

# 一种基于投影层析方法的水下目标成像方法

邵鹏飞, 祝 献, 邹丽娜

(杭州应用声学研究所声呐技术重点实验室, 浙江杭州 310012)

**摘要:** 投影层析是一种在几何上基于多角度投影实现目标与情景的像重构方法。水下散射目标具有数量众多、散射特性复杂的特点, 为了有效探测到感兴趣的目标, 需要重构出目标及所在情景高可靠分辨的像。因此, 该文从逆问题求解的角度出发, 分析了实现投影层析方法的物理条件及数学原理; 并提出了一种水下目标投影层析成像的可行性方法及实现流程; 通过在不同的扫描角度范围下的仿真进一步验证了投影层析方法对指定区域反射性目标探测的可行性。

**关键词:** 投影层析; 像重构; 逆问题; 目标探测

中图分类号: TP911.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2016)-04-0314-05

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2016.04.006

## A projection tomography based method for underwater target imaging

SHAO Peng-fei, ZHU Xian, ZOU Li-na

(Science and Technology on Sonar Laboratory, Hangzhou Applied Acoustics Research Institute, Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

**Abstract:** Projection tomography is a kind of target and scene image reconstruction method based on multi angle projection in geometry. The underwater scattering target has the characteristics of large quantity and complex scattering characteristics. The problem of effectively detecting the interested target can be solved by reconstructing the high reliable and high resolution images of target and the scene. Therefore, this paper analyzes the physical conditions and the mathematical principle of the method of projection tomography, and proposes a feasible method and the realization process of the underwater target projection tomography. The feasibility of the projection tomography method to the target detection in the specified region is verified by the simulations at different scanning angles.

**Key words:** projection tomography; image reconstruction; inverse problem; target detection

## 0 引言

通过对目标区域有指向性的照射可以接收到相应的回波信号, 回波信号中的幅度和相位信息可以一定程度上反映目标场的散射或反射特性, 利用这个原则, 通过多个角度的观察回波, 可以重构出一定区域的水下声场散射的二维或者三维的像。对于一般的水下目标二维像重构问题, 可以将其目标散射密度函数表示为  $\rho(x, y)$ , 通过观测可以直接获得的目标回波信号表示为  $p_{\theta}(t)$ , 正向观察的物理过程可以表示为  $\rho(x, y) \xrightarrow{\text{观察者}} p_{\theta}(t)$ ; 通过观测信号估计目标或情景像的过程表示为  $p_{\theta}(t) \xrightarrow{\text{估计者}} \rho(x, y)$ , 这一过程就称作为逆问题求解<sup>[1]</sup>。

投影层析作为逆问题求解的工具, 已经应用于

医学诊断、地质勘查、海洋环境监测等领域。对应于不同的物理机制, 层析方法也分为衍射层析、X射线层析、散射或反射层析、背景辐射层析等<sup>[1-2]</sup>。在声呐探测问题中, 传感器信号的强度、相位(时延)、多普勒参量是用来提取物理场中目标位置及散射和运动特性的基本信息, 这一过程可以通过物理建模来反演实现。为了获得更可靠和高分辨的目标特性, 除了寻求在某一准则下的规则化最佳性算法外, 还可以通过设定的观测模式, 在相应处理方法下提高探测性能。本文介绍的投影层析方法就是利用了投影层析的观测方式, 对指定观察区域的情景和目标进行探测和分析。文中首先介绍了投影层析的观察模型, 正向建模为解决投影层析探测这一逆问题求解提供了必要条件; 接下来介绍了投影层析的核心理论, 即投影-切片定理, 这是通过投影层析方法进行数据处理的数学基础; 然后对投影层析系统进行描述, 主要对实现该方法进行了充分性的分析, 介绍了相应的实现流程; 最后给出了仿真分析

收稿日期: 2015-10-20; 修回日期: 2016-01-10

作者简介: 邵鹏飞(1989—), 男, 湖北荆门人, 硕士, 研究方向为水声信号处理。

通讯作者: 祝献, E-mail: sklzhuixian@163.com

和论证。

## 1 观察模型

投影层析方法的数据来源于对目标所在情景从不同角度照亮，接收相应的回波，这一过程可以看作是构成一次投影，投影层析观察模型如图 1 所示。

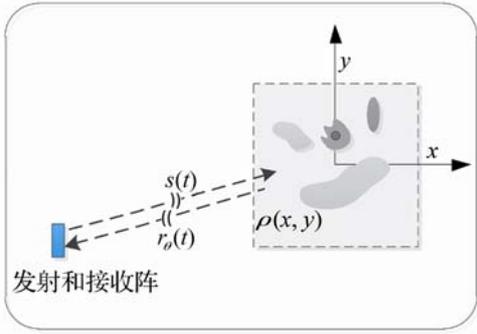


图 1 投影层析观察模型

Fig.1 The observation model of projection tomography

假定被观察二维情景的散射密度函数可以表示为一个连续可积的二元函数  $\rho(x, y)$ ，接收阵为满足半波长布阵且阵孔径为  $l$  的一维阵，则与其中心距离为  $L$ 、投影角度为  $\theta$  的阵元接收到的信号可以表示为：

$$r_\theta(t) = \iint \alpha_L \rho(x, y) s(t - 2\tau_{x,y}) dx dy \quad (1)$$

其中： $\alpha_L$  表示与距离相关的衰减因子， $s(t)$  表示探测信号波形。在近场假设下，即满足  $L < l^2/\lambda$  条件时，距离衰减因子  $\alpha_L \propto 1/L$ ，时延参量表示为  $\tau(x, y) = \sqrt{(x - L \cos \theta)^2 + (y - L \sin \theta)^2}$ ；在远场假设下，即满足  $L \gg l^2/\lambda$  条件时，距离衰减因子  $\alpha_L \propto 1/\sqrt{L}$ ，时延参量表示为  $\tau(x, y) = L - x \cos \theta - y \sin \theta$ 。

## 2 投影层析的基本原理

### 2.1 投影-切片定理

投影-切片定理是投影层析方法的一个基本应用定理，形象地反映了层析的基本概念，其含义就是投影通过傅里叶变换构建为所谓的切片，切片集合与原函数的傅里叶变换之间构成等价关系<sup>[3]</sup>。

投影切片定理的一般描述：若将角度  $\theta$  上投影  $p_\theta(t)$  的一维傅里叶变换  $P_\theta(f)$  称作为该角度的切片，则其与原函数  $\rho(x, y)$  的二维傅里叶变换  $\psi(f_x, f_y)$  之间的关系表示为： $P_\theta(f) = \psi(f_x, f_y)$ 。在信号处理语境上，每一次投影采集得到的是回波

中的波前信息，与时域波形的傅里叶变换对应，切片就是波前的谱，即将高维的波前等效地通过低维的切片进行表征。

由上述可知，通过完备切片重构被投影的二维像可以表示为：

$$\rho(x, y) = \int_0^\pi \int_{-\infty}^\infty P_\theta(f) e^{j2\pi f(x \cos \theta + y \sin \theta)} |f| df d\theta \quad (2)$$

在数学上，投影切片定理是 Radon 变换和傅里叶变换两个重要的数学工具的集成体现<sup>[4]</sup>，可以通过图 2 说明投影-切片定理的基本含义。

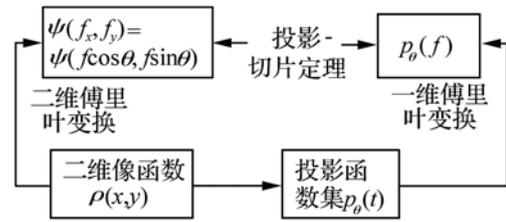


图 2 投影-切片定理示意图

Fig.2 Schematic diagram of projection-slice theorem

由投影-切片定理可以推导出最常见的重构算法就是滤波背投影算法，该算法可以简单地通过如下两部操作来实现：

$$g_\theta(t) = \int_{-\infty}^\infty |f| P_\theta(f) e^{j2\pi ft} df \quad (3)$$

$$\psi(x, y) = \int_0^\pi g_\theta(x \cos \theta + y \sin \theta) d\theta \quad (4)$$

式(3)描述的过程可以看作是滤波的形式，即：

$$g_\theta(t) = h(t) * p_\theta(t) \leftrightarrow G_\theta(f) = H(f) P_\theta(f) \quad (5)$$

其中： $h(t)$  表示滤波器响应函数，也可称为重构核的函数；其时域及频域表达分别为  $h(t) = -\frac{1}{2}(\pi t)^{-2}$ ； $H(f) = |f|, |f| \leq B$ 。

### 2.2 与常规主动声呐探测的区别

传统的主动声呐探测方法中，提取的是接收回波中包含目标相对于接收阵的相对距离与方位角，没有将观察过程中不同视角的数据结合起来，因而投影层析方法在处理的信噪比增益和可分辨的目标数目上都比传统的主动声呐探测方法性能优越。

传统主动声呐的算法描述为匹配滤波与多波束波束形成的结合，其处理增益主要为发射信号的时间-带宽增益  $G_{bt} = 10 \lg(BT)$  和波束形成处理的阵增益，对于均匀线阵  $G_a = 10 \lg N$ ，其中  $B$ 、 $T$ 、 $N$  分别表示为发射信号带宽、脉宽及阵元数目，理论上最大可分辨的目标数目应小于阵元数目。投影-层析方法是在这两部处理的基础上，对不同视角的处理结果通过滤波背投影算法进行重构，引入了空间相干处理增益，同时可分辨的目标数目得到了成倍

的提高,理论上,可分辨目标数目为  $n=N^*(\varphi/w_b)$ , 其中  $\varphi$  表示投影-层析扫描角度,  $w_b$  表示波束响应的主瓣宽度。

### 3 投影层析系统简述

声在介质中传播会因为介质的特性而产生相应的物理现象<sup>[5]</sup>。对于波长为  $\lambda$  的声波,在传播路径上遇到目标障碍时,当目标的均匀尺度  $d > \lambda$  时,主要产生声反射特性,且反射强度受目标介质反射与吸收系数影响。当介质界面相对于波长具有明显的非均匀时,会产生不同角度的散射回波,当波长  $\lambda \gg d$  时,声波会穿透目标障碍形成绕射波,也称之为衍射现象。所以基于不同类型的目标对象,首先需要考虑与波长对应的探查波频率,依据不同介质对不同波长的散射系数和吸收系数差异,可以通过间隔一定时延发射不同中心频率的脉冲串信号,得到针对不同波长段的相应介质的较强的回波,从而可以进一步分析目标的介质特性。

在确定了发射信号的中心频率前提下,还需要考虑带宽对时延分辨力的影响,因为时延直接与目标距离和方位分辨特性相关。对于某个信号波形  $s(t)$  及其 Chirp 波形  $s(t)e^{j2\pi\alpha t^2}$ , 由 Gabor 参量的分辨力度量准则,两类信号的时延分辨力与 Gabor 带宽  $B_G$  和 Gabor 时宽  $T_G$  的关系分别为<sup>[1]</sup>:

$$\Delta\tau_1 = \frac{1}{B_G}; \quad \Delta\tau_2 = \frac{1}{\sqrt{B_G^2 + \alpha^2 T_G^2}} \quad (6)$$

除此之外,波形和波前的采集均需要满足 Nyquist 采样准则实现。在处理流程上,首先要设定被观察区域,通过一次照射投影后,截取相应的回波信号,进行波束形成和脉冲压缩处理;同时,为了提高时延分辨的可靠性和噪声抑制效果,可以引入时延参量的非相干估计方法或者相位恢复方法<sup>[6]</sup>(例如,维纳滤波解卷算法)。在此基础上,对滤波后的输出进行傅里叶变换得到相应的切片,再通过投影-切片定理将各个切片重构出指定观察区域的像。

投影层析方法的实现流程示意图如图 3 所示。

### 4 仿真分析

本文分别对分布离散性的点目标和连续性的目标体进行投影层析方法目标成像的仿真,被观察的区域二维尺度均为  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ ,且均通过三种不同的观测角度范围来进行比较,投影的角度间隔均为  $1^\circ$ ,第一种观测方式为理想的全视角投影,第

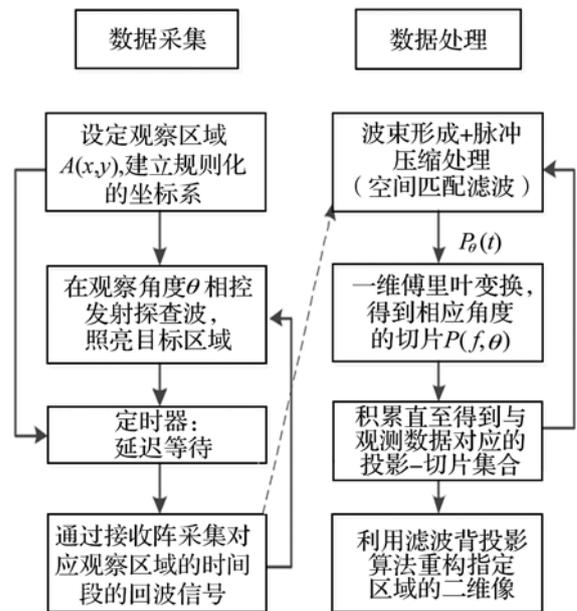
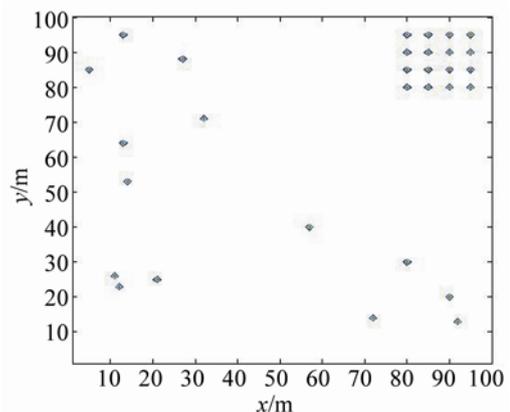


图 3 投影层析方法的流程示意图  
Fig.3 Flow-process diagram of projection tomography method

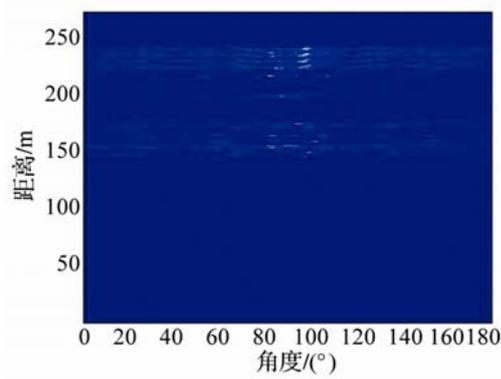
二种和第三种为沿直线运动轨迹的多角度投影,对应的有效投影角度范围分别是  $-60^\circ \sim 60^\circ$ 、 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 。在仿真中,设定的探测脉冲信号为线性调频脉冲,中心频率为  $30\text{ kHz}$ ,带宽为  $6\text{ kHz}$ ,脉宽为  $6\text{ ms}$ ;接收信号的采样率为  $100\text{ kHz}$ ;不考虑环境中的波导多路径效应;背景为均匀各向同性白高斯噪声。

图 4 和图 5 分别给出了情景中分布性离散目标和连续目标的仿真结果。

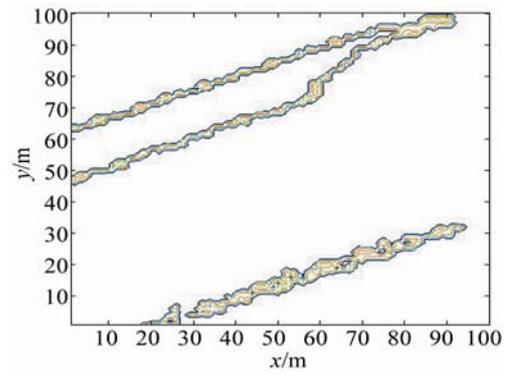
图 4(a)和图 5(a)分别为仿真设定的被观察区域的实际目标;图 4(b)和图 5(b)分别为目标区域在接收阵正横方向上,通过传统的主动声呐探测方法处理出的结果,与通过投影层析方法处理出的结果图 4(c)和图 5(c)类比,不难发现投影层析相对于传统的主动探测处理具有高可靠分辨的优势;图 4(c)和图 5(c)分别对被观察区域,由收-发共置阵在  $-180^\circ$



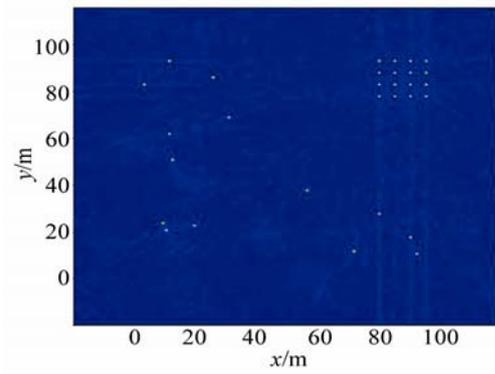
(a) 指定观察区域实际的离散分布性目标



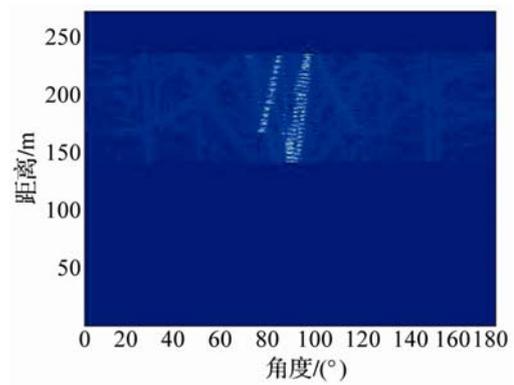
(b) 正横方向上传统主动声呐探测结果



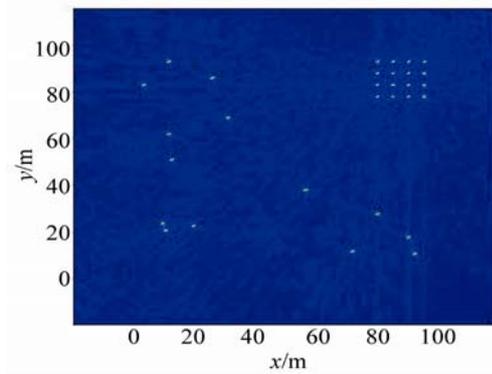
(a) 指定观察区域实际的连续目标



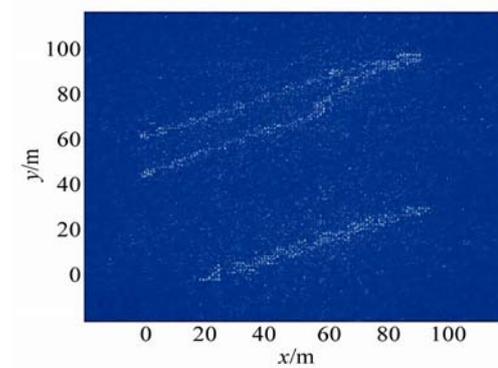
(c) 在±180°角度范围扫描的投影层析成像结果



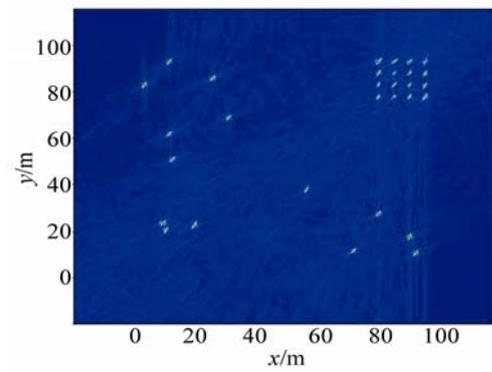
(b) 正横方向上传统主动声呐探测结果



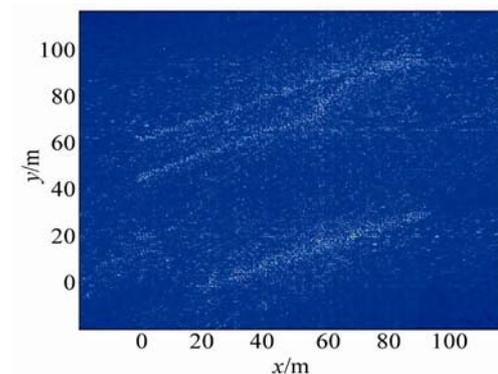
(d) 在±60°角度范围扫描的投影层析成像结果



(c) 在±180°角度范围扫描的投影层析成像结果



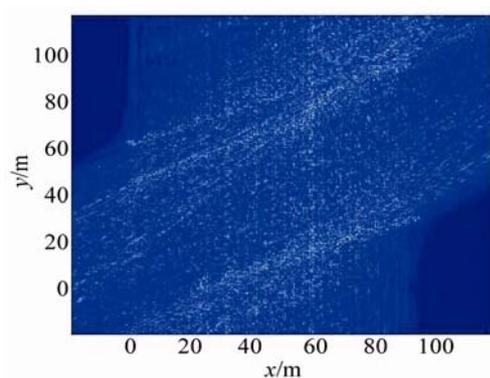
(e) 在±30°角度范围扫描的投影层析成像结果



(d) 在±160°角度范围扫描的投影层析成像结果

图 4 对于离散分布性目标，通过投影层析方法重构得到的被观察区域目标的像

Fig.4 For discrete distributional targets, the images of the targets reconstructed by the projection tomography method in different observed areas



(e) 在 $\pm 30^\circ$ 角度范围扫描的投影层析成像结果

图 5 对于连续的目标体, 通过投影层析方法重构得到的被观察区域目标的像.

Fig.5 For continuous target, the images of the targets reconstructed by the projection tomography method in different observed areas

$\sim 180^\circ$  角度环绕目标区域扫描得到的数据, 扫描半径为 500 m, 通过投影层析重构算法得到的成像结果; 图 4(d)和图 5(d)分别给出了对被观察区域, 收发共置阵沿直线轨迹运动过程中对目标区域扫描, 有效扫描角度为  $-60^\circ \sim 60^\circ$ , 且最近观察距离为 500 m, 通过投影层析重构算法得到的成像结果; 图 4(e)和图 5(e)分别给出了对被观察区域, 收发共置阵沿直线轨迹运动过程中对目标区域扫描, 有效扫描角度为  $-30^\circ \sim 30^\circ$ , 且最近观察距离为 500 m, 通过投影层析重构算法得到的成像结果。

由图 4 和图 5 仿真比较可知, 无论是针对离散点目标还是连续的目标体, 投影层析方法均能重构出对应目标的像, 但会存在一定的模糊, 这也与投影的角度范围有关, 投影角度范围越充分, 像的模糊越低。同时, 对比图 4 (d)和图 5(d), 均在相对不充分的角度范围的投影下的两种情形, 具有稀疏特

性的离散点目标像的可分辨效果比连续目标像的分辨效果好, 可以由此推断利用目标分布的稀疏特性可以适当地降低观测数据的冗余度。

## 5 小 结

本文利用投影层析方法对指定区域的目标进行成像探测, 介绍了相应的观测方式与实现的条件, 给出了基本的处理算法和处理流程, 通过仿真验证了不同扫描角度下的投影层析方法对指定区域反射性目标探测的可行性。该方法对于实际中的探测问题, 如掩埋目标探测和声场介质分析等, 具有一定的参考性和应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Richard E. Blahut. Theory of Remote Image Formation[M]. New York: Cambridge, 2004.
- [2] Chu Dezhang, Tang Dajun, Thomas C Austin, et al. Fine-Scale acoustic tomographic imaging of shallow water sediments[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, 26(1): 70-83.
- [3] Brian G Ferguson, Ron J Wyber. Mapping the acoustic reflectivity of underwater objects using reconstructive tomography[C]//IEEE Conference Publications, OCEANS 2008. Signal Processing, 2005, 85: 873-874.
- [4] Brian G Ferguson, Ron J Wyber. Generalized framework for real aperture, synthetic aperture, and tomographic sonar imaging[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2009, 34(3): 225-238.
- [5] 张嫦娥. 不同声反射体的声学后向散射特性的实验研究[J]. 海洋技术, 1990, 9(4): 12-26.  
ZHANG Change. The experimental study of acoustic scattering characteristics of different sound reflector[J]. Ocean Technology, 1990, 9(4): 12-26.
- [6] Frey O, Meier E. Combining time-domain back-projection and capon beamforming for tomographic SAR processing[C]//IGARSS 2008, 2008.