

RCS 測定のための正確な校正方法の検討

A Study on Accurate Calibration for RCS Measurements

電気電子情報通信工学専攻 曲谷 慧

Satoshi MAGATANI

1. まえがき

レーダ (RADio Detection And Ranging:RADAR) とは、電波を遠方にある物体に照射してその散乱波を受信し、解析することにより、電波の照射部からその物体までの距離と方位及び動きを測る電波探知装置である [1]。照射する電波にはパルスを用い、電波の照射から受信までの時間を測定することで距離を測り、アンテナビームの方向から方位を知る。また、レーダは暗闇や雨といった視界が不明瞭な状況においても影響を受けることなく、肉眼では認識が困難な遠方のターゲットを識別することができる。このようにレーダは人間の眼では物体を認識することが困難な状況下において、ターゲットの位置や方向を検出し、記憶し人間の眼で見る能力を著しく増大させる装置である。一方でレーダは肉眼に比べて細かな識別能力において劣るという短所がある、例えば、肉眼では、小さな船や飛行機などを見つけて認識することができるが、レーダではこのようなターゲットは粗い点としか映らない [2]。上述のように現在のレーダ技術ではターゲットを検出して、距離や方位、移動速度を測定することが可能であるがその形状までは認識することができない。そこで、レーダを利用してターゲットの具体的な形状を認識する方法が必要であると考えられる。この方法が確立すれば、多くのセンシング技術への応用が期待される。

こうした背景をもとに、物体からの電磁波散乱量を示すレーダ散乱断面積 (Radar Cross Section : RCS) を用いて、物体の特徴を認識する方法が検討されている。しかし、物体に対する校正が正しく行われていなければ、良い測定結果を得られない。こうしたことから正確な校正方法について研究し、校正の精度を上げることで、より正確な測定結果を得ることができる。これまでに校正の精度の向上のために IF 帯域幅を 100Hz 以下に低減することによって、ネットワークアナライザのダイナミックレンジを大きくすることによってノイズを低減させられることが分かっている [3]。

本研究では、RCS 測定のための正確な校正方法の検討を行う。検討方法として、校正式の各要素に対し、複数回

の測定を行い、実部、虚部、大きさの標準偏差のばらつき傾向を示す。さらに測定結果の平均値を用いてノイズの低減を行い、どのようにに平均値を用いたら効果的かの検討を行う。また、平均値を用いた測定結果と厳密解の RCS 値、実部、虚部を比較して検討し、考察を行う。

2. 測定概要

2.1 電波暗室での測定

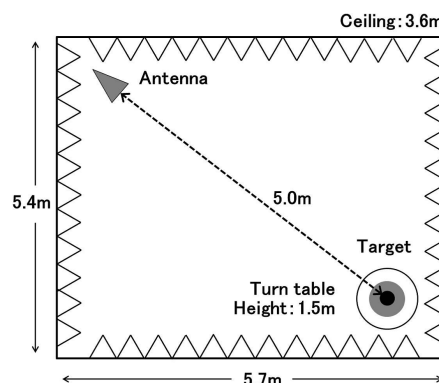


図 1: 電波暗室の構造

本節では文献 [4] を参照する。本研究室では RCS の測定に電波暗室を使用している。図 1 は、その電波暗室の構造である。幅 5.4 m、奥行き 5.7 m、高さ 3.6 m のシールドルームに、ピラミッド形状の電磁波吸収材量を装着しており、室内の壁や天井などからの不要反射波を抑制している。測定試料は試料近傍からの不要な反射波を抑えるため、発泡スチロールのみによって保持されている。また、送受信アンテナの配置から水平偏波に比べて垂直偏波の方がアイソレーションエラーが大きいことが分かっているため、測定には水平偏波を使用している。本研究ではネットワークアナライザを用いて目標物を測定する。

2.2 RCS 校正について

RCS 測定は、レーダ散乱断面積 (RCS) の単位の基準として 1 m^2 を使ったデシベル表記 dBsm を用いる。

RCS 校正とは、RCS 値を用いた形状認識測定を行う際に行う校正方法である。測定した値を校正するための方程式は

$$\text{Cal.RCS} = \frac{TGT_{test}(f) - BKG_{test}(f)}{TGT_{ref}(f) - BKG_{ref}(f)} \times \text{THEOR}(f) \times \left[\frac{R_{test}}{R_{ref}} \right]^2 \quad (1)$$

と表される。ここで各パラメータを以下に示す。

- ・ TGT_{test} はターゲットからの校正していない受信電圧データ
- ・ BKG_{test} はターゲットを除いたバックグラウンド受信電圧データ
- ・ TGT_{ref} は基準となる校正用ターゲット (球等) の受信電圧データ
- ・ BKG_{ref} は校正用ターゲットを除いたバックグラウンド受信データ,
- ・ THEOR は校正用ターゲットの理論 RCS 値 (電圧値)
- ・ R_{test} はターゲット散乱の位相中心までの距離
- ・ R_{ref} は校正用ターゲットの位相中心の距離

本暗室での測定において、測定の際に、同様な条件で校正をとるので $RKG_{test} \sim BKG_{ref}$, $R_{test} \sim R_{ref}$ とすると式 (1) は、

$$\text{Cal.RCS} = \frac{TGT_{test}(f) - BKG}{TGT_{ref}(f) - BKG} \times \text{THEOR}(f) \quad (2)$$

となり、球を校正物として用いた場合

$$\text{THEOR}(f) = \sigma_v \quad (3)$$

となる [3]。

また、以下に本論文に用いる変数の説明を行う。
 b_n は物体を置かずに測定を行った n 番目のデータ
 \bar{b} は物体を置かずに測定を行った n 個のデータの平均値
 t_n は導体球を置いて測定を行った n 番目のデータ
 \bar{t} は導体球を置いて測定を行った n 個のデータの平均値
 $n=1,2,\dots,150$

3. 校正の誤差を減らす方法

3.1 データの平均化

ノイズの低減方法として用いるデータの平均化について説明を行う。データの平均化においては、測定されたデータを N 個足し合わせ、その個数 N で割ることで求める。平均化をするとなぜ標準偏差が減るかについての説

明をする。ネットワークアナライザの仕様として測定された N 個分のデータの平均値を用いることによって、ノイズフロアが $10\log N$ dB 下がるという関係がある。ノイズフロアが高い場合、もし測定対象から帰ってくる信号が微弱な場合、ノイズフロアを下回ってしまい、検出できなくなる恐れがある。これらのことからノイズフロアを低くすることによって校正の精度の向上が期待される。

3.2 データの平均化の使い方

本研究室において校正に用いられているのは式 (2) である。どの要素に平均化した値を用いたら効果的かの検証のために、はじめに \bar{b} を用いて、 $t_n - \bar{b} = d_n$ の測定結果を $t_n - b_n = c_n$ の測定結果と比較する。その後 \bar{t} を用いて、 $\bar{t} - b_n = e_n$ の測定結果と c_n に比較を行う。測定結果の評価方法として、標準偏差を用いる。また、測定結果は、実部、虚部、大きさの標準偏差を示し、全ての測定の標本数は 150 個である。

3.3 測定結果の比較

c_n と d_n の実部、虚部、大きさの標準偏差の比較結果を図 2～図 4 に示し、 c_n と e_n の実部、虚部、大きさの標準偏差の比較結果を図 5～図 7 に示す。

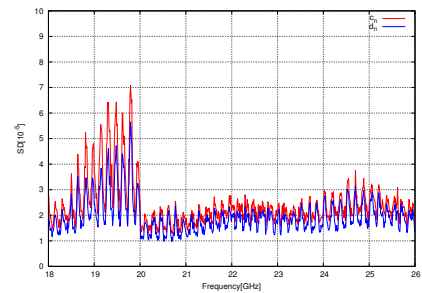


図 2: 実部の標準偏差の比較

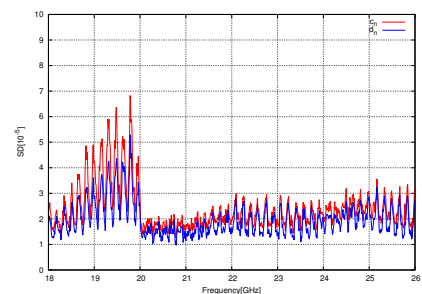


図 3: 虚部の標準偏差の比較

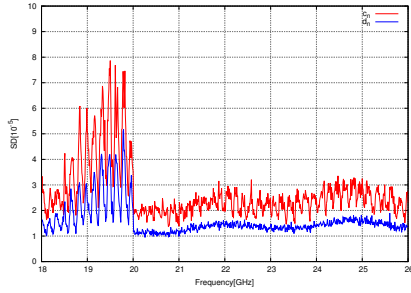


図 4: 大きさの標準偏差の比較

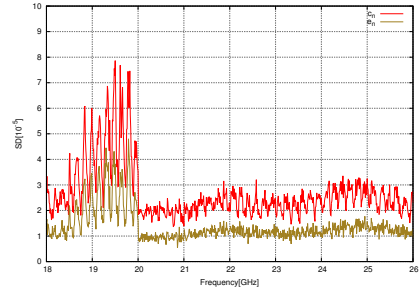


図 7: 大きさの標準偏差の比較

図 2 は実部における標準偏差の比較結果である。18～20 GHz にかけて平均値を用いた場合と用いていない場合の両方に大きな値が出ている。その後 20～26 GHz にかけては一定の標準偏差の値を示している。全ての周波数帯域において平均値を用いた方が標準偏差の値が小さくなっていることがわかる。図 3 は虚部における標準偏差の比較結果である。各周波数帯において実部と同様の傾向が示されている。こちらも平均値を用いた方が標準偏差の値が小さくなっていることがわかる。図 4 は大きさにおける標準偏差の比較結果である。20～26 GHz にかけて実部、虚部より標準偏差の値が小さくなっている。

小さくなっており、20～26 GHz にかけてもグラフがはっきり分かれているのがわかるほど、標準偏差が小さくなっている。図 6 の虚部と図 7 の大きさの測定結果の比較においても各周波数帯において実部と同じ傾向が見られる。

図 2～図 4 と図 5～図 7 の実部、虚部、大きさの標準偏差を見比べると \bar{t} を用いた方が \bar{b} を用いた場合より標準偏差の値が小さいことが分かる。

3.4 厳密解との比較

前節より、平均値を用いることにより、より精度の高い校正が行え、厳密解に近い測定結果が期待される。厳密解と各要素の平均値を用いた RCS 値、実部、虚部の結果の比較を行う。また、比較に用いる式は以下のとおりである。

$$\text{厳密解} = \text{THEOR}(f), \quad (4)$$

$$\text{RCS}(1) = \frac{t_1 - \bar{b}}{t_n - \bar{b}} \times \text{THEOR}(f), \quad (5)$$

$$\text{RCS}(2) = \frac{t_n - b_n}{\bar{t} - b_n} \times \text{THEOR}(f), \quad (6)$$

$$\text{RCS}(3) = \frac{t_n - \bar{b}}{\bar{t} - \bar{b}} \times \text{THEOR}(f). \quad (7)$$

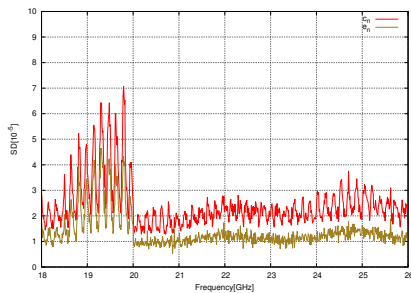


図 5: 実部の標準偏差の比較

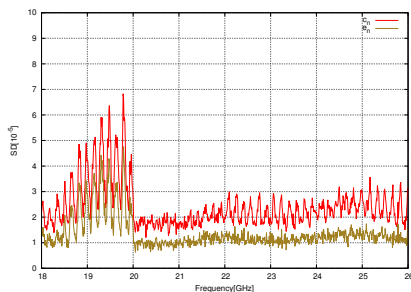


図 6: 虚部の標準偏差の比較

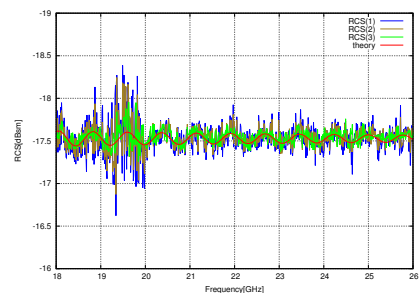


図 8: RCS 値の比較

図 5 は実部における標準偏差の比較結果である。18～20 GHz にかけて平均値を用いた場合、標準偏差が大幅に

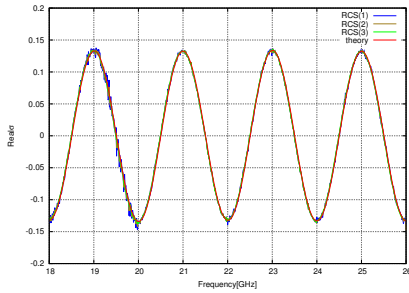


図 9: 実部の比較

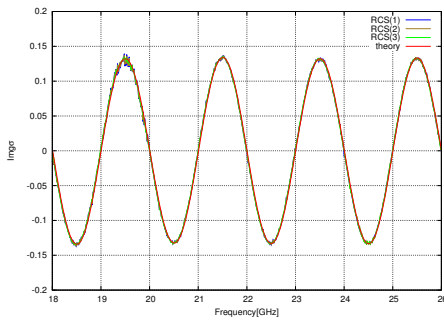


図 10: 虚部の比較

図 8 を見てみると \bar{t} と \bar{b} を用いた RCS(3) が最も厳密解に近い値となっている。 \bar{b} のみを用いた RCS(1) と \bar{t} のみを用いた RCS(2) は前節での標準偏差の値が小さい \bar{t} のみを用いた RCS(2) の方が厳密解と近い値を示している。

図 9 と図 10 は実部と虚部を厳密解と比較したものであるが、実部においては 19~20 GHz において厳密解とずれていることが分かる。また虚部においては 19.5 GHz 付近において厳密解とのずれが確認できる。また、厳密解とどの程度値が異なっているかの確認のために RCS 値において 18~26 GHz において 1 GHz 刻みで厳密解との差の標準偏差を示す。RCS 値の標準偏差の票を見てみると全ての周波数帯において標準偏差の値が $\text{RCS}(3) < \text{RCS}(2) < \text{RCS}(1)$ の関係となっていることが分かる。

4. 結論と今後の課題

本論文ではより正確な校正を行うために、標準偏差を用いて測定結果を評価した。また、標準偏差の値を小さくする方法として各要素の値を平均化して用いることを提案をした。次に \bar{b} と \bar{t} を用いてどちらが標準偏差の値を小さくするかを調べた。 \bar{t} を用いた場合の方が標準偏差の値が小さいと分かったが、18G~20GHz にかけての標準偏差の値が大きかったため、 \bar{b} と \bar{t} の両方を用いた方が良

表 1: RCS 値の標準偏差

周波数帯域	RCS(1)	RCS(2)	RCS(3)
18~19 GHz	0.167	0.119	0.047
19~20 GHz	0.368	0.267	0.110
20~21 GHz	0.089	0.079	0.046
21~22 GHz	0.114	0.083	0.038
22~23 GHz	0.100	0.074	0.038
23~24 GHz	0.111	0.084	0.038
24~25 GHz	0.103	0.079	0.043
25~26 GHz	0.112	0.074	0.043
18~26 GHz	0.170	0.125	0.056

いことが分かった。 \bar{b} のみを用いた場合と \bar{t} のみを用いた場合と \bar{b} と \bar{t} の両方を用いた場合と厳密解の RCS 値、実部、虚部の比較することで、全ての要素の平均値を用いた場合が最も厳密解に近い値となることが分かった。また、RCS 値の標準偏差を示すことによって全ての周波数帯でどの方法を用いた場合が厳密解と近い値をとっているかが鮮明に分かった。

今後の課題としては 18~20 GHz にかけて他の周波数と比べて大きな標準偏差が確認できたのでその原因を究明する必要がある。また、各校正要素に対してどの程度の回数を測定し平均値を用いた方が良いか検討する必要がある。測定回数を増やすことで精度が上がる一方、測定時間も増加していくので適切な測定回数を見つけることが望まれる。

参考文献

- [1] 吉田 孝:「改訂レーダ技術」, 電子情報通信学会, 1996.
- [2] 関根 松夫:「レーダ信号処理技術」, 電子情報通信学会, 1992.
- [3] 森田 圭介:「RCS 測定のための散乱応答解析」, 中央大学大学院理工学研究科, 修士論文, 2007.
- [4] 石川 正行:「時間領域における RCS 値を用いた凹面を含む柱状散乱体の散乱解析」, 中央大学大学院理工学研究科, 修士論文, 2001.