Theorie und Anwendung von linearen und nichtlinearen Inversionsverfahren in der zerstörungsfreien Prüfung

René MARKLEIN[*], Jinghong MIAO[**]
[*] Universität Kassel, FB 16 Elektrotechnik / Informatik, FG Theorie der Elektrotechnik und Photonik, Wilhelmshöher Allee 71, D-34121 Kassel
[**] Tianjin Polytechnic University, No. 63 Chenglin Road, Hedong District, 300160 Tianjin, China

Kurzfassung. Dieser Beitrag stellt die Theorie von linearen und nichtlinearen Inversionsalgorithmen und deren Anwendung auf Ultraschall- und Mikrowellendaten vor. Neben den linearen Verfahren wie SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique), FT-SAFT (Fourier-Transform-SAFT) und der Beugungstomografie (Diffraction Tomographie, DT), die man in der zerstörungsfreien Prüfung (zfP) sehr gut kennt, gibt es noch eine Vielzahl anderer Verfahren, die man in der zfP zur Detektion und Bestimmung von Position, Form und Größe von Fehlern sowie zur Materialcharakterisierung einsetzen kann. In diesem Beitrag werden neben den oben genannten Ansätzen drei weitere Methoden vorgestellt und deren Leistungsfähigkeit getestet. Es handelt sich dabei um den linearen MUSIC-Algorithmus (MUltiple-SIgnal Classification, MUSIC) in Kombination mit dem Time Reversal-Verfahren und um zwei nichtlineare iterative Algorithmen, die sogenannte Contrast Source Inversion (CSI) und Multiplicative Regularization Contrast Source Inversion (MR-CSI). Es werden Resultate für ausgewählte synthetische und experimentelle Datensätze für den multifrequenten und multibistatischen Fall präsentiert und diskutiert.

Lizenz: http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de

Theorie und Anwendung von linearen und nichtlinearen Inversionsverfahren in der zerstörungsfreien Prüfung

UNIKASSEL VERSITÄT

[a] Universität Kassel, FB 16 Elektrotechnik / Informatik,
FG Theorie der Elektrotechnik und Photonik, Wilhelmshöher Allee 71, D-34121 Kassel
[b] Tianjin Polytechnic University,
No. 63 Chenglin Road, Hedong District, 300160 Tianjin, China

René Marklein[a], Jinghong Miao[b]
(marklein@uni-kassel.de, miaojinghong@tjpu.edu.cn)

Zusammenfassung

Dieser Beitrag stellt die Theorie von linearen und nichtlinearen Inversionsalgorithmen und deren Anwendung auf Ultraschall- und Mikrowellendaten vor. Neben den linearen Verfahren wie SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique), FT-SAFT (Fourier-Transform-SAFT) und der Beugungstomografie (Diffraction Tomography, DT), die man in der zerstörungsfreien Prüfung (zfP) einsetzt, gibt es noch eine Vielzahl anderer Verfahren, die man in der zfP zur Detektion und Bestimmung von Position, Form und Größe von Fehlern sowie zur Materialcharakterisierung einsetzen könnte. Hier werden neben den oben genannten Ansätzen drei weitere Methoden vorgestellt und deren Leistungsfähigkeit getestet. Es handelt sich dabei um den linearen MUSIC-Algorithmus (MUltiple-SIgnal Classification, MUSIC) in Kombination mit dem Time Reversal-Verfahren und um zwei nichtlineare iterative Algorithmen, die so genannte Contrast Source Inversion (CSI) und Multiplicative Regularization Contrast Source Inversion (MR-CSI). Es werden Resultate für ausgewählte experimentelle Mikrowellen- und Ultraschalldatensätze für den multifrequenten und -bistatischen Fall präsentiert.

Einleitung / Motivation

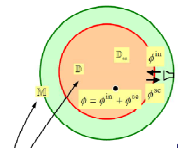
In der zfP-Praxis werden zur Evaluierung und Charakterisierung von Prüfkörpern elektromagnetische Wellen (Mikrowellen) und elastodynamische Wellen (Ultraschallwellen) eingesetzt; da die Grundgleichungen dieser Wellen – akustische Wellen eingeschlossen – strenge Ähnlichkeiten aufweisen, können die gleichen Verfahren zur Inversion von Wellenfeldern angewendet werden. Solange man eine skalare Approximation des Streu- oder Beugungsvorgangs vertreten kann, ist das heuristische SAFT-Prinzip zur Inversion von verschiedenen Wellentypen anwendbar, z. B. SAR in der Fernerkundung oder SAS in der Sonaranwendung. Wenn man SAFT vor dem Hintergrund der Inversen Beugungstheorie als Beugungstomografie versteht, stellt sich heraus, dass die Linearisierung die strengste inhärente Approximation darstellt. Zur Untersuchung der Auswirkungen dieser Linearisierung werden hier Abbildungsergebnisse von nichtlinearen Inversionsverfahren mit Resultaten von SAFT verglichen.

Anwendung

Der Einsatz von elektromagnetischen und elastodynamischen Wellen ist in verschiedenen Disziplinen der Wissenschaft und des Ingenieurwesens verbreitet, wie beispielsweise bei der Anwendung des Radar-Prinzips, wobei man ein Messgerät zur Aufzeichnung von Informationen eines Objektes verwendet, welches nicht im direkten Kontakt mit Objekt stehen muss. Ein Flugkörper, wie z. B. ein Erdbeobachtungssatellit, erstellt nach dem Prinzip der Fernerkundung Radarbilder von der Erde . Wendet man sich der physikalischen Natur von Wellen zu, so ist die Anwendung von Mikro- und Ultraschallwellen in der zerstörungsfreien Prüfung (zfP) und der zerstörungsfreien Evaluierung (zfE) sowie der geophysikalischen Exploration sehr weit verbreitet. In der zfP und zfE werden beispielsweise Mikro- und Ultraschallwellen zur Detektion und Vermessung von Streu- und Beugungskörpern, zur Sicherstellung der Integrität von Bauteilen und zur Bestimmung von physikalischen Materialeigenschaften eingesetzt. In der geophysikalischen Exploration werden z. B. seismische Wellen zur Auffindung von Rohstoffen verwendet.

Nichtlineares Inversionsverfahren (CSI)

Skalare Inverse Beugungstheorie



Kontrastfunktion der Wellenzahl

$$\chi(\mathbf{R},\omega)=\begin{cases}\dfrac{k^2(\mathbf{R},\omega)}{k^2}-1 & \mathbf{R}\in\mathbb{D}_{sc}\\ 0 & \mathbf{R}\in\mathbb{R}^3\setminus\mathbb{D}_{sc}\end{cases}$$

Integralgleichungen

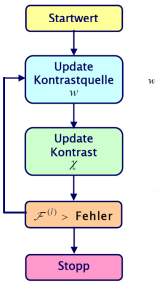
Objektgleichung für $\mathbf{R}\in\mathbb{D}$, Lippmann-Schwinger-Gleichung

$$\phi(\mathbf{R},\omega)=\phi^{in}(\mathbf{R},\omega)+k^2\int_{\mathbf{R}'\in\mathbb{D}}G(\mathbf{R}-\mathbf{R}',\omega)\,\underbrace{\chi(\mathbf{R}',\omega)\phi(\mathbf{R}',\omega)}_{-w(\mathbf{R},\omega)\ \text{Kontrastquelle}}\mathrm{d}^3\mathbf{R}'$$

Datengleichung für $\mathbf{R}\in\mathbb{M}$

$$\phi^{sc}(\mathbf{R},\omega)=k^2\int_{\mathbf{R}'\in\mathbb{D}}G(\mathbf{R}-\mathbf{R}',\omega)\,\overbrace{\chi(\mathbf{R}',\omega)\phi(\mathbf{R}',\omega)}^{w(\mathbf{R}',\omega)}\mathrm{d}^3\mathbf{R}'$$

Flussdiagramm des iterativen CSI-Verfahrens



z. B. Rückausbreitung (Back Propagation)

$w_{n_R}^{(l)}=w_{n_R}^{(l-1)}+\alpha_w^{(l)}d_{w,n_R}^{(l)}$ CG-Schritt

CG: Conjugate Gradient

$\chi_{\text{analytic}}^{(l)}=$ Inversion einer Diagonalmatrix

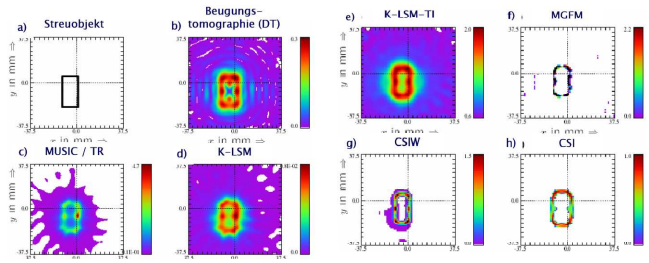
Wenn der Wert des Fehlerfunktionals

$\mathcal{F}^{(l)}=\left[\mathcal{F}_{\mathbb{D}}^{(l)}+\mathcal{F}_{\mathbb{M}}^{(l)}\right]\mathcal{F}_{\mathbb{D}}^{\mathrm{TV}(l)}$

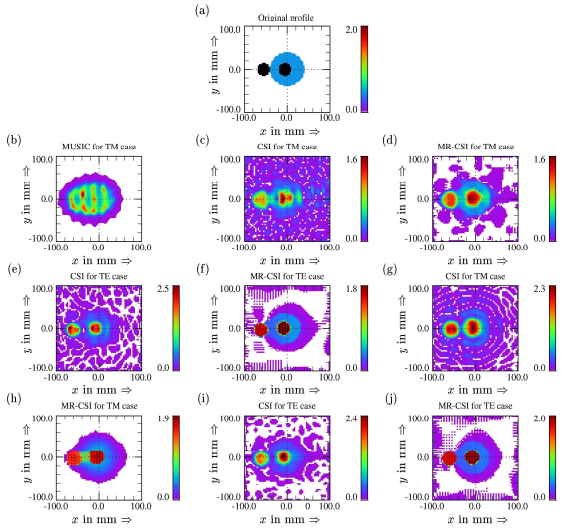
klein genug ist, dann stoppt die Iteration!

Komplexität = 2 x Komplexität des CG-Lösers für das Vorwärtsproblem

Experimentelle Mikrowellendaten

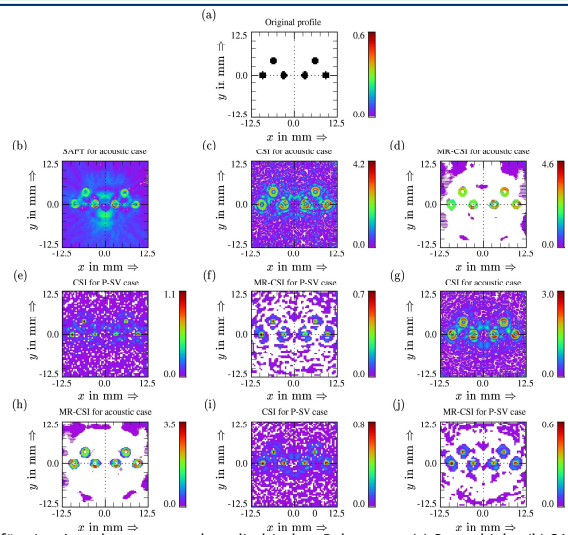


Ergebnisse für ein metallisches Rechteck: (a) metallisches Objekt, (b) Beugungstomografie (FT-SAFT), (c) MUSIC und Time-Reversal-Imaging, (d) Linear Sampling Methode (K-LSM), (e) K-LSM mit Tikhonov-Regularisierung (K-LSM-TI), (f) Modified Gradient in Field Metallic , (g) Contrast Source Inversion Weighted (CSIW), (h) CSI. (b)-(e) für $f=16$ GHz-Daten und (f)-(h) Frequenz-Sprung-Verfahren $f=\{4, 8, 12, 16\}$ GHz.



Ergebnisse für ein inhomogenes dielektrisches Streuobjekt: (a) Streuobjekt, (b), (c), (d), (e) und (f) sind MUSIC, CSI- und MR-CSI-Ergebnisse für eine Frequenz $f=6$ GHz. (g), (h), (i) und (j) sind CSI- und MR-CSI-Ergebnisse bei gleichzeitiger Verarbeitung mehrerer Frequenzen $f=\{2, 3, 4, 5, 6\}$ GHz. Die CSI- bzw. MR-CSI-Ergebnisse zeigen die Ergebnisse nach 512 Iterationen.

Experimentelle Ultraschalldaten



Ergebnisse für eine Anordnung aus sechs zylindrischen Bohrungen: (a) Streuobjekt, (b) SAFT-Ergebnis, (c), (d), (e) und (f) sind CSI- und MR-CSI-Ergebnisse für eine Frequenz $f=2.1$ MHz. (g), (h), (i) und (j) sind CSI- und MR-CSI-Ergebnisse für mehrere Frequenzen $f=\{1.9, 2.1, 2.3, 2.5, 2.7\}$ MHz . Die CSI- bzw. MR-CSI-Ergebnisse zeigen die Ergebnisse nach 256 Iterationen.

Schlussfolgerung

Es wurden Abbildungsergebnisse durch Anwendung von linearen und nichtlinearen Inversionsalgorithmen auf Mikro- und Ultraschallwellendaten präsentiert. Der direkte Vergleich zwischen den Resultaten der eingesetzten linearen und nichtlinearen Inversionsverfahren demonstriert deren erhebliches Potential für die zfP-Praxis, d. h. man ist in der Lage die Ergebnisse der linearen Inversionsverfahren, wie dem heuristischen SAFT-Verfahren, durch Anwendung der Inversen Beugungstheorie wesentlich zu verbessern. Mit der vorgestellten Arbeit und den erzielten Ergebnissen stehen nun nichtlineare Inversionsverfahren für die Anwendung in der zfP-Praxis zur Verfügung.