引用格式：杜方键，张永峰，张志正，等. 基于时延优化的三维成像声呐视野展宽方法研究[J]. 声学技术，2020，**39**(6): 758-762. [DU Fangjian, ZHANG Yongfeng, ZHANG Zhizheng, et al. Delay optimization based visual field broadening method for 3D imaging sonar[J]. Technical Acoustics, **39**(6): 758-762.] **DOI**: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2020.06.017

# 基于时延优化的三维成像声呐视野展宽方法研究

杜方键[1,2]，张永峰[1,2]，张志正[1,2]，郭小飞[3]

(1. 中国电子科技集团公司第二十七研究所，河南郑州 450047；2. 郑州市水下信息系统技术重点实验室，河南郑州 450047；
3. 郑州宇通客车股份有限公司，河南郑州 450047)

**摘要：**针对平面阵，研究并探讨了一种近场聚焦波束形成中时延参数的优化方法，以扩大三维成像声呐的有效视野范围。该方法是在方位角和俯仰角重新定义时，将精确的近场时延表达式按泰勒公式展开，取前三项，并对每一项进行加权。然后，通过求三个加权系数的偏导，再令其等于 0，得出最优加权系数，此时优化的时延表达式与精确的近场时延表达式的误差最小，即优化的时延表达式更接近于精确的时延表达式，能够有效地用于扩大成像声呐的有效视野。最后，通过计算机仿真验证了该方法的有效性。

**关键词：**成像声呐；有效视野；时延参数；最优加权系数

**中图分类号：**TB556 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-3630(2020)-06-0758-05

# Delay optimization based visual field broadening method for 3D imaging sonar

DU Fangjian[1,2], ZHANG Yongfeng[1,2], ZHANG Zhizheng[1,2], GUO Xiaofei[3]

(1. *The 27th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation*, *Zhengzhou* 450047, *Henan*, *China*; 2. *Zhengzhou Key Laboratory of Underwater Information System Technology*, *Zhengzhou* 450047, *Henan*, *China*; 3. *Zhengzhou Yutong Bus Co.,Ltd.*, *Zhengzhou* 450047, *Henan*, *China*)

**Abstract:** A delay optimization design method for near-field focused beamforming is studied to broaden the visual field of the three dimensional imaging sonar with a planar array. In this method, the first three terms in the Taylor series of the exact near-field delay expression are selected and weighted under the new definitions of the azimuth and pitching angles. By setting the partial derivatives of the three weighting coefficients equal to zero, the optimum weighting coefficients can be obtained. Therefore, the difference between the delay expression of the three weighted terms with optimum weighting coefficients and the exact near-field delay expression is minimal. In other words, the delay expressed by the three weighted terms with optimum weighting coefficients is very close to the exact near-field delay, which can be used effectively to broaden the visual field of imaging sonar. Finally, simulation for a planar array is conducted to verify the effectiveness of the proposed method in this paper.

**Key words:** imaging sonar; visual field; delay expression; optimum weighting coefficient

## 0 引 言

水下声成像技术在水下探测尤其是海底测绘、海底物体探测与识别的应用中发挥着重要作用，具有广泛的应用前景。早期的二维成像声呐[1]仅能提供二维信息[2]，随着地形勘探、结构检查、物体测量等水下业务的迅速拓展，对立体、精细的水下成像需求愈发迫切，推动了水下三维成像技术[3]的发展进步。水下三维成像技术可快速生成水下地形、结构、物体的三维高分辨率图像，提供直观丰富的细节描述。三维成像分为近场与远场两种情形。远场条件下，波束形成的时延参数容易准确计算出来；而近场条件下，必须考虑波前弯曲程度，需要对波束形成进行聚焦处理。近场条件下，我们一般使用一种近似时延方法，通常情况下采用菲涅耳近似(Fresnel approximation)[4-5]，但是 Lawrence J. Ziomek 指出，使用菲涅耳近似必须满足三个条件[6]，其中第一个条件就是限制成像声呐的有效视野范围：$|\theta|\leqslant 18°$，这在很大程度上减小了声呐成像的效率。随着成像声呐技术的迅速发展，Andrea Trucco 在 1997 年提出了一种基于菲涅耳近似的最小二乘近似[7]。该方法的核心是将菲涅耳近似的时延表达式进行加权，应用在线列阵中的确扩大了成像的有效视野范围，但该方法是否同样适用其它阵形的成像声呐，还需进一步研究。

**收稿日期：**2019-08-28；**修回日期：**2019-11-07
**作者简介：**杜方键(1987－)，男，河南固始人，硕士，工程师，研究方向为目标检测识别与信息平台总体研究。
**通讯作者：**杜方键，E-mail: dufj2843@163.com

本文针对平面阵近场聚焦波束形成[8-9]，研究并探讨了一种时延优化方法。该方法是在方位角和俯仰角的重新定义下，将准确的时延表达式按泰勒公式展开，取前三项，并对每一项进行加权；然后，通过求三个加权系数的偏导，再令其等于零，求出最优加权系数，此时优化的时延表达式与准确时延表达式的误差最小。优化的时延表达式不仅扩大了成像声呐的有效视野范围，而且更接近于准确的时延表达式。最后，通过计算机仿真验证了本文方法的优越性。

## 1　平面阵的聚焦波束形成

平面阵的布放结构如图 1 所示。假设有 $M\times N$ 个阵元组成的平面阵放置于 $z=0$ 的平面，第 $(m,n)$ 号阵元的坐标可以表示成 $\boldsymbol{v}=(x_m,y_n,0)$，其中 $m=1,2,\cdots,M$，$n=1,2,\cdots,N$。

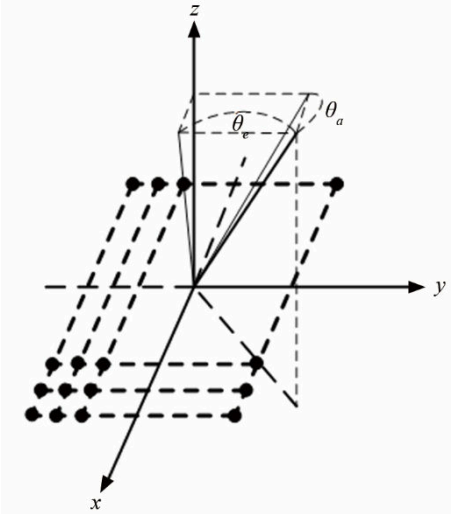



图 1　平面阵的布放结构
Fig.1　The layout of planar array

俯仰角 $\theta_e$ 与方位角 $\theta_a$ 的定义如图 1 所示，波束信号的方向向量可以表示为

$$\boldsymbol{u}=\left(\sin\theta_a,\sin\theta_e,\sqrt{\cos^2\theta_a-\sin^2\theta_e}\right) \tag{1}$$

则平面阵接收信号进行聚焦波束形成之后的输出可表示为

$$b(r_0,\boldsymbol{u},t)=\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M}w_{m,n}\cdot x_{m,n}[t-\tau(r_0,\boldsymbol{u},m,n)] \tag{2}$$

其中：$x_{m,n}(t)$ 是第 $(m,n)$ 号阵元接收到的时域信号；$w_{m,n}$ 是幅度加权值；$\tau(r_0,\boldsymbol{u},m,n)$ 表示第 $(m,n)$ 号阵元接收的距离为 $r_0$、波束方向为 $\boldsymbol{u}$ 的目标回波信号的时延。目标位于近场区域时，时延参数可以精确表示为

$$\tau_{\mathrm{ex}}(r_0,\boldsymbol{u},m,n)=(r_0-\sqrt{r_0^2+\|\boldsymbol{v}\|^2-2r_0\boldsymbol{u}\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}})/c \tag{3}$$

其中：$c$ 为声波传播速度，$\|\cdot\|^2$ 表示欧几里德范数。

由式(3)可知，在聚焦距离 $r_0$ 一定的情况下，第 $(m,n)$ 号阵元接收目标回波信号的时延参数就是关于扫描角的函数。而成像声呐需要较宽的有效视野范围，为此，设想构造一种方法可以优化时延参数，使扫描角得以展宽。

## 2　时延优化算法

当 $|b|<1$ 时，$\sqrt{1+b}$ 的泰勒展开式为

$$\sqrt{1+b}\approx 1+\frac{b}{2}-\frac{b^2}{8}+\cdots \tag{4}$$

令

$$b=\frac{\|\boldsymbol{v}\|^2-2r_0\boldsymbol{u}\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}}{r_0^2} \tag{5}$$

则精确的时延表达式可以展开为

$$\tau_{\mathrm{ex}}\approx\frac{\boldsymbol{u}\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}}{c}-\frac{\|\boldsymbol{v}\|^2}{2r_0c}+\frac{(\boldsymbol{u}\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}})^2}{2r_0c}-\frac{\|\boldsymbol{v}\|^2\cdot\boldsymbol{u}\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}}{2r_0^2c}+\frac{\|\boldsymbol{v}\|^4}{8r_0^3c} \tag{6}$$

在菲涅耳近似条件下，时延表达式可表示为

$$\tau_{\mathrm{Fr}}=\frac{\boldsymbol{u}\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}}{c}-\frac{\|\boldsymbol{v}\|^2}{2r_0c} \tag{7}$$

其中：下标 Fr 表示该时延表达式为菲涅耳近似表达式。Ziomek 给出了近场条件下，波束形成算法的菲涅耳近似时延表达式成立的三个必要条件，其中第一个条件是限制成像有效视野范围 $|\theta|\leqslant 18°$[6]。为了增大菲涅耳近似限定三维成像声呐的有效视野范围，在准确时延的泰勒展开表达式(6)和菲涅耳近似时延表达式(7)的基础上，采用一种优化的时延近似表达式[8-9]，如式(8)所示：

$$\tau_{\mathrm{TF}}=k_1\frac{\boldsymbol{u}\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}}{c}+k_2\frac{\|\boldsymbol{v}\|^2}{r_0c}+k_3\frac{(\boldsymbol{u}\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}})^2}{r_0c} \tag{8}$$

式(8)称之为 TF 近似，其中 TF 是 Taylor 和 Fresnel 的缩写，以区别于上述时延的准确表达式和菲涅耳近似表达式，$k_1,k_2,k_3$ 是用于扩大成像声呐有效视野范围的加权系数。当 $k_1=1,k_2=-0.5,k_3=0$ 时，式(8)就等同于时延参数的菲涅耳近似表达式；当 $k_1,k_2$ 为两个常数，$k_3=0$ 时，式(8)就是文献[7]提出的时延参数近似表达式。

## 3　时延表达式的最优化过程

首先，引入均方差(Mean Square Error, MSE)的概念。定义两种时延的均方差为

$$E_{\mathrm{MS\text{-}Fr}}=\frac{1}{MN}\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M}|\tau_{\mathrm{Fr}}-\tau_{\mathrm{ex}}|^2 \tag{9}$$

$$E_{\text{MS-TF}}=\frac{1}{MN}\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M}\left|\tau_{\text{TF}}-\tau_{\text{ex}}\right|^2 \tag{10}$$

对于 $\tau_{\text{TF}}$ 中的三个加权系数，若是能取到一组加权系数使得该时延更接近于准确时延，则 TF 近似时延表达式就是最优的时延表达式。对某一特定的成像声呐而言，它的阵元个数和阵元间距都是一定的，因此上式定义的均方误差就变成关于 $k_1,k_2,k_3$ 的函数。要使 $\tau_{\text{TF}}$ 最接近于准确时延 $\tau_{\text{ex}}$，即要使 $E_{\text{MS-TF}}$ 最小，则可以通过求偏导来获得最优 TF 近似时延下的 $k_1,k_2,k_3$ 的值：

$$\begin{cases}\dfrac{\partial E_{\text{MS-Fr}}(k_1,k_2,k_3)}{\partial k_1}=0\\ \dfrac{\partial E_{\text{MS-Fr}}(k_1,k_2,k_3)}{\partial k_2}=0\\ \dfrac{\partial E_{\text{MS-Fr}}(k_1,k_2,k_3)}{\partial k_3}=0\end{cases} \tag{11}$$

将式(10)代入式(11)可以得到：

$$\boldsymbol{AK}=\boldsymbol{B} \tag{12}$$

其中：$\boldsymbol{A},\boldsymbol{K},\boldsymbol{B}$ 表达式为

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M}(\boldsymbol{uv}^{\mathrm{T}})^2 & \sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M}(\boldsymbol{uv}^{\mathrm{T}})\|\boldsymbol{v}\|^2 & \sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M}(\boldsymbol{uv}^{\mathrm{T}})^3\\ \sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M}(\boldsymbol{uv}^{\mathrm{T}})\|\boldsymbol{v}\|^2 & \sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M}(\|\boldsymbol{v}\|^4) & \sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M}(\boldsymbol{uv}^{\mathrm{T}})^2\|\boldsymbol{v}\|^2\\ \sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M}(\boldsymbol{uv}^{\mathrm{T}})^3 & \sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M}(\boldsymbol{uv}^{\mathrm{T}})^2\|\boldsymbol{v}\|^2 & \sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M}(\boldsymbol{uv}^{\mathrm{T}})^4\end{bmatrix} \tag{13}$$

$$\boldsymbol{K}=[k_1\ \ k_2\ \ k_3] \tag{14}$$

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M}\left[\boldsymbol{uv}^{\mathrm{T}}\left(r_0-\sqrt{r_0^2+\|\boldsymbol{v}\|^2-2r_0\boldsymbol{uv}^{\mathrm{T}}}\right)\right]\\ \sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M}\left[\|\boldsymbol{v}\|^2\left(r_0-\sqrt{r_0^2+\|\boldsymbol{v}\|^2-2r_0\boldsymbol{uv}^{\mathrm{T}}}\right)\right]\\ \sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M}\left[(\boldsymbol{uv}^{\mathrm{T}})^2\left(r_0-\sqrt{r_0^2+\|\boldsymbol{v}\|^2-2r_0\boldsymbol{uv}^{\mathrm{T}}}\right)\right]\end{bmatrix} \tag{15}$$

可以求出最优的加权系数，即：

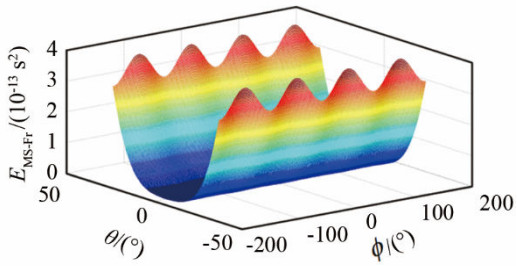
$$\boldsymbol{K}=\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{B} \tag{16}$$

## 4 仿真实验

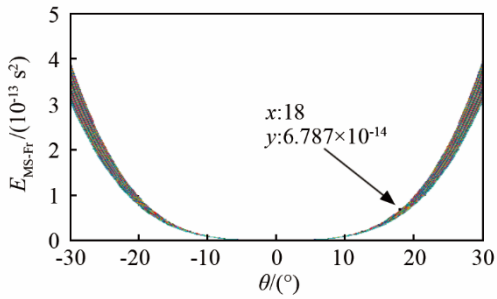
假设有 $M\times N$ 个阵元组成的平面阵，$M=N=48$，接收信号中心频率 $f$=300 kHz，阵元间距等于信号波长，声速为 1 500 m·s$^{-1}$。按图 1 在 $xyz$ 坐标系内放置平面阵。

通过求解式(3)、(7)、(9)获得菲涅耳近似下的时延均方误差。图 2 为在聚焦距离 $r_0$=1 m 处菲涅耳近似均方差随方位角 $\phi$ 和俯仰角 $\theta$ 的变化情况。图 2(a)是均方差随方位角和俯仰角变化的三维图，图 2(b)是图 2(a)在综合方位角方向的侧视图，以下类同。从图 2(b)中可以看出，当 $\theta$=18° 时，均方差最大约 6.8×10$^{-14}$ s$^2$。

取初始 $\boldsymbol{K}$ 值 $\boldsymbol{K}_0$=[1 −0.5 0.5]，通过求解式(3)、(8)、(10)获得 TF 近似下的时延均方差。图 3 为 TF 近似均方差随方位角和俯仰角的变化情况。



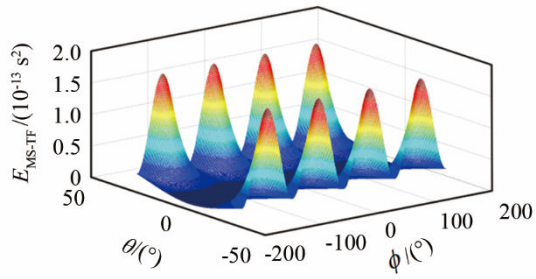

(a) 三维显示



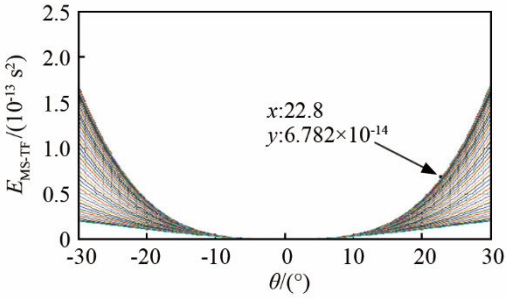

(b) 侧视图

图 2 菲涅耳近似的均方差

Fig.2 MSE of Fresnel approximation




(a) 三维显示




(b) 侧视图

图 3 TF 近似的均方差

Fig.3 MSE of TF approximation

对比图 3(b)与图 2(b)可知，当均方差 $6.8\times10^{-14}$ $s^2$ 时，成像声呐有效视野范围的俯仰角从 ±18° 至少扩大到约 ±23°，当且仅当 $\phi=-180°,-90°,0°,90°,180°$ 时，有效视野范围可以从 ±18° 扩大到 ±90°，说明 TF 近似方法可以扩大成像声呐有效视野范围。

通过 Matlab 计算式(13)、(15)、(16)可获得最优加权系数 $\boldsymbol{K}_{\text{best}}=[0.994\,2\ \ -0.498\,0\ \ 0.488\,9]$，从图 4 最优化后的均方差结果可以看出，均方差为 $6.8\times10^{-14}$ $s^2$ 时，成像声呐有效视野范围扩大到约 ±24°。相对于文献[7]提出的时延参数近似表达式，本文方法在计算时延时增加了 1 项多项式计算的复杂度，时延均方误差计算用时增加约 28%(2.5 s)，在实际应用过程中需要综合考虑系统资源，结合实际需求选择更为合适的时延参数近似表达式。

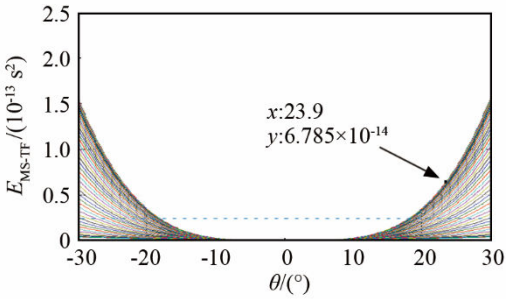



图 4　最优化 TF 近似的均方差

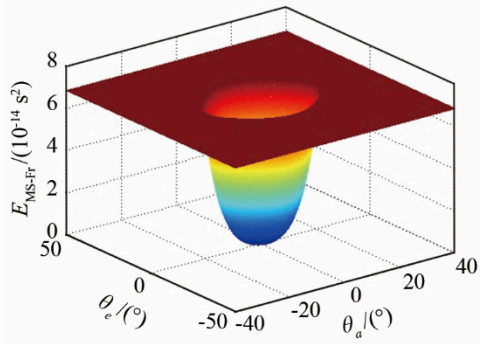
Fig.4　MSE of optimal TF approximation

从上述仿真结果可知，在传统方位角与俯仰角的定义下，当 $|\theta|=18°$ 时，菲涅耳近似与准确时延的均方误差最大为 $6.8\times10^{-14}$ $s^2$。本文另在新方位角与俯仰角定义下，以均方差为基准讨论菲涅耳近似与 TF 近似在该均方差值下的有效视野范围大小。图 5 视野范围图，图 5(a)为三维显示图，图 5(b)为俯视图，以下类同。图 5(b)中非深红色区域的均方差都小于 $6.8\times10^{-14}$ $s^2$，说明这些区域是成像的有效视野范围。

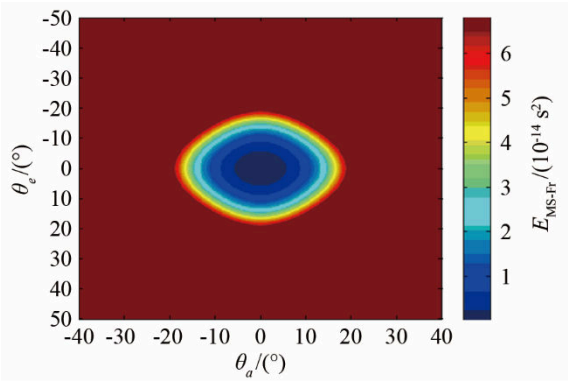
图 6 是 TF 近似在新方位角与俯仰角定义下的有效视野范围图。图 6(b)中非深红色区域的均方差都小于 $6.8\times10^{-14}$ $s^2$，从图中可以看出该区域面积较图 5(b)中大很多，说明 TF 近似的确扩大了三维成像的有效视野范围。

图 7 是当 $\boldsymbol{K}$ 值最优时的 TF 近似在新方位角与俯仰角定义下的有效视野范围图。

图 7(b)与图 6(b)的最大不同之处就是蓝色区域面积增大，总体非深红色区域面积也有所扩大。说明 $\boldsymbol{K}$ 值最优时，能够扩大三维成像的有效视野范围，并明显减小原有区域的均方差，对于提升图像分辨率、减小图像畸变具有重要作用。



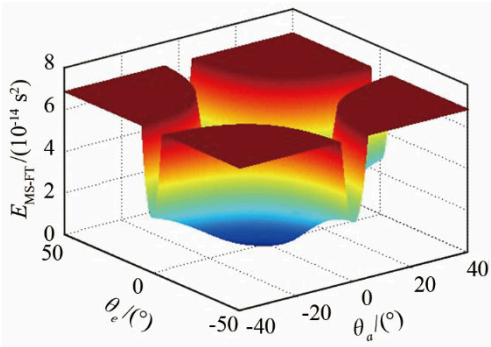

(a) 三维显示



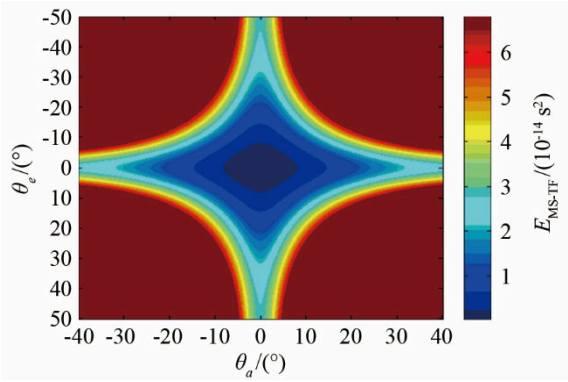

(b) 俯视图

图 5　菲涅耳近似下平面阵的有效视野范围

Fig.5　Effective visual field of planar array under Fresnel approximation



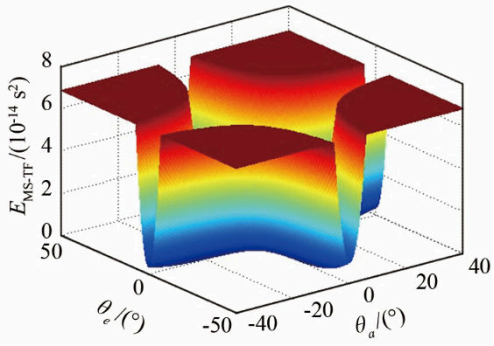

(a) 三维显示



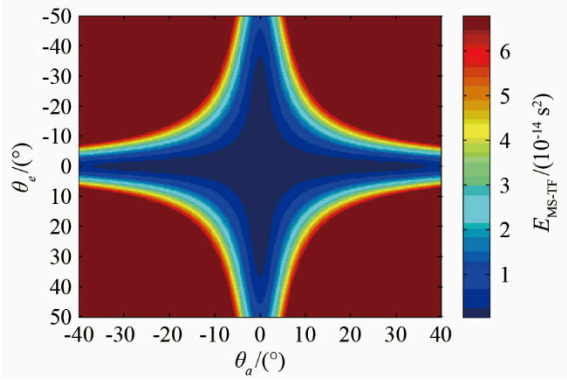

(b) 俯视图

图 6　TF 近似下平面阵的有效视野范围

Fig.6　Effective visual field of planar array under TF approximation




(a) 三维显示




(b) 俯视图

图 7 ***K*** 最优时的 TF 近似下平面阵的有效视野范围

Fig.7 Effective visual field of planar array under TF approximation with optimal ***K*** values

## 5 结 论

针对平面阵，本文研究并探讨了一种时延参数的优化方法，推导了其数学表达式。通过求解平面阵在聚焦波束形成中的时延参数，并对其进行 Matlab 仿真，得出以下结论：

(1) 与菲涅耳近似时延相比较，本文研究的 TF 近似时延的确可以扩大成像的有效视野范围。

(2) 当 ***K*** 值最优时，TF 近似时延能进一步扩大有效视野范围并明显减小原有效视野范围内的均方差。

### 参 考 文 献

[1] 张德俊. 声成像的研究进展及应用前景[C]//1994 年全国声学学术会议, 1994.

[2] 丁迎迎. 海底物体回波模拟与图像生成技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
DING Yingying. Research on echo simulation and image generation of seabed objects[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006.

[3] MURINO V, TRUEEO A. Three dimensional image generation and processing in underwater acoustic Vision[J]. Proceedings of the IEEE, 2000, **88**(12): 1903-1948.

[4] PALMESE M, TRUCCO A. Efficient digital CZT beamforming design for near-field 3-D sonar imaging[J]. Proc. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2010, **35**(3): 584-594.

[5] MURINO V, TRUCCO A. Underwater 3D imaging by FFT dynamic focusing beamforming[C]//1st IEEE International Conference on ImageProcessing. Austin, Texas. 1994(1): 890-894.

[6] ZIOMEK L J. Three necessary conditions for the validity of the Fresnel phase approximation for the near-field beam pattern of an aperture[J]. IEEEJ. Ocean Eng., 1993, **18**(1): 73-75

[7] TRUCCO A. A least-squares approximation for the delays used in focused beamforming[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1998, **104**(1): 171-175.

[8] 陈朋. 相控阵三维成像声呐系统的稀疏阵及波束形成算法研究[D].杭州: 浙江大学, 2009.
CHEN Peng. Research on sparse array and beamforming algorithm for phased array three-dimensional imaging sonar system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.

[9] CHEN P, TIAN X, CHEN Y W. Optimization of the digital near field beamforming or underwater 3D sonar imaging system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2010, **59**(2): 415-424.