

对无临近点信息干涉条纹的参数估计

王 超, 王忠康

(杭州应用声学研究所, 浙江杭州 310023)

摘要: 用广义 radon 变换可以从运动目标产生的干涉条纹中估计出目标的运动参数和波导不变量。但是当干涉条纹中没有出现临近点时, 用此方法估计不出真实值。为了解决此问题, 提出了一种新的估计方法。主要过程是先从时频图中提取出干涉条纹轨迹, 再去搜索与此轨迹误差最小的最优曲线, 此曲线的参数值代表目标的运动参数和波导不变量。仿真和海试结果表明, 在干涉条纹无临近点信息情况下, 用广义 radon 变换估计的参数值与真实值偏差很大, 但是文中提出的方法仍能估计出较准确的结果。

关键词: 干涉条纹; 无临近点信息; 广义 radon 变换; 宽容性参数估计; 波导不变量

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2016)-02-0162-05

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2016.02.014

Parameter estimation from interference striations under no information on the most approaching point

WANG Chao, WANG Zhong-kang

(Hangzhou Applied Acoustic Institute, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: An interference structure can be observed in low frequency continuous spectral sound field. The interference striations are a set of quasi hyperbolas as the source goes through the receiving hydrophone. The motion parameter of the source and the waveguide invariant can be estimated by using generalized radon transforms. The vertex of the quasi hyperbola represents the closest distance between source and receiving hydrophone, and the vertex is called the most approaching point (MAP). The generalized radon transforms need the vertex information, namely t_0 and f_0 (t_0 is the time of the target arriving at MAP and f_0 is the corresponding frequency at the quasi hyperbolas vertex). Without the vertex information, the estimation error is large. This paper presents a new way to estimate parameters under no information on MAP. In this way, the trajectory of the interference striation is first extracted for subsequently searching out the optimal parameter values. The error can be represented by a tolerance cost function. The simulation and sea-trial results show that this method can get an accurate result of parameter estimation under no information on the most approaching point.

Key words: interference striation; without the information of MAP; generalized radon transforms; robust parameter estimation; waveguide invariant

0 引言

低频声场中存在稳定的干涉结构, 并且随着频率的改变干涉结构中的极值会产生偏移, 这个在距离 r 上的偏移量和频率 ω 的关系可以用波导不变量 β 来描述, 即用 β 来描述 $r-\omega$ 域干涉条纹的斜率^[1]。虽然 β 的值随着海洋环境的改变而变化, 但是在大部分浅水波导环境中 β 可以近似为 1^[2]。

对于运动目标(假设目标做匀速直线运动), 它到接收水听器的距离一直在变化, 所以其辐射的宽

带噪声中能观察到倾斜的干涉条纹。而对接收数据进行分析, 只能得到信号的时频域 $t-\omega$ 信息, 但由于运动目标的距离随时间变化, 所以 $r-\omega$ 域与 $t-\omega$ 域相关联, 它们的关系由声源相对于接收水听器的相对速度决定。如果运动目标的轨迹经过接收水听器, 那么其在时频域的干涉条纹是一族类双曲线。这些曲线中包含有波导不变量 β 、 r_0/v (r_0 为目标最近通过距离, v 为目标航向速度)、 t_0 (t_0 为目标到达临近点的时间)等信息。其中若 r_0/v 已知, 就可以求得声源的距离和速度^[3-4], 准确的 r_0/v 值对于速度和距离求解十分重要。图 1 是用海试数据处理以后得到的时频图(LOFAR), 从中可以看到清晰的类双曲线干涉条纹。而双曲线顶点对应的的时间就是目标离接收点最近的时间。

文献[1]中已指出用广义 radon 变换可以提取出上述信息。但是如果时频图中没有完整的干涉条

收稿日期: 2015-09-25; 修回日期: 2015-12-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2011AA09A107)

作者简介: 王超(1989-), 男, 河南三门峡人, 硕士研究生, 研究方向为水声信号处理。

通讯作者: 王超, E-mail: wangchaochim@foxmail.com

纹，即在已有的信号接收时间内，目标一直在靠近或者远离接收水听器，并没有经过它。此时直接用广义 radon 变换进行分析效果会变得很差，本文提出了一种方法可以在很大程度上减小误差，从没有顶点信息的干涉条纹中提取参数，并进行了仿真和海试分析。

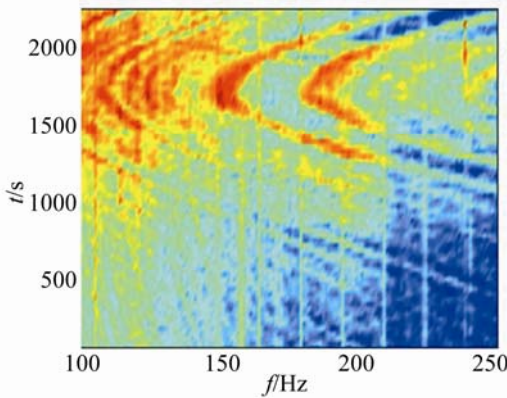


图 1 目标的干涉结构
Fig.1 The interference structure of target

1 运动目标的干涉条纹分析

先建立一个运动模型，假设目标做匀速直线运动。接收水听器位于坐标原点。目标运动过程中辐射宽带连续谱信号，其线速度为 v ，最近通过距离为 r_0 ，最近通过时刻为 t_0 ，其航迹几何关系如图 2 所示。

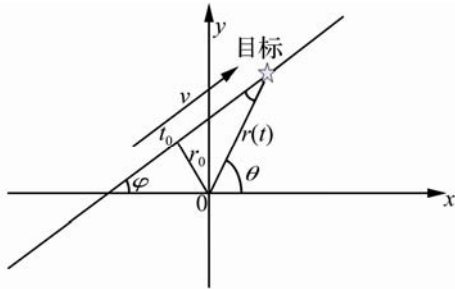


图 2 目标运动轨迹示意图
Fig.2 Target trajectory

由几何关系可知目标运动轨迹方程为：

$$r(t) = \sqrt{v^2 \tau^2 + r_0^2}, \quad \tau = t - t_0 \tag{1}$$

由式(1)可得

$$\frac{dr}{d\tau} = \frac{v^2 \tau}{\sqrt{v^2 \tau^2 + r_0^2}} \tag{2}$$

因为干涉条纹的斜率为 $\frac{df}{d\tau} = \frac{df}{dr} \cdot \frac{dr}{d\tau}$ ，将式(2)

代入到波导不变量的定义式 $\beta = \frac{r}{w} \frac{dw}{dr}$ 中，得到

$$\frac{df}{f} = \frac{\beta v^2 \tau}{v^2 \tau^2 + r_0^2} d\tau \tag{3}$$

两边积分，整理得

$$\left(\frac{f}{f_0}\right)^{2/\beta} - \left(\frac{\tau}{r_0/v}\right)^2 = 1 \tag{4}$$

式(4)即为时频图上干涉的轨迹方程。当 $\beta \approx 1$ 时，它可简化为一个标准的双曲线方程^[3]。如果观察时间内声源没有到达临近点或者从开始观察时已经开始远离临近点，此时干涉条纹中的类双曲线观察不到顶点。

广义 radon 变换可以检测图像中的任意曲线。它是将图像空间中同一曲线上的点映射到参数空间交于一点的一族曲线，交点的位置反映了图像空间该曲线的参数^[4]。图 1 所示图像中亮纹的集合表示为：

$$g((t_0, f_0, \beta, r_0/v), (t, f)) = 0 \tag{5}$$

其中： (t, f) 表示曲线上点在图像空间中的坐标，而 $(t_0, f_0, \beta, r_0/v)$ 为决定曲线的参数。则图像空间中曲线上任意点 (t', f') 映射到参数空间上的某一曲线 $g((t', f'), (t_0, f_0, \beta, r_0/v)) = 0$ ，而图像空间中该曲线上的所有点映射到参数空间上为交于 $(t_0, f_0, \beta, r_0/v)$ 点的一族曲线。参数空间中每一点 $(t_0, f_0, \beta, r_0/v)$ 处的强度，是所有图像空间中参数为 $(t_0, f_0, \beta, r_0/v)$ 的点的强度累加和。

对于图 1 所示的图像， (t_0, f_0) 就是类双曲线的顶点，可以从图像中直接读出。这样图 1 中的参数就只有 $(\beta, r_0/v)$ ，此时用广义 radon 变换就能得到较满意的结果。但是如果类双曲线不完整，即 (t_0, f_0) 未知，就要估计四个参数，此时带来的影响不仅仅是运算量的增加，估计结果的误差也会大大增加。对图 1 进行广义 radon 变换，如果干涉条纹完整估计的结果是 $\beta=1.05, r_0/v=525$ ，从波导不变量的估计值就可以看出此估计结果较为准确，但是如果只取图 1 中 1440 s 之内的数据进行估计，得到的结果为 $\beta=1.4, r_0/v=227.5$ ，此结果已经不符合实际情况。所以需要寻找新的方法来估计参数。

2 无临近点干涉条纹参数估计

运动目标产生的类双曲线条纹对应的参数 $(t_0, \beta, r_0/v)$ 与目标的运动参数和海洋环境有关，是不变的， f_0 的不同值形成了图 1 中所示的多条双曲线。即一组参数 $(t_0, f_0, \beta, r_0/v)$ 只对应一条亮纹。上面讲的广义 radon 变换在求一组参数时将时频图上所有点都进行了分析，这同时增加了计算量和误

差。由于类双曲线较为明显，可以先把某条干涉亮纹提取出来，再求解这条亮纹对应的参数，这样就可以减少由于考虑无关点所带来的计算量和误差。下面提出了一种针对于无临近点信息干涉条纹的参数估计方法。首先对接收信号做时频分析得到数据的时频图，然后去除掉无关点得到某条亮纹，再把这条亮纹转化为关于 (t, f) 的曲线，接着对参数值进行搜索，每一组参数值都对应一条 (t, f) 的线，与由亮纹提取出的线最相似的那条线对应的参数值就是估计的参数值。可以构造一个代价函数来判断其相似程度。在搜索过程中利用亮纹的某些特性进行剪枝，减小运算量。该过程的示意图如图 3 所示。

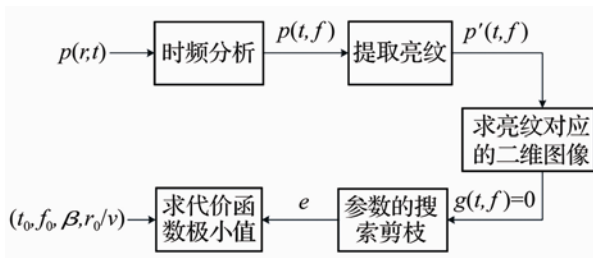


图 3 处理流程图
Fig.3 Flow chart of feature extraction

下面以海试数据图 1 为例分析以上过程，假设只有图 1 中 1440 s 以内的数据，并且分析的频率段在 50~200 Hz 之间。经时频分析求出接收信号的时频图如图 4 所示，提取出 77 Hz 对应的亮纹，结果如图 5 所示。

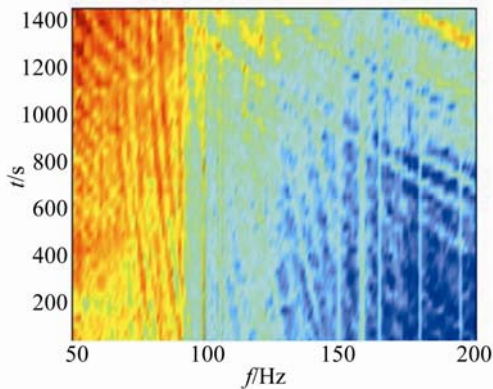


图 4 取自图 1 中 1440 s 以内数据的时频图
Fig.4 LOFAR gram within 1440 seconds from Fig.1

接下来要从提取出的亮纹中找到 (t, f) 的关系，即确定曲线 $g(t, f)=0$ ；这条线在后面参数搜索时使用。由公式(5)可知每一组参数对应一条线，跟 $g(t, f)=0$ 最相似的那条线对应的参数就是所要估计的参数值。这里考虑宽容性，即由亮纹提取的不是一条直线，而是一个区间(如图 6 所示)。

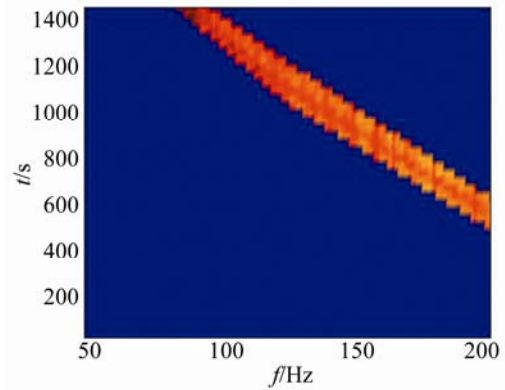


图 5 对应于 77 Hz 的干涉亮纹
Fig.5 The interference striations corresponding to 77 Hz

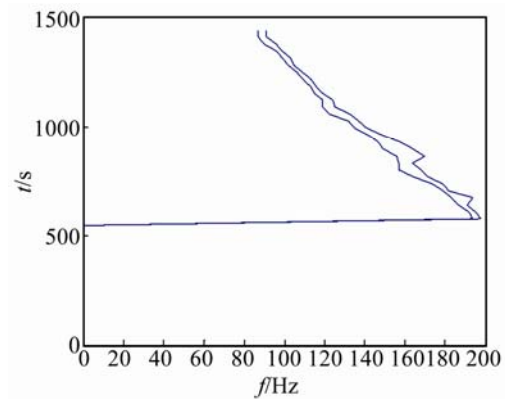


图 6 亮纹对应的二维区间
Fig.6 The corresponding interval of interference striations

在参数估计过程中，只要估计的参数值处于图 6 所示的限定区间之内都认为是合理的。超出限定区间的部分被认为是误差 ε ^[5]。下面考虑用二次代价函数，即 $R(\varepsilon)=\varepsilon^2$ ，误差 ε 可表示为

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} 0 & f' \in [f_{\min}, f_{\max}] \\ \min(|f' - f_{\min}|, |f_{\max} - f'|) & f' \notin [f_{\min}, f_{\max}] \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中 f_{\min} 、 f_{\max} 是在 t 时刻由亮纹提取的关于 f 区间的最小值和最大值， f' 是由式(7)

$$g' \left(\left(t_0', f_0', \beta', \frac{r_0'}{v} \right)', (t, f) \right) = 0 \quad (7)$$

确定的 f ， $(t_0', f_0', \beta', (r_0'/v)')$ 是待估计的参数。

为了减小搜索过程的运算量和误差，可先根据条纹线的特性在搜索过程进行剪枝筛选。若由搜索参数值 $(t_0', f_0', \beta', (r_0'/v)')$ 确定的线不满足条纹特性，就不再计算该搜索值对应的误差，直接认为这组参数不是真实值。亮纹的产生是由于目标运动导致不同时刻声源与接收点距离发生改变而产生的。当目标按图 2 所示的轨迹运动，且 $r_0 \neq 0$ ，目标由远及近向接收点运动时，它的距离变化率一直在减少，即相对速度减小。此时反映在干涉条纹上就是条纹斜率的绝对值一直在减小，也就是说干涉条纹对应的

函数是个下凸函数。所以用式(8)来对搜索线进行筛选：

$$\frac{g'(t(1))+g'(t(end))}{2} > g'\left(t\left(\frac{1+end}{2}\right)\right) \quad (8)$$

其中 $f=g'(t)$ ，是由 $(t_0', f_0', \beta', (r_0/v)')$ 确定的函数。

对所有的参数值筛选结束以后就得到一个误差函数 $R(t_0', f_0', \beta', (r_0/v)')$ 。由式(9)来确定待估计的参数：

$$\{t_0, f_0, \beta, r_0/v\} = \arg \min R(t_0', f_0', \beta', r_0/v') \quad (9)$$

3 仿真和海试结果分析

由于处理的频带是 300 Hz 以下的低频目标，仿真过程中用 kraken 模型计算出运动目标的接收信息，然后用第 2 节所示的方法进行处理。具体的仿真环境为等声速波导，声速为 1525 m/s，深度为 100 m；采用粗粒砂底，具体参数为：底部声速 1836 m/s，密度 $\rho_b=2034 \text{ kg/m}^3$ ，底部损失 $\alpha_b=0.479 \text{ dB}/\lambda$ ；收发设备分别在 80 m 和 40 m。目标的运动模型如图 2 所示，其速度 $v=2.5 \text{ m/s}$ ，最近距离 $r_0=1250 \text{ m}$ ，最近通过时间 $t_0=1728 \text{ s}$ 。此环境下 $\beta=1$ ， $r_0/v=500$ 。考虑 50~300 Hz 这一频段内的数据。时频图如图 7 所示。

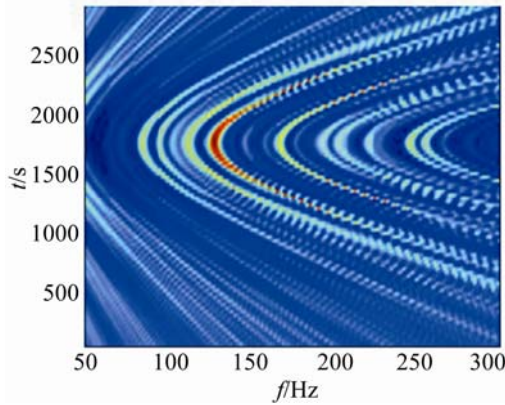


图 7 测试目标的 LOFAR 图
Fig.7 LOFAR gram of the test target

首先对有完整干涉条纹的情况用广义 radon 变换进行分析，其中 (t_0, f_0) 为亮纹顶点，是已知的，主要估计参数为 β 、 r_0/v 。估计结果如图 8 所示。

图 8 中椭圆标明的地方为最大值，其对应的估计结果为 $\beta=1$ ， $r_0/v=537.5$ ，此结果与真实值接近。左上角无值区域表示此参数对应的 $g(t, f)=0$ 不在 (t, f) 的已知范围之内。

接下来分析没有亮纹顶点信息时的参数提取，图 9 即为要处理的时频图，它只有 1440 s 以内的数据。

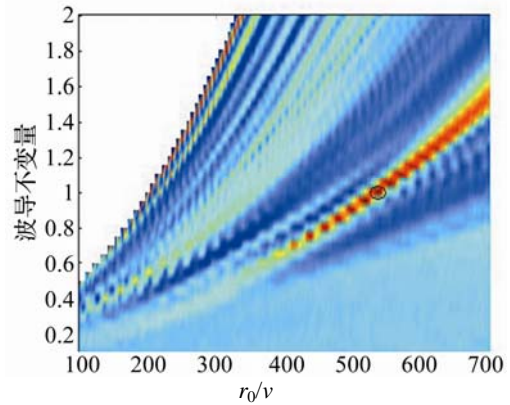


图 8 广义 radon 变换的估计结果
Fig.8 The result using generalized radon transforms

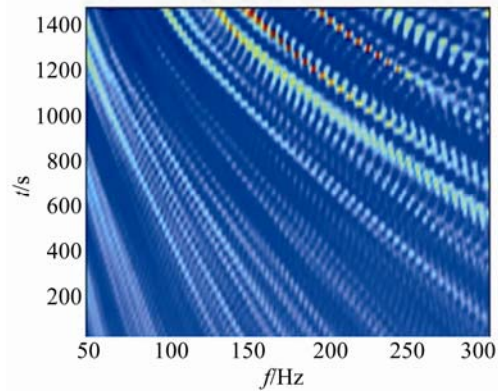


图 9 取自于图 7 中 1440s 以内数据时频图
Fig.9 LOFAR gram within 1440 seconds from Fig.7

直接用广义 radon 变化来求解， β 、 r_0/v 、 t_0 、 f_0 的搜索区间分别为 $[0,2]$ 、 $[100,700]$ 、 $[1500,2000]$ 、 $[150,180]$ 。得到的结果为 $\beta'=1.95$ ， $r_0/v'=120$ ， $t_0'=1500 \text{ s}$ ， $f_0'=154 \text{ Hz}$ 。与真实值相差较远。

然后用第 2 节提到的方法来进行分析，首先提取出亮纹，如图 10 所示，这里选择的是顶点频率在 129 Hz 的亮纹，然后提取出此亮纹所对应的 (t, f) 区间，结果如图 11 所示。

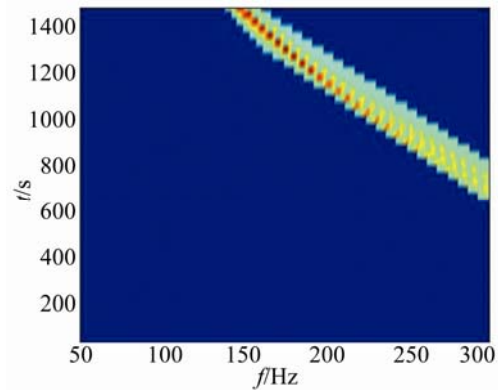


图 10 提取顶点频率为 129 Hz 的亮纹
Fig.10 The interference striations corresponding to the vortex frequency of 129 Hz

估计过程中因为考虑了宽容性处理,用一条亮纹进行分析时,误差最小得到的结果可能有很多组不同参数值都对应着最小误差,此时考虑再找一条或多条亮纹进行分析,然后找出结果中 $(t_0, \beta, r_0/v)$ 出现次数最多的一组,作为估计的结果。本文考虑了 168 Hz, 113 Hz 两条亮纹,最后得到的结果为 $\beta'=1$, $r_0/v'=495$, $t_0'=1660$ s。此结果与真实值相比已相当准确。

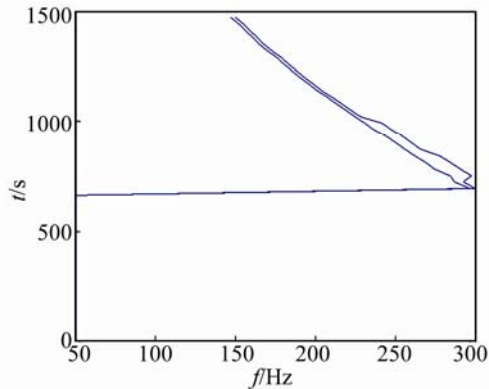


图 11 亮纹对应的二维区间

Fig.11 The corresponding interval of interference striations

用海试数据进行分析,对图 1 所示的干涉条纹,直接用广义 radon 变换进行分析,此时 t_0 和 f_0 已知, t_0 为 1728 s, f_0 为{77, 95, 109, 125, 153, 184}Hz,对 β 在区间[0, 2]内搜索, r_0/v 的搜索范围在[100, 1500]之间。对 f_0 为不同值的结果进行求和便可得到估计的参数值。具体结果为 $\beta=1.05$, $r_0/v=525$, β 的值符合浅海波导的理论值,所以此估计结果较为准确。分析不完整的干涉条纹,即如图 4 所示, t_0 、 f_0 的搜索区间分别为[1500, 2000]、[60, 90]。用广义 radon 变换得到的结果为 $t_0=1900$ s, $f_0=62$ Hz, $\beta=1.4$, $r_0/v=227.5$,此结果明显误差较大。

下面用第 2 节提出的方法来分析,具体的过程

图 4~6 所示,这里选用顶点频率为 77 Hz 的那条亮纹,估计出的结果为 $t_0=1700$ s, $f_0=76$ Hz, $\beta=1$, $r_0/v=470$ 。此结果中 (t_0, f_0, β) 与真实值较为接近, r_0/v 与有顶点信息的估计结果相近,此结果可以接受。

4 总结

本文提出了一种针对干涉条纹的参数估计方法。文中先详细介绍了运动目标产生干涉条纹的原理,并指出用广义 radon 变换来分析干涉条纹中包含的运动参数信息。但是当干涉条纹不完整时,用此方法分析误差较大。本文方法先提取出要分析的亮纹,然后构造一个代价函数,再利用干涉条纹的下凸特性进行剪枝搜索,搜索得到的最优解代表目标的运动参数和波导不变量。在干涉条纹无临近点信息时,此方法与广义 radon 变换进行对比可很大程度上减小误差。仿真和海试都验证验证了此方法的可行性。

参 考 文 献

- [1] Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, et al. Computational ocean acoustics[M]. 2nd ed. New York, 2011.
- [2] Cockrell K L. Understanding and utilizing waveguide invariant range-frequency striations in ocean acoustic waveguides[D]. Massachusetts Institute of Technology, 2011.
- [3] 余赞, 惠俊英, 赵安邦, 等. 波导不变量及双阵元被动测距方法研究[J]. 兵工学报, 2011, 32(3): 274-280.
YU Yun, HUI Junying, ZHAO An-bang, et al. Waveguide Invariant and Passive Ranging Using Double Elements[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(3): 274-280.
- [4] Turgut A, Rouseff D. Broadband source localization using horizontal-beam acoustic intensity striations[J]. J Acoust Soc Am, 2010, 127(1): 73-83.
- [5] Kay S M. Fundamentals of statistical signal processing: estimation theory[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1993.