时间的标准偏差  $\delta_s = \sqrt{(\Delta\tau_s)^2}$ 。  $\bar{\rho}_s$  定量地描述两个接收点上信号波形的相似性;  $\delta_s$  表征延迟时间的稳定性。对于单频或窄带信号,  $\delta_s$  与两接收点的相位差起伏相联系:

$$\sqrt{(\Delta\varphi_{AB})^2} = \omega\delta_s, \quad (3)$$

此处  $\Delta\varphi_{AB}$  是接收点  $A$  与  $B$  的信号的相位差的起伏,  $\omega$  为角频率。

当两个接收点的空间相关很强时 ( $\bar{\rho}_s \approx 1, \delta_s \approx 0$ ), 不但两个接收信号的波形相似, 而且彼此相差一个确定的延迟时间, 此延迟时间  $\tau_s$  应等于波阵面到达两个接收点的传播时间差。横向投弹时声源的方位发生变化, 下面我们分析两个接收点的传播时间差  $\tau$  与声源的横向位移  $x$  的关系。如图 9 所示,  $A$  与  $B$  表示两个水听器, 其间距为  $d$ , 中点  $O$  与第一个投弹点  $D$  的

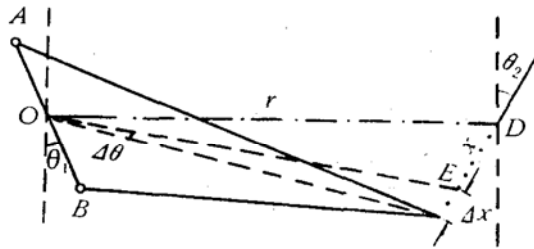


图 9 几何程差  
Geometric path-difference

距离为  $r$ ,  $OD$  的法线与  $AB$  夹角为  $\theta_1$ , 与投弹点连线的夹角为  $\theta_2$ , 某一投弹点  $E$  与  $D$  之间的位移为  $x$ 。不难证明, 当  $d/r \ll 1$  与  $x/r \ll 1$  时由几何程差所确定的传播时间差为

$$\tau(x) = \frac{d \sin \theta_1}{c} + \frac{d \cos \theta_1 \cos \theta_2}{cr} x \quad (4)$$

此处  $c$  为声速。上式中  $d, \theta_1, \theta_2$  是一些确定的常数, 因此当空间相关很强时延迟时间  $\tau_s$  应随位移  $x$  线性变化。我们将利用横向投弹时两个水听器同时接收的信号来检验上述延迟时间与几何程差的关系。

当发射与接收点固定时, 对于不同时刻  $T$  发出的脉冲信号, 由于传播信道的时变特性与多途干涉, 接收信号的波形  $p(t, \mathbf{r}, T)$  将随  $T$  而变化, 我们按下式来定义时间相关系数  $\rho_t$ :

$$\rho_t(\Delta T) = \frac{\text{Max} \left| \int_{-\infty}^{\infty} p(t - \tau, \mathbf{r}, T) p(t, \mathbf{r}, T + \Delta T) dt \right|}{\left[ \int_{-\infty}^{\infty} p^2(t, \mathbf{r}, T) dt \int_{-\infty}^{\infty} p^2(t, \mathbf{r}, T + \Delta T) dt \right]^{1/2}} \quad (5)$$

$\rho_r$  定量地描述接收信号波形的时间稳定性,在某种程度上也反映了传播信道的稳定性。

对于不同位置、不同时刻发出的脉冲信号,我们用下式定义其时-空相关系数  $\rho_{st}$

$$\rho_{st}(r_1, r_2, \Delta T) = \frac{\text{Max} \left| \int_{-\infty}^{\infty} p(t - \tau, r_1, T) p(t, r_2, T + \Delta T) dt \right|}{\left[ \int_{-\infty}^{\infty} p^2(t, r_1, T) dt \int_{-\infty}^{\infty} p^2(t, r_2, T + \Delta T) dt \right]^{1/2}} \quad (6)$$

当声源位置仅在传播方向变化时,  $\rho_{st}$  就是式(1)所给出的纵向相关。

实验结果: 第二次实验处理了三个频带的信号的空间相关实验资料,其中包括 0.5 千赫 1/3 倍频程、1 千赫 1/3 倍频程和 0.2—0.8 千赫宽带信号。

### 1. 固定间距的空间相关 $\bar{\rho}_r$ 与 $\delta_r$

投弹船在距离 55、93、130 公里抛锚时两个水听器与投弹点之间的几何位置如图 10。图中  $d$  是两个水听器之间的间距,  $l$  是在传播方向上两个水听器之间的程差,表 1 给出了  $d$  与  $l$  的测量值。

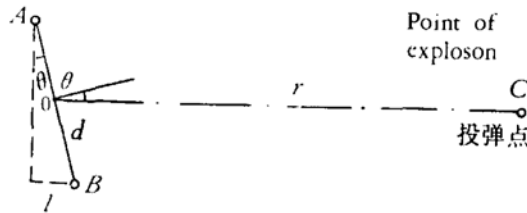


图 10 水听器 A 与 B 的位置  
C 为投弹点

Positions of the hydrophones A and B

表 1 三个距离上水听器的位置参数

Position parameters of the hydrophones at three distances

距离 (km)	55	93	130
$d$ (m)	210	160	420
$l$ (m)	150	120	60

在每个抛锚点上,在 5—6 分钟内投 20—30 个信号弹用来测量两个水听器所接收的信号的相关,计算得到的相关系数  $\bar{\rho}_r$  与延迟时间的标准偏差  $\delta_r$  列于表 2。从表 2 看出,不但相

表 2 固定间的空间相关  $\bar{\rho}_r$  与  $\delta_r$

Spatial Correlations  $\bar{\rho}_r$  and  $\delta_r$  for fixed separation

	55 km		93 km		130 km	
	$\bar{\rho}_r$	$\delta_r(\mu s)$	$\bar{\rho}_r$	$\delta_r(\mu s)$	$\bar{\rho}_r$	$\delta_r(\mu s)$
1kHz 1/3oct	0.55	110	0.60	70		
0.5kHz 1/3oct	0.77	56	0.75	68	0.59	43
0.2—0.8kHz	0.75	85	0.84	55	0.75	40

关系数  $\bar{\rho}_r$  较大,延迟时间的标准偏差也很小。标准偏差  $\delta_r$  很小意味着两个水听器接收信号的相位差起伏很小。例如对于 0.5 千赫 1/3 倍频程的信号,在 55 公里距离上  $\delta_r = 56$  微秒;按

照公式(3),相位差起伏为 $\sqrt{(\Delta\varphi_{AB})^2} \approx 10$ 度. 这样小的相位差起伏对阵信号处理是很有利的. 应当指出,由于测量系统的误差,实际的标准偏差  $\delta_s$  比表 2 的数值还要小些.

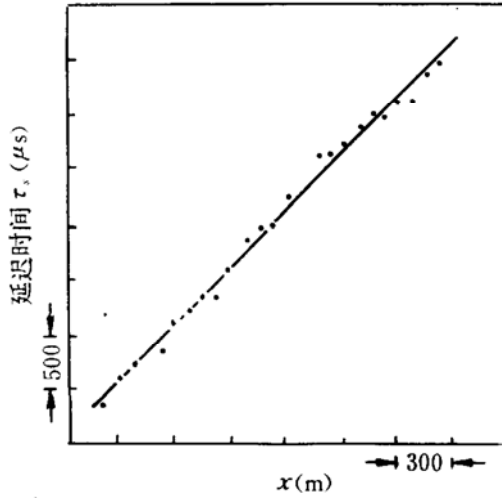


图 11 距离 55 km 延迟时间  $\tau_s$  与位移  $x$  的关系  
距离  $r$ , 55 km; 间距  $d$ , 210 m; 0.2—0.8 kHz

Delay time  $\tau_s$  versus displacement  $x$  at the distance 55km

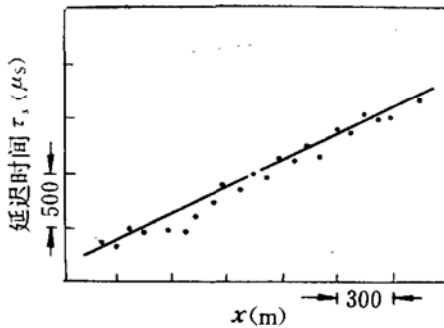


图 12 距离 93 km, 延迟时间  $\tau_s$  与位移  $x$  的关系  
距离  $r$ , 93 km; 间距  $d$ , 160m; 0.2—0.8kHz

Delay time  $\tau_s$  versus displacement  $x$  at the distance 93km

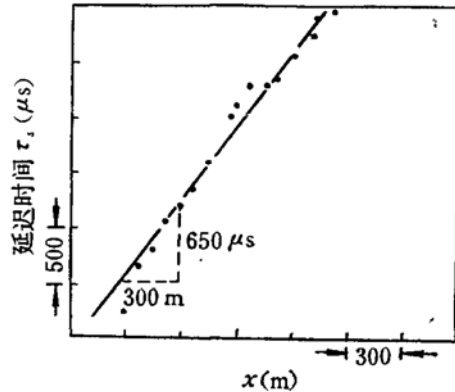


图 13 距离 130 km, 延迟时间  $\tau_s$  与位移  $x$  的关系  
距离  $r$ , 130km; 间距  $d$ , 420m; 0.2—0.8kHz

Delay time  $\tau_s$  versus displacement  $x$  at the distance 130km

### 2. 延迟时间 $\tau_s$ 与横向位移 $x$ 的关系

图 11、12、13 分别表示在三个距离上横向投弹时两个水听器所接收的信号之间的延迟时间  $\tau_s$  (互相关最大值的位置)与投弹点横向位移  $x$  的关系. 从图上看,实验值虽然有微小起伏,而延迟时间  $\tau_s$  与位移  $x$  很好地成线性关系,这与(4)式的预计一致.

### 3. 声场的水平角度扩展

对两个水听器接收的信号进行相关处理,实际上就是一个最简单的线列接收阵,由互相关最大值的位置(即延迟时间  $\tau_s$ )可以确定声源的方位. 如果延迟时间  $\tau_s$  没有任何起伏,投弹点横向移动时延迟时间  $\tau_s$  将随之变化,则可以分辨任何微小的声源方位改变. 由于  $\tau_s$  存在随

机起伏,它限制了分辨声源方位变化的精度;换句话说,由于声场存在水平角度扩展<sup>[5,7]</sup>,就不能无限制地提高声呐的角度分辨.利用本文的实验结果可以对远程声场的水平角度扩展作出某些估计.从图 13 看出,对于 0.2—0.8 千赫的宽带信号,在  $r = 130$  公里的距离上至少可以分辨  $\Delta x = 300$  米的横向位移,因此这种情况下至少可以分辨  $\Delta\theta = \Delta x/r = 2.3 \times 10^{-3}$  即 0.13 度的角度变化.这一结果说明,对于 0.2—0.8 千赫的信号,在 130 公里的距离上声场的水平角度扩展小于 0.13 度.

#### 4. 时间相关

我们利用一个水听器接收的抛锚投弹信号按公式(5)计算时间相关系数  $\rho_t$ .图 14 与 15 是

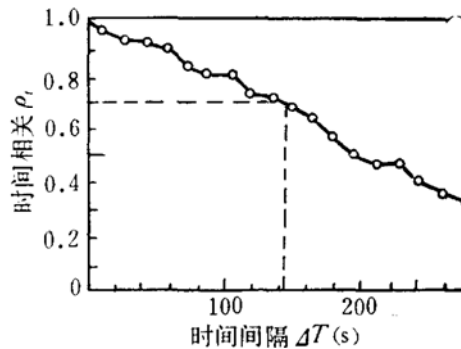


图 14 距离 93 km 时间相关  $\rho_t$   
距离  $r, 93\text{ km}$ ; 0.2—0.8 kHz

Temporal correlation at the distance 93 km

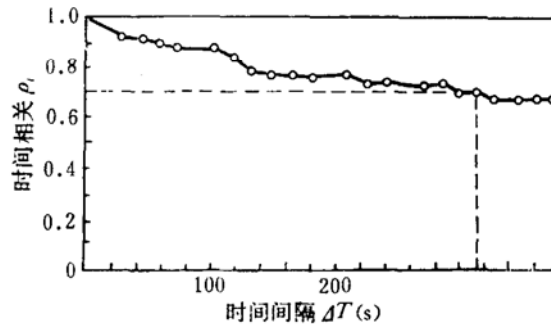


图 15 距离 130 km 时间相关  $\rho_t$   
距离  $r, 130\text{ km}$ ; 0.2—0.8 kHz

Temporal correlation at the distance 130 km

在距离 93 与 130 公里、频带 0.2—0.8 千赫信号的时间相关曲线.如果用  $\rho_t(\Delta T)$  下降至 0.7 时的  $\Delta T$  作为时间相关半径,则在 93 公里处的时间相关半径为 144 秒,在 130 公里处的时间相关半径为 312 秒.此外,我们从波形记录看出在 93 与 130 公里距离上信号波形的时间展宽达 100 毫秒,远大于发射信号(0.2—0.8 千赫)的脉冲宽度,这说明接收信号中包含着许多途径(射线或简正波)的到达.时间相关半径达数百秒说明远程声场具有长时间的多途稳定性,在一定程度上也反映了传播信道具有较强的时间稳定性.

#### 5. 横向时-空相关

我们利用一个水听器接收的横向投弹信号按照公式(6)计算横向时-空相关系数  $\rho_{st}$ , 图



16 是在 130 公里得到的 0.2—0.8 千赫信号的横向相关曲线。从图上看，横向时-空相关系数  $\rho_{st}$  随  $\Delta x$  与  $\Delta T$  基本上是单调下降的。从表 1 的数据看出，在 130 公里实验时两个水听

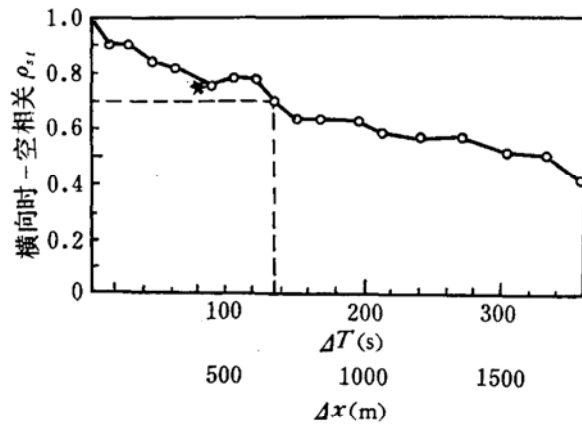


图 16 距离 130km 横向时-空相关  $\rho_{st}$   
距离  $r, 130\text{km}, 0.2-0.8\text{kHz}$

Transversal time-space correlation at the distance 130km

器接近于正横位置（水听器连线与传播方向垂直）；这时水听器间距 420 米的空间相关系数  $\bar{\rho}_s = 0.75$ （见表 2），我们将此数值用“\*”表示在图 16 中。从图中看出，两种方法得到的结果相互一致。

### 6. 纵向时-空相关

我们利用一个水听器接收的纵向投弹信号按照公式(6)计算纵向时-空相关系数  $\rho_{st}$ ，图 17 是在 55 公里得到的 0.2—0.8 千赫信号的纵向相关曲线。从图上看，纵向时-空相关系数随位移  $\Delta r$  不是单调下降的，在下降过程中有几次极大出现，这可能与多途干涉有关。

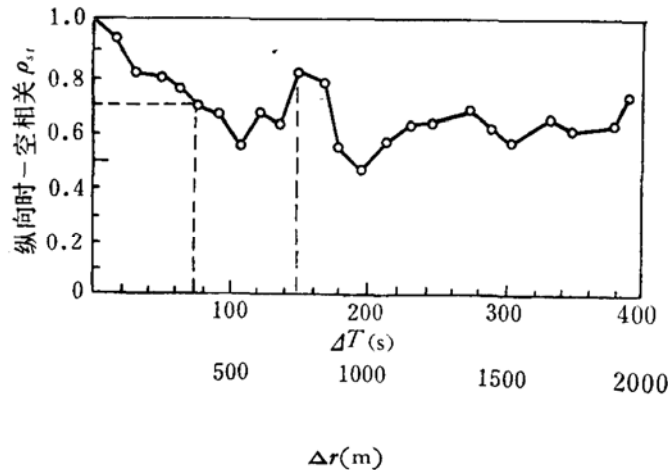


图 17 距离 55km 纵向时-空相关  $\rho_{st}$   
距离  $r, 55\text{km}; 0.2-0.8\text{kHz}$

Longitudinal time-space correlation at the distance 55km

## 四、关于远程声场空间相关机理的一点看法

第二次实验在跃变层之下进行，远程声场的主要传播路途位于跃变层之下（见图 18），海

面波浪对远程声场的空间相关影响较小,海水介质起伏将起主要作用。



图 18 跃变层之下的传播路径

Propagation paths below the thermocline

对于海水介质起伏的影响,按照文 [9] 的理论,沿某种路径到达两个接收点的横向相关系数为

$$\rho = \exp \left[ -\sqrt{\pi} \langle \mu^2 \rangle a k^2 L \left( 1 - \frac{1}{L} \int_0^L e^{-\frac{x^2(l)}{a^2}} dl \right) \right]$$

$$\simeq \exp \left\{ -\sqrt{\pi} \langle \mu^2 \rangle a k^2 L \left[ 1 - \frac{\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(d/a)}{2(d/a)} \right] \right\} \quad (7)$$

式中  $\langle \mu^2 \rangle$  为海水折射率的起伏,  $a$  是非均匀水团尺寸,  $L$  是路程长度,  $x(l)$  是两路途之间的横向间距,  $d$  是接收点  $A$ 、 $B$  的间距。

海水中存在着温度微结构已为人们所熟知, Liebermann 与 Urick 曾对温度微结构做过测量,他们得到的折射率起伏与非均匀水团尺寸为<sup>[10]</sup>:

Liebermann,  $\langle \mu^2 \rangle = 5 \times 10^{-9}$ ,  $a = 0.6$  米,  $\langle \mu^2 \rangle a = 3 \times 10^{-9}$  米;

Urlick 与 Searfoss,  $\langle \mu^2 \rangle = 8 \times 10^{-10}$ ,  $a = 5$  米,  $\langle \mu^2 \rangle a = 4 \times 10^{-9}$  米。温度微结构的时间相关半径(起伏周期)为秒的量级。

对于 0.5 千赫的频率、距离 130 公里、水听器间距 400 米,我们用公式(7)算出温度微结构所决定的横向相关系数为

$$\rho \approx 0.996.$$

而实际测量得到  $\rho_s = 0.59$ , 比上述计算值要小。另外,由于温度微结构的非均匀水团尺寸较小,当间距远大于水团尺寸时 ( $d/a \gg 1$ ), 横向相关系数  $\rho$  应趋于稳定值  $\exp(-\sqrt{\pi} \langle \mu^2 \rangle a k^2 L)$ 。但是我们从图 16 看出,间距达几百米时横向相关系数并未下降到稳定值。根据以上分析我们推测,除了温度微结构以外,在实验海区还存在着某种大尺度、长周期的介质起伏(如内波、湍流),它决定远程声场空间相关的性质。

## 五、结 论

在本文所述的实验条件下我们可以得到下列结论:

1. 浅海低频远程声场有较强的空间相关性。以 0.2—0.8 千赫的信号为例,在 130 公里的距离上横向空间相关半径大于 420 米。
2. 浅海低频远程声场的水平角度扩展较小。以 0.2—0.8 千赫的信号为例,在 130 公里的距离上声场的水平角度扩展小于 0.13 度。
3. 浅海低频远程声场信号波形有较强的时间稳定性。以 0.2—0.8 千赫的信号为例,在 130 公里距离上时间相关半径达 312 秒。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Черлов, Л. А., Волны в случайных-неоднородных средах, М., «Наука», (1975).
- [ 2 ] Гулин, Э. П., *Аку. Жур.*, 8(1962), 426.
- [ 3 ] Гулин, Э. П., Малышев, К. И., *Аку. Жур.*, 8 (1962), 292.
- [ 4 ] Urick, R. J., *J. Acoust. Soc. Am.*, 46(1969), 1308.
- [ 5 ] Wille, P., Thiele, R., *J. Acoust. Soc. Am.*, 50(1971), 348.
- [ 6 ] Urick, R. J., *J. Acoust. Soc. Am.* 54(1973), 115.
- [ 7 ] Scholz, R., "Horizontal coherence measurements with explosive sources in shallow water", *Sacramento Conference Proceedings CP13*, 1(1974).
- [ 8 ] Scholz, R., "Horizontal spatial coherence measurements with explosives and CW-sources in shallow water", *Aspects of Signal Processing with Emphasis on Underwater Acoustics, NATO ASI Proceedings*, (1976).
- [ 9 ] 张仁和, 声学学报, 1979, No. 2 109.
- [ 10 ] 乌立克, R. J., 工程水声原理, 国防工业出版社, (1972).

## SPATIAL CORRELATION AND TEMPORAL STABILITY OF LONG-RANGE SOUND FIELD IN SHALLOW WATER

ZHANG Ren-he    ZHANG Shuang-rong    XIAO Jin-quan

SUN Geng-chen    WANG Meng-xin

(Institute of Acoustics, Academia Sinica)

The experimental results of spatial correlation and temporal stability of long-range sound field in shallow water are presented. Two experiments had been made. The first experiment was conducted in shallow water with depth 38 m, the source-and received-depth was 7 m and 6 m respectively, the longitudinal spatial correlation above the thermocline was studied mainly. The longitudinal correlation curves for frequency 1.0kHz at ranges 1.4, 6.4 and 16 km revealed that the stronger spatial correlation presented at longer range. From experiment it was also observed that received signals had complex but similar multi-path structure.

The second experiment was conducted in shallow water with depth 60 m, source depth was 25 m and receivers were located at bottom. The transverse correlation, the longitudinal correlation, the horizontal angular spreading and the temporal stability of sound field below the thermocline were studied. The measurements and analyses were made at ranges 55, 93, 130 km for narrow-band signals of frequencies 0.5 and 1.0 kHz with width 1/3 oct and for wide-band signals of frequencies from 0.2 to 0.8 kHz. The experimental results showed that (1) the long-range sound field has strong spatial correlation, for example, the transverse spatial correlation length of wide-band signal at range 130 km is larger than 420 m; (2) the long-range sound field has small horizontal angular spreading, for example, the horizontal angular spreading of wide-band signal at range 130 km is less than  $0.13^\circ$ ; (3) the waveform of received signals has strong temporal stability, for example, the temporal correlation length of wide-band signal at range 130 km is more than 312 second.