《論　文》

論 22-3

LIN/CFARによるレーダクラッタ抑圧のためのシミュレーション†

金　斗澈*・佐山周次*・関根松夫*

ABSTRACT　We have observed Rayleigh distributed sea clutter by using a millimeter wave (MMW) radar. In a radar system, it is well known that the conventional LIN/CFAR techniques are effective for Rayleigh clutter. To apply these techniques to practical radar system, we considered three types of LIN/CFAR circuits including CFAR normalized by mean, root mean square and third root mean cube. The false alarm probability P_{fa}, the detection probability P_d, and the CFAR loss were calculated by a Monte Carlo Simulation on a computer for a finite number of sample. And we use a LIN/CFAR normalized by mean, root mean square and third root mean cube to process the MMW radar image. The LIN/CFAR normalized by mean, root mean square and third root mean cube can increase their target-to-clutter ratio more than 1.9db. In the processed image, we able to detect the radar target easily by sea clutter suppression. It is concluded that the LIN/CFAR normalized by square mean root is superior to others for radar target detection.

1.　はじめに

レーダ反射信号の中にはターゲット(船舶や航空機などの目標物からの反射波)のほかに様々なクラッタ(地表面，海面，雨雲などからの反射波)が含まれている．地表面からの反射波をグランドクラッタ，海面からの反射波をシークラッタ，雨雲からの反射波をウェザークラッタと言う．これらを抑圧し，クラッタに埋もれている船舶や航空機を検出するためにこれまで様々なCFAR(Constant False Alarm Rate)回路が考案されてきた[1]．CFAR回路は対数増幅器を用いる非線形なLOG/CFAR回路[2]と線形回路のみのLIN/CFAR回路[3]に分類される．これらのCFAR処理により，入力クラッタの振幅波高分布がレイリー分布に従うときには出力の誤警報確率が一定となりCFAR特性が得られる．LOG/CFARでは，受信信号を対数増幅器(Logarithmic amplifier)に通過させることにより，反射強度の強い信号を圧縮することができる．LIN/CFARはダイナミックレンジの広い信号の場合，受信機の制約を受けて飽和してしまうため，利用が限られてきた．しかしながら，近年広いレンジをもつ受信機が登場したことによりLIN/CFARの採用も可能となっている．従来の研究においてLOG/CFAR回路とLIN/CFARのパフォーマンスの比較が報告されており，平均値の規格化によるLIN/CFAR回路は検出確率，誤警報確率，CFAR損失の点でLOG/CFARより優れた特性をもつことが明らかとなっている[4]．本研究では，LIN/CFARの特性を更に詳細に考察するためLIN/CFAR回路として考えられる<平均値の規格化によるCFAR>[4]の他に更に<二乗平均値の平方根の規格化によるCFAR>，<三乗平均値の三乗根の規格化によるCFAR>の二つを取り上げ，各CFAR回路の誤警報確率，検出確率，CFAR損失等のパフォーマンスの比較を数値計算により行った．その結果<二乗平均値の平方根の規格化によるCFAR>が最も優れている結果が得られた．更に，実際にミリ波(Millimeter wave：MMW)レーダにより観測されたレイリー分布に従う海面クラッタのレーダ画像にそれぞれのCFAR処理を適用し，クラッタ抑圧の効果を検討した．

Simulation for Suppression of Radar clutter by LIN/CFAR. By *Kim Doochul*, *Shuji Sayama* and *Matsuo Sekine* (National Defence Academy).
* 防衛大学校
† 2002年7月19日受付　2002年10月17日再受付

2.　クラッタ抑圧の解析的過程

2.1　レイリー分布

本研究ではレイリー分布に従うことが知られているシークラッタを対象とした．レイリー分布は式(1)の確率密度関数で与えられる．σは分布の広がりに影響を与えるスケールパラメータである．

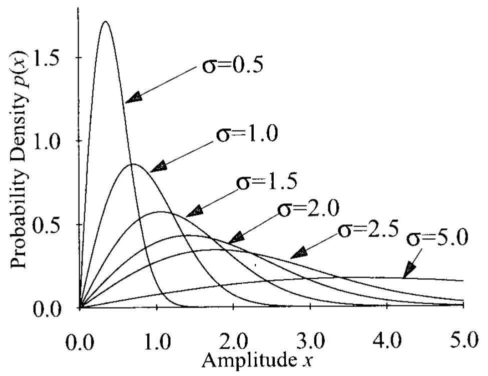


図1　レイリー確率密度分布

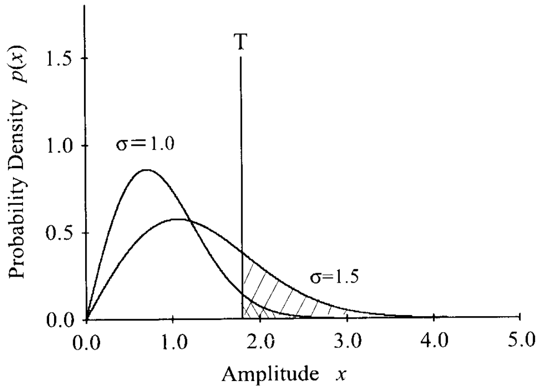


図2　レイリー確率密度関数と誤警報確率

$$p(x)=\frac{2x}{\sigma^2}\exp\left[-\frac{x^2}{\sigma^2}\right] \tag{1}$$

2.2 誤警報確率と検出確率

レーダターゲットの判定法としてThreshold Detection方式が挙げられる．これは，レーダからの反射信号が設定したしきい値を超えるか否かを判別するものである．ターゲットからの反射信号がしきい値を超える確率を検出確率(Detection Probability)と言い，クラッタからの反射信号が同様にしきい値を超え誤警報となる確率を誤警報確率(False Alarm Probability)と言う．

図2には$\sigma=1, 1.5$の場合のレイリー分布が示してあり，レイリークラッタの誤警報確率は，$x=T$とx軸及び確率密度関数の曲線で囲まれた面積で表せる．両者は本質的に相反する関係にあり，検出確率を高めるためしきい値を低く設定すれば誤警報確率も高くなる．レーダシステム設計の際，レーダの性能を評価するために誤警報確率と検出確率の関係を定量的に導出しておくことは重要である．

2.3 LIN/CFAR回路

レイリークラッタを想定したとき，しきい値Tにおける誤警報確率は次式で与えられる．

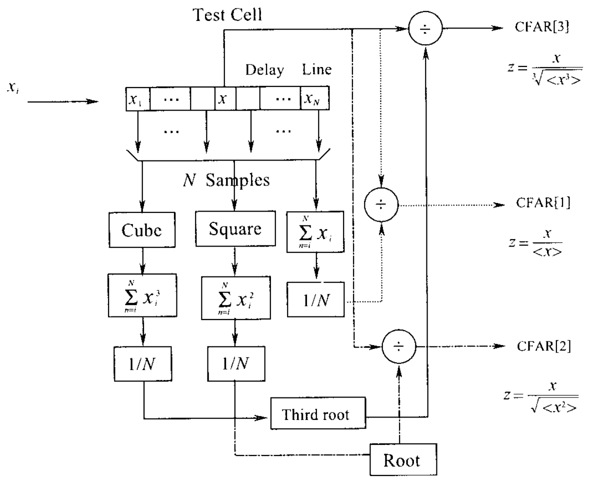


図3　CFAR[1][2][3]の処理回路

$$p_{fa}=\int_T^\infty p(x)\,dx=\exp\left[\frac{T^2}{\sigma^2}\right] \tag{2}$$

式(2)から明らかなように誤警報確率は分布のパラメータσに依存する．この依存性を排除し，しきい値を固定した場合でも，任意のσに対して常に一定の誤警報確率を得るようにするための回路がCFAR回路である．我々はレイリー分布に従うクラッタを抑圧ために次のLIN/CFAR処理を考えた．

i）CFAR[1];平均値の規格化によるCFAR

ii）CFAR[2];二乗平均値の平方根の規格化によるCFAR

iii）CFAR[3];三乗平均値の三乗根の規格化によるCFAR

図3はCFAR[1], CFAR[2], CFAR[3]の処理をブロック図で示したものである．

レイリークラッタのサンプル数が無限個の場合は，例えば$\lim_{N\to\infty}\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}x_i$は(1)式のレイリー分布に対する平均値

$$\langle x\rangle=\int_0^\infty xp(x)\,dx=\frac{\sqrt{\pi}}{2}\sigma \tag{3}$$

と一致する．同様に$\lim_{N\to\infty}\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}x_i^2$は2乗平均値

$$\langle x^2\rangle=\int_0^\infty x^2p(x)\,dx=\sigma^2 \tag{4}$$

と一致する．

これから分散は$N=\infty$，すなわち理論は

$$V(x)=\langle x^2\rangle-\langle x\rangle^2=\left(1-\frac{\pi}{4}\right)\sigma^2 \tag{5}$$

となる．このようにある信号xの周りの分散は分布のパラメータに依存し，一定でないことが確かめられる．

信号のサンプル数が無限個の場合はCFAR化の過程を解析的に求めることができる．以下にCFAR[3]においてレイリークラッタが抑圧されていく過程を示す．

出力zに関する確率密度関数$p(z)$は次のように得られる．

$$p(z)=2\left(\frac{3}{4}\sqrt{\pi}\right)^{\frac{2}{3}}z\exp\left[-\left(\frac{3}{4}\sqrt{\pi}\right)^{\frac{2}{3}}z^2\right] \tag{6}$$

したがって，出力zの平均値$\langle z\rangle$，2乗平均値$\langle z^2\rangle$，分散$V(z)$は

$$\langle z\rangle=\sqrt{\pi}/2\left(\frac{3}{4}\sqrt{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{7}$$

$$\langle z^2\rangle=1/\left(\frac{3}{4}\sqrt{\pi}\right)^{\frac{2}{3}} \tag{8}$$

$$V(z)=\langle z^2\rangle-\langle z\rangle^2\approx 0.1775 \tag{9}$$

となりパラメータσに依存しない一定の分散が得られる．しきい値をTに設定すると，CFAR処理後の誤警報確率p_{fa}は，

$$p_{fa}=\int_T^{\infty}p(z)\,dz=\exp\left[-\left(\frac{3}{4}\sqrt{\pi}\right)^{\frac{2}{3}}\times T^2\right] \tag{10}$$

で与えられ，パラメータに無関係に一定となる．すなわち，CFAR特性が得られる．

次に検出確率について考える．定常で一様なクラッタxの中に，ゆらいでいない1点のターゲットsが埋もれている状態を仮定する．ターゲットはsingle-hitに相当し，ただ1つの反射信号を返す．反射信号の振幅は，クラッタの振幅xとターゲットの振幅sの和で与えられ，CFAR処理後の出力z_sは次のように表せる．

$$z_s=\frac{x+s}{\sqrt{1-\pi/4}\sigma} \tag{11}$$

ターゲットを含む場合の確率密度関数$p(z_s)$は

$$p(z_s)=2\left(Kz_s-\frac{s}{\sigma}\right)\exp\left[-\left(Kz_s-\frac{s}{\sigma}\right)^2\right]K \tag{12}$$

なお　$K=\sigma\left(\frac{3}{4}\sqrt{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}$

したがって，検出確率p_Dは

$$p_D=\int_T^{\infty}p(z_s)=\exp\left[-\left(\sigma\left(\frac{3}{4}\sqrt{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}T-\frac{s}{\sigma}\right)^2\right] \tag{13}$$

また，T/C比(Target to Clutter Ratio)について

$$T/C=10\log\frac{s^2}{\langle x^2\rangle}=10\log\frac{s^2}{\sigma^2} \tag{14}$$

と定義すると式(10)，(14)から

$$T=\frac{1}{(3/4\sqrt{\pi})^{1/3}}\sqrt{-\ln p_{fa}},\quad \frac{s}{\sigma}=10^{(T/C)/20} \tag{15}$$

これを式(13)に代入すると，次のように検出確率p_D，誤警報確率p_{fa}，しきい値Tの関係式を導くことができる．

$$p_D=\exp\left[-\left(\sqrt{\ln p_{fa}}-10^{\frac{T/C}{20}}\right)^2\right] \tag{16}$$

以上のとおり，CFAR[3]について考察したが，同様の手順でCFAR[2]，CFAR[1]についても諸式が導出されるCFAR[1]においては

$$V(z)=\langle z^2\rangle-\langle z\rangle^2=\frac{\pi}{4}-1 \tag{17}$$

$$p(z)=\frac{\pi z}{2}\exp\left[-\frac{\pi z^2}{4}\right] \tag{18}$$

$$p(z_s)=\frac{\pi s z_s}{2\sigma}\exp\left[-\left(\frac{\sqrt{\pi}z_s}{2}-\frac{s}{\sigma}\right)\right] \tag{19}$$

$$p_{fa}=\exp\left[-\frac{\pi T^2}{4}\right] \tag{20}$$

CFAR[2]においては

$$V(z)=\langle z^2\rangle-\langle z\rangle^2=1-\frac{\pi}{4} \tag{21}$$

$$p(z)=2z\exp\left[-z^2\right] \tag{22}$$

$$p(z_s)=2\left(z_s-\frac{s}{\sigma}\right)\exp\left[-\left(z_s-\frac{s}{\sigma}\right)^2\right] \tag{23}$$

$$p_{fa}=\exp\left[-T^2\right] \tag{24}$$

がサンプル数$N=\infty$の場合の理論値として与えられる．

CFAR[1]，CFAR[2]による検出確率は一定の誤警報確率，T/C比のもとでCFAR[3]による検出確率と一致する．

3. 数値計算によるCFAR回路のパフォーマンス評価

サンプル数Nが無限個の場合は，前述した諸式のように解析解を求めるのは容易である．しかし，サンプル数は乱数を発生させて求めるのでサンプル周期とは無関係で有限個の場合は有意な近似解を求めることは非常に困難である．そこで，本研究では一様乱数列を用い十分な長さをもったレイリークラッタを発生させ，シミュレーションを行なった．レイリー分布において，クラッタ信号が0からxまでの値をとる累積確率をξとすると，

$$\xi=\int_0^{\infty}\frac{2x}{\sigma^2}\exp\left[-\frac{2x}{\sigma^2}\right]dx=1-\exp\left[-\frac{x^2}{\sigma^2}\right]\quad(0<\xi<1)$$

$$\xi'=\exp\left[-\frac{x^2}{\sigma^2}\right]\quad(0<\xi'<1) \tag{25}$$

より，

$$x=\sigma\sqrt{-\ln\xi'} \tag{26}$$

で与えられる．したがって，一様乱数列ξを用いることにより，レイリークラッタxを発生させることができる．

3.1 誤警報確率と検出確率の計算

サンプル数が無限大の場合の各CFAR回路における誤警報確率p_{fa}，検出確率p_Dについて述べた．実際の回路(図3)では，無限大の遅延線を構成することは不可

能であるので，有限個のサンプルで平均を求めることになる．xをテストセルとし，テストセルの前後それぞれ$N/2$個のセル，計N個をリファレンスセルの平均値$\langle x\rangle$，2乗平均値の平方根$\sqrt{<x^2>}$，3乗平均値の三乗根$\sqrt[3]{<x^3>}$を計算し，テストセルをそれぞれ規格化する．誤警報確率を10^{-6}程度まで求めるために，処理時間や精度を考慮してクラッタのデータ数は1.0×10^7個とした．レイリークラッタをしきい値Tの値を代えながら，CFAR[1][2][3]回路で処理し，誤警報確率を計算した．CFAR回路のサンプル数は，$N=2, 4, 8, 16, 32$とし，$N=\infty$のときの解析解を理論値として比較した．レイリークラッタのスケールパラメータは$\sigma=10$とした．検出確率は10^{-3}程度まで求めるために，データ数を10^5個とし，サンプル数は誤警報確率を求めたときと同様に$N=2, 4, 8, 16, 32$とした．パラメータも同じである．検出確率はT/C比に依存する．T/C比を変化させるためにSingle-hitターゲットの振幅sを変化させた．

ターゲットは遅延線の中央であるテストセルの位置に添加し，時系列に沿って順次シフトされる．誤警報確率を10^{-1},10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}, 10^{-6}に固定したときの検出確率を求めるため，しきい値－誤警報確率のグラフより決定したしきい値を用いる．サンプル数が無限大のときの検出確率を式(16)から求め，理論値として比較した．同一の誤警報確率で固定した場合，検出確率が最も高いのはCFAR[2]である．

3.2 CFAR損失

サンプル数Nの標本平均を用いると，Nの値によってCFAR回路の出力zの分散が変化し，Nが小さいほど分散が大きくなる．したがって，無限個サンプルの場合と同じしきい値を用いると誤警報確率は高くなる．同じ誤警報確率を得るためには，しきい値を高くしなければならず，検出確率の低下を生じる．これが有限個サンプルによるCFAR回路のCFAR損失である．誤警報確率を一定にした場合，T/C比が大きくなると検出確率は高くなるので，有限個サンプル時に無限個サンプルと同じ検出確率を得るには，T/C比が大きくならなければならない．この同じ検出確率を得るための無限個サンプルと有限個サンプルのT/C比の差をCFAR損失と定義した．

$$\text{CFAR損失} = T/C_{N=\text{有限}} - T/C_{N=\text{無限}}$$
$$(p_{fa}=const, p_D=const.) \qquad (27)$$

3.3 シミュレーションの結果と考察

CFAR[1]，CFAR[2]，CFAR[3]のアルゴリズムで処理を行った場合の誤警報確率p_{fa}としきい値Tの関係をそれぞれ図4, 5, 6に示す．いずれのサンプル数でも一定のしきい値で比較した場合は，CFAR[3], CFAR[2], CFAR[1]の順で誤警報確率が低いことが確かめられた．

誤警報確率$p_{fa}=10^{-3}$における検出確率とT/C比の関係を図7, 8, 9に示す．いずれの場合も，サンプル数$N=32$で理論値に近い検出確率が得られている．より低いT/C比でターゲットを検出できるのはCFAR[2]であり，次いでCFAR[3]となる．式(27)で定義したCFAR損失をそれぞれの誤警報確率で求めたものが図10, 11, 12である．CFAR損失が最も少ないのは，CFAR[2]である．

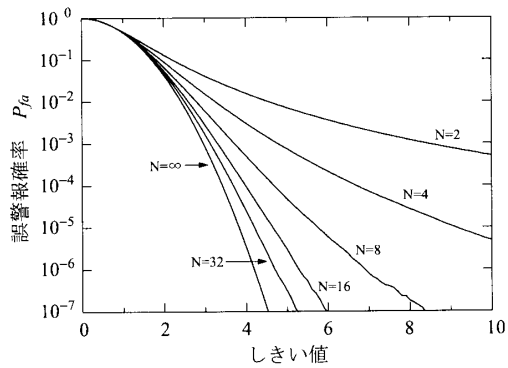


図4　CFAR[1]回路の誤警報確率

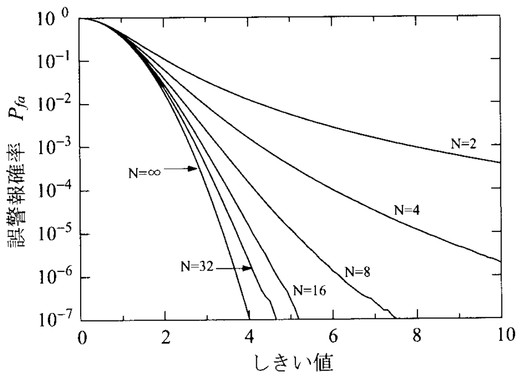


図5　CFAR[2]回路の誤警報確率

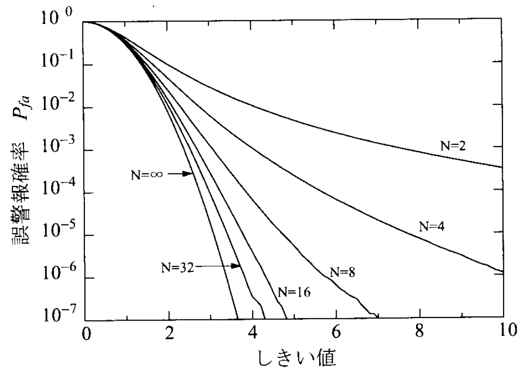


図6　CFAR[3]回路の誤警報確率

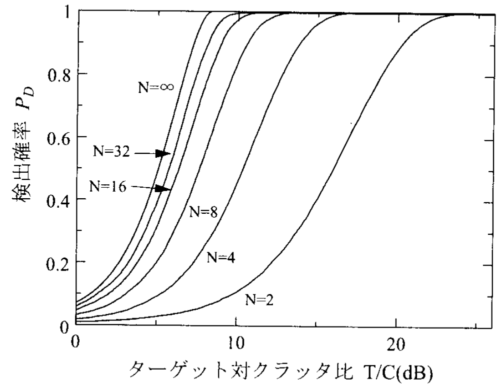


図7　CFAR[1] 回路の検出確率（誤警報確率：10^{-3}）

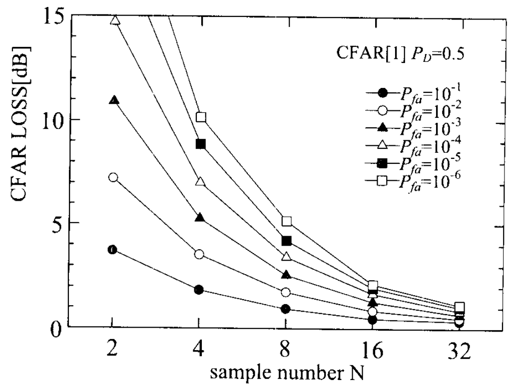


図10　CFAR[1] 回路の CFAR 損失

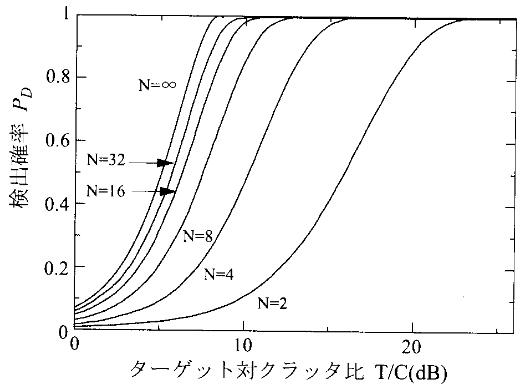


図8　CFAR[2] 回路の検出確率（誤警報確率：10^{-3}）

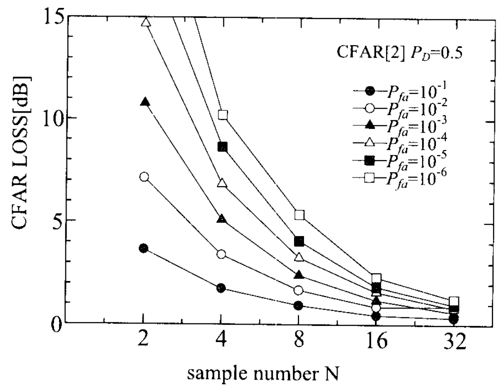


図11　CFAR[2] 回路の CFAR 損失

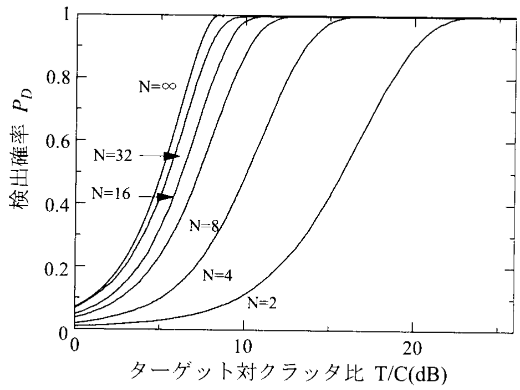


図9　CFAR[3] 回路の検出確率（誤警報確率：10^{-3}）

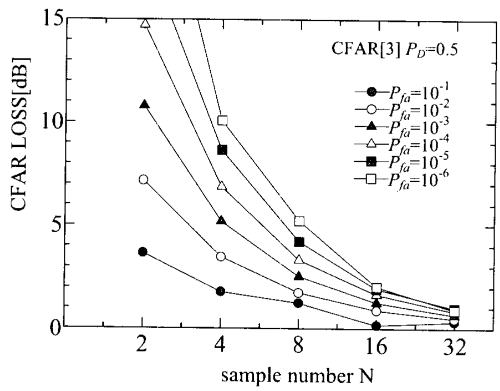


図12　CFAR[3] 回路の CFAR 損失

4.　レーダ画像

4.1　ミリ波（MMW）レーダによる海面クラッタ抑圧

ミリ波レーダ（送信周波数34.86GHz）により観測されたターゲットを含むシークラッタのレーダ画像をCFAR[1][2][3]のアルゴリズムで処理し，クラッタ抑圧の効果と *T/C* 比の向上効果を検討した．

図14(a)に示すレーダ画像は横須賀市追浜の海面を航行する大型の自動車運搬船を観測したものであり，アジマス方向に62.2～76.0 deg．レンジ方向に0.2～2.12 kmの範囲をもつそれぞれの256 pix，計65536 pixで構成され振幅強度（最大256階調）はアジマス方向につないで波状の線で表現されている．海面の観測に使用したミリ波レーダの諸元は**表1**のとおりである．観測レーダ中の海面クラッタは**図13**に示すように

$\sigma = 90.3$ の Rayleigh 分布に近いことが分布推定により確かめられる．

4.2 画像処理実験の結果と考察

ミリ波レーダによる観測データ（図 14(a)）を基準として，CFAR[2] による処理（図 14(c)）が最もよくクラッタを抑圧した．次いで CFAR[3] となる．比向上の効果を比較すると表 2 のとおりとなり，シミュレーションによる性能評価に準じる結果となった．

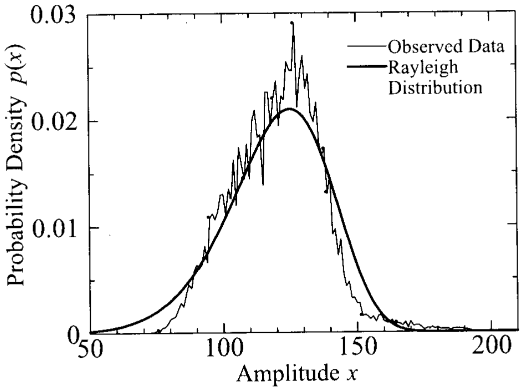


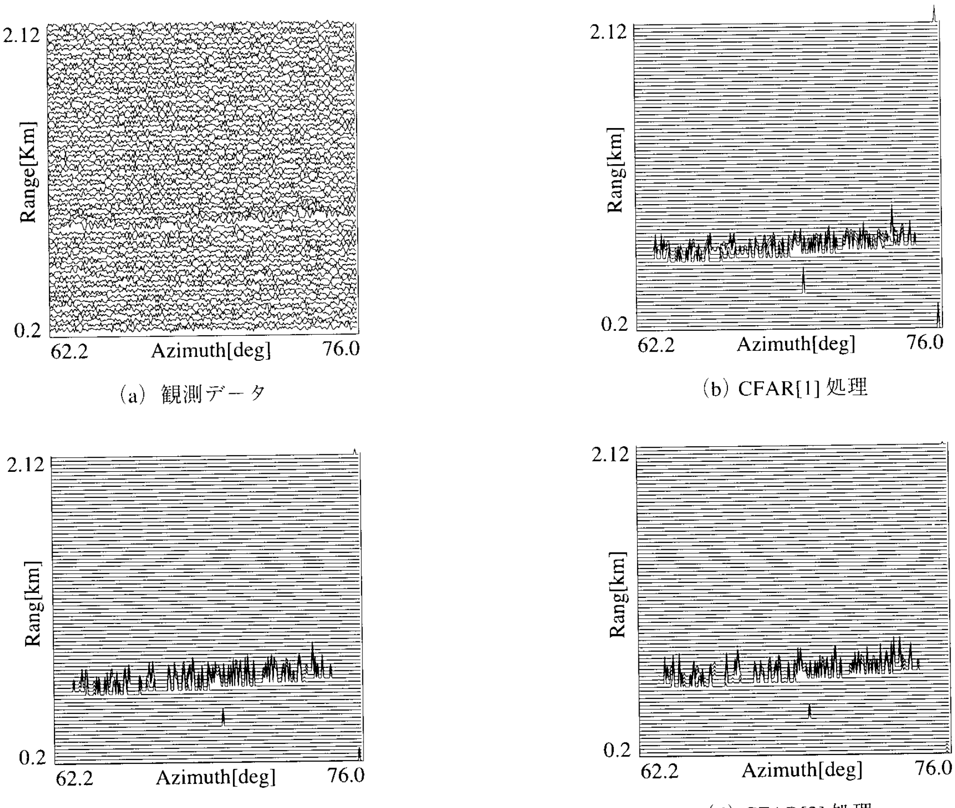
図 13 ミリ波レーダにより観測された海面クラッタの分布推定結果

表 1 ミリ波レーダ（CPSH-4J）の主要諸元値

MMW Radar	Specification
送信周波数	34.86 GHz
送信尖頭出力	30 kW
送信パルス幅	30 nsec
パルス繰返し周波数	4000 Hz
空中線回転数	20 rpm
アンテナビーム幅	
水　平	0.25 deg.
垂　直	5.0 deg.
偏波方式	水平偏波
受信機形式	線形出力
中間周波数	100MHz
中間周波数帯域幅	45MHz

表 2 処理画面の T/C（Target-to-Clutter）比

	Original Radar Image	Processed Image CFAR1	Processed Image CFAR2	Processed Image CFAR3
T/C比	2.34dB	4.28dB (+1.94)	6.79dB (+4.45)	5.01dB (+2.67)



(a) 観測データ

(b) CFAR[1] 処理

(c) CFAR[2] 処理

(d) CFAR[3] 処理

図 14 観測データ画像と処理結果

5. まとめ

レイリークラッタを抑圧し，クラッタに埋もれたレーダターゲットを検出するため平方根の規格化によるCFARすなわちCFAR[1]，二乗平均値の規格化によるCFARすなわちCFAR[2]，三乗平均値の規格化によるCFARすなわちCFAR[3]のアルゴリズムを用いてシミュレーションを行うとともに，これらのアルゴリズムをミリ波レーダにより観測されたレーダ画像に適用し，クラッタ抑圧の効果を検討した．

今回のシミュレーションにより，実際に回路を構成する有限個サンプルにおける誤警報確率，検出確率，CFAR損失を定量的に求めることができた．各CFAR回路の比較結果，同一のしきい値においてはCFAR[3]の誤警報確率が最も低いが，同一の誤警報確率で固定した場合，検出確率はCFAR[2]が最も高く，CFAR損失もCFAR[2]が最も少ない，との結果が得られた．パフォーマスは総合的にCFAR[2]，CFAR[3]，CFAR[1]の順で優れていると評価できる．実際のレーダに応用する有限個サンプルを考えたときはCFAR[2]の回路が最も優れた特性を得られることが確かめられた．レーダ画像の処理実験においては*T/C*比を比較した場合，CFAR[2]，CFAR[3]，CFAR[1]の順で効果が大きい，これらはシミュレーション評価に準じ，LIN/CFARの優越性を実証した．レイリークラッタのレーダ画像に対しては，このLIN/CFAR[2]の方法が最も有効であると言える．

参考文献

1) 関根松夫: レーダ信号処理技術, 電子情報通信学会, (1991)
2) V.G. Hanson and H.R. Ward: Detection Performance of the Cell Average LOG/CFAR Receiver, IEEE Trars.Aerosp. Electron.Syst. AES-8, 5, 548/652 (1972)
3) R. Nitzberg: Analysis of the Arithmetic Mean CFAR Normalizer for Fluctuating Target, IEEE Trans.Aerosp.Electron.Syst. AES-14, (1978)
4) 立川精一, 関根松夫, 武者利光: レーダクラッタ除去のためのシミュレーション, シミュレーション, **4**-2, 37/43 (1985)