

AHS用超音波レーダに関する研究

An Ultrasonic Radar for AHS

江村超, 王磊, 熊谷正朗, 有山隆暁

Takashi Emura, Lei Wang, Masaaki Kumagai, Takaaki Ariyama

東北大学

Tohoku University

キーワード : AHS(Automated Highway System), 超音波レーダ(Ultrasonic Radar),
環境認識(Enviromental Sensing), ALV(Autonomous Land Vehicle)

連絡先 : 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01 東北大学大学院 工学研究科 機械電子工学専攻 江村研究室
有山 隆暁, Tel.: (022)217-6969, Fax.: (022)217-6967, E-mail: ariyama@emura.mech.tohoku.ac.jp

1. 緒言

近年, 自動車台数の増加に伴い, 交通事故や交通渋滞, また, 環境汚染などが社会問題となっている。そこで, ITS(Intelligent Transport Systems)といった交通システムのインテリジェント化に注目が集まっている。ITSプロジェクトの一環としてAHS(Automated Highway System)がある。これは道路と車両が一体となって運転の自動化をはかるというものである。本研究では, このような運転の自動化を目標とした際, 障害物を検出し危険回避を行なうために高性能なレーダが必要であると考へ, 超音波を使ったレーダの開発を行なった。

障害物の早期発見のために, 広い測距範囲が求められるが, 一般に用いられているトランスミッタは出力パワーが低く, さらに, 送出された音響エネルギーが分散され, 測距範囲が制限されてしまう。そこで, 本研究では, 測距範囲の拡大のために, トゥイータにより音源の出力を上げるとともに, 放物面鏡により, 音圧が距離によって急激

に減衰しないようにした。また, 受信時にも放物面鏡を用い集音効果を高めた。さらに, 周波数帯域の広いトゥイータを用いたことにより, 近距離目標の計測に適する高い周波数の超音波と遠距離目標の計測に適する低い周波数の超音波を送出することができ, 広い範囲において測距の精度を向上した。

しかし, パースト波の送信を大出力で行なったため, 可聴成分が含まれ, 大きな騒音を発する現象が生じた。実用化に向け, 騒音の低減が必要であると考へ, 振幅変調の原理を利用して送信波を生成し, 静かなパースト波を得た。

通常に用いられている超音波レーダは主に走査型であるため, 走査に時間がかかり, 高速の測距が困難である。そのため, 本研究では, 1個の音源と複数マイクからなる無走査型超音波レーダを構築し, その性能向上をはかった。無走査型超音波レーダにおいては, マイクの数が少ないと, 障害物の方向や形状推定時の誤り発生の可能性が大

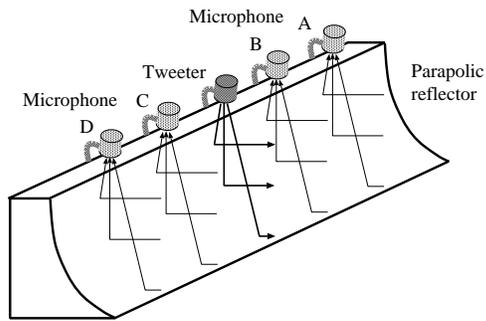


Fig. 1 無走査型超音波レーダ

Table 1 放物面反射鏡の諸元

幅	1250mm
高さ	210mm
奥行き	170mm
最低地上高	400mm
反射鏡の材質	塩化ビニル樹脂

きくなる．そこで，コストも考慮しマイクの数
を4個とした．

なお，受音時には，バンドパスフィルタを用い
てドップラーシフトの方向を検出し，障害物との
相対速度の正負が判別できるようにした．

今回は，自動車に搭載する無走査型超音波レー
ダを試作し，その性能を確認するための基礎実験
を行った．以下，試作した無走査型超音波レーダ
と，その動作確認のために行った実験結果につい
て報告する．

2. 無走査型超音波レーダ

今回試作した無走査型超音波レーダの概略を
Fig.1に，実際の自動車に取り付けた様子を Fig.2
に示す．また，放物面反射鏡の諸元を Table1 に示
した．放物面反射鏡の中央に設置した大出力ツイ
ーターにより超音波を送出し，両側に対称に取り
付けた4個のコンデンサーマイクにより反射波を
受音する．これらのツイーターとコンデンサーマ



正面



側面

Fig. 2 超音波レーダ車載図

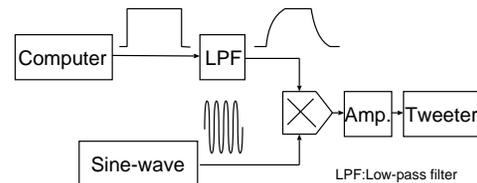


Fig. 3 送信システムの構成

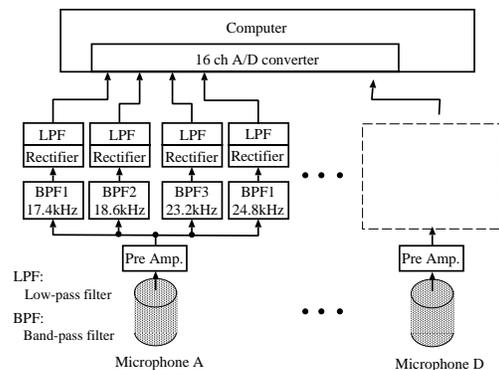


Fig. 4 受信システムの構成

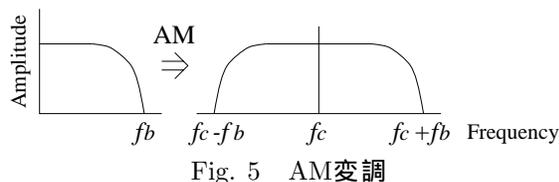


Fig. 5 AM変調

3.1 原理

まず、提案する静粛化バースト波(Silenced burst-wave)の生成法、原理について述べる。静粛化バースト波は Fig.3 に示すような構成で生成する。すなわち、バースト波の出力タイミングを決定する矩形信号を入力し、これをローパスフィルタに通してエンベロープを生成し、搬送波と乗じて(AM変調)バースト波とする。得られた波形はパワーアンプにより増幅しツイータにより送出する。

AM変調の原理より、搬送波(周波数 f_c の正弦波)を周波数 f の正弦波信号で変調した場合、 $f_c \pm f$ の信号が出力される。そのため、Fig.5に示すように、主たる成分を $0 \sim f_b$ に含む信号を変調した場合、出力には周波数が $f_c - f_b$ から $f_c + f_b$ までの成分が含まれる。ここで、使用するバースト波の周波数を f_c とし、 $f_c - f_b$ が可聴域より高くなるように f_b を設定すれば、バースト波に可聴成分が含まれず、静粛なバースト波が得られることになる。つまり、 f_b 以上の成分を十分減衰させるローパスフィルタをエンベロープ生成に使用すれば良い。

以上が、静粛化バースト波の生成原理である。本手法の利点の1つとしては、フィルタの遮断特性の誤差が大きく影響しないことが挙げられる。バースト波を作成した上で可聴成分を鋭く除去するためには、フィルタの遮断周波数は厳密でなければならず、若干のずれが可聴成分を残したり、エンベロープ形状が崩れる原因となる。それに対して本手法では、エンベロープ生成時の周波数成分の誤差は出力波では比率としては圧縮されるため、影響が少なくなる。なお、可聴成分を大幅に減衰させることで、パワーアンプの出力をバースト波生成のために有効に使用することにもなる利点なども

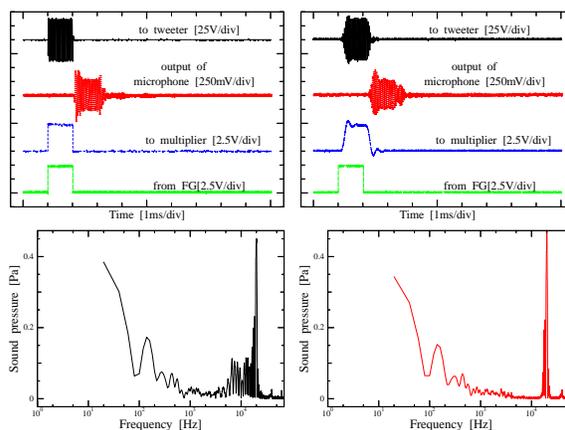


Fig. 7 可聴域バースト音低減実験

ある。

本手法を実装する場合には、大きく2通りの方法がある。アナログフィルタ、アナログ乗算器による実装と、コンピュータ内で波形を生成し、ROM+DACにより出力する方法である。後述の実験ではアナログ式のデータを示すが、コンピュータ内で波形生成を行ったものも静粛になることを実験で確認している。

3.2 FFTによる解析

実際にどの程度の静粛化が得られるかをFFT解析により検証した。波形の条件としては搬送波を20kHz、バーストの長さを1ms、バースト間隔を0.1sとした。解析は0.1sを 2^{16} 分割して行った。幾つかの例をFig.6に示す。上段はバースト波形そのもの、下段はFFT解析により得られた振幅特性である。(a)は単純な矩形エンベロープ、(b)は立ち上がり立ち下がり正弦波を利用して緩やかにしたもの、(c)は矩形波をカットオフ周波数4kHzの2次ローパスフィルタを4段重ねたもの(8次)に通したエンベロープによる波形である。これらの結果において比較すべき点は、周波数スペクトルにおいて1kHz付近の平坦な部分の振幅、および10kHz以上の部分での減衰傾度である。前者はほぼ、騒音の大きさを表し、後者は大きな騒音はないにしても人によ

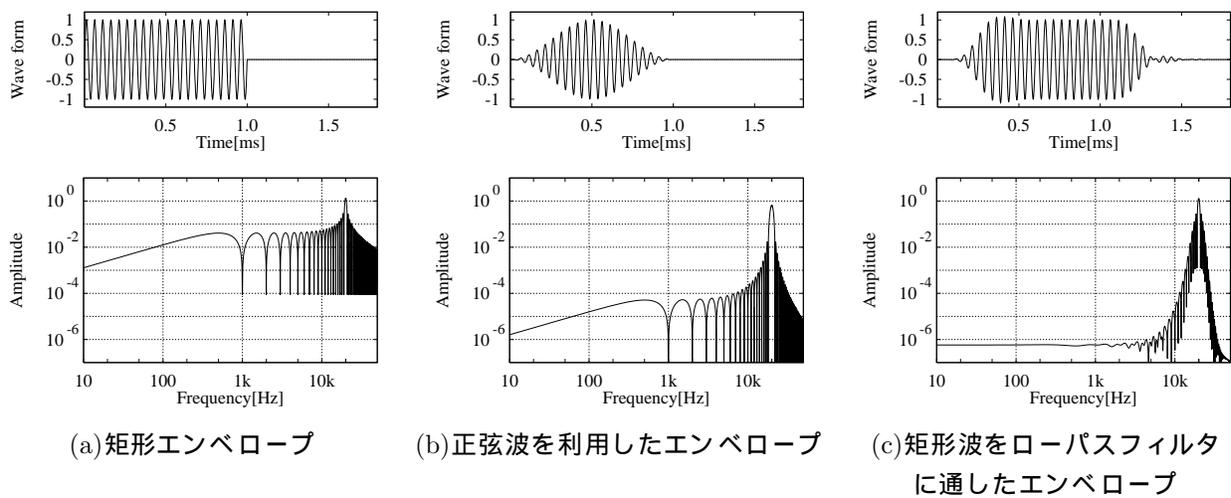


Fig. 6 パースト波の形状および周波数スペクトル

ては知覚し不快感を感じる部分である。

当初, (a)のような波形を用いて測距装置の実験を行っていたが, これは非常に大きな騒音を伴っていた. 必要としている20kHzに対して可聴域成分の振幅が下がらず, 必要な出力のバースト波を送信した場合に, これら可聴成分も出力されてしまうためである. エンベロープの鋭い立ち上がり原因があるのではないかと推測し, 外見上は非常にゆるやかなエンベロープとしたのが(b)である. 波形(a)に比較し, 可聴域では60dBほど振幅が小さくなっている. これは騒音も60dBほど低下することになり, 騒音回避という目的にはかなうものである. しかし, 距離測定に使用するには波形の立ち上がりが不鮮明である. これらに対して, 今回のフィルタとAM変調を使用した手法による(c)では1kHz付近の成分にいたってはほぼ含まれず, 10kHz以上の成分についても(b)ほどではないにしても周波数の低下とともに急激に減衰しており, 搬送波を若干高くするのみで可聴成分を知覚できなくすることも可能である. しかも, 送信波形には若干の遅れは見られるものの, エンベロープはかなり原形をとどめている.

以上のFFT解析の結果より, 本手法は距離測定用の大出力バースト波を低騒音に生成手法として, 十分有効であることが確認できる.

3.3 可聴域バースト音低減実験

実際にアナログ回路によって, Fig.3のブロックダイアグラムの回路を製作し, 実験を行った. 搬送波としては20kHzを用いた. この結果をFig.7に示す. 左図はローパスフィルタをもちいず, 右図はカットオフ周波数2.8kHz, 5次のローパスフィルタを用いた結果を示す. 上段は, 上からトウイータへの入力波形, マイクの出力波形, 乗算器に入力する波形, FG(Function Generator)により作られた波形を示している. 下段は, マイクの出力波形をFFT解析した結果得られた振幅特性である. FFT解析の結果より, どちらも搬送波の周波数である20kHzに大きなピークが表れている. また, ローパスフィルタを用いた方が, 用いない方に比べ, それ以外の成分が大きく減衰しているのがわかる. 10Hz付近の強度が大きいのが, これは送信波形になんらかのオフセットが加わったため, これを取り除けば低周波数においても平坦な結果が得られると考えられる.

以上により, ローパスフィルタを用いることで, 低騒音化が可能であると言える.

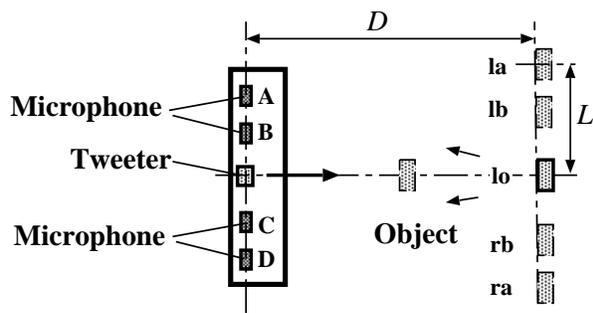


Fig. 8 実験配置図

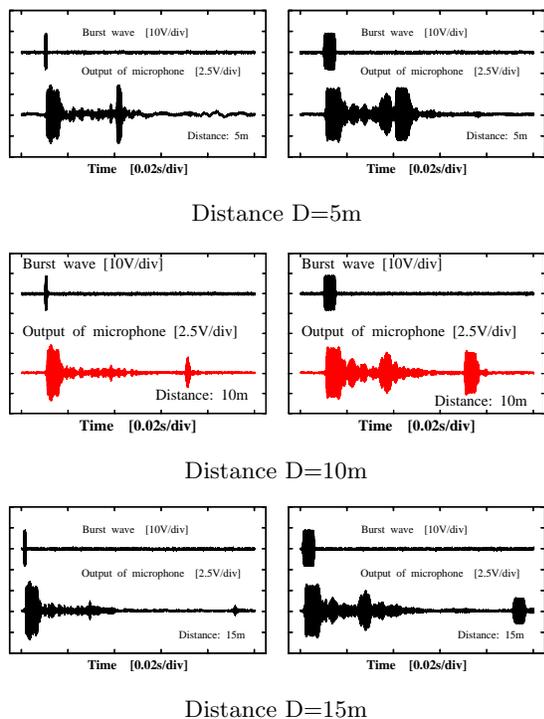


Fig. 9 コンデンサマイクの出力

4. 実験

超音波レーダの特性を確認するための実験方法をFig.8に示す. 測定対象として高さ0.6m, 幅0.5m, 奥行0.3mのブロックを用いた. Fig.9に測定対象を中心線上に置き, 超音波レーダとの距離 D を5mと15mにした場合の測定結果を示す. 左側は24kHzの超音波, 右側は18kHzの超音波を出力した場合のコンデンサマイクDの出力波形である. 図から分かるように, 24kHzの超音波の場合は距離 $D = 5m$ の障害物から十分の強さの信号が反射されるが,

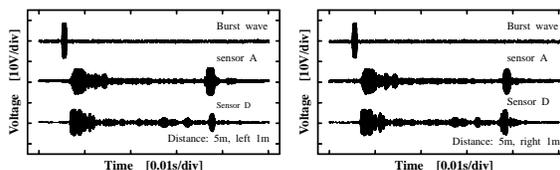


Fig. 10 障害物の方向検出

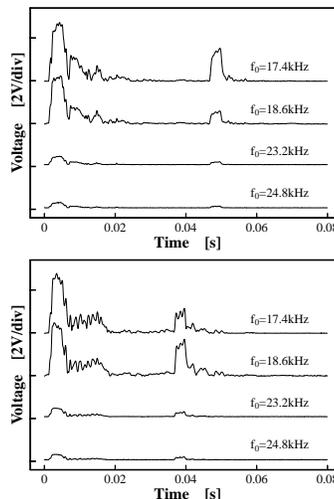


Fig. 12 バンドパスフィルタの出力

距離 $D = 15m$ になると反射信号はほとんど検出されなくなってしまう. また, 18kHzの超音波の場合は, 直接波, 反射鏡自身からの反射波と思われる反射波などの不要信号が強いため, 近距離の測定が難しくなっている. しかし, これらのノイズは超音波を送出してから短い時間域にしか現れず, 距離が長くなると, その影響はほとんどなくなってしまう. また, $D = 15m$ の長距離においても24kHzの超音波ほど減衰せず十分な測定精度が得られる. よって, 近距離($D < 10m$)に主に24kHzの超音波, 遠距離($D > 10m$)に18kHzの超音波を使用することにより広い範囲の測距が可能となることがわかる.

Fig.10は, 距離 $D = 5m$, 中心線から左右1m離れた時に, コンデンサマイクAとDから得られた波形である. 実験では24kHzの超音波を使用した, コンデンサマイクAとDまでの超音波の伝播時間差がはっきり観察される. たとえば, 測定

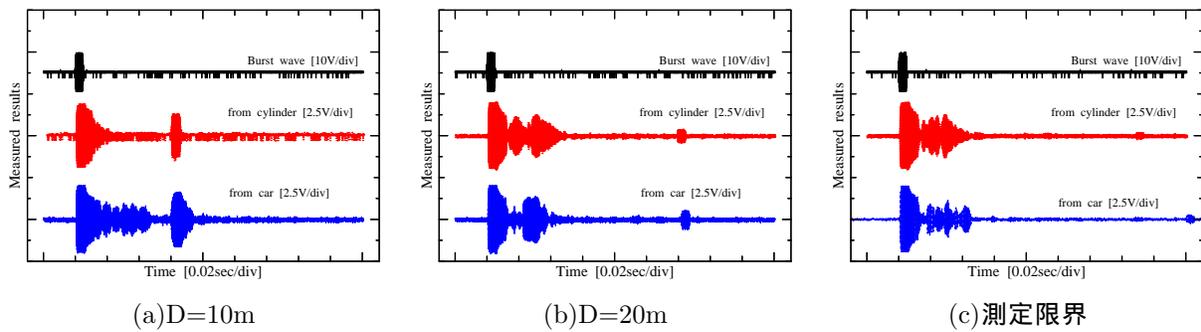


Fig. 11 円筒および自動車検出実験

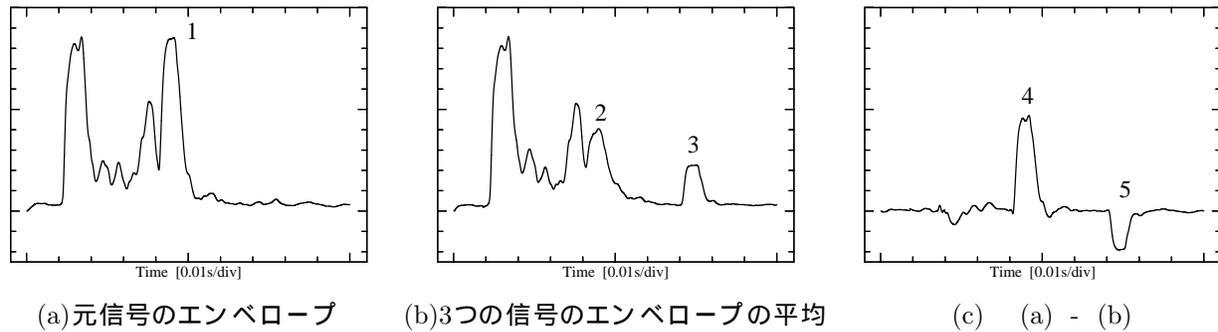


Fig. 13 不要信号の除去

対象が左側にある時はマイクDまでの伝播時間が長く、測定対象が右側にある時はマイクAまでの伝播時間が長くなる。しかし、Fig.10からわかるように、中心線からずれた場合は、コンデンサーマイクAとDの両方から同時に十分な強度の反射波を得ることが難しく、距離または方向の測定に誤差を生じてしまう。そこで、本研究では、相互相関法によるこの問題の解決を試みた。具体的には、出力の大きい方のマイクの波形から距離を求め、相互相関法により両方の時間差を算出して方向を定めた。この方法は、ノイズに強いため、微弱な信号を用いても正確な計測ができる特徴を有している。

次に測定対象として直径15cm、高さ80cmの円筒(cylinder)および自動車(car)を用いて以下の実験を行なった。測定対象を自動車の中心線上に配置して、距離を変えて反射波を検出した。結果をFig.11に示す。この結果より超音波レーダの測定限界は円筒においては25m、自動車においては30m程度になることが確認された。

Fig.12は、超音波レーダを搭載した自動車を静止させ、もう一台の自動車を走行させた時の計測結果である。左図は自動車が遠ざかる場合、右図は自動車が接近する場合の例を示す。ここで、発信周波数は18kHzであるので、自動車が遠ざかる場合は、ドップラー効果によって受信信号の周波数が低くなるため、中心周波数17.4kHzのフィルタの出力の方が大きくなる。逆に、自動車が接近する場合は、右図に示したように、中心周波数18.6kHzのフィルタの方の出力が大きくなる。

以上の結果から、本研究で試作した無走査型超音波レーダを用いて、対象物の距離と方向の測定、および相対速度の方向の判別ができることが確認された。

5. 不要信号の除去

Fig.9より18kHzのバースト波送信直後に不要信号が表れているのが確認できる。この不要信号は比較的形状が似ている。そこで、不要信号の形状の

類似性に注目して、不要信号の除去を試みた。まず、Fig.9の18kHzの超音波の反射波のデータを用いて、これらのデータを絶対値化したのちローパスフィルタを通すことで、おのおのの反射波のエンベロープを得る。つぎにこれらのエンベロープの平均を求める。すると、形状に類似性のある不要信号のみが残り、類似性のない障害物からの反射波は減衰する (Fig.13(b))。次に、元信号 (ここではFig.9 D=5m のときの18kHzの超音波の反射波のデータ) のエンベロープ (Fig.13(a)) からエンベロープの平均 (Fig.13(b)) を引くことで不要信号を除去した結果をFig.13(c)に示す。これにより障害物からの反射波のみを有効に検出していることが分かる。なお、図中の1で示された部分が障害物からの反射波を示しており、それ以前に表れる部分が不要信号である。また、2および3で示された部分は平均したことにより減衰されてしまった障害物からの反射波である。4は、この手法により抽出できた障害物からの反射波である。平均を行なう際のデータ数が足りなかったことで3が残ってしまったため、5のような負側にピークが表れたがこれはデータ数を増やすことで低減されると考えられる。以上の手法により、類似性のある不要信号の除去を行なえることが確認できた。この手法を用いることにより、走行中にいつも表れる信号は無視し、急に表れた信号を障害物として認識するという方法も有効であると考えられる。つまり、測定された反射波を記憶しておき、いくつかのデータの平均を常に計算しておき、現在測定された反射波との差をとることにより、走行に支障のない環境の認識を行わず、急に表れた反射波を障害物からの反射波として認識するということが可能であろう。

6. 結 論

本研究では、無走査型超音波レーダを試作し、基礎実験を行って次の結果を得た。

- (1) 大出力トウイータ、放物面鏡及び複数周波数の超音波を用いることにより測距範囲の拡大が実現できた。
- (2) 複数マイクにより測定対象の距離と方向が計測できる。また、複数のバンドパスフィルタを用いることで対象物との相対速度の正負が判別できることが確認された。
- (3) 大出力のバースト波送信に伴い、騒音が発生したが、これを低減する手法を提案し、その有効性をシミュレーションおよび実機による実験で確認した。

参考文献

- 1) 谷腰，超音波とその使い方，日刊工業新聞社 (1994)