

利用射线模型快速预报海洋信道对包络谱的影响

赵春梅^{1,2,3}, 徐江³, 宋俊³

(1. 中国科学院研究生院, 北京 100190; 2. 中国科学院声学研究所, 北京 100190; 3. 海军装备研究院, 北京 100161)

摘要: 包络谱是舰船辐射噪声的特征之一, 可作为目标识别的重要依据。快速预报海洋信道对包络谱传播的影响, 可对目标识别提供帮助。提出并从理论上分析了用射线模型快速预报海洋信道对包络谱影响的方法, 利用这种方法计算了几种典型海洋信道中包络谱随接收距离的变化, 分析了声速剖面、海底参数、声源和接收深度对包络谱传播的影响。

关键词: 射线模型; 海洋信道; 包络谱; 传播

中图分类号: TB556

文献表示码: A

文章编号: 1000-3630(2010)-03-0258-06

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2010.03.004

Fast forecasting of ocean channel's effects on demon spectrum with ray model

ZHAO Chun-mei^{1,2,3}, XU Jiang³, SONG Jun³

(1. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Naval Academy of Armament, Beijing 100161, China)

Abstract: Demon spectrum is one of the characters of ship radiated noise. It can be used as an important basis in target identification. Target identification could be improved if ocean channel's effects on Demon spectrum propagation can be forecasted quickly. The method of quickly forecasting the effects of ocean channel on Demon spectrum is proposed and analyzed theoretically. Changes of Demon spectrum verses receiving distance in some typical channels are calculated. Effects of sound profile, waterbed parameters, depth of source and receiver on Demon spectrum propagation are analyzed.

Key words: ray model; ocean channel; Demon spectrum; propagation

1 引言

包络谱也称为 DEMON 谱, 是带有螺旋桨调制信息的舰船辐射噪声的解调制谱。该特征可作为目标识别的重要依据之一。对于包络谱的形成机理和提取方法, 国内外已经做过很多研究。文献[1]将舰船辐射噪声作为局部平稳过程来拟合, 用双重谱描述此类信号, 并讨论了解调制谱的检测性能。

在实际探测过程中, 目标辐射噪声信号需要通过海洋信道的传播才能到达接收点, 而海洋信道会使信号发生衰减和变形, 从而使包络谱特征发生变化。另外, 本船和目标船通常都是运动的, 声源和接收深度也会发生变化。在本船和目标船相对位置不断变化的过程中, 包络谱特征也会不断变化, 有时甚至会消失。如果想利用包络谱特征进行目标识

别, 最好能提前了解包络谱特征在特定海区的传播特点, 而这需要根据测得的水文条件预报海洋信道对包络谱的影响。文献[2]利用时频傅立叶变换的方法, 对舰船辐射噪声包络谱随接收距离的变化进行了仿真研究。本文提出了用射线模型^[3]快速预报海洋信道对包络谱的影响的方法, 并利用这种方法计算和分析了典型海洋环境下包络谱随接收距离的变化规律。

2 包络谱的物理特征

混有噪声的舰船辐射噪声经带通滤波后可视为周期性局部平稳高斯过程 $\{Y(t)\}$ ^[2]:

$$\{Y(t)\} = [1 + \alpha m(t)] \{R(t)\} \quad (1)$$

其中:

$$\alpha = \frac{\sigma_x^2}{\sigma_x^2 + \sigma_n^2} = (\sigma_x^2 / \sigma_n^2) / (1 + \sigma_x^2 / \sigma_n^2) \quad (2)$$

上式中, $\{R(t)\} = \{X(t)\} + \{N(t)\}$, $\{X(t)\}$ 为舰船辐射噪声, 可视为窄带平稳高斯随机过程, 方差为 σ_x^2 。 $\{N(t)\}$ 为高斯白噪声, 方差为 σ_n^2 。 $m(t)$ 称为调

收稿日期: 2009-08-31; 修回日期: 2009-11-24

作者简介: 赵春梅(1969-), 女, 山西平遥人, 博士研究生, 工程师, 研究方向为目标特性与传播。

通讯作者: 赵春梅, E-mail: zhaochm@263.net

制函数, 是缓变的周期函数, 变化周期远低于 $\{X(t)\}$ 的变化周期。

设 $m(t) = m_p \cos 2\pi F_0 t$, 其中 m_p 为调制深度, F_0 是包络谱频率。如果设 $S(0)$ 为零频率的谱强度, $S(F_0)$ 为调制谱强度高出连续谱的值, $S'(F_0)$ 为用 $S(0)$ 归一化后的调制谱强度, 则有:

$$S'(F_0) = \frac{(\alpha m_p)^2}{2} \quad (3)$$

归一化后的 $S'(F_0)$ 可视为包络谱高出信号的连续功率谱的比例, 作为表征包络谱高低的量度。下面提到的包络谱的大小指的都是 $S'(F_0)$ 的大小。

3 包络谱传播规律快速预报方法分析

调制是时域信号的特征, 要预报包络谱通过海洋信道之后发生的变化, 需要了解信号通过海洋信道之后波形的变化。在水声领域, 时域信号传播规律的研究方法通常是: 将时域信号通过傅立叶变换变为频域信号, 研究每个频点经过水声信道之后的变化, 然后将变化后的频域信号通过反傅立叶变换变为时域信号。

按照这个思路, 要预报包络谱的变化, 需要执行以下步骤:

(1) 产生具有调制特征的时域信号, 通过傅立叶变换计算出该信号的频谱;

(2) 依据测得的水文条件以及要求的接收距离和深度, 利用传播模型计算各频点的传播损失;

(3) 将信号频谱与对应频点的传播损失相乘, 得到接收信号的频谱;

(4) 通过反傅立叶变换得到特定接收距离处的信号的波形, 按信噪比要求加入噪声;

(5) 通过谱分析得到包络谱, 并与原信号的包络谱进行对比。

这种方法比较经典, 但存在以下问题:

(1) 计算量大。计算过程不但需要前后做两次傅立叶变换, 还需利用传播模型计算数百甚至上千个频点的传播损失, 并对前后波形信号进行谱分析。

(2) 近似计算受限。提取包络谱之前, 通常先使用带宽为三分之一倍频程的带通滤波器滤波。一定带宽内各频点的传播损失通常可以看作是相等的, 这个特性可用于近似计算。但是, 利用上述方法, 如果将三分之一倍频程带宽内的传播损失近似看作是相同的, 则信号的频谱不变, 波形也不变, 这样就只能估计出信噪比减小对包络谱的影响, 而估计不出波形失真对包络谱的影响, 即多途效应对

包络谱的影响。

另外, 由于水文测量和海底参数选取的局限性以及海洋信道的不稳定性, 要精确预报包络谱随声源和接收点的变化是不可能的, 也是不经济的。

因此, 利用时频傅立叶变换预报海洋信道对包络谱的影响虽然是可行的, 但由于计算量庞大, 又不能进行近似计算, 因而在使用上具有一定的局限性, 它更适合理论研究, 而不适合实时预报。

射线传播模型是研究水声信号传播的经典模型之一, 这种模型的物理图像清晰, 能够计算出声信号通过海洋信道之后的传播损失和传播路径。在自由传播过程中, 如果不考虑声吸收, 每条射线在传播过程中只有幅度和时延会随着接收位置而变化, 波形是保持不变的。在与海面 and 海底反射的过程中, 尽管不同频率的反射特征不尽相同, 但在窄带范围内, 例如在三分之一倍频程内, 不同频率的射线根数、各条射线的幅度和时延可以看成是近似相等的。换言之, 波形不会产生太大的变化。因此, 在整个传播过程中, 通过各条路径传播的信号可以看成是波形不变的。这样, 接收点处的总信号就可以视为是通过各条路径到达的信号之和。利用这种多路信号相加的概念, 可以快速、容易地计算出海洋信道对包络谱的影响。

4 包络谱传播规律理论分析

在传播过程中, 包络谱的高低, 即 $S'(F_0)$ 的大小, 主要受两方面的影响: (1) 随着传播损失的增加, 信号的信噪比将不断减小, 最终使信号特征被噪声所掩盖; (2) 多途效应将导致信号失真, 从而减小或丧失包络谱特征。下面分别分析噪声掩盖和多途效应对包络谱的影响。

4.1 噪声掩盖对包络谱的影响

辐射噪声信号在海洋环境中传播时, 信号幅度会随着传播损失的增加而减小, 致使信号的成份越来越少, 噪声的成份越来越多, 从而使包络谱幅度不断减小。如果不考虑多途的影响, 只考虑直达声, 那么, 假设经过传播之后, 信号幅度变为原来的 λ 倍, 相当于式(1)中的 σ_x^2 变为 $\lambda^2 \sigma_x^2$, α 变为 α' :

$$\alpha' = \frac{\lambda^2 \sigma_x^2}{\lambda^2 \sigma_x^2 + \sigma_n^2} = \lambda^2 (\sigma_x^2 / \sigma_n^2) / (1 + \lambda^2 \sigma_x^2 / \sigma_n^2) \quad (4)$$

那么, 在噪声掩盖下, 检波和积分后信号的包络谱估计如下:

$$S'(F_0) = \frac{(\alpha' m_p)^2}{2} \quad (5)$$

式(4)中的 δ^2 其实就是传播损失 TL , 用射线模型计算出 TL , 代入式(4)算出 α' , 再代入式(5), 就可以得到 $S'(F_0)$ 。假设原始信号的信噪比为 SN_0 , 包络谱因噪声掩盖而下降的 dB 值为:

$$20\log\alpha' = 20\log\frac{\gamma}{1+\gamma} \quad (6)$$

其中, $\gamma = 10^{\frac{SN_0 - TL}{10}}$

4.2 多途对包络谱的影响

多途效应是海洋信道传播的重要特征之一, 尤其是在浅海中。随着传播距离的增加, 海面、海底反射的信号将与直达声叠加在一起。由于各路信号的幅度和时延均不相同, 接收点的波形将不同于原始信号, 因而影响到包络谱的提取。

设接收点接收到的一路信号为:

$$\{S(t)\} = \delta[1 + m_p \cos 2\pi F_0(t - \tau)]\{X(t - \tau)\}$$

其中, δ 为信号幅度, τ 为信号到达接收点所需的时间, 设 $\{X(t)\}$ 的功率谱为 G_{xx} , $\{S(t)\}$ 的功率谱为 G_{ss} , 那么^[4]:

$$\begin{aligned} G_{ss} &= G_{xx} \{[\delta + \delta m_p \cos 2\pi F_0(t - \tau)]^2 + \\ &G_{xx}[\delta^2 + 2\delta^2 m_p \cos 2\pi F_0(t - \tau) + \\ &\delta^2 m_p^2 \cos^2 2\pi F_0(t - \tau)] \} \end{aligned}$$

由于 δ 和 m_p 均小于 1, 因此可以忽略上式中后面的一项。这样有:

$$G_{ss} = \delta^2 G_{xx} [1 + 2m_p \cos 2\pi F_0(t - \tau)] \quad (7)$$

在实际海洋环境中, 接收点接收到的信号通常为多路信号的叠加, 设每路信号为:

$$\{S_i(t)\} = \delta_i [1 + m_p \cos 2\pi F_0(t - \tau_i)]\{X(t - \tau_i)\} \quad (8)$$

其中, δ_i 为各路信号的幅度, τ_i 为各路信号的延迟。根据前面的推导, 多路信号的功率谱为:

$$G_{ss} = G_{xx} \sum_1^n \delta_i^2 + 2m_p G_{xx} \sum_1^n \delta_i^2 \cos 2\pi F_0(t - \tau_i) \quad (9)$$

由于

$$\begin{aligned} \sum_1^n \delta_i^2 \cos 2\pi F_0(t - \tau_i) &= \cos 2\pi F_0 t \sum_1^n \delta_i^2 \cos 2\pi F_0 \tau_i + \\ &\sin 2\pi F_0 t \sum_1^n \delta_i^2 \sin 2\pi F_0 \tau_i = \mu \cos 2\pi F_0(t - \phi) \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $\mu = \sqrt{(\sum_1^n \delta_i^2 \cos 2\pi F_0 \tau_i)^2 + (\sum_1^n \delta_i^2 \sin 2\pi F_0 \tau_i)^2}$,

ϕ 为叠加信号的相位, 式(9)变为:

$$G_{ss} = G_{xx} [1 + \frac{2\mu m_p}{\sum_1^n \delta_i^2} \cos 2\pi F_0(t - \phi)] \quad (11)$$

将式(11)与式(7)比较, 相当于 m_p 变为 βm_p , 包络谱变为:

$$S'(F_0) = \frac{1}{2} m_p^2 \beta^2 \quad (12)$$

$$\text{其中 } \beta = \frac{\sqrt{(\sum_{i=1}^n \delta_i^2 \cos 2\pi F_0 \tau_i)^2 + (\sum_{i=1}^n \delta_i^2 \sin 2\pi F_0 \tau_i)^2}}{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}$$

包络谱因多途效应而下降 $-20\log\beta$ 。

从式(12)可以看出, 只要利用射线模型计算出经过接收点的每条射线的幅度 δ_i 和时延 τ_i , 即可以算出因多途效应而使包络谱降低的幅度。

包络谱的变化是噪声掩盖和多途共同作用的结果, 在考虑包络谱的变化时, 应当将两者的影响相加。因此, 在传播过程中, 包络谱下降幅度为: $-20\log\alpha' - 20\log\beta$ 。

5 利用快速预报方法分析包络谱的传播规律

利用上述方法可以计算和分析各种海洋信道以及本船和目标船的相对位置对包络谱传播的影响, 为目标识别提供帮助。

当用于目标识别时, 在目标和本船相对运动过程中, 影响包络谱识别效果的主要是多途效应。因为在目标识别当中, 通常是在先检测到能量信号的前提下, 再利用包络谱特征进行识别。既然已经检测到能量信号, 说明接收点处的信噪比通常不小于 2(单水听器接收), 按式(6)计算, 包络谱因噪声掩盖而降低的幅度不会超过 3.5dB。通常情况下, 包络谱会高出连续谱 10~20dB。如果检测不到包络谱特征, 说明多途效应使包络谱大大减小。因此, 在目标识别过程中, 预报多途效应对包络谱的影响更为重要。在下面的分析中, 只分析多途效应对包络谱的影响。

5.1 浅海信道

不同声速剖面对包络谱传播的影响如图 1 所示。图 1 中上、中、下图对应的声速剖面分别为等声速(海面声速 $c_0=1500\text{m/s}$)、弱正梯度($c_0=1500\text{m/s}$, 声速梯度 $g=0.016\text{m/s/m}$)和弱负梯度($c_0=1500\text{m/s}$, $g=-0.05\text{m/s/m}$)声速剖面, 海深 100m。海底参数为: 压缩波声速 $c_p=1600\text{m/s}$, 剪切波声速 $c_s=0$, 压缩波衰减 $\alpha_p=0.5\text{dB}/\lambda$, 剪切波衰减 $\alpha_s=0$, 密度 $\rho=2\text{kg/m}^3$ 。声源深度和接收深度分别为 7m 和 10m。包络谱频率为 5Hz。

如图 1 所示, 尽管在 20km 范围内, 对于不同的声速剖面, 包络谱下降幅度均不超过 5dB, 但包

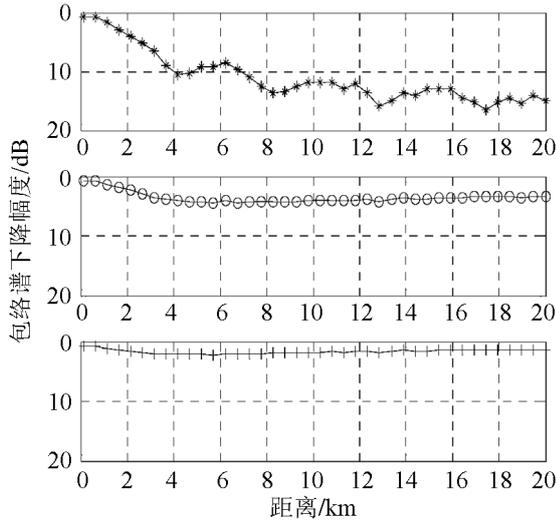


图1 浅海中不同声速剖面对包络谱的影响
Fig.1 Effect of different sound profile on Demon spectrum in shallow water

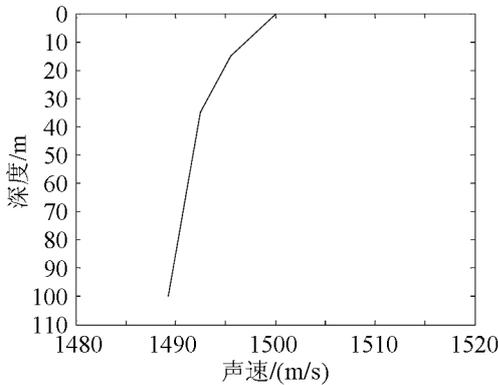


图2 浅海中温跃层声速剖面
Fig.2 Thermocline profile in shallow water

络谱随接收距离的波动情况是不同的。如果存在如图2所示的温跃层,包络谱随接收距离的变化将如图3所示,最大包络谱降低幅度将达到8dB。

不同海底声速对包络谱的影响如图4所示。图4中上、中、下图对应的海底声速为1550m/s、1600m/s和1800m/s,声速剖面为等声速($c_0=1500\text{m/s}$),海底参数为: $c_s=0$, $\alpha_p=0.5\text{dB}/\lambda$, $\alpha_s=0$, $\rho=2\text{kg}/\text{m}^3$ 。声源深度和接收深度分别为7m和10m。包络谱频率为5Hz。如图4所示,海底声速越高,即海底越硬,包络谱降低幅度越大,不同海底声速对包络谱的影响可以相差10dB。

不同海底吸收对包络谱的影响如图5所示。图5中上、中、下图对应的海底吸收为0dB/λ、0.5dB/λ和1.0dB/λ,声速剖面为等声速($c_0=1500\text{m/s}$),海底参数为: $c_p=1600\text{m/s}$, $c_s=0$, $\alpha_s=0$, $\rho=2\text{kg}/\text{m}^3$ 。声源深度和接收深度分别为7m和10m。包络谱频率为5Hz。

如图5所示,海底吸收越强,包络谱降低幅度越小,不同海底吸收对包络谱的影响可相差10dB

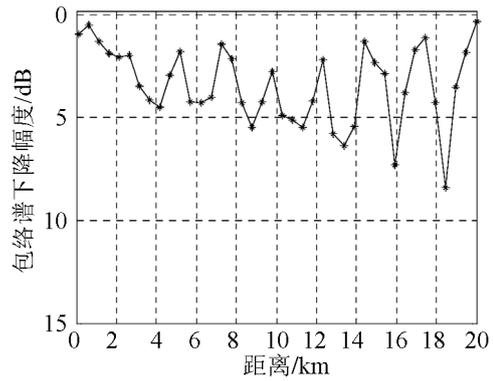


图3 浅海中温跃层对包络谱的影响
Fig.3 Thermocline's effect on Demon spectrum in shallow water

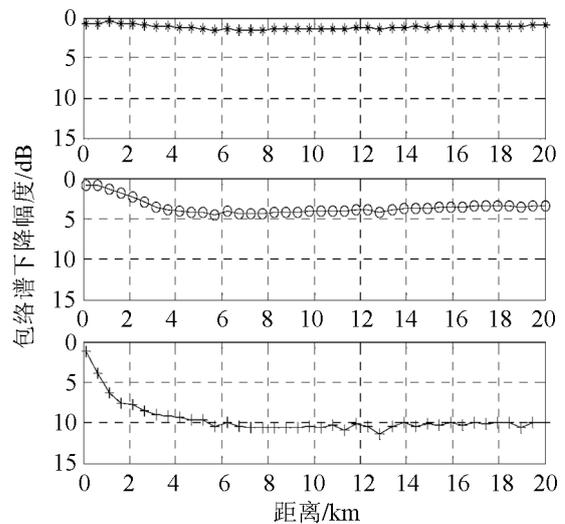


图4 浅海中不同海底声速对包络谱的影响
Fig.4 Effect of different waterbed sound speed on Demon spectrum in shallow water

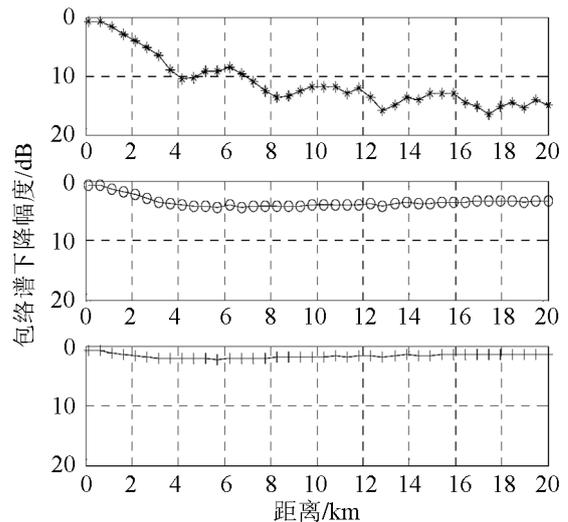


图5 浅海中不同海底吸收对包络谱的影响
Fig.5 Effect of different waterbed attenuation on Demon spectrum in shallow water

以上。

以上分析说明,在浅海中,影响包络谱传播的主要因素为声速剖面、海底声速和海底吸收,声源

和接收深度对包络谱传播的影响不大。

5.2 深海信道

为研究深海信道对包络谱的影响，选取两种声速剖面进行计算和分析。第一种声速剖面为 Munk 声道；第二种声速剖面也为 Munk 声道，但存在深度为 100m 的海面声道。在海面附近，这两种声道对包络谱的影响都比较小，包络谱降低幅度只有 1~2dB。

深海中不同海底声速对包络谱的影响如图 6 所示。图 6 中上、中、下图对应海底声速为 1550m/s、1600m/s 和 1800m/s，声速剖面为 Munk 声道，海底参数为： $c_s=0$ ， $\alpha_p=0.5\text{dB}/\lambda$ ， $\alpha_s=0$ ， $\rho=2\text{kg}/\text{m}^3$ 。声源深度和接收深度分别为 7m 和 10m。包络谱频率为 5Hz。由图中可以看出，海底声速越高，即海底越硬，包络谱降低幅度越大，不同海底声速对包络谱的影响可以相差 8dB。

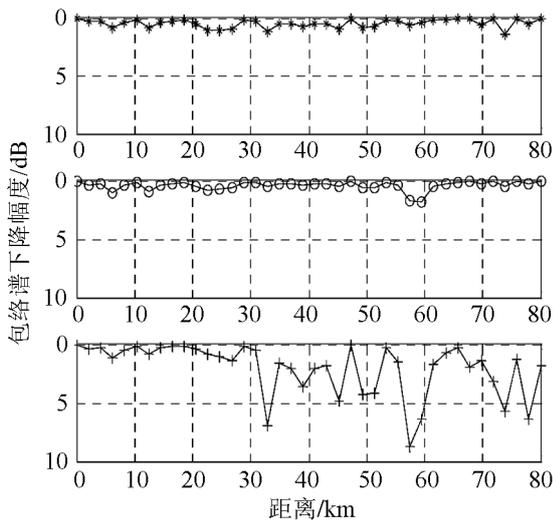


图 6 深海中不同海底声速对包络谱的影响
Fig.6 Effect of different waterbed attenuation on Demon spectrum in deep water

在深海中，不同声源和接收深度对包络谱的影响如图 7 所示。图 7 对应的声速剖面为 Munk 声道，海底参数为： $c_p=1600\text{m}/\text{s}$ ， $c_s=0$ ， $\alpha_p=0.5\text{dB}/\lambda$ ， $\alpha_s=0$ ， $\rho=2\text{kg}/\text{m}^3$ 。图 7(a)中上、中、下图对应的声源深度为 7m，接收深度分别为 50m、200m 和 300m。图 7(b)中上、中、下图对应的声源深度分别为 50m、150m 和 250m，相应的接收深度依次为 100m、150m 和 250m。包络谱频率为 5Hz。

如图 7 所示，声源和接收深度对包络谱的影响很大，有些地方会超过 20dB。通常情况下，包络谱会高出连续谱 10~20dB，如果包络谱下降幅度超过 20dB，意味着包络谱特征将完全消失。

以上分析说明，在深海中，影响包络谱传播的

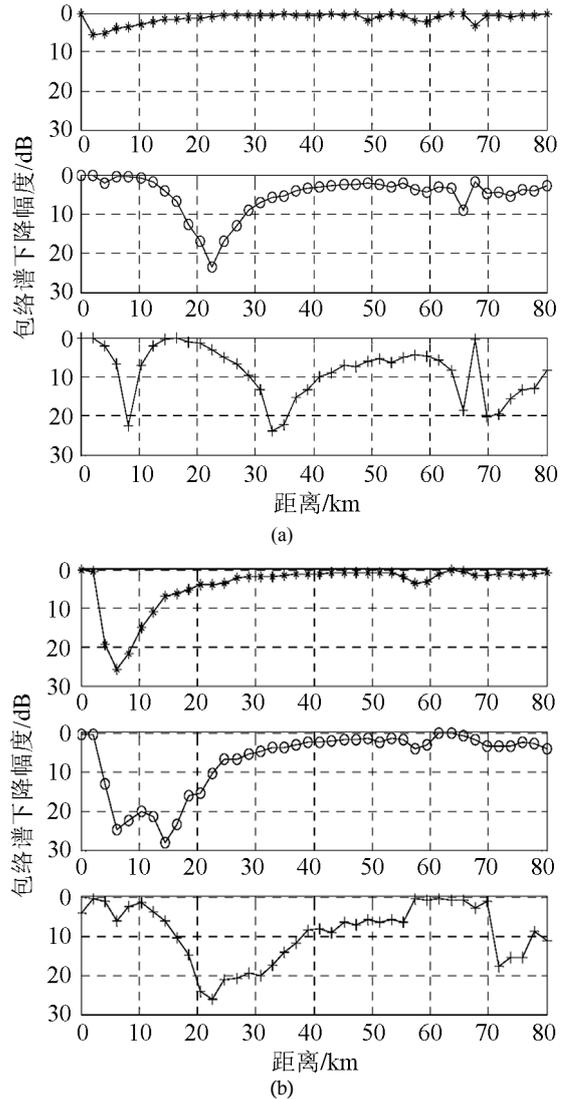


图 7 深海中不同接收深度对包络谱的影响
Fig.7 Effect of different receiving depth on Demon spectrum in deep water

主要因素是海底声速以及声源和接收深度，海底吸收对包络谱传播的影响不显著。

5.3 不同频率包络谱

无论是在浅海还是在深海中，不同的包络谱频率都表现出不同的传播特性。

浅海和深海中不同包络谱频率对包络谱传播的影响如图 8、9 所示。图 8 的海洋参数与图 4 中图相同，上、中、下图的包络谱频率分别为 5Hz、10Hz 和 20Hz。图 9 的海洋参数与图 6 类似，声源和接收深度分别为 7m 和 100m，上、中、下图的包络谱频率分别为 5Hz、10Hz 和 20Hz。

由于包络谱频率越高，对各路信号之间的时延差越敏感，因此，包络谱频率越高，包络谱所受的影响越大。如图 8 所示，在浅海中，20Hz 的包络谱要比 5Hz 的包络谱低 8dB 左右。如图 9 所示，在深

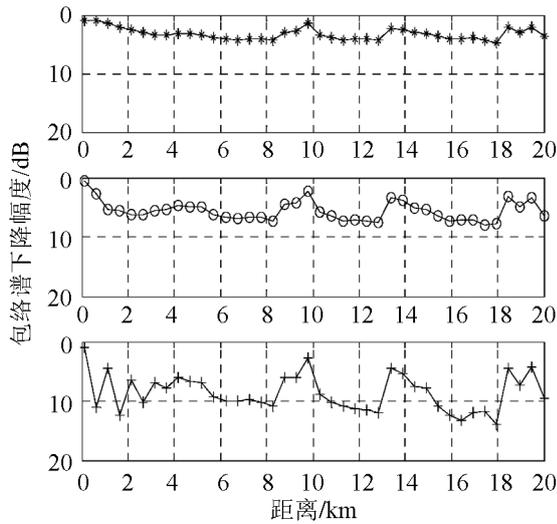


图 8 浅海中包络谱频率对包络谱的影响

Fig. 8 Effect of Demon spectrum frequency on Demon spectrum in shallow water

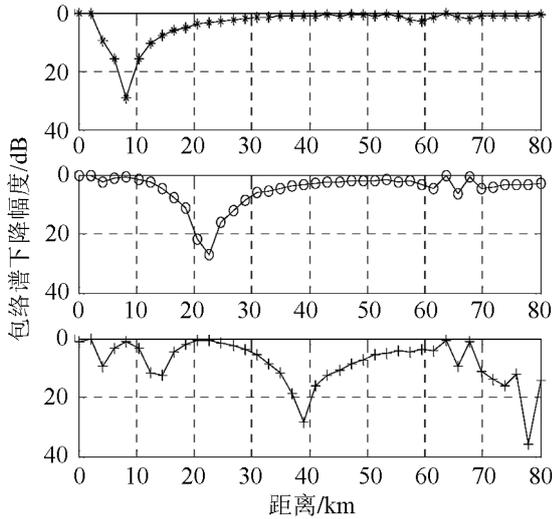


图 9 深海中包络谱频率对包络谱的影响

Fig.9 Effect of Demon spectrum frequency on Demon spectrum in deep water

海中, 20Hz 的包络谱的波动要比 5Hz 的包络谱更加剧烈。值得注意的是, 无论包络频率是多是低, 在汇聚区(图 9 中 60~70km 范围内的尖峰), 包络谱大小都基本不受影响。

6 结论

从以上分析可见, 在海洋信道中, 声速剖面、海底参数、声源和接收深度都会对包络谱的传播带来影响。利用文中介绍的预报方法, 可以快速预报实际海洋信道中包络谱的传播规律, 为目标识别提供帮助, 让识别者事先了解包络谱可能会在哪些距离上减小或消失, 这样既能避免将包络谱因多途效应而变小或消失的现象误以为是目标正在远离或改变了工况, 又能防止识别者因暂时看不到包络谱特征而怀疑先前的判断, 做到心中有数。

参 考 文 献

- [1] 吴国清, 魏学环, 周钢. 提取螺旋桨识别特征的二种途径[J]. 声学学报, 1993, 18(3): 210-216.
WU Guoqing, WEI xuehuan, ZHOU Gang. Two ways of propeller recognition feature extraction[J]. ACTA Acoustics, 1993, 18(3): 210-216.
- [2] 赵春梅, 宋俊, 吴国清. 包络谱传播特性仿真研究[J]. 声学技术, 2008, 27(5): 132-133.
ZHAO Chunmei, SONG Jun, WU Guoqing. Emulation on transmission feature of demon spectra[J]. Technical Acoustics, 2008, 27(5): 132-133.
- [3] Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, Schmidt H. Computational ocean acoustics[M]. USA: Sheridan Books, Inc., 2000. 42-44.
- [4] 吴国清. 线谱非平稳性分析和利用干涉谱测距[J]. 声学学报, 2004, 29(4): 363-368.
WU Guoqing. Nonstationarity analysis of line spectrum and range estimation by spectrum interference[J]. ACTA Acoustics, 2004, 29(4): 363-368.