

氏名（本籍）	千村 大（長野県）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲第180号
学位授与の日付	平成26年3月22日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	感度補正型送信信号を用いた超音波パルスエコー法の測定精度の向上に関する研究
論文審査委員	（主査） 教授 陶 良 （副査） 教授 飯田 一博 教授 相知 政司 教授 長 敬三 教授 室 英夫

学位論文の要旨

感度補正型送信信号を用いた超音波パルスエコー法の測定精度の向上に関する研究

音響計測法は空中での自動車や小型ロボットの周囲環境認識や水中計測などに広く用いられる。音波の伝搬時間より計測する超音波パルスエコー法が一般的に用いられ、高精度の測定にパルス圧縮法が用いられる。パルス圧縮法は、基準信号と受信信号の相関により伝搬時間を測定する方法で、その効果は信号の周波数帯域に依存するため線形 FM 変調信号(チャープ波)などの広帯域信号が送信信号に用いられている。しかし、実測において信号は送・受波器の感度特性などの音波伝搬特性の影響を受けるため、パルス圧縮に有効な周波数帯域は制限されると考えられる。そこで、信号の広帯域化を目指し、感度補正 AM 信号を考案した。感度補正 AM 信号は、あらかじめ測定された受信信号を用いて作成される、主に送・受波器の感度特性の影響に配慮した送信信号である。加えて、受信 SN 比に配慮した感度補正 FM 信号を考案した。これらの感度補正型送信信号を用いることで、特に、送・受波器の感度特性の $-20 \sim -30\text{dB}$ に十分な SN 比をもつ広い周波数帯域が存在すると考えられる空中超音波計測において、受信信号の周波数特性の広帯域化および平坦化が期待できる。さらに、感度補正型送信信号を用いることで、受信信号の周波数特性が平坦化されることに着目し、線形予測処理を用いて高感度帯域内のスペクトルより低感度帯域のスペクトルを予測値で補う帯域拡大法を提案した。これにより、信号帯域のさらなる拡大と信号の時間分解能の向上が期待できる。本論文では、これらの提案手法の効果を実験的に検討した。また、距離測定とその応用計測として、空中移動物体の速度計測および方位計測についても検討を行った。各提案手法の応用背景と関連研究および論文構成をまえがきとして第1章に述べている。

第2章では、感度補正型送信信号の理論や作成方法について述べている。感度補正 AM 信号は、

チャープ波を送信としてあらかじめ測定された受信信号に逆フィルタ処理を施すことで作成される。ここで、感度補正 AM 信号は、その周波数振幅特性が時間領域の信号振幅に線形的に反映されるため、AM 変調されたチャープ波となる。したがって、時間領域のエネルギー分布が不均一化され、受信 SN 比が低下すると考えられる。そこで、感度補正された振幅不変の FM 変調信号を考案した。感度補正 FM 信号は、感度補正 AM 信号の周波数特性(感度補正特性)より作成され、感度補正特性を周波数変調時間に反映させた非線形 FM 変調信号である。感度補正 FM 信号には、感度補正特性の振幅特性を周波数変調時間に反映させた振幅等価型感度補正 FM 信号とパーシバルの等式より導いたエネルギー等価型感度補正 FM 信号の 2 種類があり、作成した 2 種類の信号例を比較した結果、エネルギー等価型感度補正 FM 信号を用いることで、より受信信号の広帯域化および平坦化が期待できる。一方で、時間有限のパルス信号である感度補正 FM 信号は、感度補正 AM 信号と比較して周波数補正の効果が低下する。

第 3 章では線形予測処理を用いた信号帯域の拡大法の理論について述べ、信号帯域の拡大例を示している。この方法は、感度の良い周波数帯域より感度の悪い周波数帯域の予測値を求め、信号帯域を拡大し、時間分解能の向上を図るものである。

第 4 章ではパルス圧縮法を用いた距離測定に感度補正送信信号および線形予測処理による帯域拡大法を用い、その効果を検討した。感度補正型送信信号の有効性を検討する基礎実験として、モデル水槽を用いた水中距離測定においてチャープ波を用いた場合と感度補正 AM 信号および振幅等価型感度補正 FM 信号を用いた場合をそれぞれ比較した。その結果、感度補正送信信号を用いることで、パルス圧縮信号が広帯域化され、距離測定精度が僅かに向上した。特に受信 SN 比が低下する設置条件では振幅等価型感度補正 FM 信号を用いることで距離測定の分散が小さくなり、より測定精度が向上した。また、パルス圧縮法を用いた空中距離測定では、感度補正 AM 信号およびエネルギー等価型感度補正 FM 信号を用い、さらに、感度補正送信信号と線形予測処理による帯域拡大法を併用した距離測定法を提案してその効果を検討した。感度補正型送信信号によるパルス圧縮信号に線形予測処理を施すことで帯域が平坦に拡大され、信号のパルス幅が 1/2 以下に短縮された。加えて、比較的感度補正の効果が高い感度補正 AM 信号と線形予測法を併用することで、測定精度向上の傾向が示された。

第 5 章では、感度補正型送信信号および線形予測処理による帯域拡大法の空中移動物体の速度計測法への応用について述べている。この方法は、送信信号を 2 波送信して移動物体からの反射波である 2 波受信信号を測定し、この 2 波の送信時間間隔と受信時間間隔の差より速度を測定するものである。チャープ波を用いた場合の速度計測と比較した結果、感度補正型送信信号を用いることで測定精度が 0.06 m/s 程度向上した。一方で、感度補正型送信信号と線形予測処理による帯域拡大法を併用した場合、その有効性は示されなかった。

第 6 章では、感度補正型送信信号を用いた距離測定の空中物体方位計測法への応用について述べている。この方法は、受波器を 2 つ用いて、2 次元平面上での空中物体の方位計測するものである。チャープ波を用いた場合と比較した結果、感度補正型送信信号を用いることで測定精度の向上が示された。特に、受信 SN 比が低下する設置条件においてはエネルギー等価型感度補正 FM 信号を用いることで 0.05 rad 程度方位測定誤差偏差が小さくなった。

第 7 章は総括であり、実験結果を比較検討して、以下の結論を示した。

- [1] 感度補正型送信信号は、特に汎用空中超音波センサのような感度特性をもつ送・受波器を用いた超音波パルスエコー法の測定精度向上に有効である

[2] 受信 SN 比が低い場合は感度補正 FM 信号を送信信号に用いることが有効である

[3] 感度補正型送信信号と線形予測帯域拡大化処理を併用する方法はパルス圧縮信号の時間分解能の向上に有効である

また、感度補正 FM 信号の不十分な周波数特性の補正効果など、今後の研究発展の課題を提起している。

審査結果の要旨

超音波パルスエコー法は、工業、海洋、医学など多分野で研究・応用されているが、特に方位計測や 2 m/s 以下の低速度の計測において、距離測定の精度が不十分の問題で実用する範囲が制限されている。超音波パルスエコー法を用いた測距方式として、短パルス信号では信号の SN 比が低下するため広帯域で変調した信号にパルス圧縮処理を施す方法は一般的に使用されている。しかし、受信信号は送・受波器の感度特性や音波の伝搬特性の影響を受けるため、パルス圧縮に有効な周波数帯域が制限されている。一方、パルス圧縮処理には、主にインバースフィルタとマッチングフィルタの 2 種類が挙げられるが、インバースフィルタでは広帯域化に有効であるが SN 比が低下し、マッチングフィルタでは SN 比の向上に有効であるが周波数帯域が更により狭くなり分解能が低下する特徴がそれぞれある。

本論文は、特に空中超音波送・受波器の感度特性においては -6 dB 帯域幅は狭いが、 $-20 \sim -30$ dB まで十分な SN 比をもつ広い帯域幅が存在することに着目し、送・受波器の感度積にインバースフィルタ処理を施して作成した感度補正型送信信号を提案している。すなわち、SN 比の良い送信段階でインバースフィルタにより広帯域化を図り、受信信号のパルス圧縮処理の段階でマッチングフィルタにより SN 比の向上を図るものである。この信号は、線形 FM 変調信号（チャープ波）を基に感度特性の除算より作成され、周波数成分の補正が送信信号の振幅に線形的に反映されるため、AM 感度補正型送信信号となっている。更に、AM 感度補正型送信信号は、短パルス信号と同様に SN 比が低下すると考え、時間領域の信号振幅を整合した FM 感度補正信号を提案している。この信号は、送・受波器の感度特性の補正を非線形的に変調時間に反映したものである。また、感度補正型送信信号とパルス圧縮処理を併用することで、受信信号により平坦な広帯域が得られることに着目し、この有効帯域内の周波数成分を用いて、線形予測法より低感度帯域の周波数成分を推定し、更なる広帯域化を図る方法を考案している。

これらの提案手法の有効性を検討するために、水中物体の距離測定、空中物体の距離・速度・方位測定の実験をそれぞれ行っている。

水中物体の距離測定では、送受波器には水浸探傷用超音波探触子、目標物には直径 3 cm のガラス球をそれぞれ使い、幅 45 cm × 高 45 cm × 長 120 cm のモデル水槽を用いて行っている。感度補正型送信信号とチャープ波とをそれぞれ用いて実験的に比較検討した結果、感度補正信号を用いることで圧縮パルス幅が短縮されること、SN 比が低下する設置条件では FM 感度補正信号を用いることで測定精度が向上されることがそれぞれ確認されている。しかしいずれの改善効果も微小であり、それは水浸探傷用超音波探触子の感度特性の平坦

さに補正する余地が少ないためと考察している。

空中物体の測定では、自動車や小型ロボットの比較的に近い周囲環境の認識を想定し、送・受波器には40 kHz共振タイプの汎用空中超音波センサ、目標物には5 cm×5 cmの方形スチール板をそれぞれ用いて、約1~2 m以内の範囲内で目標物の距離・速度(1~2 m/s)・方位の測定をそれぞれ実験的に検討している。速度計測では、ダブルパルス送信方式を用いて、送信パルス間隔と受信パルス間隔の差より目標物の速度を求める方法を用いている。方位計測では、2つの受波器を用いて測定したそれぞれの距離の差より2次元偏角を求める方法を用いている。まず、パルス圧縮の結果、感度補正型送信信号を利用することで、チャープ波を用いた場合より圧縮パルスの幅が50%以上短縮され、その圧縮パルスに線形予測広帯域化処理を施すとパルス圧縮効果をもっと向上されたことが確認されている。また、FM感度補正型送信信号ではAM感度補正型送信信号より圧縮パルス幅の短縮効果が少し低くなっており、これは有限時間長の送信パルスによりFM変調の周波数分解能の制限によるものと考察している。距離測定精度において、AM感度補正型送信信号と線形予測処理を併用することで、2~7 mm程度の精度の向上が確認されている。しかしFM感度補正型送信信号と線形予測処理を併用すると、SN比の低い条件下で測定精度が低下し、これは、FM感度補正信号は補正が不十分であるため、線形予測より広帯域化すると逆に誤差が大きくなると考察している。速度計測精度において、AM・FM感度補正型送信信号がともに、チャープ波より約0.06 m/sの精度向上が確認されているが、線形予測法を併用すると更なる精度の向上が確認できていない。方位計測精度において、感度補正型送信信号ではチャープ波より精度向上の効果が確認され、特にSN比の低い条件下で、FM感度補正型送信信号では約0.05 radの精度向上が確認されている。

これらの実験結果より、(1)感度補正型送信信号は、特に汎用空中超音波センサのような感度特性をもつ送受波器を用いた超音波パルスエコー法の測定精度向上に有効であること、(2)受信SN比が低い場合ではFM感度補正型送信信号を用いる手法が有利であること、(3)感度補正型送信信号と線形予測広帯域化処理を併用する方法は、パルス圧縮信号の時間分解能の向上に有効であることを結論づけている。更に、FM感度補正型送信信号の補正不十分の問題、線形予測処理における適切な予測次数の選定、具体的な応用例に応じて伝搬経路の影響の考慮など、今後の研究発展の課題を提起している。

本論文は超音波パルスエコー法の精度向上について研究したものであり、感度補正型送信信号を新たに提案し、測定手法の改善について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。

従って、学位申請者の千村大は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。