

江豚声信号的记录与分析*

张思照 宋政修 齐孟鸢 许兰英 徐如彦

(中国科学院海洋研究所)

早在 50 年代, Kellogg, Schevill, Evans 和 Norris 等人分别记录和研究了海豚的声信号, Schevill 和 Lawrence 通过实验有力地证实了海豚具有很好的回声定位能力。60 年代以来, 各国对海豚动物声呐进行了广泛研究, 取得了很大进展。多年来, 不少国外学者在实验工作的基础上对海豚的声发射与接收机制提出了一些近似的物理模型, 不同程度地解释了一些海豚声呐系统中的现象, 但与仿生学的综合研究的目标还相距甚远。对海豚水下声信号进行深入的定量测量与分析, 仍是海豚仿生学中一项重要的基础工作, 它对进一步研究、改进水下声学探测设备和强背景噪声下弱信号的识别与检测都有着实际指导意义。目前在大约五十余种海豚中, 除对胆鼻海豚 (*Tursiops truncatus*) 国外有过较多的研究外, 对其他海豚的研究则很少。

江豚属齿鲸亚目, 是体型最小的一种海豚。它主要分布在日本海和中国及东南亚各国沿岸海域, 在中国长江口分布最为集中。每年 3, 4 月份江豚到长江口一带生殖, 有时沿江深入甚远。日本学者 Kazuhiro Mizue 等 (1968) 和英国的 Purves (1983) 都对江豚的水下声信号作过记录与测量, 但 Kazuhiro Mizue 等只记录到 4kHz, Purves 也只记录了 30Hz—35kHz 的信号; 遗憾的是, 由于信噪比太低, 他们都没有进行详细的频谱分析。本实验所记录到的江豚声信号, 由于记录器频带范围的限制, 频率范围仅是 40Hz—70kHz, 其中包括了几种不同波形的较高频和低频脉冲信号, 本实验对其频谱和周期作了较为详细的分析测量。

一、实验方法

实验是在 1984 年 3 月底至 4 月下旬在崇明岛裕安捕鱼站海塘边的一条河里进行的。河宽约 25m, 平均深度约 2m 左右, 水清, 泥沙底。为了实验方便, 江豚被尼龙网拦截在 100m 左右的范围内。对先捕获的两头江豚进行实验。两天后又捕到两头, 与原来的两头饲养在一起。在这样较开阔的水域中, 实验的前几天主要记录个体江豚在自然游动状态下的回声定位信号。由于江豚的声信号很弱, 十几米以外就难监听到, 所以后期实验就把三头江豚 (有一头受伤死亡) 用尼龙网围在 25m 的范围内。这样便于记录江豚信号的同时监听声音和观察其行为, 尽量使其行为和声信号二者的记录“同步”, 以便室内精细分

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 1419 号。

收稿日期: 1987 年 3 月 17 日。

析。

测量用的水听器是中国科学院声学所北海研究站制作的 SBZ-102 型宽带接收换能器,在 50kHz 以下具有较平滑的灵敏度响应和良好的无指向性,50Hz—100kHz 时灵敏度下降不大于 10dB;自制电压放大器,放大倍数为 750 倍,频率响应从 10Hz 到 100 kHz 变化不大于 2 dB。记录器用丹麦 B & K 公司产的 7005 型便携式磁带记录器,其实测录放频率特性从 40Hz 到 60kHz 变化在 ± 3 dB 之内,60—70kHz 下降不大于 5dB。

二、分析结果

1. 低频脉冲 图 1, 2 是江豚在水下发出的两种波形和频谱完全不同的低频窄带脉冲列。图 1 脉冲具有调频特征,谱峰分别在 44Hz 和 56Hz,带宽不超过一个倍频程。图 1 和图 2 两种脉冲可连续交替出现。在 1984 年 4 月的一次观察中,江豚由远处游向水听器时,相继交替发出几列这两种频率相差很大的脉冲组,如图 3 所示。

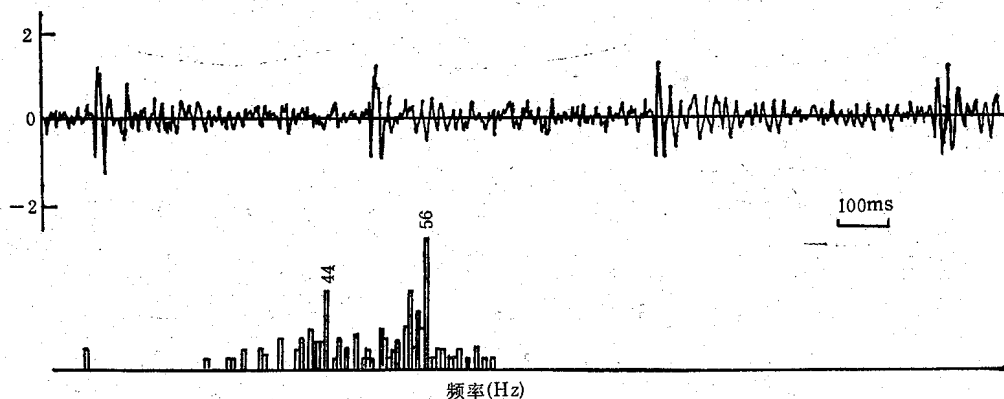


图 1A 低频脉冲波形与频谱图

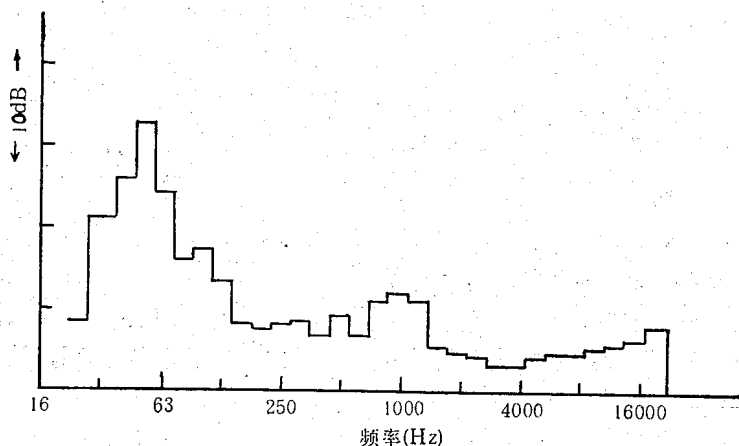


图 1B 低频脉冲三分之一倍频程频谱图

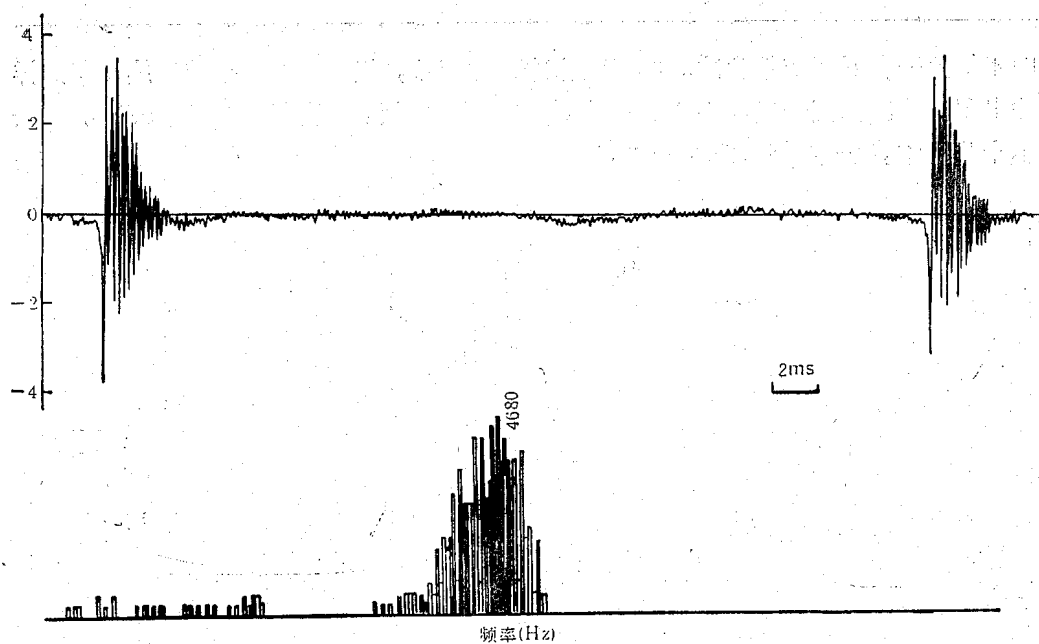


图 2 填充频率为 4680Hz 的低频脉冲波形与频谱图

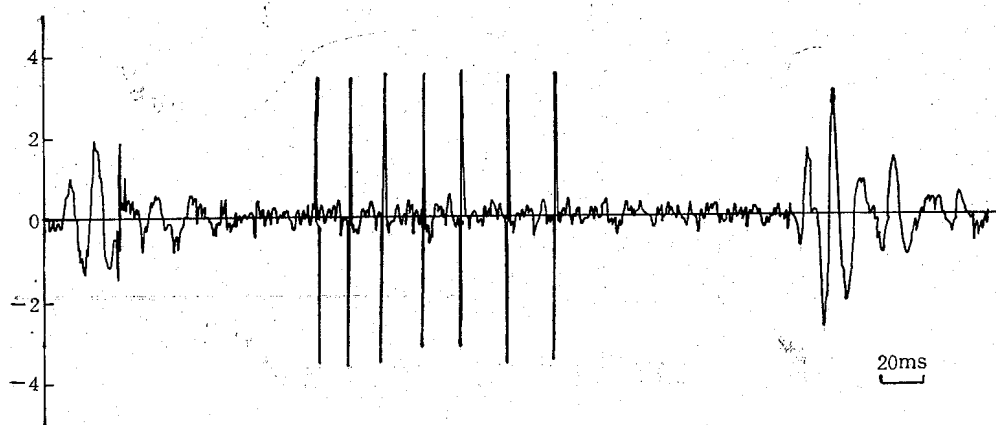


图 3A 两种频率不同的低频脉冲交替发出时的波形图
(中间是填充频率为 4680Hz 的低频脉冲)

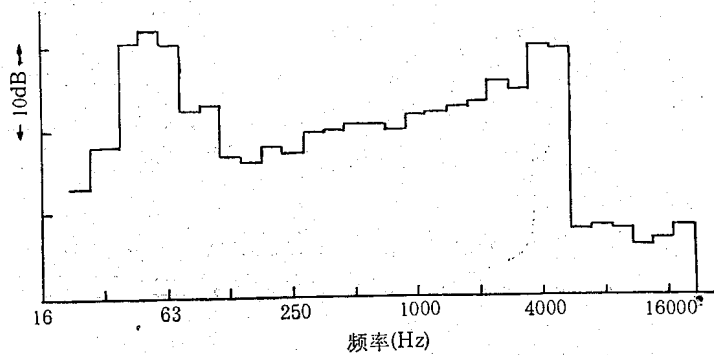


图 3B 两种脉冲交替发出时三分之一倍频程频谱图

图4是另一种低频窄带脉冲。在高频脉冲列的间歇,经常会有单个或连续几个这样的脉冲出现。脉冲宽度一般在100ms以上,具有调频特征,幅度基本呈指数衰减。频谱范围不十分稳定,但一般都有两个峰值。

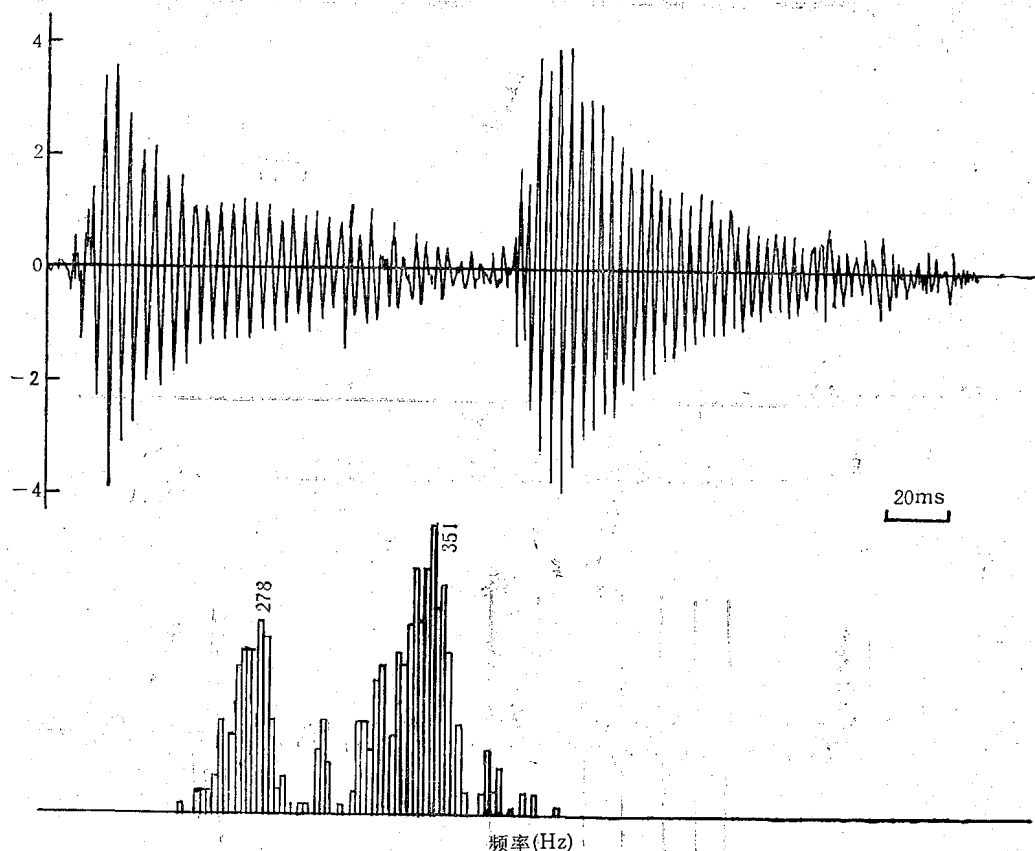


图4 幅度呈指数衰减的低频宽脉冲波形与频谱图

在1984年4月的观察实验中,还几次记录到非正弦波填充的低频脉冲列。如图5所示,脉冲宽度在10—40ms之间,脉冲重复周期为100ms左右。脉冲能量主要分布在1500—2500Hz和3000—5000Hz两个频带内。脉冲的填充频率在人的听觉灵敏域,所以可以监听到响亮的“唧唧……”声,并带有明显的音调特征。

江豚在快速游动时,除不断发出高频脉冲列之外,还时而发出“拍拍……”的宽带低频爆破声。如图6所示,爆破脉冲的开始是一个短暂的“冲击波”(正或负),随后则是水下气泡惯性振动所引起的低频脉动。一般情况下正、负“冲击波”是交替出现的。

2. 高频脉冲

(1) 由正弦波填充的“尖脉冲”,如图7所示。其宽度一般在0.1—0.6ms之间,频谱峰值在70kHz左右,频带宽度大约10kHz。脉冲前沿上升快,第二个周期便达到幅度峰值,之后呈指数衰减。

(2) “调制脉冲”,如图8所示。这种脉冲同样用70kHz左右的正弦波填充,但受到

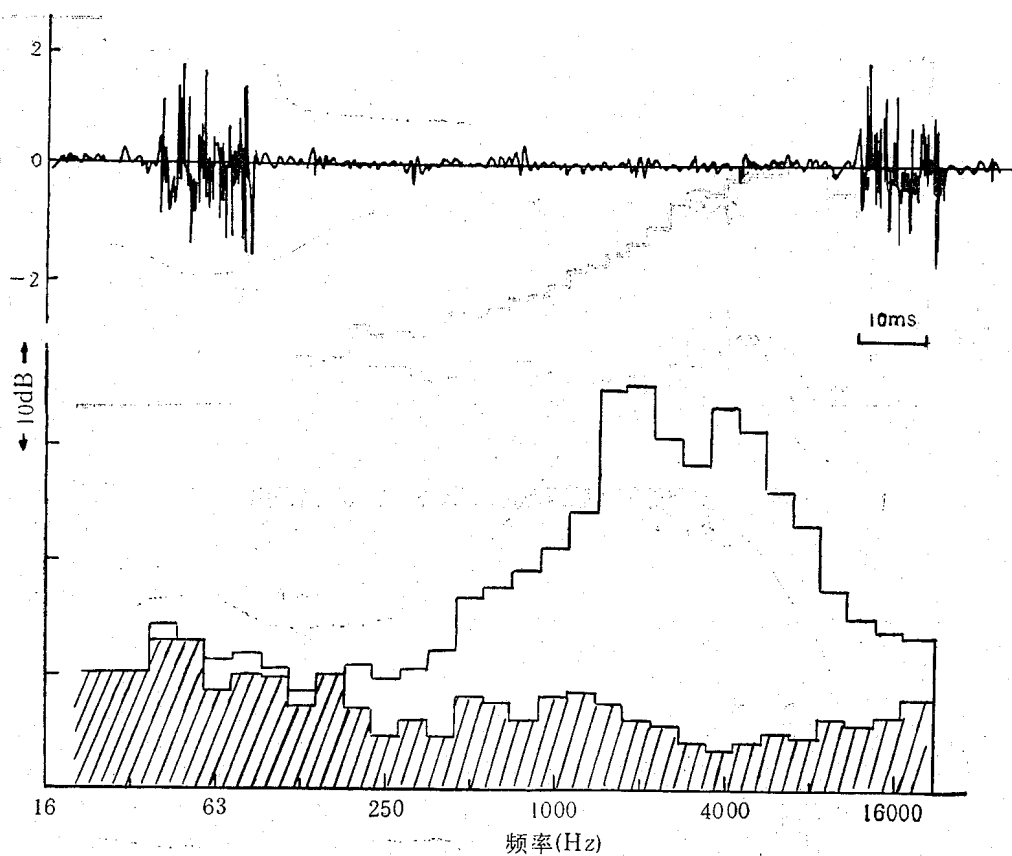


图5 非正弦波填充的低频脉冲波形与三分之一倍频程频谱图

注：图中阴影部分表示测量时环境噪声的频谱，后同。

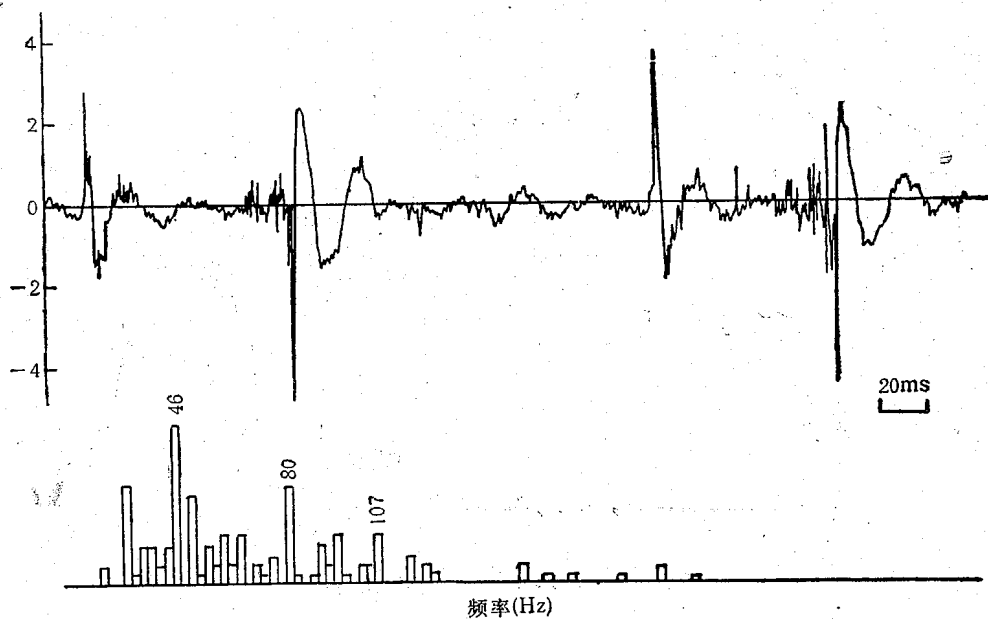


图6A 宽带低频爆破声脉冲波形与频谱图

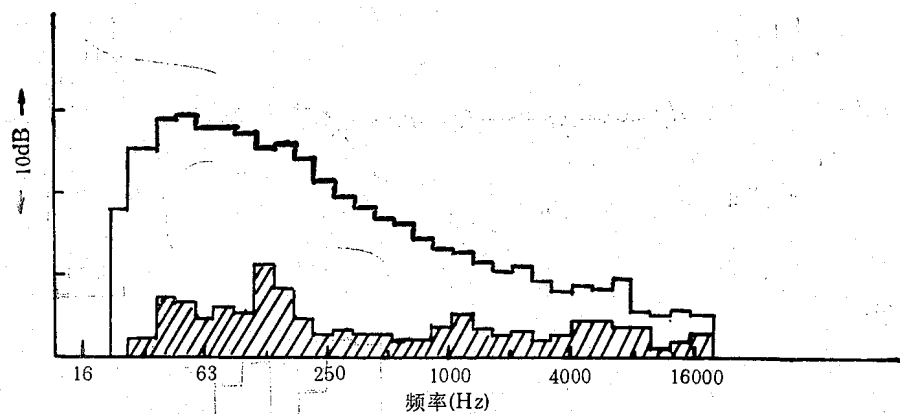


图 6B 宽带低频爆破声脉冲三分之一倍频程频谱图

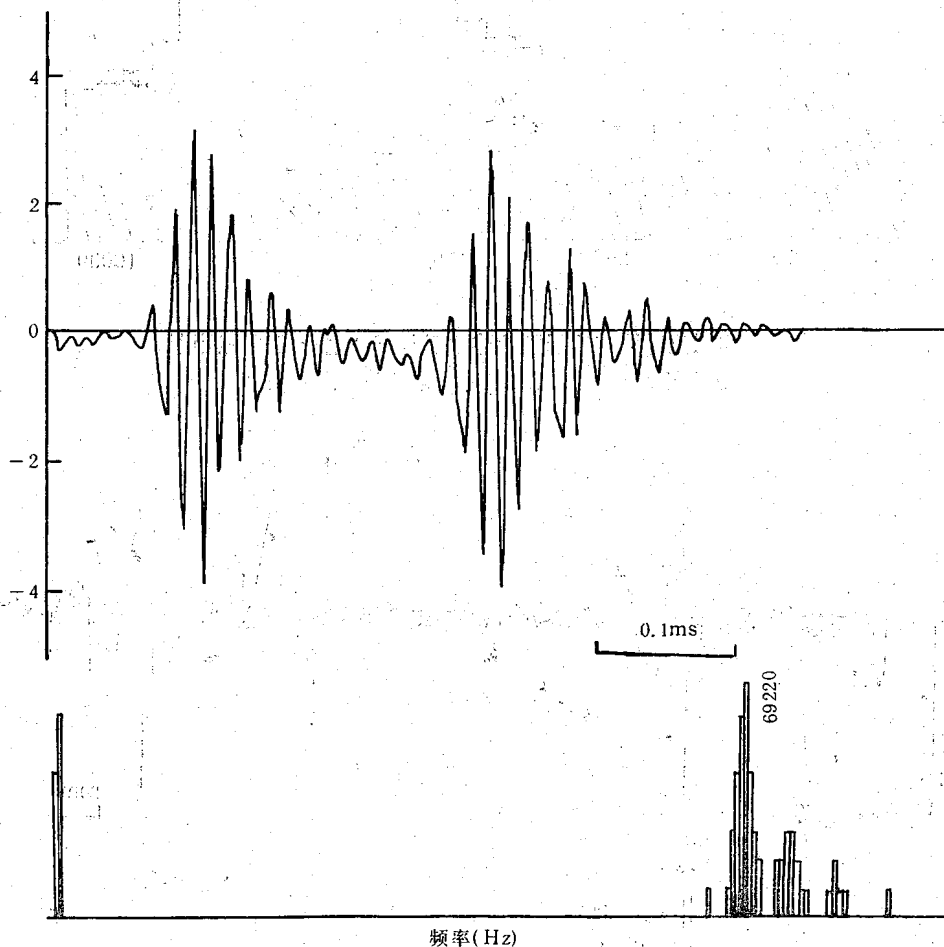


图 7A 高频“尖脉冲”波形与频谱图

低频成分的调制, 低频成分大约分布在 1—8kHz 之间。脉冲较宽, 一般在 0.5ms 以上, 波形比较稳定。

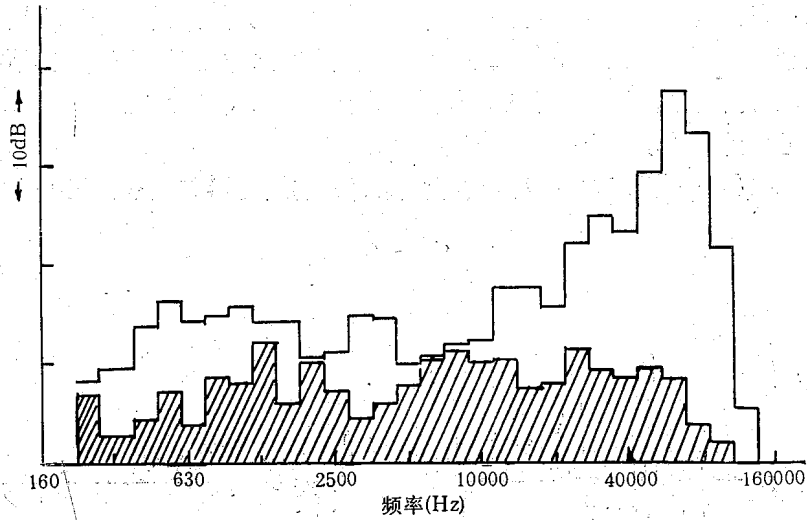


图 7B 高频“尖脉冲”三分之一倍频程频谱图

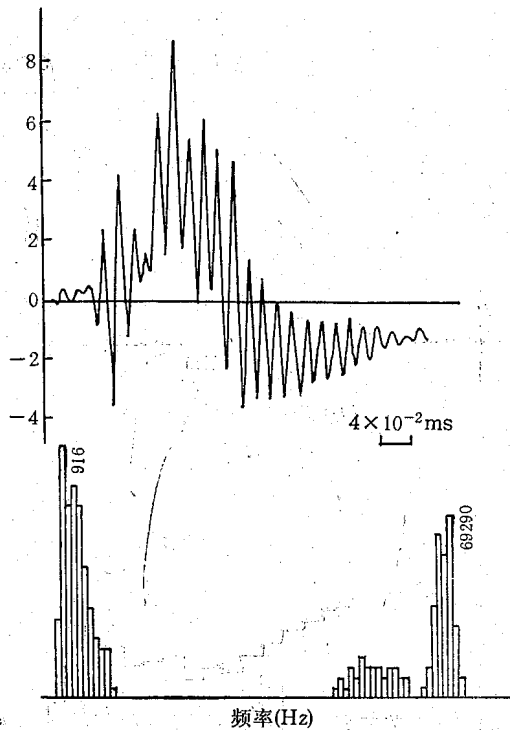


图 8 “调制脉冲”波形与频谱图

(3) “爆破型脉冲”,如图 9 所示。这种脉冲在整个记录资料中出现的几率约在 50% 以上,是最多的一种。脉冲的开始部分与低频爆破型脉冲相似,为一个较大的负“冲击波”(正的很少),其前沿下降的时间为 20—40 μ s,总宽度大约 1—2ms。与低频爆破脉冲不同的是“冲击波”之后的一次和二次脉动脉冲被频率为 70 kHz 左右的正弦波所填充,形成正

负幅度对称的“尖脉冲”。这种脉冲由于结构上的特殊性，其频谱成分也比较丰富。低频部分能量大于高频。高频段在 70kHz 左右的峰值是尖脉冲的填充正弦波所贡献，而低频部分则主要是“冲击波”的连续谱，从几十 Hz 到十几 kHz（少数可达几十 kHz），在 1—8 kHz 之间能量较为集中。

(4) 图 10 是另一种爆破型脉冲，它好像是两个连续的爆破过程。第一个爆破过程的

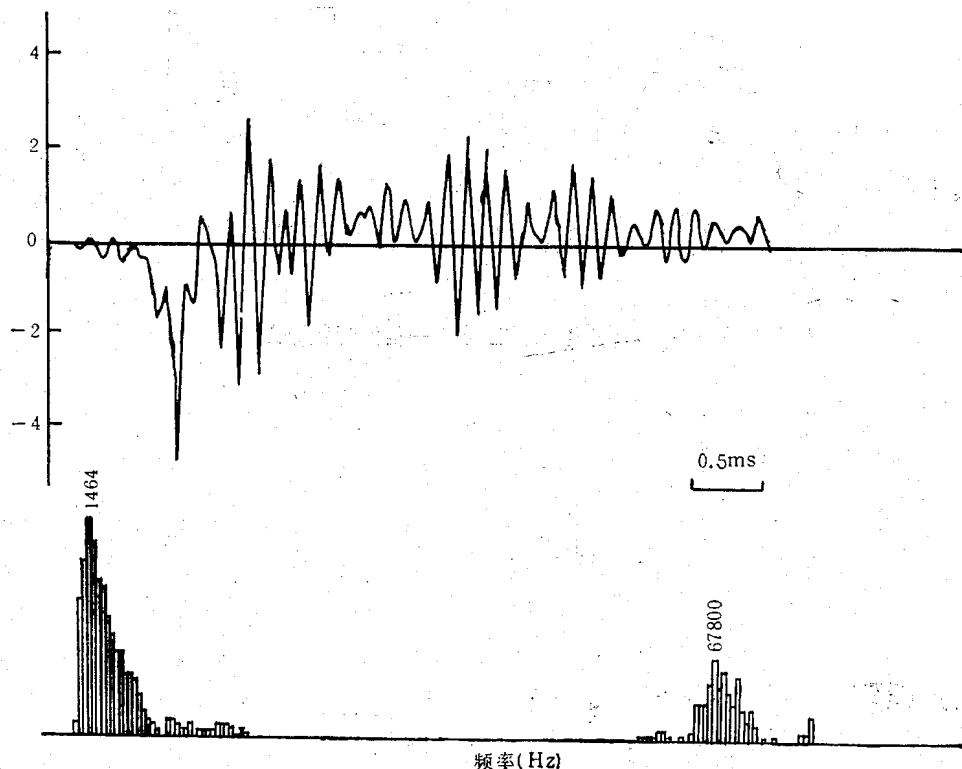


图 9A 爆破型高频脉冲波形与频谱图

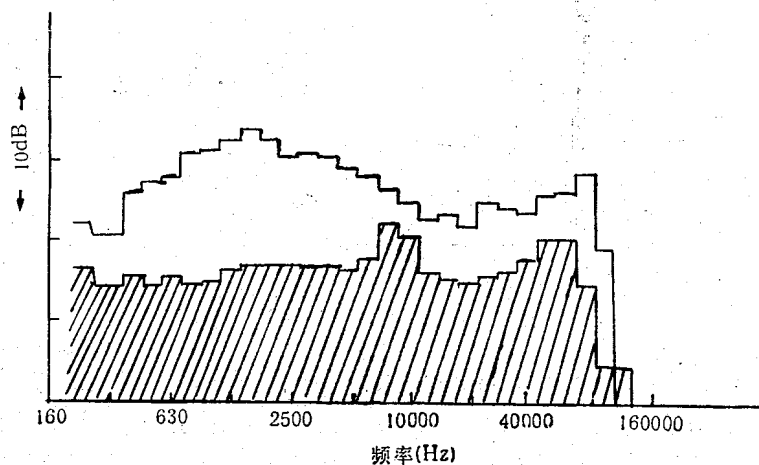


图 9B 爆破型高频脉冲三分之一倍频程频谱图

负冲击波之后的一个脉动被 70kHz 的正弦波所填充；紧接这个脉动脉冲出现的第二次爆破过程却没有高频成分填充其后的一、二次脉动。两次爆破过程的总长度一般在 5ms 以上，其频谱与图 9 所示的爆破脉冲相比，低频成分更丰富一些，由低到高呈连续型。

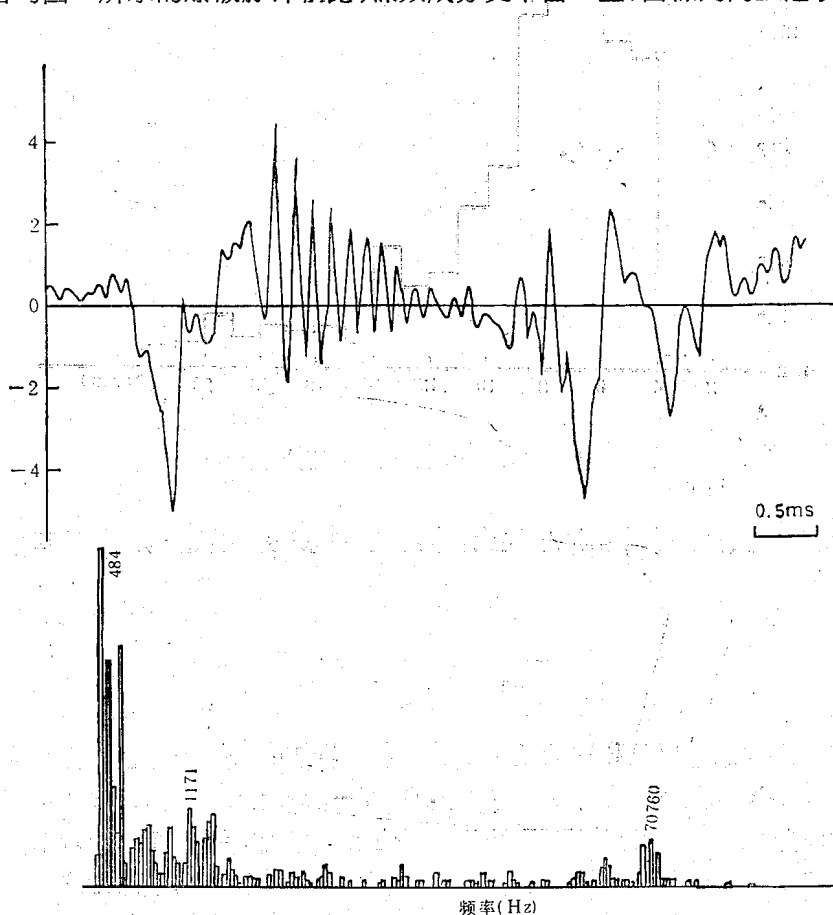


图 10 具有两次爆破的高频爆破型脉冲波形与频谱图

3. 脉冲周期 江豚的声脉冲周期变化非常大，对 145 个信号取样中的 646 个脉冲进行了统计，最小周期为 3ms，最大超过 95ms。较集中的范围在 4—9 ms，约占总数的 63.4%。图 11 中的百分比是这样进行统计累加而得到的：凡处于相邻两个整数之间的周期(ms)归并为一组，只包括下限，上限则归并到高一组中；例如，周期为 5ms 的脉冲被累加到 5—6ms 的一组(5 是 4—5 组的上限)。

4. 声压级 在实验水域中，本底噪声的总声压级一般为 85 至 90dB($0\text{dB} = 1\mu\text{Pa}$)，在距江豚 1m 处的正前方测得的高频脉冲信号声压级在 104—107 dB 之间。这个结果与 Purves 在印度河三角洲库迪(Kudi)湾测得的值(105—108dB)很接近。

在实验过程中，几次有拖拉机和汽车经过河边，江豚突然表现出“惊恐不安”，此时脉冲信号的声压级比原来提高了将近 10dB，游泳速度也有明显增加。这可能是因为汽车或拖拉机经过时水中的背景噪声增加，江豚正常的回声定位能力受到了干扰，为了保证声呐系统的有效工作，使它具有足够的接收信噪比，就必须提高声源的发射功率。同样，江豚

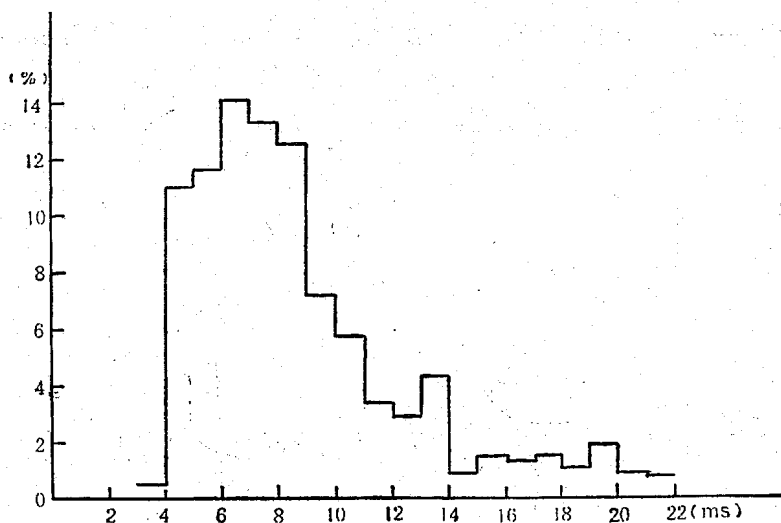


图 11 江豚声脉冲周期百分比分布图

在受到其它骚扰时(如向水中丢进一块土块),随着游泳速度的提高,发声的强度也会有明显的增加。

三、讨 论

本实验测得的江豚高频脉冲周期可以从几毫秒增加到一百多毫秒,低频脉冲最大周期长达 1s 之多。Purves 测得的江豚脉冲周期为 6.7—50ms; Kazuhiro Mizue 测得的为 1.25—12.5ms。差异如此之大可能与实验时江豚所处水域环境有关。江豚要对不同水域中的不同目标进行探测,所用的脉冲周期肯定是不相同的。必须指出,在已发表的众多的研究报告中,即便是同一种江豚,各个研究者的测试结果大都不完全相同(张思照等,1984),这大概都是实验条件和实验水域环境不同所致。在我们的实验中,江豚没有经过专门驯养,场地未设专门目标和障碍,是在一定的开阔水域的半自然条件下进行测量的,所得结果应更接近自然状态。从总的平均情况看,江豚的脉冲周期要比体型较大的胆鼻海豚的脉冲周期小得多。

江豚的回声定位脉冲,就其频率成分而言,既有低频窄带和高频窄带,又有宽带,通常多以宽带脉冲为主。爆破型脉冲的频谱呈连续型,可以从几十 Hz 一直延续到 70kHz。目前人们为了远距离的探测目标,不得不设计低频大功率声呐,而为了提高分辨率又不得不另行设计高频声呐,可是海豚的“动物声呐”却完美地解决了这一矛盾。

小功率发射是江豚“动物声呐”的一个突出特点。表 1 列出了几种海豚声信号的声压级(距海豚 1m 处的测量值)。从表中可以看出,江豚的声压级最小,所以江豚的“动物声呐”作用距离也必然最短。江豚的这种小功率发射系统也许是它比较适应近岸海区生活的原因。

我们已记录到的江豚高低频脉冲达十几种之多;其中“调制脉冲”和“爆破脉冲”在

1981 年的实验中已经记录到,只不过当时由于仪器频带的限制,10kHz 以上的频率成分被滤掉了。江豚利用这许多种的脉冲,在探测中相互补充,便可更详细地了解其周围复杂的浅海环境。

江豚的食物以浅海中的小型鱼虾为主,为了有效地捕捉小目标,就必须提高其“动物声呐”的分辨率,提高分辨率的关键是提高发射频率。在我们的实验中也说明了这一点,一般情况下,高频脉冲幅度远大于低频脉冲幅度。Purves 根据无喙海豚(与江豚同科)的声脉冲频率可高达 140 kHz 这一事实,估计江豚的声脉冲频率至少也不会低于这一数值。

表 1 几种海豚声信号的声压级

海 豚 名 称	声压级(dB) (0dB = 1 μ Pa)	测 量 者	个体一般体长 (m)
胆鼻海豚 (<i>T. truncatus</i>)	220	Au, W. W. L.	3.6
真海豚 (<i>D. delphis</i>)	140	Evans, W. E.	2.6
恒河豚 (<i>P. gangetica</i>)	140	Evans, W. E.	2.5
亚河豚 (<i>I. geoffrensis</i>)	166	Evans, W. E.	2.5
短吻豚 (<i>L. obliquidens</i>)	170	Evans, W. E.	2.3
无喙豚 (<i>Phocoena phocoena</i>)	125	Busnel, R. G.	1.8
江 豚 (<i>Neophocaena phocaenoides</i>)	108	Purves, P. E.	1.5

四、结 束 语

江豚声信号包括连续声和脉冲声。连续声信号波形各不相同,中心频率成分在十几种以上。脉冲信号表现为低频窄带、高频窄带和宽带几种,其中爆破型脉冲频谱呈连续型,频率范围从几十 Hz 到 70 kHz。脉冲信号重复周期变化范围很大,从 3ms 到 95ms 以上。

江豚“声呐系统”发射的声功率是海豚类中最小的一种,声能量主要集中在高频。高频信号声压级在 104—107dB 之间,其幅度远大于低频脉冲幅度。

江豚同其他海豚一样,具有完善的“动物声呐系统”,但人们对它的了解还十分不够,需要进行深入的研究,这对进一步改善水下声探测系统有很大的指导意义。因本实验记录的声信号频带范围受仪器所限,故频率高于 70 kHz 的江豚声信号尚待进一步记录与分析。

参 考 文 献

- 张思照等, 1984. 江豚声学行为的观察与水下声信号的初步研究. 海洋科学集刊 23: 27—40.
- Au, W. W. L., R. W. Floyd, R. H. Penner and A. E. Murchison, 1974. Measurement of echolocation signals of the Atlantic Bottlenose Dolphin, *Tursiops truncatus* Montagu, in open waters. *J. Acoust. Soc. Am.* 56(4): 1280—1290.
- Johnson, C. S., 1968. Masked tonal thresholds in the Bottlenosed Porpoise. *J. Acoust. Soc. Am.* 44(4): 965—967.
- Purves, P. E. and G. E. Pilleri, 1983. Echolocation in whales and dolphins. pp. 149—161. Academic Press.
- Kazuhiro Mizue, Akira Takemura and Kei Nakasai, 1968. Underwater sound of the Chinese Finless Porpoise caught in the Japanese Coastal Sea. *Bull. Fac. Fish. Nagasaki Univ.* 25: 25—32.

RECORD AND ANALYSIS OF ACOUSTIC SIGNALS OF THE FINLESS BLACK PORPOISES (*NEOPHOCAENA* *PHOCAENOIDES*)*

Zhang Sizhao Song Zhengxiu Qi Meng'e Xu Lanying Xu Ruyan
(Institute of Oceanology, Academia Sinica)

ABSTRACT

Measurements of echolocation signals of three finless black porpoises bred in a stream near the seashore show that finless black porpoises can emit not only high frequency pulse but also low frequency pulse. During the course of experiment, five different kinds of low frequency pulse and four different kinds of high frequency pulse were recorded. Oscillogram and spectrum were presented after these sound signals were analysed in laboratory. It was also found that the high frequency signals had a maximum energy between 60 and 70 kHz which is much higher than echolocation signal of *N. phocaenoides* reported by Purves et al., yet the peak energies of low frequency pulses are different from each other. The time intervals between two successive pulses in a pulse train were found to be highly variable, the pulses of intervals from 4 μ s to 9 μ s account for about 62.4%. The sound pressure levels of the echolocation signals in reference to 1 m distance in front of the animals' rostrums were in general between 104dB and 107dB re. 1 μ Pa (0dB=1 μ Pa) and closely associated with animals' speed. The faster the speed, the higher the sound pressure levels.

* Contribution No. 1419 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.