

◇ 研究报告 ◇

斜坡海底波导中随机声源的信道盲解卷积*

张雪冬^{1,2†} 牛海强¹ 吴立新^{1,2}

(1 中国科学院声学研究所 声场声信息国家重点实验室 北京 100190)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 该文研究了在斜坡海底环境中,通过基于射线的盲解卷积(RBD)方法,利用随机声源发出的信号来估计信道响应(CIR)的有效性,并讨论了不同信噪比和海底坡度情况下,RBD估计到的CIR与CIR理论值的相关性,对2016年美国圣巴巴拉海峡实验进行了仿真验证。RBD方法通过宽带波束形成估计随机声源的相位,以得到声源和接收阵之间的CIR。仿真结果表明,斜坡海底情况下RBD方法仍能较为准确地估计信道的CIR,噪声和海底坡度的变化均会对RBD估计到的CIR的精确度产生一定的影响。在具有一定粗糙度的斜坡海底波导或存在海底山丘的波导中,RBD仍然可以对CIR进行有效估计。

关键词: 盲解卷积;射线方法;斜坡海底

中图法分类号: TB533

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2020)05-0670-11

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2020.05.004

Blind deconvolution of sources of opportunity in a slope waveguide

ZHANG Xuedong^{1,2} NIU Haiqiang¹ WU Lixin^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To investigate the performance of ray-based blind deconvolution (RBD) of sources of opportunity in a slope waveguide, the correlation coefficients between RBD estimated channel impulse response (CIR) and the original CIR for different signal-to-noise ratios and slope angles is discussed using the numerical simulations of 2016 Santa Barbara Channel experiment. The RBD algorithm relies on estimating the unknown phase of the sources of opportunity through wideband beamforming along a well-resolved ray path to approximate the environment's CIR between the source and vertical line array elements. The simulation results for RBD estimated CIR in a slope waveguide show good agreement with the original CIR, and the environment noise and the slope angle influence the RBD estimated CIR. The RBD also has a good performance in a rough bottom or a hill waveguide.

Keywords: Blind deconvolution; Ray-based method; Slope waveguide

2019-09-17 收稿; 2020-02-13 定稿

*国家自然科学基金项目(11874061), 中国科学院青年创新促进会资助项目, 中国科学院声学研究所率先计划项目
作者简介: 张雪冬(1992-), 女, 山东人, 博士研究生, 研究方向: 水声物理。

†通信作者 E-mail: zxd@mail.ioa.ac.cn

0 引言

水下声源和接收阵之间的信道脉冲响应(Channel impulse response, CIR, 也称为格林函数)在海洋声学研究中有重要的作用^[1]。信道响应的估计有基于主动信号和被动信号两种方法。基于主动信号的方法用已知的声源发射的信号对接收信号数据进行解卷积来估计信道响应,这种方法得到的信道响应比较精确,缺点是需要预先知道声源的频谱信息。基于被动信号的方法利用随机声源(例如船舶噪声)来对信道响应进行估计,由于无法预知声源频谱,仅从阵列接收到的信号中对信道响应和声源频谱进行估计,会遇到难解的盲解卷积问题。然而,如果已知关于信道响应结构的部分先验信息(例如,由于海洋信道多途效应使声场呈现射线到达结构),则盲解卷积问题变得可解^[2]。最近的研究已经证明了基于射线的盲解卷积方法(Ray-based blind deconvolution, RBD)估计信道响应的可靠性。当声源为可控通信声源或船舶噪声时,RBD方法可以只利用接收阵阵型信息和阵列位置处的声速剖面(Sound speed profile, SSP)信息来估计信道响应。

已有的研究已验证了RBD方法在水平面海底的海洋波导环境中估计到的信道响应(以下简称为RBD-CIR)的准确性。例如,在相位方面,利用RBD-CIR的到达时间信息,可进行声源定位^[3-5]、接收阵阵型检测^[6-7]以及被动声层析^[6]等。在幅度方面,张雪冬等^[8-9]通过RBD-CIR的直达波与海底反射波幅度之比并对偶极子效应修正得到了海底反射损失,反演了海底参数,验证了RBD-CIR幅度信息的准确性。以上研究均基于海洋波导为水平面海底的情况,本文对于斜坡海底(海深随距离变化)环境下,RBD方法估计得到的信道响应的准确性和有效性进行验证和讨论。主要内容分为以下几个部分:首先介绍了基于射线的盲解卷积方法的基本原理;然后利用仿真数据,验证了水平面海底时RBD方法的有效性;接着仿真比较了海底坡度不同时RBD方法所得信道响应,并对海底坡度和信噪比(Signal-to-noise ratio, SNR)对RBD-CIR的影响进行了讨论;另外还对具有一定粗糙度的海底斜坡波导中或存在海底山丘的波导中,

RBD方法的有效性进行了讨论;最后对本文进行了总结。

1 RBD方法^[2]

利用基于射线的盲解卷积方法估计CIR。假设未知源发出的角频率为 ω 的信号可表示为

$$S(\omega) = |S(\omega)|e^{i\Phi_s(\omega)}, \quad (1)$$

其中, $\Phi_s(\omega)$ 为声源相位谱。那么第 j 个接收水听器的接收信号频谱为

$$P(z_j, z_s, \omega) = G(z_j, z_s, \omega)S(\omega), \quad (2)$$

其中, G 是频域信道响应函数, z_s 是声源深度, z_j 是由 N 个阵元组成的接收阵中第 j ($j = 1, 2, \dots, N$)个水听器的深度。当海洋信道多途效应使声场呈现射线到达结构时,该信道响应可以表示为多条射线路径的叠加^[10],

$$G(z_j) = \sum_k \alpha_k e^{i\omega T(\theta_k) + \tau_{j,k}}, \quad (3)$$

其中, α_k 表示第 k 条射线路径的幅度; $T(\theta_k)$ 为从声源到接收阵的第 k 条射线路径的传播时间, θ_k 为第 k 条射线的到达角; $\tau_{j,k}$ 表示第 k 条射线路径到达第 j 个阵元与到达参考阵元的时间差。因此,与特定到达角 θ_k 相关联的特定入射波可以在接收端通过宽带波束形成(例如常规波束形成^[11])被分离出来。假设该阵列具有足够的空间分辨率,使得其他射线路径上的能量旁瓣最小,则有

$$\begin{aligned} B(\omega; \theta_k) &= \sum_{j=1}^N P(z_j, z_s, \omega) e^{-i\omega \tau_{j,k}} \\ &\approx |B(\omega; \theta_k)| e^{-i\omega T(\theta_k) + i\Phi_s(\omega)}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $B(\omega; \theta_k)$ 为接收信号在第 k 条射线到达角 θ_k 方向上的波束形成结果。令

$$\psi(\omega; \theta_k) = \arg(B(\omega; \theta_k)) = -\omega T(\theta_k) + \Phi_s(\omega), \quad (5)$$

利用公式(5),可得归一化信道响应

$$\begin{aligned} &G_e(z_j, z_s, \omega; \theta_k) \\ &= \frac{P(z_j, z_s, \omega)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N |P(z_j, z_s, \omega)|^2}} e^{-i\psi(\omega; \theta_k)} \\ &= \frac{G(z_j, z_s, \omega)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N |G(z_j, z_s, \omega)|^2}} e^{-i\omega T(\theta_k)}. \end{aligned} \quad (6)$$

在浅海中,通常假设公式(6)中的分母在频率上足够恒定,通过平方根项的归一化消除了声源信号幅度的影响。此外,通过将估计的信道响应 $G_e(z_j, z_s, \omega; \theta_k)$ 与接收数据 $P(z_j, z_s, \omega)$ ($j = 1, \dots, N$)做解卷积可以估计原始声源的波形,即声源波形可以表示为

$$\begin{aligned} \hat{S}(\omega; \theta_k) &= \sum_{j=1}^N G_e^*(z_j, z_s, \omega; \theta_k) P(z_j, z_s, \omega) \\ &= \sqrt{\sum_{j=1}^N |G(z_j, z_s, \omega)|^2} S(\omega) e^{i\omega T(\theta_k)}, \quad (7) \end{aligned}$$

其中,*表示取共轭。

2 水平面海底信道

首先验证水平面海底信道时RBD方法的有效性。利用射线模型对2016年美国圣巴巴拉海峡实验进行仿真,仿真环境如图1(a)所示。假设海底斜坡坡度 $\phi = 0^\circ$,即信道为深600 m的水平不变波导。声源位于海面以下10 m处,发射带宽150~500 Hz的白噪声信号。31元的垂直接收阵(Vertical line array, VLA)深度为510~540 m,阵元间隔为1 m。以接收阵处为0点,水面舰船从距接收阵1.0 km处逐渐航行至3.5 km处。声速剖面由16个温盐深仪(Conductivity, temperature, depth, CTD)所测数据的平均值所得,如图1(a)中蓝线所示。海底为半无限空间,海底声速 c_b 、密度 ρ_b 和吸收系数 α_b 分别设为1600 m/s、1.6 g/cm³和0.5 dB/ λ 。利用

Bellhop^[12]对声场进行仿真。当声源-接收阵距离 r 为2.5 km时,其CIR如图1(b)所示,此时可以看出明显的3条射线路径:直达波、海底反射波以及海底-海面反射波。

以声源-接收距离 $r = 2.5$ km为例,图2介绍了利用RBD方法估计信道响应的详细的步骤。将声源发出的白噪声信号与CIR理论值在频域做乘法(公式(2)),得到接收信号。图2(a)为VLA上第一个阵元(510 m)处的接收信号。对VLA所有阵元的接收信号做常规波束形成所得波束图如图2(b)所示,其中红点表示的直达波到达角和海底反射波到达角分别为 $\theta_1 = -13^\circ$ 和 $\theta_2 = 16^\circ$ (其坐标定义见图2(e))。对VLA所有阵元的接收信号在直达波到达方向 θ_1 上做波束形成(公式(4)),将波束形成后的信号与接收信号做匹配滤波,然后对幅度进行归一化(公式(5)~(6)),得到RBD-CIR如图2(c)所示。其对应的VLA接收深度上的CIR理论值如图2(d)所示。为了便于比较,将RBD-CIR的直达波在第一个VLA阵元上的到达时间人工平移到1 s处。可以看出,CIR与RBD-CIR在幅度和相位上均符合得很好。由于RBD方法通过对接收信号做波束形成(公式(4))来估计随机声源的相位,因此无法估计出声源与接收阵之间的绝对到达时间,所以图2(c)与图2(d)时间轴是不同的。

对声源-接收阵之间不同距离上的接收信号进行空间滤波,对应的波束形成结果见图3(a),并利用Bellhop计算直达波到达角 θ_1 和海底反射波到达角 θ_2 的理论值,用+表示(图3(a))。利用不同

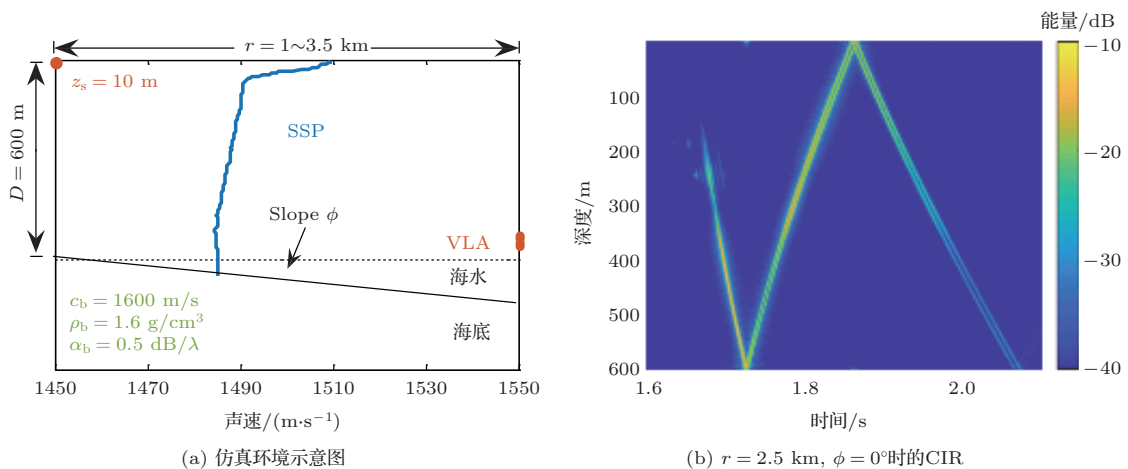


图1 仿真环境示意图及利用Bellhop产生的CIR图

Fig. 1 The environment model and the CIR synthesized by Bellhop

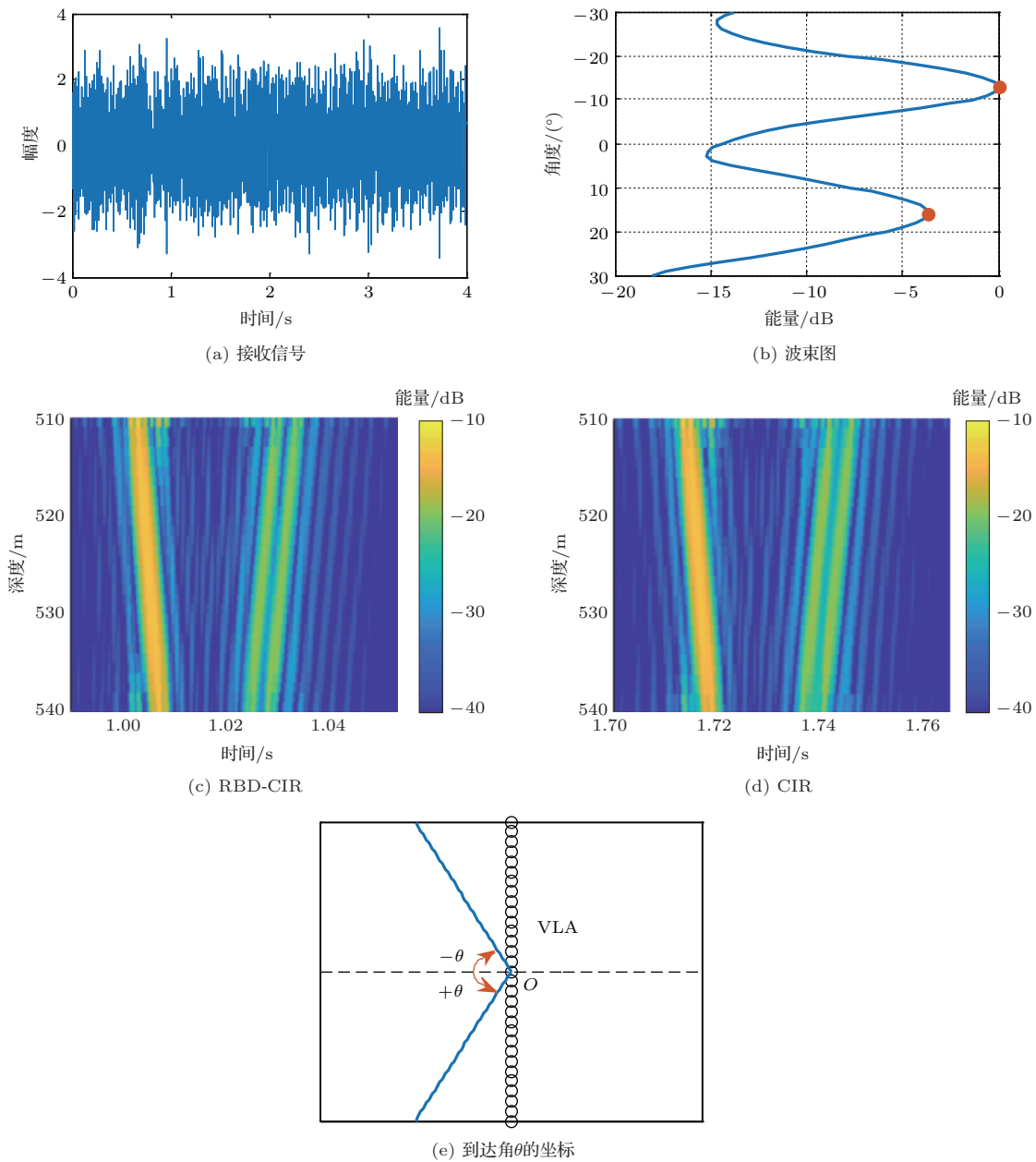


图2 利用RBD方法估计信道响应的实现步骤及到达角坐标系定义

Fig. 2 The steps for estimating CIR using RBD method and the coordinate for arrival angle

声源-接收距离上的直达波到达角 θ_1 的波束形成结果得到RBD-CIR, 并将RBD-CIR与其对应的CIR理论值做相关, 并将互相关系数在深度上做平均, 得到平均互相关系数 \bar{C} ,

$$\bar{C} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \text{xcorr}\{G(z_j, z_s, \omega), G_e(z_j, z_s, \omega; \theta_1)\}, \quad (8)$$

其中, xcorr 表示求互相关系数。所得的平均互相关系数 \bar{C} 随距离的变化关系如图3(b)中蓝线所示。图3(b)中其他曲线为对接收信号增加不同SNR的

噪声时, 其平均互相关系数 \bar{C} 随距离的变化关系。可以看出, 随着SNR的减小, 平均互相关系数 \bar{C} 也在随之减小。一般认为, 归一化相关系数大于0.7时, 两点间的声场相关性较好, 所以这里两信道响应间相关性的判别也选取了0.7作为参考依据, 李整林等^[13]也有类似处理。当SNR小于10 dB时, 平均互相关系数 \bar{C} 小于0.7, 表明RBD-CIR与CIR的相关性非常小或不相关, RBD对CIR的估计无效。当SNR不同时, 随着声源-接收距离 r 的增加, 平

均互相关系数 \bar{C} 均逐渐增大,这意味着估计到的RBD-CIR越准确。这是由于随着声源-接收距离 r 的增加,声源所发出的信号在接收阵上越接近平面波,波束形成的结果越精确,从而估计的RBD-CIR越精确。

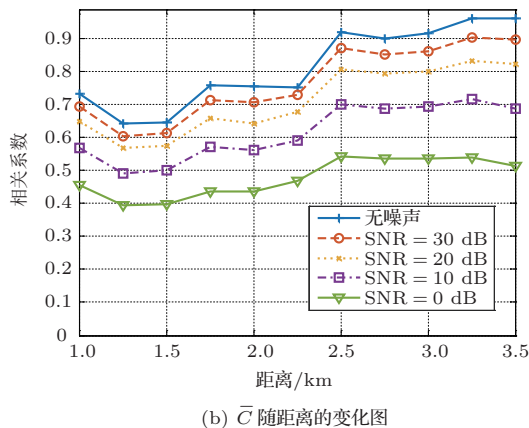
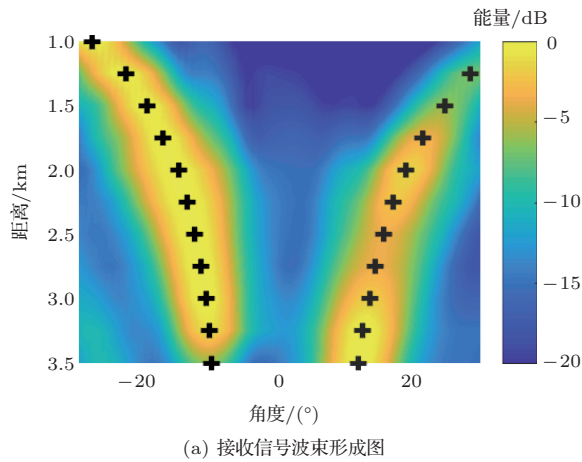


图3 $\phi = 0^\circ$ 时波束形成结果及 \bar{C} 随距离的变化图

Fig. 3 Evolution of the beamforming patterns and \bar{C} along increasing source-receiver distances when $\phi = 0^\circ$

3 平斜坡海底信道

RBD方法在水平海底时对CIR的估计效果已被很多研究验证^[1-9],但在斜坡海底时的研究还很欠缺。这一部分介绍了当海洋环境的海底坡度 ϕ 不等于 0° 时(如图1(a)所示),RBD方法对CIR的估计效果。图4(a)为声源-接收距离 r 为2.5 km,海底坡度 ϕ 分别为 -2° 、 0° 、 1° 和 5° 时,对接收信号做常规宽带波束形成的结果。受VLA深度的限制,这里仅对 $> -2^\circ$ 的平海底斜坡进行了讨论。如图4(a)所示,直达波的到达角 $\theta_1 = -13^\circ$ 不随海底坡度 ϕ

变化;但海底反射波的到达角 θ_2 随海底坡度的增加而增大,且由于海底反射损失的影响,其在 θ_2 处的幅度随着坡度的增加 ϕ 而减小。对于半无限空间的海底,其海底反射损失(Reflection loss, RL)^[10]可表示为

$$RL(\theta) = 20 \lg \left| \frac{\frac{\rho_b c_b}{\cos \theta_b} - \frac{\rho_w c_w}{\cos \theta_w}}{\frac{\rho_b c_b}{\cos \theta_b} + \frac{\rho_w c_w}{\cos \theta_w}} \right|, \quad (9)$$

其中, c_w 、 ρ_w 、 θ_w 和 θ_b 分别表示在接近海底处海水的声速、密度,声线入射角和透射角。透射角和入射角的关系根据Snell定律^[10]得到

$$\left(\frac{\omega}{c_b} + i\alpha_b \right) \sin \theta_b = \frac{\omega}{c_w} \sin \theta_w. \quad (10)$$

由于 α_b 与 ω 成正比,所以RL与 ω 无关。根据图1(a)海底参数得到的海底反射损失与声线入射角 θ_w 的关系如图4(b)所示。当海底坡度 ϕ 越大时,其入射角 θ_w 越小,海底反射损失RL越大,导致海底反射波的幅度越小。

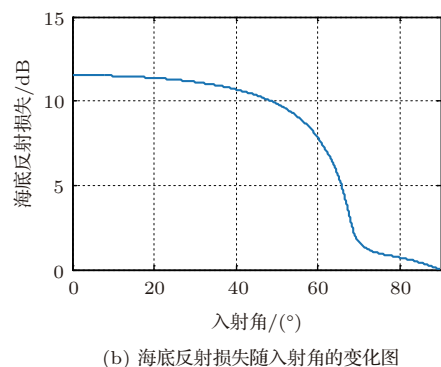
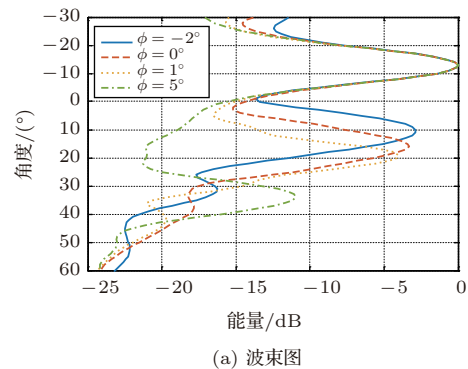


图4 不同海底坡度 ϕ 下的波束图及海底反射损失随入射角的变化图

Fig. 4 Beamforming pattern for different slope angle ϕ and the relationship between RL and the incident angle

对比海底坡度 ϕ 分别为 -2° 、 1° 和 5° 时的 CIR(图5 第一列) 与 RBD-CIR(图5 第二列) 在声源-接收间距 r 为 2.5 km 处的结果可以看出, 当海底坡度不同时, RBD 均可以对 CIR 的幅度和相位进行较为准确的估计。在这里, 与水平面海底的情况类似, 也将 RBD-CIR 的直达波在第一个 VLA 阵元上的到达时间人工平移到 1 s 处。由于 RBD 方法无法估计出声源与接收阵之间的绝对到达时间, 所以图5 的第一列与第二列的时间轴是不同的。

当海底坡度 ϕ 分别为 -2° 、 1° 和 5° 时, 对所有不同声源-接收距离 r 的信号做波束形成(见图6),

并利用 Bellhop 计算直达波到达角 θ_1 和海底反射波到达角 θ_2 , 用 + 表示(见图6)。利用不同声源-接收距离 r 上的直达波到达角 θ_1 的波束形成结果估计其对应的 RBD-CIR。当 SNR 和海底坡度 ϕ 不同时, 其 RBD-CIR 与 CIR 理论值的平均互相关系数 \bar{C} 随距离的变化关系如图7所示。可以看出, 对于所有的海底坡度情况, \bar{C} 均随着声源-接收距离 r 的增加而增加, 并随着 SNR 的减小而减小。当 SNR < 10 dB 时, 平均互相关系数 $\bar{C} < 0.7$, 表明 RBD-CIR 与 CIR 的相关性非常小或不相关, RBD 对 CIR 的估计无效。

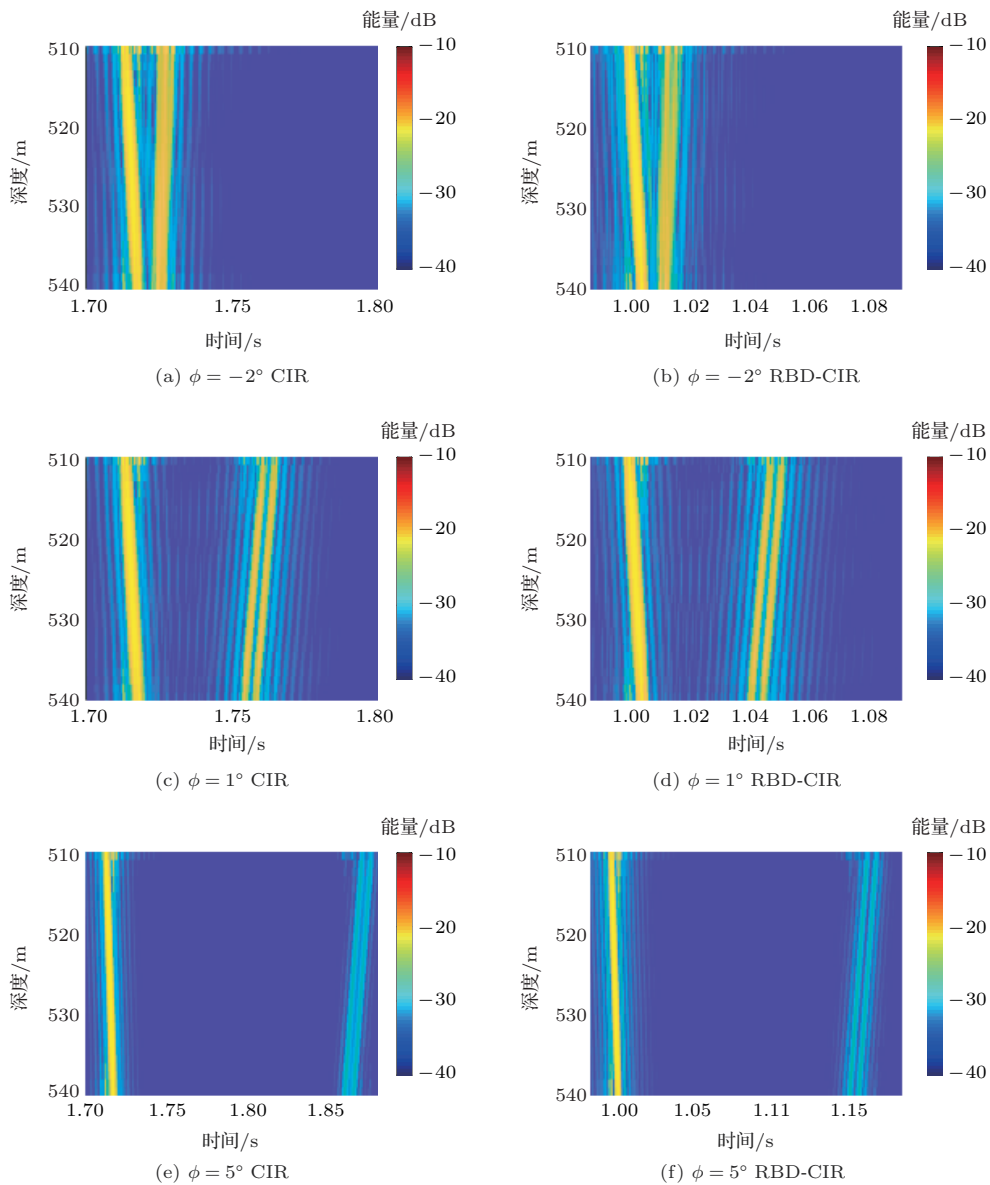


图5 当 $r = 2.5$ km 时, CIR 理论值及其对应的 RBD-CIR 在不同海底坡度 ϕ 下的结果

Fig. 5 The CIRs and their corresponding RBD-CIRs for different slope angle ϕ at the source-receiver distance r of 2.5 km

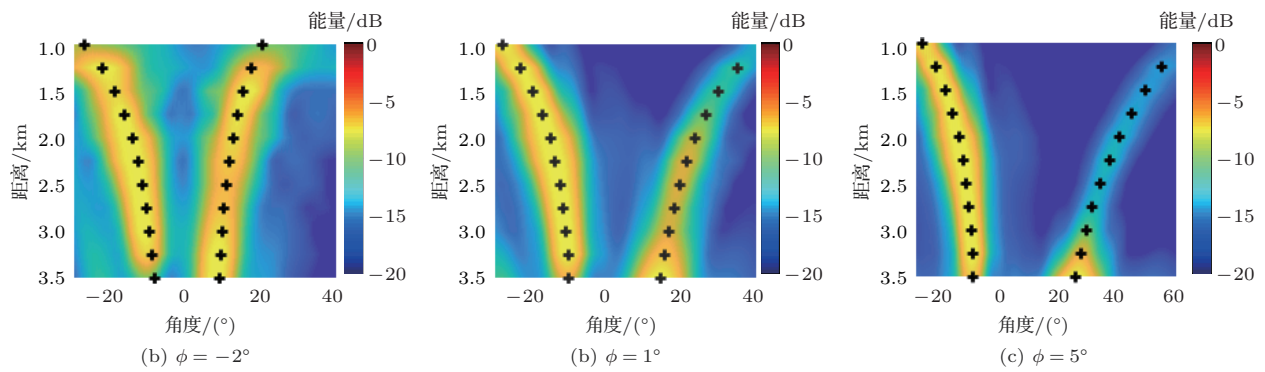


图6 海底坡度 ϕ 不同时, 波束形成结果及由 Bellhop 得到的到达角理论值 (黑色加号) 随距离的变化关系
 Fig. 6 Evolution of the beamforming patterns along increasing source-receiver distances and their corresponding arrival angle calculated by Bellhop (dark plus signs) with different slope angle ϕ

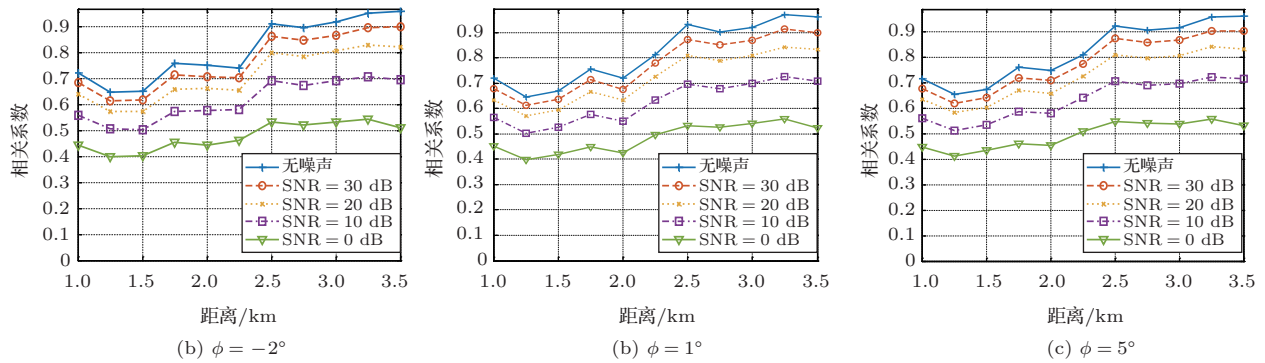


图7 海底坡度 ϕ 不同时, CIR 与 RBD-CIR 的平均互相关系数随距离的变化关系
 Fig. 7 Evolution of mean correlation coefficients along increasing source-receiver distances with different SNR for different slope angle ϕ

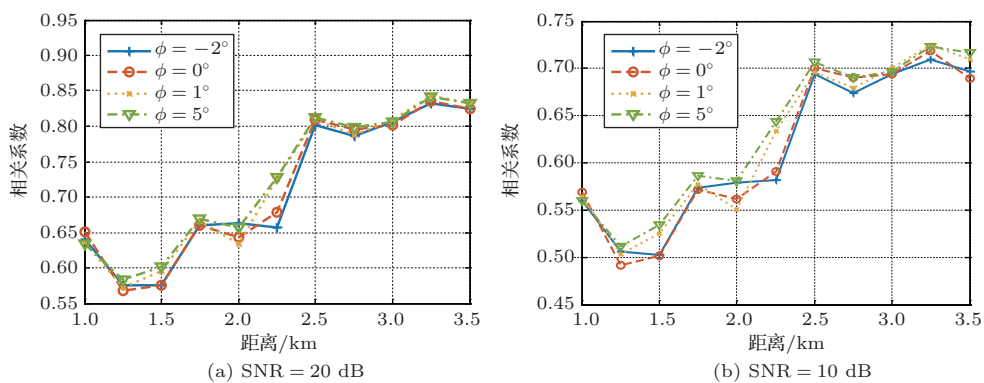


图8 海底坡度 ϕ 不同时, CIR 与 RBD-CIR 平均互相关系数随距离的变化关系
 Fig. 8 Evolution of mean correlation coefficients along increasing source-receiver distances for different slope angle ϕ

为了比较同一 SNR 时, 不同海底坡度 ϕ 对平均互相关系数 \bar{C} 的影响, 以 SNR 为 20 dB 和 10 dB, 海底坡度 ϕ 分别为 -2° 、 0° 、 1° 和 5° 为例, 其 \bar{C} 随声源-接收距离 r 的变化关系如图 8 所示。可以看出,

对于不同的 SNR, \bar{C} 随着 ϕ 的增加而略微增大, 尤其在 $r = 2.25$ km 处, 最大增值可以达到 0.07。这是由于当海底坡度较大时, 海底反射损失越大, 其他路径 (例如海底反射波) 的接收信号对直达波路径的接收

信号干扰越小,从而使得估计的RBD-CIR越准确, \bar{C} 越大。

4 粗糙斜坡信道

当海底坡度 ϕ 为 1° 时,为了对粗糙平海底斜坡情况进行仿真,令海底在每距声源的水平距离为50 m处发生一次随机起伏,该起伏服从均值为0 m、方差分别为0.5 m和2.5 m的正态分布,所得海底斜坡地形分别如图9(a)和图9(d)所示,来模拟相对平滑和相对粗糙的海底情况,其他环境参数与图1(a)中相同。利用Bellhop得到的信道响应理论

值分别如图9(b)和图9(e)所示。海底相对平滑时,海底反射波较为清晰;海底相对粗糙时,海底反射波受到较大影响,能量降低。利用RBD方法对随机声源(在这里选取为白噪声)在150~500 Hz产生的接收信号进行处理,所得RBD-CIR分别如图9(c)和图9(f)所示。利用公式(8)得到CIR理论值与相应RBD-CIR的平均互相关系数 \bar{C} 分别为0.93和0.94,可以看出不同海底粗糙度情况下,RBD-CIR与CIR均符合得很好。由于该RBD方法在对接收信号进行波束形成时,利用直达波的到达角来得到声源的相位,所以不受海底情况的影响,RBD方法依然是有效的。

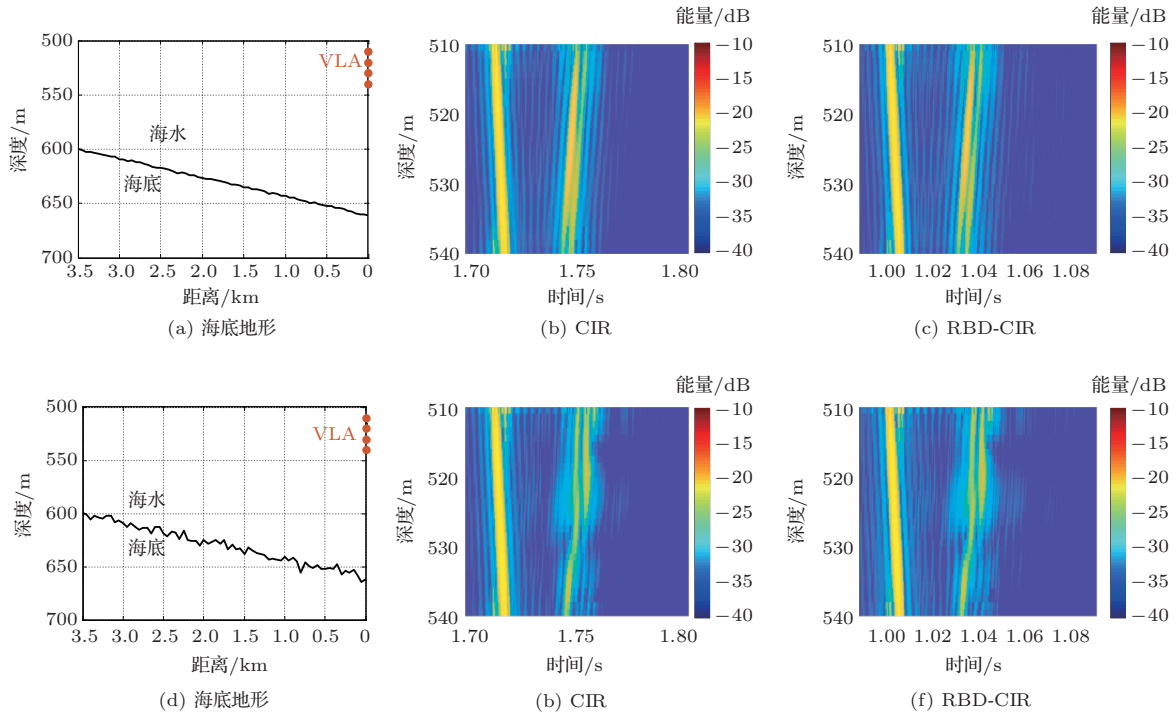


图9 海底斜坡较光滑(第一行)和较粗糙(第二行)情况下的海底地形图、CIR理论值和RBD-CIR结果

Fig. 9 The bottom geometry, the CIRs, and their corresponding RBD-CIRs for smooth (upper panel) and rough (lower panel) bottoms, respectively

5 信道中存在山丘的情况

对海底存在较小幅度的山丘的情况进行讨论,海底分布如图10(a)所示在离VLA水平距离0.15~0.40 km处存在一个海底山丘,其高度随距离的变化服从正弦函数的半周期,幅值为110 m。当声源-接收距离为2.5 km、接收深度分别为510 m和551 m时,由Bellhop所得的直达波如图10(a)所示。由图10(a)可以看出,当接收深度为551 m时,直达波声线与山丘相切,当接收深度大于551 m时

直达波无法抵达接收阵元处,即在此距离上直达波最深可抵达深551 m的接收阵元。图10(b)为31阵元的VLA深度分别为510~540 m、540~570 m以及570~600 m,声源-接收距离为2.5 km时,对接收信号做常规宽带波束形成的波束图结果。当VLA深度为510~540 m时,波束图在直达波方向上(-13°)的能量最高;当VLA深度为540~570 m时,波束图在直达波(-13°)和海底-海面反射波(-36°)方向上具有相当的能量;当VLA深度为570~600 m

时,波束图在海底-海面反射波方向上(-36°)的能量最高。

图11为VLA深度分别为510~540 m和540~570 m时,在声源-接收距离为2.5 km处的CIR理论值

论值(第一列)和其对应的RBD-CIR(第二列),这里RBD方法所使用的波束形成角度为直达波到达角(-13°),两种情况所得RBD-CIR与其理论值的平均互相关系数分别为0.93和0.71,估计结果有效。

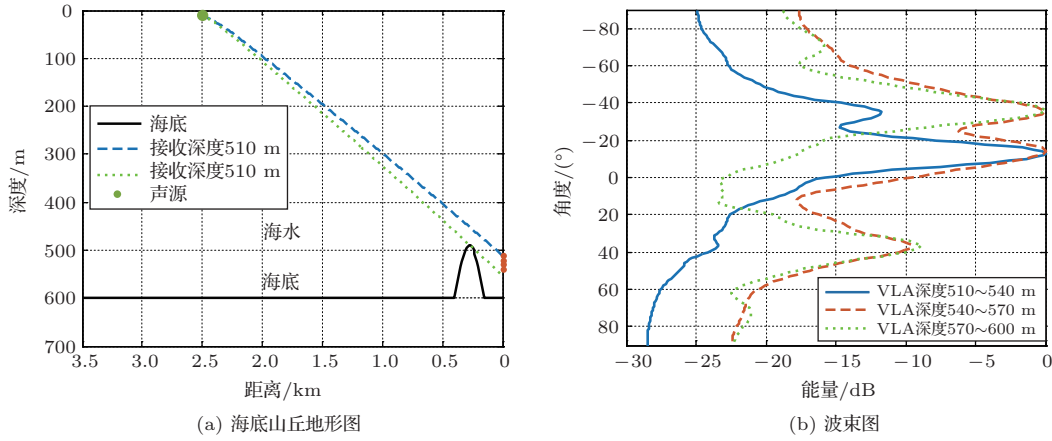


图10 海底山丘地形图及VLA深度不同时的波束图

Fig. 10 The bottom geometry with a hill and the beamforming pattern for different VLA depth

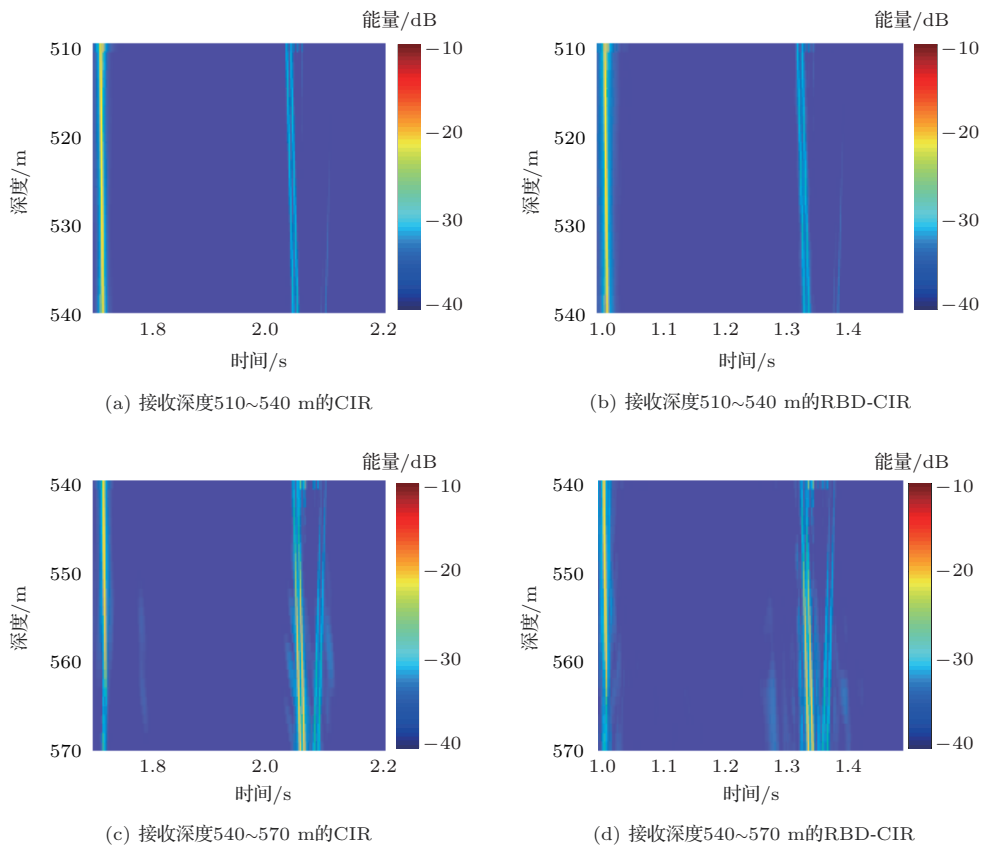


图11 当VLA深度不同时,在声源-接收距离r = 2.5 km处的CIR理论值(第一列)及其对应的RBD-CIR(第二列)结果,其中波束形成角度(θ = -13°)为直达波到达角

Fig. 11 The CIRs (first column) and their corresponding RBD-CIRs (second column) for different VLA depth with the source-receiver distance r of 2.5 km, where the beamforming angle (θ = -13°) is the direct arrival angle

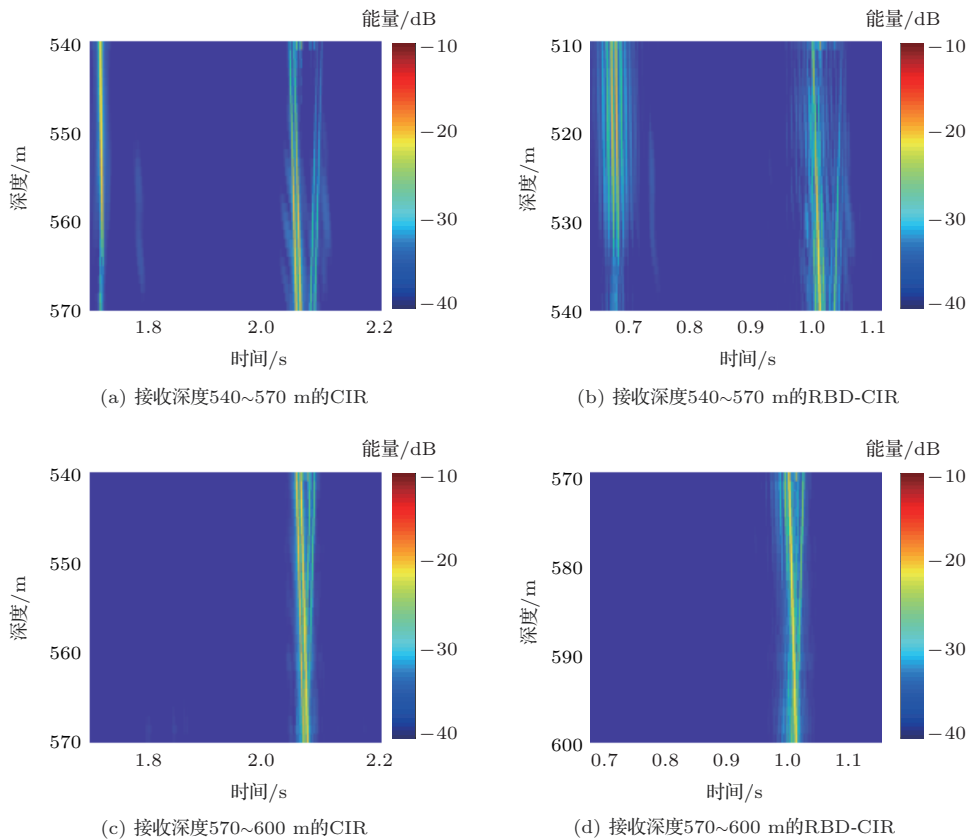


图 12 当 VLA 深度不同时,在声源-接收距离 $r = 2.5$ km 处的 CIR 理论值(第一列)及其对应的 RBD-CIR(第二列)结果,其中波束形成角度 ($\theta = -36^\circ$) 为海底-海面反射波到达角

Fig. 12 The CIRs (first column) and their corresponding RBD-CIRs (second column) for different VLA depth with the source-receiver distance r of 2.5 km, where the beamforming angle ($\theta = -36^\circ$) is the bottom-surface arrival angle

图 12 为 VLA 深度分别为 540~570 m 和 570~600 m 时,在声源-接收距离为 2.5 km 处的 CIR 理论值(第一列)和其对应的 RBD-CIR(第二列),这里 RBD 方法所使用的波束形成角度为海底-海面反射波到达角 (-36°),两种情况所得 RBD-CIR 与其理论值的平均互相关系数分别为 0.71 和 0.84,估计结果依然有效。因此当海底山丘对直达波有遮挡作用时,RBD 方法可以利用其他射线路径的到达角度对接收信号做波束形成,以估计随机声源的相位,进而对 CIR 进行有效估计。

6 结论

本文对 2016 年美国圣巴巴拉海峡实验进行仿真,验证了水平面海底和斜坡海底时,利用 RBD 方法来估计信道 CIR 的有效性,并讨论了不同信噪比和坡度下,RBD-CIR 与 CIR 理论值之间的平均互

相关系数随声源-接收距离的变化关系。可以看出,对于不同坡度的平斜坡海底信道,RBD 方法估计到的 CIR 在幅度与相位上均与实际 CIR 符合得较好。对于同一坡度的海底,平均互相关系数随着信噪比和声源-接收距离的增大而增大。当信噪比大于 10 dB 时,RBD 方法可以对 CIR 进行有效估计。当信噪比固定时,海底坡度的增加会使得海底反射损失增大,令其他路径的信号对直达波路径信号的干扰减小,从而导致平均互相关系数增大。在斜坡信道比较粗糙或信道中存在海底山丘的情况下,RBD 方法仍可对 CIR 进行有效的估计。由于本文主要基于仿真数据,对于实际应用时 RBD 方法在斜坡海底波导中的有效性仍需进一步验证与讨论。

参 考 文 献

[1] Dowling D R, Sabra K G. Acoustic remote sensing[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2015, 47(1): 221-243.

- [2] Sabra K G, Dowling D R. Blind deconvolution in ocean waveguides using artificial time reversal[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2004, 116(1): 262–271.
- [3] Abadi S H, Rouseff D, Dowling D R. Blind deconvolution for robust signal estimation and approximate source localization [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2012, 131(4): 2599–2610.
- [4] Song H C, Cho C, Byun G, et al. Cascade of blind deconvolution and array invariant for robust source-range estimation[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2017, 141(5): 3270–3273.
- [5] Byun S H, Verlinden C M A, Sabra K G. Blind deconvolution of shipping sources in an ocean waveguide[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2017, 141(2): 797–807.
- [6] Gemba K L, Jit S, Bruce C, et al. Estimating relative channel impulse responses from ships of opportunity in a shallow water environment[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2018, 144(3): 1231–1244.
- [7] Yang J, Byun S H, Sabra K G. Improving ray-based blind deconvolution of random shipping sources with short arrays in an ocean waveguide using adaptive beamforming[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2016, 139(4): 2051–2051.
- [8] Zhang X, Durofchalk N C, Niu H, et al. Geoacoustic inversion using ray-based blind deconvolution of shipping sources[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2019, 147(1): 285–299.
- [9] 张雪冬, Sabra K G, 王凯, 等. 基于盲解卷积利用海洋波导中的机会声源反演海底参数 [C]//中国声学学会水声学分会 2019 年学术会议论文集, 2019.
- [10] 刘伯胜, 雷家煜. 水声学原理 [M]. 第二版. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2009.
- [11] 鄢社锋. 优化阵列信号处理 (上册): 波束优化理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [12] Porter M B, Bucker H P. Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1980, 68(3): 628–633.
- [13] 李整林, 董凡辰, 胡治国, 等. 深海大深度声场垂直相关性 [J]. 物理学报, 2019, 68(13): 134305.
- Li Zhenglin, Dong Fanchen, Hu Zhiguo, et al. Vertical correlations of sound field at large depths in deep water[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(13): 134305.