

瓶鼻海豚的 click 声信号特性

牛富强, 杨燕明, 文洪涛, 刘贞文

(国家海洋局第三海洋研究所, 福建厦门 361005)

摘要: 对自然环境下圈养在网箱内的瓶鼻海豚的发声及信号特性进行研究, 利用实验室构建的宽频信号记录系统, 获取大量的海豚原始发声信号, 借助 Matlab 软件对这些信号进行时域、频谱分析。结果表明, 瓶鼻海豚的发声信号复杂多样, 主要分为滴答声、哨叫声和爆裂脉冲等三类。重点研究的答声属于高频窄脉冲, 频率分布范围广, 集中在 2~160 kHz, 峰值频率在 110 kHz 附近, 高于室内环境下瓶鼻海豚的答声信号的峰值频率; 并且不同的声行为下, 瓶鼻海豚发出的答声的次数有明显不同, 喂食和训练时, 发声次数较多, 但频谱特性的变化趋势基本一致。

关键词: 瓶鼻海豚; 频谱分析; 声信号特征

中图分类号: P7 Q62

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2011)-02-0148-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2011.02.008

Vocalization and signal characteristic of bottlenose dolphin

NIU Fu-qiang, YANG Yan-ming, WEN Hong-tao, LIU Zhen-wen

(Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, Fujian, China)

Abstract: The research on the vocalization and signal characteristics of bottlenose dolphins in natural environment has been done. A large amount of original vocal signals are obtained by the broad frequency-band recording system integrated by laboratory instruments. Signals are evaluated by Matlab tools, and the results suggest that the sounds of bottlenose dolphins are complex and diverse, mainly including click, whistles and burst pulses etc. The paper focuses on the clicks having high frequency and narrow time. Clicks have a wide range of frequency distribution concentrating in 2~160 kHz and the peak frequency as high as 110 kHz, but dolphins in tank emit clicks with lower peak frequencies. The number of clicks is obviously different under different acoustic behavior. Dolphins emit clicks more frequently at feeding and training times but the trends of spectral characteristic variation are basically the same.

Key words: Bottlenose dolphin; spectrum analysis; signal characteristics of sound

0 引 言

海豚具有发达的回声定位系统, 它们的发声在其生命活动中有着至关重要的作用。海豚的回声定位系统, 分为三个子系统: 接收系统、传输系统和处理判决系统。瓶鼻海豚具有一个宽带的听觉接收系统, 可以听到频率在 100 Hz~150 kHz 之间的声音, 最大听觉灵敏度大约在 40 dB/ μ Pa^[1]。

海豚声纳研究起源军事应用, 模拟海豚声纳, 制造水声定位器。随着水声技术的发展, 对海豚声纳的研究也越来越多, 应用也越来越广, 涉及到渔

业、医学等。医学超声治疗的研究成为新热点, 在国外已有利用海豚发出的超声波为人唤醒自闭症的先例, 国内也有不少基于海豚机理的脑瘫超声治疗仪的研究。

近年来, 国内外对海豚声纳的研究主要集中在两个方面: 一是利用声学仪器监测海豚发声, 通过记录到的发声次数来估算海豚种群数量及分布; 二是研究海豚的声信号特征及听力敏感度, 制作各种海豚听力敏感的声发射装置, 最终实现利用水声技术来保护海豚的目的。这两方面的研究, 国外开展较早, 并且取得了相应的成果^[2-5]; 而国内起步较晚, 目前仅仅有厦门大学、香港野生自然保护基金会等对中华白海豚的水下声信息已进行了初步的记录分析, 但国内很少有正式发表的论文资料。本文对自然环境下圈养在网箱内的瓶鼻海豚的发声信号特征进行研究, 目的在于了解海豚的基本声学特性以及与其行为之间的关系, 对今后相关的研究提供重要的参考资料, 为更好地保护海豚奠定基础。

收稿日期: 2010-03-09 修回日期: 2010-06-11

基金项目: 国家海洋局第三海洋研究所基本科研业务费专项资金资助项目(海三科 2009049、海三科 2009010); 2010 年国家海洋局青年科学基金项目(2010422)

作者简介: 牛富强(1981-), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 研究方向为水声信号处理及海洋哺乳动物声学。

通讯作者: 杨燕明, E-mail: ymyang126@126.com

1 海豚发声信号的基本特征

关于海豚发声信号的记录,最早是由Φ·乌德于1951年进行的^[1]。在乌德之后,又有人做了大量工作,发现海豚在水下产生的声信号是多种多样的^[6]。60年代初出现了关于海豚声信号的结构和参数方面的首批资料,并积累了大量介绍海豚发射信号和在水族馆中活动的对比资料。1961年,Lilly根据海豚的生理功能和信号参数对海豚信号进行了分类^[7]。目前国内外,一般将海豚声音分为三大类^[8]:滴答声(click)、哨叫声(whistles)和爆裂脉冲(burst pulses)。海豚的click信号属于高频窄脉冲,集中在宽频带的超声范围,持续时间短,用来定位、探测等,在中高频(2~200 kHz)时成为识别clicks,可清晰识别物种种类特性,而低频(0.25~1 kHz)时成为定位clicks,可收集环境地形、探索粗略性的信息;whistles信号是一种时间连续信号,持续时间从十分之几秒到几秒,频率分布主要集中在声频范围内,一般几千到十几千赫兹之间,瓶鼻海豚的whistles频率大约在5~15 kHz之间,主要用来通讯交流;burst pulses信号属于应急、突发信号,对此信号的结构形式和参数研究较少,主要是生物学家在研究,他们对这类信号进行了定性区分,分为吠声、噪声、颤音等^[7]。本文重点研究瓶鼻海豚的click声信号特征,自然环境下瓶鼻海豚的click信号长度大多分布在50~80 μs,峰值频率70%分布在110~130 kHz,声源峰值幅度最高可达230db/μPa^[8]。

2 实验海豚及方法

2.1 实验海豚

2008年12月至2009年2月,对某海湾海豚保护基地两只瓶鼻海豚的发声进行了10次现场记录,每次记录时间大约在4h,共记录了160段(每段约3min)原始发声数据,包括自由游泳、喂食、探测、受惊吓等状态。两只瓶鼻海豚分别为中年雄豚(M1)、青年雄豚(Y2),实验期间海豚的基本性状见表1所示。

M1、Y2圈养在1#网箱内,网箱尺寸为29m×

表1 瓶鼻海豚的基本性状
Table 1 The status of bottle-nose dolphins

ID	体长	体重	估计年龄	成熟状态	圈养网箱
M1	240cm	134kg	16岁	中年	1#
Y2	213cm	120kg	12岁	青年	1#

29m,该处海域水深约5m。该海湾海域属于港内海湾,风浪较小,湾口海水清澈、天然饵料丰富,非常合适海豚生存。

2.2 实验系统的构建

海豚可以发出多种类型的声音,并且覆盖频带宽。为了能记录海豚所发出的各种声音,实验所构建的系统必须要有足够的带宽、足够高的采样率,采集系统示意图如图1所示。

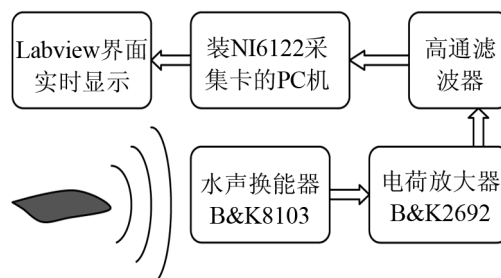


图1 宽频数据采集系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of broadband data acquisition system

水声换能器选择丹麦B&K公司生产的宽频带、高灵敏度全方向性的8103,频率响应从0.1 Hz到180 kHz,灵敏度为-211 dB re 1V/μPa。电荷放大装置采用B&K公司生产的2692,B&K2692带有4个通道,频率响应从1 Hz到100 kHz,测量范围0.1 mV到10 V。系统核心部分,使用美国NI公司生产的16位高频低噪采集卡NI6122,它具有4个模拟输入通道,可以同步采样,采样率达500kHz。经过采集卡之前,先对发声信号进行高通滤波,实际测量实验海域的海洋背景噪声功率谱级在40 dB附近,频率在1 kHz以下,因此将滤波下限频率设置为2 kHz来滤除海洋背景噪声。最后将初步处理后的信号在PC机上实时显示并储存。

2.3 数据分析方法

对原始数据的分析,主要通过Matlab (Matrix Laboratory)软件编程来完成。进行声谱分析时,使用一维离散快速傅立叶变换函数FFT。Matlab可以从时域、频域、时频域对声信号进行分析,同时具有结果可视化功能,提供原始信号、频率谱和声谱图。基于以上功能,本文用如下方法,由于数据量大,首先将采集到的原始数据按时间分段,考虑到Matlab的处理速度,每10s分成一个独立文件,然后截取其特征明显部分,得到发声信号的时域波形图。由于海豚发声持续时间短,而系统的采样率高,因此进行频域及时频域分析时,采用补零FFT来提高频率分辨率。最后对这些结果进行统计,找出所研究海豚的发声信号特征。

3 研究结果及分析

本文研究只涉及发声的时间和频率特征,而不涉及计算发声强度的任何绝对测量值。因为实验对象是自然环境下的海豚,海豚一直处于游动状态,无法保持海豚和水听器之间的距离固定不变,由于声强度和声源距离的平方近似成反比,所以所记录数据的强度对本文研究没有实际意义。忽略强度计算,对于本文的分析研究,不会带来任何影响。

3.1 高频脉冲信号分类

这类信号由一连串的单个高频窄脉冲(click 信号)所构成,脉冲数目从几个到上百个不等,重复时间一般在 30~490 ms 之间。单个窄脉冲,也即 click 信号,有一个或多个完整波形组成,每个波形的长度约为 20~30 μ s 之间。对现场采集的发声信号进行处理分析,共提取出 4214 个脉冲串,按照含有完整波形个数的多少分类,由于 click 单个波形长度只有几十微妙,远远小于水下声波反射的时间差,因此多波形 click 信号是独立存在的一类,将海豚的 click 信号分为 5 类,如图 2 所示,其中含有单个波形的 click 占大多数,含 3 个以上波形的较少,如图 3 所示。

3.2 发声频率范围及谱峰值

采用本文 2.3 所述的方法,对只含一个波形的 click 信号进行频谱分析,任意选取 60 个此类信号,进行 256 点补零 FFT 计算,所得结果如表 2 所示。以表中数据可以看出,瓶鼻海豚的 click 信号频率范围大约为 2~160 kHz。

取出上述 60 个 click 中的一个进行频谱分析,并与室内环境下(某海底世界海豚馆)的瓶鼻海豚发声进行对比,如图 4 所示,将带宽 B 定义为功率谱幅度下降 3dB 时所对应的频率范围。由图 4 见,室内环境下瓶鼻海豚 click 信号功率峰值频率较低,在 73kHz 附近,频谱能量分布在 2~148kHz 之间,带宽 B 下限频率在 27kHz,上限频率在 88kHz,大约在 61kHz。自然环境下,瓶鼻海豚 click 信号功率峰值较高,在 110kHz 附近,频谱能量分布也更广,在 2~160kHz 范围内,带宽 B 和室内环境下的海豚相似,频率大约在 57 kHz,下限频率在 79 kHz,上限频率在 136 kHz。

3.3 不同声行为下发声信号特性分析

海豚通过连续发射 click 信号对目标物进行探测和定位,在接收到前一个 click 的回波后才发射

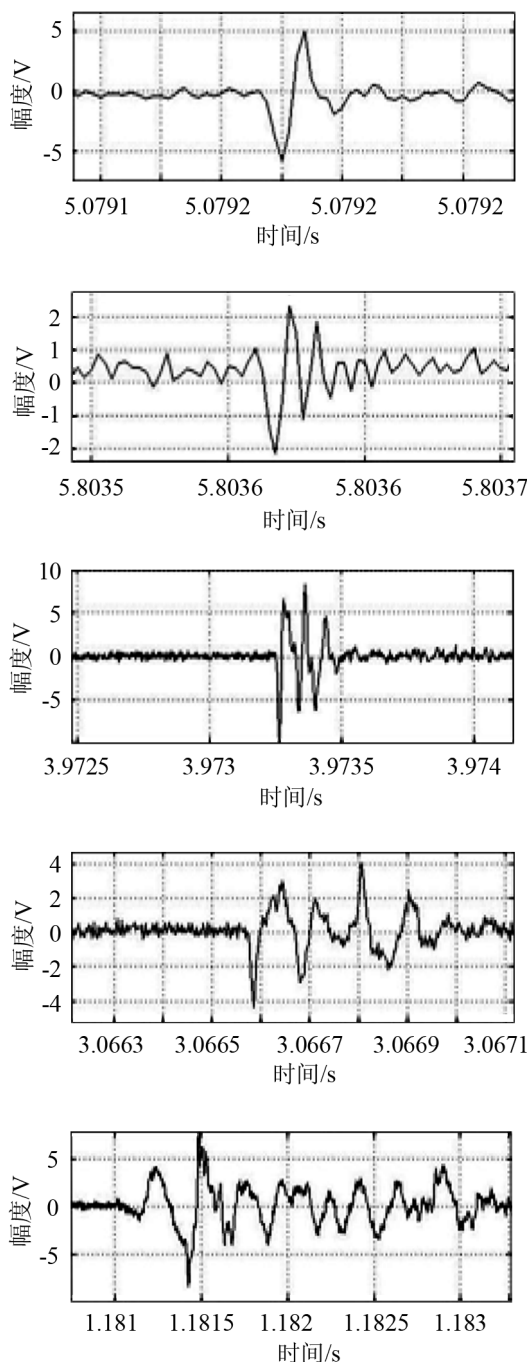


图2 瓶鼻海豚 click 信号波形

Fig.2 Click waveform of bottlenose dolphins

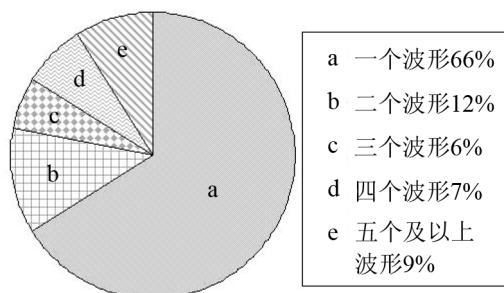


图3 瓶鼻海豚 click 信号分类

Fig.3 Click classification of bottlenose dolphins

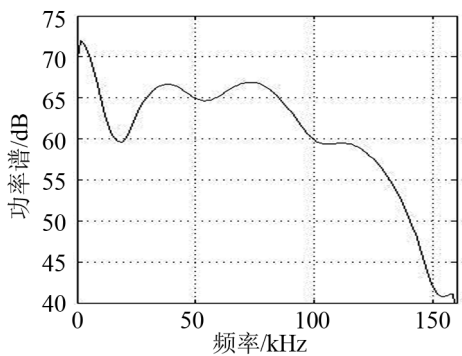
表2 瓶鼻海豚单脉冲 click 信号频谱统计表
Table 2 Click spectrum statistics of bottlenose dolphins

序号	频率范围/kHz	序号	频率范围/kHz
1	2.0~141.0	31	2.0~140.0
2	2.3~143.0	32	2.0~116.0
3	2.0~120.1	33	2.1~130.1
4	2.1~120.1	34	2.1~128.0
5	2.0~130.0	35	2.3~120.1
6	2.0~70.0	36	30.0~142.1
7	2.0~130.0	37	2.1~110.0
8	2.0~125.0	38	2.1~126.0
9	15.1~160.0	39	28.2~128.0
10	2.0~140.0	40	2.5~129.1
11	2.0~122.0	41	2.7~139.1
12	2.0~80.0	42	2.0~140.0
13	2.0~122.0	43	3.2~158.1
14	2.0~150.0	44	2.5~160.0
15	2.0~122.0	45	4.5~143.0
16	2.0~126.0	46	2.3~143.0
17	2.0~140.0	47	2.5~120.1
18	2.0~141.0	48	2.1~126.0
19	2.0~120.0	49	2.0~130.1
20	2.0~140.0	50	2.0~158.0
21	2.3~124.0	51	3.9~126.1
22	2.1~130.0	52	2.0~125.1
23	2.1~130.0	53	11.0~160.0
24	2.1~125.0	54	4.1~145.0
25	3.6~128.0	55	2.1~122.0
26	2.1~146.0	56	2.0~80.0
27	2.5~118.0	57	2.1~126.1
28	3.7~134.0	58	2.2~153.1
29	2.0~122.0	59	2.1~122.0
30	3.1~119.0	60	2.0~130.1

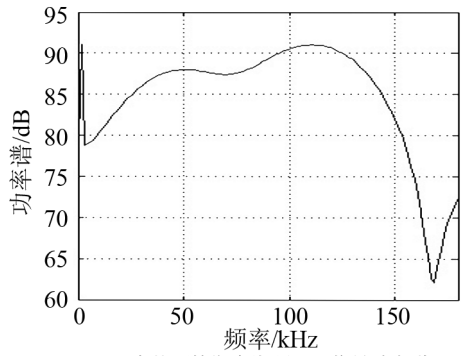
下一个信号,这一循环速率随着海豚接近目标物而有所增加^[9],因此可以通过 click 次数的变化来粗略判断海豚的活动。通过现场观察和 click 记录仪记录到的数据分析得出,在喂食和训练状态下海豚发出 click 次数较多,而自由游泳和受惊吓(利用声学警报器,可以发出 20~120kHz 的信号,声源级达到 120dB/ μ Pa)时,海豚发出 click 次数较少。选取各种行为下记录到的 60 个 click 信号进行频谱分析,结果如图 5~8 所示。比较各曲线可以看出,不同的声行为下,虽然海豚发声强度不同,但是频谱特性的变化趋势几乎一致,除了喂食状态和自由游泳外,其他行为没有明显的谱峰。

4 讨论

瓶鼻海豚发声信号复杂多样,各种信号在时域上存在较大差距,但频率都集中在超声频带内。通过实验结果分析可以看出,click 声信号长度主要集中在 20 μ s~30 μ s 之间,信号间隔差异较大;不同的



(a) 室内瓶鼻海豚click信号功率谱



(b) 自然环境瓶鼻海豚click信号功率谱

图4 室内与自然环境下瓶鼻海豚 click 信号功率谱对比
Fig.4 Comparison between click power spectrums of bottlenose dolphin in tank and in open water

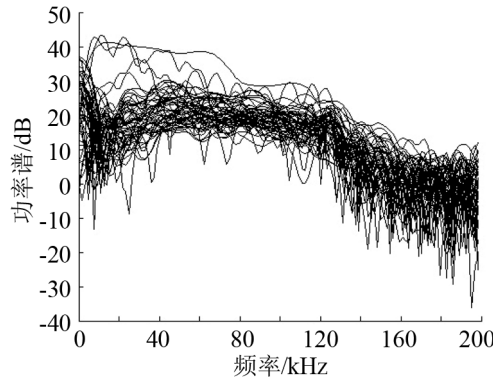


图5 喂食状态下瓶鼻海豚 click 信号功率谱
Fig.5 Click power spectrum of bottlenose dolphin during feeding

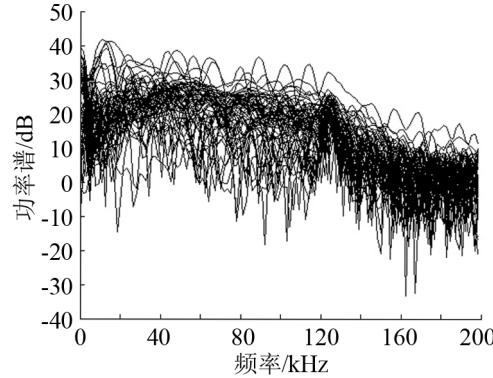


图6 训练状态下瓶鼻海豚 click 信号功率谱
Fig.6 Click power spectrum of bottlenose dolphin during being stimulated

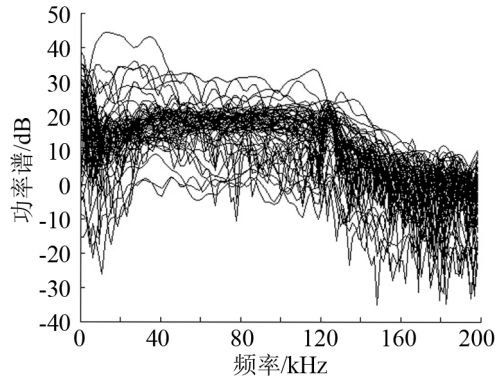


图7 受惊吓状态下瓶鼻海豚 click 信号功率谱
Fig.7 Click power spectrum of bottlenose dolphin during being frightened

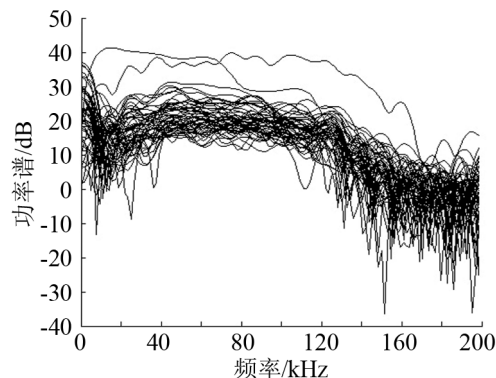


图8 自由游泳状态下瓶鼻海豚 click 信号功率谱
Fig.8 Click power spectrum of bottlenose dolphin during swimming

声行为下瓶鼻海豚 click 声信号的频谱特性基本上是一致的, 峰值频率在 110~120 kHz 之间, 但发声次数有显著不同。喂食和训练时, 发出的 click 声信号次数较多, 而自由游泳和受到惊吓时, 发声次数明显减少。另外, 实验计算结果也表明, 室内环境下瓶鼻海豚的 click 声信号频率峰值比自然环境下低 40 kHz 左右, 这与 Whitlow W L Au 研究结果

相一致^[8]。本文对自然环境下圈养的瓶鼻海豚发声进行记录与分析, 实验结果对于以后开展海豚声学相关研究提供了基础。对 click 声信号强度以及频谱特性的细化分析, 将是进一步的研究方向。

参 考 文 献

- [1] 格鲁勃柯夫 A Г. 海豚水声定位器[M]. 北京: 国防工业出版社. 1984: 10-33.
Ge Lu Bo He Fu A Г. Dolphins' Hydro locator[M]. Beijing: National Defense Industry Press. 1984: 10-33.
- [2] Berrow S D, O'Brien J, O'Connor I, McGrath D. Abundance estimate and acoustic monitoring of harbor porpoise *Phocoena phocoena* in the Blasket Islands candidate Special Area of Conservation[R]. Report to the National Parks and Wildlife Service, 2007: 1-50.
- [3] Gordon J, Northridge S. Potential impacts of Acoustic Deterrent Devices on Scottish Marine Wildlife[R]. Scottish Natural Heritage Commissioned Report F01AA404, 2002: 1-100.
- [4] Whitlow W L Au, Robert W. Floyd, Ralph H. Penner, Earl Murchison A. Measurement of echolocation signals of the Atlantic bottlenose dolphin, *Tursiops truncatus* Montagu, in open waters[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1974, 56(4): 1280-1290.
- [5] Kamminga C, Beitsma G R. Remarks on dominant sonar frequencies from *Tursiops truncatus* [J]. Aquatic Mammals, 1990, 16(1): 14-20.
- [6] Whitlow W L Au. The dolphin sonar: excellent capabilities in spite of some mediocre properties[J]. High-Frequency Ocean Acoustics, 2004, 728(4): 247-259.
- [7] Lilly J C. Sonic-ultrasonic emissions of the bottlenose dolphin[J]. University of California Press, 1996: 503-508.
- [8] Whitlow W L Au. The Sonar of dolphins[M]. New York: Springer-Verlag, 1993: 119-134.
- [9] Whitlow W L Au, Kelly J. Benoit-Bird. Automatic gain control in the echolocation system of dolphins[J]. Nature, 2003, 423: 861-863.