

超声波检测计算机模拟和仿真的研究及应用现状

张伟志 刚 铁 王 军

(哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室 哈尔滨 150001)

2002 年 3 月 4 日收到

摘要 随着高性能计算机的广泛应用, 超声检测模拟和仿真的研究方兴未艾。本文对这些研究所选择的数学模型和方法进行了综合评述, 探讨了 Gaussian 模型、声线模型、衍射理论、有限积分技术等的应用, 涉及的方法包括各种解析方法及有限差分、有限元、边界元等数值方法。

关键词 超声检测, 数学模型, 分析方法, 数值方法

A survey of the simulation and its application in ultrasonic testing

ZHANG Weizhi GANG Tie WANG Jun

(State Key Laboratory of AWPT, HIT, Harbin 150001)

Abstract With the availability of high speed personal computers with large storage and random access memory, simulation of UNDT can now be done widely. A review of the progress in mathematical models and methods used in UNDT is given in this paper. The models and analytical method of mutiGaussian, acoustic ray, diffraction theory, EFIT etc, as well as the numerical methods including the finite difference method (FDM), the finite element method (FEM) and the boundary element method (BEM) are discussed.

Key words Ultrasonic testing, Mathematical models, Analytical method, Numerical method

1 引言

近年来, 无损检测技术在工业中的应用越来越普遍。一方面制造业中结构件功能逐步趋于组合化, 要求在缩短设计周期和降低成本的同时提高质量水平, 这需把早期的设计信息用于最终的检测过程, 进行结构件可检性预测和检测工艺设计, 节省检测时间和费用; 另一方面现代工业中非均质和各向异性材料 (例如

奥氏体焊缝和异种材料结合的焊缝) 的广泛应用也对超声无损检测提出了新的要求。工业应用的需求、超声无损检测数学模型的发展及大容量高速个人计算机的普及都为超声波检测的模拟仿真和可视化研究提供了可能和方便。

在超声检测的模拟和仿真中, 目前主要发展应用两类方法: 解析方法和数值方法。解析方法采用物理参数, 容易处理, 计算时间较少, 缺点是不适用于太复杂的情况, 而引入假设简

化后求解精度会大大降低。数值方法包括有限元方法、有限差分方法、边界元方法等,这三种方法各有特色,总的来说,数值方法计算结果比较精确,使用范围广,可以处理任意的结构,缺点是需要网格定义和较长的计算时间,因而目前数值方法主要应用于二维情况。同时各种方法在大量结合使用,从而在运算时间和使用范围上追求平衡。从模拟和仿真的对象上看,目前超声波检测模拟和仿真研究主要集中在声场区域的计算,声束与缺陷的相互作用等方面。

2 解析方法的研究现状

2.1 声线模型

一般在声线模型中,探头被看作一个点声源,超声波束用声线表示,声压表示为声线密度和超声反射系数。每条声线的反射和波型转换均按斯内尔定律绘制,声线传播的模拟用波单元沿传播方向随时间而延伸来实现,波单元长度与声速成正比。日本学者用超声成像法分析了声压分布,使用声线模型建立了可显示超声波实际探伤的简化模型。此模型可显示超声波在试件中的传播路径,并预告 A 型扫描荧光屏上的回波位置等^[1]。Takashi 等用声线模型模拟了斜探头横波法和直探头液浸法的实际探伤,计算了超声波声束线,进行了对接焊缝超声波探伤的模拟^[2,3]。实验表明,超声波在缺陷上的散射和 UT 中扫描显示的模拟结果与实际结果相当一致。声线模型实质是用几何光学来描述超声波特性,这种近似可以定性描述超声波的传播,在界面和缺陷处的折射、反射以及波型转换等,但超声波的波长同光波的波长要差三个数量级,因而声线模型在描述超声波的衍射、近场特征以及返回信号的强弱上会遇到不小的困难。

2.2 基于近轴近似的 Gaussian 波束模型

在声学区域的研究中,使用近轴近似 Gauss 模型不但可以有效地评价复杂几何形

状和复杂材料对换能器辐射声波的影响,而且能降低几个数量级的计算量,因而在超声波区域的运算和模拟仿真中广泛应用。Thompson 等使用近轴近似模型模拟了穿过曲线界面进入各向同性介质时的单一高斯波束^[4]。Newberry 等将该模型拓展用于计算活塞波区域的问题^[5]。有研究人员使用近轴近似模型模拟了穿过任意弯曲界面时的高斯波波束传播,而后结合高斯叠加,进行了在不同检测结构中活塞波的衍射修正^[6,7]。Spies 也使用叠加的高斯波波束模型来模拟在不均匀焊缝中的传播^[8]。Gengembre 等用近轴近似和点源叠加模型模拟了穿过弯曲界面时波的折射^[9]。综合上述等人的工作, Schmerr 等发展了近轴近似波束模型,该模型通过较小数目的高斯波束叠加,模拟了平面探头或聚焦探头水浸检验任意曲线界面各向异性固体时的声场。Lister 等使用近轴近似的高斯波束叠加模型,讨论了超声波换能器的声学区域,给出的模型公式可以模拟平面探头或聚焦探头以任意角度辐射穿过曲线固液界面时产生的超声区域有效声束^[10]。该模拟用不到两页的 MATLAB 程序就可以在个人电脑上方便地实现。另外,使用两适用于个人电脑来分析复杂结构介质中超声波传播和复合材料各向异性介质中, Spies 模拟仿真了超声束的外形,信号随时间的传播情况及超声波在缺陷处的散射等^[11]。

2.3 衍射理论模型

几何衍射理论 (GTD) 较早应用于在超声无损检测的模拟和仿真。Chapman 首先使用 GTD 进行了简单裂纹形状的分析^[12]。针对铁素体钢中的光滑平面缺陷(主要为裂纹),Gorgiou 等基于几何衍射理论建立了声场及超声波与缺陷作用模型,模拟了超声波在材料中的传播,在裂纹面上的反射和在裂纹边缘的散射等。并以这些模型为基础,建立了脉冲反射检测系统^[13]。无损检测软件 NDTAC 和 TOFD 中也都使用了 GTD。

Kirchhoff 衍射理论能够以系数的形式给

出缺陷作用后散射波的幅度,描述可能发生的波型转换,从而模拟波束和缺陷的相互作用。Chapman^[14]利用 Kirchhoff 衍射理论表示裂纹的张开位移, Lhémy^[15]分析了体积缺陷的散射。Raillon 等基于 Kirchhoff' 近似,使用互惠原则,进行回波信号和缺陷相互转换计算,研制了波与缺陷作用的计算模型,提出了零件产生的超声回波预测模型^[16]。

对 Rayleigh-Sommerfeld 积分公式进行二维积分可以计算平面活塞波辐射的压力区,但相当麻烦,文献 [17,18] 使用 Stokes 原理,把此积分变换为一维线性积分即边界衍射波模型 (BDEM)。使用 BDEM,文献 [19] 计算了 64 个矩形元相阵换能器产生的声学区域,模拟仿真了转向角、焦点位置及频率变化时的近场区域,得出的结论可以优化探头的设计,判定近场区域的聚焦法则,预测时域上的波型转换等。

2.4 CEA 的 Champ-Son 和 Mephisto 模型

法国原子能委员会 (CEA) 有关人员长期致力于超声波模拟和仿真工具的研究。90 年代 CEA 开发的 CIVA 系统最初用于多种检测数据的识别和处理,目前该软件已从简单结构均质材料的处理发展到复杂结构异质各向异性材料的处理,广泛应用于工业实际^[20]。该系统中超声无损检测仿真工具主要由 Champ-Son 和 Mephisto 两个模块组成。Champ-Son 模型基于几何最优化近似,能够进行复杂几何形状界面,任意探头和任意的激发脉冲的处理,定量地预测工件中声场分布,该理论模型与一些辅助软件功能结合可以实现探头的设计。Mephisto 模型使用 Kirchhoff 衍射理论独立进行各种缺陷的分析和计算,在给出探头和检测结构参数后,能够模拟产生超声无损检测的数据,同实际检测结果比较,以供专家分析^[21]。将 Champ-Son 模型扩展到非均质各向异性材料中,将 Mephisto 模型扩展到三维情况,在时域上直接计算,CEA 研究人员还发展了焊缝

超声检测模型^[22]。

2.5 UTDefect 模型

为避免几何衍射理论对频率和几何形状的限制,以及避免有限元方法和有限积分技术体积分散化带来的大量计算问题,瑞典 Chalmers 工业大学力学系使用不同的积分变换和积分方程技术模拟探头和缺陷的散射,开发了 UTDefect 软件,该软件用于均质和各向同性材料件超声波检测中缺陷的定位。扩展了较早面向实验室应用的 UTDefect 软件功能,SUNDT 项目以 UTDefect 为处理数学模型核心,在脉冲回波或串列检测情况下,可以模拟任意类型、角度或尺寸接触探头的坑洞检测工序,该项目在瑞典原子能机构中得到了应用^[23]。在 UTDefect 基础上,A.S. Eriksson, J. Mattsson, A.J. Niklasson 发展了各向异性材料中超声波传播和裂纹检验的 3D 弹性动力学模型。该模型使用傅立叶方法,能够计算声波在半空间和层状结构中传播的区域,以任意角度产生的准 P-, SV-, SH 波区,以及超声区域同带状裂纹作用等。研究人员还给出了奥氏体焊缝和无方向性的碳环氧增强纤维材料的数字模拟实例^[24]。这些系统和工具将有助于焊件中超声波传播过程的更好理解,作为参数研究的工具,可以研究探头参数,缺陷性质和检测方法对检测结果的影响等。

2.6 模拟和仿真的其他解析方法

R. Mux 等使用 Midas 光线示踪模型模拟超声波束进入被检测件的传播状况,并且可以通过假定缺陷仿真。该模拟可以进行探头参数、检测方式、检测覆盖面、回波波幅及可视化等方面的研究,具有检测复杂几何形状和识别专门缺陷的能力,目的是用于技术可行性的评估^[25]。

为了了解超声换能器特别是非标准探头中产生的声场特性,E.A. Ginzler 等用超声束外形模拟获得波束展开图,再用 Dr. D.H. Mair 的两个模型程序生成了理想波形和尺寸的图象,该研究弥补了 ASTM E-1065 只可以探知液浸

探头声束的形状的不足^[26]。

VK Ravindran 等研制的计算机综合超声无损评价工具具有产生标准的人造信号, 缺陷条件仿真和分析能力, 可用于了解超声脉冲和不同几何条件的缺陷的相互作用, 提高检测和解释的准确度。这也可用于缺陷的人工制作比较困难的情况下, 或通过人工改变缺陷的条件获得更多的缺陷信息^[27]。

针对环件沿厚度方向的辐射状生长的疲劳裂纹难于检测这一情况。Zongbao Li 用波模扩张解法, 对厚环形波导管中暂态超声波的传播进行了模拟。模拟结果为波导管内表面裂纹检测提供了更好操作参数的选择 (频率、透声楔类型、探头位置)。该技术已成功的应用于 H-46 直升机倾斜轴部分环形元器件的检测^[28]。

3 基于数值方法的超声波模拟和仿真

3.1 有限积分技术及数字化应用简介

有限积分技术 (FIT) 直接运用于积分形式的波传播支配计算公式, 在交错网格系统中进行计算公式的空间和时间的离散, 形成了三个离散的显式矩阵方程式 (PFIT (Piezoelectric Finite Integration Technique), EFIT (Elastodynamic Finite Integration Technique), AFIT (Acoustic Finite Integration Technique)), 这三个方程式保存了原始公式的分析特性, 推出了稳定性条件为离散化的数字方法在超声波检测中的应用提供了基础。

EFIT 最早由 Fellingner 等人发展。Schmitz 用 EFIT 方法计算了各向异性材料中波的传播和散射, Schmitz 还发展了两个不同缺陷类处理型的有限元综合模型^[29]。Schmitz 等用纯粹的数字方法 EFIT 计算内部或表面裂纹的散射, 该方法计算量大, 对几何形状具有通用性。使用 EFIT, F. Schubert 等发展了混凝土中弹性波模型 EADQ, 并结合 EADQ 使用 EFIT 的最优化版本建立数字模型, 针对铁轨裂纹检

测研制了纵波和表面波检测的应用软件 (EFI-Trail), 该软件通过向计算机输入参数, 加入铁轨的外形控制, 只需原来内存的六分之一。该模型模拟结果与试样上实验的 A 扫描结果相吻合^[30]。

3.2 三种常用数字方法应用及比较

适用于高频和低频的分析解决方案, 近年来逐步被数字方法代替。Temple 和 Bond 考察了几种数字方法的相对优点后认为, 有限元方法 FEM 对不同类型问题的适应能力优于其他方法。目前, 在所有的数字方法中, 有限差分法 FDM 在弹性波的分析中应用最广, 边界元方法 BEM 和有限元法在一般性问题中应用最广。文献 [31] 全面分析了有限元和边界元方法后认为, 有限元法的主要优点是, 它处理的材料可以是非均匀和各向异性的, 但其缺点是要求区域是有界的, 而且处理起来比较麻烦。边界元既可以处理有界, 也可以处理无界区域, 计算精度和效率也比有限元高, 但通常要求材料是均匀的。文献 [32] 也较详细地介绍了数值模拟在超声检测过程的应用。这里对这些方面的研究作进一步的补充和分析。

3.2.1 有限差分技术

将换能器模拟为正方形复合材料棒的规则排列, Schechter 等人使用有限差分时分域技术对复合材料换能器连续波的区域进行了全面的数字计算和三维模拟仿真。在大规模并行计算机上进行的横波和纵波全面模拟, 不仅包含换能器建模, 而且可以进行辐射声压的仿真。该模拟考虑了外壳和边界的影响, 包含了波的传播许多本质的特征^[33]。文献 [34] 把不均匀材料中暂态波传播的时域方法作为工具模拟连续波的区域, 使用有限差分法在大规模并行计算机上计算了辐射入水中的三维压力波区域情况。模拟区域较大, 近场和远场区都适用。模拟结果能够显示微小缺陷对波束的影响, 并同 Rayleigh 表面积分的解析方法及实验作了比较。

Yim, H.^[35] 等人用质点弹簧点阵模型, 得

出了在各向同性介质和横向同性介质中超声波传播的模型公式,首先模拟了超声波检测规范及裂纹的散射问题,而后根据网格间距和时间步长最优比例,包含简单的吸收边界条件以降低来自于计算网格平切边界的干扰反射,用部分简化的有限差分法,在高性能个人电脑(奔腾处理器,64兆内存)图形用户接口环境中用VC++开发了PC软件包——波传播仿真器WAPS,该软件具有友好的用户界面,可以方便地进行数据输入,计算和结果可视化,能够进行超声波传播和散射的二维模拟和仿真。

3.2.2 有限元技术

D. Datta 和 N.N. Kishore^[36] 使用包含吸收边界条件的二维平面应变有限元模型研究了超声波在各向同性和各向异性材料中的传播过程。当持续时间短的脉冲在无缺陷存在或有裂纹夹杂类缺陷区域传播时,该方法有能力模拟实验的超声波回波技术,以获得 A 扫描数据并能进行频率区域特征分析。该研究还提供了考虑一定的谐振敏感性和缺陷类型的适配性准则,显示了波传播过程中缺陷存在时模型转换和散射等其他重要的假象。F. Bettayeb^[37] 建立了简化的超声检测系统模型,使用有限元方法模拟了超声波在均质材料中的传播,结果可以预测 A 扫描反应及工件和缺陷系统的反射幅度。N.N. Kishore^[38] 等研制了包含吸收边界的二维有限元模型,以观察超声波在无限同性固体(或孤立缺陷)中的散射。正弦曲线脉冲同缺陷作用时,该模型有能力显示复杂的波形转换,特别是在裂纹、柱孔、球孔等缺陷的尺寸与波长相近情况下。Xue 等建立了平面和曲面换能器在固体声介质中发射声场的有限元模型^[39];Issa 等用 p-version FEM 模拟了固体中超声波的传播^[40];You^[41] 等用轴对称动弹性 FEM 定量地计算了各向同性和正交各向异性的高衰减材料中弹性波的位移场,考虑了 Rayleigh 散射、粘滞吸收和超声波声束的扩散作用;Harumi 等结合 FEM 和质点模型模拟了弹性波在固体中的传播^[42]。另外 Imma

Orilio^[43] 等使用能够对航空复合材料超声检测更好地进行实验解释。

3.2.3 边界元技术

边界元方法主要应用于板材检测的分析中,Hirose^[44] 等用边界元法对 Lamb 波在板材中的散射问题进行了数值计算,Cho 等对 Lamb 波在表面裂纹上的反射和透射系数问题进行了数值预测,王路根和沈建中等用边界元法和传递矩阵法相结合的方法研究了板中缺陷对弹性波的散射问题^[45],Rose^[46] 等利用边界元法对板表面缺陷的形状进行了分类,Liu 等采用了边界元和有限元相结合的数值解法,对各向异性层/基层的背散射场的 $V(z)$ 曲线进行了计算,结果表明该方法非常有效^[47]。另外 Hevin^[48] 等探讨了裂纹几何形状对表面波传播影响的数学模型,用间接边界元法计算了二维缺陷和表面波的反应,给出了三维空间下的信号反应结果分布,从而可以用实际测得的表面波信号反推裂纹的深度。

4 我国超声波检测模拟和仿真的发展

从上述文献来看,目前国外超声波检测模拟和仿真研究一方面集中在以解析方法为主开发工业应用的软件系统,进行超声波检测工艺及可行性、可靠性分析,以降低检测成本,提高效率;另一方面是采用数字方法进行模拟和仿真,针对现代工业广泛应用的各向异性材料和特殊结构件进行超声检测研究,以提高检测精度,拓宽超声波检测的应用范围。

80 年代以来,计算机技术在我国超声检测中得到广泛的应用,主要集中在超声信号的采集、量化和处理及超声成像系统和自动超声探伤系统的研制上。90 年代以来浙江大学还开发出了无损检测工艺制定专家系统(CAPPNDT)^[49],冶金部压力容器检测站研制了无损检测专用软件 NDTs^[50]。但新技术研究和开发中计算机技术的应用是我国无损检测的薄弱环节,目前我国超声波检测模拟和仿真

方面的研究进行的很少。在加入 WTO 后的今天,我国超声检测要实现跨越式发展,就必须跟上国际超声检测潮流,在引进硬件设备的基础上进行自主的软件开发和创新,加快超声波检测模拟和仿真研究。

参 考 文 献

- 1 李衍编译. 无损探伤, 1997,(2): 26-29.
- 2 Takashi F, Kazuhiro D. *Materials Evaluation*, 1994, **52**(9): 1108-1111.
- 3 Takashi F, Gouki Y, Kazuhiro D. *Materials Evaluation*, 1995, **53**(6): 747-749.
- 4 Thompson R B, Lopez E F. *J. Nondestr. Eval.*, 1984, **4**: 107-123.
- 5 Newberry B P, Thompson R B. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1989, **85**: 2290-2300.
- 6 Minachi A, Margetan F J, Thompson R B. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 1998, **17A**: 907-914.
- 7 Wen J J, Breazeale M A. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1988, **83**: 1752-1756.
- 8 Spies M, Kroning M. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 1999, **18A**: 1107-1114.
- 9 Gengembre N, Lhémy A. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 1999, **18A**: 1131-1138.
- 10 Lester W, Schmerr J. *Materials Evaluation*, 2000, **58**(7): 882-888.
- 11 Martin Spies. *Materials Evaluation*, 2000, **58**(7): 897-901.
- 12 Chapman R K. *J. Nondestr. Eval.*, 1990, **9**(9): 127-211.
- 13 Georgiou G A, Blakemore M, Chapman R K, et al. *British Journal of NDT*, 1989, **31**(10): 551-561.
- 14 Chapman R K. CEGB Report, North Western Region NDT applications Centre, NWR:SSD:82:0091:N, 1982.
- 15 Lhémy J. *Acoust. Soc. Am.*, 1995, **98**: 2197-2208.
- 16 Raillon, Raphaëlea, Lecœur-Taïbi, Isabellea. *Ultrasonics*, 2000, **38**(3): 527-530.
- 17 Macovski A. *Proceedings of the IEEE*, 1979, **67**(4): 484-495..
- 18 Azar L, Whoo S C. *Materials Evaluations*, 1999, **57**(2): 134-140.
- 19 Song Sung-Jin, Shin Hyeon Jae, Jang You Hyun. The 15th World Conference on Nondestructive Testing, Rome, 2000.
- 20 Calmon P, Lhémy A, Lecœur-Taïbi, et al. *The 15th World Conference on Nondestructive Testing*, Rome, 2000.
- 21 Pierre Calmon, Alain Lhémy, Isabelle Lecœur-Taïbi, et al. *Nuclear Engineering and Design*, 1998, **180**: 272-283.
- 22 Lhémy A, Calmon P, Lecœur-Taïbi I, et al. *NDT&E International*, 2000, **33**: 499-513.
- 23 Wirdelius H. *The application of mathematical NDT.net*. 1998, **3**(11).
- 24 Eriksson A S, Mattsson J, Niklasson A J. *NDT&E International*, 2000, **33**:441-451.
- 25 Mux R, Borra M, Cabrera E, et al. First International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components. Amsterdam, Netherlands, 1998.10.
- 26 Ginzel E A, Hotchkiss F H C. Ultrasonic beam profile modelling. NDT.net.
- 27 Ravindran V K, Bhaumik B C. The 15th World Conference on Nondestructive Testing, Rome, 2000.
- 28 Zongbao Li, Berthelot Y H. *NDT&E International*, 2000, **33**:225-232.
- 29 Schmitz V, Langenberg K J, Kroning M. *Proc. Joint CEC OECD IAEA Specialists Meeting on NDE*. Petern, The Netherlands, 1994.
- 30 Frank Schubert, Bernd Koehler, Olga Sacharova. Ultrasonic testing of rails with vertical cracks - numerical modeling and experimental results. NDT.net.
- 31 他得安, 黄瑞菊, 刘镇清. 无损检测, 2001, **23**(11): 485-488.
- 32 陈建忠, 史耀武. 无损检测, 2001, **23**(5): 198-201.
- 33 Schechter R S, Simmonds K E, Mignogna R B. *Ultrasonics*, 2001, **39**(3): 163-172.
- 34 Halkjær S, Sørensen M P, Kristensen W D. *Ultrasonics*, 2000, **38**(1-8): 256-261.
- 35 Yim H, Sohn Y. *IEEE Trans. UFFC*, 2000, **47**(3): 549-558.
- 36 Datta D, Kishore N N. *NDT&E International*, 1996, **29**(4): 213-223.
- 37 Bettayeb F. The 15th World Conference on Nondestructive Testing. Rome, 2000.
- 38 Kishore N N, Sridhar I, Iyengar N G R. *NDT&E International*, 2000, **33**: 297-305.
- 39 Xue T, Lord W, Wdpa S. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 1995, **14**(3): 137-148.
- 40 Issa C A, Iyer K S, Blasubramaniam K. *Ultrasonics*, 1994, **32**(1): 13-20.

(下转第 32 页)

为 2.0° 。图 4 给出了信噪比为 0 dB 时两种方法的空间方位谱,从图 4 可以看出,本文方法的空间方位谱更尖锐。

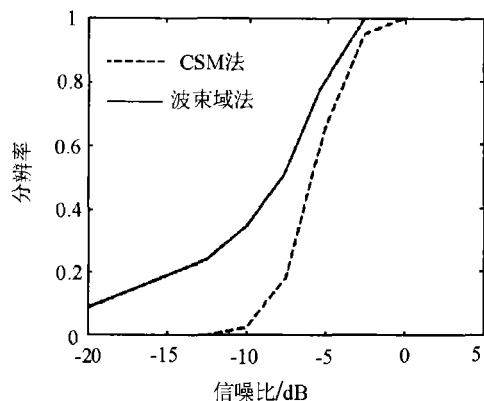


图 5 分辨率比较

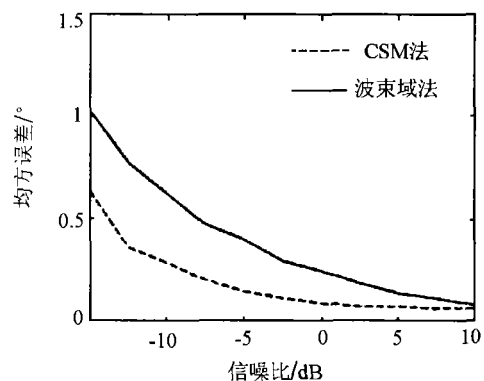


图 6 均方误差比较

图 5 和图 6 给出了两种方法的分辨率和均方误差的比较,每个信噪比下做 100 次独立的

实验,其中均方误差定义为对两个方位估计均方误差的平均值。结果表明,本文方法的分辨率高于 CSM 方法,或者说比 CSM 法更容易分辨空间两个相距很近信号源,但本文方法的均方误差要高于 CSM 法。

6 结论

本文提出的利用自适应模拟的方法求解不同频率下的波束形成矩阵,只需在参考频率下用现有的窄带方法设计参考波束形成矩阵,在其它频点下的波束形成矩阵便可由计算机自动求解,而不需要推导波束形成矩阵的表达式。利用波束形成矩阵来实现宽带信号的聚焦,不仅保持了波束域方位估计方法运算量小,分辨率高等优点,还具有相关信号子空间能解相关源的优点。该方法可适合于任意阵形,且对各阵元的指向性也没有任何限制。因此具有良好的工程应用前景。

参 考 文 献

- 1 Wang H, Kaveh M. *IEEE Trans. ASSP*, 1985, **33**(4): 823-831.
- 2 Hung H, Kaveh M. *IEEE Trans. ASSP*, 1988, **36**(8): 1272-1281.
- 3 Doron M A, Weiss A J. *IEEE Trans. SP*, 1992, **40**(6): 1292-1302.
- 4 Anderson S. *Signal Processing*, 1993, **30**(2): 246-256..
- 5 Lee H B, Wengrovitz M S. *IEEE Trans. ASSP*, 1990, **38**(9): 1545-1559..
- 6 Li F, Liu H. *IEEE Trans. SP*, 1994, **42**(3): 604-610.
- 45 Cho Y, Hongerholt D D, Rose J L. *IEEE Trans on UFFC*, 1997, **44**(1): 44-52.
- 46 Rose J L, Wenhao Z, Cho Y. *IEEE Ultrasonics Symposium. Sendai Japan*: 1998: 885-888.
- 47 Liu G R, Achenbach J D, Kim J D, et al. *Acoust. Soc. Am.*, 1992, **92**(5): 2734-2740.
- 48 Hevin G, Abraham O, Pedersen H A, et al. *NDT&E International*, 1998, **31**(4): 289-297.
- 49 方海滨, 周晓军. 无损探伤, 1999, (2): 6-9.
- 50 陈翠梅, 刘汇, 霍臻. 无损检测, 1999, **21**(9): 396-398.
- 41 You Z, Lusk M, Ludwig R, et al. *IEEE Transactions on UFFC*. 1991, **38**(5): 436-445.
- 42 Harumi K. *NDT&E International*, 1986, **19**(5): 315-332.
- 43 Imma Orilio. The 15th World Conference on Nondestructive Testing, Rome, 2000.
- 44 Hirose S, Yamano M. *Review of Progress in Quantitative NDE*. 1996, **15**(A): 201-207.

(上接第 44 页)