

白暨豚的回声定位信号

荆显英 肖友芙 景荣才

(中国科学院声学研究所)

1980年初,我国首次捕获一头仅存于长江中的世界珍稀齿鲸动物白暨豚(*Lipotes Vexillifer*)——“淇淇”。当时在较大的泥底临时饲养池中记录了它的水下声信号,并进行了分析^[1]。但记录信号的频带上限仅达30kHz。在“淇淇”经一年的人工饲养之后,使用通带为200kHz的设备,对它的信号进行了全频带记录和分析。记录是分别在 $25 \times 20 \times 4$ 米³的方形和直径为15米、深4米的圆形水泥壁和底的水池中进行的。分析着重于高频“的答声”。同时测试了信号的声压级和指向性图。至于低频信号,如啸叫声等与原分析结果一致。

一、“的答声”的一般特征

白暨豚定位信号——“的答声”的典型形式如图1所示,其脉宽约 $60\mu\text{s}$ 。统计相邻十二列“的答声”,其脉冲间隔如表1所示,最大的脉冲间隔为2.79ms,最小间隔0.37ms,平均1.02ms。每列“的答声”中所含脉冲数较少,多为5—8个,超过20个脉冲的脉冲列则很少见。

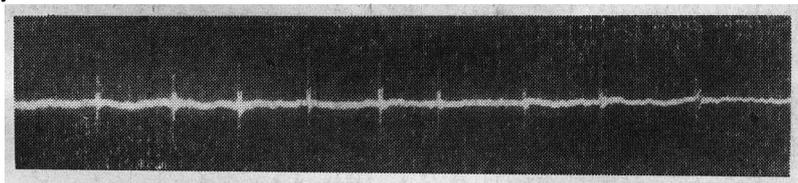


图1 典型“的答声”的示波器照相图

“的答声”脉冲波形的多样性和易变性仍为白暨豚信号的突出特点之一,图2(a)和(b)所示的信号与图1典型“的答声”相比有明显的差别,而图2(c)不仅所含脉冲之间差异很大,还有较低频信号迭加其上,可见信号之多样性。一般“的答声”脉冲的频谱处于20kHz到160kHz之间,而能峰频率多数处于8kHz到120kHz范围内。

在文献[1]中已较详细叙述的另一特点被再次证明,即白暨豚在同一时刻能发出频率截然不同的声信号,如图3所示。低频信号的中心频率为5.6kHz,而高频信号的频率为92kHz。白暨豚能同时发出参量各自不同的脉冲的事实,不仅与其声呐信号的各种用途有

表1 脉冲间隔 (时间单位: ms)

列 间隔	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
max	1.613	1.288	1.038	2.788	1.194	1.469	0.918	0.963	1.025	1.713	1.913	1.81
min	1.088	0.788	0.875	0.369	1.013	0.825	0.413	0.531	0.681	0.844	1.288	0.594
mean	1.260	0.991	0.977	0.988	1.123	0.960	0.725	0.783	0.852	1.194	1.509	0.888
与前列间隔		4.163	5.913	4.525	2.494	5.163	3.794	14.688	5.838	1.550	5.138	4.563
脉冲个数	5	5	5	8	5	6	6	7	5	4	4	3

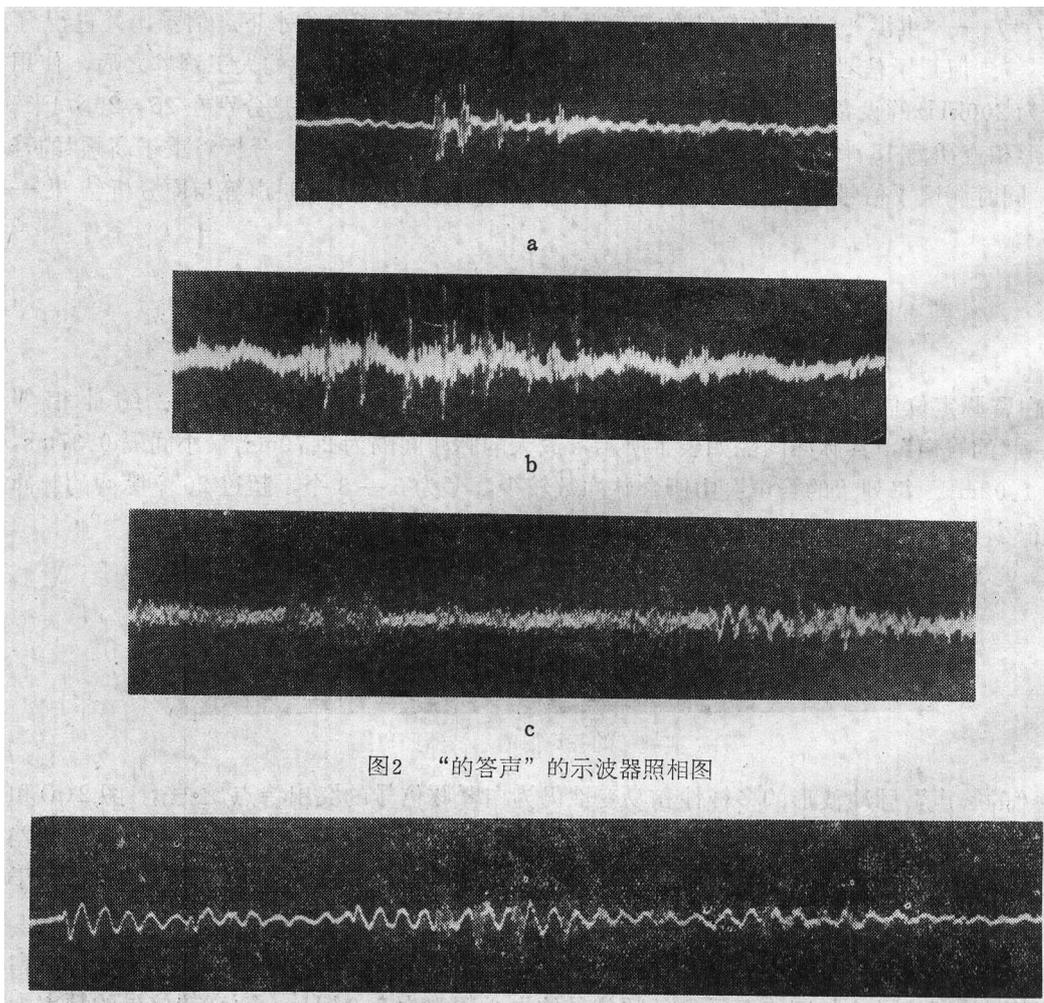


图2 “的答声”的示波器照相图

图3 同时出现两种不同频率的信号波形图

关,也反映了其发声过程的复杂性

经一年人工饲养,“淇淇”的声信号依然保持了原来的特点。但由于环境和生活条件的

变化，它的发声特性亦产生了一些明显的变化。首先，其发声的频繁程度大为下降。初捕获时几乎不间断地发“的答声”，啸叫声亦不时地被记录到。而此次记录时“的答声”的发出次数明显下降，如在 20:00 到 20:30 的半小时内仅发 4 次“的答声”，为初捕时同一时间内的十分之一。一列“的答声”内脉冲个数也由平均三十余个减少到六个左右。啸叫声在 24 小时内仅发出 5 次。但所发声信号在全天 24 小时内的分布情况却无明显改变。

二、典型“的答声”的结构

(一) 列间反相

白鲨豚在探测目标时，发出一系列脉冲列，少则十几列，多则数十列，这种定位信号即所谓“的答声”。

一般列与列之间有较长的时间间隔，因而列与列之间很容易区分。但亦有例外，当列与列之间的间隔较小，甚至小于列内脉冲间隔时，从间隔上就无法区分它们，如表 1 中第 5 列与第 4 列的间隔是 2.49ms，而第 4 列中最后两个脉冲的间隔是 2.79ms。这时，列的区分就产生了困难。仔细分析发现，每相邻两列“的答声”中脉冲相位相反，因而可建立一个可靠的划分列的标准，即当脉冲相位发生反转时即是另一脉冲序列的开始。在同一序列中脉冲同相。图 4 示出相邻三列“的答声”的脉冲波形与自相关曲线（以下称 I、II、III 列）。波形下第一个数字为该脉冲的起始时间，第二个数字为脉冲高频部分（详见下述）的中心频率和带宽，第三个数字为后一个脉冲与前一个脉冲的互相关系数。

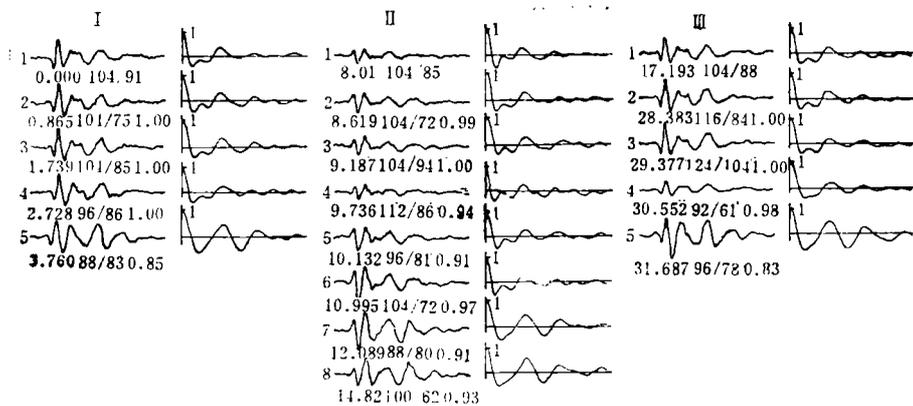


图4 I、II、III列“的答声”的波形图和自相关曲线

(二) 稳定性

在同一序列中，脉冲不仅同相，波形也十分稳定、相似。这点不仅由图 4 中的波形一目了然，还可通过序列内脉冲的互相关曲线说明。图 5(a) 为第 I 列“的答声”中后一个脉冲与前一个脉冲的相关曲线，(b)、(c) 分别为第 II、III 列中取 II₆、II₇ 及 III₁、III₅ 与同列内

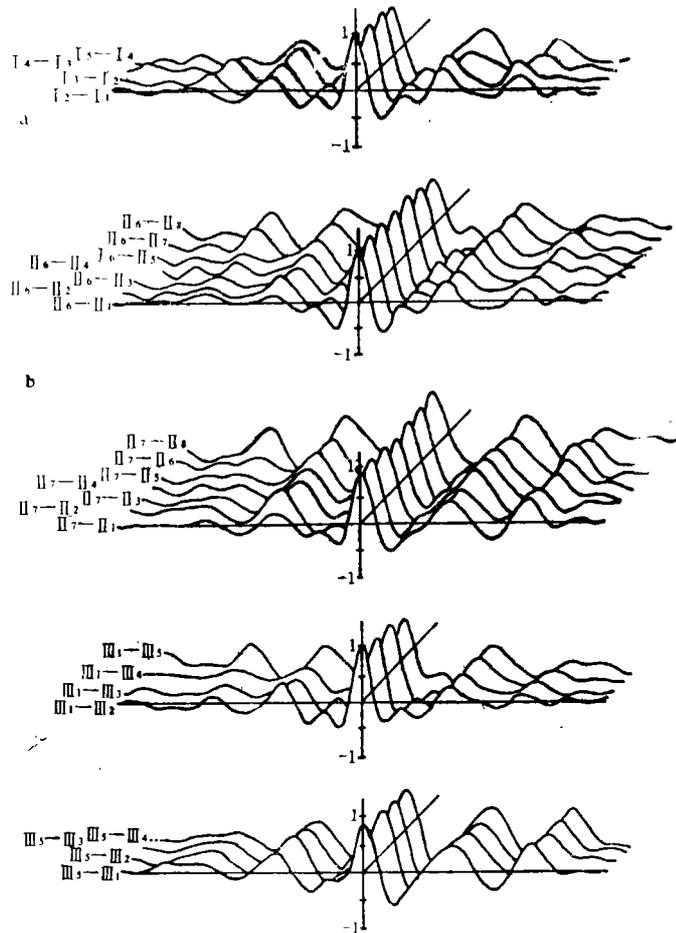


图5 列内脉冲间的互相关曲线

其它脉冲的互相关曲线。列内相邻脉冲之间的相关系数在 0.9 以上的占 86.6%，最低的相关系数为 0.83。而列内任意两脉冲间的相关系数在 0.9 以上的占 59%，最低的相关系数为 0.8。通常在同一列内相邻脉冲的相关系数大于任意两个脉冲间的相关系数，由此可见，列内脉冲是渐变的。

图 6 为列间脉冲的相关曲线，I、II、III 列各取一个脉冲分别与其它两列脉冲做互相关运算，其结果为：相关系数在 0.9 以上的占 66%，最低的相关系数为 0.77。由此可见，不仅一个序列内的脉冲是稳定的，不同序列的脉冲也保持着相对稳定性。

(三) 细微结构

1. 观察图 4 中的脉冲波形，不难发现，每一个脉冲均由高、低频两部分构成，前半部频率较高，有相当好的稳定性，其频谱如图 7 所示。而后半部频率较低，且不稳定，脉冲间有较大差异，其频谱如图 8 所示。图 4 中第 III 列整个序列的平均功率谱如图 9。

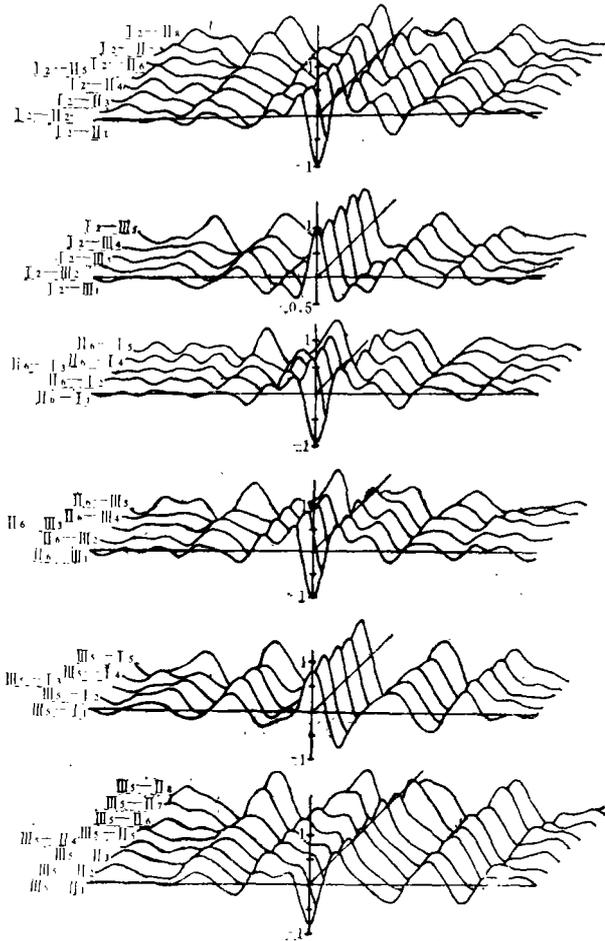


图6 不同列间的脉冲互相关曲线

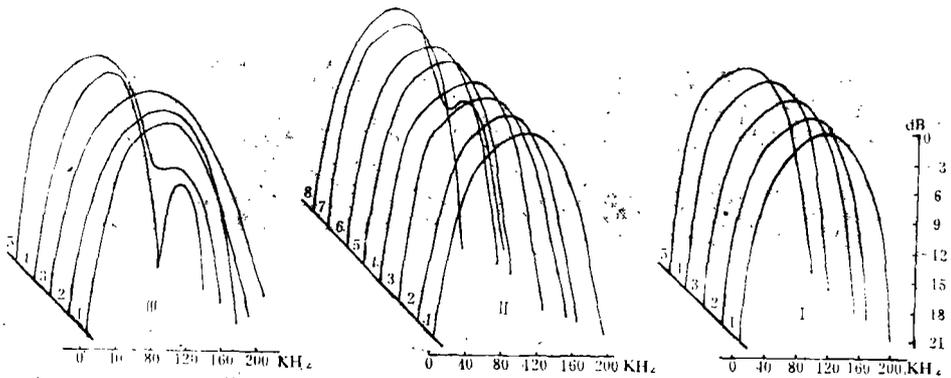


图7 脉冲前部的功率谱

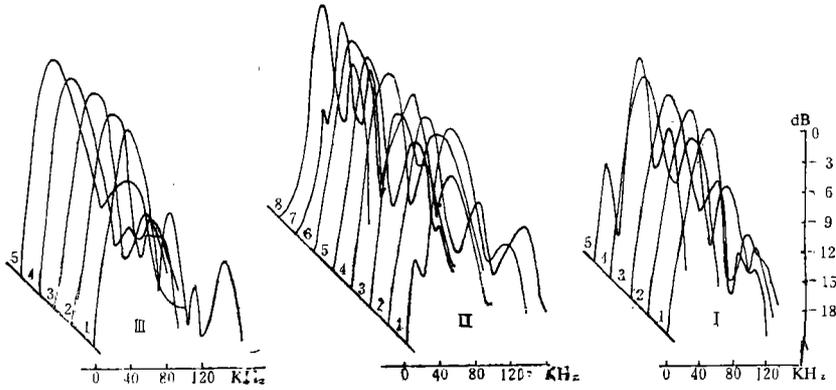


图8 脉冲后部的功率谱

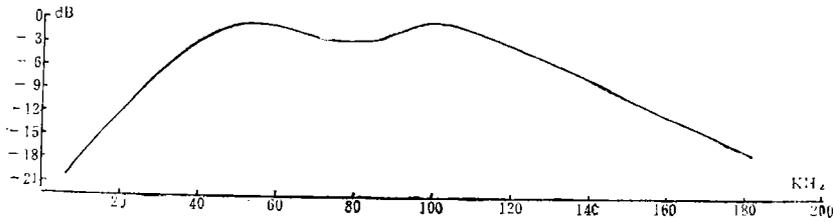


图9 第Ⅲ列脉冲的总平均功率谱

2. 线性周期调制特性

精心测量图4中脉冲高频部分过零点的时间间隔就会发现,虽然过零点的次数不多(只有1.5个完整周期),但却有一个明显的规律——过零点的间隔按指数规律变化,即周期是时间的线性函数。图10为其中一个脉冲的示波照相波形图。表2为每列中选出2个脉冲过零点间隔的测量值。

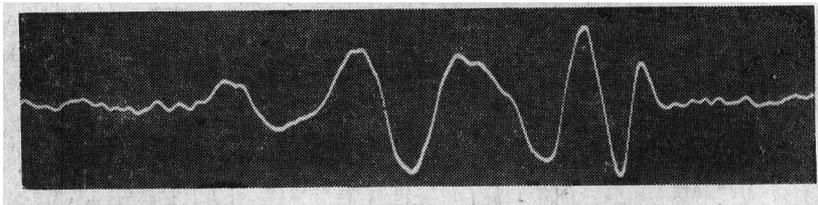


图10 I, 脉冲的示波器照相波形图

由表2看到脉冲过零点的时间间隔为一等比级数,比例系数为1.22。即 $T_n = (1.22)^{n-1} T_1$, T_1 为第一个过零点的时间间隔, T_n 为第 n 个过零点的时间间隔, n 为正整数。

综上所述,白鲸豚的探测信号具有线性周期调制特性。线性周期调制信号即对数相位调制或双曲调频信号,也就是多普勒不变信号^[2, 3]。当不考虑幅度变化时,此信号的解析表达式为:

表2 过零点的时间间隔

		间隔 (μs)			间隔比		列平均间隔比
I	I ₃	3.75	4.63	5.63	1.23	1.22	1.23
	I ₅	3.75	4.75	5.13	1.27	1.29	
II	II ₅	3.75	5.00	6.00	1.21	1.20	1.22
	II ₇	3.88	4.75	6.13	1.23	1.29	
III	III ₁	3.88	4.50	5.38	1.16	1.19	1.22
	III ₅	4.00	4.88	6.00	1.22	1.23	

$$S(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \exp\left\{-j2\pi \frac{F}{K} \ln(1+Kt)\right\}.$$

就“淇淇”典型“的答声”而言, T , F 和 K 的平均值分别为: $T = 14.46 \mu\text{s}$;

$$F = 162.56\text{kHz}, \quad K = 0.0597\left(\frac{1}{\mu\text{s}}\right).$$

由于具有线性周期调制特性, 信号有较大的相对带宽, 脉冲后半部低频信号的存在又使带宽向低频延伸. 由图9得脉冲的平均中心频率为77kHz, 平均带宽为78kHz, 脉冲持续时间为63 μs , 由此得脉冲的相对带宽为101.3%, 时间带宽乘积 TW 为4.9; 而胆鼻海豚的相对带宽和 TW 值分别为31%和1^[1].

三、“的答声”的方向图和声压级

在池中用数个水听器布设一水平和垂直接收阵, 当白髯豚垂直游向此接收阵时, 记录各接收点信号强度, 经换算得出其声辐射指向性图. 所得结果示于图11. 其中(a)为

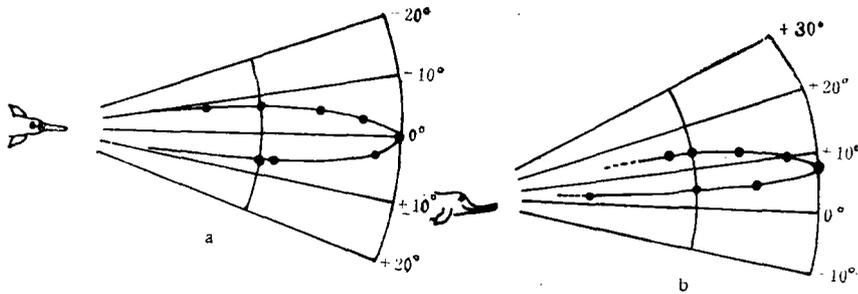


图11 水平与垂直指向性图

水平指向性图, -3dB 束宽为 13° ; (b)为垂直指向性图, -3dB 束宽为 9.1° , 波束主轴有 7.5° 仰角. 这个结果与白髯豚头部标本的指向性测试结果^[6]基本一致, 头部标本在40kHz时测得水平和垂直 -3dB 束宽分别为 20.8° 和 20° , 且随频率的增高束宽变窄.

测得白髯豚“的答声”的声压级为156.1dB(相对 $1\mu\text{Pa}$), 其啸叫声的强度与“的答

声”大小相仿。这一量级与其它三种淡水豚接近，而明显低于胆鼻海豚、虎鲸等体形较大的豚类^{〔6〕}。

四、讨 论

1. 每列“的答声”之间，脉冲必定反相，而每个脉冲又是由两部分组成，这必然是由其发声机理所决定，也是发声过程的一种反映。

2. 白鱔豚在波涛滚滚的长江中要不时追捕活鱼充饥和躲避频繁往来的船只，因而在使用其声呐系统时，声源与目标之间总是处在相对运动之中，多普勒效应的影响不可避免。使用线性周期调制信号可能是对这种生态条件相适应的一种表现。

3. 白鱔豚采用线性周期调制信号之后，再加低频部分以进一步扩展其信号的带宽，可能是专为提高其识别性能而设计的。

4. 目前，对豚类声发射指向性的报道尚少，白鱔豚之发声指向性即主轴方向和波束宽度与 W.W. L. Au^{〔4〕} 及 W.E. Evans^{〔6〕} 等人所测得胆鼻海豚的结果相似，但却与 G. Pilleri^{〔7〕} 所测得印河豚的指向性全然不同。

本工作是在汪德昭教授直接参与和领导下完成的。

参 考 文 献

- 〔1〕 荆显英、肖友芙、景荣才，中国科学，1981，2，233—239.
- 〔2〕 A.W. 里海捷克，雷达分辨理论，科学出版社，1973，422—428.
- 〔3〕 Altes, R.A., *J. Acoust. Soc. Am.*, 61(1977), 4, 1019—1030.
- 〔4〕 Wu, W.W.L., *Echolocation signals of the atlantic bottlenose dolphin(Tursiops truncatus) in open Waters*, Plenum Press, New York, 1980, 251—282.
- 〔5〕 荆显英、肖友芙、景荣才，声学学报，7(1982)，1，14—22.
- 〔6〕 Evans, W.E., *J. Acoust. Soc. Am.*, 54(1973)，1，191—199.
- 〔7〕 Pilleri, G., *Investigations on cetacea*. 7(1976)，26—32.