

연근해 소형 어선의 레이더 정보 수록 및 해석 시스템 개발* - CFAR에 의한 레이더 잡음 억제 -

이대재[†] · 김광식^{**} · 신형일 · 변덕수^{***}

부경대학교 · ^{**} 마린전자상사 · ^{***} 한국해양수산연수원

Development of Acquisition and Analysis System of Radar Information for Small Inshore and Coastal Fishing Vessels - Suppression of Radar Clutter by CFAR -

Dae-Jae LEE, Kwang-Sik KIM^{**}, Hyeong-Il SHIN and Duck-Soo BYUN^{***}

Pukyong National University, ^{**} Marine Electronics Corporation,

^{***} Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology

Abstract

This paper describes on the suppression of sea clutter on marine radar display using a cell-averaging CFAR(constant false alarm rate) technique, and on the analysis of radar echo signal data in relation to the estimation of ARPA functions and the detection of the shadow effect in clutter returns.

The echo signal was measured using a X-band radar, that is located on the Pukyong National University, with a horizontal beamwidth of 3.9°, a vertical beamwidth of 20°, pulsewidth of 0.8 μs and a transmitted peak power of 4 kW.

The suppression performance of sea clutter was investigated for the probability of false alarm between 10^{-0.25} and 10^{-1.0}. Also the performance of cell averaging CFAR was compared with that of ideal fixed threshold.

The motion vectors and trajectory of ships was extracted and the shadow effect in clutter returns was analyzed.

The results obtained are summarized as follows :

1. The ARPA plotting results and motion vectors for acquired targets extracted by analyzing the echo signal data were displayed on the PC based radar system and the continuous trajectory of ships was tracked in real time.
2. To suppress the sea clutter under noisy environment, a cell averaging CFAR processor having total CFAR window of 47 samples(20+20 reference cells, 3+3 guard cells and the cell under test) was designed. On a particular data set acquired at Suyong Man, Busan, Korea, when the probability of false alarm applied to the designed cell averaging CFAR processor was 10^{-0.75}, the suppression performance of radar clutter was significantly improved.

* 이 논문은 2002년도 부경대학교 기성회 학술연구비에 의하여 연구되었음.

[†]Corresponding author : daejael@pknu.ac.kr

The results obtained suggest that the designed cell averaging CFAR processor was very effective in uniform clutter environments.

3. It is concluded that the cell averaging CFAR may be able to give a considerable improvement in suppression performance of uniform sea clutter compared to the ideal fixed threshold.
4. The effective height of target, that was estimated by analyzing the shadow effect in clutter returns for a number of range bins behind the target as seen from the radar antenna, was approximately 1.2 m and the information for this height can be used to extract the shape parameter of tracked target.

Key words : radar clutter suppression(레이더 잡음 억제), CFAR(일정오경보확률), threshold detection(역치탐지), shadow zone(음영구역), radar signal processing(레이더 신호처리)

서 론

선박에서는 자선 주변에 존재하는 각종 물표의 반사신호를 수신하여 이들 물표의 위치 및 동적거동 등을 모니터링하기 위해 레이더를 사용하고 있지만, 주된 관찰대상이 되는 선박이나 해상에 설치된 어구와 같은 각종 항해 장애물 이외의 반사파 신호, 즉, 해면, 지표면, 우적, 강설, 기타 잡음원 등에 의한 반사파 신호(clutter signal)가 함께 수신되는 경우가 많다. 이 때문에 자선 주변의 해상 장애물을 정확하게 검출하여 자선의 안전을 확보하기 위한 방안으로 레이더 clutter 신호를 효과적으로 억제 및 제거하기 위한 연구가 널리 수행되어 왔다.

대개의 선박에서는 이와 같은 레이더 clutter 신호를 항해의 안전과 관련된 각종 항해 장애물에 의한 반사파 신호로써 오인하는 경우가 많기 때문에 레이더 신호처리분야에서는 이들 clutter 신호의 적극적인 억제를 통해 표적 신호만을 효율적으로 검출하는 역치검출(threshold detection) 방식이 널리 이용되고 있다. 보통, 레이더 수신기의 출력에 어떤 역치를 설정하고, 출력신호가 역치레벨을 초과하는가의 여부에 따라 표적여부를 판정하는 방법이 사용되고 있는데, 이 때, clutter 신호가 역치레벨을 초과하면 clutter를 표적으로써 오인하는 결과가 되어 오경보(false alarm)가 된다.

일반적으로 레이더 반사파에 대한 envelope 신호의 진폭은 Rayleigh 분포에 따라 변동하는 특성을 나타내지만, 만일, clutter의 진폭분포의 파라미터가 변동하여 분포형상이 변화하면, 오경보확률(false alarm probability)에도 변화가 발생하기 때문에 오경보확률을 충분히 낮은 일정치로써 억제시켜 일정오

경보확률(constant false alarm rate, CFAR)을 유지하는 처리가 필요하다¹⁾⁻⁷⁾.

이미 저자들은 radar target extractor(RTX)을 이용한 PC based radar system을 개발하고, 탐지 표적 위치의 자동추적과 그 추적 결과를 실시간으로 해석할 수 있는 레이더 시스템에 관한 연구 성과를 보고한 바 있다⁸⁾⁻⁹⁾.

본 연구에서는 前報⁸⁾에서 개발한 PC based radar system에 대한 응용 연구의 하나로써, cell averaging CFAR 처리장치를 통해 실제의 레이더 echo 신호를 처리하여 clutter 신호 속에 묻혀있는 선박의 신호를 효율적으로 검출한 결과 및 오경보 확률의 설정치의 변화에 따른 echo 영상의 변화패턴을 레이더 스크린상에서 직접 비교, 분석한 결과에 대하여 보고한다.

재료 및 방법

1. 이동표적의 추적 및 레이더 clutter의 억제

본 연구는 부산 용호만을 대상으로 선박용 X밴드 레이더(FR1832, Furuno)를 사용하여 이동 선박의 echo 신호를 연속 관측하고, CFAR processor에 의한 sea clutter의 억제를 통해 이동선박의 탐지효율을 향상시키기 위한 연구를 수행하였다. 또한, radar echo generator(EG-3000, Furuno)에 수록된 동경향에 대한 레이더 echo 신호를 본 연구에서 개발한 레이더 해석 시스템에 입력시켜 이동선박의 정보를 실시간으로 추적 및 해석하는 시스템도 동시에 구현하였다.

본 실험에서는 레이더를 부경대학교 공동실습관 옥상에 고정, 설치하고, 레이더에서 출력되는 analog video signal, trigger pulse, azimuth reset pulse (ARP), azimuth count pulse (ACP)를 RTX에 입력하였다. 레이더 영상신호의 수록은 신호처리에 필요한 이득, 방위와 거리 offset, STC, 잡음레벨 등과 같은 각종 입력 파라미터의 초기치를 설정한 후에 행하였다. 이 때, 레이더 비디오 신호는 40 MHz로써 sampling되었고, 거리방향의 sampling 수는 512, 1 sampling 시간간격에 대한 거리분해능은 3.75 m, 레이더 스크프의 한 화면은 512×720 pixel로써 구성하였다.

본 연구에서는 먼저 Fig. 1과 같이 cell averaging CFAR의 처리^{1), 2)}를 위해 레이더 수신기의 포락선 검파 출력을 sampling한 후, 이 값을 2승 처리하여 전력(power)으로써 변환하였고, 이들 신호전력의 평균치가 1이 되도록 정규화 처리를 거쳐 range cell에 입력시켰다.

레이더 조사면내에 다수의 불필요한 잡음성 산란체가 random하게 존재할 때, 이 조사면에서 산란되는 반사파, 즉, 협대역 필터를 통과시킨 레이더 clutter의 정현파 신호 진압 y 의 분산 β^2 는

$$\beta^2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M y_i^2 - \left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M y_i \right)^2$$

이 되고, 여기서, y_i 는 i 번째 range cell에 대한 clutter 신호전압이고, M 은 1회의 레이더 송신에 대한 range cell 방향의 sampling 데이터 수이다.

만일, 레이더 clutter 신호가 평균 zero, 분산 β^2 의 Gaussian성 백색잡음인 경우,

$$\beta^2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M y_i^2$$

이 되어 표준편차 β 는 rms clutter 진압, 분산 β^2 는 clutter 전력(power)이 된다.

이 때, 레이더 clutter 신호의 envelope 진폭 r 은 Rayleigh 분포, 즉,

$$p(r) = \frac{r}{\beta^2} e^{-\frac{r^2}{2\beta^2}}$$

에 따르면, 여기서, $x = \left(\frac{r}{\sqrt{2}}\right)^2$ 라 하면, $\beta^2 =$

$$\langle x \rangle = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i \text{ 이 된다.}$$

또한, clutter 신호의 envelope 진폭 r 에 대응하는 clutter power x 는

$$p(x) = \frac{1}{\langle x \rangle} e^{-\frac{x}{\langle x \rangle}}$$

의 지수분포에 따른다.

cell averaging CFAR processor의 2승 검파기를 거쳐 reference cell에 입력된 k 번째 clutter 전력의 데이터 샘플 x_k 를 그 평균전력 $\langle x \rangle$ 로서 정규화하여 v_k 라 할 때,

$$v_k = \frac{x_k}{\langle x \rangle} = \frac{r_k^2}{2\beta^2}$$

이 되고, 정규화된 clutter 전력 v_k 역시

$$p(v_k) = e^{-v_k}$$

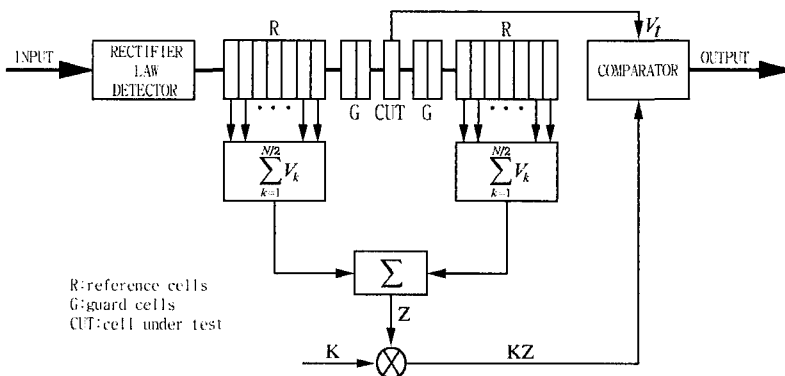


Fig. 1. Block diagram of cell-averaging CFAR processor.

의 지수분포에 따르고, 이 clutter 전력이 어떤 전력 역치 v_T 보다 크게 될 확률, 즉, 오경보확률(false alarm probability) $P_{fa} (v_T < z_k < \infty)$ 는

$$P_{fa} = \int_{v_T}^{\infty} e^{-v_k} dv_k = e^{-v_T}$$

이 된다. 여기서, v_T 는 ideal theshold level이고, $v_T = -\ln(P_{fa})$ 로서 clutter 전력과는 무관하게 정의된다.

Fig. 1에서 reference cell의 adder 출력 z 는

$$z = \sum_{k=1}^N v_k$$

이 되는 데, 이 clutter 전력은 레이더 안테나의 회전 에 의한 조사면의 이동에 따라 변동하고, 그 확률밀도함수 $p(z)$ 는

$$p(z) = \frac{z^{N-1}}{(N-1)!} e^{-z}$$

이 되는 데, 여기서, N 은 reference cell의 data sample 수이다.

만일, Fig. 1의 cell averaging CFAR processor 에 대한 레이더 clutter 전력의 역치 v_T 를

$$v_T = \frac{\alpha}{N} z$$

로써 설정하면, 역치 v_T 의 확률밀도함수 $p(v_T)$ 는

$$p(v_T) = \frac{N}{\alpha} \frac{(\frac{N}{\alpha} z)^{N-1}}{(N-1)!} e^{-\frac{N}{\alpha} z}$$

이 된다. 여기서, α 는 scaling factor 이다. 따라서, 오경보확률의 기대치 P_{FA} 는

$$P_{FA} = \int_0^{\infty} e^{-v_T} p(v_T) dv_T = (1 + \frac{\alpha}{N})^{-N}$$

이 되어 clutter power β^2 과는 무관하게 구할 수 있고, scaling factor α 는

$$\alpha = N((P_{FA})^{-\frac{1}{N}} - 1)$$

가 된다.

본 연구에서는 오경보확률 기대치 P_{FA} 을 변화시키면서 clutter의 전력역치를 구하고, 이 전력역치의 변화에 따른 레이더 스크로상에 나타나는 선박영상의 성능개선특성을 조사, 분석하였다.

2. 음영구역(shadow zone)의 측정

레이더 안테나에서 발사된 전파가 공기중을 진행해 가는 도중에 대형 장애물이 존재하면, 전파의 진행이

차단되어 장애물 후방에 위치하는 표적의 탐지가 불가능하게 되는 데, 특히, 연안해역에 있어서는 대형선박의 주변에서 조업하는 어선의 레이더 탐지가 어려워 예기치 못한 사고가 빈번하게 발생하고 있다. 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 해상에 존재하는 표적의 후방에 발생하는 음영구역에 대한 정량적 검토를 행하였다.

Fig. 2에서 레이더 안테나에서 발사된 전파가 해면으로 방사될 때, 안테나로부터 수평거리(ground range)가 \overline{AD} 인 위치에 타선이 존재하는 경우, 타선의 C점에서 반사되는 전파의 slant range와 이 전파의 진행방향에 대한 해면(지면) 반사점의 slant range를 각각 R_C, R_B 라 하면, 타선의 해면상의 유효높이(H_T)에 기인하여 초래되는 음영구역의 폭 \overline{CB} 는 타선의 안테나 높이를 H_a 라 할 때,

$$\overline{CB} = R_B - R_C = H_T \sec \theta$$

에 의해 구할 수 있고, 여기서, 전파의 입사각 θ 는

$$\theta = \sin^{-1} \frac{H_a}{R_B}$$

가 된다.

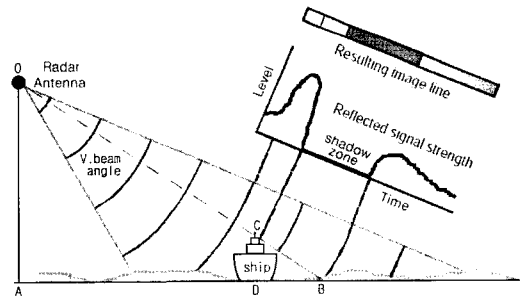


Fig. 2. Effect of target geometry on radar imagery.

결과 및 고찰

1. 추적정보의 표시 및 수록

전자해도상에 레이더 영상을 중첩시켜 표시하고, 추적표적의 정보를 표시 및 수록한 결과의 일례는 Fig. 3과 같다.

Fig. 3은 레이더 target extractor의 DSP에서 8 bit의 분해능으로 샘플링된 0~255 레벨을 16 레벨 간격으로 분할하여 컬러로써 설정한 후, 실시간으로

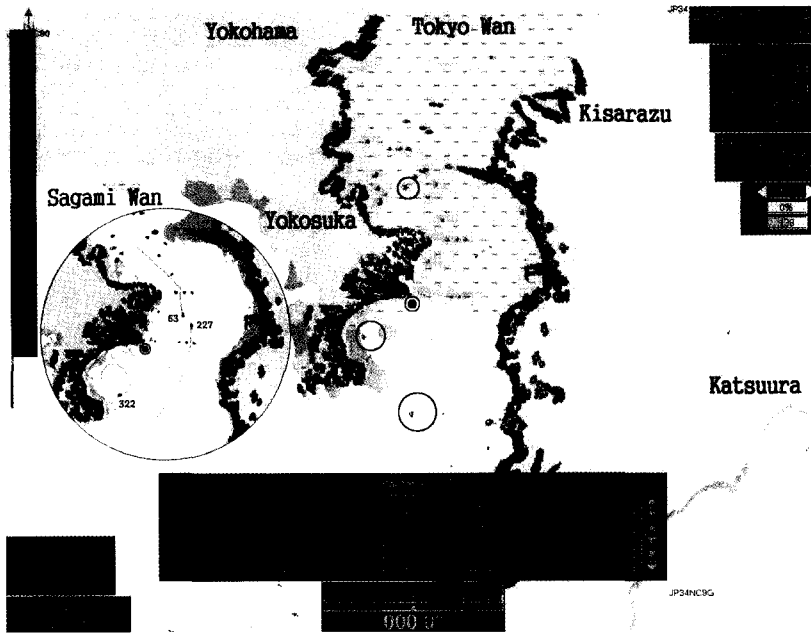


Fig. 3. An example of echo trace and real-time ARPA information for continuous ship's target tracking acquired in Tokyo harbor, Japan.

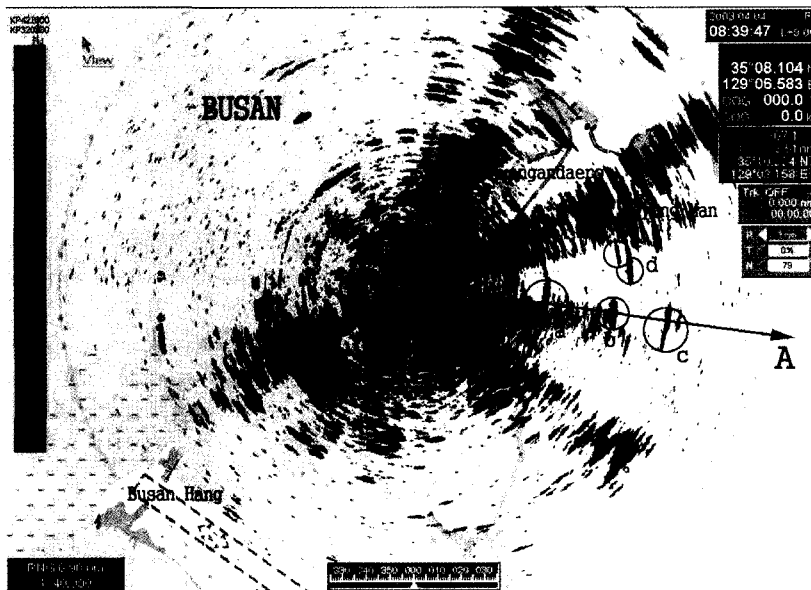


Fig. 4. A example of the radar image showing the sea clutter and ship's targets(a~e) super-imposed on the ENC acquired in Busan harbor, Korea.

변동하는 레이더 영상신호를 PPI 스크프상에 컬러영상으로 나타낸 결과의 일례이다. 실험은 radar echo generator에 수록되어 있는 동경향의 video 신호를 radar target extractor에 입력시켜 전자해도상에 중첩시켜 나타낸 결과이다.

Fig. 3에서 동시에 추적이 가능한 표적의 수는 512 개이고, 각각의 표적에 대하여 번호, 방위, 거리, 속력, CPA, TCPA 등의 정보가 표시되도록 하였다.

또한, 현재 추적되고 있는 표적의 항적은 사용자가 설정하는 시간동안 표시되는 데, 만일, 표적의 항적을 연속적으로 표시토록 하면, Fig. 3에서와 같이 선박의 동태를 실시간으로 파악하는 것이 가능하고, 또한, 이들의 항적정보는 hard disk에 수록하여 후일 필요에 따라 분석할 수 있도록 하였다.

한편, 추적하고 있는 표적의 vector time은 사용자가 필요에 따라 자유롭게 설정할 수 있도록 하였고, 표적의 추적범위는 소형 어선에 탑재되고 있는 소형 레이더 PPI 스크프상에 대한 탐지범위를 대상으로 하고 있기 때문에 연안소형어선에 이 시스템을 부착시키면 저가의 비용으로써 ARPA 기능을 발휘케 할 수 있을 것으로 판단된다.

일반적으로 CFAR processor에서는 먼저 어떤 한 test cell을 대상으로 표적의 유무를 판정한 후, test cell을 순차적으로 바꾸어가면서 표적의 존재여부에 대한 판정을 반복하게 된다. 이 때, 강한 clutter 신호속에 표적의 반사신호가 묻혀 있는 경우에는 reference cell에 clutter 신호성분이 혼입된다. 만일, cell averaging CFAR processor의 reference cell에 clutter 신호성분이 혼입되면 reference cell에 대한 신호의 평균치가 상승하기 때문에 threshold level도 함께 상승하고, 이 때문에 test cell에 표적이 존재하더라도 표적을 검출할 수 없는 문제가 빈번하게 발생한다.

본 연구에서는 이를 정량적으로 분석하여 선박용 레이더의 clutter 신호를 억제시키는 방법을 개선하고, 이를 통해 표적의 탐지성능을 향상시키기 위해 부산 용호만을 통항하는 해상 이동표적을 대상으로 RTX를 이용하여 레이더 신호를 정량적으로 수록, 분석하였는데, 그 결과의 일례는 Fig. 4와 같다. 그림에서 (a)는 정박중인 선박, (b)~(e)는 육안으로 확인된 항주중인 선박이고, 레이더 scope상에는 광안대교의 영상이 선명하게 나타나 있다. 여기서는 레이더 스크프상의 line "A"에 대한 한 주사선의 echo 신호를 대상으로 cell averaging CFAR processor를 구성하여 표적의 탐지성능을 분석하였는데, 그 결과는 Fig. 5과 같다.

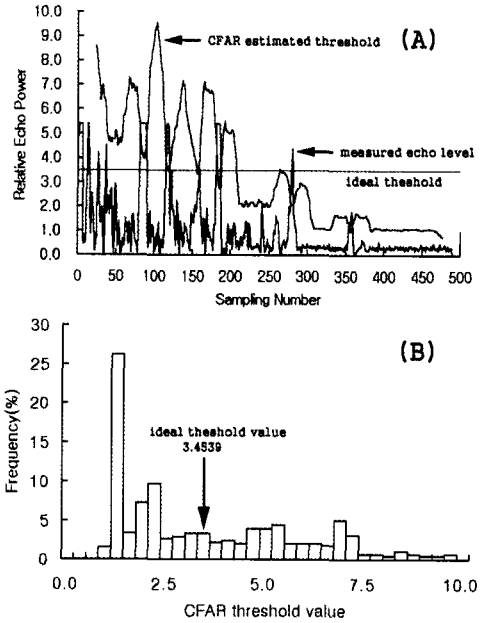


Fig. 5. (a) A example for cell-averaging CFAR processing for echo power of radar signal acquired in littoral regions (b) Histogram of cell-averaging CFAR threshold values for echo power.

Fig. 5(A)는 오경보확률을 일정한 수준으로 억제하기 위해 레이더 영상 신호의 검파 출력을 2승하여 전력으로 변환한 후, 평균전력을 구하고, 각각의 range cell에 대한 영상신호의 측정 전력치를 평균전력으로 규격화하여 나타낸 상대전력이다. 이 그림에는 ideal threshold 레벨과 cell averaging CFAR에 의해 추정된 threshold 레벨을 중첩시켜 나타내었다. Fig. 5(A)에서 횡축은 레이더 영상신호의 샘플링 번호로써 1개의 주사선에 해당하는 데이터 번호이다. 여기서는 매 펄스가 송신될 때마다 거리방향으로 3.75 m 격으로 512개의 데이터를 수록하여 각 range cell에 할당하였지만, Fig. 5에는 500번째 range cell까지의 영상 데이터만을 나타내었다. 횡축은 이렇게 할당된 각 range cell에 대한 영상신호의 전력(x_k)을 평균전력($\langle x \rangle$)으로 규격화한 상대전력

$$(v_k, v_k = \frac{x_k}{\langle x \rangle}) \text{을 나타낸 것이다.}$$

Fig. 5(A)에서 ideal threshold level v_T 는 오경

보확률(P_{fa})을 $P_{fa} = 10^{-1.5}$ 로 하여, $v_T = -\ln(P_{fa})$ 에 의해서 추정된 값으로서 그 값은 $v_T = 3.4539$ 이다. 또한, cell averaging CFAR에 의한 threshold는 24번째부터 477번째까지의 range cell을 대상으로 먼저 24번째 range cell의 상대전력부터 test cell에 setting하고, 그것의 좌측 20개 및 우측 20개, 즉 총 40개의 reference cell에 입력되는 레이더 영상신호의 상대전력의 합(Z)을 산출한 후, cell averaging CFAR에 대한 오경보확률의 기대치(P_{FA})를 $P_{FA} = 10^{-1.5}$, reference cell의 총수(N)를 $N = 20$ 으로 하여 CFAR scaling factor(α)를 $\alpha = N((P_{FA})^{-1/N} - 1)$ 에 의해 구하여 이들 값의 곱, 즉, αZ 를 추정된 결과인데, 이 threshold는 test cell에 순서대로 setting되는 24번째부터 477번째까지의 상대 전력을 대상으로 추정하였다. 이 때, cell averaging CFAR processor는 test cell에 setting된 레이더 영상신호의 상대전력(V_i)과 CFAR threshold의 추정치 αZ 를 비교하여 $V_i > \alpha Z$ 이면 표적이 존재한다고 판정하고, $V_i < \alpha Z$ 이면 표적이 존재하지 않는다고 판정하게 된다.

Fig. 5(A)에서 cell averaging CFAR processor의 비교기(comparator)가 레이더 영상신호의 상대전력과 CFAR threshold의 추정치를 비교, 출력한 결과를 보면, 레이더 영상신호의 상대전력이 CFAR threshold 레벨을 초과하여 레이더에 수신된 echo 신호를 표적신호로써 판정한 수는 5개였지만, 그 첫 번째의 echo 신호는 용호만 부두끝단에 의한 echo 신호, 두 번째는 인근 육상구조물에 의한 거짓상(false echo)이고, 나머지 3개의 echo 신호는 용호만에 정박 및 항해중인 선박의 echo 신호로써 선박이 비교적 정확하게 검출되었다.

그러나, 레이더의 echo 신호에 ideal threshold level을 적용하여 표적을 검출한 결과에서는 모두 9개의 echo 신호가 표적 신호로써 검출되었는데, 특히, 레이더 안테나 주변의 clutter 신호에 대한 억제가 적절하게 행하여지지 않았고, 또한, 원거리 선박의 검출이 불가능하여 전반적으로 적절한 clutter 억제기능을 발휘하지 못하는 문제가 있음을 알 수 있었다.

한편, Fig. 5(B)는 cell averaging CFAR processor에 의한 전력 threshold의 추정치에 대한 빈도분포를 나타낸 결과로서 ideal threshold level을 함께 나타내었다. Fig. 5의 (A)와 (B)에서 전력

threshold의 추정치는 ideal threshold level을 중심으로 cell averaging CFAR processor의 reference cell에 혼입되는 clutter 신호의 전력성분의 변화에 연동하여 변동하였고, 이 때문에 clutter 신호가 강하게 혼입되면 reference cell에 대한 영상신호의 평균 전력이 증가하여 threshold 값도 함께 상승하는 경향을 나타내었다.

대부분의 선박용 레이더의 PPI scope상에 나타나는 표적의 영상은 레이더 수신기의 포락선 검파신호에 의해 표시되는 정보이다. 따라서, 자선 주변을 항행하는 선박이나 각종 항해 위험물에 대한 반사신호를 효과적으로 검출하여 scope상에 나타내기 위해서는 불필요한 해면, 지표면, 우적, 강설 등과 같은 clutter 신호를 최대한 억제시킬 필요가 있다. 여기서는 레이더 scope상에 나타나는 clutter 잡음을 억제시키기 위해 Fig. 6의 cell averaging CFAR processor에 의한 threshold의 추정치를 이용하였다.

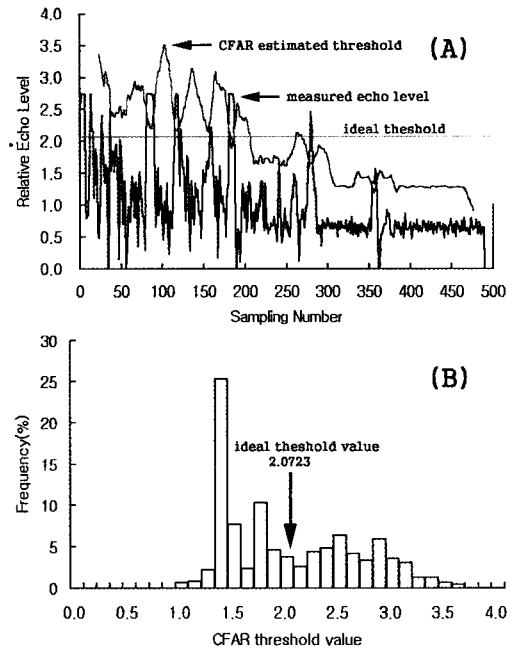


Fig. 6. (a) A example for cell-averaging CFAR processing for echo amplitude of radar signal acquired in littoral regions (b) Histogram of cell-averaging CFAR threshold values for echo amplitude.

Fig. 5에서는 레이더의 수신기에 입력되는 echo 신호의 envelope 검파 출력을 2승 처리하여 전력으로 변환한 후, threshold level을 추정하였지만, 여기서는 선박용 레이더에서와 같이 echo 신호를 PPI scope상에 나타내야 하는 문제 때문에 cell averaging CFAR processor의 reference cell, guard cell 및 test cell에 envelope 검파출력을 그대로 setting하여 threshold level을 추정하는 방법을 이용하였다. 이 방법에 의한 레이더 clutter의 억제 효과와 그 때의 오경보확률의 관계를 검토한 결과는 Fig. 6과 같다. Fig. 6(A)에서 종축은 상대 echo level이고, 횡축은 횡축은 레이더 영상신호의 샘플링 번호로써 1개의 주사선에 해당하는 데이터 번호이다.

한편, Fig. 6(B)는 cell averaging CFAR processor에 의한 진폭 threshold의 추정치에 대한 빈도 분포를 나타낸 결과로서 ideal threshold level을 함께 나타내었다. Fig. 6(B)에서 진폭 threshold의 추정치는 ideal threshold level을 중심으로 cell averaging CFAR processor의 reference cell에 혼입되는 clutter 신호의 진폭성분의 변화에 연동하여 변동하였고, 이 때문에 clutter 신호가 강하게 혼입되면 reference cell에 대한 영상신호의 평균진폭이 증가하여 threshold 값도 함께 상승하는 경향을 나타내었다.

Fig. 5와 Fig. 6에서 알 수 있는 바와 같이 cell averaging CFAR processor의 reference cell, guard cell 및 test cell에 각각 echo power와 echo envelope 진폭을 설정하여 threshold level을 추정한 결과, 전자의 경우에 있어서는 오경보확률 P_{fa} 가 $P_{fa} = 10^{-1.5}$ 일 때, 또한, 후자의 경우에 있어서는 오경보확률이 $P_{fa} = 10^{-0.9}$ 일 때, 이들 양자에 대한 표적의 검출효과가 거의 일치하는 경향을 나타내었다. 따라서, 본 연구에서는 cell averaging CFAR processor의 reference cell, guard cell 및 test cell에 echo envelope 진폭을 설정한 후, 오경보확률을 변화시키면서 threshold level을 추정하였다. 이 cell averaging CFAR에 의한 추정 threshold 레벨과 test cell에 설정된 상대 echo 진폭을 비교하여 표적을 검출하고, 그 표적 레벨을 레이더 scope상에 512×720 pixel의 영상으로 구현하는 방법으로 레이더 clutter의 억제 효과를 분석, 고찰하였다.

만일, 어떤 소형 물표의 진주 방향에 대형의 물표가 존재하면 소형물표주변의 역치레벨이 상승하고, 또한, 여러 개의 해상장애물이 서로 근접하여 존재하는 경우에는 역치레벨이 급격하게 상승하여 이들 모두의 검출이 어렵게 되는 경우가 있다.

레이더 영상신호의 레벨은 0~255까지의 256단계로서 정량화되지만, cell averaging CFAR processor에서 추정된 진폭 CFAR threshold의 추정치와 test cell에 setting된 레이더 영상신호의 echo 진폭의 차를 산출한 후, 이 레벨에 limit 하한값을 90으로 설정하여 512×720 pixel의 레이더 영상을 구현한 결과는 Fig. 7과 같다.

Fig. 7에서 (A)는 cell averaging CFAR processor에 의해 clutter 신호를 제거하기 전의 원래의 레이더 영상이고, (B)는 오경보확률 $P_{fa} = 10^{-0.9}$ 에 대한 ideal threshold level $v_T = -\ln(P_{fa})$ 를 적용시킨 레이더 영상이다. 그림의 (A)에 나타난 (a)~(e)의 기호는 용호만에서 정박 또는 항주중인 선박의 영상이고, (B)는 ideal threshold level에 $v_T = 2.0723$ 상응하는 신호레벨 193을 측정 echo 신호에 threshold 레벨로서 설정하여 나타난 영상이다. 이들 두 개의 레이더 영상을 비교해 볼 때, ideal threshold를 적용시킨 영상에 있어서는 선박 (b), (c), (d)의 echo 신호가 과도하게 감쇠되어 검출이 어려운 상태임을 알 수 있다.

따라서, 이 ideal threshold에 의한 표적 검출의 성능을 향상시키기 위해 cell averaging CFAR processor의 CUT(cell under test) 전후에 각각 3 개의 guard cell(gap)과 20개의 reference cell (lagging/leading window)를 설치하여 레이더의 video 신호를 입력하고, 오경보확률 P_{fa} 를 $10^{-0.25}$, $10^{-0.5}$, $10^{-0.75}$, $10^{-1.0}$ 의 4 단계에 걸쳐 변화시키면서 레이더 영상신호의 변화패턴을 비교, 고찰한 결과는 Fig. 8과 같다.

Fig. 8에서 각각 측정한 레이더 영상신호에 cell averaging CFAR 처리를 행한 결과, radar clutter는 매우 강력하게 억제되는 경향을 나타내었지만, 연구대상이 되는 표적, 즉 선박의 echo레벨은 효율적으로 본래의 레벨을 유지하면서 정확하게 검출되고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 8에서 오경보확률을 $10^{-0.25}$, $10^{-0.5}$, $10^{-0.75}$, $10^{-1.0}$ 로써 점차 증가시켜 갈 때, 레이더 영상신호는 오경보확률의 설정치에 비례하여 억제되어 가는 경향이 뚜렷하게 나타나고 있지만, 선박의 영상신호는 그 억제강도가 radar clutter에 비해 매우 약한 경향을 나타내었다.

이들의 결과로부터 레이더 스크오프상에서 영상신호를 관찰하면서 오경보확률을 적정하게 제어하면 지금까지의 ideal threshold level에 의한 잡음억제기법에서 나타나는 선박영상의 과도한 레벨약화현상을 보완할 수 있을 것으로 판단한다.

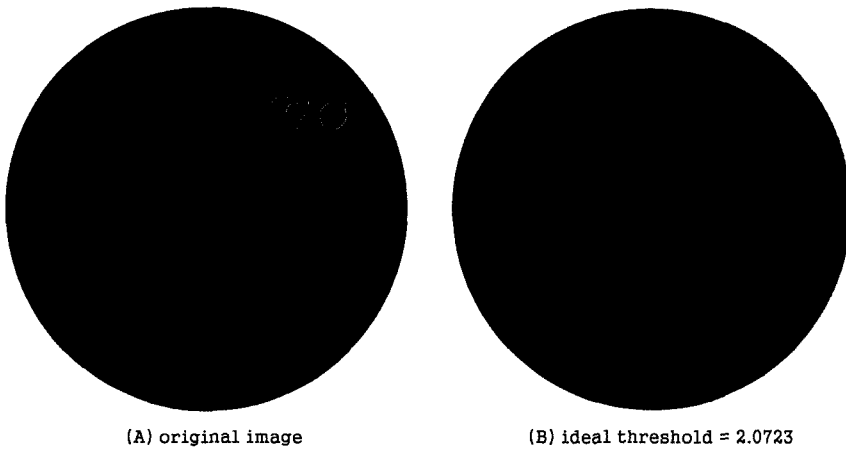


Fig. 7. Comparison of original radar image(A) and image after ideal CFAR processing for ideal threshold level(B).

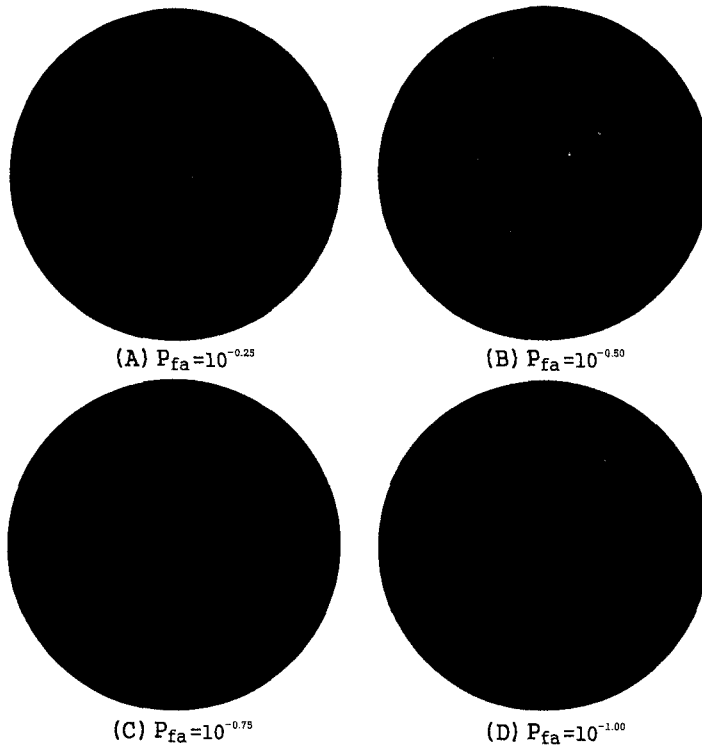


Fig. 8. Comparison of cell averaging CFAR performance for the false alarm probability $10^{-0.25}$, $10^{-0.5}$, $10^{-0.75}$, $10^{-1.0}$, respectively

3. 음영구역의 추정

Fig. 4의 부산 용호만에서 수록한 레이더 영상을 살펴 볼 때, 스크오프상에서는 음영효과(shadow effect)가 명확하게 나타나고 있지 않지만, RTX에서 0~255까지의 256단계로서 정량화된 영상신호의 레벨을 살펴보면 표적의 후방에 대한 음영효과를 명확하게 파악할 수 있는 데, 일례로써 Fig. 4의 영상에 나타난 표적 "a" 주변에 대한 영상신호의 수치값을 나타낸 결과는 Fig. 9와 같다.

Fig. 9에서 표적영상 "a"는 tugboat가 모래운반 barge 선을 우현 선수에서 예인하고 있는 상황을 레이더로써 포착한 결과인 데, 그림에서 tugboat와 barge 선의 영상이 선명하게 분리되어 나타나고 있다. 특히, tugboat의 후방에는 영상의 수치값이 "0"인 음영구역이 2개의 분해능 cell에 걸쳐 나타나고 있고, barge 선의 우현측 후방에도 1~2개의 분해능 cell에 걸쳐 음영구역이 나타나고 있다. 이들의 음영구역은 tugboat와 barge 선의 상부구조물에 기인하여 나타나는 현상이고, barge 선 선수쪽에서는 상부 구조물이 거의 없는 관계로 음영구역이 나타나고 있지 않음을 알 수 있다.

Fig. 9의 영상신호를 수록할 당시 실험에 사용한 레이더 안테나의 설치 높이는 $H_a \approx 30 m$ 이었고, 레이더 영상의 분해능 cell σ 는 $\sigma = 11.25 m$ 이었으므로, 해면(지면) 반사점의 slant range R_B 는 $R_B = 2148.75 m$ 가 된다.

또한, 타선까지의 실제적인 slant range R_C 는 타선의 video 신호영상이 소멸되는 cell까지의 slant range를 R_F , 레이더 송신펄스의 폭을 $\tau(\mu s)$ 라 할 때,

$$R_C = R_F - (150\tau + \frac{\sigma}{2})$$

이 되는 데, 여기서, $R_C = 2064.4 m$ 이므로 실제적인 음영구역의 폭은 $R_B - R_C = 84.4 m$ 가 된다.

이 때, 해면에 대한 전파의 입사각은 $\theta = \sin^{-1} \frac{H_a}{R_B} = 0.8^\circ$ 가 되므로, 음영구역을 초래하는 tugboat의 상부구조물의 유효높이는 $H_T = (R_B - R_C) \sin \theta \approx 1.2 m$ 로 추정된다. 이와 같이 레이더 영상신호의 음영패턴과 음영대역폭을 추정하면 탐지물표의 유효높이의 추정이 가능하기 때문에 이 정보는 향후 3 차원 레이더 영상을 구현하는 데 기초자료가 될 것으로 판단된다.

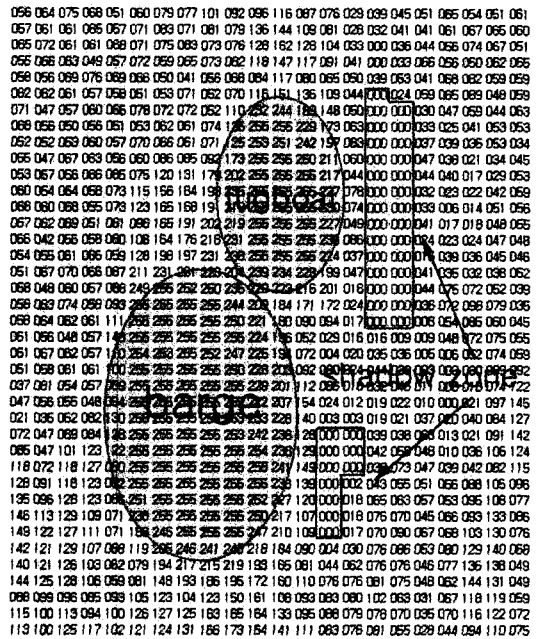


Fig. 9. Shadow zones in radar images caused by the shape characteristics of radar targets.

요 약

연근해 소형 어선에 널리 탑재되어 있는 소형 레이더 장치에 radar target extractor를 인터페이스하여 레이더 신호를 수록, 처리 및 해석하기 위한 PC based radar system을 구축하고, cell averaging CFAR 처리장치를 통해 실제의 레이더 echo 신호를 처리하여 오경보 확률의 설정치 변화에 따른 echo 영상의 변화패턴을 레이더 스크오프상에서 직접 비교, 분석한 결과 및 레이더 영상신호의 음영구역의 발생 대역폭을 추정한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 레이더 신호의 해석을 통해 추출된 표적의 운동 벡터 및 방위, 거리, 속력, CPA, TCPA 등과 같은 ARPA 정보를 실시간으로 이동 궤적과 함께 PC 모니터상에 구현하고 있기 때문에 소형 레이더 시스템에 이 장치를 부착하면 저가의 비용으로써 ARPA 정보의 취득이 가능하다.

2. ideal threshold에 의한 표적검출성능을 개선시키기 위해 cell averaging CFAR processor의 CUT 전후에 각각 3 개의 guard cell과 이 cell의 좌·우측에 각각 20개씩, 총 40개의 reference cell를 설

치하여 레이더의 video 신호를 입력한 후, 오경보 확률을 $10^{0.25} \sim 10^{-1.0}$ 의 범위에 대하여 설정치를 점차 증가시켜 갈 때, 레이더 영상신호는 $10^{-0.75}$ 의 설정치에서 가장 양호한 clutter 제거효과를 나타내었다.

3. 레이더 스크린상에서 영상신호를 관찰하면서 cell averaging CFAR의 오경보 확률을 적정하게 제어하면 지금까지의 ideal threshold level에 의한 잡음억제기법에서 나타나는 선박영상의 과도한 레벨약화현상을 보완할 수 있을 것으로 판단한다.

4. 부산 용호만에 정박중인 예인선의 레이더 신호를 해석하여 영상의 음영패턴과 음영 대역폭을 추정 한 결과, 예인선의 유효높이는 약 1.2 m 이었고, 이들 음영효과의 정량적 해석을 통한 해상표적의 형상정보는 향후 3차원 레이더 영상을 구현하는 데 그 기초 자료가 될 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Levanon, N. (1988) : Radar Principles, John & Wiley & Sons, 247-267.
2. Mahafza, B. R. (2000) : Radar Systems Analysis and Design using MATLAB, Chapman & Hall/CRC, 172-175.
3. Edde, B. (1995) : Radar : Principles, Technology, Applications, Prentice Hall, 271-277.
4. Kolawole, M. O. (2002) : Radar Systems, Peak Detection and Tracking, Newnes, 279-281.
5. Watts, S. (1996) : Cell-averaging CFAR gain in spatially correlated K-distributed clutter, IEE Proc. Radar, Sonar Navig. Vol. 143, No. 5, 321-327.
6. Pedersen, E., Arai, Y. and Sato, N. (1997) : On the effect of plotting performance by errors of pointing target in the ARPA system, Jour. of Navigation 52, 119-125.
7. Wei, X., Murai, K., Kouguchi, N. and Miyoshi, Y. (1997) : A study on the accuracy of ARPA information-II, J. Japan Inst. of Navigation 96, 53-61.
8. 이대재 · 김광식 · 변덕수 (2002) : Radar Target Extractor에 의한 선박운동정보의 추출에 관한 연구, 한국어업기술학회지, 38(3), 249-255.
9. 이대재 · 김광식 · 신형일 · 변덕수 (2003) : 연근해 소형어선의 레이더 정보 수록 및 해석 시스템 개발, - 위치 추적 및 실시간 모니터링 -, 한국어업기술학회지, 39(4), 337-346.

2003년 8월 13일 접수

2003년 8월 26일 수리