

基于可靠声路径的深海声场垂直相关性研究

邱春燊, 陈 羽, 马树青, 孟 洲

(国防科技大学气象海洋学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 可靠声路径(Reliable Acoustic Path, RAP)是深海中的一种重要声信道, 在总结可靠声路径物理机理及探测优势的基础上, 采用射线模型分析了 RAP 声信道内水听器接收声线的结构特性, 计算了 32 基元垂直线列阵接收信号的相关性随声源距离的变化, 仿真结果显示在中程探测距离内信号垂直相关性将出现衰落。结合这一现象深入探究了多途效应对声场垂直相关性的影响, 揭示了多途传播中能量较强的波在不同基元上的到达时间差是影响垂直相关性的最主要因素, 最后利用以上分析对 RAP 声信道内垂直阵列的布放、设计及增益分析提出了建议。

关键词: 垂直相关性; 可靠声路径; 射线理论; 深海

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2019)-03-0270-08

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2019.03.006

Research on the vertical correlation of acoustic field in deep water based on reliable acoustic paths

QIU Chun-yu, CHEN Yu, MA Shu-qing, MENG Zhou

(College of Meteorology and Oceanology, National University of Defense Technology, Changsha 410005, Hunan, China)

Abstract: The reliable acoustic path (RAP) is an important acoustic channel in deep water. Based on the physical mechanism of RAP and its advantages in detection, the structures of the acoustic rays received in RAP are analyzed by using ray theory. For a 32-element vertical linear array, the variation of the cross-correlations of the received signals with the source range are simulated, and the result shows that a sudden decline of the cross-correlation appears in medium detection range. Based on this phenomenon, the influence of multipath effect on the vertical correlation is studied. It indicates that the time deviation of the acoustic rays with higher amplitude arriving different elements is the main factor to affect the vertical correlation. Finally, some suggestions on the deployment, design and gain analysis of the vertical array in RAP are put forward.

Key words: vertical correlation; reliable acoustic path (RAP); ray theory; deep water

0 引 言

可靠声路径(Reliable Acoustic Path, RAP)是深海中的一种特殊声信道, 其形成条件是声源或接收器放置在声速值高于海面附近最大声速的近海底位置。实际深海中声源大多为浅源, 故本文着重对垂直阵列布于近海底位置的情况进行仿真研究。在 RAP 声信道中, 声传播受海面海底影响较小, 传输损耗和噪声级很低, 声传播存在一定特点。它的应用始于美国建立的深海海啸灾害监测系统, 为美国国家海洋和大气管理局对海啸提供远程监测; 随着技术发展, 安静型潜艇对海上平台造成了极大的不

对等威胁, 认识到 RAP 的优点后, 美国国防部先进研究项目局启动了基于可靠声路径的分布式潜艇猎捕系统研究; 2009~2011 年美国在菲律宾海相关海域布放了全深度分布式垂直线列阵, 并先后组织了两次实验, 将可靠声路径的声传播作为实验研究的一个重要部分^[1]。国内基于 RAP 的研究较少, 西工大的杨坤德等^[2]进行了基于 RAP 声线到达角度的水下声源定位研究; 段睿^[1]做了基于宽带信号相干条纹的可靠声路径定深方法研究; 文献[3]将 RAP 与时间反转处理相结合, 研究了基于 RAP 的垂直水听器阵时反定位问题。2018 年初, 中科院声学所的新型深海分布式声学接收系统研制成功, 实现了全水深探测, 突破了国外对我国 1 000 m 以上深度水听器的技术封锁, 未来国内对 RAP 的研究和应用将实现跨越式发展。

当前对于 RAP 条件下声场垂直相关性的研究还很少。水声传播过程中由于水介质的折射及声波在海面海底的反射, 自发射点至接收点存在多个传

收稿日期: 2018-02-03; 修回日期: 2018-04-02

基金项目: 国防科技大学校科研重点基金项目(ZDYYJCY J20140701)、
国防科技大学校科研基金项目(ZK16-03-56, ZK16-03-31)

作者简介: 邱春燊(1993—), 男, 福建龙岩人, 硕士研究生, 研究方向为
水声物理、水声探测技术。

通讯作者: 陈羽, E-mail: chenylm@163.com

播途径的现象称为多途效应，它是影响声场相关性的重要原因^[4-5]。

本文采用射线模型，分析了 RAP 声信道内水听器接收声线的结构特征，并对中程探测距离内信号的垂直相关性进行研究，仿真分析了相关性随声源距离增大所呈现的衰落现象，分析表明该现象的产生是受多途效应影响的结果，结合波导特性，揭示了声场垂直相关性受多途效应影响程度的最主要因素。最后对垂直阵的设计、布放及增益分析提出建议。

1 射线理论及海底反射分析

在经典射线声学中，对声场的描述是把声波的传播看作是一束无数条垂直于等相位面的射线的传播，由声线来传递声能量。从声源出发的声线按一定的路径到达接收点，接收到的声能是所有到达声线的能量的叠加，由于声线都有一定的路径，相应有一定的到达时间和相位。每根声线携带的能量守恒，强度由声线的截面确定。由此，在射线声学的范畴内有两个基本的方程，一个是用于确定声线轨迹和到达时间的程函方程；一个是用于确定单根声线能量的强度方程。这两个方程可以在一定的近似条件下得到^[6]：

$$(\nabla\varphi)^2 = \left(\frac{c_0}{c}\right)^2 = n^2(x, y, z) \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (A^2 \nabla \varphi) = 0 \quad (2)$$

式(1)、(2)分别为程函方程和强度方程。其中， c_0 为参考点声速， n 为折射率， $\varphi(x, y, z)$ 表示程函， $A(x, y, z)$ 表示声压幅值。在声速变化的介质中，声线的折射满足 Snell 定律：

$$\frac{\cos\theta_1}{c_1} = \frac{\cos\theta_2}{c_2} = \dots = \text{const} \quad (3)$$

式中， $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ 表示声线的掠射角， $c_1, c_2, \dots, c_n$ 表示声速。如图1所示，Snell 定律最直观的物理表现是声线总向声速减小的方向偏折。

为研究深海环境中的海底反射，本文建立液-液声学半空间模型，基于射线理论研究两种介质上的反射问题。如图2所示，后续仿真中将海底设置为硬质无损海底。

图2中，上半空间为均匀液体，表面真空，底部为均匀硬质海底。设入射平面波具有单位幅度，且传播方向相对水平轴的掠射角为 θ_i ，并用 R 和 T 分别表示反射波和透射波幅度。则它们的声压可表示为^[7]

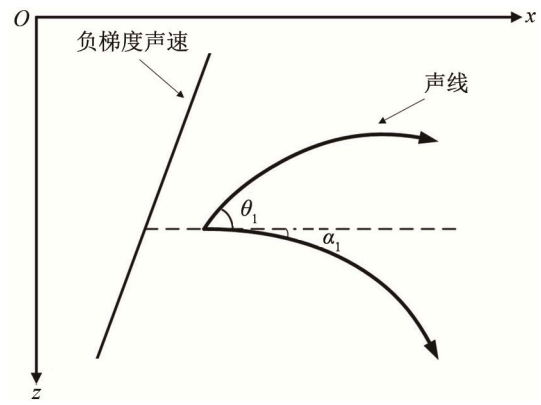


图1 声速负梯度条件下的声学 Snell 定律示意图
Fig.1 Schematic diagram of acoustic Snell's law under negative sound speed gradient

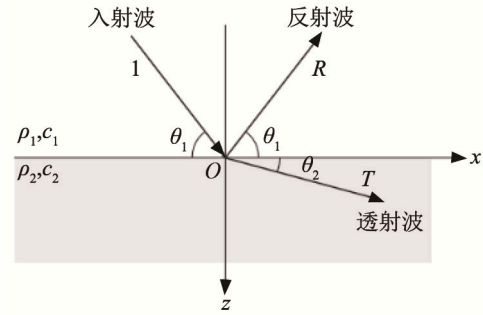


图2 液-液半空间海底反射模型
Fig.2 Liquid-liquid half-space sub-bottom reflection model

$$p_i = \exp[ik_1(x\cos\theta_1 + z\sin\theta_1)] \quad (4)$$

$$p_r = R \cdot \exp[ik_1(x\cos\theta_1 - z\sin\theta_1)] \quad (5)$$

$$p_t = T \cdot \exp[ik_2(x\cos\theta_2 + z\sin\theta_2)] \quad (6)$$

式(4)~(6)中省略了共有时间因子 $e^{i\omega t}$ ， $k_1 = \omega/c_1$ ， $k_2 = \omega/c_2$ ，代入边界条件计算可得反射系数 Re 的表达式：

$$Re = \frac{\rho_2 c_2 / \sin\theta_2 - \rho_1 c_1 / \sin\theta_1}{\rho_2 c_2 / \sin\theta_2 + \rho_1 c_1 / \sin\theta_1} \quad (7)$$

当 $\cos\theta_2 > 1$ 即 $\sin\theta_2$ 为纯虚数时，发生全反射，即 $Re=1$ ，此时掠射角 θ_i 小于某个角度 θ_c 。由 Snell 定律可知

$$\theta_c = \arccos\left(\frac{c_1}{c_2}\right) \quad (8)$$

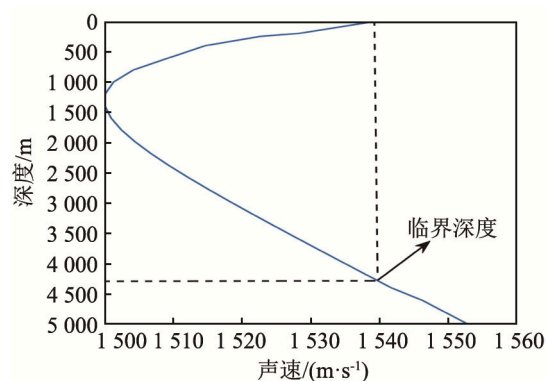
其中， θ_c 为临界角，且仅当 $c_2 > c_1$ 时存在。

若设介质为无损介质，结合式(7)，当 $\theta_i > \theta_c$ 时，反射系数 Re 是实数且 $|Re| < 1$ ，反射过程中存在损失但没有附加相移；当 $\theta_i < \theta_c$ 时，式(7)中分子、分母为复共轭，反射系数 Re 是复数且 $|Re|=1$ ，将发生全反射且存在附加相移。

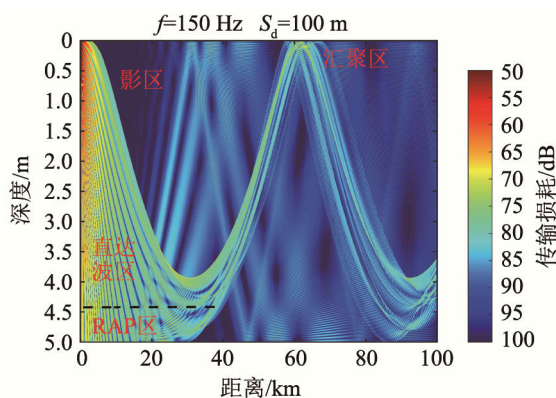
2 RAP 的形成机理与探测优势

可靠声路径(RAP)是深海水声传播中的一种特

殊声信道。如图 3(a)所示,在含有声信道轴的典型深海声速剖面中,把声信道轴下方的某个深度值定义为临界深度。该处声速等于近海面的声速最大值(表面声信道存在时通常为表面声信道底部的声速值)。临界深度也称为表面声信道深度的共轭深度,临界深度至海底的水体厚度称为深度余量。图 3(b)给出了声速剖面对应的声传播损失空间分布图,图中 f 表示声源频率, S_d 表示声源深度,下同。



(a) 深海声速剖面



(b) 传播损失($f=150$ Hz)

图 3 深海环境中声传播损失空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of acoustic transmission loss in deep ocean

信号在 RAP 声信道中传播有以下 3 个优点:(1) 直达波能量较强,且噪声级较低。如图 3(b)所示,主要是因为存在临界深度时,若声线出射角度足够小或深度余量足够大,则射线将在与海底接触前反转,传播至近海面附近形成会聚区,传输损失较小。且远距离噪声源辐射的噪声由于出射掠射角较小,无法穿过临界深度到达 RAP 声信道内;(2) 声速起伏和界面散射对其声传播影响较小。主要是因为传播至海底附近的直达波其出射掠射角较大,根据 Snell 定律,声线掠射角大时声速起伏对其折射角的相对影响较小^[1];(3) 靠近底部的接收器在一定距离内无探测盲区。如图 4 中,若将声源设置在临

界深度以下(即深度余量内),在 40 km 左右的整个中程范围内都将形成一个低传输损耗区。40~60 km 内的低损耗声场在三维空间中形成一个碗形结构^[2]。但若把声源设置在近海面或声信道轴附近时,如图 5(a)、(b),在中近程范围内都将有无法用于探测的影区存在。因此根据声学的互易性原理,近海底接收器可在无任何盲区的情况下在一定范围内探测海面目标或潜入目标。

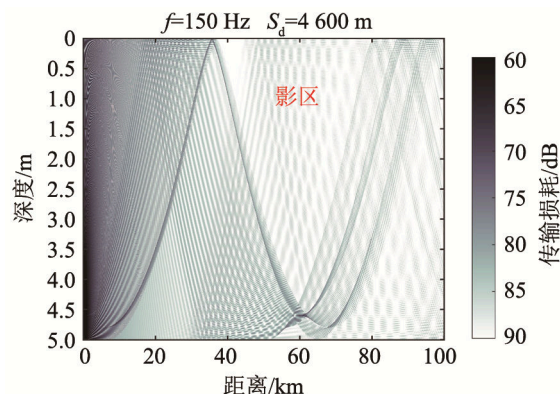
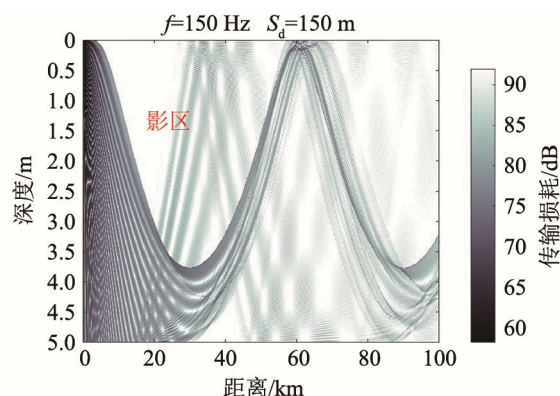
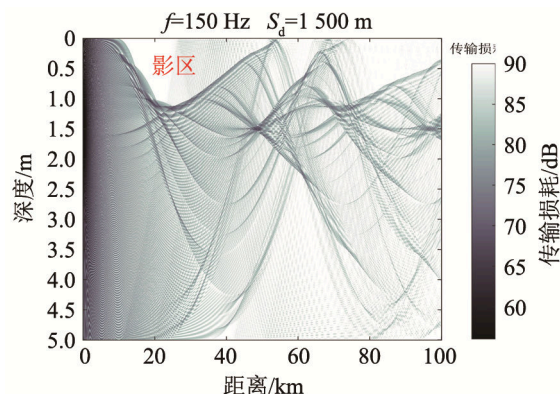


图 4 声源位于深度余量内的传播损失分布图

Fig.4 Spatial distribution of the transmission loss in deep ocean for the source at 4600 m



(a) 声源位于近海面



(b) 声源位于声信道轴

图 5 不同声源深度的声传播损失空间分布图

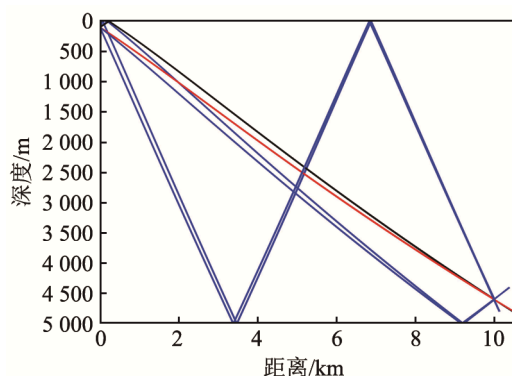
Fig.5 Spatial distribution of acoustic transmission loss for the source at different depths in deep ocean

3 仿真结果及原因分析

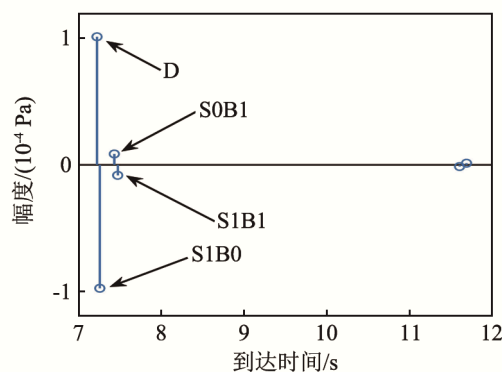
3.1 基于 RAP 的声线结构分析

采用如图 3(a)所示的声速剖面, 声源深度为 100 m, 辐射 150 Hz 单频声信号。海底声学参数分别为: 压缩波声速 $c_b = 1\,600\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 海底密度 $\rho_b = 1.6\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。垂直线列阵置于 4 600~4 755 m 的深度余量内。将到达波中的直达波记为 D, 海面一次反射波记为 S1B0, 海底一次反射波记为 S0B1, 海面海底各一次反射波记为 S1B1。

图 6(a)、6(b)给出了深度为 4 600 m、与声源水平距离为 10 km 的水听器所接收的本征声线路径及结构。可以看出, 当 $r=10\text{ km}$ 时, 声线的传播路径较为复杂, 但对接收波形起主要贡献的是 D 和 S1B0, 到达时间在 7.3 s 左右, 其中 D 能量最强, S1B0 的能量低约 0.32 dB。经海底反射的声线 S0B1 及 S1B1 能量较弱, 较 D 低约 21.6 dB, 可以近似忽略不计。海底反射波能量较弱的原因主要是当声源距离较近时, 射线以较大的掠射角穿透底部, 主要的能量在基底中衰减。从仿真实验知, 声源距离在约 15 km 内, 可认为只有 D 和 S1B0 起主



(a) 声线到达路径

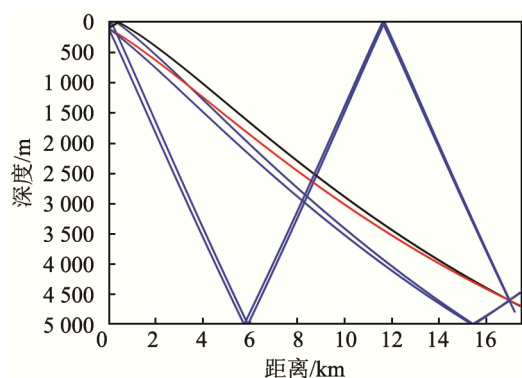


(b) 声线到达结构

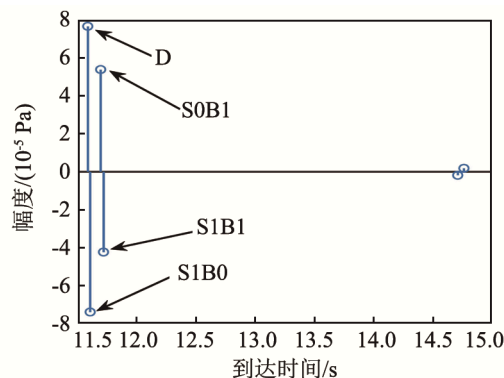
图6 水听器位于 10 km 处所接收的声线到达路径及结构图
Fig.6 The arrival path and its structure at the receiver of 10 km apart

要贡献。

图 7(a)、7(b)给出了深度为 4 600 m、距声源 17 km 的水听器所接收的本征声线路径及结构。可以看出当声源距离为 17 km 时, 声线的传播路径较为复杂, 对接收波形起主要作用的有 4 根声线, 时间在 11.7 s 左右, 分别对应 D、S1B0、S0B1 以及 S1B1, 其中 D 能量最强。在 14 s 之后到达的多次反射波能量很弱, 较 D 低约 51.6 dB, 可以忽略不计。产生上述现象的主要原因是当射线以较小的掠射角射入底部时, 更多的能量将被反射到水中, 但海底海面多次反射波由于底部的大掠射角和附加的几何衰减而变弱。因此当声源在 16~30 km 的中等距离时, D、S1B0、S0B1 和 S1B1 一同起主要作用。



(a) 声线到达路径



(b) 声线到达结构

图7 水听器位于 17 km 处所接收的声线到达路径及结构图
Fig.7 The arrival path and its structure at the receiver of 17 km apart

对于 38 km 范围内的声源, 接收信号中 S0B1 和 S1B1 作用更加显著, 同时此处 D 和 S1B0 发生强烈弯曲, 根据 Snell 定律, 它们被临界点下的声速剖面强烈弯折, 因声线能量近似服从高斯分布, 故只有少部分能量泄漏进入接收器, 幅度较小。且此时海底一次反射波也产生了较强的弯曲。

3.2 基于 RAP 的信号垂直相关性分析

对于均匀声场, 其时空相关函数定义为

$$\varphi_{12}(\tau, r) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} p_1(t, 0) p_2(t + \tau, r) dt \quad (9)$$

对空间位置固定的两点, 式(9)可化为时间的函数

$$\varphi_{12}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} p_1(t, 0) p_2(t + \tau, r) dt \quad (10)$$

因此归一化的互相关函数定义为

$$C_{12}(\tau) = \frac{\varphi_{12}(\tau)}{\sqrt{\varphi_{11}(0) \varphi_{22}(\tau)}} \quad (11)$$

将归一化互相关函数的最大值定义为接收信号的互相关系数:

$$\rho_{12} = \max[C_{12}(\tau)] \quad (12)$$

本节对深度余量内信号垂直相关性随声源距离的变化进行仿真分析。基于 RAP 噪声级低的优点, 将噪声设置为高斯白噪声。采用图 3(a)所示的声速剖面, 将 32 基元垂直阵置于 4 600~4 755 m 的深度余量内, 基元间距 5 m。设置声源深度为 100 m, 相对接收器的水平距离从 3~30 km 变化。发射中心频率为 150 Hz、带宽为 50 Hz 的扫频信号。海底参数设置不变。假定阵列首基元为参考基元, 将参考基元与其它各基元接收信号的相关系数相加取平均定义为平均相关系数, 声源每移动 1 km 计算一次平均相关系数。以声源距离为自变量作图 8。

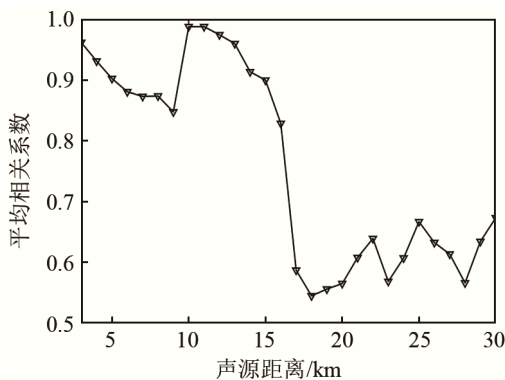


图 8 平均相关系数随声源距离变化图(扫频声源)
Fig.8 Average correlation coefficient versus source distance(sweep frequency source)

考虑当声源发射信号为线谱时的垂直相关性。设置其它参数不变, 由 8 Hz 基频、倍频分量以及 1 kHz 所组成的线谱信号如图 9 所示。

当信号源为图 9 所示的线谱时, 垂直阵平均相关系数随声源距离的变化如图 10 所示。

从图 8 及图 10 可以看出: 当声源水平距离小于 16 km 时, 平均相关系数较大, 在大部分区间内高于 0.8; 当距离大于等于 17 km 时相关系数平均

值锐减, 且随着深度的变化而剧烈起伏变化, 在大部分深度范围内, 相关系数均值低于 0.58。

以上述扫频信号源为例, 对平均垂直相关系数的衰落现象进行分析。

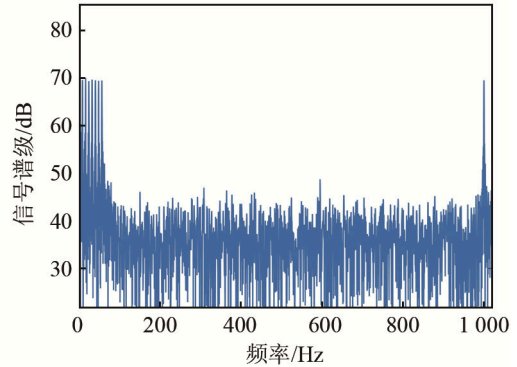


图 9 信号源线谱图
Fig.9 The line spectrum of the source

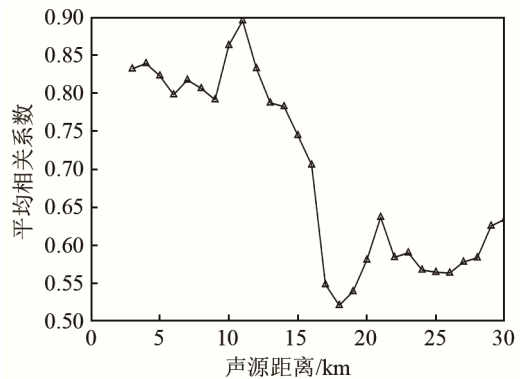


图 10 平均相关系数随声源距离变化图(线谱声源)
Fig.10 Variation of average correlation coefficient with source distance(line spectrum source)

由 3.1 节的分析可知, 在声源水平距离 16~30 km 的 RAP 声信道内, 对声信号起决定作用的有 4 根声线, 其中当 $r=17$ km 时, 由图 7(b)可知, 到达时间在 11.7 s 左右且幅度较大的声线分别对应 D 和 S1B0, 紧随其后的两根声线分别是 S0B1 以及 S1B1。在我们的仿真实验中, 海底压缩波声速 $c_b=1\,600\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 海水中取平均声速 $\bar{c}\approx 1\,525\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 则由式(8)可知, 海底反射波发生全反射的理论临界角应为 $\varphi_1 = \arccos\left(\frac{\bar{c}}{c_b}\right) = 0.307\text{ rad}$ 。由第 1 节分析

知, 当发生全反射时, 反射波将产生附加相移。依据 BELLHOP 软件的仿真结果, 当垂直阵接收距离为 17 km 时, 阵元接收到的 S0B1 及 S1B1 出现了附加相移, 表明此时海底反射波已发生全反射。则如图 11 所示, 以 $r=17$ km、海深 $d=4\,600$ m 处的首阵元为参考, 计算可得实际掠射临界角 $\varphi_2 \approx \arctan\left(\frac{5\,000}{15\,370}\right) = 0.314\text{ rad}$, $\varphi_1 \approx \varphi_2$, 理论与实际

基本相符。

故可近似认为当声源水平距离大于等于 17 km 时, 声线在海底已发生全反射, S0B1 及 S1B1 幅度有较大提升, 反射系数为海底反射声线引入了附加相位。

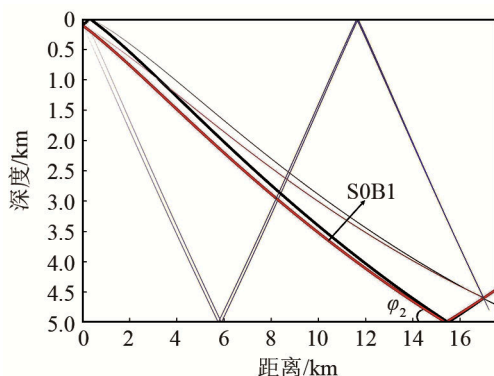


图 11 海底掠射角计算图

Fig.11 Calculation of grazing angle on the sea-bottom

假定首基元为参考基元, 当声源与垂直阵相距 17 km 时, 参考基元与其它各基元声信号的相关系数如图 12 所示。可明显看到, 此时垂直相关性较低且剧烈起伏, 使得此时接收信号的平均相关系数较低。

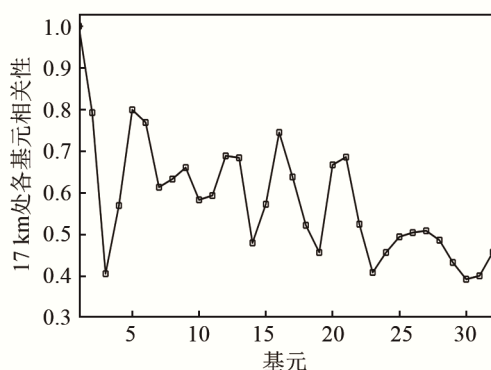


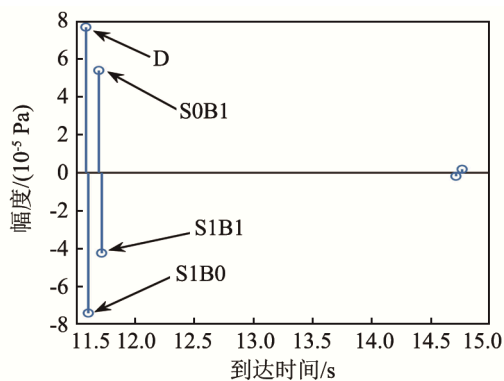
图 12 声源距离 17km 时垂直阵各基元接收信号相关系数

Fig. 12 Vertical correlation coefficient of the signal received by each element of the vertical array at 17 km apart

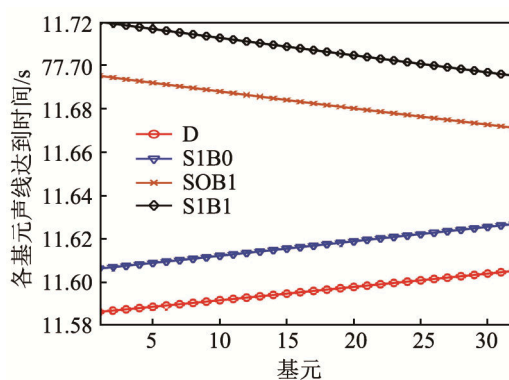
17 km 处垂直阵列首基元的声线到达结构如图 13(a)所示, 可以看出, 受到海底全反射的影响, 导致 S0B1 及 S1B1 幅度升高, 与 D、S1B0 一同对接收波形起主要作用。4 个波的到达时间如图 13(b)所示, 将 D 及 S1B0 编为组 1, S0B1 及 S1B1 编为组 2。

从仿真结果中可以看到, 组 1 与组 2 到达时间的时延差不断减小, 组 1 中两个不同路径的波将最先到达首基元, 最后到达 32 号基元, 而组 2 中的两个波则完全相反, 最先到达 32 号基元, 最后到达首基元。因此在各基元中, 不同路径波进行叠加的时间差不一致, 故各基元接收波形产生较严重的畸变, 相关系数不高。且由于时延差的减小是近似

线性的, 所以图 12 中各基元相关系数呈现不断减小的“周期”震荡。



(a) 17km 处首基元各声线到达结构



(b) 17 km 处首基元各主要声线到达时间

图 13 17 km 处首基元声线到达结构及时间图

Fig.13 The structure and time of arrival path at the first element of 17 km apart

水平阵常规波束形成能够获得较好的理论增益, 这是由于它的到达信号能够满足平面波的假设, 即声场中不同路径到达波的时间差在各基元中是相同的, 因此不同路径波在各基元中的叠加方式是一致的(进行叠加的时间差一致), 声传播几乎不受多途效应的影响, 理想情况下各基元接收波形将高度相关。水平阵各基元信号的相关是一种水平横向相关, 实际环境中波导随机起伏所引起的波形畸变是影响其相关性高低的主要原因。对垂直阵而言, 各主要声线在不同基元间到达时延差的差异是导致其不能满足平面波假设的主要原因, 它使得主要声线在不同基元中的叠加方式产生差异, 即使得多途效应对垂直相关性产生强烈影响, 多途效应的影响程度是导致垂直相关性高低的最重要原因。

声源距离 16 km 时阵列参考基元与其它各基元接收信号的相关系数如图 14 所示。可以看出当 $r=16$ km 时, 参考基元与其它各基元接收信号的相关系数随深度的增加呈缓慢下降趋势, 略有起伏变化, 但垂直相关性较高, 从而相距 16 km 处阵列的平均相关系数也较高。

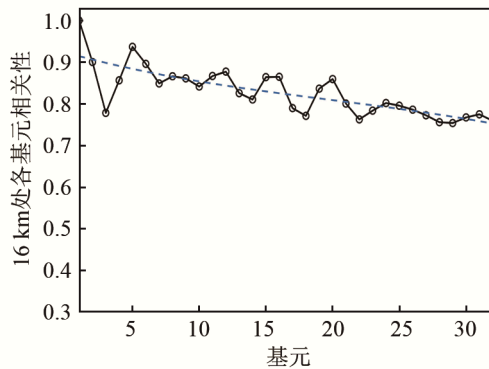
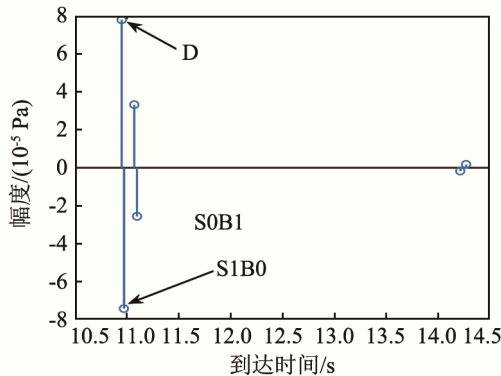
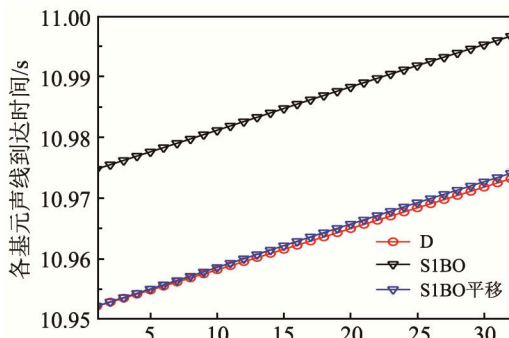


图 14 声源距离 16 km 时垂直阵各基元接收信号相关系数
Fig. 14 Vertical correlation coefficient of the signal received by each element of the vertical array at 16 km apart

取 16 km 处垂直阵首基元的声线到达结构作图 15(a), 取第 32 基元声线到达结构作图 16。由图 15(a) 可以看到, 由于海底反射波尚未到达全反射临界角, 故 S0B1 及 S1B1 幅度较小, 可近似认为只有 D 及 S1B0 两个波做主要贡献, 绘制这两个波的到达时间如图 15(b) 所示, D 与 S1B0 到达时间近似平行, 时延差几乎不变, 可近似认为 D 与 S1B0 在各基元中的叠加方式是一致的, 因此受多途效应影响较微弱, 各基元与首基元的相关系数较高。随基元序号变大, 其相关系数呈现缓慢减小趋势, 结合



(a) 16 km 处首基元各声线到达结构



(b) 16 km 处首基元各主要声线到达时间

图 15 16 km 处首基元声线到达结构及时间
Fig. 15 The structure and time of arrival path at the first element of 16 km apart

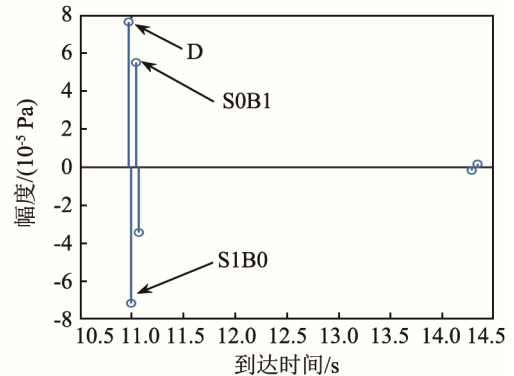


图 16 16 km 处末基元声线到达结构
The structure of arrival path at the last element of 16 km apart

图 16, 可知这是由于深度增大, 对应基元接收到的 S0B1 掠射角逐渐达到全反射临界角, 进而幅度提升所致。由于随着基元号数增大, S0B1 能量逐渐变强, 其叠加方式对接收波形的影响将愈发重要, 同时 S0B1 幅度的提升也使得波形产生畸变, 上述两点使得相关性略有下降。

图 17 中的 3 条曲线分别表示声源水平距离为 13、14、15 km 时阵列的垂直相关系数。可以看出在这些距离上, 垂直相关性普遍较高, 因此在图 8 中的平均相关系数也较高。14、15 km 处垂直阵中序号较大的基元相对首基元接收信号的相关性有所下降, 是 RAP 声信道内海底反射波开始产生全反射, 多途效应逐渐变强所导致的结果。结果与仿真分析是一致的, 验证了上述分析。

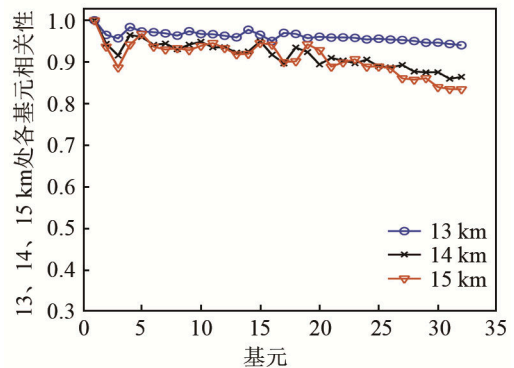


图 17 分别在 13、14、15 km 处的垂直阵各基元接收信号相关系数

Fig. 17 Correlation coefficients of the signal received by each element of the vertical array at 13, 14 and 15 km apart respectively

如图 18 所示, 3 条曲线分别表示声源距离为 18、19、20 km 时垂直阵列的垂直相关系数。可以看出在这些距离上, 垂直相关性起伏剧烈且普遍较低, 因此在图 8 中呈现的平均相关系数较低, 结果与分析一致。

对于均匀波导, 垂直阵列阵布放在 RAP 声信

道内对浅源目标进行探测时,在约 17 km 的探测距离上将出现相关性的衰落,因此垂直阵能够更为有效地探测到水平距离约 17 km 内的目标(本文为便于分析,将海底设置为无损海底,实际情况下的有效探测距离应大于 17 km)。有效探测距离外,由于各基元信号相关性降低,故增大孔径不一定能有效提升增益,需结合实际环境具体分析。本文的结果对垂直线列阵的设计、布放及增益分析具有一定的指导意义。

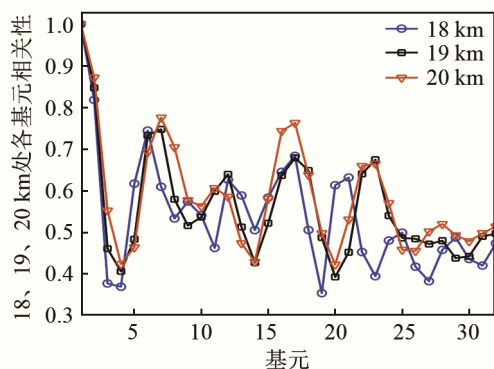


图 18 分别在 18、19、20 km 处的垂直阵各基元接收信号相关系数

Fig. 18 Correlation coefficients of the signal received by each element of the vertical array at 18, 19 and 20 km apart respectively

4 结束语

本文基于射线模型对 RAP 声信道内的声传播路径及到达结构进行分析,计算了 RAP 内阵列接收信号的垂直相关性随声源距离的变化,针对中程距离内信号相关性的衰落进行分析。仿真结果显示:当声源距离较近时,垂直阵各基元接收波形中起主要作用的是直达波和海面一次反射波,由于其到达时延差基本不变,因此在各基元中的叠加方式基本一致,传播过程中受多途效应影响较小,各基元信号的相关性较高;随着接收距离增大,由于全反射的作用,海底反射波幅度增大,使得不同路径

到达波的时延差随基元序号不断变化,即各路径波进行叠加的时间差随基元序号不断变化,接收信号受多途效应影响显著,进而导致垂直相关性急剧降低。

声场垂直相关性主要受多途效应的影响,多途传播中能量较强的波在不同基元上的幅度变化及到达时间差决定了信号受多途效应影响的强烈程度,其中到达时间差的差异是最主要因素。以上分析表明,布放于 RAP 声信道(深度余量)内的垂直阵在一定距离内能够对浅源目标实现有效探测,在此距离之外探测性能将降低,且增大基阵孔径不一定能有效提升增益。

参 考 文 献

- [1] 段睿. 深海环境水声传播及声源定位方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2016:32-56.
DUAN Rui. Studies on sound propagation and localization methods in deep water source[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016: 32-56.
- [2] DUAN R, YANG K D, MA Y L, et al. Research on reliable acoustic path: Physical properties and a source localization method[J]. Chinese Physics B, 2012, 21(12): 42-48.
- [3] 王鸿吉, 韩建辉, 杨日杰. 基于 RAP 的垂直线列阵时反定位研究[J]. 传感器与微系统, 2015, 12(4): 56-58.
WANG Hongji, HAN Jianhui, YANG Rijie. Research on time reversal positioning of vertical line array based on RAP[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2015, 12(4): 56-58.
- [4] ZHOU S, ZHANG R, TAO X, et al. Vertical correlation characterization of acoustic fields in the deep sea[J]. Progress in Natural Science, 1998, 18(3): 37-42.
- [5] 胡治国, 李整林, 张仁和, 等. 深海不平海底对声场水平纵向相关性的影响[J]. 声学学报, 2016, 41(5): 758-767.
HU Zhiguo, LI Zhenglin, ZHANG Renhe, et al. The effects of the uneven bottom on horizontal longitudinal correlations of acoustic field in deep water[J]. Acta Acustica, 2016, 41(5): 758-767.
- [6] 刘伯胜, 雷家煜. 水声学原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010: 46-56.
LIU Bosheng, LEI Jiayu. Principles of underwater sound[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2010: 46-56.
- [7] JENSEN F B, KUPERMAN W A, PORTER M B. Computational ocean acoustics 2ed[M]. New York: Springer-Verlag, 1992.