

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号
特開2012-42449
(P2012-42449A)

(43) 公開日 平成24年3月1日(2012.3.1)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
GO 1 S 15/32 (2006.01)	GO 1 S 15/32	2 F 0 6 8
A 6 1 B 8/08 (2006.01)	A 6 1 B 8/08	2 G 0 4 7
GO 1 N 29/00 (2006.01)	GO 1 N 29/18	4 C 6 0 1
GO 1 S 7/526 (2006.01)	GO 1 S 7/52 J	5 J 0 8 3
GO 1 S 7/521 (2006.01)	GO 1 S 7/52 A	
審査請求 未請求 請求項の数 18 O L (全 33 頁) 最終頁に続く		

(21) 出願番号 特願2011-54576 (P2011-54576)	(71) 出願人 504133110
(22) 出願日 平成23年3月11日 (2011.3.11)	国立大学法人電気通信大学
(31) 優先権主張番号 特願2010-163423 (P2010-163423)	東京都調布市調布ヶ丘一丁目5番地1
(32) 優先日 平成22年7月20日 (2010.7.20)	(74) 代理人 100067736
(33) 優先権主張国 日本国 (JP)	弁理士 小池 晃
特許法第30条第1項適用申請有り 平成22年9月29日 社団法人電子情報通信学会発行の電子情報通信学会技術研究報告 信学技報 Vol. 110 No. 213において発表	(74) 代理人 100096677
	弁理士 伊賀 誠司
	(74) 代理人 100106781
	弁理士 藤井 稔也
	(74) 代理人 100113424
	弁理士 野口 信博
	(72) 発明者 鎌倉 友男
	東京都調布市調布ヶ丘1丁目5番地1 国立大学法人電気通信大学内
最終頁に続く	

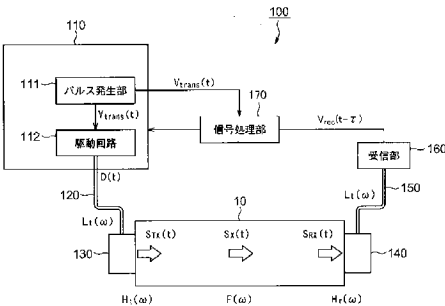
(54) 【発明の名称】 超音波伝搬時間計測方法及び超音波伝搬時間計測装置

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】 超音波伝搬媒体の非線形音響特性、さらには超音波トランスデューサの伝達特性や超音波伝搬特性をも考慮した超音波伝搬時間計測を行うことによって高精度に計測方法および装置を提供する。

【解決手段】 送信部110により送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を発生し、送信用超音波トランスデューサ130により超音波パルス信号 $S_x(t)$ に変換して測定対象の超音波伝搬媒体10に入力し、前記超音波伝搬媒体10を介して伝搬される前記超音波パルス信号 $S_x(t)$ を受信用超音波トランスデューサ140により受信し増幅して受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ を得て、信号処理部170において、前記超音波伝搬媒体10が有する非線形性を考慮した参照信号と被参照信号との間で相互相関処理をすることによって、前記超音波伝搬媒体10を介して伝搬される超音波パルス信号 $S_x(t)$ の送受信間の時間間隔を超音波伝搬時間として検出する。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

送信部により送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を発生し、

該送信パルス信号を送信用超音波トランスデューサにより超音波パルス信号に変換して測定対象の超音波伝搬媒体に入力し、

該超音波伝搬媒体を介して伝搬される前記超音波パルス信号を受信用超音波トランスデューサにより受信して電気信号に変換し、

該受信用超音波トランスデューサにより電気信号に変換された超音波パルス信号を受信部により増幅して受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ を得て、

前記超音波伝搬媒体が有する非線形性を考慮した疑似送信パルス信号 $V_{trans}'(t)$ と前記受信部により得られた受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ との相互相関処理、または、送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ と、非線形性を考慮した疑似受信パルス信号 $V_{rec}'(t-\tau)$ との相互相関処理により、前記超音波伝搬媒体を介して伝搬される超音波パルス信号の送受信間の時間間隔を超音波伝搬時間として呈示する超音波伝搬時間計測方法。

10

【請求項 2】

送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を発生する送信パルス信号発生手段と、

該送信パルス信号を前記送信超音波パルス信号に変換する送信用超音波トランスデューサと、

前記送信超音波パルス信号を測定対象の超音波伝搬媒体を介して受信し、受信した超音波パルス信号を電気信号に変換する受信用超音波トランスデューサと、

20

前記受信用超音波トランスデューサにより電気信号に変換された超音波パルス信号を増幅して受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ を得る受信部と、

非線形性を考慮した疑似送信パルス信号 $V_{trans}'(t)$ を形成する手段と、前記受信部により得られた受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ と前記疑似送信パルス信号 $V_{trans}'(t)$ との間の相互相関処理手段、または、受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ を非線形性を考慮した疑似受信パルス信号 $V_{rec}'(t-\tau)$ に変換する手段と、該疑似受信パルス信号 $V_{rec}'(t-\tau)$ と送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ との間で相互相関処理を行う信号処理手段とを備え、更に、前記超音波伝搬媒体を介して伝搬される超音波パルス信号の送受信間の時間間隔を超音波伝搬時間 τ として呈示する呈示手段とを備えることを特徴とする超音波伝搬時間計測装置。

30

【請求項 3】

前記参照信号発生手段が、前記送信部で発生された送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ と、他の手段によって発生させた特定の信号 $V_{add}(t)$ とを加算処理する加算処理手段と、該加算処理によって得られる加算信号を疑似送信パルス信号 $V_{trans}'(t)$ とし、前記受信信号 $V_{rec}(t-\tau)$ との間で相互相関処理をする相互相関処理手段を有することを特徴とする請求項 2 に記載の超音波伝搬時間計測装置。

【請求項 4】

前記加算処理手段において、前記送信部で発生された送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ に加算する信号 $V_{add}(t)$ が、前記送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ と同じ振幅で、 n 倍 (n は 2 以上の整数) の周波数を有したパルス信号であることを特徴とする請求項 3 に記載の超音波伝搬時間計測装置。

40

【請求項 5】

前記加算処理手段において、前記送信部で発生された送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ と加算する信号 $V_{add}(t)$ との間に位相差を設ける手段を有することを特徴とする請求項 4 に記載の超音波伝搬時間計測装置。

【請求項 6】

前記位相差を設ける手段が、前記相互相関処理手段から出力される相互相関値 $R(\tau)$ のピーク値が最大に、かつピークにおける半値幅が最小になる位相差を計算によって求める手段を有することを特徴とする請求項 5 に記載の超音波伝搬時間計測装置。

50

【請求項 7】

前記信号処理手段は、前記受信超音波信号 $V_{rec}(t-\tau)$ をフーリエ変換し、その周波数特性 $V_{rec}(\omega)$ を得るためのフーリエ変換手段と、その周波数特性の絶対値において、該周波数特性 $V_{rec}(\omega)$ の高調波成分のピークレベルを基本波成分のピークレベルにほぼ等しくなるように増幅するピークレベル等化手段と、前記ピークレベル等化手段によって得られるピークレベル等化信号 $V_{rec}'(\omega)$ を逆フーリエ変換して時間特性信号である疑似受信パルス信号 $V_{rec}'(t-\tau)$ を出力する逆フーリエ変換手段を有し、前記疑似受信パルス信号 $V_{rec}'(t-\tau)$ と前記送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ との間で相互相関処理をする相互相関処理手段を有することを特徴とする請求項 2 に記載の超音波伝搬時間計測装置。

10

【請求項 8】

前記高調波成分は、正極性の駆動信号を前記送信用超音波トランスデューサに印加したときの受信信号と、負極性の駆動信号を前記送信用超音波トランスデューサに印加したときの受信信号との和をとることにより抽出される信号であり、

前記基本波成分は、正極性の駆動信号を前記送信用超音波トランスデューサに印加したときの受信信号と、負極性の駆動信号を前記送信用超音波トランスデューサに印加したときの受信信号との差をとることにより抽出される信号であることを特徴とする請求項 7 記載の超音波伝搬時間計測装置。

【請求項 9】

前記フーリエ変換手段が、フーリエ変換の絶対値を計算する手段を有することを特徴とする請求項 7 記載の超音波伝搬時間計測装置。

20

【請求項 10】

前記送信パルス信号発生手段は、立ち上がり周波数 f_L 、立ち下がり周波数 f_H のチャープ波に窓関数 $W1(t)$ を積算することにより、前記送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を発生し、該窓関数 $W1(t)$ は、チャープ波の立ち上がり時刻 t_L での電圧レベルが、周波数が $(f_L + f_H)/2$ となる時刻における電圧レベルの α_L 倍、チャープの立ち下がり時刻 t_H での電圧レベルが、周波数が $(f_L + f_H)/2$ となる時刻における電圧レベルの α_H 倍となる波形としたことを特徴とする請求項 2 に記載の超音波伝搬時間計測装置。

【請求項 11】

前記送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ は周波数が $f_L \sim f_H$ の範囲で掃引されたチャープ波信号であり、これに加算する信号 $V_{add}(t)$ が、同じ振幅で n 倍 (n は 2 以上の整数) の周波数、即ち $nf_L \sim nf_H$ の周波数成分を持つチャープ波であることを特徴とする請求項 4 記載の超音波伝搬時間計測装置。

30

【請求項 12】

前記送信パルス信号発生手段が、 δ 関数に近似できる広帯域信号を第 1 の送信パルス信号 $V_{trans}\delta(t)$ として発生させる手段と、周波数が $f_L \sim f_H$ の範囲で掃引されたチャープ波信号を第 2 の送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ として発生させる手段と、第 1 の送信パルス信号と第 2 の送信パルス信号を出力するタイミングを切り替えるスイッチ手段を有し、

40

前記信号処理手段が、第 1 の送信パルス信号 $V_{trans}\delta(t)$ の駆動に対する受信信号 $V_{rec}\delta(t)$ をフーリエ変換し、その絶対値 $Abs(V_{rec}\delta(\omega))$ を計算する手段と、これを一時的に記憶する手段と、第 2 の送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ の駆動に対する受信信号 $V_{rec}(t-\tau)$ をフーリエ変換して得られる周波数特性 $V_{rec}(\omega)$ を前記一時的に記憶していた絶対値 $Abs(V_{rec}\delta(\omega))$ を読み出し、これで除算する除算手段と、該除算信号を逆フーリエ変換して得られる疑似受信パルス信号 $V_{rec}'(t-\tau)$ を形成し、前記送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ との間で相互相関する機能を有することを特徴とする請求項 2 に記載の超音波伝搬時間計測装置。

【請求項 13】

前記送信パルス信号発生手段が、 δ 関数に近似できる広帯域信号を第 1 の送信パルス信

50

号 $V_{trans} \delta(t)$ として発生させる手段と、周波数が $f_L \sim f_H$ の範囲で掃引されたチャープ波信号を第2の送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ として発生させる手段と、第1の送信パルス信号と第2の送信パルス信号を出力するタイミングを切り替えるスイッチ手段を有し、前記信号処理手段が、第1の送信パルス信号の駆動に対する受信信号 $V_{rec} \delta(t)$ をフーリエ変換し、その絶対値 $abs(V_{rec} \delta(\omega))$ を計算する手段と、該計算結果について、送信信号 $V_{trans}(t)$ をフーリエ変換して得られる周波数特性 $V_{trans}(\omega)$ と積算して、積算結果を逆フーリエ変換して得られる疑似送信パルス信号 $V_{trans}'(t)$ と、受信信号 $V_{rec}(t-\tau)$ との間で相互相関処理をする相互相関処理手段を有することを特徴とする請求項2に記載の超音波伝搬時間計測装置。

10

【請求項14】

前記送信用超音波トランスデューサと前記受信用超音波トランスデューサとが測定対象の超音波伝搬媒体の異なる二端面に設けられ、

前記測定対象の超音波伝搬媒体の一方の端面から前記送信用超音波トランスデューサにより送信され、前記測定対象の超音波伝搬媒体を介して伝搬する超音波が前記測定対象の超音波伝搬媒体の他方の端面において前記受信用超音波トランスデューサにより受信されるまでの超音波伝搬時間を検出することを特徴とする請求項2に記載の超音波伝搬時間計測装置。

【請求項15】

前記送信用超音波トランスデューサと前記受信用超音波トランスデューサが測定対象の超音波伝搬媒体の一端面に設けられ、

前記測定対象の超音波伝搬媒体の一端面から前記送信用超音波トランスデューサにより送信され、前記測定対象の超音波伝搬媒体を介して伝搬される超音波が前記測定対象の超音波伝搬媒体の他端面において反射されて前記測定対象の超音波伝搬媒体の前記一端面において前記受信用超音波トランスデューサにより受信されるまでの超音波伝搬媒体の超音波伝搬時間を検出することを特徴とする請求項2に記載の超音波伝搬時間計測装置。

20

【請求項16】

電極が二つの領域に分割され、それぞれ送信用電極部を含む送信用超音波トランスデューサ部に送信信号 $V_{trans}(t)$ を印加する端子と、受信用電極部を含む受信用超音波トランスデューサ部で伝搬超音波を受信し、電気信号 $V_{rec}(t-\tau)$ を出力する端子とを有する超音波トランスデューサを備えることを特徴とする請求項15に記載の超音波伝搬時間計測装置。

30

【請求項17】

前記超音波トランスデューサに於いて、送信時は、前記送信用超音波トランスデューサ部に送信信号 $V_{trans}(t)$ を印加し、受信時は、前記送信用超音波トランスデューサ部と前記受信用超音波トランスデューサ部が並列接続となるようなスイッチ手段を有していることを特徴とする請求項16に記載の超音波伝搬時間計測装置。

【請求項18】

前記送信用超音波トランスデューサ部、または前記受信用超音波トランスデューサ部のいずれか一方の超音波トランスデューサ部の出力端子と前記スイッチ手段までの経路に受信信号を減衰、または増幅する手段を有することを特徴とする請求項17に記載の超音波伝搬時間計測装置。

40

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、超音波伝搬時間の高精度計測を行う超音波伝搬時間計測方法及び超音波伝搬時間計測装置に関する。

【背景技術】

【0002】

超音波伝搬時間の高精度計測は、超音波距離計、超音波厚さ計、超音波流量計、材料の

50

音速測定などの非破壊検査装置や探傷用や医療用の画像診断装置の高精度、高信頼性計測、イメージングに更なる改善が求められている。超音波距離計は超音波伝搬媒体の音速と超音波伝搬時間の積によって距離が、超音波厚さ計は材料の音速と超音波伝搬時間の積によって材料の厚みが、超音波流量計は伝搬距離を超音波伝搬時間で除することによって、超音波伝搬媒体の音速と流速の和および差から流速が求まり、管断面積との積から流量が決定される。また材料の寸法と材料中を超音波が伝搬する時間とからその材料の物性定数としての音速が求まる。いずれも、超音波伝搬時間の高精度化によって、距離、厚さ、流量、音速などが高精度に表示されることになり、探傷装置や医療診断といった画像診断装置においても、画像分解能を向上させ、診断精度の向上を実現させることが求められている。

10

【0003】

この超音波伝搬時間の高精度計測に対し、これまで種々の方法が考案されている。それらのうち、近年コンピュータの演算処理の高速化に伴って注目を集めているのが相互相関法を用いた超音波伝搬時間の高精度計測技術であり、更にはパルス圧縮技術である。

【0004】

これに関連した技術として、本件発明者等は、気象要因によって変動する変動表面と路面との変動高さを、簡易な構成で容易且つ正確に計測することができる路面変動高さ計測装置および路面変動高さ計測方法を提案している（例えば、特許文献1参照）。

【0005】

すなわち、特許文献1には、路面変動高さ計測において、従来課題とされていた、1～2cmの路面高さ変動計測を可能とする技術を提供しようとするもので、課題解決方法として気象要因によって変動する変動表面と路面との変動高さを計算するに際して、超音波送信素子からチャープ波を変動表面に出力するとともに、このチャープ波の反射波を超音波受信素子から入力し、同チャープ波の基準波形データと反射波の入力波形データとの相互相関処理を行って相互相関値を演算するとともに、最大相互相関値が検出されるまでの時間差に基づいて変動高さを計算することにより、変動高さが1～2センチ程度であっても、精度良く路面変動高さを計測する技術が開示されている。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【特許文献1】特開2004-125583号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

超音波伝搬媒質は一般に非線形効果を含むが、線形効果に比べ10～20dB小さいので、それほど高精度の計測が要求されていない場合は無視しても問題なかった。しかしながら、近年のマイクロ、ナノ領域の諸技術の発展に伴い、更なる高精度計測が必要になってきた。例えば、ナノ表面加工技術やナノインプリント技術の進展に伴って厚さ計測精度の更なる高分解能化が求められている。また、薬液等の微量流量制御分野では、細管を流れる粘性液体の高精度流量制御が必要になってきている。また、超音波を使った細胞診断分野においても、そのサイズや音速などの微細情報が必要になり、高分解能超音波伝搬時間高精度計測が必要になってきている。さらには、医療分野においても癌組織の成長に伴う栄養血管に流れる血流診断など、これまで以上の高分解能超音波伝搬時間高精度計測が必要になってきている。さらに、これらの超音波計測では、高周波化が高分解能計測に直接つながるという考え方に基づいて比較的高周波の超音波が用いられ、粘性液体や固体材料を対象とする場合が多く、非線形効果が現れやすい状況での計測となる場合が多い。

40

【0008】

しかし、従来は、その配慮がされておらず、受信信号に対する参照波は駆動信号そのものであった。

【0009】

50

そこで、本発明の目的は、従来配慮されていなかった超音波伝搬媒体の非線形音響特性、さらには超音波トランスデューサの伝達特性や超音波伝搬特性をも考慮した超音波伝搬時間計測を行うことによって、超音波伝搬時間を高精度に計測できるようにした超音波伝搬時間計測方法及び超音波伝搬時間計測装置を提供することにある。

【0010】

本発明のさらに他の目的、本発明によって得られる具体的な利点は、以下において図面を参照して説明される実施の形態から一層明らかにされる。

【課題を解決するための手段】

【0011】

一般に、比較的高周波の超音波を用いる場合や、粘性液体や固体材料を対象とする場合など、非線形効果が現れやすい状況下での計測では、非線形性効果を考慮することによって、より高精度の高分解能超音波伝搬時間計測が可能になると考えられている。また、相互相関処理をする場合の参照波は受信信号に含まれる要素、例えば、超音波トランスデューサや超音波伝搬経路に関する情報を特性として含んでいたほうが、相互相関値が大きくなり、超音波伝搬時間の計測精度を高めることができる。あるいは、受信信号に含まれる超音波トランスデューサの伝達関数と超音波伝搬に伴って発生する高調波成分を含む合成信号で受信信号を除し、この除算信号と駆動信号との相互相関を計算することにより、同等の効果が得られる。高精度に超音波伝搬時間を計測するには、上記の様に相互相関値が大きくなる必要とともに相互相関値が最大になるピーク位置が高精度に超音波伝搬時間 τ をあらわしていることが必要である。相互相関処理によって高精度に超音波伝搬時間 τ が現れるには、相互相関処理の原理を考慮すると、相互相関処理をする一方の信号に超音波伝搬時間 τ 情報があり、他方に τ 情報が無いということである。

【0012】

そこで、本発明に係る超音波伝搬時間計測方法において、送信部により送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を発生し、該送信パルス信号を送信用超音波トランスデューサにより超音波パルス信号に変換して測定対象の超音波伝搬媒体に入力し、該超音波伝搬媒体を介して伝搬される前記超音波パルス信号を受信用超音波トランスデューサにより受信して電気信号に変換し、該受信用超音波トランスデューサにより電気信号に変換された超音波パルス信号を受信部により増幅して受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ を得て、前記超音波伝搬媒体が有する非線形性を考慮した疑似送信パルス信号 $V_{trans}'(t)$ と前記受信部により得られた受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ との相互相関処理、または、送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ と、非線形性を考慮した疑似受信パルス信号 $V_{rec}'(t-\tau)$ との相互相関処理により、前記超音波伝搬媒体を介して伝搬される超音波パルス信号の送受信間の時間間隔を超音波伝搬時間として呈示することを特徴とする。

【0013】

本発明に係る超音波伝搬時間計測装置は、送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を発生する送信パルス信号発生手段と、該送信パルス信号を前記送信超音波パルス信号に変換する送信用超音波トランスデューサと、前記送信超音波パルス信号を測定対象の超音波伝搬媒体を介して受信し、受信した超音波パルス信号を電気信号に変換する受信用超音波トランスデューサと、前記受信用超音波トランスデューサにより電気信号に変換された超音波パルス信号を増幅して受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ を得る受信部と、非線形性を考慮した疑似送信パルス信号 $V_{trans}'(t)$ を形成する手段と、前記受信部により得られた受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ と前記疑似送信パルス信号 $V_{trans}'(t)$ との間の相互相関処理手段、または、受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ を非線形性を考慮した疑似受信パルス信号 $V_{rec}'(t-\tau)$ に変換する手段と、該疑似受信パルス信号 $V_{rec}'(t-\tau)$ と送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ との間で相互相関処理を行う信号処理手段とを備え、更に、前記超音波伝搬媒体を介して伝搬される超音波パルス信号の送受信間の時間間隔を超音波伝搬時間 τ として呈示する呈示手段とを備えることを特徴とする。

【0014】

また、本発明に係る超音波伝搬時間計測装置は、前記参照信号発生手段が、前記送信部で発生された送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ と、他の手段によって発生させた特定の信号 $V_{add}(t)$ とを加算処理する加算処理手段と、該加算処理によって得られる加算信号を疑似送信パルス信号 $V_{trans}'(t)$ とし、前記受信信号 $V_{rec}(t-\tau)$ との間で相互相関処理をする相互相関処理手段を有することを特徴とする。

【0015】

更に、本発明に係る超音波伝搬時間計測装置では、前記加算処理手段において、前記送信部で発生された送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ に加算する信号 $V_{add}(t)$ が、前記送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ と同じ振幅で、 n 倍 (n は 2 以上の整数) の周波数を有したパルス信号とすることを特徴とする。

10

【0016】

更に、本発明に係る超音波伝搬時間計測装置では、前記加算処理手段において、前記送信部で発生された送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ と加算する信号 $V_{add}(t)$ との間に位相差を設ける手段を有することを特徴とする。

【0017】

更に、本発明に係る超音波伝搬時間計測装置は、前記位相差を設ける手段が、前記相互相関処理手段から出力される相互相関値 $R_{xy}(\tau)$ のピーク値が最大に、かつピークにおける半値幅 Δt が最小になる位相差を計算によって求める手段を有することができる。

【0018】

更に、本発明に係る超音波伝搬時間計測装置において、送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を参照信号とし、前記信号処理手段は、前記受信超音波信号 $V_{rec}(t-\tau)$ をフーリエ変換し、その周波数特性 $V_{rec}(\omega)$ を得るためのフーリエ変換手段と、その周波数特性の絶対値において、該周波数特性 $V_{rec}(\omega)$ の高調波成分のピークレベルを基本波成分のピークレベルにほぼ等しくなるように増幅するピークレベル等化手段と、前記ピークレベル等化手段によって得られるピークレベル等化信号 $V_{rec}'(\omega)$ を逆フーリエ変換して時間軸信号である疑似受信パルス信号 $V_{rec}'(t-\tau)$ を出力する逆フーリエ変換手段を有し、前記疑似受信パルス信号 $V_{rec}'(t-\tau)$ と前記送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ との間で相互相関処理をする相互相関処理手段を有することを特徴とする。

20

【0019】

更に、本発明に係る超音波伝搬時間計測装置において、前記高調波成分は、正極性の駆動信号を前記送信用超音波トランスデューサに印加したときの受信信号と、負極性の駆動信号を前記送信用超音波トランスデューサに印加したときの受信信号との和をとることにより抽出される信号であり、前記基本波成分は、正極性の駆動信号を前記送信用超音波トランスデューサに印加したときの受信信号と、負極性の駆動信号を前記送信用超音波トランスデューサに印加したときの受信信号との差をとることにより抽出される信号であることを特徴とする。

30

【0020】

更に、本発明に係る超音波伝搬時間計測装置は、前記フーリエ変換手段が、フーリエ変換の絶対値を計算する手段を有することを特徴とする。

40

【0021】

更に、本発明に係る超音波伝搬時間計測装置において、前記送信パルス信号発生手段は、立ち上がり周波数 f_L 、立ち下がり周波数 f_H のチャープ波に窓関数 $W1(t)$ を積算することにより、前記送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を発生し、該窓関数 $W1(t)$ は、チャープ波の立ち上がり時刻 t_L での電圧レベルが、周波数が $(f_L + f_H)/2$ となる時刻における電圧レベルの α_L 倍、チャープの立ち下がり時刻 t_H での電圧レベルが、周波数が $(f_L + f_H)/2$ となる時刻における電圧レベルの α_H 倍となる波形としたことを特徴とする。

【0022】

更に、本発明に係る超音波伝搬時間計測装置は、前記送信パルス信号 $V_{trans}(t)$

50

)は周波数が $f_L \sim f_H$ の範囲で掃引されたチャープ波信号であり、これに加算する信号 $V_{add}(t)$ が、同じ振幅で n 倍(n は2以上の整数)の周波数、即ち $nf_L \sim nf_H$ の周波数成分を持つチャープ波とすることを特徴とする。

【0023】

更に、本発明に係る超音波伝搬時間計測装置は、前記送信パルス信号発生手段が、 δ 関数に近似できる広帯域信号を第1の送信パルス信号 $V_{trans}\delta(t)$ として発生させる手段と、周波数が $f_L \sim f_H$ の範囲で掃引されたチャープ波信号を第2の送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ として発生させる手段と、第1の送信パルス信号と第2の送信パルス信号を出力するタイミングを切り替えるスイッチ手段を有し、前記信号処理手段が、第1の送信パルス信号 $V_{trans}\delta(t)$ の駆動に対する受信信号 $V_{rec}\delta(t-\tau)$ をフーリエ変換し、その絶対値 $abs(V_{rec}\delta(\omega))$ を形成する手段と、これを一時的に記憶する手段と、第2の送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ の駆動に対する受信信号 $V_{rec}(t-\tau)$ をフーリエ変換して得られる周波数特性 $V_{rec}(\omega)$ を前記一時的に記憶していた絶対値 $abs(V_{rec}\delta(\omega))$ を読み出し、これで除算する除算手段と、該除算信号を逆フーリエ変換して得られる疑似受信パルス信号 $V_{rec}'(t-\tau)$ を形成し、前記送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ との間で相互相関する機能を有することを特徴とする。

【0024】

更に、本発明に係る超音波伝搬時間計測装置は、前記送信パルス信号発生手段が、 δ 関数に近似できる広帯域信号を第1の送信パルス信号 $V_{trans}\delta(t)$ として発生させる手段と、周波数が $f_L \sim f_H$ の範囲で掃引されたチャープ波信号を第2の送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ として発生させる手段と、第1の送信パルス信号と第2の送信パルス信号を出力するタイミングを切り替えるスイッチ手段を有し、前記信号処理手段が、第1の送信パルス信号の駆動に対する受信信号 $V_{rec}\delta(t-\tau)$ をフーリエ変換し、その絶対値 $abs(V_{rec}\delta(\omega))$ を計算する手段と、該計算結果を送信信号 $V_{trans}(t)$ をフーリエ変換して得られる周波数特性 $V_{trans}(\omega)$ に積算して、積算結果を逆フーリエ変換して得られる疑似送信パルス信号 $V_{trans}'(t)$ と、受信信号 $V_{rec}(t-\tau)$ との間で相互相関処理をする相互相関処理手段を有することを特徴とする。

【0025】

更に、本発明に係る超音波伝搬時間計測装置は、前記送信用超音波トランスデューサと前記受信用超音波トランスデューサとが測定対象の超音波伝搬媒体の異なる二端面に設けられ、前記測定対象の超音波伝搬媒体の一方の端面から前記送信用超音波トランスデューサにより送信され、前記測定対象の超音波伝搬媒体を介して伝搬される超音波が前記測定対象の超音波伝搬媒体の他方の端面において前記受信用超音波トランスデューサにより受信されるまでの超音波伝搬時間を検出することを特徴とする。

【0026】

更に、本発明に係る超音波伝搬時間計測装置は、前記送信用超音波トランスデューサと前記受信用超音波トランスデューサが測定対象の超音波伝搬媒体の一端面に設けられ、前記測定対象の超音波伝搬媒体の一端面から前記送信用超音波トランスデューサにより送信され、前記測定対象の超音波伝搬媒体を介して伝搬される超音波が前記測定対象の超音波伝搬媒体の他端面において反射されて前記測定対象の超音波伝搬媒体の前記一端面において前記受信用超音波トランスデューサにより受信されるまでの超音波伝搬媒体の超音波伝搬時間を検出することを特徴とする。

【0027】

更に、本発明に係る超音波伝搬時間計測装置は、電極が二つの領域に分割され、それぞれ送信用電極部を含む送信用超音波トランスデューサ部に送信信号 $V_{trans}(t)$ を印加する端子と、受信用電極部を含む受信用超音波トランスデューサ部で伝搬超音波を受信し、電気信号 $V_{rec}(t-\tau)$ を出力する端子とを有する超音波トランスデューサを備えることを特徴とする。

【0028】

更に、本発明に係る超音波伝搬時間計測装置において、前記超音波トランスデューサに於いて、送信時は、前記送信用超音波トランスデューサ部に送信信号 $V_{trans}(t)$ を印加し、受信時は、前記送信用超音波トランスデューサ部と前記受信用超音波トランスデューサ部が並列接続となるようなスイッチ手段を有することを特徴とする。

【0029】

更に、本発明に係る超音波伝搬時間計測装置は、前記送信用超音波トランスデューサ部、または前記受信用超音波トランスデューサ部のいずれか一方の超音波トランスデューサ部の出力端子と前記スイッチ手段までの経路に受信信号を減衰、または増幅する手段を有することを特徴とする。

【発明の効果】

【0030】

本発明によれば、送信部により送信パルス信号を発生し、前記送信パルス信号を送信用超音波トランスデューサにより超音波パルス信号に変換して測定対象の超音波伝搬媒体に入力し、前記超音波伝搬媒体を介して伝搬される前記超音波パルス信号を受信用超音波トランスデューサにより受信して電気信号に変換し、前記受信用超音波トランスデューサにより電気信号に変換された超音波パルス信号を受信部により増幅して受信パルス信号を得て、前記超音波伝搬媒体が有する非線形性を考慮した疑似送信パルス信号と、前記受信部により得られた受信パルス信号との相互相関処理、または、送信パルス信号と非線形性を考慮した疑似受信パルス信号との相互相関処理をすることにより、前記超音波伝搬媒体を介して伝搬される超音波パルス信号の送受信間の時間間隔を超音波伝搬時間として検出するので、従来配慮されていなかった超音波伝搬媒体の非線形音響特性、さらには超音波トランスデューサの伝達特性や超音波伝搬特性をも考慮した超音波伝搬時間計測を行い、超音波伝搬時間を高精度に計測することができる。

【0031】

本発明では、超音波伝搬時間を高精度に計測して、その結果を、例えば、板厚等の寸法、欠陥やターゲットの位置、変位、流体の流速、材料の物性値としての音速、又は、生体臓器の位置や状態情報、構造材料の欠陥の位置や形状などの超音波画像診断に用いられる情報のうちのいずれか、又はいくつかを組み合わせた物理情報又は物性情報の精密測定、または材料の物性計測に利用することができる。

【図面の簡単な説明】

【0032】

【図1】本発明に係る超音波伝搬時間計測装置の基本構成を示すブロック図である。

【図2】前記超音波伝搬時間計測装置に採用されるパルス圧縮法を説明するための波形図である。

【図3】前記超音波伝搬時間計測装置に採用される他のパルス圧縮法を説明するための波形図である。

【図4】本発明を適用した超音波伝搬時間計測装置の構成例を示すブロック図である。

【図5】前記超音波伝搬時間計測装置の信号処理部において行われる処理の手順を示すフローチャートである。

【図6】本発明を適用した超音波伝搬時間計測装置の他の構成例を示すブロック図である。

【図7】本発明を適用した超音波伝搬時間計測装置に用いられる超音波トランスデューサの構成例を示す要部断面図である。

【図8】本発明を適用した超音波伝搬時間計測装置の他の構成例を示すブロック図である。

【図9】前記超音波伝搬時間計測装置の信号処理部において行われる処理の手順を示すフローチャートである。

【図10】前記超音波伝搬時間計測装置において、信号処理部に入力される受信パルス信号の周波数特性をモデル的に表示した図である。

10

20

30

40

50

【図 1 1】前記超音波伝搬時間計測装置において、周波数 f_L から f_H まで周波数を変化させたチャープ信号 $V_{trans}(t)$ に、同じ振幅で、周波数が $2f_L$ から $2f_H$ まで周波数を変化させた 2 倍のチャープ信号を加算した加算信号 $V_{trans}'(t)$ を示す図である。

【図 1 2】前記超音波伝搬時間計測装置において、受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ と加算処理信号 $V_{trans}'(t)$ とを相互相関処理することにより得られるパルス圧縮信号を示す図である。

【図 1 3】前記超音波伝搬時間計測装置の信号処理部において行われる処理の手順を示すフローチャートである。

【図 1 4】本発明を適用した超音波伝搬時間計測装置の他の構成例を示すブロック図である。

【図 1 5】本発明を適用した超音波伝搬時間計測装置の他の構成例を示すブロック図である。

【図 1 6】本発明を適用した超音波伝搬時間計測装置の他の構成例を示すブロック図である。

【発明を実施するための形態】

【0033】

以下、本発明を実施するための形態について図面を参照して詳細に説明する。

【0034】

本発明を実施するための形態の具体的な説明に先立って、本発明に係る超音波伝搬時間計測装置 100 の原理について図 1 を参照して概略を説明する。

【0035】

この超音波伝搬時間計測装置 100 は、送信部 110 により発生される送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ に応じて駆動される送信用超音波トランスデューサ 130 から超音波伝搬媒体 10 を介して超音波パルス信号 $S_x(t)$ を送信し、前記超音波伝搬媒体 10 を介して伝搬されてくる前記超音波パルス信号 $S_x(t-\tau)$ を受信用超音波トランスデューサ 140 により受信して受信部 160 により受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ を得て、信号処理部 170 において、前記送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ と前記受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ との相互相関処理を行うことにより、前記超音波伝搬媒体 10 を伝搬する超音波の伝搬時間を計測するものである。

【0036】

前記送信部 110 は、送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を出力するパルス信号発生器 111 と、このパルス信号発生器 111 から出力される送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を増幅して広帯域で高電圧の駆動信号 $D(t)$ を出力する駆動回路 112 とを備える。

【0037】

この送信部 110 は、前記パルス信号発生器 111 が出力した送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を前記信号処理部 170 に供給するとともに、この送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を増幅した駆動信号 $D(t)$ を前記駆動回路 112 から同軸ケーブル 120 を介して前記送信用超音波トランスデューサ 130 に供給して、前記駆動信号 $D(t)$ により前記送信用超音波トランスデューサ 130 を駆動する。

【0038】

前記送信用超音波トランスデューサ 130 は、前記駆動信号 $D(t)$ で駆動されることにより、前記送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を超音波パルス信号 $S_x(t)$ に変換して前記超音波伝搬媒体 10 を介して送信する。

【0039】

前記受信用超音波トランスデューサ 140 は、前記送信用超音波トランスデューサ 130 から送信され前記超音波伝搬媒体 10 を介して伝搬されてくる前記超音波パルス信号 $S_x(t-\tau)$ を受信し、その受信出力を同軸ケーブル 150 を介して受信部 160 に供給する。

【0040】

10

20

30

40

50

ここで、この超音波伝搬時間計測装置 100 において、前記送信信号発生部 110 のパルス信号発生器 111 より発生される送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ は、周波数軸上で $V_{trans}(\omega)$ にて示される周波数特性を有し、駆動回路 112 から出力される駆動信号 $D(t)$ は周波数軸上で、 $D(\omega)$ にて示される周波数特性を有するものとする。

【0041】

また、前記送信部 110 から前記駆動信号 $D(t)$ を送信用超音波トランスデューサ 130 に伝達する同軸ケーブル 120 は、伝達特性 $L_t(\omega)$ で示される伝達関数を有するものとする。

【0042】

また、前記超音波伝搬媒体 10 を介して測定用の超音波パルス信号 $S_x(t)$ を送信する送信用超音波トランスデューサ 130 は、 $H_t(\omega)$ で示される伝達関数を有するものとする。

【0043】

また、前記超音波伝搬媒体 10 を介して測定用の超音波パルス信号 $S_x(t-\tau)$ を受信する受信用超音波トランスデューサ 140 は、 $H_r(\omega)$ で示される伝達関数を有するものとする。

【0044】

さらに、前記受信用超音波トランスデューサ 4 の出力を受信部 160 に伝達する同軸ケーブル 150 は伝達特性 $L_r(\omega)$ で示される伝達関数を有するものとする。

【0045】

そして、測定対象の超音波伝搬媒体 10 は、 $F(\omega)$ で示される伝達関数を有するものとする。

【0046】

前記超音波伝搬媒体 10 を介して伝搬される超音波パルス信号 $S_x(t)$ を、以下便宜的に $T(t)$ と表し、その周波数特性を $T(\omega)$ とし、また同様にして超音波パルス信号 $S_x(t-\tau)$ を、以下便宜的に $R(t-\tau)$ と表し、その周波数特性を $R(\omega)$ と表す。

【0047】

なお、周波数特性 $T(\omega)$ および $R(\omega)$ は、それぞれ時間特性 $T(t)$ および $R(t-\tau)$ をフーリエ変換 (FFT 処理) した関係にあるものとする。

【0048】

ここで、超音波伝搬時間を計測する対象は、超音波伝搬媒体の超音波伝搬方向の長さ、材料の音速、伝搬媒体の流速、超音波伝搬媒体の一部にある欠陥等の位置検出、生体組織に存在する異常組織診断や寸法検出、血球等の生体細胞の内部構造観察のいずれでも良い。

【0049】

これらの検出、診断、観察において高精度の超音波伝搬時間計測が、高精度、あるいは高分解能、高信頼性の検出、診断、観察の基礎になることは言うまでもない。超音波伝搬時間計測は、送信用超音波トランスデューサ 3 から送信超音波パルス信号 $S_{TX}(t)$ が、超音波伝搬媒体 10 に送信された瞬間の時刻から受信用超音波トランスデューサ 4 によって伝搬してきた受信超音波パルス信号 $S_{RX}(t-\tau)$ を受信した時刻までの時間で定義される。

【0050】

この場合、受信超音波パルス信号 $S_{RX}(t)$ のスペクトル特性 $R(\omega)$ は、

$$R(\omega) = T(\omega) \times F(\omega) \times H_r(\omega) \quad (1)$$

で表される。ここで、 $T(\omega)$ は送信超音波パルス信号 $S_{TX}(t)$ の周波数特性、 $F(\omega)$ は超音波伝搬媒体 10 の伝搬特性であり、超音波減衰やサイドローブ特性あるいは音響的な非線形特性を含んだ伝達特性を表す。 $H_r(\omega)$ は受信用超音波トランスデューサ 140 の伝達関数である。さらに、送信超音波パルス信号 $S_{TX}(t)$ の周波数特性 $T(\omega)$ は、

10

20

30

40

50

$$T(\omega) = D(\omega) \times L_t(\omega) \times H_t(\omega) \quad (2)$$

で表される。ここで、 $H_t(\omega)$ は送信用超音波トランスデューサ 130 の伝達関数、 $D(\omega)$ は駆動信号 $D(t)$ の周数特性であり、 $L_t(\omega)$ は前記駆動信号 $D(t)$ を送信用超音波トランスデューサ 130 に伝達する同軸ケーブル 150 の伝達関数である。

【0051】

前記受信超音波パルス信号 $S_{RX}(t-\tau)$ を受信信用超音波トランスデューサ 140 が受信することにより前記受信部 160 に得られる受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ は、前記受信信用超音波トランスデューサ 140 により受信した前記受信超音波パルス信号 $S_{RX}(t-\tau)$ のスペクトル特性 $R(\omega)$ を

$$V_{rec}(\omega) = R(\omega) \times L_r(\omega) \times A_r(\omega) \quad (3)$$

なる式に基づいて変換したスペクトル特性 $V_{rec}(\omega)$ を有するものとなる。

【0052】

前記受信部 160 に得られる受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ は、信号処理部 7 に供給されて、前記駆動信号 $D(t)$ と以下の関係のある参照パルス信号との間で相互相関処理が行われる。

【0053】

前記 (3) 式における $A_r(\omega)$ は、受信部 160 の増幅度の帯域特性であり、高調波成分を含む周波数帯域で一定の増幅度を持っていれば定数として扱うことができる。

【0054】

$$D(\omega) = V_{trans}(\omega) \times A_t(\omega) \quad (4)$$

ここで、 $A_t(\omega)$ は、前記送信部 110 に備えられた駆動回路 112 の増幅度の帯域特性であり、パルス信号発生器 111 より発生される送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ の周波数特性 $V_{trans}(\omega)$ の帯域内で一定の増幅度を持っていれば定数として扱うことができる。

【0055】

また、同軸ケーブル 120、150 の伝達関数 $L_t(\omega)$ 、 $L_r(\omega)$ を超音波トランスデューサ 3、4 の伝達関数に含め、それらを新たに超音波トランスデューサの伝達関数 $H_t(\omega)$ 、 $H_r(\omega)$ と定義しなおすと、

$$\begin{aligned} V_{rec}(\omega) &= R(\omega) \times L_r(\omega) \times A_r(\omega) \\ &= T(\omega) \times F(\omega) \times H_r(\omega) \times A_r(\omega) \\ &= H_t(\omega) \times D(\omega) \times F(\omega) \times H_r(\omega) \times A_r(\omega) \end{aligned} \quad (5)$$

となり、また、送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ の周波数特性 $V_{trans}(\omega)$

$$V_{trans}(\omega) = D(\omega) / A_t \quad (6)$$

となる。ここで A_t 、 A_r は定数である。

【0056】

そして、相互相関関数 $R_{xy}(j)$ は、信号 $x(t)$ 、 $y(t)$ の離散データを $x(i)$ ($i=0, 1, 2, \dots, N-1$)、 $y(i)$ ($i=0, 1, 2, \dots, N-1$) とすると、次の (7) 式にて定義される。

【0057】

【数 1】

$$R_{xy}(j) = \frac{1}{N-j} \sum_{i=0}^{N-1-j} x(i) \cdot y(i+j) \quad (j=0, 1, 2, \dots, N-1)$$

【0058】

ここで、 $x(i) = V_{trans}(t)$ 、 $y(i+j) = V_{rec}(t-\tau)$ で $R_{xy}(j) = R_{xy}(\tau)$ であり、 $V_{trans}(t)$ 、 $V_{rec}(t-\tau)$ は $V_{trans}(\omega)$ 、 $V_{rec}(\omega)$ を逆フーリエ変換したものである。

【0059】

10

20

30

40

50

$R_{xy}(\tau)$ は $V_{trans}(t)$ と $V_{rec}(t-\tau)$ との類似度に従って位相 τ における値が 1 に近づいてゆき、同時に位相 τ におけるメインピークの半値幅 Δt が狭くなり、位相 τ の値の精度が高まることを意味する。

【0060】

超音波伝搬時間は前記位相 τ に相当するので、相互相関に関する前記説明より分かるように、超音波伝搬時間の測定精度を上げるということは、相互相関関数 $R(t)$ の $t = \tau$ における値が 1 に近く、 $t = \tau$ におけるメインピークの半値幅が小さい値を示すことであるということが分かる。また、 $V_{trans}(t)$ と $V_{rec}(t-\tau)$ との類似度が高いほど、 τ の計測精度が向上したことを意味する。 $V_{rec}(t-\tau)$ と $V_{trans}(t)$ の波形の類似度は $V_{rec}(\omega)$ と $V_{trans}(\omega)$ の類似度と考えてもよい。

10

【0061】

すなわち、この超音波伝搬時間計測装置 100 では、送信部 110 により送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を発生し、前記送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を増幅した信号 $D(t)$ を送信用超音波トランスデューサ 130 に印加することにより超音波パルス信号 $S_x(t)$ に変換して測定対象の超音波伝搬媒体 10 に入力し、前記超音波伝搬媒体 10 を介して伝搬される前記超音波パルス信号 $S_x(t-\tau)$ を受信用超音波トランスデューサ 140 により受信して電気信号に変換し、前記受信用超音波トランスデューサ 140 により電気信号に変換された超音波パルス信号 $S_x(t-\tau)$ を受信部 160 により増幅して受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ を得て、信号処理部 170 において、前記超音波伝搬媒体 10 が有する非線形性を考慮した疑似受信パルス信号 $V_{rec}'(t-\tau)$ 又は疑似送信パルス信号 $V_{trans}'(t)$ を形成し、それぞれ、 $V_{trans}(t)$ 、 $V_{rec}(t-\tau)$ との相互相関処理により、前記超音波伝搬媒体 10 を介して伝搬される超音波パルス信号 $S_x(t)$ の送受信間の時間間隔を超音波伝搬時間として検出することができる。

20

【0062】

ここで、パルス圧縮の原理を説明する。

【0063】

チャープ波 $p(t)$ は振幅 P_0 として、次の式で表せる。

【0064】

【数 2】

30

$$p(t) = \begin{cases} P_0 \sin(\omega_s t + \frac{1}{2} \mu t^2) & (0 \leq t \leq T) \\ 0 & (\text{elsewhere}) \end{cases}$$

【0065】

ここで、 $\omega_s (= 2\pi f_s)$ は初期角周波数、 T は掃引時間、 μ は角周波数掃引率である。また、 f_e を最終周波数、 $2\pi \Delta f$ を掃引角周波数とすると、 $\mu = \Delta \omega / T = 2\pi (f_e - f_s) / T$ の関係にある。チャープ波のパルス圧縮比は $T \Delta f$ で与えられ、 Δf を大きくするほどパルス幅は狭くなり、距離分解能は高まる。

40

【0066】

以上がパルス圧縮の原理である。

【0067】

なお、パルス圧縮の効果があるのは、周波数変調信号であるチャープ波の他、位相変調信号、即ち符号化系列信号であるバーカー系列信号、相補系列信号、M 系列信号などでも同様の効果があるが、チャープ波を用いた場合が最も SN が良く好ましい。

【0068】

図 2 の (A) に示すように、立ち上がり周波数 f_L 、停止周波数 f_H でバースト長が ΔT のチャープ波駆動信号 $D(t)$ を送信用超音波トランスデューサ 130 に印加した場合

50

に、図 2 の (B) に示すような受信パルス信号 $V_{rec}(t - \tau)$ が得られる。

【0069】

前記チャープ波駆動信号 $D(t)$ は、送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を A_t 倍に増幅した信号の関係になっている。

【0070】

前記受信信号 $V_{rec}(t - \tau)$ は、その周波数特性 $V_{rec}(\omega)$ を用いて示すと、次のような関係がある。なお、 $H_{tr}(\omega)$ は、 $H_{tr}(\omega) = H_t(\omega) \cdot H_r(\omega)$ の関係を表し、 $F_{nl}(\omega)$ は、図 2 に示した超音波伝搬媒体の伝搬特性 $F(\omega)$ 内の非線形成分を示している。すなわち、

$$\begin{aligned} V_{rec}(\omega) &= V_{trans}(\omega) \times A_t \times H_{tr}(\omega) \times F_{nl}(\omega) \times A_r \\ &= V_{trans}(\omega) \times V_{rec} \delta(\omega) \times C \end{aligned} \quad (8) \quad 10$$

ここで、

$$V_{rec} \delta(\omega) = H_{tr}(\omega) \times F_{nl}(\omega) \times C \quad C: \text{定数} \quad (9)$$

である。すなわち、前記受信パルス信号 $V_{rec}(t - \tau)$ の周波数特性は、前記チャープ波駆動信号 $D(t)$ に

$$H_{tr}(\omega) \times F_{nl}(\omega) \times C,$$

を積算したものに等しい。 C' は定数である。

【0071】

以上から、送信パルス信号 $V_{trans}(\omega)$ に $V_{rec} \delta(\omega)$ ($V_{rec} \delta(\omega) = H_{tr}(\omega) \times F_{nl}(\omega)$) の絶対値 $abs(V_{rec} \delta(\omega))$ を積算した信号 $V_{trans}'(\omega)$ を形成し、これを逆フーリエ変換して得た時間軸信号である疑似送信パルス信号 $V_{trans}'(t)$ と受信信号 $V_{rec}(t - \tau)$ との相互相関を計算すれば最も相関値が高くなるといえる。以上が第一の方法である。 20

【0072】

あるいは、以下の方法でも同等の効果が得られる。

【0073】

受信信号 $V_{rec}(\omega)$ を $V_{rec} \delta(\omega)$ の絶対値で除算した結果を逆フーリエ変換して、時間軸信号である疑似受信パルス信号 $V_{rec}'(t - \tau)$ に変換し、その時間軸信号と、送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ との相互相関処理することによっても同等の効果が得られることは上式 (8) の関係から明らかである。尚、ここで $V_{rec} \delta(\omega)$ の絶対値を用いるのは前記除算結果に超音波伝搬時間 τ の情報を残すためであり、これによって物理的な考え方に矛盾をもたらすものではない。絶対値をとるのは、除算結果に τ に関する情報を残すことが目的であり、この目的が達成されるのであれば、他の方法であっても構わない。以上が第二の方法である。 30

【0074】

他の方法として、例えば、受信信号 $V_{rec}(t - \tau)$ をフーリエ変換して、周波数特性 $V_{rec}(\omega)$ を算出し、この信号 $V_{rec}(\omega)$ から絶対値信号、即ち位相情報を含まない周波数特性 $abs(V_{rec}(\omega))$ を算出し、この絶対値周波数特性において、該周波数特性における高調波成分の周波数範囲のレベルを基本波成分のピークレベルにほぼ等しくなるように増幅し、新たな受信信号 $abs(V_{rec}'(\omega))$ を算出し、この信号 $abs(V_{rec}'(\omega))$ を逆フーリエ変換して、新たに時間軸信号である疑似受信パルス信号 $V_{rec}'(t - \tau)$ を得る。この疑似受信パルス信号 $V_{rec}'(t - \tau)$ と、もとの送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ との間で相互相関処理をする方法でも良い。以上が第三の方法である。 40

【0075】

更には以下に記載する、より簡便な方法もある。

【0076】

送信信号 $V_{trans}(t)$ の周波数成分を全て、考慮する次数倍した第 2 の送信信号 $V_{trans2}(t)$ を形成し、もとの送信信号 $V_{trans}(t)$ と第 2 の送信信号 $V_{trans2}(t)$ とを加算したあらたな疑似送信パルス信号 $V_{trans}'(t)$ を形 50

成し、もとの送信信号 $V_{trans}(t)$ に対する受信信号 $V_{rec}(t-\tau)$ との間で相互相関処理する方法も、簡便で好ましい方法と言える。例えば、もとの送信信号 $V_{trans}(t)$ が f_L から f_H の周波数掃引されるチャープ波の場合、 $V_{trans_2}(t)$ として $2f_L$ から $2f_H$ で周波数掃引されるチャープ波を形成することになる。また 3 次の高調波までを計算する場合は、更に $3f_L$ から $3f_H$ で周波数掃引される第三のチャープ波信号を加算することになる。この様にして得られる広帯域送信パルス信号は相互相関処理に用いるだけであり、送信用超音波トランスデューサに印加する訳ではないので、その次数は適宜決めることが出来るし、より広帯域の送信用超音波トランスデューサを必要とするわけではない。ただし、この方法には超音波トランスデューサが有する伝達関数の効果が配慮されず、超音波トランスデューサの周波数特性に、不要振動が混在する場合

10

【0077】

尚、(8) 式の $V_{rec}\delta(\omega)$ に τ に関する情報が残っていると、 $V_{trans}'(t)$ とならずに

$$V_{trans}'(t-\tau'), \tau \neq \tau'$$

となり、受信信号 $V_{rec}(t-\tau)$ との相互相関処理をしても、 τ の正しい値が得られない。そこで、 $V_{rec}\delta(\omega)$ の絶対値を計算して τ に関する情報を持たない新たな $V_{rec}\delta'(\omega)$ を計算し、これによる前記第一の方法における $V_{trans}(\omega)$ への積算、あるいは前記第二の方法における $V_{rec}(\omega)$ を除算することに用いる。この操作によって、 τ に関する情報を含まない疑似送信パルス信号 $V_{trans}'(t)$ が得られることになり、受信信号 $V_{rec}(t-\tau)$ との相互相関処理によって正確な τ の値が得られることになる。

20

【0078】

また、受信信号 $V_{rec}(t-\tau)$ をフーリエ変換して得られる $V_{rec}(\omega)$ の絶対値 $abs(V_{rec}(\omega))$ は位相情報を持たないので、この絶対値 $abs(V_{rec}(\omega))$ において、高調波成分のピークレベルが基本波成分に等しくなるような演算処理を行い、その結果得られる $V_{rec}'(\omega)$ を逆フーリエ変換して得られる疑似受信パルス信号 $V_{rec}'(t-\tau)$ と送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ との間で相互相関処理することによって、更に相関値が改善される。

【0079】

[第1の実施の形態]

この実施の形態は前述した第四の方法に対応している。図4に示す超音波伝搬時間計測装置200は、送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を発生する送信部210と、前記送信部210からの送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を超音波パルス信号 $S_x(t)$ に変換する送信用超音波トランスデューサ230と、前記送信用超音波トランスデューサ230により変換された超音波パルス信号 $S_x(t)$ を測定対象の超音波伝搬媒体10を介して受信し、受信した超音波パルス信号 $S_x(t-\tau)$ を電気信号に変換する受信用超音波トランスデューサ240と、前記受信用超音波トランスデューサ240により電気信号に変換された超音波パルス信号を増幅して受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ を得る受信部260と、前記超音波伝搬媒体10が有する非線形性を考慮した参照信号と前記受信部260により得られた受信パルス信号との相互相関処理により、前記超音波伝搬媒体10を介して伝搬される超音波パルス信号 $S_x(t)$ の送受信間の時間間隔 τ を超音波伝搬時間として検出する信号処理部270とを備える。

40

【0080】

この超音波伝搬時間計測装置200は、所謂透過法で超音波伝搬時間を計測するものであって、前記送信用超音波トランスデューサ230と前記受信用超音波トランスデューサ240が測定対象の超音波伝搬媒体10の異なる二端面10A、10Bに設けられ、前記測定対象の超音波伝搬媒体10の一方の端面10Aから前記送信用超音波トランスデューサ230により送信され、前記測定対象の超音波伝搬媒体10を介して伝搬される超音波パルス信号 $S_x(t-\tau)$ が前記測定対象の超音波伝搬媒体10の他方の端面10Bにお

50

いて前記受信用超音波トランスデューサ240により受信されるまでの超音波伝搬時間を検出する。

【0081】

この超音波伝搬時間計測装置200において、前記送信部210は、前記送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ として周波数が $f_L \sim f_H$ の範囲で掃引されたチャープ波信号を発生するパルス信号発生器211と、前記パルス信号発生器211により送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ として発生された周波数が $f_L \sim f_H$ の範囲で掃引されたチャープ波信号を増幅して得られる駆動信号 $D(t)$ により前記受信用超音波トランスデューサを駆動する駆動回路212からなる。

【0082】

この送信部210は、前記パルス信号発生器211が出力した送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を前記信号処理部270に供給するとともに、この送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を増幅した駆動信号 $D(t)$ を前記駆動回路212から前記受信用超音波トランスデューサ230に供給して、前記駆動信号 $D(t)$ により前記受信用超音波トランスデューサ230を駆動する。

【0083】

前記受信用超音波トランスデューサ230は、前記駆動信号 $D(t)$ で駆動されることにより、前記送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を超音波パルス信号 $S_x(t)$ に変換して前記超音波伝搬媒体10を介して送信する。

【0084】

前記受信用超音波トランスデューサ240は、前記受信用超音波トランスデューサ230から送信され前記超音波伝搬媒体10を介して伝搬されてくる前記超音波パルス信号 $S_x(t-\tau)$ を受信し、前記超音波パルス信号 $S_x(t-\tau)$ を電気信号に変換して受信部260に供給する。

【0085】

前記受信部260は、前記受信用超音波トランスデューサ240による受信出力を広帯域増幅器261により増幅して受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ を得て、この受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ をAD変換器262によりデジタル化して信号処理部270に供給する。

【0086】

この超音波伝搬時間計測装置200における信号処理部270は、デジタル信号処理回路であって、前記送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ として前記パルス信号発生器により発生された周波数が $f_L \sim f_H$ の範囲で掃引されたチャープ波信号に $2f_L \sim 2f_H$ の周波数成分を持つチャープ波を加算した加算チャープ信号 $V_{add}(t)$ を疑似送信パルス信号 $V_{trans}'(t)$ として、前記受信部により得られる受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ との相互相関処理を行うことにより、前記測定対象の超音波伝搬媒体10を介して伝搬される超音波パルス信号 $S_x(t)$ が前記測定対象の超音波伝搬媒体10の他方の端面10Bにおいて前記受信用超音波トランスデューサ240により受信されるまでの超音波伝搬時間 τ を検出することができる。

【0087】

なお、本実施の形態における送信信号 $V_{trans}(t)$ に特定の窓関数 $W1(t)$ を積算して得られる信号を新たな疑似送信パルス信号 $V_{trans}'(t)$ として受信信号 $V_{rec}(t-\tau)$ との間で相互相関処理を行ってもよい。上記窓関数 $W1(t)$ は、チャープ波の立上り時刻 t_L での電圧レベルが、周波数が $(f_L + f_H)/2$ となる時刻における電圧レベルの α_L 倍、チャープ波の立下り時時刻 t_H での電圧レベルが、周波数が $(f_L + f_H)/2$ となる時刻における電圧レベルの α_H 倍となる波形、例えばTukey window、Hamming window、Hanning windowやBlackman windowなどの窓関数の逆数を用いることができる。本窓関数処理は、 $V_{trans}\delta(t)$ と $V_{trans}\delta(t-\tau)$ の送受信、すなわち超音波振動子が有する伝達関数を用いることに対する代替処理とも言える。従って、この窓関数処理は、前記した第四の方法に対しても適用可能である。

10

20

30

40

50

【0088】

[第2の実施の形態]

この実施の形態は前述した第三の方法に対応している。

前記信号処理部270において、図5のフローチャートに示す処理を行うことにより参照信号を生成して用いることもできる。

【0089】

すなわち、この場合、前記信号処理部270は、前記パルス信号発生器211により送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ として発生された周波数が $f_L \sim f_H$ の範囲で掃引されたチャープ波信号を前記駆動回路212により増幅して得られる駆動信号 $D(t)$ により前記送信用超音波トランスデューサ230を駆動して(ステップST1)、前記受信部260に得られる受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ をフーリエ変換(FFT処理)して周波数軸信号 $V_{rec}(\omega)$ に変換し(ステップST2)、前記周波数軸信号 $V_{rec}(\omega)$ の絶対値の高調波成分を増幅した周波数軸信号 $V_{rec}'(\omega)$ を算出し(ステップST3)、前記周波数軸信号 $V_{rec}'(\omega)$ を逆フーリエ変換して時間軸信号である疑似受信パルス信号 $V_{rec}'(t-\tau)$ に変換する(ステップST4)。

10

【0090】

そして、前記信号処理部270は、この疑似受信パルス信号 $V_{rec}'(t-\tau)$ と送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ との相互相関処理を行うことにより、位相差 τ を算出し、超音波伝搬時間を求める(ステップST6)。

【0091】

図6に示す超音波伝搬時間計測装置300は、送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を発生する送信部310と、前記送信部310からの送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を超音波パルス信号 $S_x(t)$ に変換して測定対象の超音波伝搬媒体10を介して送信し、前記測定対象の超音波伝搬媒体10を介して伝搬され反射されてくる前記超音波パルス信号 $S_x(t-\tau)$ を受信し、受信した超音波パルス信号 $S_x(t-\tau)$ を電気信号に変換する送受信兼用超音波トランスデューサ340と、前記送受信兼用超音波トランスデューサ340により電気信号に変換された超音波パルス信号を増幅して受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ を得る受信部360と、前記超音波伝搬媒体310が有する非線形性を考慮した参照信号と前記受信部360により得られた受信パルス信号との相互相関処理により、前記超音波伝搬媒体10を介して伝搬される超音波パルス信号 $S_x(t)$ の送受信間の時間間隔 τ を超音波伝搬時間として検出する信号処理部370を備える。

20

30

【0092】

この超音波伝搬時間計測装置300は、所謂反射法で超音波伝搬時間を計測するものであって、前記送受信兼用超音波トランスデューサ340が測定対象の超音波伝搬媒体10の一端面10Aに設けられ、前記測定対象の超音波伝搬媒体10の一方の端面10Aから前記送受信兼用超音波トランスデューサ340により送信され、前記測定対象の超音波伝搬媒体10を介して伝搬される超音波パルス信号 $S_x(t)$ が前記測定対象の超音波伝搬媒体10の他方の端面10Bにおいて反射され前記測定対象の超音波伝搬媒体10の前記一方の端面10Aにおいて前記送受信兼用超音波トランスデューサ340により受信されるまでの超音波伝搬時間 τ を検出する。

40

【0093】

この超音波伝搬時間計測装置300において、前記送信部310は、前記送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ として周波数が $f_L \sim f_H$ の範囲で掃引されたチャープ波信号を発生するパルス信号発生器311と、前記送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を増幅して得られる駆動信号 $D(t)$ により前記送信用超音波トランスデューサを駆動する駆動回路312からなる。

【0094】

この送信部310は、前記パルス信号発生器311が出力した送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を前記信号処理部370に供給するとともに、この送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を増幅した駆動信号 $D(t)$ を前記送受信兼用超音波トランスデューサ340の

50

送信用超音波振動子部に供給して送信超音波 $S_x(t)$ を発生させる。

【0095】

前記送受信兼用超音波トランスデューサ340の送信用超音波振動子部は、前記送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を増幅した駆動信号 $D(t)$ を超音波パルス信号 $S_x(t)$ に変換して前記超音波伝搬媒体10に送信し、前記超音波伝搬媒体10を介して伝搬され他方の端面10Bにおいて反射され戻されてくる前記超音波パルス信号 $S_x(t-\tau)$ を受信し、前記超音波パルス信号 $S_x(t-\tau)$ を電気信号に変換して受信部360に供給する。

【0096】

前記受信部360は、前記送受信兼用超音波トランスデューサ340による受信出力を広帯域増幅器361により増幅して受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ を得て、この受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ をAD変換器362によりデジタル化して信号処理部370に供給する。

【0097】

この超音波伝搬時間計測装置300における信号処理部370は、デジタル信号処理回路であって、前記受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ をフーリエ変換して周波数特性 $V_{rec}(\omega)$ に変換し、更に周波数特性 $V_{rec}(\omega)$ の絶対値 $Abs(V_{rec}(\omega))$ を計算し、該絶対値周波数特性 $Abs(V_{rec}(\omega))$ の高調波領域の信号レベルを基本波周波数領域のピークレベルに等化した新たな絶対値周波数特性 $Abs(V_{rec}'(\omega))$ が得られるような信号処理を施し、この信号処理結果を逆フーリエ変換して、疑似受信パルス信号 $V_{rec}'(t-\tau)$ を形成し、これと送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ との間で相互相関処理を行うことにより、前記測定対象の超音波伝搬媒体10を往復するのにかかった超音波伝搬時間 τ を検出する。しかし実際には、基本波成分に対する高調波成分のレベル比は、相互相関信号のピーク信号のピーク値や半値幅をモニターしながら、ピーク値が最大、半値幅が最小になる最適値に調整することが好ましい。

【0098】

なお、前記絶対値周波数特性 $Abs(V_{rec}(\omega))$ の高調波領域の信号と基本波周波数領域の信号は、次のように手法で形成するのが好ましい。すなわち、高調波領域の信号は、正極性のチャープ波駆動信号 $D^+(t)$ を送信用超音波トランスデューサに印加したときに受信用超音波トランスデューサで得られる受信信号 $V_{rec}^+(t-\tau)$ と、負極性のチャープ波駆動信号 $D^-(t)$ を送信用超音波トランスデューサに印加したときに受信用超音波トランスデューサで得られる受信信号 $V_{rec}^-(t-\tau)$ との和をとることにより抽出される信号とし、また、基本波周波数領域の信号は、正極性のチャープ波駆動信号 $D^+(t)$ を送信用超音波トランスデューサに印加したときに受信用超音波トランスデューサで得られる受信信号 $V_{rec}^+(t-\tau)$ と、負極性のチャープ波駆動信号 $D^-(t)$ を送信用超音波トランスデューサに印加したときに受信用超音波トランスデューサで得られる受信信号 $V_{rec}^-(t-\tau)$ との差をとることにより抽出される信号とする。受信用超音波トランスデューサで得られる受信信号の基本波成分は逆位相であるが、高調波成分は同位相であるので、受信信号 $V_{rec}^-(t-\tau)$ と受信信号 $V_{rec}^+(t-\tau)$ の和をとることにより、基本波成分は相殺され、高調波成分は加算されて2倍の信号レベルの信号として抽出され、また、受信信号 $V_{rec}^-(t-\tau)$ と受信信号 $V_{rec}^+(t-\tau)$ の差をとることにより、高調波成分は相殺され、基本波成分は加算されて2倍の信号レベルの信号として抽出され、前記絶対値周波数特性 $Abs(V_{rec}(\omega))$ の高調波領域の信号と基本波周波数領域の信号を効率よく形成することができる。

【0099】

尚、伝搬時間と音速との関係から試料の厚さや反射点までの距離を計算する時は前記超音波伝搬時間 τ に1/2倍した値を用いる必要があることはいうまでも無い。

【0100】

この超音波伝搬時間計測装置300では、前記送受信兼用超音波トランスデューサ340の送信用超音波トランスデューサ部と受信用超音波トランスデューサ部を並列接続し、

この並列接続した送受信兼用超音波トランスデューサ 340 で送信超音波を発生させ、他端面で反射し、戻ってきたエコー信号を検知し送信してから受信するまでの時間 τ を $1/2$ した時間 $\tau_1/2$ を超音波伝搬時間とし、音速を用い、試料の厚さや異物や欠陥などの対象物までの距離を検出することができる。

【0101】

[超音波トランスデューサの構成例]

ここで、送信用超音波トランスデューサ及び前記受信用超音波トランスデューサには、例えば図 7 の (A), (B) に示すように、電極が送信用電極部と受信用電極部に分割された分割型広帯域超音波トランスデューサ 20 を用いることができる。この分割型広帯域超音波トランスデューサ 20 は、リング状コンポジット圧電振動子 24、円板状コンポジット圧電振動子 25 からなり、前記リング状コンポジット圧電振動子 24 の内側円内に前記円板状コンポジット圧電振動子 25 が配置される。両コンポジット圧電振動子 24, 25 は同じ構造と特性を有し、前記円板状コンポジット 25 の厚さはリング状コンポジット圧電振動子 24 の厚さの約 $1/3$ に設定されており、分割領域 36 によって両コンポジット圧電振動子 24, 25 が分離されている。この超音波トランスデューサ 20 において、26 は共通接地電極、27 はプラノコーンケープ状の音響レンズ、28 はダンピング層、29 はエポキシ樹脂封止層である。両コンポジット圧電振動子 24, 25 の図示しない信号入出力側電極は、ハウジング 33 に取り付けたマイクロドットコネクタ 34, 35 に配線 31, 32 を介して接続されている。37 は超音波トランスデューサ固定台への取り付けネジであり、ここでは UHF コネクタを用いている。

【0102】

このような構造の分割型広帯域超音波トランスデューサ 20 は、両コンポジット圧電振動子 24, 25 を電氣的に並列接続することにより、あたかも単体の超音波トランスデューサかのように用いることができる。

【0103】

また、前記分割型広帯域超音波トランスデューサ 20 は、送信時は片側の低周波側超音波トランスデューサ部を用い、受信時は他の高周波側超音波トランスデューサ部を使うことができる。このような使い方はパルス幅が長いチャープ波を送信信号に用いる場合有利となる。即ち、対象物がチャープ波送信信号の時間内に相当する距離にある場合、受信信号とのオーバーラップ領域が出現し、送信波形 $V_{trans}(t)$ と受信波形 $V_{rec}(t-\tau)$ とが峻別できなくなり相互相関処理が難しくなる。送信用超音波トランスデューサは送信駆動のみ行い、受信用超音波トランスデューサは受信のみ行うことによって、両信号が干渉した信号が発生することはない。

【0104】

さらに、前記分割型広帯域超音波トランスデューサ 20 は、送信時は片側の低周波側超音波振動子を用い、受信時は電氣的に並列接続になるようにスイッチ切り替えをして使うこともできる。この場合、受信信号の基本波成分の信号レベルに対して高調波成分の信号レベルの相対比率を可変とする増幅手段を伴う場合もある。

【0105】

[第 3 の実施の形態]

この実施の形態は前述した第一の方法に対応している。

【0106】

図 8 に示す超音波伝搬時間計測装置 400 において、前記送信部 410 は、第 1 の送信パルス信号 $V_{trans}\delta(t)$ として δ 関数と近似できる $D(\omega) = 1$ の広帯域パルス信号、たとえば半波の正弦波信号を発生する広帯域パルス発生器 411 A と、立ち上がり周波数 f_L 、停止周波数 f_H でバースト長が ΔT のチャープ信号を発生するチャープ信号発生器 411 B を備える。前記広帯域パルス発生器 411 A により発生される第 1 の送信パルス信号 $V_{trans}\delta(t)$ は、スイッチ制御信号発生器 413 により発生される第 1 のスイッチ制御信号により ON・OFF 制御される第 1 のスイッチ 414 A を介して駆動回路 412 に供給され、また、前記チャープ信号発生器 411 B により発生される第 2

の送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ は、前記スイッチ制御信号発生器 413 により発生される第 2 のスイッチ制御信号により ON・OFF 制御される第 2 のスイッチ 414 B を介して前記駆動回路 412 に供給される。前記スイッチ制御信号発生器 413 は、前記信号処理部 470 による制御に基づいて前記第 1 のスイッチ制御信号と第 2 のスイッチ制御信号を発生する。

【0107】

この超音波伝搬時間計測装置 400 は、上述の図 3 を用いて説明したパルス圧縮法を採用して、所謂透過法で超音波伝搬時間を計測するものであって、前記送信用超音波トランスデューサ 430 と前記受信用超音波トランスデューサ 440 が測定対象の超音波伝搬媒体 10 の異なる二端面 10A、10B に設けられている。

10

【0108】

前記送信用超音波トランスデューサ 430 と前記受信用超音波トランスデューサ 440 には、ともに上述の図 7 に示した構造の分割型広帯域超音波トランスデューサ 20 の両超音波トランスデューサ部を並列接続したものをを用いている。

【0109】

前記送信部 410 は、前記広帯域パルス発生器 411 A により発生される第 1 の送信パルス信号 $V_{trans\delta}(t)$ を前記駆動回路 412 により増幅した第 1 の駆動信号 $D_1(t)$ を、前記送信用超音波トランスデューサ 430 に供給して、また、前記チャープ信号発生器 411 B が発生した第 2 の送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を前記信号処理部 470 に供給するとともに、この第 2 の送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を前記駆動回路 412 により増幅した第 2 の駆動信号 $D_2(t)$ を前記送信用超音波トランスデューサ 430 に印加する。

20

【0110】

前記送信用超音波トランスデューサ 430 は、第 1 の送信パルス信号 $V_{trans\delta}(t)$ を第 1 の超音波パルス信号 $S_{1X}(t)$ に変換して前記超音波伝搬媒体 10 に送信し、前記第 2 の送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を第 2 の超音波パルス信号 $S_{2X}(t)$ に変換して前記超音波伝搬媒体 10 に送信する。

【0111】

前記受信用超音波トランスデューサ 440 は、前記送信用超音波トランスデューサ 430 から送信され前記超音波伝搬媒体 10 を介して伝搬されてくる前記第 1 の超音波パルス信号 $S_{1X}(t-\tau)$ を受信し、前記第 1 の超音波パルス信号 $S_{1X}(t-\tau)$ を電気信号に変換して受信部 460 に供給し、また、前記送信用超音波トランスデューサ 430 から送信され前記超音波伝搬媒体 10 を介して伝搬されてくる前記第 2 の超音波パルス信号 $S_{2X}(t-\tau)$ を受信し、前記第 2 の超音波パルス信号 $S_{2X}(t-\tau)$ を電気信号に変換して前記受信部 460 に供給する。

30

【0112】

前記受信部 460 は、前記受信用超音波トランスデューサ 440 による受信出力を広帯域増幅器 461 により増幅して、前記第 1 の超音波パルス信号 $S_{1X}(t-\tau)$ の受信時に第 1 の受信信号 $V_{rec\delta}(t-\tau)$ を得て、この第 1 の受信パルス信号 $V_{rec\delta}(t-\tau)$ を A/D 変換器 462 によりデジタル化して信号処理部 470 に供給し、また、前記第 2 の超音波パルス信号 $S_{2X}(t-\tau)$ の受信時に第 2 の受信信号 $V_{rec}(t-\tau)$ を得て、この第 2 の受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ を前記 A/D 変換器 462 によりデジタル化して前記信号処理部 470 に供給する。

40

【0113】

この超音波伝搬時間計測装置 400 における信号処理部 470 は、デジタル信号処理回路であって、図 9 のフローチャートに示す処理を行う。前記第 1 の送信パルス信号 $V_{trans\delta}(t)$ を送信用超音波トランスデューサに印加し (ST11)、前記受信部 460 により得られた第 1 の受信パルス信号 $V_{rec\delta}(t-\tau)$ をフーリエ変換して周波数特性 $V_{rec\delta}(\omega)$ に変換し (ST12)、更に周波数特性 $V_{rec\delta}(\omega)$ の絶対値周波数特性 $abs(V_{rec\delta}(\omega))$ を計算する (ST13)。次にこの絶対値周波数

50

特性 $Abs(V_{rec} \delta(\omega)) (= V_{rec} \delta'(\omega))$ を第 2 の送信信号 $V_{trans}(t)$ (ST14) の周波数特性 $V_{trans}(\omega)$ (ST15) に積算し (ST16)、該積算信号を逆フーリエ変換して得られる時間軸特性である疑似送信パルス信号 $V_{trans}'(t)$ (ST17) と、第 2 の送信信号 $V_{trans}(t)$ に対する受信信号 $V_{rec}(t-\tau)$ との間で相互相関処理 (ST18) を行うことにより、前記超音波伝搬媒体 10 を介して伝搬される第 2 の超音波パルス信号 $S_{2X}(t)$ の送受信間の時間間隔を超音波伝搬時間 τ として検出して呈示する (ST19) ことが可能となる。

〔第 4 の実施の形態〕

この実施の形態は前述した第二の方法に対応している。

【0114】

図 8 に示す超音波伝搬時間計測装置 400 において、前記送信部 410 は、第 1 の送信パルス信号 $V_{trans} \delta(t)$ として δ 関数と近似できる $D(\omega) = 1$ の広帯域パルス信号、たとえば半波の正弦波信号を発生する広帯域パルス発生器 411A と、立ち上がり周波数 f_L 、停止周波数 f_H でバースト長が ΔT のチャープ信号を発生するチャープ信号発生器 411B を備える。前記広帯域パルス発生器 411A により発生される第 1 の送信パルス信号 $V_{trans} \delta(t)$ は、スイッチ制御信号発生器 413 により発生される第 1 のスイッチ制御信号により ON・OFF 制御される第 1 のスイッチ 414A を介して駆動回路 412 に供給され、また、前記チャープ信号発生器 411B により発生される第 2 の送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ は、前記スイッチ制御信号発生器 413 により発生される第 2 のスイッチ制御信号により ON・OFF 制御される第 2 のスイッチ 414B を介して前記駆動回路 412 に供給される。前記スイッチ制御信号発生器 413 は、前記信号処理部 470 による制御に基づいて前記第 1 のスイッチ制御信号と第 2 のスイッチ制御信号を発生する。

【0115】

この超音波伝搬時間計測装置 400 は、上述の図 3 を用いて説明したパルス圧縮法を採用して、所謂透過法で超音波伝搬時間を計測するものであって、前記送信用超音波トランスデューサ 430 と前記受信用超音波トランスデューサ 440 が測定対象の超音波伝搬媒体 10 の異なる二端面 10A、10B に設けられている。

【0116】

前記送信用超音波トランスデューサ 430 と前記受信用超音波トランスデューサ 440 には、ともに上述の図 7 に示した構造の分割型広帯域超音波トランスデューサ 20 の両超音波トランスデューサ部を並列接続したものをを用いている。信号処理フローチャートが示されている図 13 を併用しながら本実施の形態の作用を説明する。

【0117】

前記送信部 410 は、前記広帯域パルス発生器 411A により発生される第 1 の送信パルス信号 $V_{trans} \delta(t)$ を前記駆動回路 412 により増幅した第 1 の駆動信号 $D_1(t)$ を、前記送信用超音波トランスデューサ 430 に供給する (ST21)、また、前記チャープ信号発生器 411B が発生した第 2 の送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を前記信号処理部 470 に供給するとともに、この第 2 の送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を前記駆動回路 412 により増幅した第 2 の駆動信号 $D_2(t)$ を前記送信用超音波トランスデューサ 430 に印加する (ST24)。

【0118】

前記送信用超音波トランスデューサ 430 は、第 1 の送信パルス信号 $V_{trans} \delta(t)$ を第 1 の超音波パルス信号 $S_{1X}(t)$ に変換して前記超音波伝搬媒体 10 に送信し、前記第 2 の送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を第 2 の超音波パルス信号 $S_{2X}(t)$ に変換して前記超音波伝搬媒体 10 に送信する。

【0119】

前記受信用超音波トランスデューサ 440 は、前記送信用超音波トランスデューサ 430 から送信され前記超音波伝搬媒体 10 を介して伝搬されてくる前記第 1 の超音波パルス信号 $S_{1X}(t-\tau)$ を受信し、前記第 1 の超音波パルス信号 $S_{1X}(t-\tau)$ を電気信

10

20

30

40

50

号に変換して受信部460に供給し、また、前記送信用超音波トランスデューサ430から送信され前記超音波伝搬媒体10を介して伝搬されてくる前記第2の超音波パルス信号 $S_{2x}(t-\tau)$ を受信し、前記第2の超音波パルス信号 $S_{2x}(t-\tau)$ を電気信号に変換して前記受信部460に供給する。

【0120】

前記受信部460は、前記受信用超音波トランスデューサ440による受信出力を広帯域増幅器461により増幅して、前記第1の超音波パルス信号 $S_{1x}(t-\tau)$ の受信時に第1の受信信号 $V_{rec}\delta(t-\tau)$ を得て(ST12)、この第1の受信パルス信号 $V_{rec}\delta(t-\tau)$ をAD変換器462によりデジタル化して信号処理部470に供給し、また、前記第2の超音波パルス信号 $S_{2x}(t-\tau)$ の受信時に第2の受信信号 $V_{rec}(t-\tau)$ を得て(ST15)、この第2の受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ を前記AD変換器462によりデジタル化して前記信号処理部470に供給する。

【0121】

この超音波伝搬時間計測装置400における信号処理部470は、デジタル信号処理回路であって、図13のフローチャートに示す処理を行うことにより、前記第1の送信パルス信号 $V_{trans}\delta(t)$ と前記受信部460により得られた第1の受信パルス信号 $V_{rec}\delta(t-\tau)$ をフーリエ変換して周波数特性 $V_{rec}\delta(\omega)$ に変換し(ST26)、更に周波数特性 $V_{rec}\delta(\omega)$ を計算し(ST22)、次いで絶対値周波数特性 $abs(V_{rec}\delta(\omega))$ (これを $V_{rec}\delta'(\omega)$ と表記しなす)を計算する(ST23)。この信号 $V_{rec}\delta'(\omega)$ には一度絶対値処理を行っているので、位相情報 τ を含んでいない。従って、 $V_{trans}(t)$ に対する受信信号である $V_{rec}(t-\tau)$ をフーリエ変換して得られる周波数特性 $V_{rec}(\omega)$ を除算した除算信号にはもとの位相情報 τ が含まれている(ST27)。そこで、該除算信号 $V_{rec}'(\omega)$ を逆フーリエ変換して(ST28)得られる時間軸信号である疑似受信パルス信号 $V_{rec}'(t-\tau)$ と送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ との間で相互相関処理する(ST29)ことにより前記超音波伝搬媒体10を介して伝搬される第2の超音波パルス信号 $S_{2x}(t)$ の送受信間の時間間隔を超音波伝搬時間 τ として検出して呈示する(ST30)ことが可能となる。

【0122】

ここで、前記チャープ信号の開始周波数 f_L が例えば2.5MHz、終了周波数 f_H が7.5MHzのとき、超音波トランスデューサの比帯域幅は100%となり、従来のPZTセラミクス等の圧電振動子では実現不可能な値であり、ポリフッ化ビニリデン(PVDF)のような高分子圧電体では十分な送信音圧が得られない。しかしながら、送信用超音波トランスデューサ430としては、コンポジット圧電振動子を用い分割型にして両超音波トランスデューサ部を並列接続することにより、単体の超音波トランスデューサとして送受信兼用で使えることが出来る。

【0123】

尚、周波数 $3f_0$ を中心としたピークには、超音波伝搬によって発生した非線形第3高調波成分と、超音波トランスデューサとして圧電振動子を用いる場合の線形成分を加算したものであり、超音波トランスデューサの伝達関数の一部である三次のオーバートーン成分とが含まれている。このように、受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ の周波数特性には超音波トランスデューサ430、440の伝達関数 $H_t(\omega) \times H_r(\omega)$ に相当する成分と、超音波伝搬によって発生した非線形高調波成分 $F_{n1}(\omega)$ が含まれる。 F_0 は超音波トランスデューサの伝達関数の基本波成分、 F_1 は超音波伝搬によって発生した非線形成分 $F_{n1}(\omega)$ のうちの第二高調波成分、 F_2 は非線形第三高調波成分と送信超音波に既に含まれている三次のオーバートーン成分を加算した成分に対応している。尚、図10に示した周波数特性は受信信号 $V_{rec}(t-\tau)$ をフーリエ変換して得られる $V_{rec}\delta(\omega)$ の絶対値 $abs(V_{rec}\delta(\omega))$ であり、複素信号ではなく、実数信号となっていて、位相 τ に関する情報を含んでいない。従って、位相 τ に関する情報を含んでいない $abs(V_{rec}\delta(\omega))$ で位相 τ に関する情報を含んでいる $V_{rec}(t-\tau)$

）を除算すると、 τ に関する情報は除算結果にそのまま残っていて、それを逆フーリエ変換して得られる時間軸信号である疑似受信パルス信号 $V_{rec}'(t-\tau)$ にも τ に関する情報が同じ様に残っている。従って、その疑似受信パルス信号 $V_{rec}'(t-\tau)$ と送信信号 $V_{trans}(t)$ との相互相関処理を行うことによって τ を高精度で検出できるようになるのである。

【0124】

また、一般に非線形超音波は n 次 (n : 2 以上の整数) の高調波まで含まれ、次数 n が高まるほどその振幅レベルが対数的に低減するので $n=3$ まで考慮すれば十分と言われているが、本発明の技術に於いても $n=3$ までの非線形成分までを考えれば十分と言える。しかし、 n が 4 以上の次数まで考慮すると支障があるわけではない。また、 $n=2$ までを考慮するよりは、 $n=3$ までを考慮した相互相関処理を行う方が、受信パルス信号 $V_{rec}(\omega)$ と参照信号としての $V_{trans}(\omega)$ の類似度は高まり、計測精度が向上することは言うまでもない。

【0125】

図 10 に実線で示した周波数特性は、以上の様にして形成される $n=3$ までを考慮した周波数特性である。

【0126】

パルス圧縮信号、即ち相互相関信号は、チャープ信号をフーリエ変換することによる Sinc 関数の要素を持ち、図 12 に示すように相関値が最大を示すピーク PK と、その両側にサイドローブ SL を伴う特徴を持つ。該最大を示すピーク PK の半値幅 Δt が小さいほど、送信超音波の発生時刻と受信信号の受信時間差、即ち超音波伝搬時間の計測分解能が良いことを意味している。参照超音波と被参照信号の波形の類似度が高くなるほど最大を示すピーク PK のピーク相関値は 1 に近くなる。また、本実施の形態のように、チャープ波を使ってパルス圧縮することにより最大を示すピーク PK の半値幅 Δt は小さくなり、計測精度が向上してくる。

【0127】

〔第 5 の実施の形態〕

図 14 に示す超音波伝搬時間計測装置 500 は、上述の図 3 を用いて説明したパルス圧縮法を採用して、反射法で超音波伝搬時間を計測するものであって、第 1 の送信パルス信号 $V_{trans}\delta(t)$ と第 2 の送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を発生する送信部 510 を備え、送信用超音波トランスデューサ、例えばリング型振動子 24 と受信用超音波トランスデューサ、例えば円板型振動子 25 を送受信用超音波トランスデューサ 540 に別体として構造化された、上述の図 7 に示した構造の分割型広帯域超音波トランスデューサ 20 が測定対象の超音波伝搬媒体 10 の一端面 10A に設けられている。

【0128】

この超音波伝搬時間計測装置 500 において、前記送信部 510 は、第 1 の送信パルス信号 $V_{trans}\delta(t)$ として δ 関数と近似できる $D(\omega)=1$ の広帯域パルス信号、たとえば半波の正弦波信号を発生する広帯域パルス発生器 511A と、立ち上がり周波数 f_L 、停止周波数 f_H でバースト長が ΔT のチャープ信号を発生するチャープ信号発生器 511B を備える。前記広帯域パルス発生器 511A により発生される第 1 の送信パルス信号 $V_{trans}\delta(t)$ は、スイッチ制御信号発生器 513 により発生される第 1 のスイッチ制御信号により ON・OFF 制御される第 1 のスイッチ 514A を介して駆動回路 512 に供給され、また、前記チャープ信号発生器 511B により発生される第 2 の送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ は、前記スイッチ制御信号発生器 513 により発生される第 2 のスイッチ制御信号により ON・OFF 制御される第 2 のスイッチ 514B を介して前記駆動回路 512 に供給される。前記スイッチ制御信号発生器 513 は、前記信号処理部 570 による制御に基づいて前記第 1 のスイッチ制御信号と第 2 のスイッチ制御信号を発生する。

【0129】

前記送信部 510 は、前記広帯域パルス発生器 511A により発生される第 1 の送信パ

ルス信号 $V_{trans} \delta(t)$ を前記駆動回路 512 により増幅した第 1 の駆動信号 $D_1(t)$ を前記駆動回路 512 から前記送受信兼用超音波トランスデューサ 540 内に構造化された一方の振動子、例えばリング型振動子に供給して、前記駆動信号 $D_1(t)$ により超音波トランスデューサ 540 内に構造化された一方の振動子、例えばリング型振動子を駆動し、また、前記チャープ信号発生器 511B が発生した第 2 の送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を前記信号処理部 570 に供給するとともに、この第 2 の送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を前記駆動回路 412 により増幅した第 2 の駆動信号 $D_2(t)$ を前記駆動回路 512 から前記超音波トランスデューサ 540 内に構造化された一方の振動子、例えばリング型振動子に供給して、前記駆動信号 $D_2(t)$ により前記送受信兼用超音波トランスデューサ 540 内に構造化された一方の振動子、例えばリング型振動子を駆動する。

10

【0130】

ここで、前記チャープ信号発生器 511B で発生するチャープ信号の開始周波数 f_L が例えば 2.5 MHz、終了周波数 f_H が 7.5 MHz のとき、超音波トランスデューサの比帯域幅は 100% となり、従来の PZT セラミクス等の圧電振動子では実現不可能な値であり、ポリフッ化ビニリデン (PVDF) の様な高分子圧電体では十分な送信音圧が得られない。前記送受信兼用超音波トランスデューサ 540 は、受信時には基本波と第三高調波成分まで、即ちチャープ信号の開始周波数 f_L が例えば 2.5 MHz、終了周波数 f_H が 7.5 MHz のとき、2.5 MHz から 22.5 MHz の帯域を受信できる必要がある。このため、送受信兼用超音波トランスデューサ 540 として用いる分割型広帯域超音波トランスデューサ 20 の、一方の圧電振動子、例えばリング型圧電振動子 24 の厚さを T としたとき、他の圧電素子、例えば円板型圧電振動子 25 の厚さは $T/3$ にし、リング型圧電素子 24 を送信専用、円板型圧電振動子 25 を受信専用にして使うことになる。この分割型広帯域超音波トランスデューサ 20 の一方の圧電振動子、例えばリング型振動子 24 に、前記チャープ信号発生器 511B で発生するチャープ信号を駆動回路 512 によって 100 V 程度に増幅した駆動信号 $D_2(t)$ が印加される。

20

【0131】

前記超音波トランスデューサ 540 を構成するリング型圧電素子 24 は、前記駆動信号 $D_1(t)$ で駆動されることにより、前記第 1 の送信パルス信号 $V_{trans} \delta(t)$ を第 1 の超音波パルス信号 $S_{1x}(t)$ に変換して前記測定対象の超音波伝搬媒体 10 を介して送信し、また、前記駆動信号 $D_2(t)$ で駆動されることにより、前記第 2 の送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を第 2 の超音波パルス信号 $S_{2x}(t)$ に変換して前記測定対象の超音波伝搬媒体 10 を介して送信し、前記測定対象の超音波伝搬媒体 10 を介して伝搬され前記超音波伝搬媒体 10 の他方の端面 10B において反射されて戻ってくる前記第 1 の超音波パルス信号 $S_{1x}(t-\tau)$ を受信し、前記第 1 の超音波パルス信号 $S_{1x}(t-\tau)$ を電気信号に変換して受信部 560 に供給し、また、前記送信用超音波トランスデューサ 540 から送信され前記測定対象の超音波伝搬媒体 10 を介して伝搬され前記超音波伝搬媒体 10 の他方の端面 10B において反射されて戻ってくる前記第 2 の超音波パルス信号 $S_{2x}(t-\tau)$ を受信し、前記第 2 の超音波パルス信号 $S_{2x}(t-\tau)$ を電気信号に変換して前記受信部 560 に供給する。

30

40

【0132】

前記受信部 560 は、前記受信用超音波トランスデューサ 540 による受信出力を広帯域増幅器 561 により増幅して、前記第 1 の超音波パルス信号 $S_{1x}(t-\tau)$ の受信時に第 1 の受信パルス信号 $V_{rec} \delta(t-\tau)$ を得て、この第 1 の受信パルス信号 $V_{rec} \delta(t-\tau)$ を AD 変換器 462 によりデジタル化して信号処理部 570 に供給し、また、前記第 2 の超音波パルス信号 $S_{2x}(t-\tau)$ の受信時に第 2 の受信信号 $V_{rec}(t-\tau)$ を得て、この第 2 の受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ を前記 AD 変換器 462 によりデジタル化して前記信号処理部 570 に供給する。

【0133】

この超音波伝搬時間計測装置 500 における信号処理部 570 は、デジタル信号処理回

50

路であって、前記超音波伝搬時間計測装置 400 における信号処理部 470 と同様に、前記図 9 又は図 13 のフローチャートに示した処理を行うことにより、前記第 1 の送信パルス信号 $V_{trans} \delta(t)$ と前記受信部 560 により得られた第 1 の受信パルス信号 $V_{rec} \delta(t - \tau)$ から前記超音波伝搬媒体 10 が有する非線形性を考慮した疑似送信パルス信号 $V_{trans}'(t)$ を形成し、形成した疑似送信パルス信号 $V_{trans}'(t)$ を前記受信部 560 により得られた第 2 の受信パルス信号 $V_{rec}(t - \tau)$ との相互相関処理により、前記超音波伝搬媒体 10 を介して伝搬される第 1 の超音波パルス信号 $S_{2x}(t - \tau)$ の送受信間の時間間隔を超音波伝搬時間 τ として検出して呈示する。

【0134】

なお、この図 14 に示した超音波伝搬時間計測装置 500 は、前記信号処理部 570 により、前記送信部 510 の第 1 のスイッチ 514A を OFF 状態とし、第 2 のスイッチ 514B を ON 状態とするようにスイッチ制御信号発生器 513 の動作を制御して、前記チャープ信号発生器 511B により発生される第 2 の送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を前記駆動回路 512 により増幅した第 1 の駆動信号 $D_2(t)$ を前記駆動回路 512 から前記送受信兼用超音波トランスデューサ 540 に供給して、前記駆動信号 $D_2(t)$ により前記送受信兼用超音波トランスデューサ 540 の一方、例えばリング型振動子 24 を駆動するものとするることにより、上述の図 6 に示した超音波伝搬時間計測装置 300 として用いることもできる。本実施の形態では、送信用圧電振動子には送信駆動にのみ、受信用圧電振動子はエコー信号の受信のみに用いるので、送信信号のパルス幅によらず両信号が重なり合うことがないので、全ての伝搬時間範囲で伝搬時間を高精度に検出して呈示できるようになる。

【0135】

〔第 6 の実施の形態〕

図 15 に示す超音波伝搬時間計測装置 500A は、上述の図 14 に示した超音波伝搬時間計測装置 500 における前記送受信兼用超音波トランスデューサ 540 として用いた分割型広帯域超音波トランスデューサ 20 を構成しているリング状コンポジット圧電振動子 24 と円板状コンポジット圧電振動子 25 を送信用超音波トランスデューサと受信用超音波トランスデューサとして個別に機能させるようにしたものである。

【0136】

すなわち、この超音波伝搬時間計測装置 500A では、送信用超音波トランスデューサとしてリング状コンポジット圧電振動子 24 が送信部 510 の駆動回路 512 に接続されており、受信用超音波トランスデューサとして円板状コンポジット圧電振動子 25 が受信部 560 の広帯域増幅器 561 に接続されている。

【0137】

そして、超音波伝搬時間計測装置 500A は、信号処理部 570 により、送信部 510 の第 1 のスイッチ 514A を OFF 状態とし、第 2 のスイッチ 514B を ON 状態とするようにスイッチ制御信号発生器 513 の動作を制御して、前記チャープ信号発生器 511B により発生される第 2 の送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ を前記駆動回路 512 により増幅した第 1 の駆動信号 $D_2(t)$ を前記駆動回路 512 から前記送受信兼用超音波トランスデューサ 540 供給して、前記駆動信号 $D_2(t)$ により前記送受信兼用超音波トランスデューサ 540 を駆動するものとするることにより、上述の図 6 に示した超音波伝搬時間計測装置 300 として機能するようにしたものである。

【0138】

この超音波伝搬時間計測装置 500A における他の構成要素は、上述の図 14 に示した超音波伝搬時間計測装置 500 と同じなので、図 14 中に同一符号を付して、その詳細な説明を省略する。

【0139】

この超音波伝搬時間計測装置 500A において、送受信兼用超音波トランスデューサ 540 として用いた分割型広帯域超音波トランスデューサ 20 を構成している両コンポジット圧電振動子 24、25 は互いに面積が等しく、リング状コンポジット圧電振動子 24 は

中心周波数が 5 MHz 、円板圧電振動子 25 は中心周波数が 15 MHz に成る厚さに設定されている。比帯域幅がともに 100% あるとすると、リング状コンポジット圧電振動子 24 は 2.5 MHz から 7.5 MHz の帯域を有し、送信部 510 の駆動回路 512 により駆動信号 $D_2(t)$ が印加され、送信超音波パルス信号を発生することだけに用いられ、円板状コンポジット圧電振動子 25 は、 7.5 MHz から 22.5 MHz の帯域を有し、受信超音波パルス信号を電気信号に変換することだけに用いられる。

【0140】

したがって、リング状コンポジット圧電振動子 24 に印加される駆動信号 $D_2(t)$ は、開始周波数 f_L が 2.5 MHz 、終了周波数 f_H が 7.5 MHz のチャープ信号であり、該チャープ信号によって駆動されて、超音波パルス信号を一端面 10A から超音波伝搬媒体 10 に送信する。そして、その超音波パルス信号が前記超音波伝搬媒体 10 の他端面 10B に到達し、該他端面 10B で反射された超音波パルス信号がパルスエコー信号となって受信用の円板状コンポジット圧電振動子 25 で受信され、電気信号に変換される。そして、受信部 260 において、前記受信用の円板状コンポジット圧電振動子 25 で受信された超音波パルス信号の電気信号が広帯域増幅器 561 によって増幅され A/D 変換器 562 によってデジタル信号に変換された受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ として、信号処理部 570 に入力される。

【0141】

前記信号処理部 570 での信号処理内容は、上述の図 6 に示した超音波伝搬時間計測装置 300 の場合とほぼ同じであるので、相違点のみを以下に説明する。

【0142】

ここで、送受信兼用超音波トランスデューサ 540 として用いた分割型広帯域超音波トランスデューサ 20 の特徴は、受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ を得るための受信専用の円板状コンポジット圧電振動子 25 が、受信超音波パルス信号が有する周波数帯域のうち、当該円板状コンポジット圧電振動子 25 が有する受信帯域の帯域成分を選択的に受信する機能を有することである。

【0143】

例えば、リング状コンポジット圧電振動子 24 から 2.5 MHz から 7.5 MHz の帯域を有する超音波パルス信号が送信され、超音波の伝搬に伴って、 7.5 MHz から 22.5 MHz の帯域を有する高調波成分が加わったとすると、受信専用の円板状コンポジット圧電振動子 25 は、選択的に 7.5 MHz から 22.5 MHz の帯域を有する高調波成分を出力する。 2.5 MHz から 7.5 MHz の周波数帯域成分や第二高調波成分の $5\text{ MHz} \sim 15\text{ MHz}$ 成分を完全に遮断するわけではないので、前記受信専用の円板状コンポジット圧電振動子 25 により電気信号に変換された受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ は、人為的な操作なしに周波数軸信号 $V_{rec}(\omega)$ における各周波数成分の相対的な信号レベル差が低減した信号となる。

【0144】

このレベル差は、前記受信専用の円板状コンポジット圧電振動子 25 のダンピングを弱め、振動の共振先鋭度 Q を高くすれば、それに比例して相対的な信号レベル差が低減してゆく。したがって、受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ をフーリエ変換して、基本波成分に対して高調波成分の信号レベルを同程度まで持ちあげ、それを逆フーリエ変換して再び時間信号 $V_{rec}'(t-\tau)$ にするということが不要になる。すなわち、前記信号処理部 570 では、前記受信専用の円板状コンポジット圧電振動子 25 の出力に基づいて受信部 560 において得られる受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ の周波数特性 $V_{rec}(\omega)$ の絶対値 $abs(V_{rec}(\omega))$ を計算し、レベル調整を行って新規の $V_{rec}'(\omega)$ を得る。そして、それを逆フーリエ変換して得られる疑似受信パルス信号 $V_{rec}'(t-\tau)$ と送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ との間の相互相関を実施すれば良いことになる。その処理手順は前述した図 5 のフローチャートからステップ ST3, ST4 を省略した処理で良いことになる。それ以外は第 2 の実施の形態に示した通りであるので省略する。

10

20

30

40

50

【0145】

〔第7の実施の形態〕

図16に示す超音波伝搬時間計測装置500Bは、上述の図15に示した超音波伝搬時間計測装置500Aにおける前記送受信兼用超音波トランスデューサ540が、超音波送信時には分割型広帯域超音波トランスデューサ20を構成している送信用超音波トランスデューサ、例えばリング状コンポジット圧電振動子24のみを用い、受信時には送信用超音波トランスデューサ24と受信用超音波トランスデューサ、例えば円板状コンポジット圧電振動子25を並列接続することにより受信用超音波トランスデューサとして機能させるように、第3のスイッチ514Cを設けたものである。

【0146】

この第3のスイッチ514Cは、受信時には、前記リング状コンポジット圧電振動子24と円板状コンポジット圧電振動子25を並列接続することにより受信用超音波トランスデューサとして機能させ、送信時には前記リング状コンポジット圧電振動子24を単独で送信用超音波トランスデューサとして機能させるように、信号処理部570によりON・OFF制御される。この超音波伝搬時間計測装置500Bにおける他の構成要素は、上述の図15に示した超音波伝搬時間計測装置500Aと同じなので、図16中に同一の符号を付して、その詳細な説明を省略する。

【0147】

この超音波伝搬時間計測装置500Bにおいて、前記送受信兼用超音波トランスデューサ540として用いた分割型広帯域超音波トランスデューサ20は、超音波送信には中心周波数が基本波周波数になる厚さのコンポジット圧電振動子、例えば図7に示したリング状圧電振動子24を、また伝搬超音波の受信には高調波成分の周波数が、その共振周波数となる厚さに設定したコンポジット圧電振動子、例えば図7に示した円板状圧電振動子25を対応させ、両圧電振動子は接地側の電極26こそ共通としているものの、信号入出力側の電極は分離してそれぞれ別々の配線31, 32が接続されている。

【0148】

この超音波伝搬時間計測装置500Cでは、受信時には、前記リング状コンポジット圧電振動子24と円板状コンポジット圧電振動子25を並列接続することにより受信用超音波トランスデューサとして機能させ、送信時には前記リング状コンポジット圧電振動子24を単独で送信用超音波トランスデューサとして機能させるようにした所謂送受信分離型の構造を採用したので、受信側の圧電振動子の厚さとダンピング層の設計を最適化することによって、広帯域パルス駆動に対する受信信号の周波数特性の高調波成分の信号レベルを基本波成分にほぼ等しくすることができる。

【0149】

なお、前記送受信兼用超音波トランスデューサ540として用いた分割型広帯域超音波トランスデューサ20には、高調波成分の振幅レベルが基本波成分の振幅レベルに対し最適な関係になるように調整するための可変直流抵抗等の信号減衰器580が前記円板状コンポジット圧電振動子25の信号端子と前記第3のスイッチ514Cとの間設けられている。前記信号減衰器580は、前記円板状コンポジット圧電振動子25の信号端子と前記第3のスイッチ514Cとの間に配置するのではなく、前記リング状コンポジット圧電振動子24の入出力端子との間に配置してもよい。また、信号減衰器580として、前記受信パルス信号が伝送される経路にハイパスフィルタを配置しても良い。また減衰させたい方の超音波振動子、たとえば送信用超音波トランスデューサに並列に信号線と接地線との間に直流抵抗を接続しても良い。

【0150】

したがって、この超音波伝搬時間計測装置500Bでは、上述の図15に示した超音波伝搬時間計測装置500Aと同様に、前記信号処理部570に高調波成分増幅の機能は不要となる。

【0151】

送信部510の駆動回路512は、開始周波数 f_L 、終了周波数 f_H 、パルス長 ΔT を

10

20

30

40

50

有すチャープ波信号を増幅して駆動信号 $D(t)$ として、前記送受信兼用超音波トランスデューサ 540 に印加する。

【0152】

前記送受信兼用超音波トランスデューサ 540 が前記駆動信号 $D(t)$ の印加により駆動され、超音波パルス信号を一端面 10A から超音波伝搬媒体 10 に送信する。そして、その超音波パルス信号が前記超音波伝搬媒体 10 の他端面 10B に到達し、該他端面 10B で反射された超音波パルス信号がパルスエコー信号となって前記超音波トランスデューサ 540 の前記並列接続された受信用超音波トランスデューサで受信され、電気信号に変換される。そして、受信部 560 において、前記並列接続された受信用超音波トランスデューサで受信された超音波パルス信号の電気信号が広帯域増幅器 561 によって増幅され、A/D 変換器 562 によってデジタル信号に変換された受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ として、信号処理部 570 に入力される。受信パルス信号 $V_{rec}(t-\tau)$ の周波数特性 $V_{rec}(\omega)$ の絶対値特性は、前記したように、基本波成分のみを減衰させる図示していない減衰手段を制御するか、高調波成分を増幅する手段 580 を制御するかによって受信信号の基本波成分のピーク信号レベルと高調波成分のピークレベルが等化されているので、受信信号 $V_{rec}(t-\tau)$ をそのまま用い送信パルス信号 $V_{trans}(t)$ との間で相互相関処理すれば良いことになる。これは、送信用圧電振動子の共振周波数が送信超音波の基本波周波数に合うような厚さに設計され、受信用圧電素子の共振周波数が受信超音波の高調波成分の中心周波数に合うような厚さに設計されているためであり、受信超音波のうち、高調波成分を選択的に受信する機能があるからである。

【0153】

尚、以上の説明は本実施の形態が最も効果を発揮できる第 2 の実施の形態を引用して説明したが、他の実施の形態に示した信号処理法に対応させても問題が起こることは無い。減衰も増幅もしないで、第 5 の実施の形態と同様な使い方が出来る。

【0154】

上述の各実施の形態における信号処理部 370, 470, 570 では、上述の図 5、図 9 又は図 13 に示したいずれかのフローチャートにしたがった信号処理を行うものとする。ことにより、従来配慮されていなかった超音波伝搬媒体の非線形音響特性、さらには超音波トランスデューサの伝達特性や超音波伝搬特性をも考慮した超音波伝搬時間の計測結果をうることができる。

【0155】

また、前記信号処理部 370, 470, 570 において実行される前記図 5、図 9 又は図 13 に示した各フローチャートにしたがった信号処理は、透過法による超音波伝搬時間の計測及び反射法による超音波伝搬時間の計測処理のどちらにも適用することができる。

【0156】

なお、本発明は、以上の実施形態のみに限定されるものではなく、本発明の要旨を逸脱しない範囲内において種々の変更が可能であることは勿論である。

【産業上の利用可能性】

【0157】

本発明では、超音波伝搬時間を高精度に計測することができ、その計測結果を、例えば、板厚等の寸法、欠陥やターゲットの位置、変位、流体の流速、材料の物性値としての音速、又は、生体臓器の位置や状態情報、構造材料の欠陥の位置や形状などの超音波画像診断に用いられる情報のうちのいずれか、又はいくつかを組み合わせた物理情報又は物性情報の精密測定、または材料の物性計測に利用することができる。

【符号の説明】

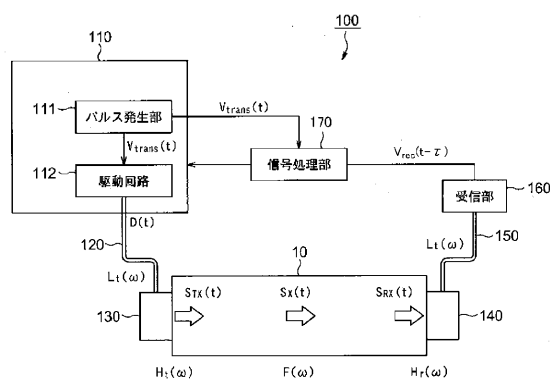
【0158】

- 10 超音波伝搬媒体、
- 20 分割型広帯域超音波トランスデューサ、
- 110, 210, 310, 410, 510 送信部、
- 111, 211, 311 パルス信号発生器、

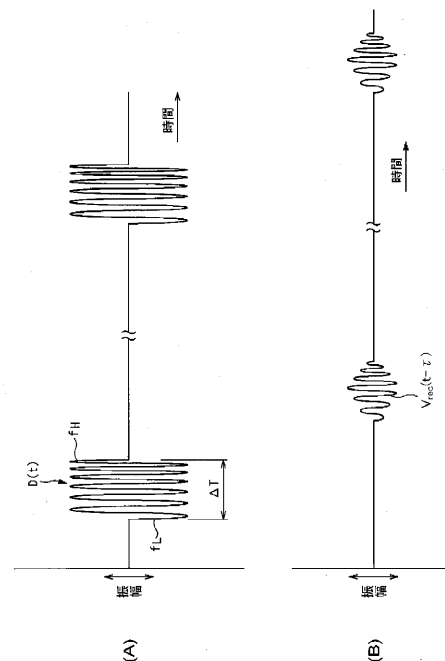
1 1 2, 2 1 2, 3 1 2, 4 1 2, 5 1 2 駆動回路、
 1 2 0 同軸ケーブル、
 1 3 0, 2 3 0, 4 3 0 送信用超音波トランスデューサ、
 1 4 0, 2 4 0, 4 4 0 受信用超音波トランスデューサ、
 1 5 0 同軸ケーブル、
 1 6 0, 2 6 0, 3 6 0, 4 6 0, 5 6 0 受信部、
 1 7 0, 2 7 0, 3 7 0, 4 7 0, 5 7 0 信号処理部、
 2 6 1, 3 6 1, 4 6 1, 5 6 1 広帯域増幅器、
 2 6 2, 3 6 2, 4 6 2, 5 6 2 A/D変換器、
 3 4 0, 5 4 0 送受信兼用超音波トランスデューサ、
 4 1 1 A, 5 1 1 A 広帯域パルス発生器、
 4 1 1 B, 5 1 1 B チャープ信号発生器、
 4 1 3, 5 1 3 スイッチ制御信号発生器、
 5 1 4 A, 5 1 4 B, 5 1 4 C スイッチ

10

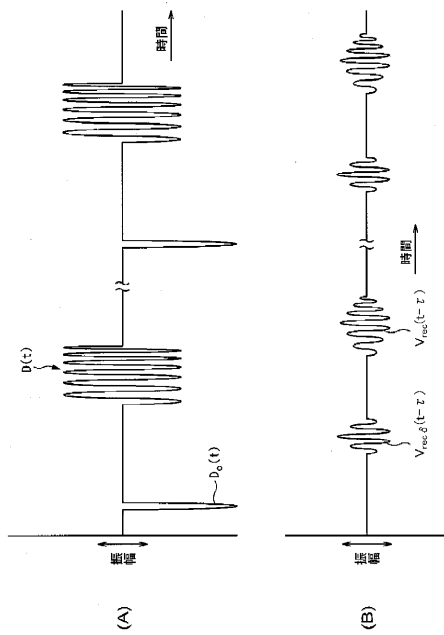
【図 1】



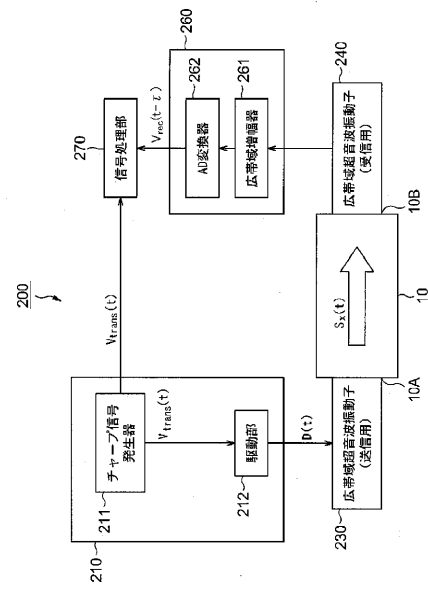
【図 2】



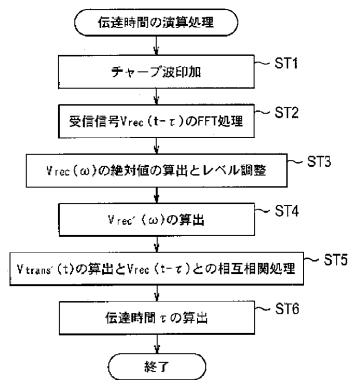
【図 3】



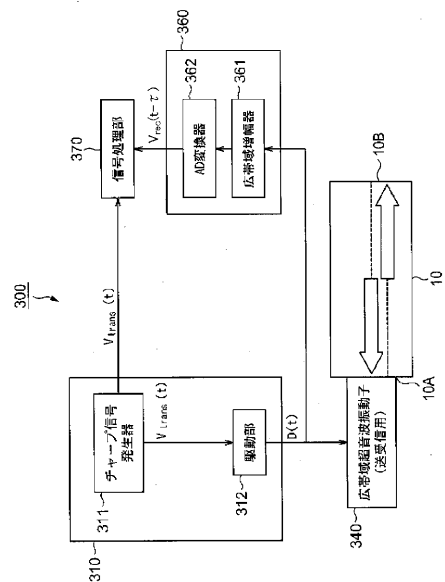
【図 4】



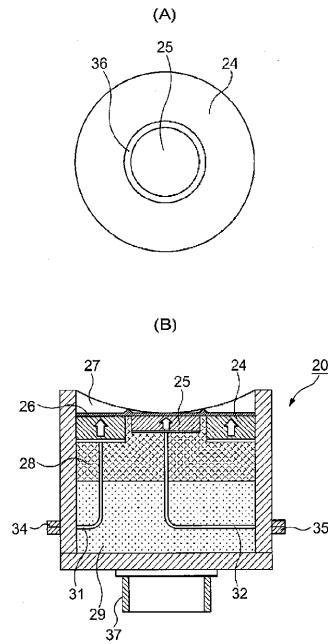
【図 5】



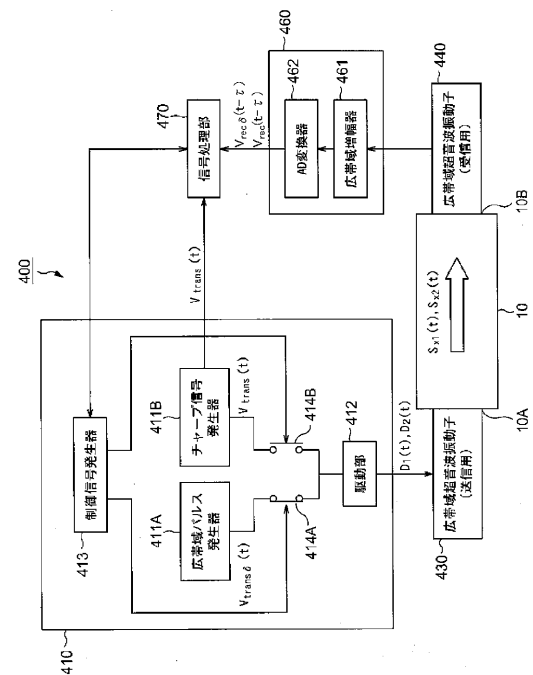
【図 6】



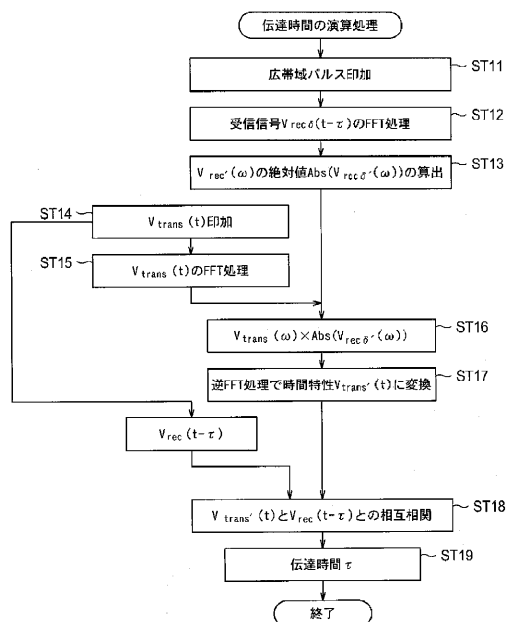
【図 7】



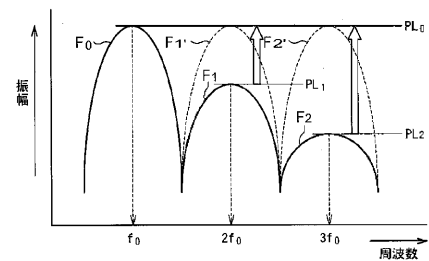
【図 8】



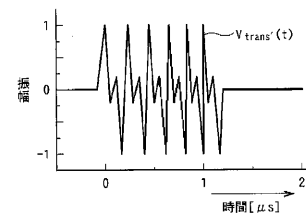
【図 9】



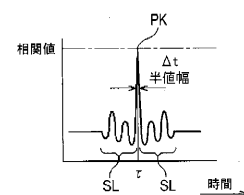
【図 10】



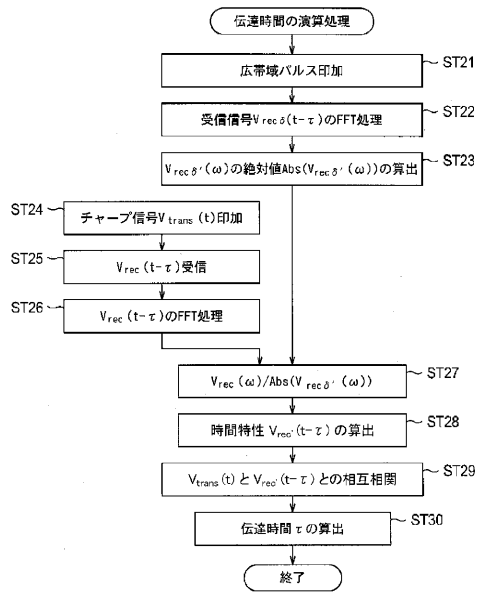
【図 11】



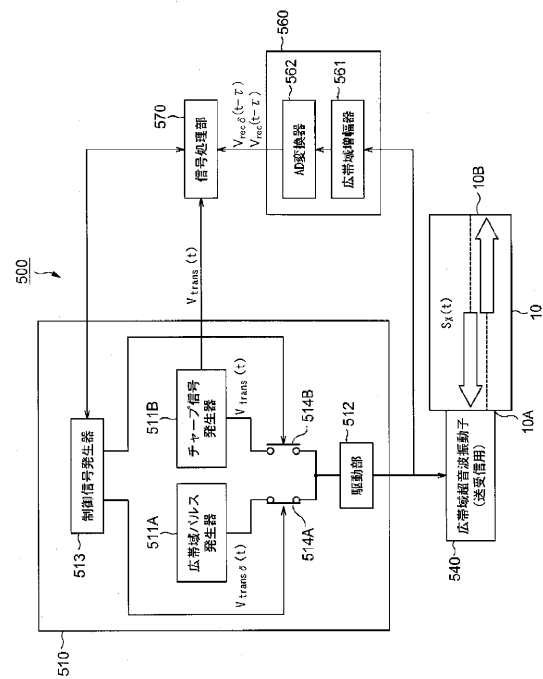
【図 12】



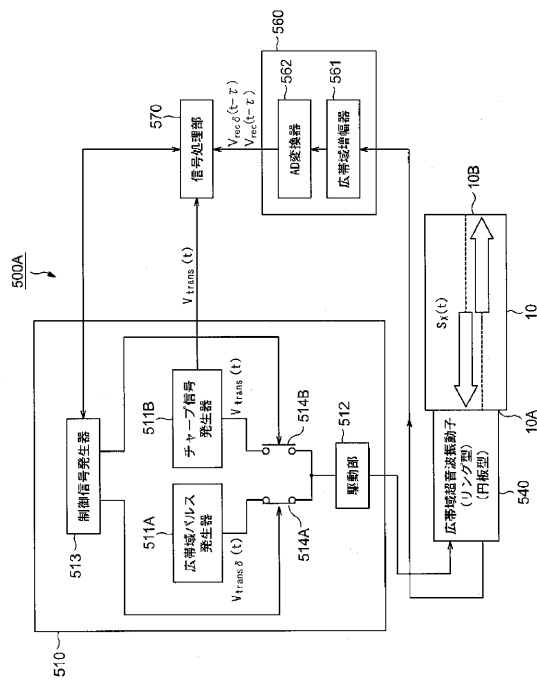
【図13】



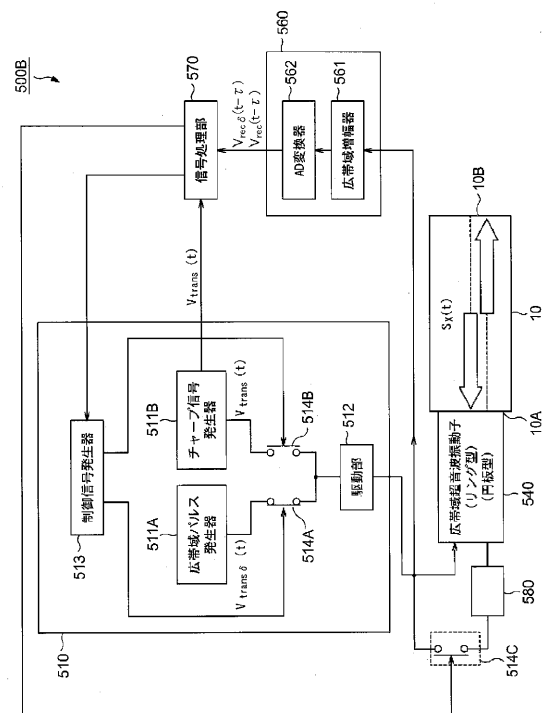
【図14】



【図15】



【図16】



フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I テーマコード (参考)
G 0 1 B 17/02 (2006.01) G 0 1 B 17/02 Z

(72)発明者 安達 日出夫

東京都調布市調布ヶ丘 1 丁目 5 番地 1 国立大学法人電気通信大学内

F ターム (参考) 2F068 AA28 DD12 FF05 FF11 FF12 GG01 KK14 LL23 QQ10 QQ18
2G047 BA01 BC02 CA01 EA10 GF07 GF08 GF12 GG12 GG30 GG36
4C601 DD20 DE17 EE09 HH04 HH09 HH10 JB38 JB44 JB49
5J083 AA02 AA04 AB17 AB18 AC28 AC29 AD04 BA03 BE10 BE41
CA03 CB04 CB17

专利名称(译)	超声波传播时间测量方法和超声波传播时间测量装置		
公开(公告)号	JP2012042449A	公开(公告)日	2012-03-01
申请号	JP2011054576	申请日	2011-03-11
申请(专利权)人(译)	国立大学法人大学电气通信		
[标]发明人	鎌倉友男 安達日出夫		
发明人	鎌倉 友男 安達 日出夫		
IPC分类号	G01S15/32 A61B8/08 G01N29/00 G01S7/526 G01S7/521 G01B17/02		
FI分类号	G01S15/32 A61B8/08 G01N29/18 G01S7/52.J G01S7/52.A G01B17/02.Z G01S7/521.A G01S7/526.J		
F-TERM分类号	2F068/AA28 2F068/DD12 2F068/FF05 2F068/FF11 2F068/FF12 2F068/GG01 2F068/KK14 2F068/LL23 2F068/QQ10 2F068/QQ18 2G047/BA01 2G047/BC02 2G047/CA01 2G047/EA10 2G047/GF07 2G047/GF08 2G047/GF12 2G047/GG12 2G047/GG30 2G047/GG36 4C601/DD20 4C601/DE17 4C601/EE09 4C601/HH04 4C601/HH09 4C601/HH10 4C601/JB38 4C601/JB44 4C601/JB49 5J083/AA02 5J083/AA04 5J083/AB17 5J083/AB18 5J083/AC28 5J083/AC29 5J083/AD04 5J083/BA03 5J083/BE10 5J083/BE41 5J083/CA03 5J083/CB04 5J083/CB17		
代理人(译)	小池 晃 藤井 稔也		
优先权	2010163423 2010-07-20 JP		
外部链接	Espacenet		

摘要(译)

解决的问题：通过考虑超声波传播介质的非线性声学特性，以及超声波换能器的进一步的传输特性和超声波传播特性，通过执行超声波传播时间测量来提供一种高精度的测量方法和装置。传输单元110生成传输脉冲信号 $V_{trans}(t)$ ，并且传输超声换能器130将其转换为超声脉冲信号 $S_X(t)$ 以传播测量目标的超声波。输入到介质10中，通过超声传播介质10传播的超声脉冲信号 $S_X(t)$ 被接收超声换能器140接收并被放大以接收脉冲信号 $V_{rec}(t-\tau)$ ，在信号处理单元170中，通过考虑超声传播介质10的非线性，在参考信号和参考信号之间执行互相关处理，超声传播检测通过介质10传播的超声波脉冲信号 $S_X(t)$ 的发送与接收之间的时间间隔作为超声波传播时间。[选型图]图1

