

圧縮センシングを用いた自動車イメージングレーダによる周囲物体の映像化及び特徴抽出に関する研究

代表研究者 山田 寛喜 新潟大学工学部 教授

1 研究の背景

近年、自動車の安全運転支援、さらには自動運転を目指した様々なセンサの開発が目覚ましく進み、安全で自律的に走行するパーソナルモビリティ社会の実現が目前となっている。これらを実現する基盤となるセンサ技術として、現在、光学画像によるターゲットの検出・認識を行うカメラ映像、主に前方車両の距離速度を検出するミリ波レーダあるいはレーザレーダ、さらには極近傍においては超音波センサなど、様々なセンサ技術が用いられている。各々のセンサ技術も感度・精度の向上に加え、圧縮センシングや機械学習などの最新のデータ解析との相乗効果で、その検出性能はますます改善されてゆくものと期待される。

しかしながら、完全な自動運転実現のためには、いかなる環境においても周囲を認識する能力が必要であり、現状のセンサではカバーできない状況が存在する。それが濃霧、強い降雨、降雪などの視界不良状況である。現在、我々が運転している際に発生する山間部などでの濃霧や、突然のゲリラ豪雨などの視界不良時には、カメラやレーザレーダなどの光学ベースのセンサの能力は著しく劣化する。ミリ波レーダは、光に比べ濃霧、雨、雪に対する透過特性が高いため、視界不良時における他のセンサの問題を補完する能力を有している。しかしながら現状のミリ波レーダ[1], [2]は、前方ターゲットの距離・速度・角度の検出にとどまっており、視界不良時において光学映像を補完するまでの性能を実現していない。ミリ波レーダにおいて、高分解能なターゲット推定を実現するには、広い周波数帯域幅と鋭い指向性（メインビーム）が必要である。周波数帯域幅においては、現在すでに 76.5GHz、79GHz レーダのいずれにおいても 1GHz 程度の帯域幅が割り当てられており、フーリエ変換などの基本的な信号処理手法を用いた場合であっても、15cm(エコー間隔 30cm)の分解能が実現可能である[3],[4]、ただし、鋭い指向性（メインビーム）の実現において壁が存在する。鋭い指向性の実現には、大開口アンテナが必要となる。多数の素子からなるアレーアンテナを設置し、電子的にビーム走査すれば高い角度分解能特性の実現が可能であるが、自動車上の設置面積の制約やハードウェアコストの問題から、なかなか進展していないのが現状である。本研究では、そのような状況を解決する一つのレーダイメージ手法を提案し、その実現可能性に関する検討を行っている。

2 研究の目的とアプローチ

この研究では、現在の 76.5GHz 帯ミリ波レーダのハードウェア規模で、より高分解能な 2次元イメージング、すなわち、周囲の物体の 2次元マップ状のレーダ画像を生成するイメージングを実現することを目的としている。衝突防止を目的とした前方監視長距離レーダに関しては、既に数素子のアレーによるデジタルビームフォーミング等により、ある程度の性能が達成されている。ここでの検討は、特に車両の中距離斜め前方から側方いたる領域をカバーし、カードレールや標識などのランドマークの位置検出による自律走行の補助、および車両、自転車、歩行者の検出による衝突回避を目指している。

イメージング手法として、この研究では合成開口レーダ(Synthetic Aperture Radar, SAR)手法の適用を提案している[5]。合成開口レーダは図 1(a)のように人工衛星や航空機に搭載したサイドスキャンレーダを用い、プラットフォームの移動時に受信されたデータを合成することにより、移動距離に相当する仮想的なアンテナ開口長を実現し、高い空間分解能を実現するレーダ技術である[6]。移動経路の各地点で受信されたデータを仮想的なアレーアンテナとみなすため、アンテナは基本的に送受一組のみで十分である。SAR 観測では既に 1m 以下の空間分解能を有する X-band(10GHz 帯)のレーダが運用されている。自動車レーダにおいては図 1(b)のように斜め前方にメインビームを向けて運用することとなる。なお、走行方向の真横（アレーのブロードサイド方向）と斜め前方に向けたメインビームのなす角度はスクイント角と呼ばれる。実装方法としては、車両のバンパー部分に送受信アンテナを搭載することを想定している。なお、前方監視レーダを多素子化し、マルチビーム運用できれば、斜め前方に向けたマルチビームの一つの受信データが利用できる可能性もある。

イメージングにおける空間分解能は、基本的には周波数帯域幅とアンテナ開口の大きさ、すなわちアレー

長により決定されレーダ方式に依存しない。現在の車載レーダの多くは距離と速度を検出するため FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave)と呼ばれる Up-チャープおよび Down-チャープ信号を組み合わせた信号(図3)を用いるが、後に示すようにイメージング実現には、車両の移動に伴い、高速なデータ取得が必要のため Up-チャープのみの高速チャープ信号を用いた FMCW 変調方式(図4)を採用した。なお、この高速チャープを用いるレーダ方式は、最新の自動車レーダに採用されている方式であり、ハードウェア的な整合性も高い。

Airborne radar

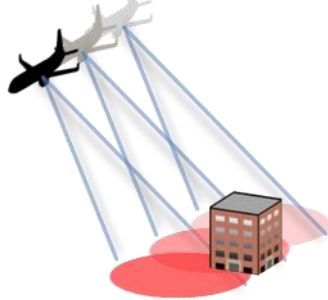


図1. 航空機搭載合成開口レーダによる観測

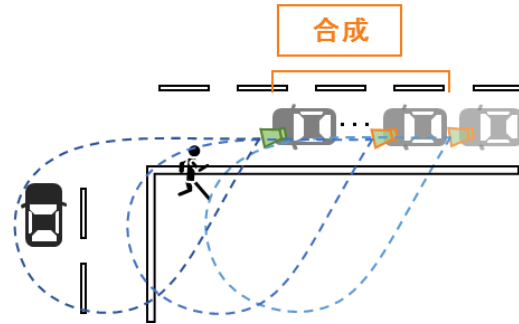


図2. 車両搭載合成開口レーダによる観測

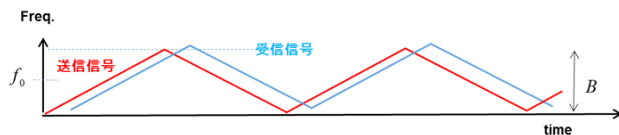


図3. Up-チャープ/Down-チャープ信号を用いた FMCW 方式送受信波形例

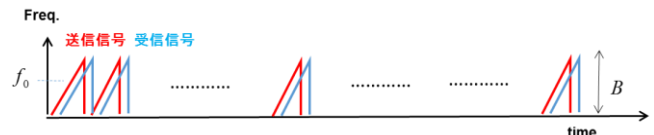


図4. 高速 Up チャープ信号を用いた FMCW 方式送受信波形例

得られたデータを用いた画像再生、すなわちイメージングアルゴリズムとしては、厳密な DFT(Discrete Fourier Transform)による映像再生手法(以降 DFT 手法)[6], SAR 信号処理で一般的に用いられる Stolt 変換 n による空間周波数補間を施した映像再生手法(Stolt 変換手法)[6],[7], および DFT 手法による画像再生手法において圧縮センシングを導入した映像再生手法(CS 手法)[8],[9]の3つのアプローチの比較検討を行っている。これは、DFT 手法は演算量、Stolt 変換は演算時のデータ量が増大するという問題が生じることが予想され、CS 手法により、これら双方の問題解決が可能となることが予想されるためである。

ターゲットの特徴抽出に関しては、再生された映像のテクスチャ解析、すなわち散乱強度分布の統計的な性質や、ドップラ周波数などの情報を組み合わせることにより、車両、人物、樹木などの判定を支援すること、およびミリ波車載レーダにおいて偏波情報を活用できないかという点に重点を置いた検討を目的とした。76.5 GHz 帯のミリ波レーダの波長は 4mm 程度であり、通常のターゲットは波長に比べ十分に大きい。したがって、通常の偏波レーダで期待されるターゲットの形状による大きな偏波特性の変化は期待できないが、理論的には、垂直偏波および水平偏波の観測データによる簡単な演算により、直接反射波とマルチパス反射波の識別が可能となる。これは車両と地面によるマルチパスの分離や、路肩の歩道のようなコーナーリフレクタ構造によるマルチパス反射の検出を狙った検討である。

シミュレーションベースの検討では、76.5GHz という高周波数(4mm という非常に短い波長)において実際に合成開口処理が実現可能か、また実際のターゲットの散乱特性のモデル化が困難なため、レーダを試作し実験ベースで検証することとした。

3 レーダパラメータに関する基礎検討

SAR 画像再生を実現するには、車両の走行とともに各地点におけるデータ取得が必要となる。図5に車両の速度と移動距離の関係の計算例を示す。この図は時速 40, 60, 80km/h で走行した車両の観測時間と、その際の移動距離、すなわち合成開口長(アレー長)を示したものである。50ms 程度の走行時間で 1m 程度の合成開口長が得られることがわかる。具体的には、60km/h の速度で 60msec の観測時間で 1m の合成開口

長が得られる。観測時間を 30ms に制限した場合であっても 50cm のアレー長に相当する。そのような実アレーを車両に搭載することは現実的には不可能であり、SAR 手法が有効であることがわかる。

次に観測点の間隔と総パルス数の関係を検討する。一般的な通信などのアレーアンテナによる角度推定においては、グレーティングローブの発生によるアンビギュイティ、すなわち虚像の発生を抑えるため、0.5 波長以下の素子間隔が求められる。合成開口レーダの場合、各地点で送受信を繰り返すため、この条件は 0.25 波長以下となる。これは 76.5GHz のレーダでは 1mm 間隔でのデータ取得に相当する。ただし、この数値は等方性アンテナを用いて側方（真横、ブロードサイド方向）を向けた場合の値であり、ヘンシルビーム状の指向性を有したアンテナ素子を用い、かつ斜め前方にメインビーム向けた際は、その条件式が緩和されることに注意されたい。図 6 が時速 60km/h で合成開口長 3m を想定した際の測定周期（パルス繰り返し周期、PRI）とアジマス間隔（観測点の間隔）および観測点数（総パルス数）の関係の計算例である。ここでは、次節で示す試作レーダのパラメータに併せた計算のため 0-10ms の範囲で示している。これより 1ms 時のパルス間隔は 1.67cm で、前述の条件を満たすには、スクイント角と素子指向性を考慮したとしてもより短いパルス周期が必要となることがわかる。今回の試作レーダは入手可能であった PLL 性能のため msec オーダのレーダとなっているが、サブ msec の高速チャープパルスを送信するレーダは既に開発されているため、十分に実現可能と考えられる。ただし、取得されるデータ数が問題となる。同図からわかるように 1ms の PRI であっても 180 パルス分の観測データが収集される。アレー長を 50cm (1/6) にした場合であっても 30 パルスであり、PRI を 0.2ms とすると 150 パルス分の観測データ（具体的にはパルス時のチャープ信号）を取得することとなる。取り扱うデータ量の増大が問題となる可能性があることがわかる。

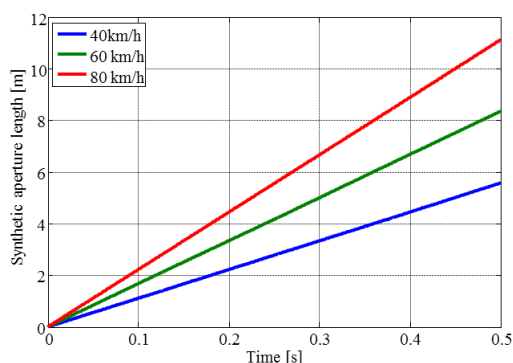


図 5. 車両の走行速度と移動距離（合成開口長）

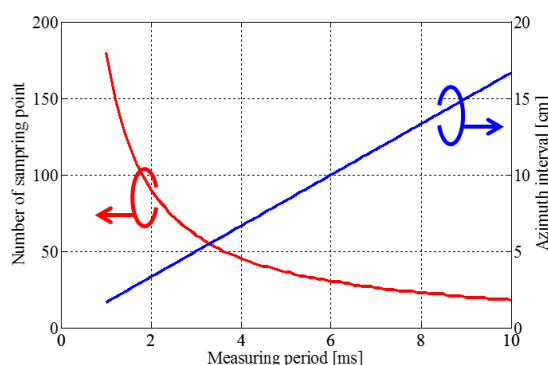


図 6. 合成開口長 3m, 時速 60km/h の際のパルス周期とアジマス間隔（観測点間隔）、サンプル点数（パルス数）の関係。

さて、最後に各パルスにおける最大観測可能距離 R_{\max} をチェックする。 R_{\max} は次式で与えられる。

$$R_{\max} = f_s c / 2M, \quad f_s: \text{サンプリング周波数}, \quad c: \text{光速}, \quad M: \text{チャープ率}(=\text{周波数帯域幅}/\text{パルス幅})$$

例えば、周波数帯域幅 500MHz, パルス幅 1ms で、サンプリング周波数 2MHz であれば、600m まで観測可能である。パルス幅を 0.2ms とした場合であっても 120m まで観測可能であり、サンプリング周波数を上げることにより、さらに遠方までを範囲をすることができる。ただしサンプリング周波数の増加は取得データ量の増加となる点には注意が必要である。

以上のように、車載ミリ波レーダにおいても、レーダパラメータの観点からはイメージングに必要な条件は、現在研究開発がすすめられているレーダハードウェアで十分に実現可能な問題となっているものと考えられる。実際には実時間での映像化が必須であるため、計算時間も問題となる。のちの検討で示すが、現状では実時間イメージングは困難である。しかしながら、この点は演算処理能力の向上に伴い、改善されるものと期待している。また、波長 4mm での観測であるため、実際の観測（アンテナ）位置の精度も問題である。その検討は、車両搭載時の観測データによるイメージング精度の確認が必要となるが、以下の検討では、そこまでには至っておらず、今後の検討課題である。しかしながら、舗装道路走行時の数 msec の観測時のアンテナの移動経路の軌跡はほぼ直線とみなせるものと予想している。

4 ミリ波多偏波レーダの概要

車載ミリ波レーダによる2次元 SAR イメージングの実験的検証のため、図7のようなレーダを試作した。今回は、基本的なイメージング特性評価であり、偏波観測も目的の一つであるため、素子アンテナとして、偏波特性が良好な標準ホーンアンテナを採用し、送受それぞれ垂直(V)、水平(H)の2送信、2受信のレーダとした。レーダ諸元は表1の通りである。前節の検討で示した通り、実際の運用ではサブミリ秒(例えば0.2ms)での動作が必要となるが、今回入手可能であった部品の性能上、2.5msとなった。送信が垂直、水平の2系統あるが、1系統のみの送信(通常のレーダ)と2系統の送信(偏波レーダ動作)の切り替えが可能である。FMCW方式であるため2系統時の同時送信は不可能である。2系統時は垂直、水平の交互送信となり、パルス周期が2倍となる。受信に関しては、いずれの動作時も垂直、水平の同時受信が可能である。

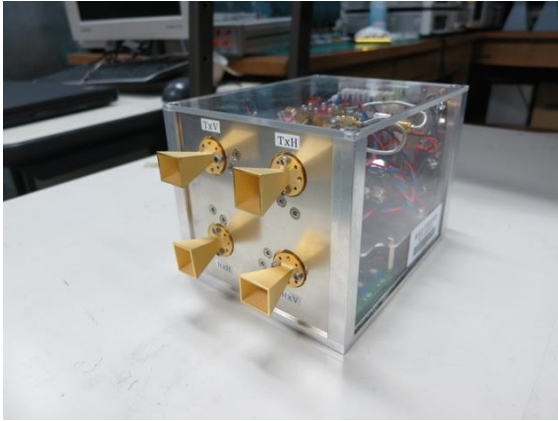


図7. ミリ波偏波レーダ

表1. ミリ波偏波レーダ諸元

中心周波数	76.5 GHz
占有周波数帯域幅	900 MHz
変調方式/周期	FMCW / 2.5 msec
空中線	角型ホーンアンテナ
空中線出力	0.01 W
観測チャンネル数	送信 2(V&H)x 受信 (V&H)

5 実験結果

ここでは、実際のイメージング結果を通して、車載ミリ波 SAR の有効性に関する基礎実験結果の一例を示す。試作レーダの使用のため現状では、実際の走行実験が困難であるため、可動式アンテナポジションを用いて低速で移動させることによりデータ取得を行った。したがって、ドップラ周波数変動による影響は無視している。実際の走行車両時のイメージングでは、ドップラ周波数変動による影響の考慮、補正が必要であることに注意されたい。実験環境を図8および9に示した。

実験は大学構内の駐車場で行った。レーダの10m前方に車両を1台配置し、必要に応じて車両の側方に検証用の参照ターゲット(導体球、コーナーリフレクタなど)を設置した。図8の写真から分かるように図9の下部は建物であり、その柱を路側の電柱や標識のポールと想定した実験である。



図8. レーダシステムおよびレーダから見込んだ観測環境

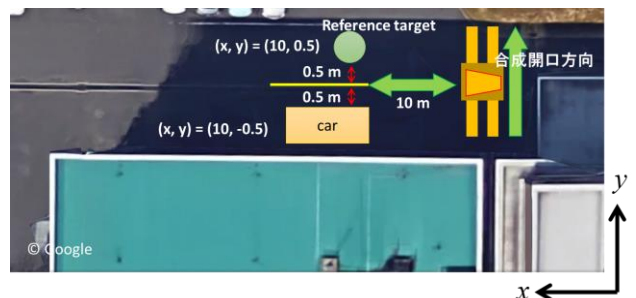


図9. 実験状況

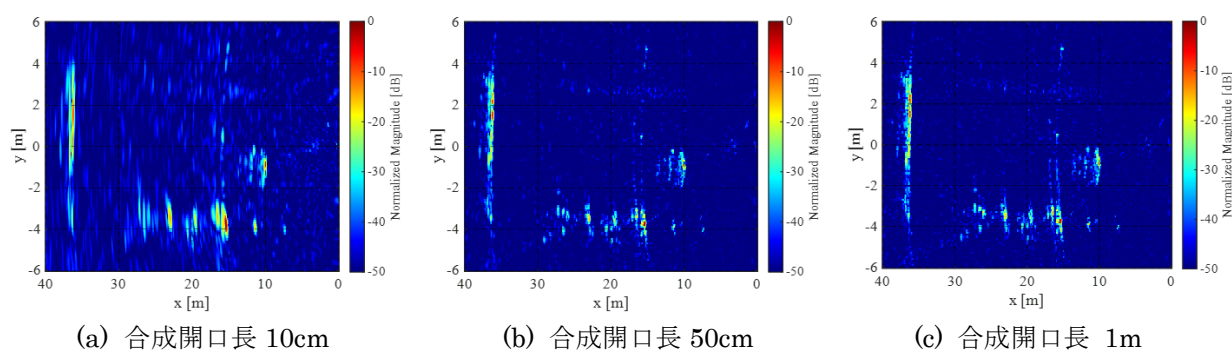
5-1 解析結果1: 合成開口長による分解能特性評価

まず、図9のようなターゲットおよびレーダ配置において、合成開口長の変化によるイメージング性能の比較を行った。図のようにレーダの移動方向に対してアンテナのメインビームを真横(スクイント角 0°)とした実験である。合成開口方向とターゲットの位置関係は、車両搭載時のレーダの運用イメージとは異なるが、イメージング性能の比較の際は問題はない。パルス繰り返し間隔は理想的な0.25波長(0.98mm)とし、

イメージングアルゴリズムは、最も正確なイメージングが可能である DFT 手法を用いた。図 10 が合成開口長 10cm, 50cm, 1m 時の VV 偏波（垂直送信, 垂直受信）時のイメージング結果である。図の横軸(x 軸)が図 9 の座標系に対応するターゲットまでの距離方向, y 軸がレーダ走査方向（角度方向に相当）である。各画像の(x, y)=(10, 1)m 付近の応答が車である。また y=-4m 付近に表れている複数の応答は建物の柱のエコーである。また, x=38m 付近に強い応答が表れているが, これは図 8 右側の写真から分かるように注射されていた車両の応答である。なお, この実験では参照ターゲットは設置していない。

車両に実アレーとして搭載した場合は 10cm 程度のアレー長が限界であろう。図 10(a)がほぼそのようなアレーを用いた際の結果に対応するものである。図 10(b), (c)の比較から分かるように帯域幅が同じであるため距離方向である x 軸方向のターゲットエコーのパルス幅は同等であるが, 角度方向に対応する y 軸方向の分解能は著しく劣化し, 38m の距離に存在している遠方ターゲットのエコーが分離されていない。合成開口長を 50cm, 1m と増加することで y 軸（角度）方向の分解能特性が向上し, 10m, 38m の車両のいずれにおいてもターゲット上の個々の散乱点まで分離可能となっている。このことから合成開口処理はイメージング性能の改善に効果的であることがわかる。

なお, この実験結果を見る限り合成開口長 50cm と 1m 時の空間分解能特性に大きな差異は認められなかった。これは, 観測点（アンテナ）位置のわずかな誤差が積算されたためと思われる。このことから位置決め精度が有効な最大合成開口長を制限するものと予想される。



(a) 合成開口長 10cm

(b) 合成開口長 50cm

(c) 合成開口長 1m

図 10. 合成開口長の違いによるイメージング性能評価 (VV 偏波)

5-2 解析結果 2 : イメージングアルゴリズムの比較

次に第 2 節で述べた 3 つのアルゴリズムの特性を比較する。検討した手法をここでは DFT 法, Stolt 法, CS 法である。以下の検討ではいずれの手法においても, 図示する観測エリアを x, y 方向それぞれ 10cm の分解能となるよう評価した。

DFT 法は, 厳密な 2 次元フーリエ変換による画像再生手法である。アレーアンテナでの 2 次元波源位置推定的な表現を用いれば, x, y の各グリッドを 2 次元モードベクトルで操作することと等価である。この手法は最も正確なイメージング結果をもたらすが, DFT(離散フーリエ変換)に基づく計算のため演算負荷が重いのが問題である。その演算負荷の軽減には, FFT(高速フーリエ変換)が有効である。ただし, レーダで取得されるデータに FFT 的な処理を施した際得られる空間メッシュは角度および距離方向で等間隔となる。空間周波数補間を導入した Stolt 変換手法は, この問題を解決するために, (x,y)において等間隔となるよう空間周波数領域で補間演算を施すものである。複数回の FFT 演算で画像再生が実現するため, 演算時間は著しく高速化される。ただし, 補間時のデータ量が所要メッシュ精度に応じて増大するのが欠点である。これら双方の欠点を解決する可能性のある手法として検討した手法が CS 手法（圧縮センシング, Compressive Sensing)である。第 3 節で検討したように, この合成開口観測により取得されるデータサイズは大きい, CS 手法を用いた際は, データのランダムサンプリング, すなわちデータを間引き, 一部のデータのみから同等のイメージングが実現可能となることが知られている。また, ミリ波のイメージングでは, 高い分解能が実現可能であるため, 画像におけるレーダエコー, すなわち散乱分布は比較的点状でまばらに分布することが予想される。これらの点からも, ランダムサンプリングを施した圧縮センシングとの親和性は良好と考えられる。圧縮センシングのスパース信号処理アルゴリズムには, 様々なものがあるが, 今回は演算速度の点を優先し, OIHT(Orthogonal Iterative Hard Thresholding)法[10]を用いた。いずれの手法を選ぶかで分解能特性や演算時間が異なるため, 様々なレーダシーンにおける更なる検討が必要である。

図 11 が各々の手法による解析結果である。ここでは図 10(c)の合成開口長 1m の VV 偏波の結果を示している。また表 2 に相対的な比較のため, 各手法の凡その計算時間と所要データ量を示した。計算は Intel Core

-i 7 の PC を使用プログラム言語は Matlab である。Stolt 手法時のデータ量は補間を施した際の最大データ量である。図 11(a)が DFT 手法によるイメージング結果であり、最も正確なイメージング結果をもたらしているが、1 時間を越える計算時間を要しており、計算負荷が非常に大きいことがわかる。一方、Stolt 手法では、FFT による高速化が図られているため、計算時間が DFT 法の 1/10 程度という高速演算が実現されている。補間を用いているため、生成された画像には僅かな劣化が認められるが、実用上は問題ないレベルといえる。ただし、補間時に一時的に必要となったデータ量が増大しており、計算ハードウェア規模によっては、この点が問題となることが懸念される。なお、このデータ量は目安であり、プログラムの改善により効率化できる可能性がある。図 11(c)が CS 手法の検出結果である。今回の解析では DFT 手法時に用いたデータを 1%まで間引くことが可能であった。すなわち、解析に用いたデータは取得データの 1/100 のみである。スパース信号処理手法である OIHT は反復回数分の主要散乱点が検出される手法である。通常は、何らかの閾値設定による反復停止処理を行うべきであるが、今回は基礎検討であるため、ターゲットの状況を勘案し 20 回の反復で停止させている。すなわち検出されたピークは 20 個である。図から分かるように柱と 2 か所の自動車に対応するピークがほぼ正しく検出されていることがわかる。計算時間はデータ量が削減されたことにより、Stolt 変換の僅か 1/10 程度となっている。言うまでもなく多数の散乱点が存在する場合や散乱分布の詳細なテクスチャの検出を試みる際には反復回数が増大するため、必ずしも CS 手法が優るとは言えない点には注意が必要である。しかしながら、並列演算も容易な CS 手法は、データ量の削減の観点からは魅力的な手法であることがわかる。

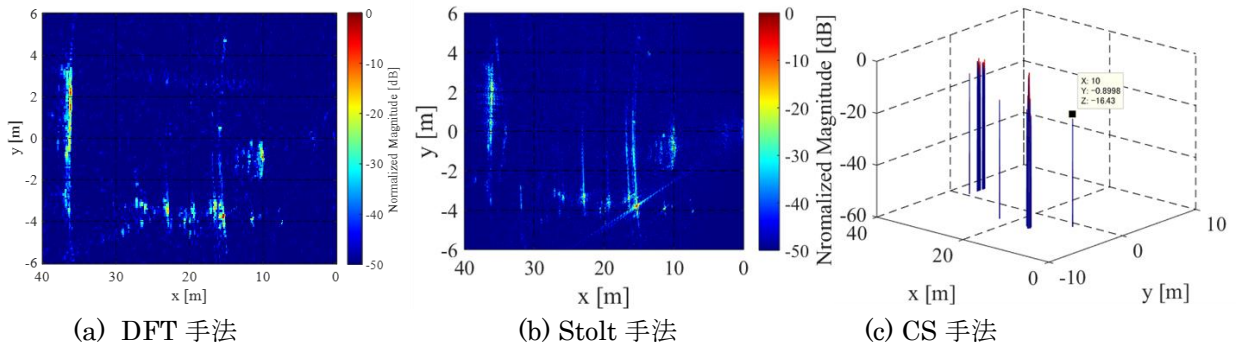


図 11. 各イメージング手法による解析結果 (VV 偏波, 合成開口長 1m)

表 2 各手法における計算時間, 所要データ量

	DFT 手法	Stolt 手法	CS 手法
計算時間	約 2 時間	約 10 分	約 1 分
所要データ量	20.4 MByte	9.4 GByte	203 kByte

5-3 解析結果 3 : 偏波によるイメージング特性 (特徴量) に関する検討

レーダの試作の遅れと初期校正などの作業のため偏波やターゲットの散乱分布からの特徴量の解析に関する検討は現在検討を進めている段階である。ここでは、波長が僅か 4mm であるミリ波において偏波画像に差異が認められるか否かの初期結果が得られたので、その結果を図 12 に示す。

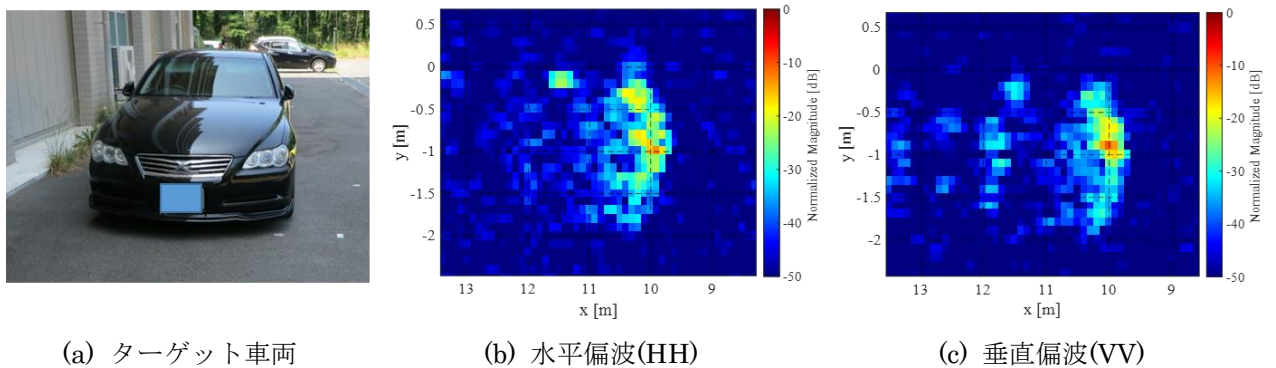


図 12. 車両部分の偏波イメージング結果 (合成開口長 1m)

これらの図から分かるように水平、垂直偏波のイメージング結果において偏波散乱メカニズムの違いによる差異が生じていることがわかる。現時点では、正確な偏波キャリブレーションが施されていないため、この違いがどのような散乱メカニズムにおいて生じたものかの判断は困難である。しかし、画像の差異から、送受信アンテナを1組追加するのみで、新たな情報が得られたものと判断できる。理論的には、水平偏波データと垂直偏波データの和画像(HH+VV)および差画像(HH-VV)から、1回反射成分(直接反射)および2回反射(マルチパス成分)の分離イメージングが可能となる。その情報を用い、ターゲット毎の偏波散乱特性を明らかにすることにより、ターゲットの分離識別性能が更に改善されるものと期待できる。ターゲットの空間的な散乱分布の統計的な解析による特徴量の解析と併せて、今後も引き続き検討を進める予定である。

6 まとめ

本報告では、自動車の安全運転支援、自動運転の実現に向けた課題の一つである視界不良時の周囲状況の把握手段として、ミリ波レーダによるイメージング手法を開発した。このレーダは前方ではなく、斜め前方から側方の領域をカバーするイメージングレーダである。ミリ波という非常に高い周波数、短い波長における合成開口信号処理の実現が必要であるが、自動車の走行時の動作を想定したパラメータスタディより、短時間パルスのアップチャープ送信型 FMCW 方式を用いることで、現状のハードウェアレベルではほぼ実現可能であることを明らかにした。さらに、ミリ波レーダシステムを試作し、屋外での低速時のモデル実験により、50cm 程度の合成開口長で通常の自動車搭載アレーレーダでは実現不可能な高精細イメージングが実現できることを示した。このイメージングレーダで取得されるデータ量は膨大で、また通常の合成開口アルゴリズムでは演算時間も問題となる。よりデータ量の削減とそれに伴う高速化が期待できる手法として圧縮センシング手法に着目し、そのイメージング結果も示した。前述のモデル実験データでは、使用データ量を1%まで削減し、それに伴い演算時間も1/10まで高速化された。リアルタイム処理の実現には更なる高速化が必要である。

今後は、より実環境に近い状況での様々な実験を通して、道路周辺の様々なレーダターゲットの特徴量の解明とそれを用いた効果的なイメージング手法の開発、さらには走行時のドップラ周波数シフトを考慮したイメージング手法など、より高度な運転支援を実現するミリ波イメージングシステムの開発を進める予定である。

【参考文献】

- [1] T. Kirimoto, "Introduction of Automotive Radars," Microwave Workshop & Exhibition, Japan, Nov. 2007.
- [2] 稲葉 敬之, 桐本 哲郎, "車載用ミリ波レーダ," 自動車技術, Vol64, No2, pp.74-79, Feb. 2010.
- [3] 総務省, "電波法施行規則," 総務省総合通信基盤局, http://www.tele.soumu.go.jp/horei/reiki¥_honbun/a720020001.html, 参照 July 16, 2015.
- [4] 電波産業会, "特定小電力無線局ミリ波レーダ用無線設備 標準規格 ARIB STD-T48," 電波産業会, [http://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/ ¥¥1-STD-T48v2¥_1.pdf](http://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/¥¥1-STD-T48v2¥_1.pdf), 参照 July 16, 2015.
- [5] J. Minotani, H. Yamada, Y. Yoshio, "Experimental study on MW-SAR imaging in outdoor environment", in Proc. 2015. International Workshop on Electromagnetics and R&S Student Competition (iWEM2015), pp. 1-2, Nov, 2015.
- [6] M. Soumekh, Synthetic aperture radar signal processing with MATLAB algorithms, Wiley-Interscience, 1999
- [7] R. Stolt, "Migration by Fourier transform," Geophysics, vol.43, no.1, pp.23-48, Feb. 1978.
- [8] S.-J. Wei, X.-L. Zhang, J. Shi, and G. Xiang, "Sparse reconstruction for SAR imaging based on compressed sensing," Progress In Electromagnetics Research, Vol. 109, pp.63-81, 2010.
- [9] D. L. Donoho, "Compressed sensing," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 52, No. 4, pp. 1289-1306, Apr. 2006.
- [10] J. Li, Y. Shen, and Q. Wang, "Stepwise suboptimal iterative hard thresholding algorithm for compressive sensing," in Proc. 2012. International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), pp. 1332-1336, May, 2012.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
車載ミリ波レーダによる SAR イメージングに関する基礎検討	電子情報通信学会技術研究報告, vol.SANE2015-40/vol.AP2015-78, pp.37-41/pp.101-106	2015. 8
ミリ波レーダを用いた SAR イメージングに関する実験的検討	2015 年電子情報通信学会信越支部大会, pp.83	2015. 10
Experimental Study on MW-SAR imaging in Outdoor Environment	2015 International Workshop on Electromagnetics and R&S Student Competition (iWEM2015), PO2.6	2015. 11
車載ミリ波レーダによるスクイントモード SAR の遠方・近傍界モードベクトルを用いたターゲットイメージングの比較検討	2016 年電子情報通信学会総合大会, B-2-39, pp.275	2016.3
圧縮センシングを用いた車載ミリ波 SAR に関する基礎検討	電子情報通信学会技術研究報告	2016.7(予定：申し込み済み)
Fundamental Study on Data Volume Reduction for Squint Mode SAR with Millimeter Wave Automotive Radar by Using Compressed Sensing	2016 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2016)	2016. 10 (予定：採録決定)