

北海声学测距系统 ACRA-FPN 的科研结果*

G. H. 齐姆

(FWG 西德国防军水声与地球物理研究所)

1975年ACRA-FPN以被动声学测距方式投入运行。及至1983年安装了声学发射/接收阵之后,又开始了合置与分置情况下的声呐实验。利用一个空间置换的接收阵可以在已知环境条件下做长时间的声学实验。特别在有风暴和高海况时,已获得令人感兴趣的基本数据结果。例如环境噪声、混响和传播损失。后者系由考察船来搜集数据。本文将给出对ACRA-FPN的描述和对研究结果的评价。

一、引言

声学测距站在各种环境条件下的长期声学实验成为可能,与运载体相比较,它的主要优点是利用空间固定的发射器和水听器仔细地研究信号与时间的关系;此外,它可以在十分恶劣的气象条件下进行研究,而这时考察船是无法成功地进行工作的。因此,考察船和水声测距站这两种方式构成了完整的水声科研工具,各有其优点。根据这一想法和任务,FWG于1969年提出在某一合适的海区安装声学测距装置的建议。

应当提及的是,约在三年之前即已提出了一个深海固定测距计划,并已于次年在亚速尔群岛海区具体实现了,这是8个北约国家合作的一个范例,这个称为AFAR(亚速尔固定声学测距)系统直至1975仍在工作。获得了大批的声学数据,其中大部分至今仍列为机密文献的主要内容。它的某些基本结果读者可由Flatte^[1]的著作中得到。

关于浅海测距,从提出建议到开始建设,这是一个达四年之久的阶段,在这期间必须解决一系列的困难问题,它们是:

进行可行性研究,为取得最佳解决而对结果进行过滤。

为在北海德国大陆架选择一个合适的站址而进行研究,该处应当具有典型的外海季度变化特征。

由于耗资巨大,需要解决预算问题。

解决测距站建成后的操作问题。

约经过10多年之后,由来自工业界,高等院校以及许多科学技术方面的专家做了无数次的讨论,对上述问题有了回答。下面可用两幅图片来说明工程设计的结果。图1与图2以侧视和顶视图给出了北海研究平台(FPN)的概略。它有一个钢管网络构造的重型底座,其上可承载住房、工作室、直升飞机平台以及各种辅助设备等等。另外还有一个单独的基础支撑着巨大的斜塔,其上有导轨可供换能器阵的升降。此处装有三个反射罩式的换能器,可以遥控使之转动或俯仰,可做合置方式的操作。

频率范围 400赫——10千赫

声源级 196——208dB/ μ Pa

指向性指数 18.5——32.4dB

图3表明FPN的地理位置。它位于Heligoland西北40海里,1984年在距FPN11公里处于

* 本文系作者于1986年5月在北京国际声学、语言、信号处理讨论会上的报告。

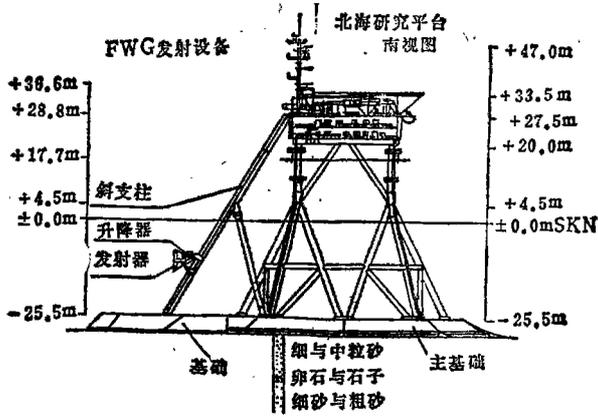


图1 北海研究平台 FPN 的侧视图

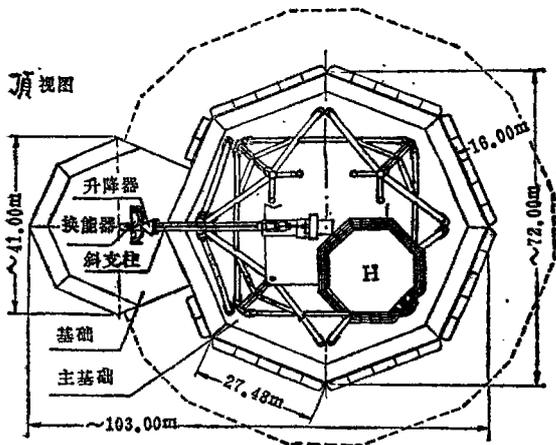


图2 北海研究平台 FPN 的顶视图

海底又安装了接收阵。阵的侧向朝着 FPN，阵长约200米，28个不等间距的水听器通过前置放大器、电缆之后与 FPN 的实验室相连。测距系统的安装不是一次实现的，而是分几步完成的。FPN 本身，亦即不带声学设备的这部分是1975年建成的。经过几次技术上的挫折之后，于1983年4月大功率的换能器及其支撑设备方始运行，接收阵于1984年8月顺利地安装完毕。

可以有两种利用这一设备的方式：有限时间内的多学科考察(2—6个星期，8—12个人)，通常要用考察船或飞机与 FPN 联系；长时间的无人自动测量，这要用自动数据记

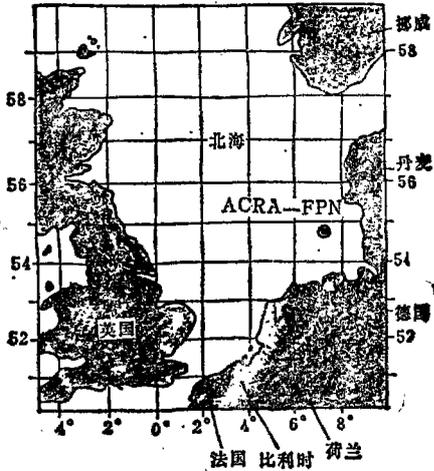


图3 ACRA-FPN 的地理位置

录设备进行观测，或用带有简易仪器的固定船只(5人以下)来长期测量。

二、科研成果的一般特征

由于篇幅有限，本文无法详载数据结果。象 FPN 这一独特的代价巨大的设备，不仅能用于水声研究，还可供其它学科使用，例如地球物理方面的应用，对此则不予赘述。

我们熟知的声呐方程^{[2][3]}是水声学中的一个主导性质的方程，它包含着与环境条件强烈有关的几项：噪声级 NL，混响级 RL，以及传播损失 TL。

根据 FWG 的任务，该所的研究首先是着重环境声学，这就是说，首先认为自然界对声学现象是有影响的；其次，应当对环境因素的影响排出一个优先顺序；第三，对此过程要作声学模拟研究。当最为优先的环境效应能够很容易地被直接或遥感测得时(最好是用飞机或卫星)，可以说是相当成功的了。

FPN 测距站主要部件的完工日期影响了研究计划的秩序。因此，当环境噪声 NL 已经得到最终报告时，混响级 RL 的结果刚刚可以提交国际会议，而且数据将于最近才能予以发表。FWG 的科学家的研究成果已载入各

报告和其它出版物了,在本文之末附有FWG文献资源的著者目录。

使用 ACRA-FPN 设备 进行的某些研究工作是与美国海军系统中心(NUSC) 共同完成的。在下面的第3—5节中谈到的一些结果表明这一巨大的独特的设备对浅海研究所带来的益处。

三、环境噪声

1975年8月在德国科技部主持下举行了FPN落成典礼,不久即开始了FWG的环境噪声研究计划。

装载于FPN上的一些设备,如柴油机、泵等的噪声辐射是不希望的噪声,对此也利用紧靠平台附近悬挂式的或海底固定式的水听器做过系统的研究^[4]。

应用尝试法(或称试凑法)可以验明这些不利的噪声源。关于环境噪声连续几年的研究结果,已在P. Wille和D. Geyer的研究报告“浅海风生噪声机理的测量”^[5]中发表。虽然其中有许多章节,但有一节专门讨论了航运噪声以及远距离船舶的航行情况,对不同机理的噪声的重要性作了排列,这些结果均系FPN设备所测得。

实验设备、测量方法、数据记录与评价

利用一个安装在海底上,高1.8米,距FPN 400米的全方向性水听器来接收噪声,也可用研究船在其它站位上做比较测量。有关的环境参数测量已在文献^[5]中列出。噪声数据的记录是利用数字式滤波器,由25赫至12.5千赫的1/3倍频程,每秒平均一次。同时每10分钟或20分钟记录一次环境数据。对于所记的这些10(20)分钟内的数据组,选取感兴趣的环境参数下的噪声记录在1/3倍频程内求平均,最后处理出按月平均的数据及其标准方差。全部数据的记录与分析广泛采用自动化。按照Piggott的方法对风级定标。在记录中所包含的由于FPN=活动的或近处船舶

引起的不希望的噪声,可在处理之前人工地予以剔除。远处船舶的航行状况可用FPN雷达来记录。它们对噪声的贡献已经通过单程声呐方程做了计算,计算时TL是已测值,SL为某给定类型和航速的船舶的声源级。

结果

风成噪声

风力的作用是产生噪声的主要因素,风速或风级可以很好地作为一个噪声级的指示参数。

在频率-风速关系的基础上讨论了噪声谱级:当风速超过5节(9级风速)以及频率高于50赫时,谱级与风速的二次方成正比。这一规律在船只的航行密度低时成立(见图4)。

在FPN附近在低频下由于远处航船噪声的影响,最小的谱级或多或少地具有与风级无关的特征。

在高频端(高于3千赫),最小的谱级随风级的增加率低于6dB/倍频程,在某些情况下,趋于零甚至是下降(见图5)。

这些特征可以解释为由于气泡层的缘故使TL值增大,最近获得的TL结果表明,在高频比在低频更易于随风速而增长,气泡层的存在的影响仍不是十分清楚的,但已有不少的证据支持它的贡献。

噪声的变异性

越是海况不同于充分发展的海况,则用波高代替风速做为噪声参数所引起的误差就越大(见图6)。

与深海情况不同,传播路径对浅海风生噪声的影响甚小,不同浅海区的噪声数据是类似的,即使它们的声传播条件极为不同,如波罗的海与北海。

在给定风速下,噪声的变异性起因于大气温度分层特性引起的风速剖面的变化(见图7),在标准方差范围之内,谱级显然接近于高斯分布,这一效应几乎与频率,风速无关。

虽然过去提出过5节风速为一阈值,超过此阈则噪声的产生过程中将有一个主要的机

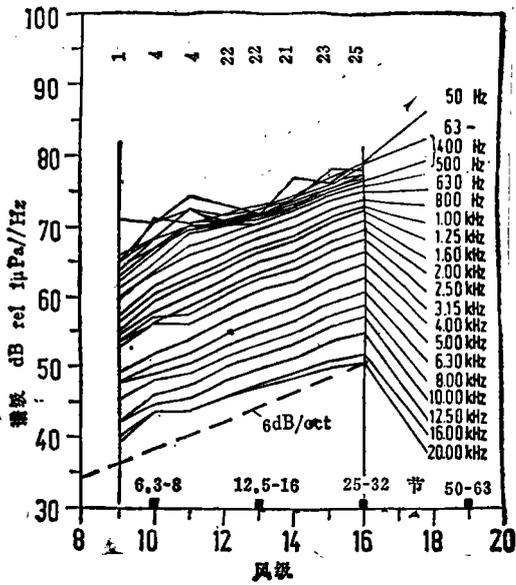


图4 环境噪声频谱与风级的关系, 波罗的海标准海区, 10月, 1/3倍频程带宽
虚线: 6dB/风速倍频程的标准斜率

了更详尽的结果。并给出了一些基本的定义, 如航行噪声的截止距离, 近距离船只的影响, 有贡献的船只数目与平滑效应。对由FPN雷达在24海里以内所观测到的航运状况与模型计算的结果作了验证, 并对此作了评价。连同在其它站位上所做的雷达观测, 可得出以下结论:

· 近距离少数几条船的作用总是较之平均航行密度的航行噪声为大。

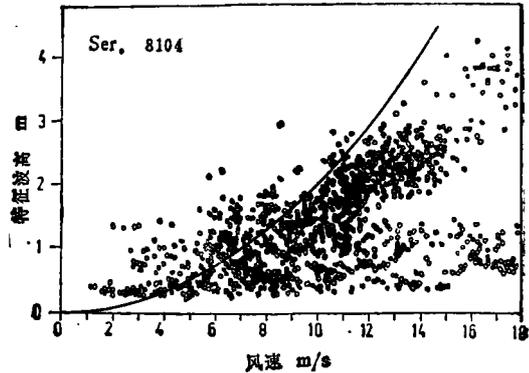


图6 特征波高与相应的风速的关系
FPN海区, 5月, 圆圈代表10分钟的平均值
实线——充分发展的海况, 即无限的风区

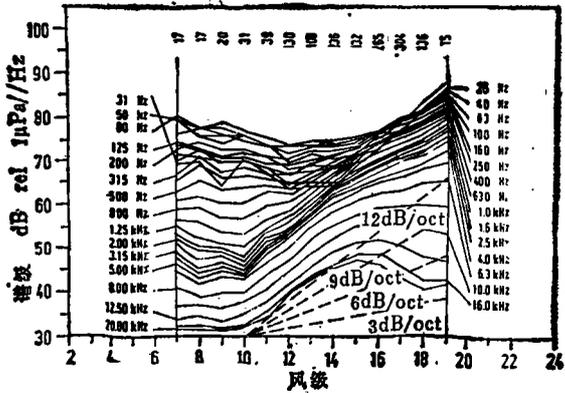


图5 环境噪声最小谱级与风级的关系
FPN海区, 12月—1月, 1/3倍频程
虚线: 3, 6, 9, 12分贝/风速倍频程
(由于更换水听器, 绝对级不可靠)

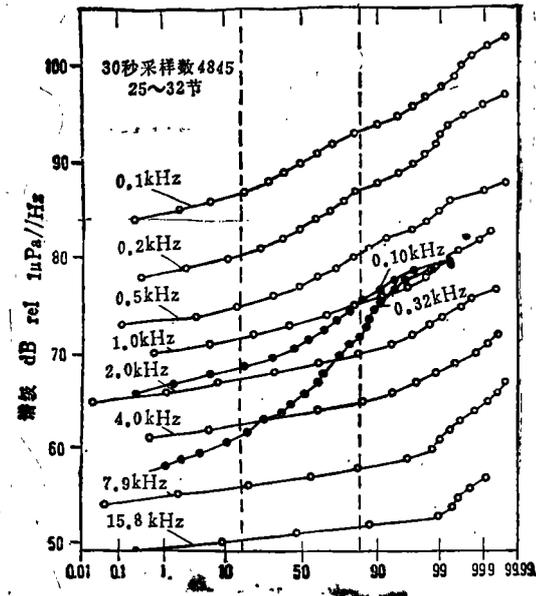


图7 噪声谱级的累积分布(百分比)
标度宽度 1dB 北海, 3月
圆点: Wenz 1972年数据

理, 但是, 产生噪声的直接机理, 例如海浪的泼/溅效应, 并未能很好的验证。

航行噪声

对于航行噪声已做过系统的研究, 其模型是基于对航行密度和航速的观察。图8给出了1/3倍频程的环境噪声数据与计算值的比较。在低频端, 航行噪声的影响与风成噪声的大小是可以比拟的。在文献[6]中对此给出

- 船只数目少则截止距离也小，
- 浅海中的平滑效应较深海弱得多。

四、混响与散射

混响是主动声呐作用距离的限制因子，特别是在浅海区，不平界面引起的混响往往超过海水介质本身的混响。

实验设备与数据评价

在FPN换能器安装之前，散射实验是用一个参量发射器做的。它是安装在FPN基础的一端或安装在距FPN约100米的海底固定钢塔上。发射器的主轴可以遥控做水平旋转和俯仰。由于参量阵的高度指向性(半功率束宽 $2.7^\circ-3.7^\circ$)，可将海面、体积、海底混响予以分开研究，接收可用合置的或分置的接收器。

在1983年中，利用FPN换能器开始了所谓的声道混响实验。由于它的指向性较差以及是浅海，不可能区分出各种型式混响。测量是合置方式的，为了提高数据采集速度，按照第5节中的方法对数据记录自动化做了一番努力。

利用前向和后向散射声级计算了散射强度和谱扩散，在引入某些标准之后，可绘出声道混响与距离(或时间)的关系，并利用FFT分析计算了频谱扩展。

结果

由FPN所完成的一部分海面海底散射实验结果已经公布^{[7][8]}。其作者有FWG的H. Herwig, B. Nutzel, NUSC的P. D. Koenigs和J. M. Monti。关于声道混响已有Herwig和Nutzal的论文^[9]。

海面散射

在图9中给出的是15节风速下散射强度与掠射角的实验曲线，并与Galybin的复合不平表面以及Champman-Harris-Eckart理论模型作了比较。在大掠射角下，Galybin模型与实验数据符合得很好。在小掠射角情况下，

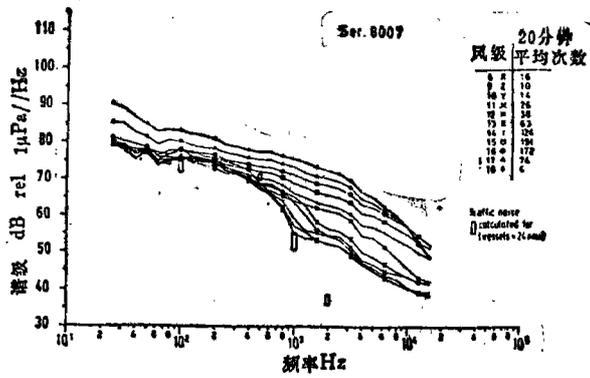


图8 1/3倍频程最小环境噪声谱与航行噪声计算值的比较
FPN海区，10月

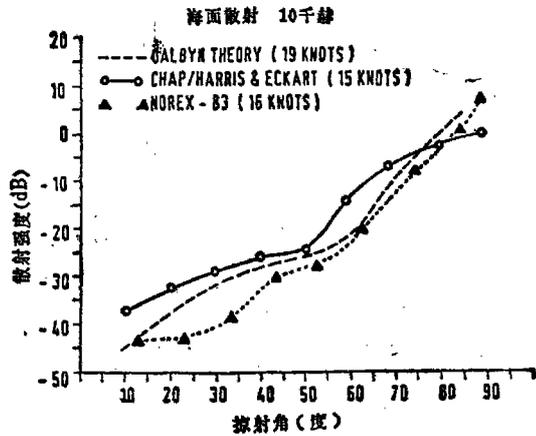


图9 散射强度与掠射角的关系，实验与理论比较

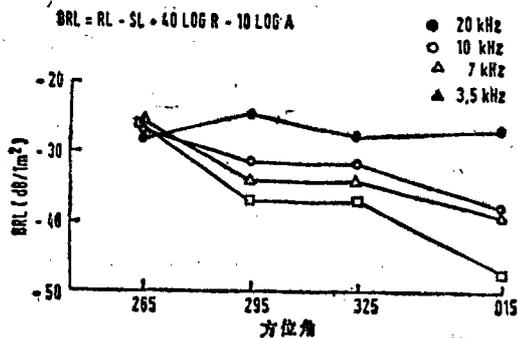


图10 海底混响与方位角的关系实测量

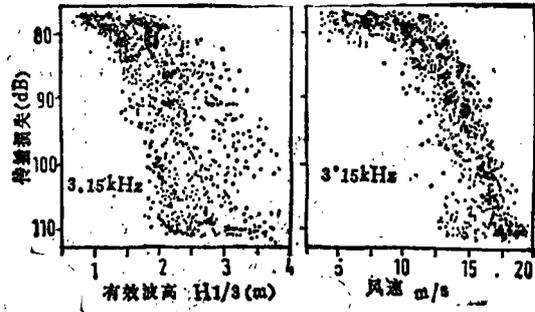


图 11 传播损失(3.2千赫)与波高(左)、风速(右)的关系。

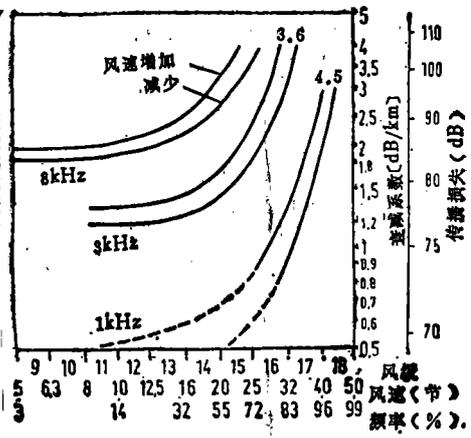


图 12 衰减系数 α 与风速的关系(log-log尺度)
 高风速下的斜率呈 n 次幂 $\alpha \sim v^n$
 最下边的标度为风速的累积概率

两模型与实验之间明显的不相符合，这时声的传播特性有重要的影响。根据文献[7]可以总结出以下的附加结论：

- 所测数据表明与频率略有关系。
- 对于前向散射，Beckman和Spicichino的理论值超过了实验值，但随角度的变化是互相一致的，在镜向上的散射强度与理论值相一致。
- 在散射强度预报中使用风速做为单一的环境参数，这一点应当特别注意。只有当充分发展的海况下才允许这么做。这说明，在模型实验中所要求的大的和小的不平整性参数是很少用得到的，这里有必要用两种不同的波长体制同时测量有方向性的波谱。

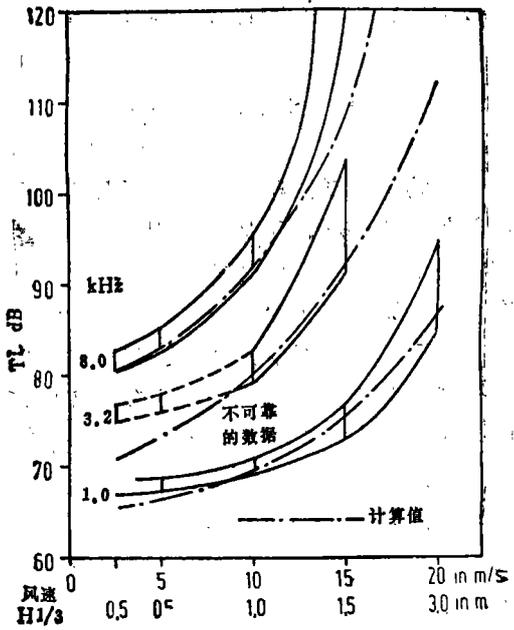


图 13 实测传播损失与将气泡估计在内的损失计算值的比较

• 海面下的气泡层的影响已被肯定。

海底反向散射

参量阵声源(3.5—20千赫)安装于海底之上7.5米高,海底与换能器的主轴成 9° 的掠射角。变更发射的方位角方向,可观察 100° 扇面内的数据。该海区的底质特征是由泥、沙和石砾组成。该区域内还有一些沙波地带和石砾地带,其散射甚强。此外潜水员曾做过水下观察,注意到在一个季度之内海底地形即有明显的变化。由几何图知,声源至照射面积的倾斜距离约为40米。图10为4个频率下海底混响与方位角的关系:

在20千赫无明显的方位角关系,通过方位角关系可以验证海底的类型或大的海底起伏参量。

在其它频率上,在 100° 的扇面内观察到了很强的方位角关系。然而在 265° 却不具有这种频率关系。因此,为描写方位角的变化关系需要一批大量数据方可。这里强调一下在使用参量阵声源时的特点。这时,在上述

频率范围内的散射强度随方位角的变化甚快,这是由于声束照射区域内的海底突出构造所致,如果使用通常的声学发射器或爆炸声,则很难分辨出这些构造来。

声道混响(RL)

现代主动声呐技术中,降低载频的趋势是不可忽视的。因此,详细的RL数据乃是进一步发展的前提。在浅海RL的衰减远较深海为慢。混响的另一个令人感兴趣的因子是频率扩展。关于混响的时间与频率的详细数据可从文献[9]中查到。

五、传播损失(TL)

当1984年8月刚一完成固定测距的安装后,即开始了系统的TL数据自动记录工作。此后获得了在各种气象、海况下的数据,风速由0.5至45节,波高由0.5至4米,这几乎包括了98%的各种自然条件。1986年7月在Halifax举行了国际声学大会,Wille,Geyer,Schneider^{[10][11]}提出了两篇关于用ACRA-FPN获得的TL数据报告。TL是决定主动式被动式声呐作用距离的重要数据。浅海TL数据的变化,在夏季主要受声速剖面的影响,在冬季主要受海面的影响。在传播模型中已考虑到了与波高有关的海面不平整性。当声速梯度较陡的情况下,部分的声线散射至海底,而海底是这些声线的吸声体。在较为平静的海况下,这一机制可以很好地描述冬季浅海传播衰减。但是有风暴时,只考虑不平海面的简单模型已不适用,因为还忽略了附加的其它环境因素。

测量技术、数据记录与评价

在单程传播方式下测量了数据。FPN上的发射器位于水面下20米,而在10.5公里远1.8米深度上用一水听器阵做为接收器。发射信号是围绕中心频率为1千赫、3.16千赫和8千赫1/3倍频程滤波的噪声频带,持续时间为1分钟。这三个频率是由于三个换能器的中

心频率所确定的。传播至FPN的信号通过电缆后每一区间为30秒做一次数字化记录,而环境参数的记录如前面第3节所述,在10分钟内平均一次。风速都归化成以气象标准波高10米为参考的。当不进行发射时,则改为记录环境噪声。与用船来测量传播不同,用固定站只能测得固定距离(10.5公里)上的TL值。因此,对此不可能区分出几何扩展和衰减来。在FPN海区冬季水文下用船测得的几何扩展,在1千赫时为63dB。此外,还表明,在冬季的TL无明显的深度关系,除非发射器或接收器放置在紧靠海面之下。所以,可以认为63dB是在ACRA-FPN实验中比较适中的几何损失值。

结果

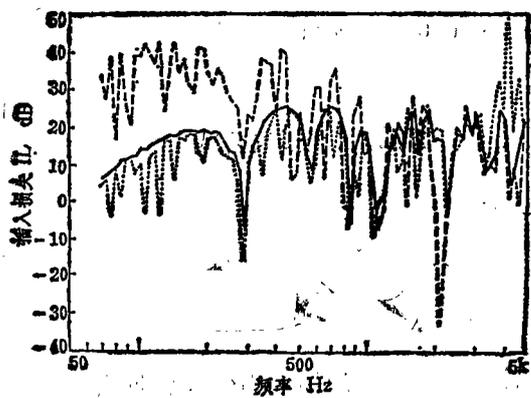
根据观察,在均匀层情况下,以风速为特征参数比用有效波高 $H_{1/3}$ 为好。这一点可从图11中数据点的离散情况看出。在三个频率下衰减 α 与风速的关系已绘在图12中。相应的一张曲线是 α 与 $H_{1/3}$ 的关系图,其中两曲线一致的部分较多,无法分出海况增加与减小的作用。

可以这样假设,在高风速下,紧靠海面以下均匀分布的气泡层是造成附加衰减的来源。风速的瞬时增大或减小所造成的海面波浪破碎,由此产生了长时间平衡于水中的与该频段共振的气泡(尺寸约在0.4—3毫米)。在用随机声线跟踪模型模拟计算声传播时,假设该气泡层的厚度为1米,并引用了文献中已知的气泡密度,由此获得的TL值与测量值是差不多的。图13就是计算值与实验值的比较曲线。

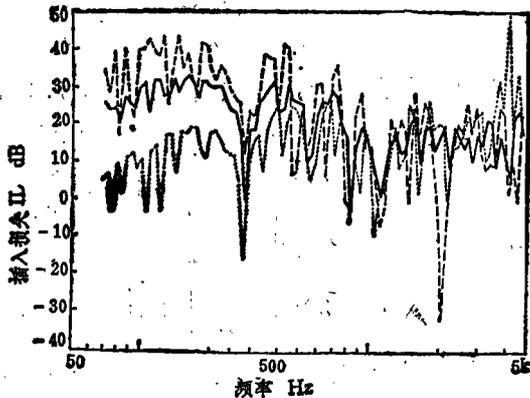
参 考 文 献

- [1] Flatté S. M., Sound transmission through a fluctuating ocean. Cambridge University Press
- [2] Urick R. J., Principles of Underwater Sound 3rd Ed. Mc Graw-Hill Book Company
- [3] Clay C. S. and Medwin H., Acoustical Oceanography. John Wiley and Sons

(下转第4页)



(a) $S=1.7\text{cm}^2$ $M=20$



(b) $S=80\text{cm}^2$ $M=20$

图2 插入损失的频响曲线

——由本文公式算得的曲线

.....由恒速声源公式算得的曲线

——由恒压声源公式算得的曲线

由本文公式方便地计算插入损失。

总之,研究表明,声源空腔对抗性消声器的插入损失影响很大,腔体的作用相当于四端网络等效电路中的声源内阻。它的影响主要决定于腔体的体积(及其形状)与连接消声器的腔壁出口截面积间的比值,而与腔壁的声透射和腔内的声吸收等因素关系不大。因此,在实际设计抗性消声器时应该考虑声源空腔的影响,而这种影响一般只要知道腔体的几何尺寸就可加以估算。

参 考 文 献

1. [日] 福田基一 奥田襄介 合著 张成译: 噪声控制与消声设计, 国防工业出版社 1982年

(上接第11页)

[4] Fisch, N. P., Wille P., Platform and Ship Radiated Noise at the Research Platform Northsea. NUSC TR 5995. FWG-Bericht 1978-6

[5] Wille, P. C. Geyer D., Measurements on the origin of the winddependent ambient noise variability in shallow water. J. Acoust. Soc Am. Vol.75, No.1, Jan.84, p.173

[6] Wille P, C. Ambient Noise: Characteristics of the Noise Field. H. G. Urban (ed.), Adaptive Methods in Underwater Acoustics 1985 p.13

[7] Koenigs, P. D. Monti; J. M. Nützel; B. Herwig, H. Acoustic Scattering from the Sea Surface. J. Acoust. Soc. Am. Supplement 1 Vol.76 Fall 1984 S.55

[8] Monti, J. M. Nützel B., Acoustic Scattering from the Sea Floor. J. Acoust. Soc. Am. Supplement 1 Vol.76 Fall 1984 S.55

[9] Herwig, H. Nützel B. Channel reverberation in shallow water. J., Acoust. Soc. Am. Supplement 1, Vol.77 Spring 1985 S.102

[10] Wille P. C. Measurements of wind dependent acoustic transmission loss in shallow water under breaking wave conditions. ICA Halifax/Can. July 1986

[11] Schneider H. G. Modelling wind dependent acoustic transmission loss due to bubbles in shallow water. ICA Halifax/Can. July 1986

编者注: 本文对原稿有所删减。