

펄스 레이더의 最大探知距離 算出 모델研究

蔡 洸 杓*

ABSTRACT

Computer model for calculating the maximum detection range of the pulse radar used for surface surveillance is developed, and the detailed procedures of each theoretical step are discussed.

The quantity of radar antenna's receiving energy, transmitting energy and noise level are compared in this model. All the calculation steps are programmed in BASIC language.

Finally, I have found the output of this model well matched with the some experimental results.

1. 序 論

레이더의 性能은 自體의 特性 뿐만 아니라 레이더와 標的 사이의 大氣影響과 標的의 種類에 크게 左右된다. 勿論 探知確率의 問題나 作動手의 能力 같은 複雜한 要素가 있으므로 理論的인 方法으로 說明하기에는 커다란 差요인이 있음을 주지 해야한다.

本 研究는 레이더 안테나의 送-受信 에너지의 크기와 雜音에너지의 크기를 比較하여 最大 探知 距離를 算出하는 컴퓨터 모델에 관한 것이다. 各 計算의 理論的 展開 過程을 밝혔으며 可能한 全 過程을 WANG 2,200 컴퓨터를 利用하는 BASIC 言語로 프로그래밍화 하였다.

여기서는 探知 確率을 50%, False alarm

rate 를 10^{-6} 으로 假定 하였으며 周波數 範圍가 2,000 Mhz 에서 12,500 Mhz 인 펄스레이더가 海面 探索用으로 使用되는 경우에 對하여 考察하였으나 基本的으로는 다른 領域으로 擴張이 可能할 것이다.

2. 레이더 理論

가. 概 要

레이더가 實際로 利用되기 始作한 것은 2 次大戰때 부터이며 오늘날은 軍事的 目的 以外에도 宇宙開發, 航海, 航空 등 널리 利用되고 있다.

大部分의 레이더는 周波數가 25 Mhz 에서 70,000 Mhz 範圍에서 作動하며 海面 探索用

*海本 体系分析室

레이다로 많이 사용되는 周波數는 2,000 Mhz 에서 12,500 Mhz 까지이다. 一般의인 펄스

레이다 裝置는 그림 1과 같으며 反響波 原理를 利用하여 電磁氣波를 送信, 受信한다.

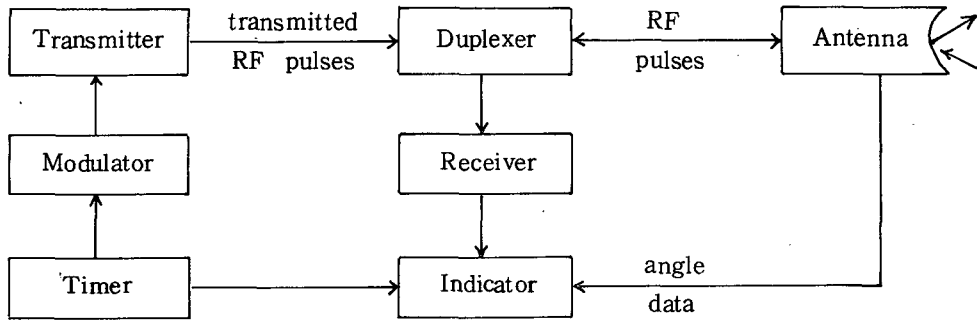


그림1. 一般의인 Pulsed, Scanning 레이다 裝置圖

나. 레이다 方程式

送信出力이 P_t 인 레이다에서 發射된 電波를 거리 R만큼 떨어진 곳에서 受信할 때 그 세기는 거리의 제곱에 反比例 한다.

또 送信 안테나의 利得을 G_t , 標的의 레이다 斷面積을 δ , 受信 안테나의 有效 受信 斷面積을 A_e 라고 하면 標的에서 反射되어 돌아온 受信 에너지의 크기는 다음 式으로 表示된다.

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot A_e \cdot \delta / (4\pi R^2)^2$$

이 式이 레이다 方程式의 基本形이다. 그런데 受信 안테나의 利得 G_r 은 레이다 波의 波長이 λ 일때 $G_r = 4\pi A_e / \lambda^2$ 의 關係가 成立하고 안테나와 標的 사이의 海面 反射效果를 고려해 준다.

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \delta \cdot \lambda^2 \cdot F_t^2 \cdot F_r^2 / (4\pi)^3 \cdot R^4$$

여기서 F_t 와 F_r 은 電波 - 伝播要素로 다음 項에서 說明하겠다.

레이다의 最大 探知 거리를 計算하는 式을 誘導하기 위하여 앞의 式을 다시 쓴다.

$$R^4 = P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \delta \cdot \lambda^2 \cdot F_t^2 \cdot F_r^2 / (4\pi)^3 \cdot P_r \dots\dots\dots(1)$$

그런데 P_r 은 受信되는 에너지의 信號 對

雜音比 (S/N)를 利用하여 나타낼 수 있다.

$$S/N = P_r / K \cdot T_s \cdot B_n$$

$$P_r = (S/N) \cdot K \cdot T_s \cdot B_n$$

여기서 K 는 볼츠만 常數로 1.38×10^{-23} (watt-sec/ K°)이며 T_s, B_n 은 各各 受信 裝置 雜音溫度, 受信機 雜音 밴드폭 (hz)이다.

送信出力 P_t 는 損失要素 L 을 고려하여 P_t/L 로 하고 (1) 式을 使用하여 레이다의 最大 探知거리 方程式을 얻는다.

$$R_{max} = \{ P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \delta \cdot \lambda^2 \cdot F_t^2 \cdot F_r^2 / (4\pi)^3 \cdot (S/N)_{min} \cdot K \cdot T_s \cdot B_n \cdot L \}^{1/4} \dots\dots\dots(2)$$

펄스 레이다의 경우에는 이 式을 고쳐 주어야 한다. 펄스의 길이를 r 이라고 하면 受信機 雜音 밴드幅은 $B_n \approx 1/r$ 이며 可視要素 (visibility factor)는 다음 式으로 定義된다. [4]

$$V = P_r \cdot r / K \cdot T_s = E_r / N_0$$

여기서 E_r 은 受信 펄스에너지, N_0 는 單位 밴드幅當 雜音의 크기다.

그러므로 다음 關係가 成立한다.

$$(S/N)_{min} \cdot B_n = V_{min} / r$$

또 V 는 受信機 雜音 밴드幅이 어떤 特定한 값을 가질 때 最小값을 갖게 된다.

$$V_{\min} = V_0 C_B \dots\dots\dots (4)$$

여기서 V_0 는 可視要素, C_B 는 밴드幅 修正要素이다.

(3), (4) 式을 (2)式에 代入하여 펄스 레이더의 最大 探知距離 方程式을 얻는다.

$$R_{\max} = \{ P_t \cdot r \cdot G_t \cdot G_r \cdot \delta \cdot \lambda^2 \cdot F_t^2 \cdot F_r^2 / (4\pi)^3 \cdot K \cdot T_s \cdot V_0 \cdot C_B \cdot L \}^{1/4} \dots\dots (5)$$

다. 레이더의 性能에 影響을 주는 要素

레이더의 性能은 레이더 方程式에서 보듯이 여러 變數에 의하여 影響을 받는다. 이들 變數를 크게 나누면 레이더 自體의 性能, 레이더와 標的 사이의 大氣, 標的의 特性에 關聯되는 것이다. 이 밖에 海面探索 레이더의 경우는 特別 海面 反射波에 의한 干涉效果, 地球 曲率의 影響을 많이 받는데 이 內容은 다음 項에서 상세히 다루겠다.

(1) 送信出力과 펄스길이

平均 送信出力은 펄스 반복주기 동안에 sine 波 形態로 出力되는 平均값을 말하는데 送信出力은 平均出力을 duty cycle 로 나눈 값이다.

$$P_t = P_{av} \cdot T/r = P_{av}/r \cdot f_r$$

여기서 T 는 펄스 주기, r 은 펄스길이, f_r 은 펄스 반복周波數이며 duty cycle 은 P_{av}/P_t , r/T , 또 $r \cdot f_r$ 로 定義된다.

레이더에서 送信出力을 증가시키면 探知거리도 比例로 증가될 것으로 假定할 수 있으나 受信 펄스의 세기는 거리의 4제곱에 反比例 한다.

連續펄스가 送信되므로 펄스 사이의 간격은 펄스가 標的까지 갔다가 되돌아 올 만큼 길어야 하므로 레이더의 最大 探知거리에 重要한 要素가 되며 最小 探知거리에도 影響을 미치게 되는데 보통 어느 限界內에서만 조정 可能하다.

(2) 안테나 利得

레이더 안테나는 標的이 있는 한 方向으로 最適의 에너지를 發射하게 되는데 이러한 方向性에서 얻어지는 電力의 增加效果를 안테나 利得이라 한다.

$$G = 4\pi \cdot A_e / \lambda^2$$

여기서 A_e 는 안테나의 有效 受信斷面積으로 안테나 效果常數와 實際面積을 곱한 값이다. 結局 可能한 한 發射 에너지를 좁은 빔으로 集積하여 最大量의 에너지를 보낼수록 레이더의 性能이 向上된다.

(3) 안테나 빔幅

안테나의 빔幅은 보통 안테나 빔 에너지의 1/2 되는 幅으로 定義되며 레이더 方程式에는 直接 나타나지는 않았으나 펄스 集積數와 關係되고 標的의 레이더 斷面積에도 影響을 미친다. 實際로 標的이 빔의 中心에 가까울수록 레이더 스코프 상에도 크게 나타나게 된다.

(4) 周波數

레이더 方程式에 나타난 周波數는 通常 사용되는 意味인데 다른 變數를 생각하지 않을 때 周波數가 增加되면 最大探知거리가 감소될 것이다. 그렇지만 이 式에서의 다른 變數들이 周波數에 關係되는 값이므로 實際는 그렇게 간단한 關係가 아니다.

(5) 밴드幅과 밴드幅 修正要素

(가) 受信機의 雜音 밴드幅

레이더 方程式에 直接 나타나지 않았으나 밴드幅 修正要素 속에 包含되고 最適 밴드幅 일때 펄스 길이에 反比例한다. $B_n \approx 1/r$ 이 때 受信機의 雜音세기는 $K \cdot T_s \cdot B_n \cdot G$ 가 된다. (5)

(나) 밴드幅 修正要素

이 값은 受信機 雜音 밴드幅의 값이 적절한 값을 갖지 못하므로 생기는 값이며 거의 1 값에 가깝다.

Haeff가 얻은 實驗式은 다음과 같다. (2)

$$C_B = B_n \cdot r \cdot (1 + \alpha / B_n \cdot r)^2 / 4 \cdot \alpha$$

여기서 B_n 은 밴드幅, r 은 펄스길이, $\alpha \approx 1$ 로 常數다.

(6) 受信裝置 雜音溫度

레이더는 送-受信裝置의 熱 雜音에 의해 性能이 低下된다. 보통 레이더의 경우 안테나 雜音溫度, 送信線 雜音溫度, 受信機의 有

効 雜音溫度를 고려한다.

$$T_s = T_a + T_r + L_r \cdot T_e$$

여기서 L_r 은 送-受信線 損失要素이다.

(가) 안테나 雜音溫度, T_a

안테나의 有效 雜音密度(單位 밴드幅당 에 너지)를 뜻하며 周波數와 高角에 關係된다.

自体 損失이 없는 안테나의 雜音溫度를 T'_a , 안테나 自体의 損失(Ohmic Loss)을 L_a 라 하면 안테나 雜音溫度(T_a)는 다음과 같다 [6].

$$T_a = (0.876 T'_a - 254) / L_a + 290$$

그런데 本 研究에서는 高角이 0° 인 경우이므로 周波數에 따른 函數로 regression 하였다.

$$T'_a = 91.12602 - 8.9466 \times 10^{-4} \times F + 3.72242 \times 10^{-7} \times F^2$$

(나) 送信線 雜音溫度, T_r

送-受信線에서 發生하는 雜音溫度는 다음 式으로 나타내진다.

$$T_r = T_{tr} (L_r - 1)$$

여기서 T_{tr} 은 送信線 溫度이며 L_r 은 送受信線 損失要素이다. T_{tr} 은 편의상 日常溫度($290^\circ K$)를 挾하며 L_r 값은 레이더 性能表에 주어지는데 db 값이 아닌 값으로 고쳐야 한다.

(다) 受信機 雜音溫度, T_e

레이더의 性能表에 값이 주어지는데 어떤 경우는 雜音要素(또는 noise figure)가 주어지며 다음 關係를 갖는다. [3]

$$T_e = T_0 (F_n - 1)$$

여기서 $T_0 = 290^\circ K$, F_n 은 noise figure 이다. 이 式은 勿論 單一 受信機를 가진 보통의 레이더에서 成立한다.

(7) 損失要素

레이더 方程式에서 나타난 損失要素 L 은 여러 原因에 의한 損失의 積으로 주어진다. 實際 計算에서는 db 값으로 表示되기 때문에 各 損失의 積을 뜻한다.

$$L = L_t \cdot L_p \cdot L_a \cdot L_x$$

여기서 L_t : 送信 損失要素

L_p : 안테나 形態 損失要素

L_a : 大氣吸收 損失要素

L_x : 기타 損失要素

또 送-受信線 損失要素와 안테나 損失要素를 생각할 수 있으나 이미 안테나 利得과 受信機 雜音溫度에 包含되므로 除外한다.

(가) 送信 損失要素

送信機와 안테나 사이의 線과 機械裝置 등에서 생기는 損失을 말하며 高周波 일수록 損失이 커진다. S-밴드 레이더의 경우는 약 3.4 db가 된다.

(나) 안테나 形態 損失要素

標的이 안테나 빔의 最大置 領域 밖에서 비쳐지거나 스쳐 지나가므로 이에 따른 損失을 뜻한다. 보통 1.6 db 값이 되는데 펄스·集積을 고려한 경우 약 1.5 db가 된다.

(다) 大氣 吸收 損失要素

안테나와 標的 사이의 大氣에 의한 吸收로 損失이 생기는데 거리, 周波數, 또 안테나 高角에 따라 값이 다르다. 여기서는 거리와 周波數에 따른 函數로 regression 하였다. 이 값은 그림 2와 같다.

(라) 기타 損失要素

受信裝置의 制限事項에 의한 損失要素, 作動手의 能力에 따른 損失要素, 裝備의 老朽 및 設備狀態 등에 따른 損失要素를 생각할 수 있으나 이들 하나 하나를 計算하기는 매우 어렵다. 實際로는 보통 全体的인 代表값을 使用하거나 除外시킨다.

(8) 可視要素(또는 信號 對 雜音比)

單位 밴드幅當 雜音의 세기와 受信된 펄스의 세기의 比를 뜻하며 앞에서 보았듯이 探知 可能信號, 信號 對 雜音比와 同一한 意味로 使用된다.

레이더 빔에는 많은 수의 펄스가 集積되는데 빔幅 θ_B 로 標的에 送信했을 때 受信되는 펄스의 갯수는 다음과 같다. [6]

$$n = \theta_B \cdot f_r / \theta_s = \theta_B \cdot f_r / 6 \cdot W_m$$

여기서 θ_B : 안테나 빔幅(deg)

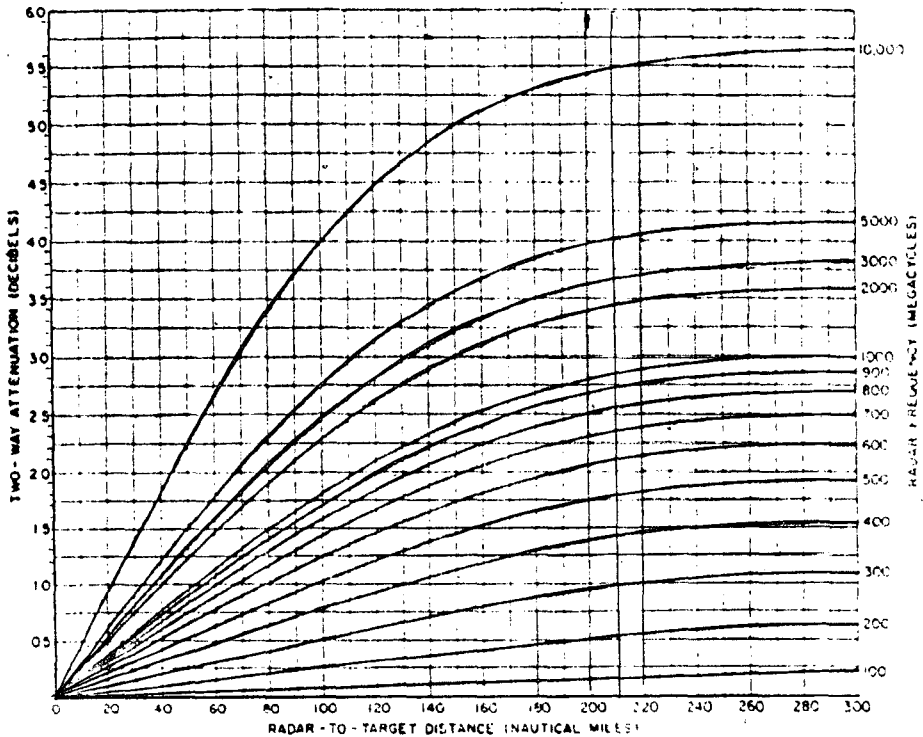


그림2. 거리와 周波數에 따른 大氣吸收(高角 0°)

- f_r : 펄스 반복 周波數
- θ_s : 안테나 回轉率 (deg/sec)
- W_m : 안테나 走査率 (rpm)

한편 레이더에는 大部分 連結힐타를 利用하여 標의 信号와 雜音 信号를 区分 增幅하고 있으나 false alarm rates 의 값은 대개 어떤 確率의 基準값을 攄한다. 여기에서는 10^{-6} 으로 하였으며 펄스 갯수에 따른 함수로 regression 하였다.

$$V_0 = -1 / 0.342728 \times \log (n / 64.242016)$$

(9) 標의 레이더 断面積

안테나에서 發射된 電波가 標의에 의해 反射되는 에너지의 量은 標의 断面積 및 構成 物質, 方向 등에 관계된다. 간단한 경우에는 幾何學的인 式으로 쉽게 表示되지만 대부분의 標은 매우 複雜하므로 實驗값을 利用하거나 單位값을 使用하여 相對的인 性能을 比較하고 있다.

라. 自由空間에서의 最大 深知거리

電波가 大氣中을 통과하는 동안에 여러가지 要素에 의하여 損失이 發生하게 되며 地表面이나 海面에 의한 反射 效果 以外에도 地球가 球形인테 기인한 標의 높이 減少效果도 있을 수 있다.

레이더의 最大 探知距離를 計算하기 위하여 우선 단순한 경우 부터 생각하자.

레이더 方程式에서 電波 - 傳播要素는 레이더 傳播 形態와 反射 - 干涉效果, 屈折, 吸收 損失, 異狀 屈折效果 등을 包含하는 變數인데 이 값을 고려하지 않는 理想的인 空間을 自由空間 (free space) 이라 한다.

(5) 式을 NM 單位로 고친다.

$$R_{max} = 129.2 \{ P_t (Kw) \cdot r (\mu sec) \cdot G_t \cdot G_r \cdot \delta \cdot F_t^2 \cdot F_r^2 / f^2 (Mhz) \cdot T_s \cdot V_0 \cdot C_B \cdot L \}^{1/4}$$

이 式을 使用하기 쉬운 decibel logarithmic 式으로 바꾸고 常數를 整理한다.

$$R_{max} (NM) = \text{antilog} (2 + \{40 \log 1.292 + \{10 \log P_t + 10 \log r + G_t (db) + G_r (db) + 10 \log \delta - 20 \log f - 10 \log T_s - V_o (db) - C_B (db) - (db) \}\})$$

이 式을 計算하는데 그림 3의 "BLAKE CHART"를 利用한다.

마. 海面 深索 레이다 理論

(1) 레이다 수평선 (Radar Horizon)

레이다의 設計와는 無關하게 水平線까지 밖 에 볼 수 없으나 레이다파의 屈折로 그림 4 에서 보듯이 r_1 가 r' 로 길어진다.

안테나 높이를 H_1 , 地球 半徑을 R , 레이다 水平線을 r_1 라고 하면 다음 關係가 成立 한다.

PULSE-RADAR RANGE-CALCULATION WORK SHEET

Radar antenna height: $h =$ ft Target elevation angle: $\theta =$ °

A. Computation of T_s : $T_s = T_o + T_r + L_r T_e$	B. Range factors	C. Decibel values	Plus (+)	Minus (-)
(a) Compute T_o . For $T_{rg} = T_{ro} = 290$ $L_o (db) = \frac{L_a}{10.876 T_o - 254} / L_o + 290$ $T_o =$ °K	$P_T (kw)$	$10 \log P_T (kw)$	.	.
	$\tau_{\mu sec}$	$10 \log \tau_{\mu sec}$	.	.
	G_T	$G_T (db)$	.	.
	G_R	$G_R (db)$	.	.
	$\sigma (m^2)$	$10 \log \sigma$	.	.
	f_{MHz}	$-20 \log f_{MHz}$	.	.
	$T_s, °K$	$-10 \log T_s$	.	.
(b) Compute T_r . $L_r (db) =$ $T_r =$ °K	V_o	$-V_o (db)$	.	.
	C_B	$-C_B (db)$		.
(c) Compute T_e . $F_n (db) =$ $T_e =$ °K $L_r =$ $L_r T_e =$ °K	L_f	$-L_f (db)$		.
	L_p	$-L_p (db)$		.
	L_s	$-L_s (db)$		.
Add. $T_s =$ °K	Range-equation constant ($40 \log 1.292$)		4.45	
	4. Obtain totals →		.	.

• find free-space range R_o corresponding to net decibel value (db) →

• determine the atmospheric-absorption loss factor, $L_a (db)$, corresponding to R' . This is $L_a (db) (t)$ →

• Multiply R' by δ_t . This is a first approximation of the range, R_1 →

그림 3. BLAKE CHART

$$(R + H_1)^2 = R^2 + r_1^2$$

$$r_1^2 = 2R \cdot H_1 + H_1^2$$

또 標的 높이를 H_2 , 레이다 水平線에서 標的 까지의 距離를 r_2 라고 하면 同一한 方法 으로 다음과 같이 된다.

$$r_2^2 = 2R \cdot H_2 + H_2^2$$

그런데 $H_1^2 \ll R$, $H_2^2 \ll R$ 이므로 레이다 水平線 (H)은 다음과 같다.

$$H = (2R)^{1/2} (H_1^{1/2} + H_2^{1/2})$$

그런데 레이다파의 大氣 屈折效果를 고려 해줄때 地球 半徑 (R)을 地球 有效半徑 R_e 로 한다. (7)

$$R_e = 4R / 3$$

$$H = (2R_e)^{1/2} (H_1^{1/2} + H_2^{1/2})$$

앞으로의 計算에서는 地球 有效半徑을 使用 한다.

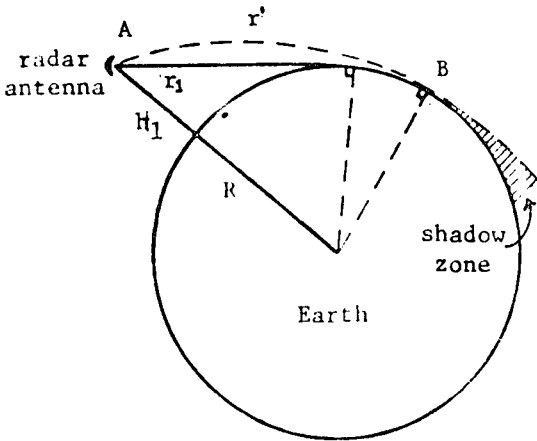


그림4. 레이더 水平線(Radar Horizon)

(2) 干涉 効果

海面 反射效果로 受信되는 레이더파에 干涉 現象이 일어나 "lobe" 形態가 된다.

레이더 方程式에서 알 수 있듯이 重要な 要素가 되며 送-受信 안테나가 하나인 경우 $F_t = F_r = F$ 로 할 수 있다. 電波-傳播要素 (Pattern - Propagation Factor) 는 다음 式으로 表示된다. [3]

$$F = P/P_0 = 1 + (R_s \cdot R_r \cdot D)^2 + 2 R_s \cdot R_r \cdot D \cdot \cos \phi$$

여기서 各 變數名은 다음과 같다.

P : Multipath 를 包含한 경우 受信 power

P_0 : Multipath 를 包含하지 않은 경우 受信 power

R_s : Smooth sea 反射係數

R_r : Rough sea 反射係數

D : 發散要素 (Divergence factor)

ϕ : 位相差

이 값은 海面 反射에 의한 受信波의 增加 比를 뜻한다.

(가) Smooth sea 反射係數

海面 入射波에 對한 反射波의 反射係數는 極性에 따라 다음 式으로 주어진다.

$$T_v = \rho_v \exp(-i\phi_v) = n^2 \sin \psi - (n^2 - \cos^2 \psi)^{1/2} \dots\dots\dots$$

Vertical

$$T_n = \rho_n \exp(-i\phi_n) = \{ \sin \psi - (n^2 - \cos^2 \psi)^{1/2} \} / \{ \sin \psi + (n^2 - \cos^2 \psi) \} \dots\dots \text{Horizontal}$$

$$n^2 = E - (60 \cdot \lambda \cdot S) i$$

여기서

ρ_v, ρ_n : 反射波의 크기

ϕ_v, ϕ_n : 反射波의 位相

n : complex dielectric const

λ : 波長

E : 反射面의 permittivity const

S : 反射面의 conductivity const

ψ : 入射角 (反射角)

그런데 E와 S는 周波數에 따라 값이 다른 데 regression 式은 아래와 같다. [1]

주 파 수 (Mhz)	E	S
$f \leq 1,500$	80	4.3
$1,500 < f \leq 3,000$	$80 - 0.00733(f - 1,500)$	$4.3 + 0.00148(f - 1,500)$
$f > 3,000$	$69 - 0.00243(f - 3,000)$	$6.52 + 0.00134(f - 3,000)$

복소수 計算을 하기 위하여

$$a = E - (\cos \psi)^2$$

$b = -F = -60 \cdot \lambda \cdot S$ 라고 하면 (A + iB) 는 (a + ib) 의 복소 평방근이 된다.

$$A = \{ [a + (a^2 + b^2)^{1/2}] / 2 \}^{1/2}$$

$$B = - \{ [-a + (a^2 + b^2)^{1/2}] / 2 \}^{1/2}$$

또 $z = \sin \psi$ 라고 하면 反射係數는

$$G_h = \{ [(z - A)^2 + B^2] / [(z + A)^2 + B^2] \}^{1/2}$$

$$G_v = \{ [(E \cdot z - A)^2 + (F \cdot z + B)^2] / \dots \}$$

$$\{ (E \cdot Z + A)^2 + (F \cdot Z - B)^2 \}^{1/2}$$

또한 極性에 따른 位相差는 다음과 같다.

$$\phi_h = \arctan \{ B / (A + Z) \} + \arctan \{ B / (A - Z) \} + \pi$$

$$\phi_v = - \arctan \{ (B + F \cdot Z) / (A - E \cdot Z) \} + \arctan \{ (B - F \cdot Z) / (E \cdot Z + A) \} + \pi$$

(나) Rough sea 反射係數

파도의 影響으로 受信되는 레이더 波가 다음 式으로 감소된다. [3]

$$R_r = \rho / \rho_0 = \exp \{ -8 (\pi \cdot \omega \cdot \sin \Psi \cdot f / c)^2 \}$$

ρ : 入射波의 크기

ρ_0 : 反射波의 크기

ω : 파고 (m)

Ψ : 入射角 (反射角)

f : 周波數 (hz)

c : 光速 (3×10^8 m/sec)

(다) 發散要素 (Divergence Factor)

地表가 球形이므로 反射波의 分散效果가 나타난다. 이 때문에 波의 強度를 떨어 뜨리며 multipath 效果를 감소시킨다. 그림 5에 나타난 發散要素는 다음 式으로 주어진다. [6]

$$D = 1 / \{ 1 + (2 \cdot R_2 \cdot R_3) / R (R_2 + R_3) \sin \Psi \}^{1/2}$$

여기서

R_2 : 안테나 ~ 反射點 사이의 거리

R_3 : 反射點 ~ 標的 사이의 거리

R : 地球 半徑

Ψ : 入射角 (反射角)

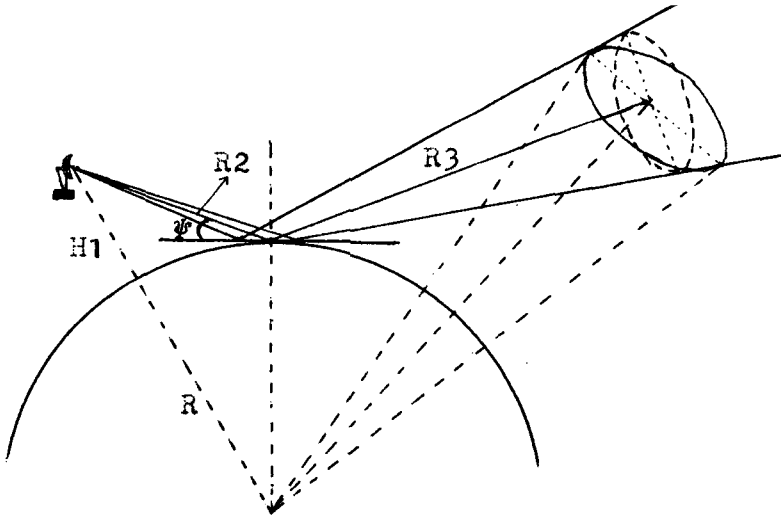


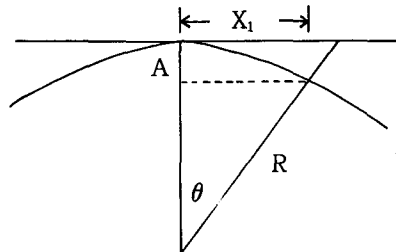
그림 5. 發散要素

(라) 位相差

入射波에 對한 反射波의 位相差는 앞에서 言及한 極性에 의한 位相差 (ϕ_v, ϕ_h)와 經路差 (ΔR)에 의한 位相差를 합쳐주면 된다.

$$\phi = 2\pi \cdot \Delta R / \lambda + \phi_v \text{ (또는 } \phi_h \text{)}$$

地球 曲率의 影響으로 標的의 高이 감소되는 效果를 가져온다. 이 때문에 經路差에서 이 效果를 고려해야 한다.



위에서 高이 감소는 $A = R(1 - \cos \theta)$ 이

된다. 그런데 $\cos\theta = (1 - \sin^2\theta)^{1/2}$
 $= 1 - \frac{1}{2} (X_1/R)^2$ 의
 근사식을 利用하면 $A = X_1^2/2R$ 이 된다.
 標的 높이 (H_2) 는 有效標的으로 다음과 같
 이 된다.

$$Y_1 = H_2 - (X_1)^2 / 2R$$

또 有效 標的거리 (X_2) 는 大略
 $X_1 \cdot H_1 / (H_1 + H_2)$ 으로 할 수 있으며 이
 것은 다음의 5차 方程式을 만족해야 한다.

(4)

$$(aX^5 + bX^4 + cX^3 + dX^2 + eX + f) /$$

$$(5aX^4 + 4bX^3 + 3cX^2 + 2dX + e) = 0$$

여기서

$$a = 1$$

$$b = -X_1$$

$$c = 2R^2$$

$$d = -R \cdot X_1 (3R + 2H_1)$$

$$e = -2R^2 \{R \cdot (H_1 + Y_1) + 2H_1 \cdot Y_1\}$$

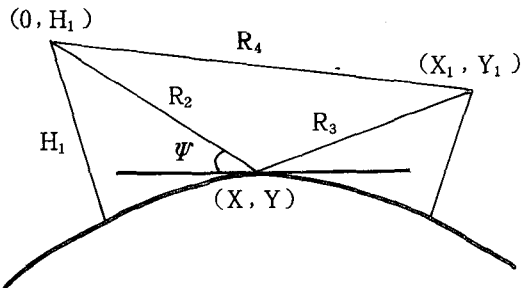
$$f = 2X_1 \cdot H_1 \cdot R^3$$

위 方程式을 만족하는 값을 X 라 하면 이
 때 地球 曲率의 影響으로 Y 좌표 값은

$Y = X^2/2R$ 가 된다. 그러므로 反射點
 좌표는 (X, Y) 가 된다. 이때 入射角(反射
 角) ψ 는 다음과 같다.

$$\psi = -\arctan(X/R) + \arctan[(H_1 - Y)/X]$$

지금 까지의 結果를 圖示하면 다음과 같다.



안테나에서 反射點까지의 距離 R_2 는
 $R_2 = \{X^2 + (H_1 - Y)^2\}^{1/2}$, 또 反射點에서
 標的까지의 距離는 $R_3 = \{(X_1 - X)^2 +$
 $(Y_1 - Y)^2\}^{1/2}$ 이 되고 안테나에서 標的까지

의 距離는 $R_4 = \{X_1^2 + (H_1 + Y_1)^2\}^{1/2}$ 이
 된다. 그러므로 直線經路와 反射된 經路사
 이의 차이는 다음과 같다.

$$\Delta R = R_2 + R_3 - R_4$$

(3) Sea Clutter Echo

(가) 海面에 의한 逆反射

海面을 여러 反射體의 集合으로 볼때 平均
 反射波의 크기는 아래 式으로 쓸 수 있다.

$$\bar{P}_r = P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sum_i \bar{S}_i / (4\pi)^3 \cdot R^4$$

여기서 $\sum_i \bar{S}_i$ 는 海面의 有效反射 斷面積
 이 된다. 그림 6에서 다음 式이 된다.

$$\sum_i \bar{S}_i = n \cdot S_o = n \cdot r \cdot \theta \cdot (c \cdot T / 2) \cdot \sec\phi$$

여기서

n : 海面 反射係數

r : 안테나 ~ 海面거리(m)

θ : 方位 빔幅 (rad)

c : 電磁波 速度

T : 펄스 幅

ϕ : grazing angle

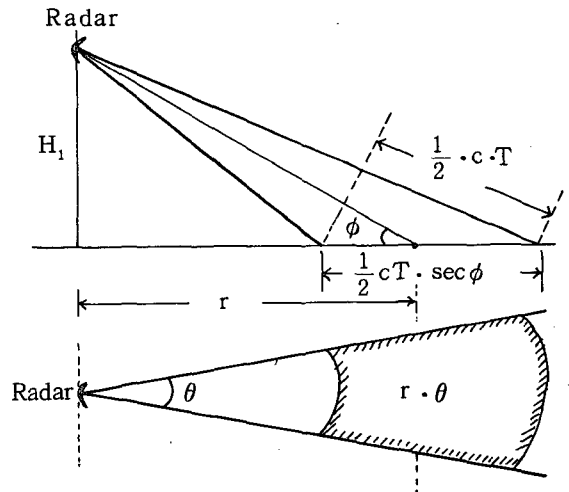


그림 6. Sea Clutter Area

Sea clutter 에 의한 反射 에너지의 크기를
 標的으로 부터의 反射 에너지 크기의 비로 나
 타내면 다음과 같다.

$$S_T = V_o \cdot F_o \cdot n \cdot S_o / S$$

여기서 V_0 는 可視要素, F_0 는 海面에 의 한 電波 傳播要素이다.

(나) Grazing angle

안테나 높이를 H_1 , 地球半徑을 R , 안테나 에서 海面 까지의 거리를 R_4 라고 할 때 그림 7에서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R_4 / \sin \theta = R / \sin \{ \pi / 2 - (\theta + \phi) \}$$

$$= (R + H_1) / \sin (\pi / 2 + \phi)$$

앞의 두 項을 다시쓰면

$$R_4 / \sin \theta = R / \cos (\theta + \phi)$$

$$= R / (1 - \sin^2 \theta)^{1/2} \cos \phi - \sin \theta \cdot \sin \phi$$

전개하면

$$R_4^2 \cos^2 \phi - R_4^2 \cos^2 \phi \sin^2 \theta = \sin^2 \theta (R + R_4 \sin \phi)^2$$

$$\sin^2 \theta = R_4^2 \cos^2 \phi / (R^2 + 2R \cdot R_4 \sin \phi + R_4^2)$$

이 式을 처음 式에 代入한다. 또 $\sin \phi = u$ 라 하면

$\tan \phi = u / (1 - u^2)^{1/2}$ 이므로 grazing angle 은 $\phi = \arctan \{ u / (1 - u^2)^{1/2} \}$ 이 된다.

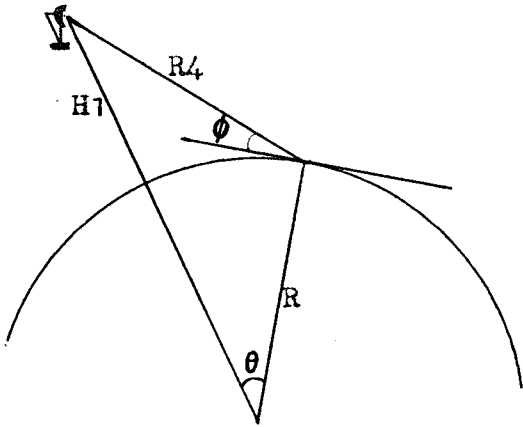


그림7 Grazing angle

(다) 海面 反射係數

海面 反射係數는 앞에서 言及 했듯이 레이 다의 周波數, 極性, 海上狀態와 grazing angle 의 함수이며 여기서는 實驗結果를 利用 하였다. [1]

(4) Noise Threshold Factor

거리가 增加함에 따라 受信되는 에너지를 거리의 4 제곱에 反比例 한다. 임의 거리에서의 反射 에너지의 크기를 自由空間에서의 反射 에너지의 크기로 나누면 거리에 따른 에너지 감소 요소인 noise threshold factor를 算出할 수 있다.

$$N_t = P_1 / P_0 = (R / R_0)^4$$

여기서

P_1 : 거리 R 에 있는 標的으로 부터 受信 에너지

P_0 : 自由空間 거리에 있는 標的으로부터 受信 에너지

R : 임의 거리

R_0 : 自由空間 거리

이 式을 db 값으로 고쳐서 使用하게 된다.

$$N_t (db) = 40 \log (R / R_0)$$

3. 探知모델

가. 自由空間에서의 深知거리

그림 3의 "BLAKE CHART"를 使用하여 算出하는데 全過程에서 regression 式의 상관계수는 99.99% 以上이 되도록 하였다.

(1) 入力要素

- Antenna Ohmic Loss (db)
- 送 - 受信線 Loss (db)
- Noise Figure (db)
- Transmitter Power (Kw)
- Pulse Length (μ sec)
- 送信 안테나 利得 (db)
- 受信 안테나 利得 (db)
- Target radar cross section (m^2)
- 周波數 (Mhz)
- Horizontal beam width (deg)
- 펄스 반복 周波數
- 안테나 回轉率 (r.p.m)
- 앞의 세 값 대신 visibility factor (db) 값을 入力시켜도 된다.
- Band width correction factor (db)

- 送信 損失要素 (db)
- 안테나 形態 損失要素 (db)
- Occasional loss factor (db)

(2) 出力

入力 및 計算된 結果가 BLAKE CHART 形態로 프린트되며 끝으로 自由·空間에서의 最大 探知거리도 出力된다. 또 大氣 吸收效果도 고려한 結果를 얻는다.

나. 海面深索 레이더의 深知거리

(1) 入力要素

Free space range 算出時 入力要素에 다음 사항이 추가된다.

- 안테나 높이 (m)
- 標的 높이 (m)
- 波高 (m) - (最大 높이의 1/3 값)
- 極 性

(2) 出力

거리에 따라 電波 - 伝播要素, Noise threshold factor, Sea clutter level 값이 차례로 프린트 된다.

標的 ~ 안테나 거리가 레이더 水平線 以上이 될 때 프로그램 進行이 終了된다.

(3) 그래프에 의한 結果 綜合

(가) 그래프상에 거리에 따른 電波 - 伝播要素의 db 값을 그린다.

(나) Noise threshold factor 의 값을 그린다.

(다) Sea clutter level 의 값을 그린다.

지금까지의 結果는 그림 8의 形態로 綜合된다. 여기서 보면 最大 探知거리는 R_{max} 點이 되며 Sea clutter에 의한 最小 探知 거리는 R_{min} 이 된다. 勿論 最大 探知거리 內에도 좁은 fade 領域이 있다.

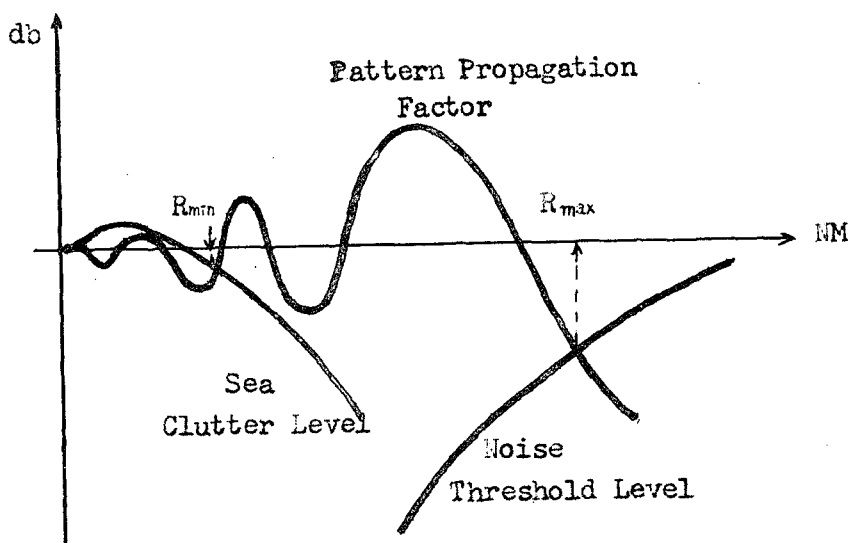
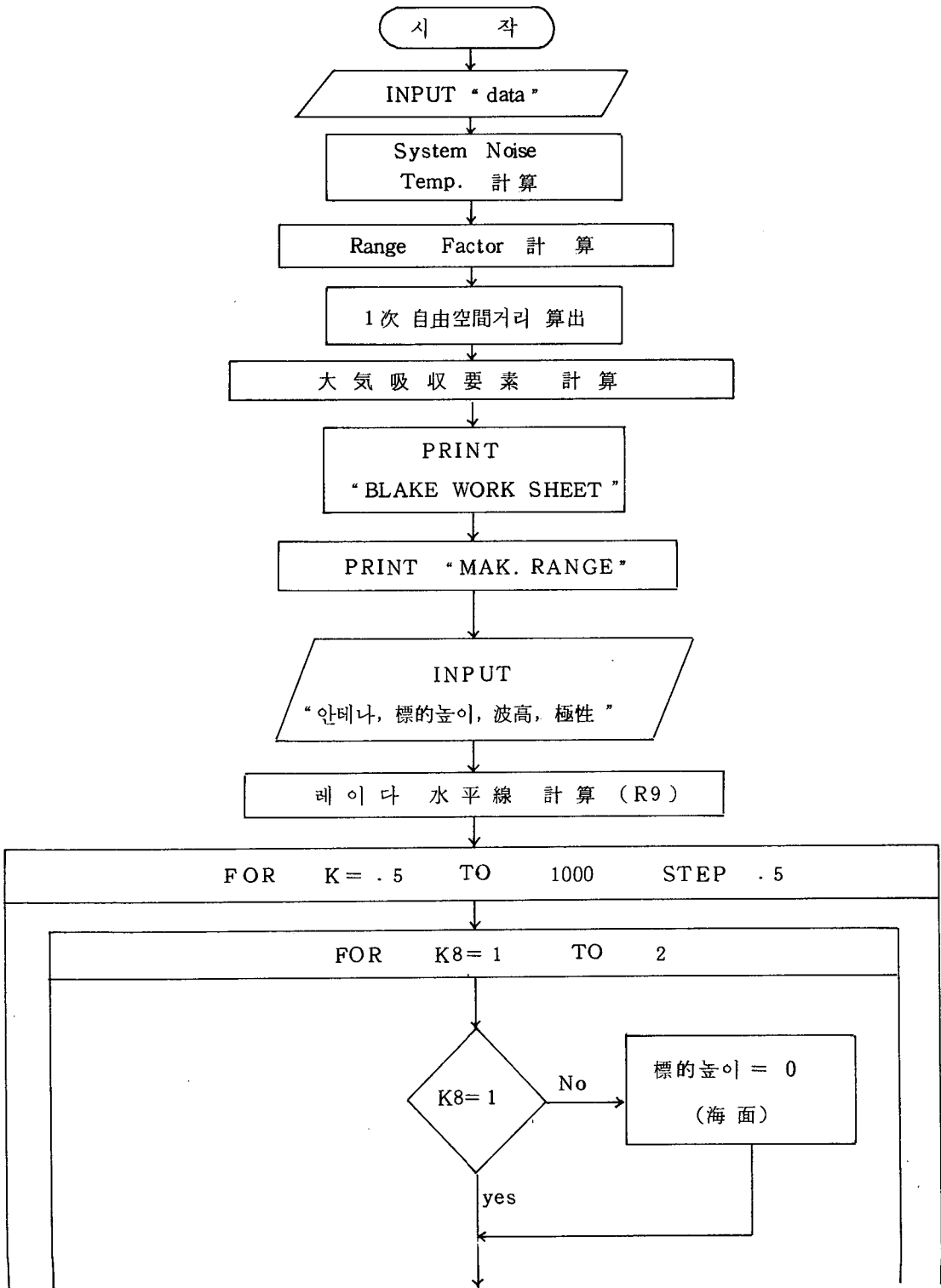
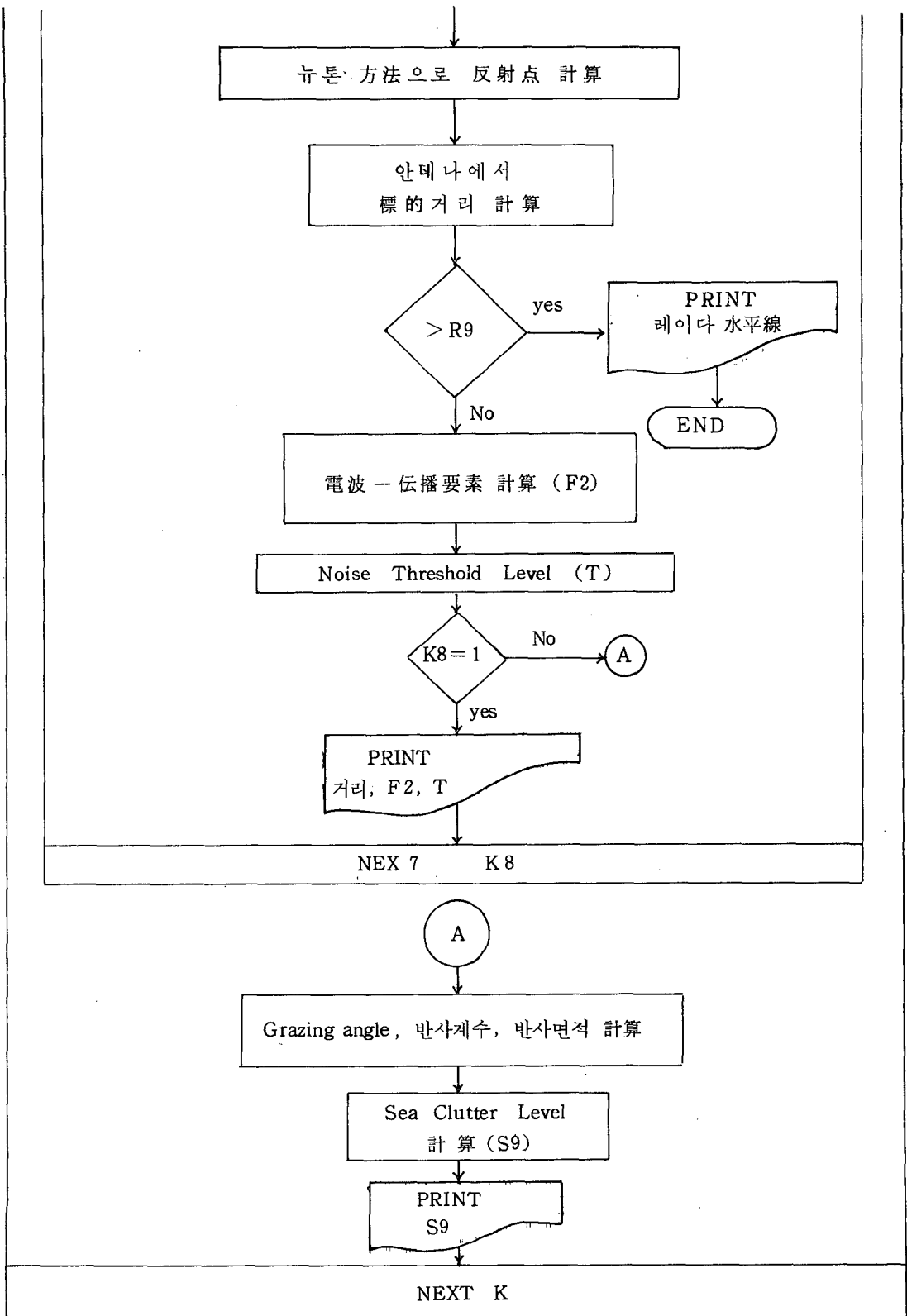


그림8 最大, 最小 深知거리

다. 컴퓨터 Flow Chart





4. 結 論

本 研究에서 만든 컴퓨터 모델은 表 1 에서 보듯이 實驗 結果와 상당히 一致함을 알 수 있다. 그러나 實際로는 더욱 많은 事例와 比較하여 修正이 必要할 것이다. 또한 레이더 性能을 算出하는데 있어서는 運用 要員의 能力, 레이더 自体의 性能, 氣象 要素, 探知 確率 등의 影響으로 理論과 實際 사이에는 커다란 誤差 要因이 있음을 알 수 있을 것이다.

그러므로 本 모델의 使用은 레이더 서로의 相對的인 性能을 比較하는데 그쳐야 할 것이며 最善의 레이더 評價方法은 많은 實際 結果에서 얻어야 한다.

表1. 實驗結果와의 比較

표적의 레이더 단면적(m ²)	표적높이 (m)	과 고 (m)	實驗結果 (NM)	모델結果 (NM)
9	1.5	1.2	15	15.2
29	1.5	1.2	-	17.8
58	1.5	1.2	18.6	18.7
80	6	0.75	26	25.3
160	6	2.4	25	25.6
500	6	0.75	27	26.8

* 註 : 實驗 結果는 1969 年 10 月, 11 月에 美國의 TRW SYSEMS GROUP 에 의하여 우리나라 西海岸에서 遂行된 Raytheon - X 레이더에 대한 것임.

(EGG TUBE "RADAR EVALUATION AND INSTALLATION" 參照)

앞으로 여러 實驗 結果와 比較하여 各 入力 變數의 알맞는 값을 算出하는 方法과 모델 自体의 補完이 要求되며 探知 確率問題, JAM-MING 效果, 降雨, 降雪 등의 氣象 效果를 追加로 고려하는 모델의 研究가 必要하다. 더 나아가 다른 目的으로 使用되는 레이더의 探知 모델 開發도 기대된다.

參 考 文 獻

1. D. E. Kerr, "SHORT WAVE PROPAGATION and RADAR DESIGN PRINCIPLE"
2. Haeff, A. V., "Minimum Detectable Radar Signal and Its Dependence upon Parameters of Radar Systems" Proc. IRE 34 Nov. 1946
3. LCdr Kerry Kirk, USN., "A RADAR DETECTION MODEL" CNA, SYSTEMS EVALUATION GROUP 1977.
4. L. V. Blake, "A Guide to Basic Pulse - Radar - Maximum - Range Calculation", NAVAL RESEARCH LABORATORY. 1969
5. North, D.O., "The Absolute Sensitivity of Ratio Receivers", RCA Review 6 (No 3) Jan. 1942
6. Skolnik, M.I., "Introduction to Radar Systems", McGraw - Hill, New York 1962
7. Skolnik, M.I., "Radar Handbook", McGraw - Hill, New York 1970.

부록 : 컴퓨터 프로그램

```

10 REM *** PULSE RADAR MAX. RANGE CAL. MODEL. ***
20 REM MADE BY LTJG. K.P. CHAE ROKN S.A. GROUP (1980.2)
30 DIM L1(2),L2(2),N(2),P(2),S(2),T1(2),T4(2)
40 READ L1(1),L2(1),N(1),T0,P(1),P5,G1,G2,S(1),F0,U5,F9,I
,C,L3,L4,L5,C1
50 DATA .5,2,8,290,750,.25,42,42,2,9375,1.5,2000,10,0,2,2
,0,4.45
60 GOSUB 150
70 PRINT "*ANTENNA OHMIC LOSS(DB)";L1(1);:INPUT L1(1)
80 PRINT "*TR.-RE. LINE LOSS(DB)";L2(1);:INPUT L2(1)
90 PRINT "*NOISE FIGURE(DB)";N(1);:INPUT N(1)
100 L1(2)=10*(L1(1)/10);L2(2)=10*(L2(1)/10);N(2)=10*(N(1)/
10)
110 T1(1)=91.12602-8.9466*10*(-4)*F0+3.72242*10*(-7)*F0+2
120 IF F0<1000 THEN 2210:IF F0>12500 THEN 2210
130 IF F0<=10499 THEN 170
140 IF F0>=10500 THEN 150:T1(1)=T1(1)+48:GOTO 170
150 IF F0>11000 THEN 160:T1(1)=T1(1)+134:GOTO 170
160 T1(1)=T1(1)+125
170 T1(2)=(0.876*T1(1)-254)/L1(2)+290
180 T2=T0*(L2(2)-1):T3=T0*(N(2)-1)
190 T4(1)=T1(2)+T2+L2(2)*T3
200 PRINT "* DR (NOISE TEMP.(K))";T4(1);:INPUT T4(1)
210 PRINT "TRANSMITTER POWER(KW)";P(1);:INPUT P(1)
220 PRINT "PULSE LENGTH (USEC)";P5;:INPUT P5
230 PRINT "TR.ANTENNA GAIN(DB)";G1;:INPUT G1
240 PRINT "RE.ANTENNA GAIN(DB)";G2;:INPUT G2
250 PRINT "TARGET RADER CROSS SECTION(M^2)";S(1);:INPUT S(
1)
260 PRINT "FREQUENCY (MHZ)";F0;:INPUT F0
270 PRINT "*HOR. BM. WIDTH(DEGREE)";U5;:INPUT U5
280 PRINT "*PULSE REPETION FREQUENCY";F9;:INPUT F9
290 PRINT "*ANTENNA ILLUMINATION RATE(R.P.M)";I;:INPUT I
300 A=64.242016:B=-.342728:N1=U5*F9/6/I:V0=1/B*LDC(N1/A):R
EM N1=NO. OF PULSE
310 PRINT "* DR (VISIBILITY FACTOR(DB))";V0;:INPUT V0
320 PRINT "BANDWIDTH CORRECTION FACTOR(DB)";C;:INPUT C
330 PRINT "TRANSMITTING LOSS FACTOR(DB)";L3;:INPUT L3
340 PRINT "ANTENNA PATTERN LOSS(DB)";L4;:INPUT L4
350 PRINT "OCCASIONAL LOSS FACTOR(DB)";L5;:INPUT L5
360 P(2)=10*LDC(P(1))/LDC(10);P9=10*LDC(P5)/LDC(10);S(2)=1
0*LDC(S(1))/LDC(10)
370 F3=-20*LDC(F0)/LDC(10);T4(2)=-10*LDC(T4(1))/LDC(10)
380 A=P(2)+P9+G1+G2+S(2)+F3+T4(2)-V0-C-L3-L4-L5+C1
390 R0=10*(2+A/40)
400 Z=INT(F0/1000+0.5)
410 ON Z GOTO 420,430,440,450,460,470,480,490,500,510,520,

```

```

530,540
420 Y=-.0155392+.0213025*RO-3.22129*10+(-5)*RO:GOTO 550
430 Y=-.0414828+.0284612*RO-5.38690*10+(-5)*RO:GOTO 550
440 Y=-.0362745+.0304464*RO-5.68978*10+(-5)*RO:GOTO 550
450 Y=-.0368627+.0325737*RO-6.25700*10+(-5)*RO:GOTO 550
460 Y=-.0404534+.0346121*RO-6.83648*10+(-5)*RO:GOTO 550
470 Y=-.0416667+.0378643*RO-7.97619*10+(-5)*RO:GOTO 550
480 Y=-.0429779+.0409114*RO-8.99680*10+(-5)*RO:GOTO 550
490 Y=-.0517279+.0438782*RO-9.90021*10+(-5)*RO:GOTO 550
500 Y=-.0565686+.0486086*RO-1.14881*10+(-4)*RO:GOTO 550
510 Y=-.0585049+.0531229*RO-1.29447*10+(-4)*RO:GOTO 550
520 Y=-.0633333+.0585794*RO-1.38725*10+(-4)*RO:GOTO 550
530 Y=-.0659804+.0640366*RO-1.47969*10+(-4)*RO:GOTO 550
540 Y=-.0809436+.0704497*RO-1.63988*10+(-4)*RO
550 Y=10+(-Y/40)
560 R=RO*Y
570 GOSUB '51
580 PRINT HEX(0A0A0A0A0A0E);TAB(10);"*BLAKE WORK SHEET*";P
PRINT :PRINT :PRINT
590 PRINTUSING 600:PRINTUSING 610:PRINTUSING 620:PRINT :PR
INTUSING 630:PRINTUSING 640
600 %-----
610 % DETECTION PR.=50% FALSE ALARM RATE=10+(-6) ANT.
ELEVATION ANG.=0
620 %-----
630 % SYSTEM NOISE TEMP. RANGE FACTOR CONVER
T VALIE
640 %=====
===
650 PRINTUSING 660,P(1),P(2):PRINTUSING 670,L1(1),L1(2),P5
,P9:PRINTUSING 680,T1(1),G1:PRINTUSING 690,G2:PRINTUSING 7
00,T1(2),S(1),S(2):PRINTUSING 710,F0,F3:PRINTUSING 720,L2(
1),L2(2),T4(1),T4(2)
660 % (1) ANTENNA N.T. Pt(KW)=####.# 10LOG(
Pt) ###.##
670 % OHMIC La(##.#);#.### T(USEC)=##.## 10LOG(
T) -###.##
680 % LOSSLESS A(Ta')=###.# Gt Gt(DB)
###.##
690 % Ta=(.876*Ta'-254)/La+290 Gr Gr(DB)
###.##
700 % =####.#( S(M+2)=###.# 10LOG(
S) ###.##
710 % (2) TR.-LINE N.T. F(MHZ)=####.# -20LOG(
F) -###.##
720 % LINE Lt(##.#);#.### Te(K)=####.# -10LOG(
Ts) -###.##
730 PRINTUSING 740,T2,VO,-VO:PRINTUSING 750,C,-C:PRINTUSIN
G 760,N(1),N(2),L3,-L3:PRINTUSING 770,L4,-L4:PRINTUSING 78
0,T3,L5,-L5:PRINTUSING 790,C1:PRINTUSING 800,T4(1),A:PRINT
USING 810:PRINT :PRINTUSING 820,RO:PRINT :PRINTUSING 830,Y

```



```

:PRINT :PRINT
740 %Tt=290*(Lt-1)=###.##          Vc=-###.##          -Vc(DB)
    -###.##
750 % (3) RECEIVER N.T.           Cb= ###.##          -Cb(DB)
    -###.##
760 %N.FIG.=(##.##);##.###        Lt=###.##          -Lt(DB)
    -###.##
770 %Te=290*(N.F-1)               Lp=###.##          -Lp(DB)
    -###.##
780 % =#####.##K                 Lx=###.##          -Lx(DB)
    -###.##
790 %Ts=Ta+Tr+Lt*Te               RANGE EQ. CONST (40*LDC(1.
292))  ###.##
800 % =#####.##K                 ===== Add. =====
== A= -###.##
810 %-----
820 %          1ST FREE SPACE RNG(10*(2+A/40))=###.## NM
830 %          ATMOSPHERIC-ABSORPTION LOSS FACTOR=###.##
840 PRINT HEX(OE);TAB(5);"FREESPACE MAX.RANGE=";PRINTUSIN
G 850,R
850 % ###.##(NM)
860 PRINT HEX(0707070A0A0A0C)
870 REM ===== REAL SPACE MAX.RANGE CALCULATION =====
880 DIM A1$(5),R1$(5),B$30,C$30,A(12,4),B(12,4)
890 R1=360*60*1852*4/2/#PI/3
900 READ H1,H2,W,K2,A1$(1),A1$(2),B0
910 DATA 23.7,1.5,.8,0,"HORIZONTAL","VERTICAL",3.25
920 GOSUB '50:PRINT HEX(03030101)
930 PRINT "HEIGHT OF ANTENNA(M)";H1;:INPUT H1
940 PRINT "HEIGHT OF TARGET(M)";H2;:INPUT H2
950 PRINT "HEIGHT OF WAVE(M)";W;:INPUT W
960 PRINT "POL.(H=>0,V=>1)";K2;:INPUT K2:A#=A1$(K2+1)
970 PRINT "IF BANDWIDTH(MHZ)";B0;:INPUT B0
980 INPUT "TYPE OF RADAR = ";B$
990 INPUT "NAME OF SITE = ";C$
1000 GOSUB '51
1010 N8=-114+10*LDC(B0)/LDC(10)+N(1);REM THER.NOISE POWER
1020 PRINT HEX(OE);TAB(3);B$;PRINT HEX(OE);TAB(3);C$;PRINT

1030 PRINTUSING 1040,H1,H2:PRINTUSING 1050,W,U5:PRINTUSING
1050,F9,I:PRINTUSING 1070,A$,B0:PRINTUSING 1080,N8:PRINT
1040 % ANTENNA HEIGHT =###.##M    TARGET HEIGHT =##.##M
1050 % RMS WAVE HEIGHT = ##.##M    HOR. BM. W. =##.###(DEC.)
1060 % PULSE R.F. =#####.##(PPS)  ANT.R.P.M= ##.##(R.P.M)
1070 % POLARIZATION =##### IF BANDWID. =###.##(MHZ)
1080 % THERMAL N.P.(DB)=-###.##
1090 PRINTUSING 1100:PRINTUSING 1110:PRINT
1100 % RANGE          PRPGTN FACTOR    NOISE THRESHOLD
SEA CLUTTER        TAR.RE.SIG. SEA RE.SIG.

```

```

1110 Z (N/M)          (dB)          (DB)
      (DB)          (DB)          (DB)
1120 F1=F0*10↑6
1130 R9=SQR(2*R1)*(SQR(H1)+SQR(H2))
1140 H9=H2
1150 S0=-174+10*LDC(P(1)*1000)/LDC(10)+G1+G2+20*LDC(3*10↑1
0/F1)/LDC(10)-L3-L4-L5
1160 GOSUB '100
1170 FOR K=.5 TO 1000 STEP .5
1180 FOR KB=1 TO 2
1190 IF KB=2 THEN 1200:H2=H9:GOTO 1210
1200 H2=0
1210 X1=K*1852
1220 Y1=-X1↑2/2/R1+H2
1230 A0=1
1240 A1=-X1
1250 A2=2*R1↑2
1260 A3=-R1*X1*(3*R1+2*H1)
1270 A4=-2*R1↑2*(R1*(H1+Y1)+2*H1*Y1)
1280 A5=2*X1*H1*R1↑3
1290 REM SOL. OF 5TH ORDER EQUATION BY NEWTON'S METHOD
1300 D2=0
1310 X2=X1*H1/(H1+H2)
1320 X2=X2+D2
1330 D2=-(A0*X2↑5+A1*X2↑4+A2*X2↑3+A3*X2↑2+A4*X2+A5)/(5*A0*
X2↑4+4*A1*X2↑3+3*A2*X2↑2+2*A3*X2+A4)
1340 IF ABS(D2)<.01 THEN 1350:GOTO 1320
1350 X3=X2
1360 Y2=-X3↑2/2/R1
1370 REM REFLECTION POINT COORDINATE IS (X3,Y2)
1380 P1=-ARCTAN(X3/R1)+ARCTAN((H1-Y2)/X3)
1390 R2=SQR(X3↑2+(H1-Y2)↑2)
1400 R3=SQR((X3-X1)↑2+(Y2-Y1)↑2)
1410 R4=SQR(X1↑2+(Y1-H1)↑2)
1420 IF R4+2>R9 THEN 1430:GOTO 1450
1430 PRINT USING 1440,R9/1852+.005,K1+.005:GOTO 1280
1440 Z          *** RADAR HORIZON = ###.## N/M ***
*** TRANSITION RANGE =###.##(NM) ***
1450 D3=R2+R3-R4
1460 D1=1/SQR(1+2*R2*R3/R1/(R2+R3)/SIN(ABS(P1)))
1470 N=F0*N*3.281*SIN(P1):IF N<100 THEN 1480:U1=.9092*EXP(
-.007454*N):GOTO 1490
1480 U1=EXP(-2*(#PI*N*SIN(P1)*F1/3/10↑8)↑2)
1490 NO=F0/1500:IF NO<2 THEN 1500:NO=2
1500 ON NO+1 GOTO 1510,1520,1530
1510 E1=80:S1=4.3:GOTO 1540
1520 E1=80-.00733*(F0-1500):S1=4.3+.00148*(F0-1500):GOTO 1
540

```

```

1530 E1=59-.00243*(F1/10+6-3000):S1=6.52+.001314*(F1/10+6-
1540 E2=180*10+8*S1/F1
1550 REM EC=(E1-J*E2) IS COMPLEX DIELECTRIC CONSTANT
1560 A6=E1-COS(P1)+2
1570 B1=-E2
1580 REM (A7+jB2) IS COMPLEX SQRT OF (A6+jB1)
1590 A7=+SQR((A6+SQR(A6+2+B1+2))/2)
1600 B2=-SQR((-A6+SQR(A6+2+B1+2))/2)
1610 Z1=SIN(P1):IF K2>=.5 THEN 1640
1620 G1=SQR(((Z1-A7)+2+B2+2)/((Z1+A7)+2+B2+2))
1630 P2=ARCTAN(B2/(A7+Z1))-ARCTAN(B2/(A7-Z1))+#PI:GOTO 167
0
1640 G1=SQR(((E1*Z1-A7)+2+(E2*Z1+B2)+2)/((E1*Z1+A7)+2+(E2*
Z1-B2)+2))
1650 P2=-ARCTAN((B2+E2*Z1)/(A7-E1*Z1)) + ARCTAN((B2-E2*Z1)
/(E1*Z1+A7))+#PI
1660 IF P2<#PI THEN 1670:P2=P2-#PI
1670 A8=P2+2*#PI*DB/(3*10+8/F1):REM PHASE DIFF.
1680 R5=D1*G1*U1
1690 F2=(1+R5+2+2*R5*COS(A8))+2
1700 IF F2<>0 THEN 1710: F2=.0000001
1710 IF K8=2 THEN 1740:PRINTUSING 1720,K,10*LDC(F2)/LDC(10
),40*LDC(K/R0)/LDC(10);
1720 Z ###.##          -###.###          -##.##
1730 NEXT K8
1740 U6=H1/R4*(1+.5*H1/R1)-R4*.5/R1
1750 P6=ARCTAN(U6/SQR(1-U6+2)):REM GRAZING ANGLE(RAD)
1760 A8=R2*U5*(#PI/180)*3*10+8*P5*10+(-6)/2/COS(P6):REM EF
F.REFL.AREA OF SEA
1770 A9=10*LDC(A8)/LDC(10)
1780 P6=P6*180/#PI:IF P6>.05THEN 1790:P6=.05
1790 N9=-A*P6+B:IF N9>-100 THEN 1800 :N9=-99.99:REM SEA R
EF. COEFF.
1800 S9=10*LDC(F2)/LDC(10)+N9+A9+V0-S(2):REM SEA CLUTTER E
CHO
1810 Q1=50+S(2)-40*LDC(K)/LDC(10):REM TARGET RETURN SIG.
1820 Q2=50+N9+A9-40*LDC(K)/LDC(10):REM SEA CLUTTER POWER
1830 K1=4*H1*H9*F1/(3*10+8)/1852:REM TRANSITION RNC.(NM)
1840 IF K<K1 THEN 1850:Q1=Q1-40*LDC(K)/LDC(10)+40*LDC(K1)/
LDC(10):Q2=Q2-40*LDC(K)/LDC(10)+40*LDC(K1)/LDC(10)
1850 PRINTUSING 1860,S9,Q1,Q2
1860 Z          -###.###          -###.##          -###.##
1870 NEXT K
1880 PRINT HEX(07070707070A0A0A0C)
1890 END
1900 DEFFN'100:REM SEA REFLECTION COEFF. CALCULATION
1910 FOR I=1 TO 12:FOR J=1 TO 4:READ A(I,J),B(I,J):NEXT J:
NEXT I

```

```

1920 REM HORIZONTAL PDL.
1930 REM F(MHZ)<1000-2000>           <2000-4000>           <4
000-8000>           <8000-12000>
1940 DATA 83.760699, -.1427297, 75.310754, -.0795502, 70.704
955, -.0950587, 66.413160, -.0879527 :REM SEA STATE 0
1950 DATA 73.675472, -.1294274, 66.506948, -.0865633, 60.916
433, -.0780280, 56.518665, -.0920550 :REM SEA STATE 1
1960 DATA 69.146880, -.1316004, 58.913702, -.0904677, 53.403
449, -.0638202, 48.905905, -.0682233 :REM SAE STATE 2
1970 DATA 63.538310, -.1290941, 51.631360, -.0903203, 46.189
775, -.0734848, 42.446926, -.0690151 :REM SEA STATE 3
1980 DATA 53.554831, -.0904707, 45.404834, -.0700764, 43.184
408, -.0863405, 38.486352, -.0623534 :REM SEA STATE 4
1990 DATA 53.170605, -.1107682, 43.788615, -.0767862, 36.718
849, -.1046554, 34.970713, -.0791651 :REM SEA STATE 5
2000 REM VERTICAL PDL.
2010 DATA 70.189560, -.1645560, 67.496457, -.1110450, 64.186
699, -.0624390, 62.335847, -.1040891 :REM SEA STATE 0
2020 DATA 65.058120, -.1422880, 57.056890, -.0788456, 54.814
749, -.0795528, 51.469957, -.0925245 :REM SEA STATE 1-EJ2030
DATA 61.803087, -.1915850, 53.629691, -.1326404, 49.387793,
-.1017470, 45.520046, -.0991270 :REM SEA STATE 2
2030 DATA 61.803087, -.1915850, 53.629691, -.1326404, 49.387
793, -.1017470, 45.520046, -.0991270 :REM SEA STATE 2
2040 DATA 54.188142, -.1870570, 48.726805, -.1419852, 43.813
539, -.1087058, 40.700747, -.0971809 :REM SEA STATE 3
2050 DATA 45.505871, -.1526105, 44.400392, -.1473763, 41.394
924, -.1255076, 38.451862, -.1043649 :REM SEA STATE 4
2060 DATA 44.278170, -.2833470, 40.646860, -.1478282, 36.111
985, -.0956984, 34.235784, -.1231051 :REM SEA STATE 5
2070 IF W>0 THEN 2080:I=1:GOTO 2130
2080 IF W>0.3 THEN 2090:I=2:GOTO 2130
2090 IF W>.92 THEN 2100:I=3:GOTO 2130
2100 IF W>1.52 THEN 2110:I=4:GOTO 2130
2110 IF W>2.44 THEN 2120:I=5:GOTO 2130
2120 IF W>3.66 THEN 2210:I=6
2130 IF FO<1000 THEN 2210
2140 IF FO>2000 THEN 2150:J=1:GOTO 2180
2150 IF FO>4000 THEN 2160:J=2:GOTO 2180
2160 IF FO>8000 THEN 2170:J=3:GOTO 2180
2170 IF FO>12500 THEN 2210:J=4
2180 IF K2<.5 THEN 2190:I=I+6
2190 A=A(I,J):B=B(I,J)
2200 RETURN
2210 PRINT HEX(0707070707):GOSUB '50:PRINT "SORRY! THIS DA
TA IS NOT FIF IN THIS PROGRAM":GOTO 1890
2220 DEFFN'50:SELECT PRINT 005(64):RETURN
2230 DEFFN'51:SELECT PRINT 215(132):RETURN

```