## ミリ波帯における自動車レーダ受信信号特性の推定

大島繁樹,浅野孔一,西川訓利

Estimation of Received Signal Characteristics for Millimeter Wave Car Radar

Shigeki Ohshima, Yoshikazu Asano, Kunitoshi Nishikawa

ミリ波帯における自動車レーダの受信信号特性 を推定する手法を提案した。この手法では,自動 車レーダのハードウェアの特性を考慮した信号推 定が可能である。また,ターゲットとの距離が短 い場合にターゲットの一部分にしか電波が照射さ れないという自動車レーダ特有の現象を考慮する こともできる。そのために,提案手法ではターゲ ットを複数の散乱点の集合体で近似している。こ の近似は,ターゲットのRCS像の測定結果に基づ いて行われ,そのために必要なRCS像の高精度な

研究報告

## 要 旨

測定法を考案した。この測定法を用いて,得られたRCS像内の複数の極大点を散乱点と考え,それらの極大点の位置とそこでのRCS値に基づいて散乱点の位置とRCS値を求めている。

さらに,実際の自動車レーダ使用環境で生ずる 特徴的な状況において,提案手法による推定結果 と実験結果とを比較した。その結果,ターゲット との距離が近い状況でも良好に受信信号特性が推 定できることが確認でき,提案手法の有効性が明 らかになった。

#### Abstract

A method for estimating characteristics of signals received by a millimeter wave car radar is proposed. In this method, characteristics of the car radar hardware are taken into account. Moreover, a phenomenon that only a part of the target is irradiated with the radio wave from the radar antenna with a sharp beam is considered; the phenomenon is peculiar to the car radar which operates in a compact range. For the consideration of the phenomenon, a radar target is substituted with a set of scattering points. The positions of these scattering points and the RCS values for the scattering points are appropriately determined on the basis of an RCS image for the target; the RCS image means a spatial distribution of RCS values on the surface of the target. The RCS image is measured accurately by using the novel measurement method introduced in this paper.

Furthermore, the estimated characteristics of the signal received by the car radar are compared with the measured ones in typical cases of car radar environments. The comparison verifies that the received signal characteristics are well estimated even in the compact range. The proposed method has proved to be valid for the estimation of the received signal characteristics.

キーワード 自動車レーダ,ミリ波,レーダ信号,逆合成開口レーダ,RCS像

#### 48

## 1.はじめに

ミリ波電波を用いた自動車レーダは自動車の安 全性向上に欠かすことのできないキーデバイスに なりつつあり,実用化に向けた研究開発が精力的 に進められている<sup>1,2</sup>)。そこでは,危険な状況にお ける自動車レーダのターゲット検出性能を再現性 よく評価することが必要とされる。しかしながら, その様な評価を実験的に行うことは安全上問題が ある。そこで,自動車レーダが実際に使用される 環境におけるターゲット検出特性を推定する手法 が望まれている。

ターゲット検出特性は,自動車レーダで受信さ れる信号(以後,レーダ信号と表す)の特性及びそ のレーダ信号に基づくターゲットの検出のための 信号処理の特性に強く依存する。さらに、レーダ 信号の特性は使用環境に存在する様々なターゲッ ト及びクラッタのみならず,アンテナ指向性,送信 出力,受信感度などの自動車レーダのハードウェ ア特性にも依存する。この様にレーダ信号の特性 は様々な要因により複雑に変化することから、こ れまでに推定された例はほとんど見あたらない。 一方,ターゲット検出の信号処理特性は,自動車 レーダにおいてそのための信号処理がソフトウェ アで実行されるため,受信信号に基づいて比較的 容易に推定可能と考えられる。従って,自動車レ ーダのターゲット検出特性の推定を実現させるに は,自動車レーダの使用環境及びハードウェア特 性に基づいてレーダ信号の特性の推定できる手法 の開発が不可欠であると言える。

航空機レーダ及び船舶レーダの受信信号特性をそれ らの使用環境に存在するクラッタの影響を考慮して 推定するツールは既に開発され,利用されている<sup>3,4</sup>)。 しかしながら,自動車レーダにおけるターゲットまで の距離は数mからせいぜい100m程度であり,航空機, 船舶レーダのそれに比べて非常に短い。この様にター ゲットまでの距離が短い場合,レーダアンテナの鋭い 指向性のためにターゲットの一部にしか電波が照射さ れない現象が生じる。この様な現象は自動車レーダに 特有なものである。さらに,自動車レーダで考慮すべ きクラッタは航空機,船舶のレーダのそれとは異なる。 確かに,大地や樹木からの反射波は航空機レーダ等の

クラッタとしても考慮されるものの,それらに対する 電波の入射角は自動車レーダに対するそれと異なり, 同じ種類のクラッタでもそれらの特性が同様であると 考えることはできない。従って,航空機,船舶レーダ を対象とした受信信号推定ツールを自動車レーダに適 用することは不可能である。

そこで,本報告では自動車レーダの使用環境及 びハードウェア特性を考慮してレーダ信号の特性 が推定できる手法を提案する。この手法では,自 動車の車体の一部にしか電波が照射されない自動 車レーダに特有の現象はもとより,路面や路側物 などによるクラッタの影響も考慮できる。また, これらの考慮は自動車及び路側物等のミリ波帯に おける電波散乱特性の詳細な測定に基づいて行っ ている。本報告では,まず,この電波散乱特性の 測定手法について述べるとともに,その手法を用 いてミリ波帯における自動車の電波散乱特性を明 らかにする。次に,この測定結果に基づいて,提 案したレーダ信号の特性を推定するための手法に ついて説明する。さらに,自動車レーダの使用環 境で生ずる特徴的な場面を対象として,提案手法 による推定結果と実験結果を比較し,提案手法の 有効性を検討する。

## 2.ミリ波帯における電波散乱特性の測定

自動車や路側物の電波散乱特性を詳細に検討す るため、ここではそれらの表面での電波散乱強度 の分布を示すレーダ反射断面積(Radar Cross Section)の二次元分布(以後,RCS像と表す)を測 定する。RCS像を測定することにより,自動車や 路側物のどの部分がどの程度の強度で電波を散乱 しているのかを視覚的に捉えることができる。こ の様なRCS像を高精度で測定するため、ここでは S/N比が大きくとれる近距離測定で、しかも高精度 な像を得ることができる新しい測定手法を考案し ている。本章では、この手法について述べるとと もに、その手法を用いて測定したミリ波帯での自 動車のRCS像の特徴を明らかにする。

## 2.1 RCS像の測定手法の提案

逆合成開口レーダ (Inverse Synthetic Aperture Radar) の手法<sup>5)</sup>を基に,近距離測定でも高精度なRCS像が 得られる新たな手法を提案する。この手法は次に示 す様な特徴を有する。まず,RCS像が有効に生成さ れる領域内では,観測点から領域内の各点までの距 離が異なることによる伝搬損失の違いに関係なく, 均一な感度でRCS像を得ることができる。そして, 従来の手法<sup>5)</sup>では円筒座標上に二次元のRCS像を生 成した後,データ変換により直線直交座標上にRCS 像を生成しているが,この手法では直接,直線直交 座標上のRCS像を生成できる。

Fig. 1は提案手法を実現するための測定系のブロ ック図を示したものである。この測定系は,ネッ トワークアナライザ,送受信用アンテナ,測定系 の制御及びデータの集積に用いるコンピュータ, 測定対象物を回転させるターンテーブル及びその 制御機からなっている。この測定系では,測定周 波数及び測定対象物の角度をそれぞれ独立に変化 させて,対象物からの散乱波の振幅と位相を測定 する。そして,測定した振幅と位相のデータをコ ンピュータに集積し,後述するFourier変換により RCS像を生成する。

この様なRCS像の測定において, Fig. 2に示す二 つの座標系を定義する。x-y座標系は測定系に固定 されており,その原点はターンテーブルの回転中 心と一致している。ここで, y軸方向をレンジ方向, x軸方向をクロスレンジ方向と表すことにする。一 方, x'-y'座標系は測定対象物に固定されている。 そして, y軸とy'軸との成す角度をアスペクト角 $\theta$ と定義し,測定対象物の姿勢(向き)を表すパラメ ータとする。尚, $\theta$ の符号は反時計方向廻りを正と する。また,測定対象物の角度位置 $\phi$ は, $\phi = 0°$ の

時を初期位置とし,この位置を中心に



の範囲で $\Delta \phi$ の間隔で角度を変化させる。この角度  $\phi = \theta$ と同様に反時計方向廻りを正とする。

測定は上述の様に周波数と測定対象物の角度を それぞれ独立に変化させて行われる。そこで,n番 目の角度位置で,周波数がm番目の周波数 $f_m$ の時に ネットワークアナライザで受信した測定対象物か らの散乱波の複素受信電圧を $\bar{v}_{nm}$ とすると,x-y座 標系における二次元RCS像 $\sigma(x, y)$ は次式に示す Fourier変換により生成することができる。

$$\sigma(x, y) = k \left| \frac{\gamma(x, y)}{NM} \sum_{n=1}^{N} W_n^{\text{ang}} \sum_{m=1}^{M} W_m^f \overline{V}_{nm} \Phi_{nm} \right|^2$$
$$\Phi_{nm} = exp \left[ j \frac{4\pi R_n(x, y)}{c} f_m \right]$$
(1)

ここで,  $R_n(x, y)$ は,角度位置がn番目の時の観測 点と測定対象物上の点(x, y)との距離である。また, cは光速である。測定する周波数の数Mとその周波 数間隔 $\Delta f$ 及びクロスレンジ方向のパラメータNと  $\Delta \phi$ は,レンジ方向の解像度 $\delta y$ と有効なRCS像が生 成される領域の長さ(有効長) $U_y$ 及びクロスレンジ 方向の解像度 $\delta x$ と有効長 $U_x$ を決めることにより以 下の式を用いて求められる<sup>5</sup>)。

$$\delta y = \frac{c}{2\Delta f(M-1)} \tag{2}$$

$$U_{y} = (M - 1) \,\delta y \tag{3}$$

$$\delta x = \frac{c}{2f_c(N-1)\sin\Delta\phi}, \ f_c \equiv \frac{f_M - f_1}{2} \tag{4}$$

$$U_x = (N-1) \,\delta x \tag{5}$$

式(1)中のkはFourier変換により得られた値をRCS



Fig. 1 Schematic diagram of RCS image measurement system.



Fig. 2 Geometrical configuration of coordinate systems and angular directions for measurement.

値に変換するための係数であり, RCS値が正確に分 かっている標準器に対して同じ条件下で測定を行う ことにより求めることができる。 $W_n^{ang} \ge W_m^f \ge d$ Fourier変換における ' 窓 ' の値であり, それぞれ, 角度領域と周波数領域に対応している。ここでは, メインローブの鋭さと低サイドローブ性から Hamming窓を用いている<sup>6</sup>)。最後に $\gamma(x, y)$ は近距離 測定のために新たに導入した距離補正関数である。 近距離測定においては,測定対象物の大きさ(長さ) が測定距離に比べて十分に小さいとみなせないた め,測定対象物上の任意の反射点と観測点との間の 距離を一定値と考えることができない。そのため, 電波の伝搬損失に差が生じ,同じ散乱強度を持つ点 に対してもその距離によって受信波の振幅が異なる ことになる。従って,この様な状況で測定した受信 波に基づいて従来の逆合成開口レーダの手法でRCS 像を生成しても正確な像を得ることはできない。距 離補正関数の役割は、この距離の違いに起因する伝 搬損失差を補正することである。ここでは,距離補 正関数γ(x, y)を式(6)で定義する。

$$\gamma(x, y) \equiv \frac{R^2}{R_0^2} = \frac{(R_0 + y)^2 + x^2}{R_0^2}$$
(6)

上式中のR及びR<sub>0</sub>は,それぞれFig.3に示す様に, 角度位置 φ が0°の時の観測点と座標(x, y)との間の距 離及び,観測点とx-y座標系の原点との間の距離を 表す。この様に単純な形の補正関数であっても正 確な距離補正が実現でき,測定領域内で均一な感 度でRCS像が測定可能となる。

この様なRCS像測定手法の空間分解能を,数値

 $(\mathbf{x},\mathbf{y})|\phi=0$ 

Measurement

antenna

Х





豊田中央研究所 R&D レビュー Vol. 32 No. 2 (1997. 6)

モデルによる仮想の測定対象物を用いて評価する。 Fig. 4はそれぞれ間隔の異なる3つの同じRCS値を 持つ仮想散乱点で構成される3組の仮想の測定対象 物のRCS像を示している。ここで, RCS像は3dB間 隔の等強度線で表している。また,図中の格子上 に示した点が仮想散乱点の位置を表し,隣接した 散乱点の間隔は右上が25mm,中央が50mm,左下 が75mmである。式(2),(4)で示される解像度δv及 びδxは約25mmである。間隔が25mmの場合のRCS 像には一つの頂点しか見られないが,間隔が50mm 以上になると, RCS像に3つの頂点が生じており, その位置は仮想散乱点の配置位置と一致している。 また, RCS像の頂点とその間の鞍点との強度差は 3dB以上となっている。この結果に基づき,間隔が 50mmの時に散乱点が分離できていると考えれば, Hamming窓を用いた式(1)によって生成されるRCS 像の空間分解能は解像度の約2倍となる。以上のこ とから,ここで提案した測定手法を用いることに より,自動車や路側物等の自動車レーダ使用環境 に存在する様々な物体のRCS像を十分な精度で測 定できると考えられる。

### 2.2 自動車のRCS像の測定結果

提案した測定手法を用いて,ミリ波帯での様々 なタイプの自動車のRCS像を測定している。ここ では,乗用車であるトヨタのマジェスタを対象と して,その後部のRCS像を測定した結果を示す。

この測定ではTable 1に示すパラメータの値を用 いた。測定周波数帯域幅は中心周波数60GHzの10% である6GHzとした。これにより,レンジ方向の有 効長と解像度は式(2),(3)からそれぞれ,2.48mと



Fig. 4 RCS images for determining resolution.

25.0mmとなる。RCS像形成における各軸方向の分 解能を同程度にするためには,クロスレンジ方向 の有効長と解像度もレンジ方向と同程度の値が望 ましい。このこと及び測定装置の動作条件から角 度位置の刻み幅 Δφを0.063°とした。この値に基づ いて式(4),(5)よりクロスレンジ方向の有効長と解 像度を求めると,それぞれ2.29mと23.1mmとなる。 従って,RCS像の空間分解能は約50mmとなる。ま た,送受信アンテナから測定対象物の回転中心ま での距離は7.5mとした。これは,送受信アンテナ のビームの覆域内に測定対象物である自動車を完 全に収めるために最低限必要な距離である。

Fig. 5(a)~(e)はマジェスタを対象にアスペクト角 を変化させた時のRCS像の変化の様子を示してい る。RCS像は-20dBsmを最低値として5dB間隔の等 強度線により示されている。さらに,各RCS像に おいて最大のRCS値を示す位置も図中に示してい る。また,今回の測定における空間分解能のスケ ールも各図の左下の位置に示している。Fig. 5(a)は, アスペクト角が0°の時のRCS像である。RCS像は 自動車後部に広がっており,ある特定の部分だけ によって電波が散乱されているわけではないこと が分かる。ただ,大きなRCS値を持つ部分は,ナ ンバープレート付近に比較的集中してみられ,そ

の部分の形状はクロスレンジ方向 に伸びている。この原因について は後で考察する。Fig. 5(b)は,ア スペクト角が3°の時のものである。 大きなRCS値を持つ部分は左方向 に移動し,クロスレンジ方向への 伸びはやや小さくなっている。 Fig. 5(c)は,アスペクト角が6°の時 の結果で,大きなRCS値を持つ部 分はさらに左方向に移動してい る。また、その形は円形に変化し ている。Fig. 5(d), (e)は, アスペ クト角がそれぞれ15°, 21°の時の 結果で,大きなRCS値を示す部分 は両図ともに車の左角部に位置 し,アスペクト角によらずにほぼ 同一の位置にある。以上の結果か ら,特にアスペクト角が小さい場

合には,自動車後部のRCS像は比較的広い範囲に 広がることが明らかになった。また,RCS像にお ける大きなRCS値を示す部分は,その位置におけ る車両表面の法線方向が観測点方向に一致する部 分にほぼ等しくなることも分かった。

ここで, Fig. 5(a)の自動車後部部分のRCS像が横 方向に伸びる原因について考察する。合成開口レー ダによるRCS像がクロスレンジ方向に伸びる原因と しては主に次の2つが考えられる。

1) 正規反射が生じているため。

# Table 1Parameters for RCS image measurement of<br/>TOYOTA Majesta.

Number of Measurement frequencies (M)	100
Frequency interval	60MHz
Frequency band	57–63GHz
Number of measurement angular directions (N)	100
Angular direction interval	0.063degrees
Unambiguous range	2.48m
Range granularity	25.0mm
Unambiguous cross-range	2.29m
Cross-range granularity	23.1mm
Target distance	7.5m
Antenna height	0.78m



Fig. 5 RCS images of TOYOTA Majesta for several aspect angles. Contour interval = 5dB, minimum level = -20dBsm.

 2) 測定対象物を回転させて測定を行っている間, 電波を強く散乱する散乱点が観測点から見て ほぼ同じ位置に留まっているため。

Fig. 5(a)から, RCS像の中心はほぼ自動車のナン バープレートの位置である。従って,ナンバープ レートによって正規反射が生じていれば, RCS像 がクロスレンジ方向に伸びることになる。しかし ながら,実際に自動車のナンバープレートのRCS 値を測定した結果,文字の刻印の凹凸により正規 反射発生時に予想される30dBsm程度の大きなRCS 値をは観測されなかった。このことから,1)が原 因とは考え難い。次に2)の原因について考えてみ る。先に示したアスペクト角に対するRCS像の変 化の測定結果から,大きなRCS値を示す部分は, その位置における車両表面の法線方向が観測点方 向に一致する部分となることが分かっている。従 って,大きなRCS値を有する電波を強く散乱する 部分は,測定に伴う車両の回転によって車両上を 移動することになる。この様な移動は車両表面の 曲率に依存し,曲率が大きいほど移動量は小さく なる。従って,曲率が大きい場合には,電波を強 く散乱する部分は車両上をほとんど移動せず、観 測点から見たその部分の位置は車両の回転に伴っ て変化することになる。一方,曲率が小さい場合 には,電波を強く散乱する部分は車両上で移動す るものの、その移動方向は測定時の車両の回転方 向とは逆になる。そのため,観測点から見た電波 を強く散乱する部分の位置は,車両が回転しても ほとんど変化しない。Fig. 5(a)は,アスペクト角が 0°の場合であり,電波を強く散乱する部分の車両 表面の曲率は小さい。従って, Fig. 5(a)の場合には, 電波を強く散乱する散乱点の位置は測定中にほと んど変化していないと考えられる。

以上の考察から, Fig. 5(a)におけるRCS像のクロス レンジ方向の伸びは2)が原因であると結論される。

3.レーダ信号の推定

前章の結果を基に,自動車レーダの使用環境に 存在するターゲットや路側物を散乱点の集合で置 き換えることによって,レーダ信号の特性を推定 する手法を提案する。ここで,レーダ信号の特性 とはターゲットの移動による信号の変動及びその 平均強度の変化を意味する。ここで提案する手法 はこれらの特性の傾向を推定しようとするもので ある。その様な傾向を推定することは自動車レー ダの研究開発に大いに役立つと考えられる。

3.1 レーダ信号の推定手法の提案

Fig. 6は自動車レーダの使用環境の一例を示した ものである。そこには,複数台の先行する自動車 (先行車)及びガードレールや樹木などの路側物が 大地上に存在する。これらの中で先行車は最も重 要なターゲットである。1章で触れた様に,自動 車レーダの使用環境では,先行車との距離が近く なると車体の一部分に集中して電波が照射される ことになる。レーダ信号特性の推定においては, この様な自動車特有の現象を考慮することが不可 欠である。そこで,前章に示した様に測定によっ て得られた自動車のRCS像の測定結果に基づき, 自動車を複数の散乱点の集合で置き換えることに する。つまり, RCS像の極大点の位置及びその RCS値を散乱点の位置及びそのRCS値とすること で,自動車を散乱点の集合体で近似する。1つの物 体を複数の散乱点の集合体で表すことによって、 その一部に集中して電波が照射される現象が考慮 できると考えられる。さらに,この近似は自動車 レーダの使用環境に存在する様々な物体の影響を 考慮する際にも適用できる。

以上述べた様に,ターゲット等を散乱点の集合 体で近似することから,これらの散乱点からの散 乱波を重ね合わせることでレーダ信号が求められ る。Fig. 7はレーダアンテナから送信された電波の 伝搬経路を図示したものである。図中の*S<sub>ij</sub>はi*番目



Fig. 6 An example of environments where the car radar is used on a high way.

の物体のj番目の散乱点を表し,その散乱点はRCS 値 $\sigma_{ij}$ を有する。尚,この散乱点での位相変化は無 視する。送信アンテナと散乱点の間及び散乱点と 受信アンテナの間の主要な伝搬経路としては直接 の経路の他に路面反射を含む経路が存在する。こ こでは, $S_{ij}$ に対応する直接の及び路面反射を含む 経路をそれぞれ $r_{ij}$ 及び $r_{-ij}$ で表す。レーダ信号を求 めるためには往復の経路が考慮される必要がある ので,1つの散乱点につき4種類の経路,即ち $r_{ij}$ - $r_{ij}$ ,  $r_{ij}$ - $r_{-ij}$ , $r_{-ij}$ でが対象となる。ただし,経 路をさえぎる物体が存在する場合,その経路は除 かれることになる。すべての散乱点に対してこれ らの経路上を伝搬する電波が重ね合わされること によって,式(7)に示す様にレーダ信号の電圧Vrが 計算できる。

$$Vr = \left| \sum_{i} \sum_{j} \frac{\sqrt{P_{t}}}{4\pi} \left( \sqrt{G_{ij}} \frac{e^{-j\beta r_{ij}}}{r_{ij}} \delta_{ij} + \sqrt{G_{-ij}} \frac{e^{-j\beta r_{-ij}}}{r_{-ij}} \Gamma_{-ij} \delta_{-ij} \right)^{2} \sqrt{\sigma_{i,j}} \sqrt{\frac{Rr}{\pi}} \lambda \right|$$
(7)

ここで,  $P_i$ は送信電力,  $G_{ij}$ は $r_{ij}$ 方向のアンテナ利 得,  $R_i$ はアンテナの放射抵抗,  $\Gamma_{-ij}$ は伝搬経路 $r_{-ij}$ に 対応する路面の反射係数である。また,  $\lambda$ は電波の 波長であり,  $\beta$ は位相定数2 $\pi/\lambda$ である。さらに,  $\delta_{ij}$ は0または1の値をとり,それぞれその経路をさえ ぎる物体の有りまたは無しに対応している。この 様に,式(7)ではマルチパス発生の要因である路面 の影響及び自動車レーダのハードウェア特性が考 慮されていることになる。従って,提案手法では, レーダ信号の推定において自動車レーダの使用環 境及びハードウェア特性が考慮できる。またこの 手法において,自動車レーダの使用環境及びハー ドウェア特性の考慮は比較的容易である。



Fig. 7 Propagation paths between the antenna and a scattering point  $S_{ij}$ .  $S_{ij}$  is the *j*th scattering point on the *i*th object and has the RCS value of  $\sigma_{ij}$ .

3.2 レーダ信号推定手法の有効性の検討

レーダ信号の測定値を推定値と比較することに より,提案した推定手法の有効性を検討する。

Fig. 8は実験システムの構成を示したものであ る。実験において、送信信号として三角波で周波 数変調された信号を用いた。アンテナから送信さ れた信号はターゲットで散乱され再び受信される。 受信信号は送信信号とホモダイン検波後,低域フ ィルタに入力される。フィルタを通過した検波信 号はフーリエ変換によって周波数軸上で各ターゲ ットに対応する信号に分離され,その中から注目 したターゲットに対応する信号が抽出される。実 験に用いた周波数及びアンテナの3dBビーム幅は一 般的な自動車レーダの仕様に基づいて<sup>7)</sup>, 60GHz及 び2°とした。また,アンテナの地上高は0.8mとし た。ターゲットとして、トヨタのマジェスタ(全 長4.9m,全幅1.8m)を用いた。実験は舗装道路上 で行い,推定においてその路面は測定値に基づい て比誘電率2.5の誘電体で近似した。

Fig. 9は, レーダ及びターゲットの位置を表すた



Fig. 8 Schematic diagram of the experimental system. Beam width of the antenna and the frequency of the radio wave used in the experiment are 2 degrees and 60GHz, respectively.



Fig. 9 The coordinate for representing a position of a target. The origin is set at the position of the antenna in the experimental system.

めの座標系を示したものである。この座標系では, レーダアンテナの位置を原点とする。ここでは, ターゲットのレンジ方向の位置をy,クロスレンジ 方向の位置をxでそれぞれ表す。

ここでは,自動車レーダ使用環境で生ずる以下 の特徴的な場面を対象に推定結果と実験結果を比 較する。

- Case 1: レーダ搭載車の前方のターゲットがク ロスレンジ方向に移動する場合。
- Case 2: ターゲットが他のターゲットを遮蔽す る場合。
- 3.2.1 Case 1 に関する検討

Fig. 10はレーダ搭載車の前方のターゲットがク ロスレンジ方向に移動する場合の推定及び実験の 条件を示したものである。ターゲットの中心位置y は40mまたは20mで一定とする。yが40mの時には ターゲット全体に電波が照射されるが,yが20mの 時にはターゲットの一部に集中して照射される様 な現象が生ずる。このことから,特にyが20mの時 の結果に基づいて,1つのターゲットを複数の散乱 点の集合で近似している提案手法の妥当性が検証 できる。一方,アスペクト角の値は直線路及びカ ープ路を考慮して,0°または15°としている。

Fig. 11(a)はyが40m, θが0°の場合における, xに 対する信号電圧の相対値の変化を示したものであ る。ここで相対電圧は,ターゲットの中心位置に 0dBsmのRCS値を有する散乱点が存在する場合に 得られる信号電圧の値を基準として表している。 また,実線が推定値,四角の点が測定値である。 推定値及び測定値はxの変化に対して20dB程度変



Fig. 10 Conditions of the estimation and the measurement for the Case 1. The target shifts in the range direction in the case that y = 40m or 20m and  $\theta = 0$  degrees or 15 degrees.

ゲットがク 案手法が有効であると言える。
Fig. 11(b)はyが20m,θが0°の場合の比較結果を
トを遮蔽す 示したものである。ターゲットまでの距離が20m
の場合においても,40mの場合と同様に推定値は
測定値の傾向をよく表している。
ゲットがク Fig. 11(c)及び(d)はθが15°の場合において,yがそ
及び実験の れぞれ40m及び20mの比較結果を示したものであ
ヘーゲットが約めになった状態でも推定値と

る。ターゲットが斜めになった状態でも推定値と 測定値は良好な一致を示している。尚,θが15°の 場合の相対電圧は,0°の場合のそれに比べて10dB 程度低下している。これは,前章のFig.5に示され ている様に,自動車のRCS像における最大値がア スペクト角が増加するにつれて小さくなることに 起因している。

動している。この変動は複数の散乱点からの信号

が重なって受信されるために生ずる位相干渉によ

るものである。ここで提案している推定手法では,

ターゲット位置の移動に伴うレーダ信号の変動及

び平均信号強度の変化の傾向の推定を主目的にし

ている。このことから, Fig. 11(a)では推定値の傾

向は実験値のそれと比較的よく一致しており、提

以上の結果から,ターゲットの一部に集中して 電波が照射される状況においてもレーダ信号の特 性が良好に推定できることがわかる。このことか ら,ターゲットを複数の散乱点の集合体で近似す ることの妥当性が確認できる。

3.2.2 Case 2に関する検討

Fig. 12はターゲットが他のターゲットを遮蔽す る場合における推定及び実験の条件を示したもの である。ここでは,x=0及びy=40mの位置に設置 されたコーナリフレクタが自動車によって遮蔽さ れる。このリフレクタの地上高は0.8mであり,実 験システムのアンテナ高と同じである。遮蔽する 自動車の中心位置はy=30mまたは20mとする。こ こで,yが30mの時,コーナリフレクタに至る直接 及び大地反射を含むレイパスの両方が自動車で遮 断される。一方,yが20mの時,路面反射を含むパ スはちょうど自動車と路面の隙間を通過する。従 って,yが20mの時の比較結果から,提案手法にお ける路面の影響の考慮方法の妥当性が検証できる。

Fig. 13(a)はyが30mの場合において,自動車のクロスレンジ方向の位置xに対する信号電圧の相対値

の変化を示したものである。 実線及び四角がそれぞれ自動 車に対応する信号電圧の推定 値及び測定値を,一方破線及 び中抜きの四角がそれぞれリ フレクタに対応する推定値及 び測定置がx方向に移動する につれて,自動車に対応する 信号の強度が低下する傾向, 及びらの信号が現れる傾向が 良好に推定されている。

Fig. 13(b)はyが20mの場合の 比較結果を示したものであ る。この場合には,路面反射 を含むパスが遮断されないこ とから,xが小さい領域での リフレクタに対する測定値は y = 40mの場合のそれより大き くなっている。提案手法はこ の様な傾向及び信号電圧の値 も良好に推定できる。

以上の結果から,複数のタ ーゲットが存在する場合に生 ずる遮蔽及び路面の影響が提 案手法で良好に考慮されるこ とが確認できる。さらに, Case 2の検討においても自動 車のクロスレンジ方向に移動 により自動車の車体上の電波 照射領域が変わっており,複 数の散乱点でターゲットを置 き換えることの妥当性がCase 2の結果からも確認できる。

以上のことから,本章で示 した自動車レーダの使用環境 における特徴的な場面を対象 とした検討結果に基づき,こ こで提案した推定手法はレー ダ信号特性の推定に有効であ ると言える。





Fig. 12 Conditions of the estimation and the measurement for the Case 2. The target car shifts in the range direction in the case that y = 30m or 20m. the corner reflector is placed at the position where x = 0m and y = 40m.



Fig. 13 Comparison result between the estimated voltage and the measured one for the Case 2.

## 4.まとめ

ミリ波帯におけるレーダ信号の特性を推定でき る手法を提案した。この手法では,アンテナ指向 性,送信出力,受信感度などの自動車レーダの八 ードウェア特性を考慮することができる。また, ターゲットとの距離が短い場合にターゲットの一 部に電波が集中して照射される自動車レーダ特有 の現象を考慮することもできる。そのために提案 手法では、ターゲットを複数の散乱点の集合体で 近似している。つまり,測定されたターゲットの RCS像の極大点を散乱点とみなし,極大点の位置 及びそのRCS値に基づいて散乱点の位置及びRCS 値を決定している。この様な近似の基となる高精 度なターゲットのRCS像を得るため,逆合成開口 レーダの手法を改良した新しい測定法を導入した。 この測定法を用いることにより,近距離測定にお いても均一な感度でRCS像を得ることができ、さ らに,座標変換を行うことなく直線直交座標上に 像を直接生成することが可能となる。ここで提案 した測定法を用いて、ミリ波帯での様々なタイプ の自動車のRCS像を測定し,特にアスペクト角が 小さい場合には,自動車後部のRCS像は比較的広 い範囲に広がることを明らかにした。また, RCS 像における大きなRCS値を示す部分は,その位置 における車両表面の法線方向が観測点方向に一致 する部分にほぼ等しくなることも明らかにした。

さらに,提案したレーダ信号推定手法の有効性 を検討するため,自動車レーダの使用環境で生ず る特徴的な場面を対象として,提案手法による推 定結果と実験結果とを比較した。その結果,ター ゲットとの距離が近い状況でも良好な推定が実現 でき,ターゲットを複数の散乱点の集合体で近似 することの妥当性が確認できた。また,複数のタ ーゲットが存在する場合に生ずる遮蔽及び路面の 影響の考慮方法が妥当であることも確認できた。 以上の結果から,提案したレーダ信号推定手法が 自動車レーダの使用環境及びハードウェア特性を 考慮したレーダ信号の特性推定に有効であること が明らかになった。

今後,提案手法に基づいたレーダ信号の推定と その信号に基づく障害物検出のための信号処理を 統合することにより,任意の自動車レーダ使用環 境での障害物検出特性推定のためのシミュレータ の開発を進めていく。さらに,実環境でのこのシ ミュレータの有効性を検討していく予定である。

#### 謝辞

日頃,御討議頂くトヨタ自動車の関係各位に深 謝致します。

## 参考文献

- Fujimura, K. : "Current Status and Trend of Millimeter-Wave Automotive Radar," MWE'95 Microwave Workshop Digest, (1995), 225
- Meinel, H. H. : "Commercial Applications of Millimeter Waves History, Present status, and Future Trends," IEEE Trans. Microwave Theory Techn., 43-7(1995), 1639
- 3) Huizing, A. G. and Theil, A. : CARPET (Computer-Aided Radar Performance Evaluation Tool), (1993), Artech House
- 4) Barton, D. K. and Barton, W. F. : Modern Radar System Analysis Software, (1993), Artech House
- 5) Mensa, D. L. : High Resolution Radar Cross-Section Imaging, (1991), Artech House
- Harris, F. J.: "On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform", Proc. of IEEE, 66-1(1978), 51
- Yamada, Y., Tokoro, S. and Fujita, Y. : "Development of a 60GHz Radar for Rear-end Collision Avoidance," (1994), 207, Proc. Intelligent Vehicles '94, Paris, France, 1

著者紹介





浅野孔一 Yoshikazu Asano
生年:1957年。
所属:情報通信研究室。
分野:電波センシング分野の研究・開発。
学会等:電子情報通信学会会員。



西川訓利 Kunitoshi Nishikawa 生年:1953年。 所属:情報通信研究室。 分野:移動体通信および電磁界解析分野 の研究・開発。 学会等:電子情報通信学会会員。

1984年IEEE-VTS論文賞受賞。 工学博士。