

CN5-(8) レーダの取り扱い

v9.2 Feb.2019

【目的】

レーダシステムの構造原理を理解し、装置の取り扱い方法を取得する。

【原理】

レーダとは Radio Detection And Ranging (電波による探知および測距)の頭文字をとったものである。類似のソナは Sound Navigation And Ranging (音波による航行および測距)であり、電波の減衰が激しい水中では効率の良い手法である。レーダは電波(主にマイクロ波)を照射してターゲットを検出し、その距離と方位の測定を行う装置である。具体的には送信した電波がターゲット表面で反射され、再びアンテナに戻ってくるまでの往復時間からターゲットまでの距離を測り、その瞬間に向いているレーダアンテナの方向からターゲットの方位を測るものである。したがって、**距離測定と方位測定**がレーダの基本である。

・距離測定の原理1(パルスレーダ方式)

山に向かって大声で叫ぶとエコー(こだま, 反響)が返ってくる。いま、発声からエコーを聞くまでの時間を 2 秒とすれば、声は $340 \times 2 = 680 \text{ m}$ (ただし、音速は 340 m/s とする)の距離を伝搬したことになる。したがって、発声者と対面している山との距離 R は 680 m の半分 $R = 340 \text{ m}$ である。レーダは図 1 左のように音速を光速に置き換えて考えるだけである。 $t = 0 \text{ s}$ で送信アンテナから電波を発射し、電波が物体で反射されて再びアンテナに戻ってくるまでの時刻を $\Delta t [\text{s}]$ とするとき、物体までの距離 $R [\text{m}]$ は光速を $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ とすると(1)で与えられる。

$$R = \frac{1}{2} c \Delta t \quad (1)$$

一般的なレーダは送信と受信を同一のアンテナで行うため、送信波と受信波が重ならないように**繰り返しパルス波**が使われている(図 2 参照)。これは電話に例えると、こちらが話しているのに相手も同時に話し出すとわけがわからなくなるのを防ぐのと同じである。このパルス波の幅は $\tau = 0.1 \sim 1 \mu\text{s}$ 程度であり、繰り返し周期は $T = 100 \sim 1000 \mu\text{s}$ 程度である。繰り返し周期 T は十分遠方からのエコーを開けるようにパルス幅 τ に比べて極めて長くなっている。このように、最も一般的なレーダ波はマイクロ波がパルス変調されたものである。

検討 1 送信パルス幅を $\tau [\mu\text{s}]$ としたとき、電波の照射軸上に存在する隣接した 2 つのターゲットを識別できる距離 $\Delta L_{\min} [\text{m}]$ はどのような式で表現されるか考えよ。(ヒント: 図 3)

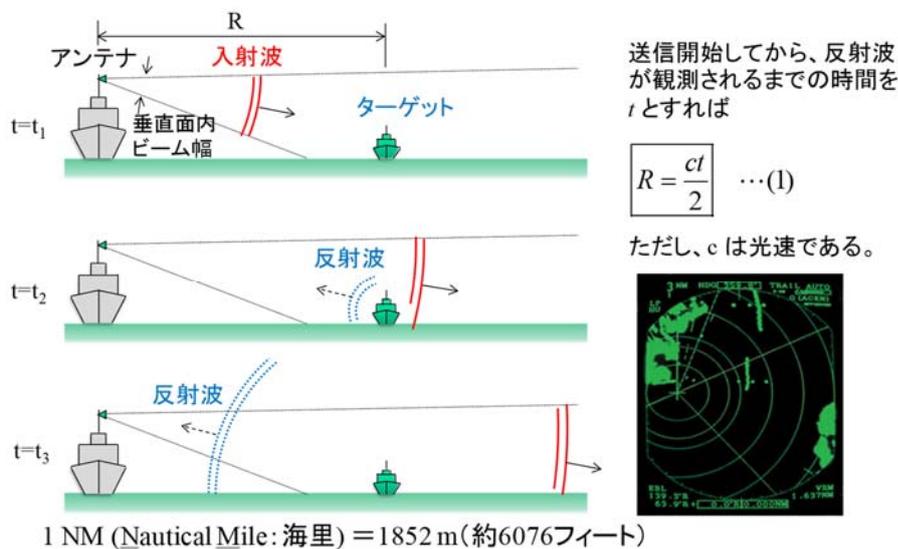


図 1. 送信アンテナから発射されたパルス波が、ターゲットで反射されて送信アンテナに戻るまでの時系列イメージ

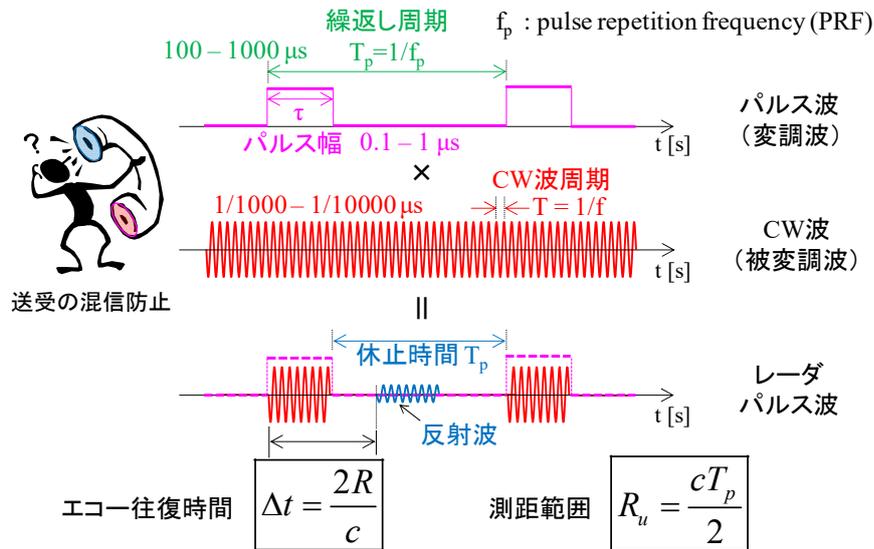


図2. レーダで使用されるパルス波形のイメージ。横軸は時間 t 、縦軸は振幅を表す。往復に要した時間から距離 R を求めることができる。休止時間に反射波を受信する。

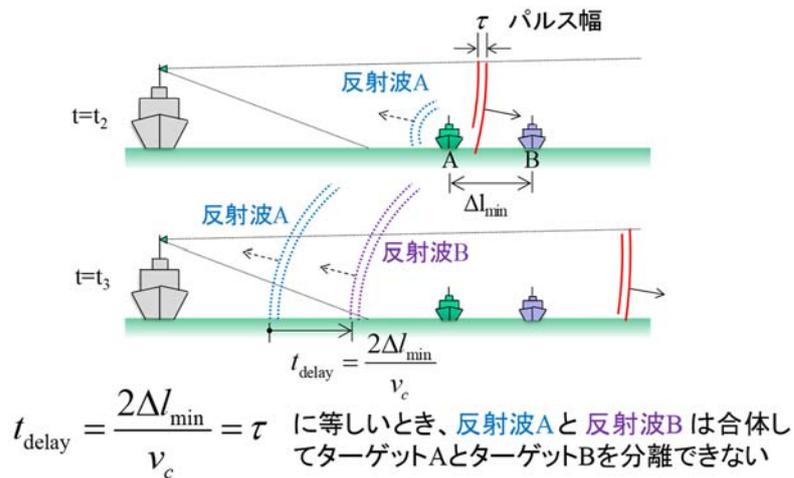


図3. 隣接する2つのターゲットを識別できる限界距離反射波Bは反射波Aに比べて $t=2\Delta l_{\min}/c$ だけ遅れて伝搬する。これがパルス幅 τ に等しいと反射波AとBはくっついて区別できなくなる。

・距離測定の原理2 (FMCW 方式)

パルスレーダ方式とともに良く使われる距離測定方法として、Frequency Modulated - Continuous Wave (FM-CW) 方式がある。この方式は送信アンテナの周波数 f_t [Hz] をある帯域幅 f_w [Hz] で掃引し、ある時刻における送信周波数 f_t [Hz] と受信周波数 f_r [Hz] との周波数差 f_b [Hz] を計測し、図4の式(3)の関係を使ってターゲットまでの距離 R [m] を求めている。パルスレーダ方式が送受パルスの時間差を測定する時間領域測定であるのに対して、FMCW方式は送受の周波数差を測定する周波数領域測定と言える。

・方位測定の原理

方位測定の概念を図5に示す。アンテナが扇形のビーム形状 (ファンビームと呼ぶ) を有する場合、これを方位方向に 360° 回転させて回転角度を把握しておけば、どの方位の反射波かを見分けることができる。しかし、遠方の反射波を完全に受信し終わるまでにアンテナ方位が変わってしまうと不都合が生じる。即ち、最も遠方にあるターゲットまでの往復に要する時間内は、アンテナが静止している必要がある。ターゲットの最大探知距離を R_{\max} とすると、往復に要する時間は

$$t = \frac{2R_{\max}}{c} \quad (2)$$

であるから、最大探知距離 R_{\max} を考えてアンテナの回転速度を決める必要がある。アンテナの回転速度がこの時間に比べて十分

に小さければ、距離測定を行っている間にアンテナは静止していると見なせる。なお、船舶レーダのファンビームの半値ビーム幅は垂直 20° 、水平 1° 程度である。

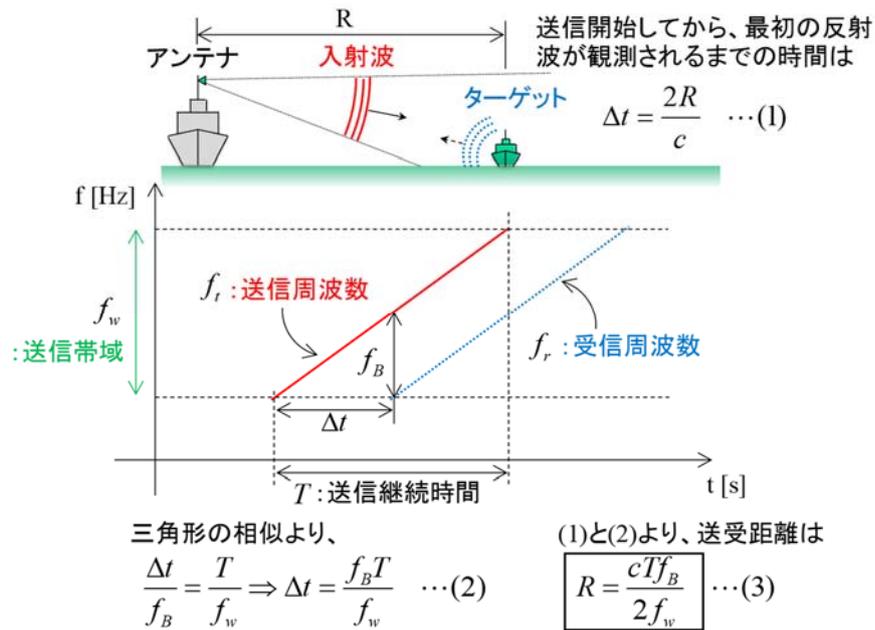


図4. FMCW方式による距離測定の原理

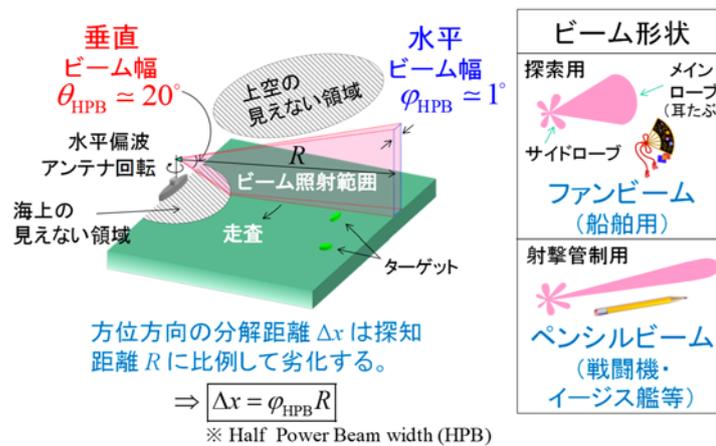


図5. 船舶探知を目的としたレーダで使用されるアンテナビーム形状のイメージ。アンテナを 360° 回転させることにより、ビーム照射範囲内の反射波を受信できる。

【測定系】

パルスレーダ測定回路の一例を図6に示す。まず、同期信号発生器で発生したパルス信号は、変調器で大電流パルスに変換される。そしてパルスの継続時間だけマグネトロンが発振し、必要な送信電力を確保した後、送受切り替えスイッチを通して送信アンテナへ送られる。送受切り替えスイッチの役割は、非常に強い送信パルス電力が受信回路に侵入して内部回路(とくにミキサ)を損傷するのを防ぐためである。一方、パルスの休止時間にアンテナに再来した反射波は、送受切り替えスイッチを通して増幅器へ送られ、ヘテロダイン方式を利用して映像信号(直流電圧)に変換される。また、最初にパルスを発生した同期信号発生器は反射波の到来時間を測定するための基準となっており、ここから距離信号となる掃引電圧が作られる。仮に、オシロスコープの横軸に距離信号、縦軸に映像信号をプロットすると、ある方位におけるエコーを表示することができる。

また、図7にシステム全体像を示す。エコーのみを表示する1次レーダ、対象物の情報を提供する2次レーダ、自分の位置を把握するGPSの3つのシステムがセットになっている。

Radar1

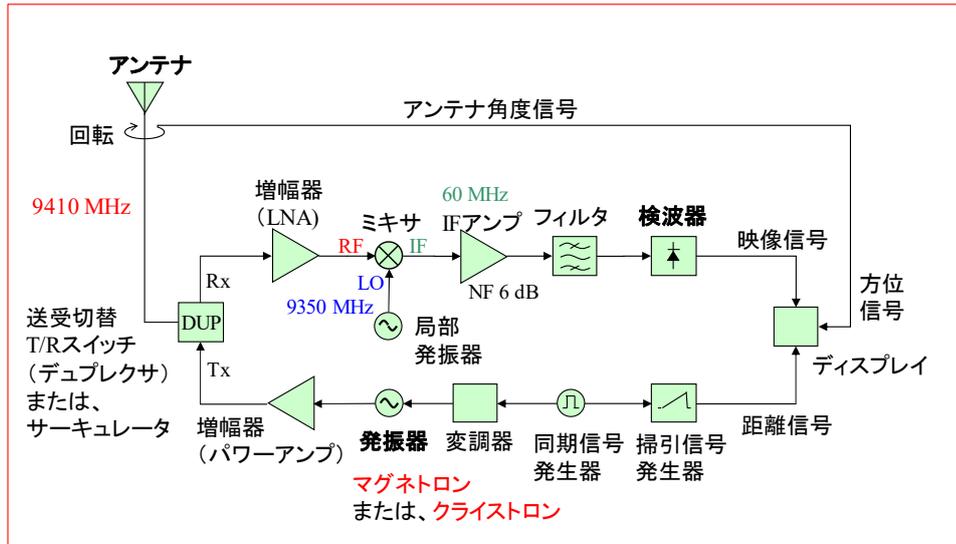


図6. 測定回路の一例。ディスプレイに向かう信号3系統のうち、上は現在のアンテナ方位を表す信号、中央は反射エコーの強さを表す信号、下は送信パルスを送る瞬間を基準とした時間信号(距離信号)を表す。

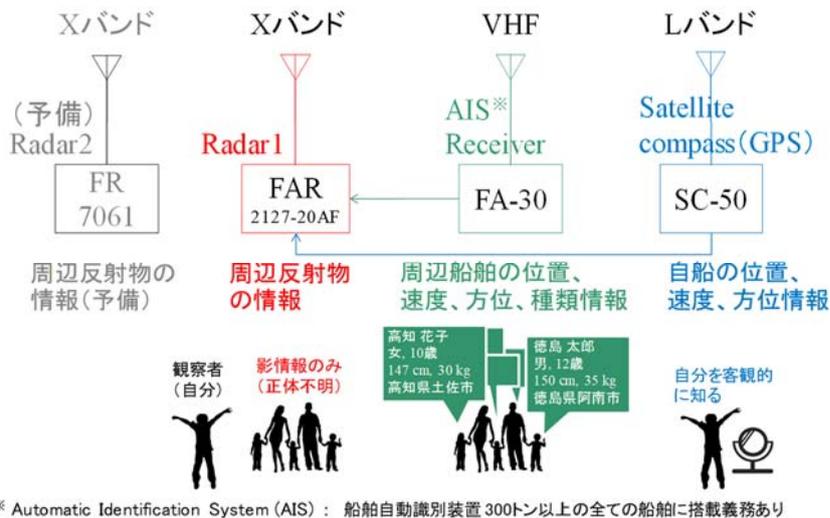


図7. システム全体概要。Radar1は上図のXバンド一次レーダの測定回路のみを示している。(システム全体は人間と非常によく似ている。1次レーダは自分を中心とした世の中の見方で、偽像や虚像に加えて死角といった間違いがよく起きる。)

【使用機材】

- (1) レーダ映像装置, FURUNO, 70MOPON, 25 kW, 9410 MHz (取扱説明書 FAR-2107/2807 シリーズ)
- (2) レーダ映像装置, FURUNO, 50MOPON, 4.9 kW, 9410 MHz (取扱説明書 FR-7061)
- (3) 縮尺地図2枚(大 1/300,000と小 1/50,000), 定規2本

【注意事項】

- (1) 取り扱い説明書を熟読すること。特に始動時(装置のウォームアップ)と終了時の決められた手続きは遵守すること。

【レポートについて】

- (1) 実習結果や測定結果に関する表やグラフは必ず各自で作成すること。
- (2) 実験テキストのワードファイルはダウンロードできるが、原理と測定系の単なるコピー貼り付けは不可です。式の導出過程等を確認して自分のレポートを作成すること。
- (3) 実験テキストの間違い訂正や改善など、今後の学生実験にとって有益なアドバイスがあれば加点される。

【測定方法】

1. 操作および実習

- (1) 携帯電話のGPS地図または図8を参考にして、レーダ画面上で学校から次の3点 ①栗島港, ②志々島港, ③高見島港までの距離と方位角を求め, 縮尺地図から求めた理論上の距離, 方位と比較して測定シートにまとめよ。3点の距離と方位角度はレーダ画面上で Variable Range Marker (VRM)キーと Electronic Beam Line (EBL) キーを使って求められる。
※方位角は高見島右端に向かって引いた線(船首線)を基準方位とした相対角度であることに注意すること。方位角の指示方式には, True Bearing (North-up), Relative Bearing (Heading-up), Stabilized Relative Bearing (Course-up)の3種類があり, デフォルトではヘッディングアップで表示される。
- (2) 現在航行中の船をエコトレイル機能の6分モードを使用して発見し, 目視と比較せよ。
- (3) 栗島, 高見島, 瀬戸大橋の虚像をレーダ画面上で確認せよ。
- (4) 縮尺地図で丸亀市沖合の広島的位置を確認した後, 定規を2本使用して学校から広島を挟むようにV字をつくる。このとき, 左側の線は栗島の右端, 右側の線はおおよそ志々島の左端を通っているはずである。同様に, レーダ画面上で広島を挟むようにEBLを2本引いて同様のV字をつくり, 広島を確認してレーダ画像として記録せよ。
- (5) 「ノースアップ表示」切り替え, 「表示画面+プロッター」を選択して2次レーダの情報を1次レーダのエコーに重ね表示し, 距離環を適度に変更して a) 瀬戸大橋, b) 本島, c) 広島, d) 飯野山, e) 青ノ山を確認してレーダ画像を記録せよ。
- (6) 机上左端に貼り付けてある無線局免許記載の種別, 型式, 動作周波数, 電力, 設置場所, 発行日と期限を記録せよ。その他の必要スペックはレーダユニットに記載された型番から, 取扱い説明書の仕様(ページSP-1)を参照して確認すること。
- (7) 実験室内に配置しているレーダアンテナの構造(全体寸法, スロット照射部の詳細)を確認せよ。
- (8) 次の実験者のために, 距離範囲を16NMに戻し, VRM, EBL やエコトレイルなどの追加機能を初期状態に戻してから終了手続きをすること。

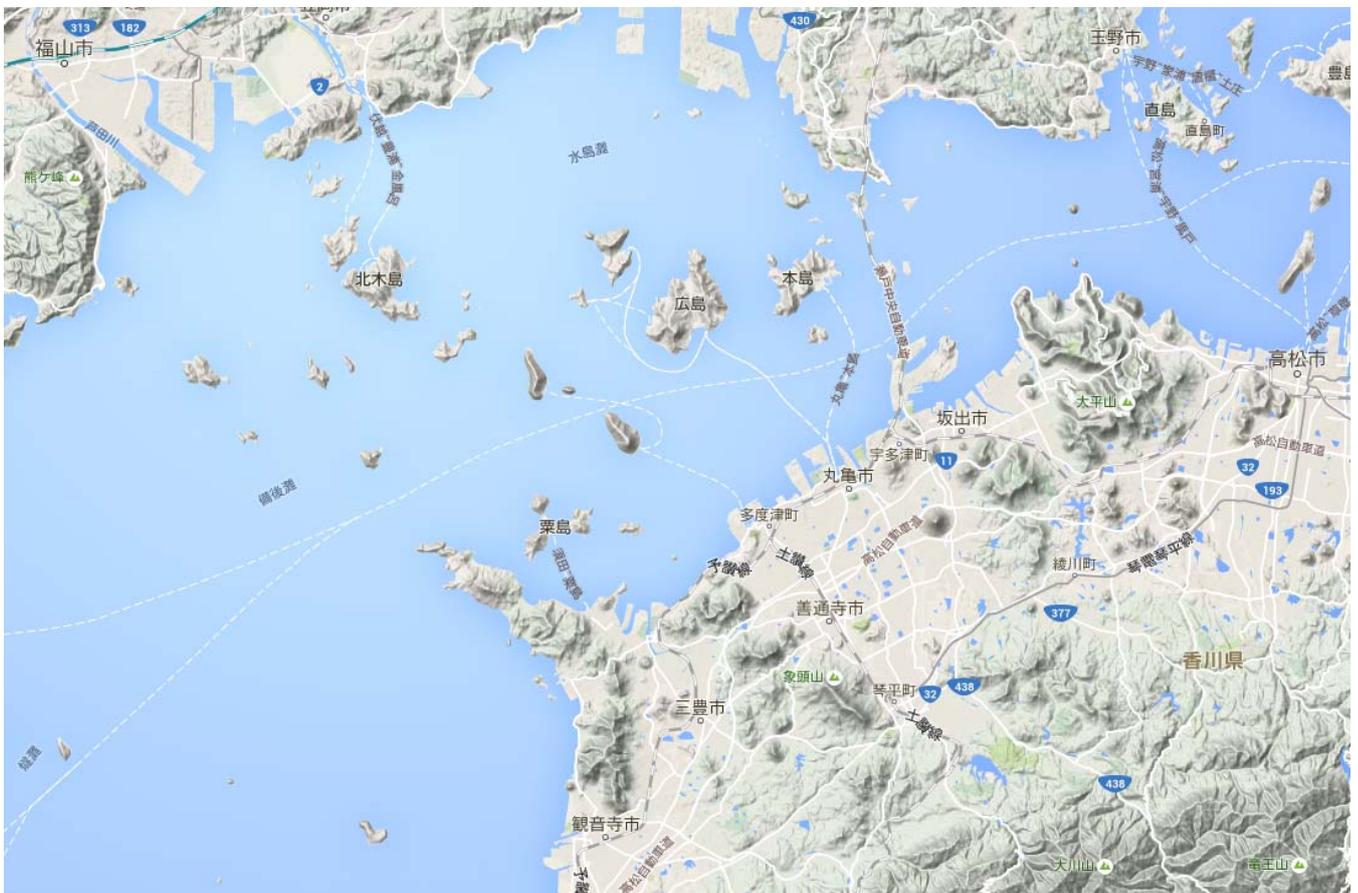


図8. 近隣の地形図 (地図データ 2015 Google, ZENRIN)

2. 実地調査 ※学外や屋上には出ないこと！

用途	アンテナ概要	1. 場所 2. 用途 3. 周波数
レーダ アンテナ 1		1. 2. 3.
レーダ アンテナ 2		1. 2. 3.
無線方位 アンテナ		1. 2. 3.
地デジ 衛星(BS)		1. 2. 3.
携帯 基地局 ※左から ソフト Au ドコモ		
PHS 基地局 ウィルコム		1. 2. 3.

【理論計算】

1. 演習

- (1) 雷が光ってから 12 秒遅れてゴロゴロと鳴り出した。雷が落ちた地点までの距離を推定せよ。
- (2) 対向する山に向かって大声を出したら 3 秒遅れてエコー(こだま)が返ってきた。山までの距離を推定せよ。
- (3) 送信パルス幅を τ [μs] とするとき、電波の照射軸上に存在する隣接した二つのターゲットを識別できる距離 Δl_{\min} はどのような式で表現されるか。
- (4) 鏡と自分の距離を L [m] とするとき、鏡に映った自分は何秒前の姿か。ただし、眼球から脳神経までの信号伝達時間は無視するものとする。
- (5) レーダ方程式において最大探知距離 R [m] はアンテナの利得を 2 倍にすると何倍になるか。ただし、最大探知距離はレーダ方程式のみで決まるものとし、最小受信電力は信号の探知限界電力とする。また、アンテナは送受共用とし、送信利得と受信利得は同じとする。
- (6) 物標の探知に必要なパルスレーダの送信尖頭出力電力を、レーダ方程式から求めたときの最小値は幾らか。ただし、最大探知距離を 10 km, アンテナ利得を 30 dB, アンテナの実効面積を 0.8 m^2 , 物標の有効反射は断面積を $\pi^2 \text{ [m}^2\text{]}$ とし、物標は受信機の受信電力が 10^{-11} W 以上のとき探知できるものとする。
- (7) 自由空間において、送信および受信アンテナの指向方向が互いに最大となるように対向させ、受信アンテナから $5 \mu\text{W}$ の最大出力を得るために必要な最小送信電力を求めよ。ただし、送信アンテナの絶対利得を 8 (リニア) とし、受信アンテナの実効面積を 0.05 m^2 , アンテナ間の距離を 5 km とする。
- (8) 自由空間において、実効面積 20 m^2 のアンテナを周波数 100 MHz で用いるとき、アンテナの相対利得 (リニア) を求めよ。
- (9) Radar Cross Section (RCS) を $1/10$ にしたら、探知距離はどれくらい短くできるか。また、探知距離を $1/10$ にしたければ RCS は幾らに減らさなければならないか。
- (10) マグネトロン内部における電子のサイクロトロン周波数を求めよ。ただし $B=0.1 \text{ T}$ とする。

【研究事項】 (以下から 2 題を選択)

- (1) 低周波の真空管がマイクロ波では利用できない理由を述べた上で、反射型クライストロンの動作原理を説明せよ。
- (2) マグネトロンの発振動作原理について説明せよ。
- (3) 最大探知距離, 距離分解能, 方位分解能, アンテナビーム形状 (水平面内と垂直面内の違い) について説明せよ。
- (4) 本実験のビーム走査方式はモータでアンテナを回転させるメカニカルスキャン方式であるが、電子スキャン方式である Electronically Steered Array (ESA) もしくはフェーズドアレイアンテナ Phased Array Antenna について調べよ。
- (5) 航空機のステルス技術について、電波/赤外線/可視光の観点から説明せよ。

【参考文献】

- [1] 吉村, “レーダ工学の基礎,” 啓学出版
- [2] 江村, “基本電子計測,” p.140, コロナ社
- [3] 落合, 茂在, “レーダの理論と実際,” 海文堂
- [4] 吉田, “改訂 レーダ技術,” 電子情報通信学会
- [5] 堤坂, 大庭, “テキストブック無線通信機器,” 13 章, 日本理工出版会
- [6] 飯島, 今津, “新訂 電波航法,” 2 章, 成山堂書店
- [7] 上保, “定在波レーダの原理とその応用,” pp.106-107, RF ワールド No.8, CQ 出版
- [8] 西谷, “電波計器,” 3 章, 成山堂書店
- [9] 吉川, 一陸技試験問題集第 3 集, 第 2 部 無線工学 A, 東京電機大学出版局