



Estimation of vector velocity

Jensen, Jørgen Arendt

Publication date:
2000

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Jensen, J. A. (2000). Estimation of vector velocity. (Patent No. WO2000068678).

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 600 19 576 T2** 2005.09.22

(12)

Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 1 175 613 B1**

(51) Int Cl.⁷: **G01N 29/00**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **600 19 576.7**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/DK00/00243**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **00 925 094.5**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 00/68678**

(86) PCT-Anmeldetag: **10.05.2000**

(87) Veröffentlichungstag
der PCT-Anmeldung: **16.11.2000**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **30.01.2002**

(97) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: **20.04.2005**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **22.09.2005**

(30) Unionspriorität:

63399 10.05.1999 DK

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT,
LI, LU, MC, NL, PT, SE**

(73) Patentinhaber:

B-K Medical A/S, Gentofte, DK

(72) Erfinder:

JENSEN, Arendt, J rgen, DK-2800 Lyngby, DK

(74) Vertreter:

**Patent- und Rechtsanwälte Bardehle, Pagenberg,
Dost, Altenburg, Geissler, 81679 München**

(54) Bezeichnung: **Schätzung von Geschwindigkeit**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

Gebiet der Erfindung

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren und ein Gerät zur Schätzung des Geschwindigkeitsvektors eines entfernt detektierten Objektes oder einer Gruppe von Objekten, unter Verwendung von entweder Schall, speziell Ultraschall, oder elektromagnetischer Strahlung wie Radar. Die Bewegung des Objektes wird bestimmt durch Aussendung und Empfang eines gepulsten Feldes mit räumlichen Oszillationen, sowohl in der axialen Richtung des Übertragers als auch in einer oder zwei Richtungen quer zur axialen Richtung. Unter Verwendung einer Anzahl von Pulsemissionen kann die Interimpulsbewegung geschätzt werden und die Geschwindigkeit, die von der geschätzten Bewegung und der Zeit zwischen den Impulsen gefunden wird. Die Erfindung basiert auf dem Prinzip der Verwendung von transversalen räumlichen Schwingungen, um das empfangene Signal durch die Querbewegung zu beeinflussen, und dann Verwendung einer neuen Autokorrelations-schätzung zur Bestimmung des Geschwindigkeitsvektors. Der Schätzer verwendet Momente vierter Ordnung, anstatt Momente zweiter Ordnung. Der Schätzablauf kann optimiert werden unter Verwendung von zeitlicher Verzögerung, die verschieden von 1 ist (eins), Kompensation der lateralen und axialen Frequenzen und durch Mittelwertbildung von HF-Proben.

Hintergrund der Erfindung

[0002] Medizinischer Ultraschall wird extensiv verwendet zum Studium der Fluid-Dynamik im menschlichen Körper, unter Verwendung von Strömungskartographie. Die Technik zeigt ein Farbbild der Strömung an, das einem normalen B-Modus-Bild überlagert ist. Die Geschwindigkeitskomponente entlang der Ultraschallstrahlrichtung wird gemessen, und die Strömung quer zum Strahl wird nicht angezeigt. Dies ist gezeigt in **Fig. 1**, in der die Strömung in einer Halsschlagader und einer Halsvene angezeigt werden. Das Bild wird erfasst mit einem konvexen Feld, und die Winkel zwischen der Strömungsrichtung und dem Ultraschallstrahl wechseln über das Bild. Man bemerke den Wechsel der geschätzten Strömungsrichtung um die gestrichelte Linie in beiden Gefäßen herum aufgrund des Wechsels des Winkels zwischen der Strömung und dem Ultraschallstrahl. Dies ist eine der Hauptbeschränkungen von gegenwärtigen Ultraschallströmungssystemen, weil die meisten Gefäße parallel zur Hautoberfläche sind, und es deswegen ein Problem ist, einen ausreichend kleinen Winkel zwischen der Strömung und dem Strahl zu bekommen. Ebenso ist die Strömung oft nicht parallel zur Gefäßoberfläche, und es ist deswegen schwierig, falls nicht unmöglich, den korrekten Winkel abzuschätzen und ihn zu kompensieren [1].

[0003] Verschiedene Autoren haben versucht, dieses Artefakt zu beheben. Fox [2] schlug vor, zwei Strahlen zu verwenden, um die Querkomponente zu finden. Das System arbeitet gut für große Übertrager und Untersuchungen nahe dem Übertrager, aber die Varianz der Querkomponente erhöht sich in Situationen mit großen Tiefen und kleineren Übertragern, wie diese beim Herzabtasten durch die Rippen verwendet werden. Trahey und seine Mitarbeiter [3] haben vorgeschlagen, Speckle-Verfolgung zu verwenden, in welcher ein kleiner Suchbereich in einem Bild korreliert wird oder verglichen wird mit einem nachfolgenden Bild. Dieser Ansatz hat Probleme in Bezug auf die Bildrate, weil Bilder verglichen werden, und die Auflösung der Geschwindigkeitsschätzung kann niedrig sein. Newhouse et al. [4] entwickelte ein Verfahren, in welchem die totale Bandbreite des empfangenen Signals beeinflusst wird durch die Quergeschwindigkeit. Es ist jedoch oft schwierig, diese Bandbreite aufgrund des inhärenten Rauschens im Signal aufzufinden.

[0004] In dieser Erfindung wird ein neuer und verbesserter Schätzer für den Ansatz, der zuvor in [5] und [6] beschrieben wurde, präsentiert, welcher es ermöglicht, den Geschwindigkeitsvektor zu schätzen, unter Verwendung eines transversalen modulierten Sondenfeldes.

Zusammenfassung der Erfindung

[0005] Ein neuer Schätzer zur Auffindung der Geschwindigkeit quer zum Ultraschallstrahl wurde entwickelt. Der Schätzer berücksichtigt den Einfluss von der Axialgeschwindigkeit sowohl durch eine Subtraktion von Phasenverschiebungen und durch Verfolgung, wie weiter unten beschrieben unter der Überschrift Verwendung axialer Geschwindigkeitskompensation. Die Verfolgung wird durchgeführt zwischen aufeinanderfolgenden Zeilen, um den axialen Bereich der Verfolgung zu minimieren und dadurch den Effekt der Geschwindigkeitsdispersion. Der Schätzer kompensiert ebenso teilweise die Differenz in der Modulationsperiode der axialen und der transversalen Modulation, durch Einbeziehung einer zeitlichen Verzögerung verschieden von 1, wie verwendet im traditionellen Autokorrelationsansatz. Der Effekt von Rauschen wird berücksichtigt durch Mittelwertbildung von HF-Proben über die Impulslänge. Die Schätzung der aktuellen Mittelfrequenz vor der Mittelwert-

bildung berücksichtigt ebenso den Effekt der Dämpfung. Dieser neue Schätzer ist nicht verzerrt, weil die tatsächliche mittlere Modulationsfrequenz des Querfeldes geschätzt wird, bevor sie in den Schätzer eingegeben wird. Dies kann getan werden, weil der Schätzer die mittlere Geschwindigkeit in der transversalen Richtung findet.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

[0006] Tabelle 1 Simulationsparameter für monochromatische Simulation.

[0007] Tabelle 2 Simulationsparameter für Simulationen, welche das Feld II-Simulationsprogramm verwenden.

[0008] Fig. 1 zeigt ein Farbflussbild der Halsarterie und der Halsvene, abgetastet mit einem konvexen Feldübertrager. Man bemerke den Wechsel des Winkels zwischen dem Ultraschallstrahl und dem Geschwindigkeitsvektor um die gestrichelte Linie herum.

[0009] Fig. 1A: zeigt ein schematisches Blockdiagramm des Gerätes der Erfindung.

[0010] Fig. 2 zeigt die In-Phasen-(Decken) und die Quadratur-(Boden)-Komponente des Sondenfeldes als Funktion der lateralen Verschiebung.

[0011] Fig. 3 zeigt eine räumlich-temporale Fourier-Transformation des komplexen Sondenfeldes. Ein Konturplot des normalisierten Amplitudenspektrums wird gezeigt mit 6 dB zwischen den Konturen.

[0012] Fig. 4 zeigt die geschätzte Geschwindigkeit für ein monochromatisches Feld.

[0013] Fig. 5 zeigt die geschätzte Geschwindigkeit für Speckle-Simulation.

[0014] Fig. 6 zeigt das Simulationsergebnis für ein Signal-Rausch-Verhältnis von 0 dB.

[0015] Fig. 7 zeigt die geschätzten Geschwindigkeiten für verschiedene Winkel für einen Stecker und eine Zeitverzögerung von 4 im Autokorrelationsschätzer.

[0016] Fig. 8 zeigt das geschätzte parabolische Geschwindigkeitsprofil für Strömung senkrecht zum Ultraschallstrahl.

[0017] Fig. 9 zeigt das geschätzte parabolische Geschwindigkeitsprofil für Strömung senkrecht zum Ultraschallstrahl. Der Mittelwert von 50 wird geschätzt \pm eine Standardabweichung.

Messung der transversalen Geschwindigkeiten

[0018] Herkömmliche Geschwindigkeitsschätzsysteme messen oder schätzen lediglich die axiale Geschwindigkeit. Unter axialer Geschwindigkeit wird die Komponente des Geschwindigkeitsvektors in der Richtung der Ausbreitung der Ultraschallenergie vom Ultraschallübertrager verstanden. In herkömmlichen System wird die Messung durchgeführt durch Emission eines sinusförmig gepulsten Ultraschallfeldes in einer Richtung einer Anzahl von Malen. Das zurückgeworfene Signal wird dann bei einer interessierenden Tiefe von d_0 abgetastet. Das abgetastete Signal für einen nahezu monochromatischen Impuls ist gegeben durch [7]

$$r(i) = \cos\left(2\pi \frac{2v_z}{c} f_0 i T_{prf} + \phi\right) \quad (1)$$

wobei c die Schallgeschwindigkeit ist, v_z die Blutgeschwindigkeitskomponente in Ultraschallrichtung, f_0 die emittierte Mittelfrequenz, i die Impulsanzahl, T_{prf} die Zeit zwischen Impulsemissionen, und ϕ ein beliebiger Phasenfaktor ist, der von der Tiefe abhängt. Die Frequenz des zurückgeworfenen Signals

$$f_p = \frac{2v_z}{c} f_0 \quad (2)$$

ist demnach proportional zur Blutgeschwindigkeit und kann bestimmt werden als entweder eine Mittelfrequenz im Spektrum des empfangenen Signals oder eine Phasenverschiebung.

[0019] Geschwindigkeit transversal zum Ultraschall kann nicht geschätzt werden vom abgetasteten Signal, und ein Signal, das beeinflusst ist durch die transversale Geschwindigkeit, muss verwendet werden. Der zugrundeliegende Mechanismus, der es ermöglicht, axiale Geschwindigkeitsschätzung durchzuführen, sind die Oszillationen im emittierten Signal. Einfügung einer transversalen, räumlichen Oszillation im Ultraschallfeld veranlasst die transversale Geschwindigkeit, das empfangene Signal zu beeinflussen, wie beschrieben in [5] und [6]. Das empfangene Signal kann dann geschrieben werden als:

$$r_i(i) = \cos(2\pi f_p i T_{prf}) \cos(2\pi \frac{v_x}{d_x} i T_{prf}) \quad (3)$$

wobei v_x die transversale Geschwindigkeit ist und d_x die laterale Modulationsperiode. Die Frequenz aufgrund der transversalen Bewegung kann geschrieben werden

$$f_x = \frac{v_x}{d_x} \quad (4)$$

[0020] Solch ein Ansatz wurde vorgeschlagen in [6], [5], [8].

[0021] Die Geschwindigkeiten können sowohl positiv als auch negativ sein, und ein Signal mit einem einseitigen Spektrum sollte eingesetzt werden, um die Region von Interesse abzutasten. Dies kann gefunden werden durch Durchführung einer Hilbert-Transformation auf Signale, und für die axiale Geschwindigkeitsschätzung ist das abgetastete Signal

$$r_q(i) = \exp(j2\pi \frac{2v_z}{c} f_0 i T_{prf} + \phi) \quad (5)$$

[0022] Eine räumliche Hilbert-Transformation muss angewendet werden, wenn eine transversale Geschwindigkeit gefunden wird, und dies kann angenähert werden, indem man zwei parallele Sondenstrahlen hat, die angezeigt werden in einem Abstand $d_x/4$, um das räumliche Quadraturfeld zu erhalten.

Abweichung des Schätzers

[0023] Das empfangene und abgetastete, phasen-räumliche Quadraturfeld kann geschrieben werden als

$$r_{sq}(i) = \cos(2\pi f_p i T_{prf}) \exp(j2\pi f_x i T_{prf}) \quad (6)$$

unter der Annahme, dass sowohl die räumlichen und zeitlichen Felder monochromatisch sind und von Einheitsamplitude. Das empfangene Feld ist demnach sowohl beeinflusst von der axialen und der transversalen Geschwindigkeit. Der Einfluss von der axialen Geschwindigkeit auf die transversale Schätzung wurde zuvor kompensiert, indem verfolgte Daten verwendet wurden, aber jeder Fehler in der Verfolgung aufgrund einer schlechten axialen Geschwindigkeitsschätzung kann die transversale Geschwindigkeitsschätzung beeinflussen.

Grundlegender Schätzer

[0024] Die axiale Geschwindigkeitskompensation durch Verfolgung kann vermieden werden unter Verwendung des fortschrittlicheren Schätzers, der in diesem Abschnitt entwickelt wird.

[0025] Die zeitliche Hilbert-Transformation von (6) führt zum temporalen quadraturräumlichen Quadraturfeldsignal:

$$r_{sqh}(i) = \sin(2\pi f_p i T_{prf}) \exp(j2\pi f_x i T_{prf}) \quad (7)$$

[0026] Neuformulierung von (6) und (7) unter Verwendung der Euler-Gleichungen führt zu

$$r_{sq} = \frac{1}{2} (\exp(j2\pi T_{prf} (f_x + f_p)) + \exp(j2\pi T_{prf} (f_x - f_p))) \quad (8)$$

$$r_{sqh} = \frac{1}{2} (\exp(j2\pi T_{prf} (f_x + f_p)) - \exp(j2\pi T_{prf} (f_x - f_p))).$$

[0027] Zwei neue Signale werden gebildet aus:

$$\begin{aligned}
r_1 &= r_{sq}(i) + jr_{sqh}(i) \\
&= \frac{1}{2}(\exp(j2\pi T_{prf}(f_x + f_p)) + \exp(j2\pi T_{prf}(f_x - f_p))) \\
&\quad + j\frac{1}{2j}(\exp(j2\pi T_{prf}(f_x + f_p)) - \exp(j2\pi T_{prf}(f_x - f_p))) \\
&= \exp(j2\pi T_{prf}(f_x + f_p))
\end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
r_2 &= r_{sq}(i) - jr_{sqh}(i) \\
&= \frac{1}{2}(\exp(j2\pi T_{prf}(f_x + f_p)) + \exp(j2\pi T_{prf}(f_x - f_p))) \\
&\quad - j\frac{1}{2j}(\exp(j2\pi T_{prf}(f_x + f_p)) - \exp(j2\pi T_{prf}(f_x - f_p))) \\
&= \exp(j2\pi T_{prf}(f_x - f_p))
\end{aligned} \tag{10}$$

[0028] Das Finden der Veränderungen in der Phase als Funktion der Sondenanzahl der zwei Signale ergibt:

$$\begin{aligned}
d\Theta_1 &= \frac{\Delta\Theta_1}{\Delta i} = 2\pi T_{prf}(f_x + f_p) \\
d\Theta_2 &= \frac{\Delta\Theta_2}{\Delta i} = 2\pi T_{prf}(f_x - f_p)
\end{aligned} \tag{11}$$

[0029] Addieren der zwei Phasen ergibt

$$d\Theta_1 + d\Theta_2 = 2\pi 2T_{prf}f_x = 4\pi T_{prf} \frac{v_x}{d_x} \tag{12}$$

und Subtraktion derselben ergibt

$$d\Theta_1 - d\Theta_2 = 2\pi 2T_{prf}f_p = 4\pi T_{prf} \frac{2v_z}{c} f_0 \tag{13}$$

[0030] Die transversale Geschwindigkeit kann demnach direkt gefunden werden aus:

$$v_x = \frac{(d\Theta_1 + d\Theta_2)d_x}{2\pi 2T_{prf}} \tag{14}$$

und die axiale Geschwindigkeit aus

$$v_z = \frac{(d\Theta_1 - d\Theta_2)c}{2\pi 4T_{prf}f_0} \tag{15}$$

[0031] Die Kombination der Signale erlaubt es deswegen, automatisch jeweils die axialen und Querbewegungen zu kompensieren. Dies ist besonders wichtig für die Querschätzung, aufgrund der raschen Variation in der Phase für eine axiale Bewegung im Vergleich zu einer transversalen Bewegung. Eine Alternative zu (15) ist es, die axiale Geschwindigkeit durch einen herkömmlichen Schätzer zu finden, unter Bildung eines empfangenen Strahles mit einer herkömmlichen Strahlformung ohne transversale Modulation. Dies kann möglicherweise eine höhere Genauigkeit erzielen unter dem Aufwand eines gesonderten Empfangsstrahlformers.

[0032] Eine Alternative zur Kombination der Signale in (10) würde sein, die Autokorrelationsfunktion der zwei Signale zu finden und dann die Subtraktion oder Addition auf den Autokorrelationen durchzuführen. Die Geschwindigkeitskomponenten werden gefunden von den Phasenverschiebungen in den kombinierten Autokor-

relationen.

[0033] Die Bestimmung der Phasenveränderungen des komplexen Signals kann z.B. vorgenommen werden unter Verwendung des Standardautokorrelationsschätzers [9], [7]. Mit dem komplexen Signal

$$r(i) = x(i) + jy(i) \quad (16)$$

wird die Phasenveränderung bestimmt durch

$$d\hat{\Theta} = \arctan \left(\frac{\sum_{i=0}^{N-1} y(i)x(i-1) - y(i-1)x(i)}{\sum_{i=0}^{N-1} x(i)x(i-1) + y(i)y(i-1)} \right) \quad (17)$$

[0034] Unter Verwendung der geschätzten komplexen Autokorrelation des Signals

$$\hat{R}(m) = \frac{1}{N-m} \sum_{i=0}^{N-m} r^*(i)r(i+m) \quad (18)$$

dies kann ebenso festgestellt werden als

$$d\hat{\Theta} = \arctan \left(\frac{\Im\{R(1)\}}{\Re\{R(1)\}} \right) \quad (19)$$

worin $\Im\{R(1)\}$ den Imaginärteil der komplexen Autokorrelation $\Re\{R(1)\}$ den Realteil bezeichnet und m die Zeitverzögerung in der Autokorrelation ist. Dies ist äquivalent zur Findung der Mittelfrequenz im Leistungsdichtespektrum, gegeben durch [7]

$$\bar{f} = \frac{\int_{f_{pf}}^{f_{pf}^{1/2}} fP(f)df}{\int_{f_{pf}}^{f_{pf}^{1/2}} P(f)df} \quad (20)$$

worin $R(m) \leftrightarrow P(f)$, aus denen die axiale Geschwindigkeit bestimmt wird durch

$$v_z = \frac{c}{2} \cdot \frac{\bar{f}}{f_0} \quad (21)$$

[0035] Dieser Schätzer findet demnach die mittlere Geschwindigkeit. Dieser Schätzer ist ebenso unverzerrt für weißes Rauschen, das dem Eingangssignal $r(i)$ zugefügt ist [7].

[0036] Die Auffindung der Phasenveränderung durch (17) zieht die Auffindung des Argustangens des Argumentes nach sich, und die transversale Geschwindigkeitsschätzung durch (14) hängt demnach von zwei Argustangens ab. Dies erzeugt Probleme, wenn die Phase springt, und eine bessere Berechnung kann gefunden werden unter Verwendung des Bezuges

$$\tan(A+B) = \frac{\tan(A) + \tan(B)}{1 - \tan(A)\tan(B)} \quad (22)$$

dann

$$\begin{aligned} \tan(d\Theta_1 + d\Theta_2) &= \tan\left(\arctan\left(\frac{\Im\{R_1(1)\}}{\Re\{R_1(1)\}}\right) + \arctan\left(\frac{\Im\{R_2(1)\}}{\Re\{R_2(1)\}}\right)\right) \\ &= \frac{\frac{\Im\{R_1(1)\}}{\Re\{R_1(1)\}} + \frac{\Im\{R_2(1)\}}{\Re\{R_2(1)\}}}{1 - \frac{\Im\{R_1(1)\}}{\Re\{R_1(1)\}} \frac{\Im\{R_2(1)\}}{\Re\{R_2(1)\}}} \\ &= \frac{\Im\{R_1(1)\}\Re\{R_2(1)\} + \Im\{R_2(1)\}\Re\{R_1(1)\}}{\Re\{R_1(1)\}\Re\{R_2(1)\} - \Im\{R_1(1)\}\Im\{R_2(1)\}} \end{aligned} \quad (23)$$

worin $R_1(1)$ der komplexe Autokorrelationswert mit Verzögerung 1 für $r_1(i)$ und $R_2(1)$ der komplexe Autokorrelationswert mit Verzögerung 1 für $r_2(i)$ ist. Ein ähnlicher Ausdruck kann abgeleitet werden für die axiale Geschwindigkeit, und die Schätzer sind:

$$v_x = \frac{d_x}{2\pi 2T_{prf}} \arctan\left(\frac{\Im\{R_1(1)\}\Re\{R_2(1)\} + \Im\{R_2(1)\}\Re\{R_1(1)\}}{\Re\{R_1(1)\}\Re\{R_2(1)\} - \Im\{R_1(1)\}\Im\{R_2(1)\}}\right) \quad (24)$$

und

$$v_z = \frac{c}{2\pi 4T_{prf} f_0} \arctan\left(\frac{\Im\{R_1(1)\}\Re\{R_2(1)\} - \Im\{R_2(1)\}\Re\{R_1(1)\}}{\Re\{R_1(1)\}\Re\{R_2(1)\} + \Im\{R_1(1)\}\Im\{R_2(1)\}}\right) \quad (25)$$

[0037] Diese zwei neuen Schätzer kompensieren die Phasenverschiebung in der transversalen Richtung der Geschwindigkeitskomponente, die geschätzt wird unter Verwendung Geschwindigkeitskomponenten vierter Ordnung im Vergleich mit der zweiten Ordnungsschätzung, verwendet in [6].

Kompensation für verschiedene Wellenlängen

[0038] Die laterale Modulationsperiode wird allgemein größer sein als die Wellenlänge des Sondenultraschallimpulses. Für eine vorgegebene Geschwindigkeit wird die Veränderung in der Phase für das transversale Signal demnach kleiner sein als die Veränderung in der Phase für das axiale Signal. Die Optimierung der Puls-wiederholzeit für beide Messungen simultan ist deswegen nicht möglich, und eine größere Änderung in der Phase für die transversale Bewegung muss künstlich eingeführt werden. Dies kann erreicht werden durch Verwendung einer Zeitverzögerung verschieden von eins im Autokorrelationsschätzer als

$$\begin{aligned} d\hat{\Theta} &= \frac{1}{k} \arctan\left(\frac{\Im\{R(k)\}}{\Re\{R(k)\}}\right) \\ \hat{R}(k) &= \frac{1}{N-k} \sum_{i=0}^{N-k} r^*(i)r(i+k) \end{aligned} \quad (26)$$

welcher dann direkt verwendet werden kann in (24) und (25).

[0039] Durch die Verwendung der Bedingung, dass die Phasenverschiebung die gleiche sein sollte für $v_x \approx v_z$, kann die Zeitverzögerung grob bestimmt werden durch:

$$k \approx \frac{d_x}{\lambda} \quad (27)$$

$$\lambda = \frac{c}{f_0}$$

[0040] Oft wird diese Gleichung einen größeren Wert für k liefern, und die Berechnung der Autokorrelation in (26) wird zu wenig Werte für eine niedrige Varianzschätzung beinhalten. Ein Kompromiss kann erreicht werden durch Verminderung von k , um sowohl eine größere Phasenverschiebung als auch eine ausreichende Anzahl von Datenwerten für die Berechnung von $\hat{R}(k)$ zu haben.

Optimierung im Fall von Rauschen und Dämpfung

[0041] Die Streuung von Ultraschall von Blut ist schwach, und es wird oft ein schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis nach der stationären Echounterdrückung gefunden. Ein Hauptaugenmerk ist deswegen, den Schätzer robust zu machen in einer verrauschten Umgebung. Dies kann erreicht werden durch Mittelwertbildung der Autokorrelationsschätzung über die Länge des abfragenden Impulses, was einer Durchführung einer angepassten Filterung entspricht. Die Länge des Impulses in Bezug auf HF-Sonden ist gegeben durch

$$N_p = \frac{M}{f_0} f_s \quad (28)$$

worin M die Anzahl von Perioden im Impuls ist (typischerweise 4 bis 8) und f_s die Abtastfrequenz ist. Die Autokorrelationsschätzung wird dann berechnet durch

$$\hat{R}(k) = \frac{1}{(N-k)N_p} \sum_{i=0}^{N-k} \sum_{n=-N_p/2}^{N_p/2-1} r^*(i, n + N_0) r(i + k, n + N_0) \quad (29)$$

[0042] Hierin bezeichnet $r(i, n)$ das empfangene Signal für die i -te Zeile und seine n -te HF-Probe. N_0 ist die Probenzahl für die Position der Geschwindigkeitsschätzung, und die Mittelwertbildung wird symmetrisch um diese Position herum durchgeführt, um die Effekte der Geschwindigkeitsverteilung zu verringern.

[0043] Die Mittelfrequenz f_0 des Ultraschallimpulses wird sich als Funktion der Tiefe ändern aufgrund der frequenzabhängigen Dämpfung des Gewebes. Die Anzahl von Proben N_p sollte sich deswegen ebenso ändern. Die tatsächliche mittlere Mittelfrequenz kann bestimmt werden durch

$$\bar{f}_0(z) = \frac{\int_{f_s/2}^{f_s/2} f P_{rf}(f, z) df}{\int_{f_s/2}^{f_s/2} P_{rf}(f, z) df} \quad (30)$$

worin f_s die Probenfrequenz ist, z die interessierende Tiefe ist und $P_{rf}(f, z)$ das Spektrum des empfangenen HF-Signals um die Tiefe z herum ist. $\bar{f}_0(z)$ kann verwendet werden in (28), um die Filterung an die Messsituation anzupassen.

Verwendung von axialer Geschwindigkeitskompensation

[0044] Der Schätzprozess kann ebenso optimiert werden, indem teilweise die axiale Geschwindigkeit kompensiert wird, wenn die transversale Geschwindigkeitsschätzung durchgeführt wird. Dies kann einfach durchgeführt werden, weil der entwickelte Schätzer im Wesentlichen die Phasenverschiebung von der Bewegung während des transversalen Schätzprozesses subtrahiert. Ob dies die tatsächliche Geschwindigkeit ist oder eine kleinere Phasenverschiebung ist, ist von keiner Bedeutung. Ebenso findet der Autokorrelationsschätzer die Phasenverschiebung von einer Zeile zur nächsten, und deswegen kann eine feste Phasenverschiebung oder eine äquivalente Verzögerung verwendet werden. Der Autokorrelationsschätzer ist gegeben durch:

$$\hat{R}(k) = \frac{1}{(N-k)N_p} \sum_{i=0}^{N-k} \sum_{n=-N_p/2}^{N_p/2-1} r^*(i, n + N_0 - n_s / 2) r(i + k, n + N_0 + n_s / 2) \quad (31)$$

worin n_s die axiale Bewegungskomponentenverzögerung ist, gegeben durch

$$n_s = \text{round}\left(k \frac{2v_z}{c} T_{prf} f_s\right) \quad (32)$$

abgerundet zu der nächsten Anzahl von Proben. Dies stellt sicher, dass der Schätzer die kleinste Phasenverschiebung von der axialen Bewegung zur Kompensation hat.

Schätzung der lateralen Modulationsperiode

[0045] Die transversale Geschwindigkeitsschätzung ist direkt proportional zur lateralen Modulationsperiode, und eine falsche Modulationsperiode gibt Anlass zu einer systematisch fehlerhaften Schätzung.

[0046] Die laterale Modulation weist kein scharf definiertes Bandpassspektrum auf, wie dies für den axialen Impuls gefunden wird. Dies kann erkannt werden aus [Fig. 2](#) und [Fig. 3](#). Die Autokorrelationsmethode jedoch schätzt die mittlere Frequenz, und eine Schätzung der mittleren Modulationsperiode kann demnach verwendet werden, um unverzerrte Schätzungen sicherzustellen. Dies wird erhalten, indem zunächst simuliert wird oder gemessen wird sowohl das In-Phasen- als auch das Quadraturfeld aus einem Punktstreuer, welcher sich vor-derhalb des Übertragers in einer interessierenden Tiefe bewegt. Die räumlich-temporale Fourier-Transformation $H(f_{\text{time}}, f_{\text{space}})$ des komplexen Abtastfeldes wird dann gefunden, wie gezeigt in [Fig. 3](#).

[0047] Der Realteil des transformierten Signals ist das In-Phasen-Feld, und der Imaginärteil ist die Quadraturkomponente. Das Spektrum ist ungefähr einseitig aufgrund der Hilbert-Transformationsbeziehung zwischen dem Real- und dem Imaginärteil des Signals. Die mittlere räumliche Frequenz kann dann gefunden werden aus:

$$\bar{f}_{\text{space}} = \frac{\int_{f_s/2}^{f_s/2} \int_{f_{sx}/2}^{f_{sx}/2} f_{\text{space}} |H(f_{\text{time}}, f_{\text{space}})|^2 df_{\text{time}} df_{\text{space}}}{\int_{f_s/2}^{f_s/2} \int_{f_{sx}/2}^{f_{sx}/2} |H(f_{\text{time}}, f_{\text{space}})|^2 df_{\text{time}} df_{\text{space}}} \quad (33)$$

unter der Annahme, dass das Streuungssignal vom Blut ein weißes Spektrum aufweist und homogen über den abgefragten Bereich ist. Hier ist f_{sx} die laterale räumliche Abtastfrequenz. Die mittlere laterale Modulationsperiode ist dann

$$\bar{d}_x = \frac{1}{\bar{f}_{\text{space}}} \quad (34)$$

[0048] [Fig. 3](#) und (33) deuten ebenso an, wie das Messungsfeld zu optimieren ist. Idealerweise sollte ein engbandiges, einseitiges Spektrum verwendet werden, um eine wohldefinierte Messsituation zu haben und dadurch eine präzise Geschwindigkeitsschätzung. Eine Messung der spektralen Spreizung wird erhalten durch:

$$\sigma^2[\bar{f}] = \frac{\int_{f_s/2}^{f_s/2} \int_{f_{sx}/2}^{f_{sx}/2} (f_{\text{space}} - \bar{f}_{\text{space}})^2 |H(f_{\text{time}}, f_{\text{space}})|^2 df_{\text{time}} df_{\text{space}}}{\int_{f_s/2}^{f_s/2} \int_{f_{sx}/2}^{f_{sx}/2} |H(f_{\text{time}}, f_{\text{space}})|^2 df_{\text{time}} df_{\text{space}}} \quad (35)$$

[0049] Dies kann die Basis für die Optimierung des räumlichen Quadraturfeldes bilden, und der niedrigste mögliche Wert von $\sigma^2_{f_{\text{space}}}$ wird dann zum besten Ergebnis führen.

Funktionalität der Erfindung

[0050] Das erste Beispiel in [Fig. 4](#) zeigt die Leistungsfähigkeit des neuen Schätzers für ein lediglich monochromatisches Feld, worin das Feld gegeben ist durch die Gleichung (6). Die Zeilen vom Origo bis '+' zeigen die wahren Geschwindigkeiten an. Die Zeilen vom Origo bis 'x' zeigen die jeweiligen mittleren Werte von allen Schätzungen an. Die Ellipsen repräsentieren jeweils eine Standardabweichung der Messung, in sowohl der transversalen als auch der axialen Richtung. Die Simulationsparameter sind in Tabelle 1 gegeben. Gauss'sches weißes Rauschen wurde den Signalen zugefügt. Es wird erkannt, dass der Schätzer korrekt die Geschwindigkeit ohne Fehler findet. Keine axiale Geschwindigkeitskompensation wird im Schätzer für diesen Plot verwendet, aber eine ähnliche Leistungsfähigkeit wird erhalten mit axialer Geschwindigkeitskompensation.

on.

[0051] Im zweiten Beispiel wird ein gepulstes Feld erzeugt durch das Feld II-Simulationsprogramm, beschrieben in [10] und [11], verwendet. Dieses Feld wurde gefaltet mit einem zweidimensionalen zufälligen Gauss-Signal zur Erzeugung eines Signals mit Speckle-Eigenschaften. Die empfangenen (HF-) Signale werden dann erzeugt durch Auswahl der geeigneten Daten von diesem zweidimensionalen Bild gemäß den transversalen und axialen Geschwindigkeiten. Die Signale werden dann um eine ganze Anzahl von Proben zwischen den Pulsemissionen verschoben. Die Simulationsparameter sind gegeben in Tabelle 2.

[0052] Die Ergebnisse der Simulation im zweiten Beispiel sind gezeigt in [Fig. 5](#) für ein Signal-Rausch-Verhältnis von 20 dB und für 100 verschiedene Schätzungen. Die axiale Geschwindigkeit wurde gefunden durch die normale Autokorrelationsschätzung mit HF-Mittelwertbildung, und der neue Schätzer wurde verwendet für die transversale Geschwindigkeit. Die axiale Geschwindigkeitskompensation, wie beschrieben, wurde verwendet im neuen Schätzer.

[0053] Die Erhöhung des Rauschens, um ein Signal-Rausch-Verhältnis von 0 dB zu erhalten, ergibt die Ergebnisse, die in [Fig. 6](#) gezeigt sind. Zufriedenstellende Ergebnisse können immer noch erkannt werden bei diesem niedrigen Signal-zu-Rausch-Verhältnis.

[0054] Um die Bewegung einer ganzen Anzahl von Proben im erzeugten Speckle-Muster zu vermeiden, wird eine volle Feld II-Simulation durchgeführt, unter Verwendung von grob 35.000 Punktstreuern. Die gleichen Parameter wie zuvor werden verwendet. Die Durchführung von Pfropfenströmungsschätzung für verschiedene Winkel ergibt die Schätzungen, die in [Fig. 7](#) gezeigt sind. Kein Rauschen wurde diesen Daten zugefügt, aber ähnliche Ergebnisse werden erhalten für Signal-Rausch-Verhältnisse oberhalb von 10 dB.

[0055] Eine volle Simulation mit parabolischem Strömungsprofil unter Verwendung von 36.000 Punktstreuern wurde durchgeführt für ein Gefäß mit einem Radius von 5 mm. Die Spitzengeschwindigkeit war 0.5 m/s, und das Gefäß war senkrecht zum Ultraschallstrahl. Ein herkömmliches Farbflusskartenbildungssystem würde in dieser Situation eine Geschwindigkeit von 0 m/s zeigen, und demnach zeigen, dass keine Geschwindigkeit vorliegt in dieser Position im Bild. Gauss'sches Rauschen wurde den Simulationsergebnissen zugefügt, um ein Signal-Rausch-Verhältnis von 20 dB zu erhalten, andernfalls wurden die gleichen Parameter wie zuvor verwendet. Ein wahres Geschwindigkeitsprofil wird gezeigt, wie die gestrichelte Linie. Im Vergleich dazu ist die Standardabweichung des Ergebnisses 0,050 m/s, und die Standardabweichung des Gesamtprofils ist -0,0067 m/s. Die Standardabweichung relativ zur maximalen Geschwindigkeit ist 10,1 %. [Fig. 9](#) zeigt, wenn die Simulation 50 Mal wiederholt wurde. Der Mittelwert \pm eine Standardabweichung wird gezeigt.

Referenzen

- [1] D.J. Phillips, K.W. Beach, and J. Primozich D. E. Strandness. Should results of ultrasound Doppler studies be reported in units of frequency or velocity? *Ultrasound Med. Biol.*, 15:205–212, 1989.
- [2] M. D. Fox, Multiple crossed-beam ultrasound Doppler velocimetry. *IEEE Trans. Son. Ultrason.*, SU-25:281–286, 1978.
- [3] G. E. Trahey, J. W. Allison, and O. T. von Ramm. Angle independent ultrasonic detection of blood flow. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, BME-34:965–967, 1987.
- [4] V. L. Newhouse, D. Censor, T. Vontz, J. A. Cisneros, and B. B. Goldberg. Ultrasound Doppler probing of flows transverse with respect to beam axis. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, BME-34:779–788, 1987.
- [5] J. A. Jensen and P. Munk. A new method for estimation of velocity vectors. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., Freq. Contr.*, 45:837–851, 1998.
- [6] Apparatus and method for determining movements and velocities of moving objects, International patent application, publication number WO 98/00719, published 8 January 1998.
- [7] J. A. Jensen. *Estimation of Blood Velocities Using Ultrasound: A Signal Processing Approach*. Cambridge University Press, New York, 1996.
- [8] P. Munk and J. A. Jensen. Performance of a vector velocity estimator. In *Proc. IEEE Ultrason. Symp.*, pages 1489–1493, 1998.
- [9] C. Kasai, K. Namekawa, A. Koyano, and R. Omoto. Real-time two-dimensional blood flow imaging using an autocorrelation technique. *IEEE Trans. Son. Ultrason.*, 32:458–463, 1985.
- [10] J. A. Jensen and N. B. Svendsen. Calculation of pressure fields from arbitrarily shaped, apodized, and excited ultrasound transducers. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., Freq. Contr.*, 39:262–267, 1992.
- [11] J. A. Jensen. Field: A program for simulating ultrasound systems. *Med. Biol. Eng. Comp.*, 10th Nordic-Baltic Conference on Biomedical Imaging, Vol. 4, Supplement 1, Part 1:351–353, 1996b.

Tabellen

Parameter	Werte
f_s	50 MHz
f_0	3 MHz
M	4
d_x	2 mm
T_{prf}	100 μ s
N	10
snr	$\sqrt{10}$
Zeitverzögerungskompensation	4

Tabelle 1: Simulationsparameter für monochromatische Simulation

Parameter	Wert
f_s	100 MHz
f_0	6 MHz
M	4
\bar{d}_x	2,26 mm
T_{prf}	100 μ s
N	20
snr	10
Zeitverzögerungskompensation	4
Übertragerelemente	128
Übertragerelementbreite	$N/2$
Übertragerelementhöhe	5 mm
Übertragerelementfuge	$N/10$
Übertragungsfokus	70 mm
Übertragungsapodisierung	von Hann Fenster
Empfängerfokus	fest auf 38,5 mm
Empfängerapodisierung	doppelt synchronisiert
Zentrum des Gefäßes	38,5 mm

Tabelle 2: Simulationsparameter für Simulationen, welche das Feld II Simulationsprogramm verwenden

Patentansprüche

1. Eine Vorrichtung zur Messung der Geschwindigkeit eines beweglichen Objektes oder einer Ansammlung von sich bewegenden Objekten, wobei die Vorrichtung aufweist: einen Generator zur Erzeugung von Impulsen von Anregungssignalen, einen emittierenden Übertrager zur Umformung dieser Anregungsimpulse in Wellenenergie und zur Emittierung dieser Wellenenergie in einer vorbestimmten Ausbreitungsrichtung, einen empfangenden Übertrager zum Empfangen von Signalen von dem beweglichen Objekt oder den beweglichen Objekten, die durch Wechselwirkung zwischen der Wellenenergie erzeugt wurden, welche von dem emittierenden Übertrager emittiert wurde, wobei der emittierende Übertrager und der empfangende Übertrager jeweilige Empfindlichkeiten aufweisen, welche in Kombination eine resultierende Empfindlichkeit aufweisen, die räumlich in einer Richtung quer zur Richtung der Fortbewegung oszilliert, gekennzeichnet dadurch, dass die Geschwindigkeit quer zum Strahl durch den Schätzer gefunden wird, gegeben durch

$$v_x = \frac{d_x}{2\pi k 2T_{prf}} \arctan \left(\frac{\Im\{R_1(k)\}\Re\{R_2(k)\} + \Im\{R_2(k)\}\Re\{R_1(k)\}}{\Re\{R_1(k)\}\Re\{R_2(k)\} - \Im\{R_1(k)\}\Im\{R_2(k)\}} \right) \quad (36)$$

und die Geschwindigkeit entlang des Strahls durch den Schätzer gefunden wird, gegeben durch

$$v_z = \frac{c}{2\pi k 4T_{prf} f_0} \arctan \left(\frac{\Im\{R_1(k)\}\Re\{R_2(k)\} - \Im\{R_2(k)\}\Re\{R_1(k)\}}{\Re\{R_1(k)\}\Re\{R_2(k)\} + \Im\{R_1(k)\}\Im\{R_2(k)\}} \right) \quad (37)$$

wobei $\Im\{R(1)\}$ den Imaginärteil der komplexen Autokorrelation bezeichnet und $\Re\{R(1)\}$ den Realteil bezeichnet und wobei $R_1(k)$ den komplexen Autokorrelationswert mit Verzögerung k für das Signal $r_1(i)$ bezeichnet, gegeben durch

$$r_1(i) = r_{sq}(i) + jr_{sqh}(i) \quad (38)$$

wobei $r_{sq}(i)$ das empfangene und räumlich abgetastete Quadraturfeld ist, und $r_{sqh}(i)$ die räumlich Hilberttransformation von $r_{sq}(i)$ ist und $R_2(1)$ der komplexe Autokorrelationswert mit Verzögerung eins für das Signal $r_2(i)$ ist, gegeben durch

$$r_2(i) = r_{sq}(i) - jr_{sqh}(i), \quad (39)$$

wobei i die Pulsechozeilennummer angibt, c die Schallgeschwindigkeit ist, f_0 die mittlere Frequenz der Übertrager ist, d_x die laterale Modulationsperiode des Strahls ist und T_{prf} die Zeit zwischen Pulsemissionen ist.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, wobei eine Verzögerung größer als eins in den Schätzern verwendet wird.

3. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei der das abgetastete Signal zu

$$\hat{R}(k) = \frac{1}{(N-k)N_p} \sum_{i=0}^{N-k} \sum_{n=-N_p/2}^{N_p/2-1} r^*(i, n + N_0) r(i+k, n + N_0) \quad (40)$$

summiert wird,

wobei $r(i, n)$ das Signal für die i -te Zeile und ihre n -te HF-Probe ist, N_0 die Nummer des Abtastwertes für die Position der Geschwindigkeitsschätzung ist und N_p die Anzahl von Abtastwerten in einem Segment darstellt.

4. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei der die geschätzte Mittelfrequenz, die in Geschwindigkeitsschätzern verwendet wird, gemäß

$$\tilde{f}_0(z) = \frac{\int_{f_s/2}^{f_s/2} f P_{rf}(f, z) df}{\int_{f_s/2}^{f_s/2} P_{rf}(f, z) df} \quad (41)$$

gefunden wird,

wobei f_s die Abtastfrequenz ist, z die interessierende Tiefe ist, $P_{rf}(f, z)$ das Spektrum des empfangenen HF-Signals um die Tiefe z herum ist und f die Zeitfrequenz ist.

5. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei der die Axialgeschwindigkeitskomponente unter Verwendung von

$$\hat{R}(k) = \frac{1}{(N-k)N_p} \sum_{i=0}^{N-k} \sum_{n=-N_p/2}^{N_p/2-1} r^*(i, n + N_0 - n_s/2) r(i+k, n + N_0 + n_s/2) \quad (42)$$

kompensiert wird,

wobei n_0 die axiale Bewegungskombinationsverzögerung durch

$$n_s = \text{round} \left(k \frac{2v_z}{c} T_{prf} f_s \right) \quad (43)$$

zur Berechnung der Autokorrelation gegeben ist.

6. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei der die Querschwingungsfrequenz, die im Geschwindigkeitsschätzer verwendet wird, durch

$$\bar{f}_{space} = \frac{\int_{f_s/2}^{f_s/2} \int_{f_{sx}/2}^{f_{sx}/2} f_{space} |H(f_{time}, f_{space})|^2 df_{time} df_{space}}{\int_{f_s/2}^{f_s/2} \int_{f_{sx}/2}^{f_{sx}/2} |H(f_{time}, f_{space})|^2 df_{time} df_{space}} \quad (44)$$

bestimmt wird,

wobei f_{sx} die laterale räumliche Abtastfrequenz ist und $H(f_{time}, f_{space})$ die räumlich temporäre Fouriertransformation des komplexen Abtastfeldes ist.

7. Verfahren zur Schätzung der Geschwindigkeit eines beweglichen Objekts oder einer Ansammlung von beweglichen Objekten, wobei das Verfahren die Emission eines Anregungssignals von Impulsen von Wellenenergie in einer vorbestimmten Ausbreitungsrichtung aufweist, wobei wenigstens ein Teil der Wellenenergie mit dem beweglichen Objekt oder der Ansammlung von beweglichen Objekten Wechselwirken wird, das Empfangen reflektierter Signale von dem beweglichen oder den beweglichen Objekten, die sich aus der Wechselwirkung von emittierter Wellenenergie mit dem beweglichen Objekt oder der Ansammlung von beweglichen Objekten ergibt, wobei die Emission des Anregungssignals und der Empfang von reflektierten Signalen jeweilige Empfindlichkeiten haben, welche in Kombination eine sich ergebende Empfindlichkeit aufweisen, die räumlich in einer Richtung quer zur Ausbreitungsrichtung oszilliert, gekennzeichnet dadurch, dass die Geschwindigkeit v_x quer zur vorbestimmten Richtung durch den Schätzer geschätzt wird, gegeben durch

$$v_x = \frac{d_x}{2\pi k 2T_{prf}} \arctan \left(\frac{\Im\{R_1(k)\}\Re\{R_2(k)\} + \Im\{R_2(k)\}\Re\{R_1(k)\}}{\Re\{R_1(k)\}\Re\{R_2(k)\} - \Im\{R_1(k)\}\Im\{R_2(k)\}} \right) \quad (36)$$

und Schätzung der Geschwindigkeit v_z entlang der vorbestimmten Richtung durch den Schätzer, gegeben durch

$$v_z = \frac{c}{2\pi k 4T_{prf} f_0} \arctan \left(\frac{\Im\{R_1(k)\}\Re\{R_2(k)\} - \Im\{R_2(k)\}\Re\{R_1(k)\}}{\Re\{R_1(k)\}\Re\{R_2(k)\} + \Im\{R_1(k)\}\Im\{R_2(k)\}} \right) \quad (37)$$

wobei $\Im\{R(1)\}$ den Imaginärteil der komplexen Autokorrelation bezeichnet und $\Re\{R(1)\}$ den Realteil bezeichnet und wobei $R_1(k)$ der komplexe Autokorrelationswert mit Verzögerung k für das Signal $r_1(i)$ durch

$$r_1(i) = r_{sq}(i) + jr_{sqh}(i) \quad (38)$$

gegeben ist,

wobei $r_{sq}(i)$ das empfangene abgetastete räumliche Quadraturfeld ist und $r_{sqh}(i)$ die räumliche Hilberttransformation von $r_{sq}(i)$ und $R_2(1)$ der komplexe Autokorrelationswert mit Verzögerung eins für das Signal $r_2(i)$ durch

$$r_2(i) = r_{sq}(i) - jr_{sqh}(i) \quad (39)$$

gegeben ist,

wobei i die Pulsechozeilennummer bezeichnet, c die Schallgeschwindigkeit ist, f_0 die Mittelfrequenz der Übertrager ist, d_x die laterale Modulationsperiode des Strahls ist, und T_{prf} die Zeit zwischen Impulsemissionen ist.

8. Verfahren nach Anspruch 7, bei dem das abgetastete Signal zu

$$\hat{R}(k) = \frac{1}{(N-k)N_p} \sum_{i=0}^{N-k} \sum_{n=-N_p/2}^{N_p/2-1} r^*(i, n + N_0) r(i + k, n + N_0) \quad (40)$$

addiert wird,

wobei $r(i, n)$ das Signal für die i -te Zeile bezeichnet und seinen n -te HF-Abtastwert, N_0 die Abtastwertsnummer für die Position der Geschwindigkeitsschätzung ist und N_p die Anzahl von Abtastwerten in einem Segment ist.

9. Verfahren nach Anspruch 7, bei dem die geschätzte Mittelfrequenz im Geschwindigkeitsschätzer durch

$$\bar{f}_0(z) = \frac{\int_{f_s/2}^{f_s/2} f P_{rf}(f, z) df}{\int_{f_s/2}^{f_s/2} P_{rf}(f, z) df} \quad (41)$$

bestimmt wird,

wobei f_s die Abtastfrequenz ist, z die interessierende Tiefe ist, $P_{rf}(f, z)$ das Spektrum des empfangenen HF-Signals um die Tiefe z herum ist und f die temporale Frequenz ist.

10. Verfahren nach Anspruch 7, bei dem die axiale Geschwindigkeitskomponente unter Verwendung von

$$\hat{R}(k) = \frac{1}{(N-k)N_p} \sum_{i=0}^{N-k} \sum_{n=-N_p/2}^{N_p/2-1} r^*(i, n + N_0 - n_s/2) r(i+k, n + N_0 + n_s/2) \quad (42)$$

kompensiert wird,

wobei n_s die axiale Bewegungskombinationsverzögerung durch

$$n_s = \text{round}\left(k \frac{2v_z}{c} T_{prf} f_s\right) \quad (43)$$

gegeben ist,

zur Berechnung der Autokorrelation.

11. Verfahren nach Anspruch 7, bei dem die Quermodulationsfrequenz, die im Geschwindigkeitsschätzer verwendet wird, gemäß

$$\bar{f}_{space} = \frac{\int_{f_s/2}^{f_s/2} \int_{f_{sx}/2}^{f_{sx}/2} f_{space} |H(f_{time}, f_{space})|^2 df_{time} df_{space}}{\int_{f_s/2}^{f_s/2} \int_{f_{sx}/2}^{f_{sx}/2} |H(f_{time}, f_{space})|^2 df_{time} df_{space}} \quad (44)$$

bestimmt wird,

wobei f_{sx} die laterale räumliche Abtastfrequenz und $H(f_{time}, f_{space})$ die räumlich temporäre Fouriertransformation des komplexen Abtastfeldes ist.

Es folgen 9 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

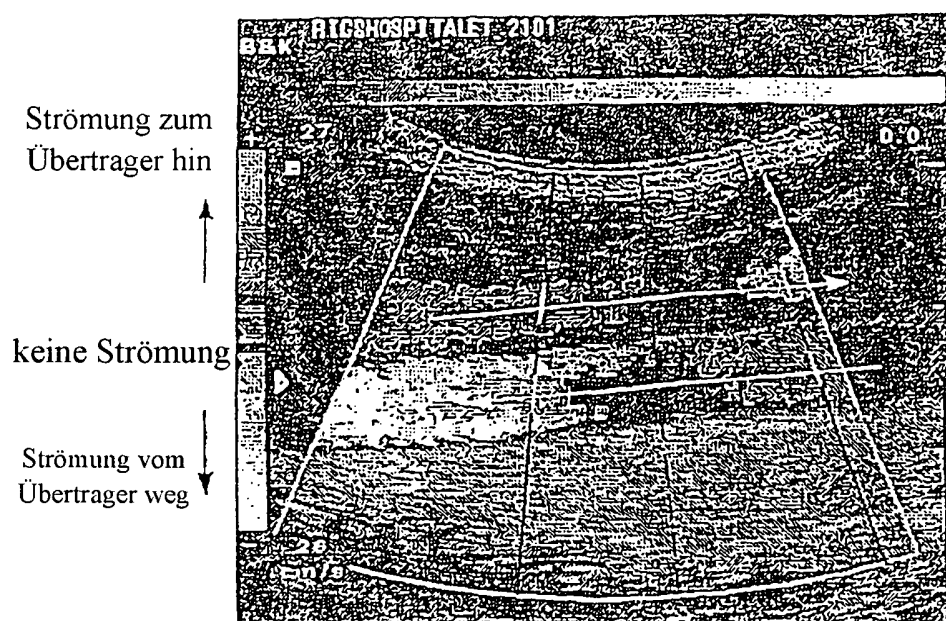


Fig. 1

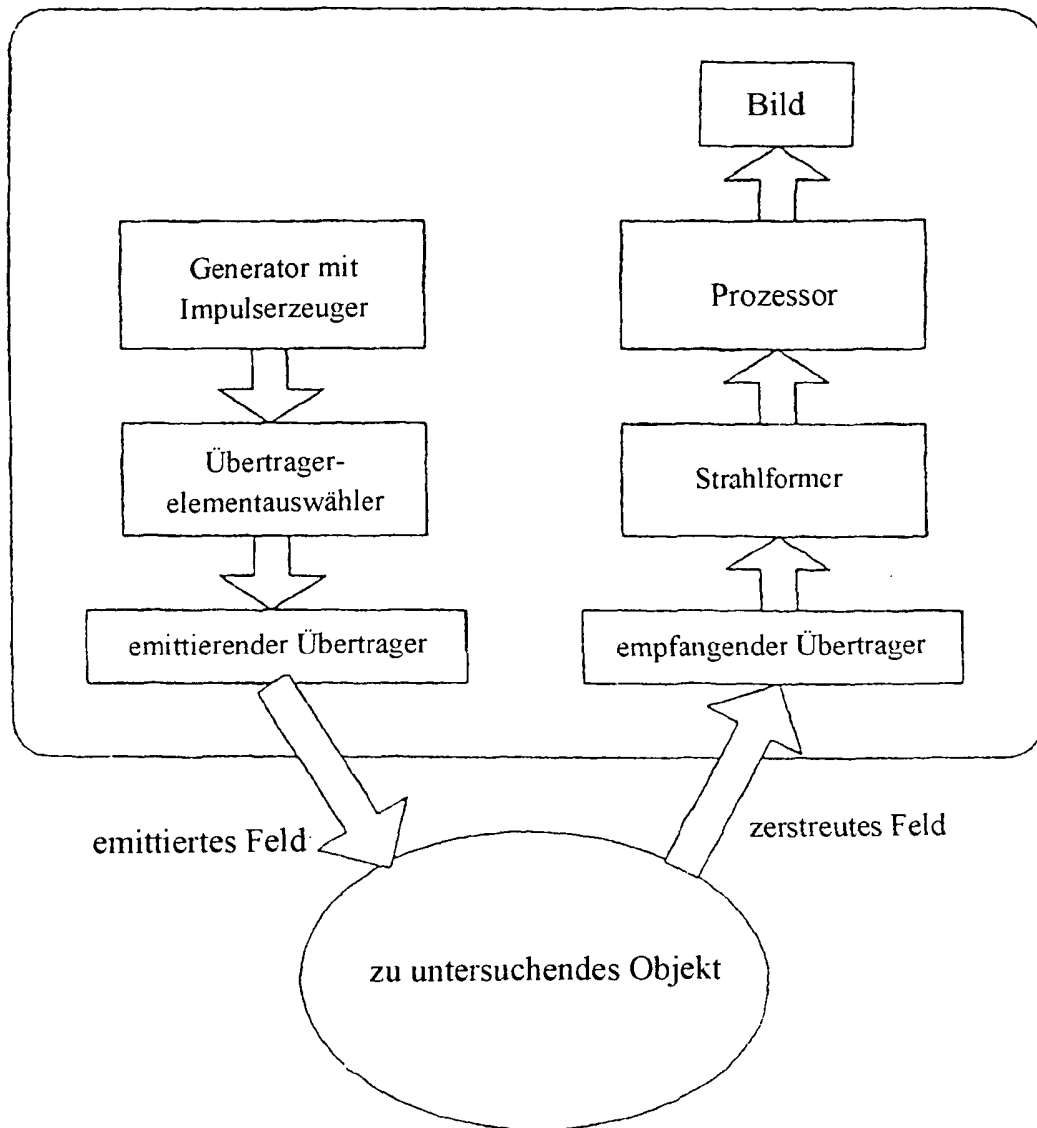


Fig. 1A

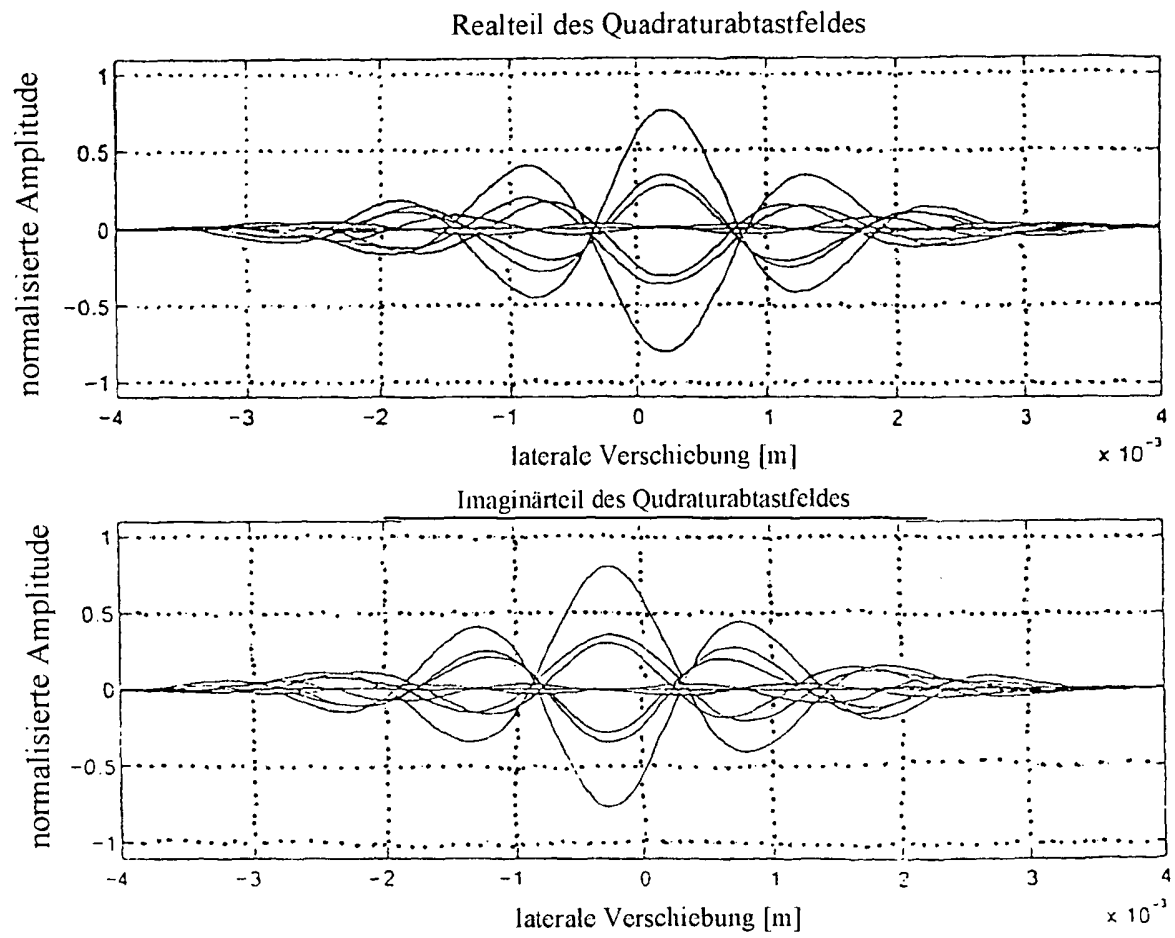


Fig. 2

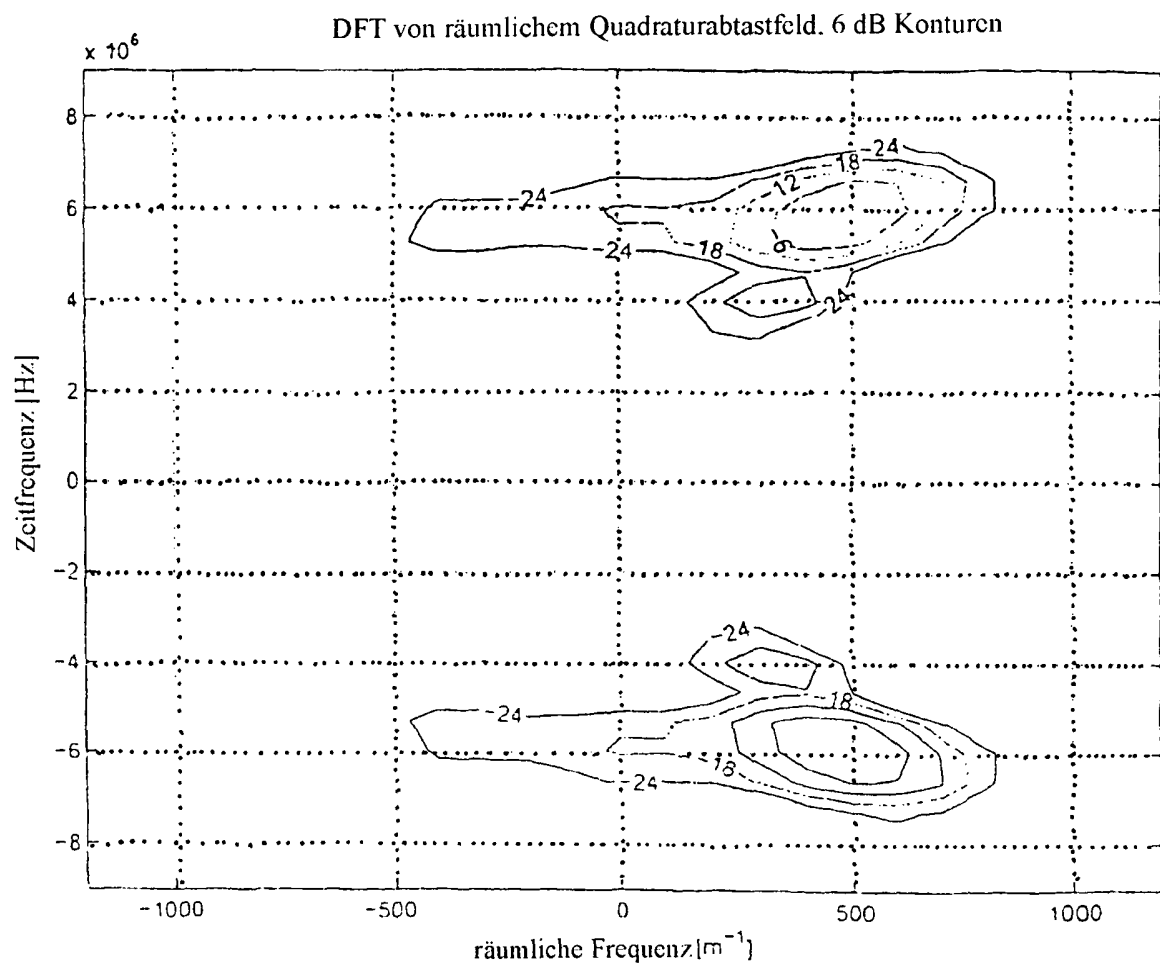


Fig. 3

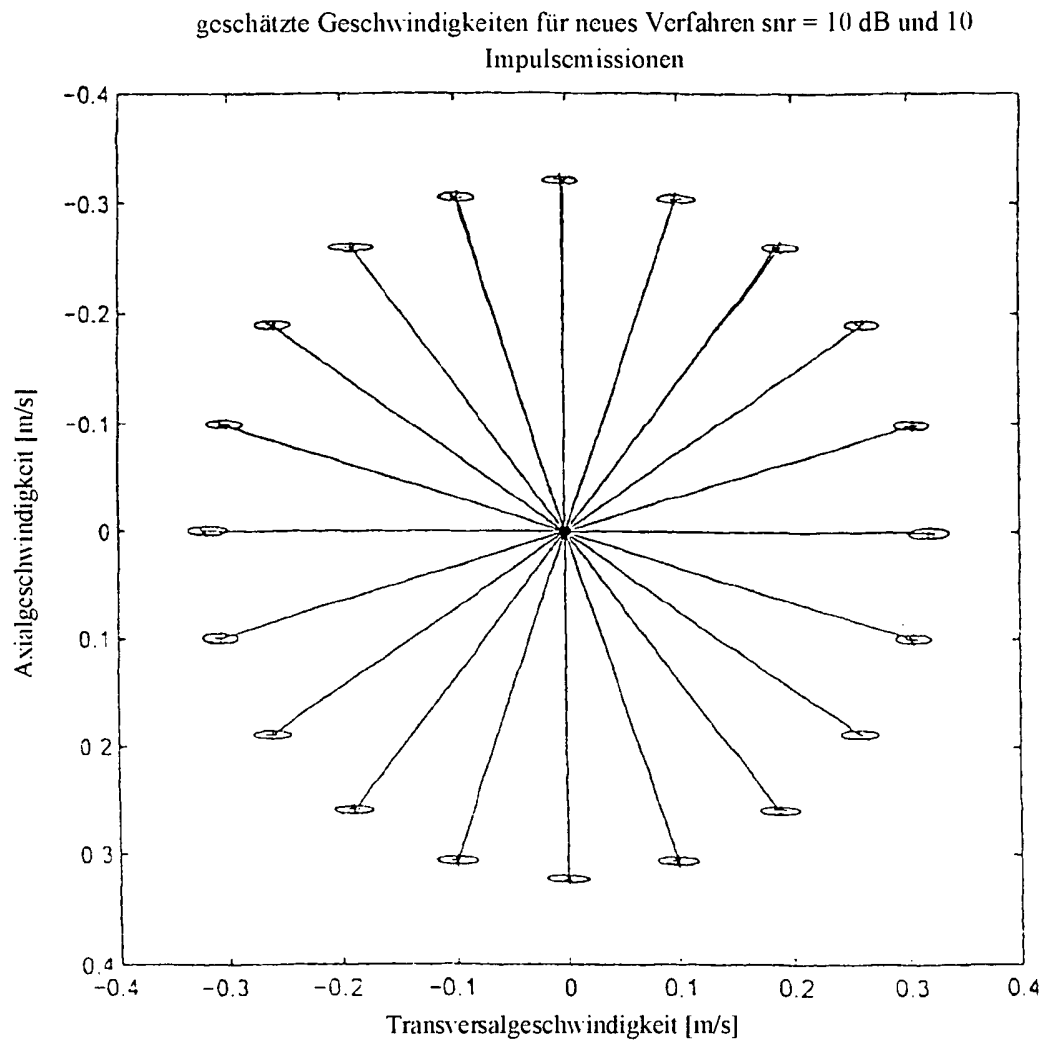


Fig. 4

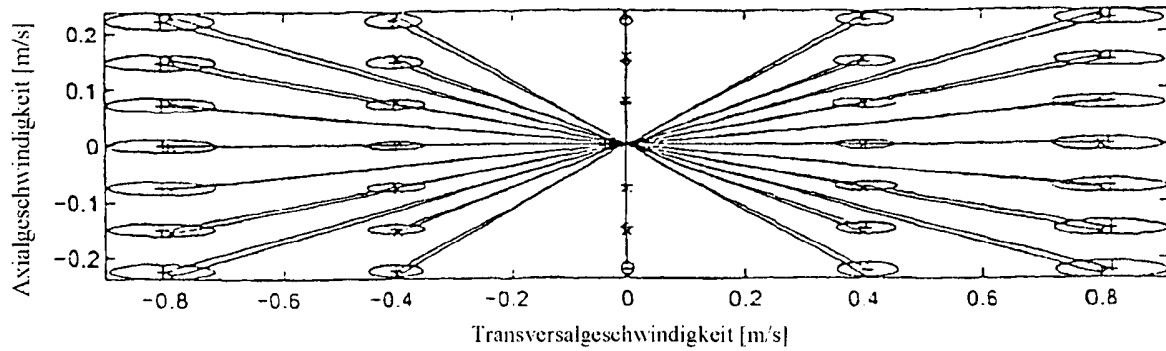


Fig. 5

Schätzungen für Verfahren 5 (Feld, axial), 20 Emissionen, snr = 0 dB, 100 Schätzungen,
5. Januar 1999, 21:57:33 Uhr

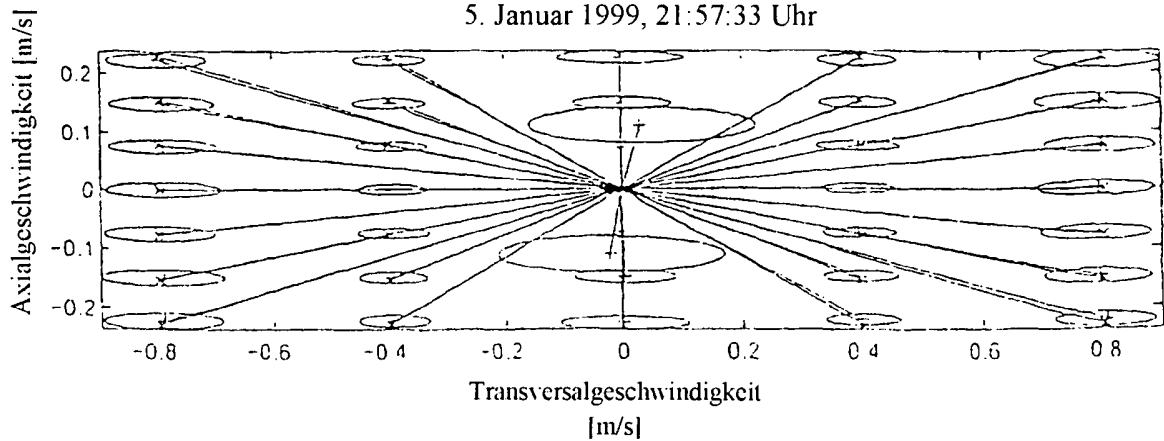


Fig. 6

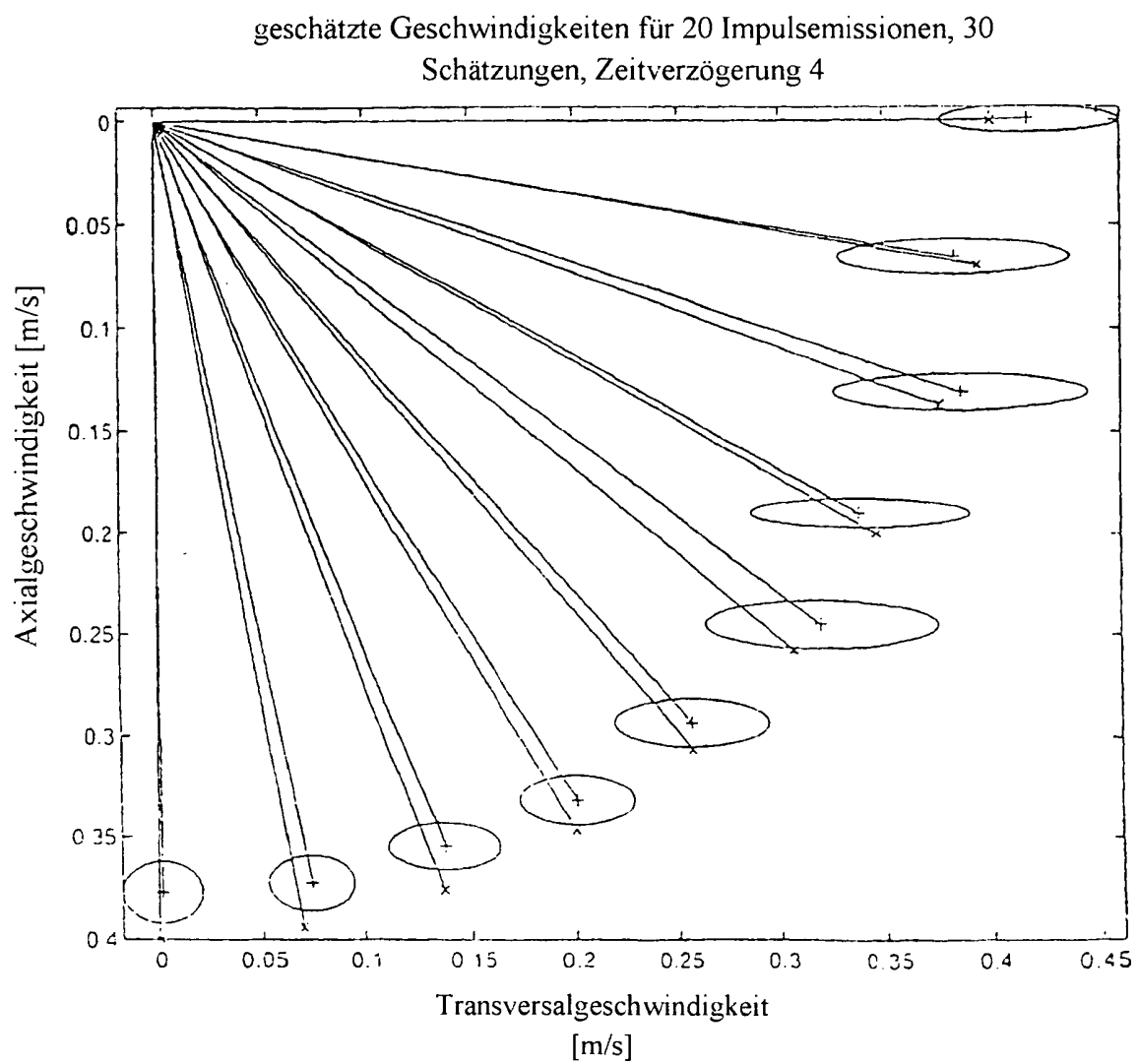


Fig. 7

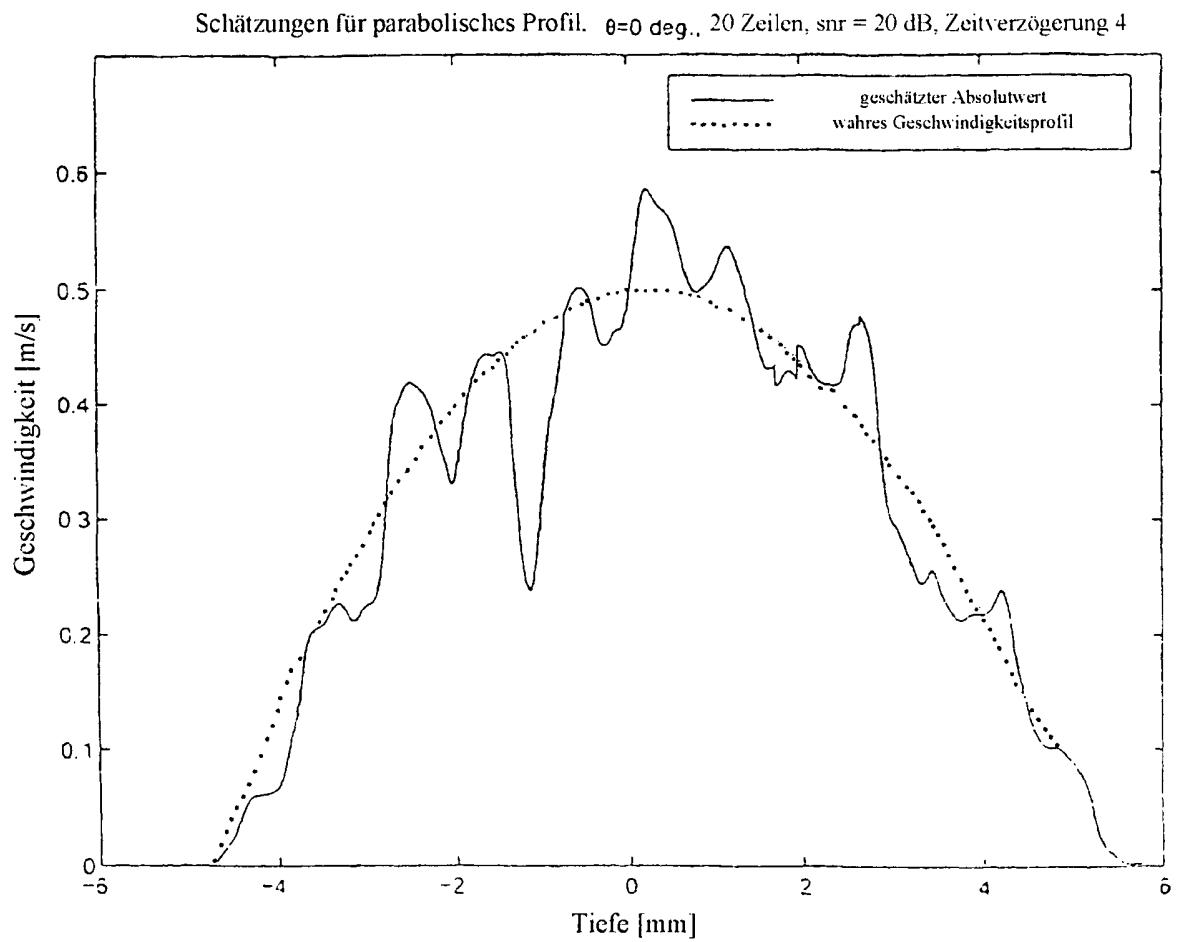


Fig. 8

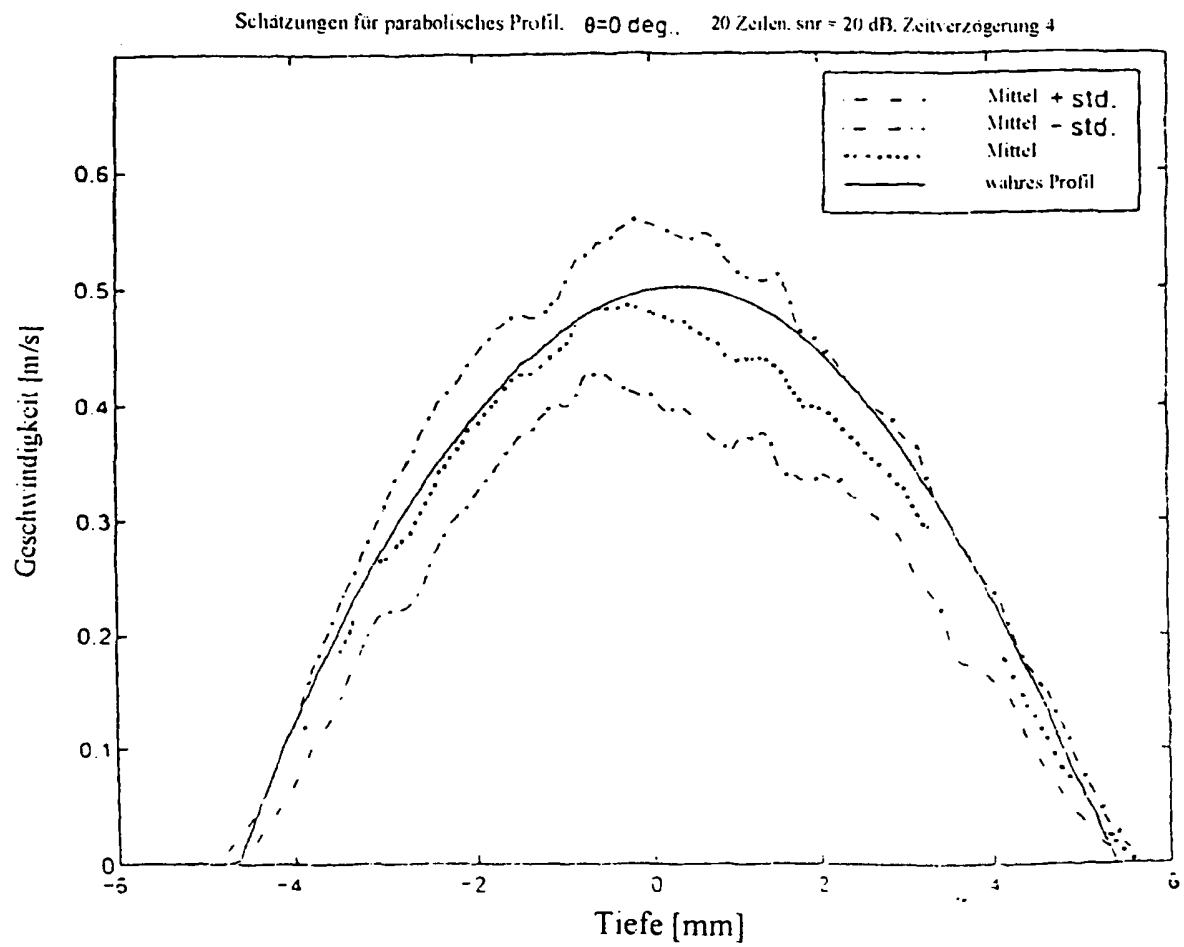


Fig. 9