

レーダの原理

-無線機器の原理と操作-

1st. 2013/05/20

Lst. 2019/09/10

語源



RADAR

Radio Detection and Ranging
(電波による探知および測距)



LIDAR※

Light Detection and Ranging
(光波による探知および測距)

※レーザーレーダの語が用いられることもある



SONAR

Sound Navigation and Ranging
(音波による航行および測距)

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 $340 \times 2 = 680$ 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 $R=340$ m である。レーダはこれを光速 $c=3 \times 10^8$ m/s に置き換えて考える。

レーダ方式による分類

方式

- パルスレーダ
- FM-CWレーダ
- ドップラーレーダ
- モノパルスレーダ
- 定在波レーダ

Primary radar
一次レーダ

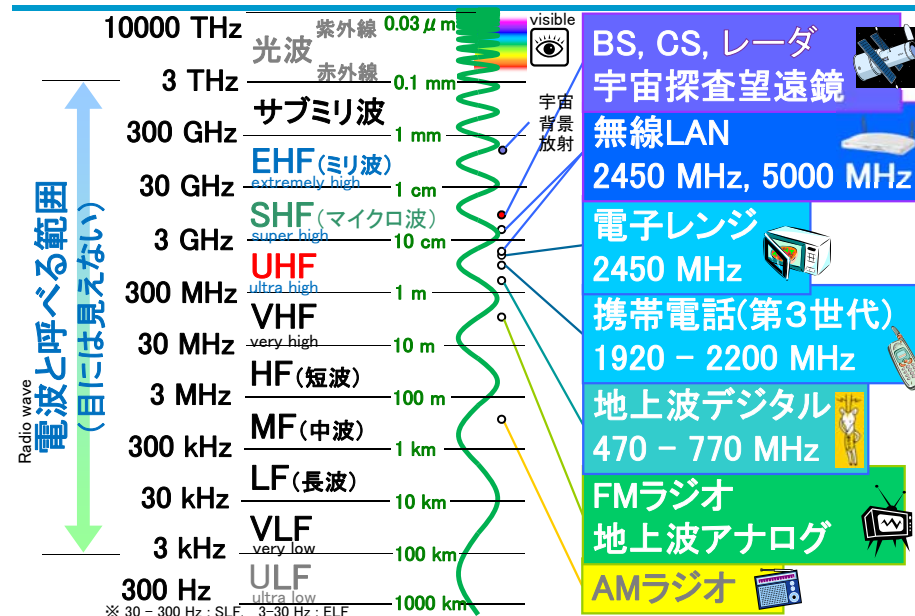
送信局より発射した電波がターゲットに反射して戻ってきた信号から、ターゲットの位置や距離を測定する方式

Secondary surveillance radar system (SSR)

二次監視レーダ方式(二次レーダ)

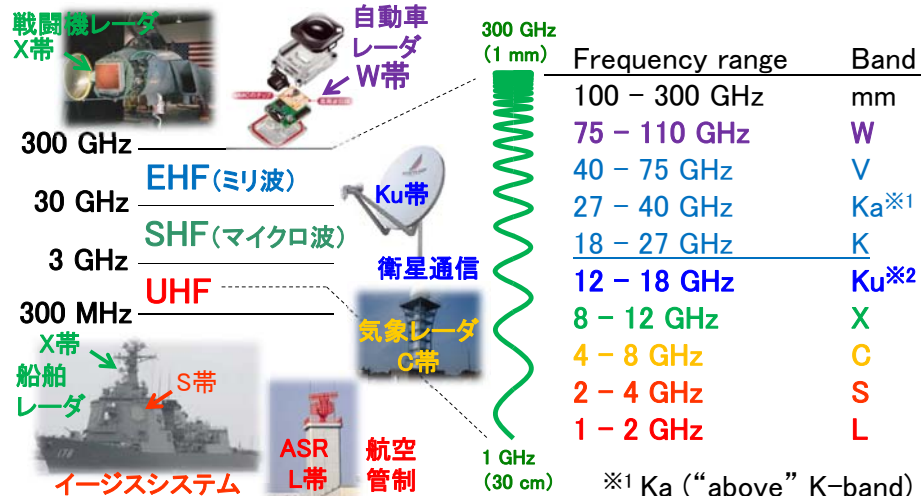
送信局: インタロゲータより発射した電波を受信した相手局: トランスポンダーが、種類・位置・高度・速度等の応答信号を発射し、これを送信局が受信してターゲットの情報を取得する方式

電磁波の名称と周波数帯



マイクロ波, ミリ波帯の識別記号

5



<http://www.masdf.com/eagle/anpag63.html>
<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/HONSHI/20090330/168029/>
 Thomas H. Lee, Planar Microwave Engineering, p.39, Cambridge
 Mark A. Richards, et al, Principles of modern radar, Scitech

5

出力電力の比較例 (参考)

6

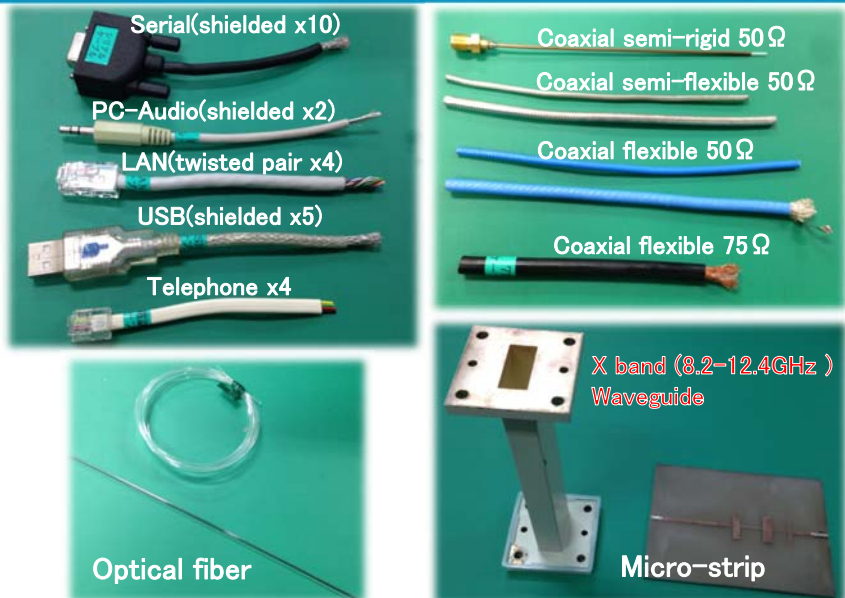
1. 蛍光灯(スタンド): **30 W** (夜でも十分勉強できる)
2. ノートパソコン (Windows7): **20 W** (何とか仕事できる)
3. デスクトップパソコン (Windows): **50 W** (多様な仕事ができる)
4. 液晶テレビ (40型): **120 W** (テレビが見られる)
5. 電子レンジ (家庭用): **500-750 W** (ごはん1杯=40秒)
6. 電子レンジ (業務用): **1,500 W** (ごはん1杯=10秒)
7. 船舶レーダ (民間用): **5-30 kW** ($R_{max} \doteq 30$ km)
8. 戦闘機レーダ (F-22, AN/APG-77): **12 kW** ($R_{max} \doteq 250$ km) 東京-大阪の直線距離 約400 km
9. イージス艦レーダ (SPY-1): **4-6 MW** ($R_{max} \doteq 400$ km)
10. 固定式警戒管制レーダ (FPS-7): **? MW** ($R_{max} \doteq 430$ km) 東京-別府の直線距離 約800 km
11. 早期警戒レーダ (E-767 AWACS): **? MW** ($R_{max} \doteq 800$ km)



<http://www.geocities.co.jp/Playtown-Knight/9679/JASDF/E-767.html>

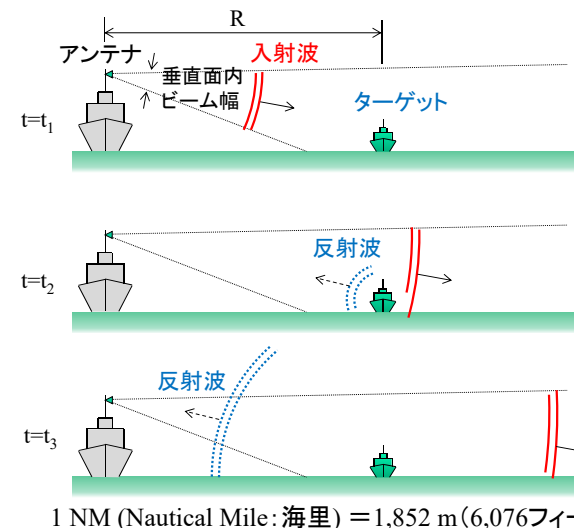
種々の伝送線路

7



距離測定の方法 (パルス方式)

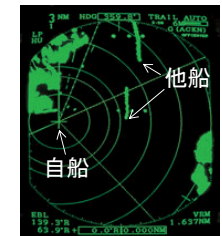
8



送信開始してから、反射波が観測されるまでの時間を t とすれば

$$R = \frac{ct}{2}$$

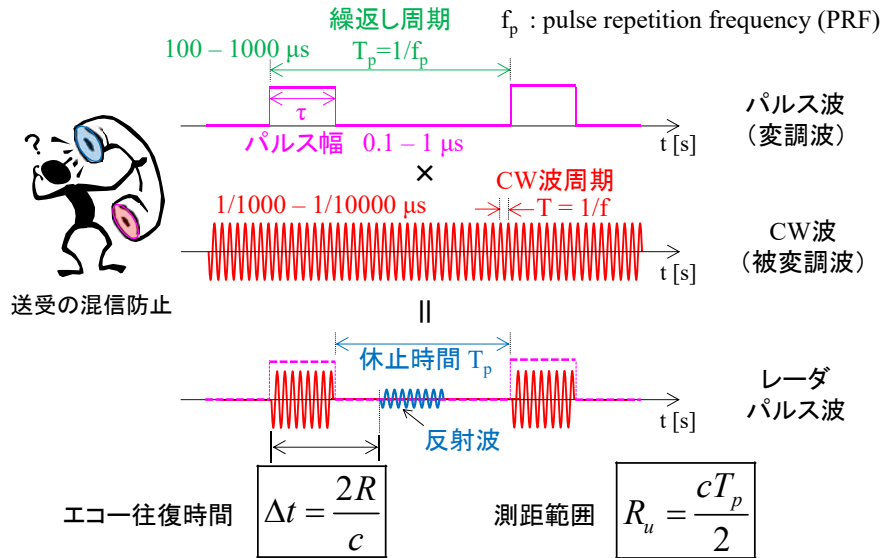
ただし、 c は光速である。



<http://www.furuno.co.jp/technology/about/radar1.html>
 落合, 茂在, ``レーダの理論と実際`` pp.20-21, 海文堂, 1959

距離測定の方法 (パルス方式)

9

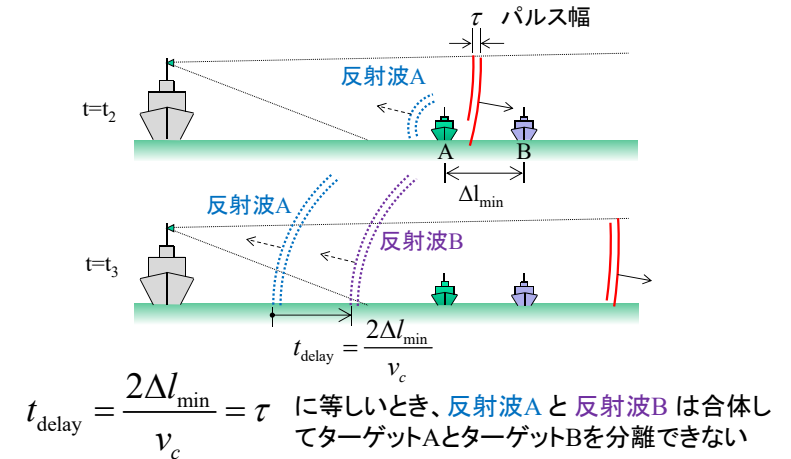


問: パルス繰返し周波数が $f_p = 1 \text{ kHz}$ のとき測距範囲は幾らか?

答え 150 km

距離測定の分解能

10



径方向の分解距離 Δl はパルス幅 τ に比例して劣化する

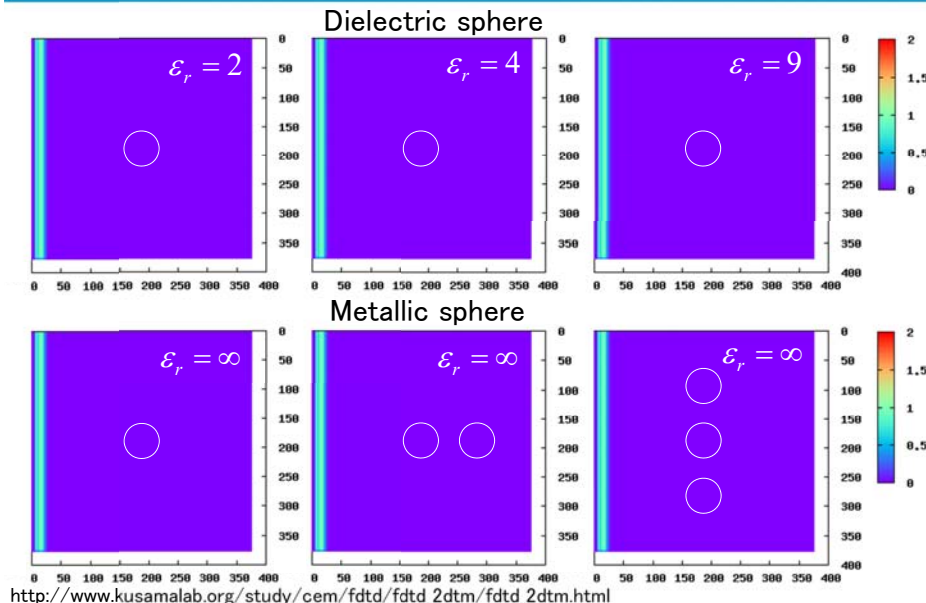
$$\Delta l_{\min} = \frac{\tau v_c}{2}$$

落合, 茂在, "レーダの理論と実際," pp.20-21, 海文堂, 1959

問: パルス幅 $\tau = 1 \mu s$ のとき距離分解能は幾らか? 答え 150 m

散乱のシミュレーション

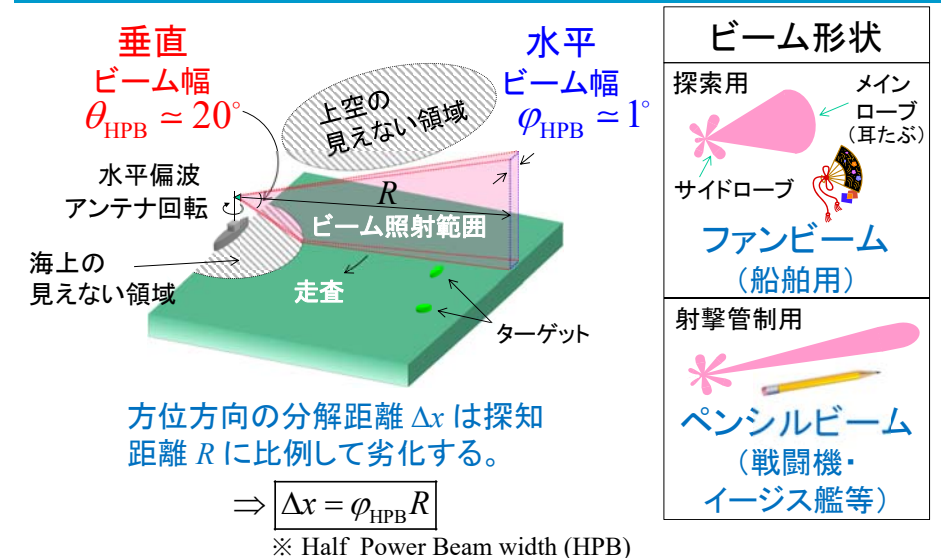
11



http://www.kusamab.org/study/cem/fdtd/fdtd_2dtm/fdtd_2dtm.html

方位測定の分解能

12



【参考】 FURUNO FAR-2107/2807 シリーズ 25 kW, 9410 MHz
 問: 水平ビーム幅 $\phi = 1^\circ$ のとき, $R = 6 \text{ km}$ における方位分解能は幾らか? 答え 約100 m

レーダ方程式（その1）

13

【探知距離】

送信アンテナから電波を放射してターゲットで反射されて帰ってくるまでのエコー観測時間を t [s] = τ [μ s], 電波の速度 $c = 3 \times 10^8$ [m] とすると, 反射物までの距離 r [m] は次式となる。

$$r = \frac{ct}{2} = 1.5t \times 10^8 \text{ m} = 150\tau \text{ [m]} \quad (1)$$

【最大探知距離】

レーダーからの放射電力を P_t [W] とすると, 距離 r [m] 離れた位置の電力密度 p_0 [W/m²] は

$$p_0 = \frac{P_t}{4\pi r^2} \quad (2)$$

となる。アンテナ(指向性)利得を G_t とすると, 同じく距離 r [m] 離れた位置の電力密度 p_G [W/m²] は式(2)より

$$p_G = p_0 G_t = \frac{P_t}{4\pi r^2} G_t \quad (3)$$

問 エコー観測時間を $t = 10 \times 10^{-6}$ s = 10μ s とすると, ターゲットまでの距離 R は幾らか? 答え 1500 m

レーダ方程式（その2）

14

ここで, レーダー反射断面積を σ [m²] とすると, 物体から再放射される電力 P_σ [W] は(3)式より

$$P_\sigma = p_G \sigma = \frac{P_t}{4\pi r^2} G_t \sigma \quad (4)$$

送信アンテナがある位置に戻るエコー電力密度 p_{r0} [W/m²] は

$$p_{r0} = \frac{P_\sigma}{4\pi r^2} = \frac{P_t G_t \sigma}{(4\pi r^2)^2} \quad (5)$$

アンテナ有効面積を A_e [m²] とすると, 受信電力^{※1}は

$$P_r = p_{r0} A_e = \frac{P_t G_t \sigma A_e}{(4\pi r^2)^2} = \frac{P_t G_t \sigma A_e}{(4\pi)^2 r^4} \quad (6)$$

アンテナ利得 G_t とアンテナ有効面積 A_e [m²] の関係^{※2}

$$G_t = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (7)$$

※1 アンテナを送受で共用するモノスタティックレーダの場合 $G_r = G_t$ となる。

※2 F. T. Ulaby ``Fundamentals of Applied Electromagnetics, Fifth Ed.`` p.438, Prentice Hall, 2007

レーダ方程式（その3）

15

を使って一方を消去すると

$$P_r = \frac{P_t \sigma G_t}{(4\pi)^2 r^4} A_e = \frac{P_t \sigma G_t}{(4\pi)^2 r^4} \frac{\lambda^2 G_t}{4\pi} = \frac{P_t G_t^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 r^4} \quad (8)$$

または

受信電力は距離の4乗に反比例

$$P_r = \frac{P_t \sigma A_e}{(4\pi)^2 r^4} G_t = \frac{P_t \sigma A_e}{(4\pi)^2 r^4} \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} = \frac{P_t \sigma A_e^2}{4\pi \lambda^2 r^4} \quad (9)$$

最小探知電力を $P_{r \min}$ と置き, 最大探知距離 r について書き直すと

$$r = \left(\frac{P_t G_t^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_{r \min}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad \text{or} \quad r = \left(\frac{P_t \sigma A_e^2}{4\pi \lambda^2 P_{r \min}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (10)$$

式(10) をレーダー方程式と呼ぶ。即ち, 1. 最小探知電力が小さく 2. ターゲット反射断面積が大きく 3. 送信電力が大きく 4. アンテナ利得が大きく 5. 波長が長いほど, 遠くまで探知できることが分かる。

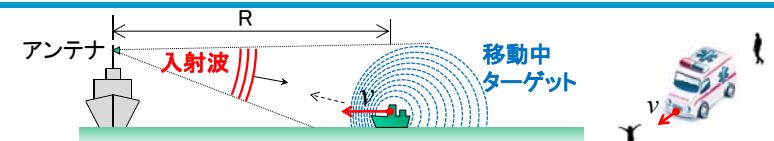
問 $f = 10$ GHz, 出力 100 kW の電波を実効面積 1 m^2 のレーダアンテナから放射した。ターゲットの反射断面積が $\sigma = 10 \text{ m}^2$, 最小探知電力 $P_{r \min} = 5 \text{ pW}$ のとき, 最大探知距離 R は幾らか?

三輪進 ``高周波電磁気学`` p.199, 東京電機大学出版局, 1992.

答え 65 km

速度測定の方法（ドップラー方式）

16



アンテナで受信される電界 E_r [V/m] は

$$E_r = E_0 e^{j(\omega_r t - k2R)} \quad (1)$$

となる。ターゲットが速度 v [m/s] で移動している場合の伝搬距離は $R = 2R_0 - vt$ に変化するので, 受信電界は

$$E_r = E_0 e^{j(\omega_r t - k2(R_0 - vt))} \quad (2)$$

となる。ここで, 受信電界の位相部分を ϕ とおくと

$$\phi = \omega_r t - k2(R_0 - vt) \quad (3)$$

両辺を t で微分すると, 受信電界の角周波数 ω_r が求まる。

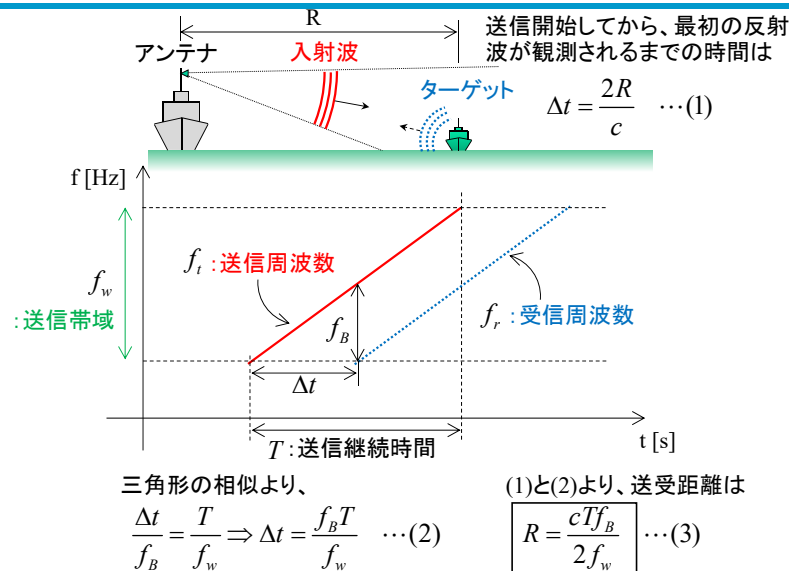
$$\frac{d\phi}{dt} = \omega_r = \omega_i + 2kv \Rightarrow f_d = \frac{\omega_d}{2\pi} = \frac{2kv}{2\pi} = \frac{2v}{\lambda} \quad (4)$$

f_d をドップラー周波数と呼び, 周波数変化から移動速度が求まる。

F. T. Ulaby ``Fundamentals of Applied Electromagnetics, Fifth Ed.`` p.439, Prentice Hall, 2007

距離測定の方法 (FM-CW方式)

17



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

不要信号の種類

18

Clutter : 《軍事》(レーダーの) 反射波、ノイズ

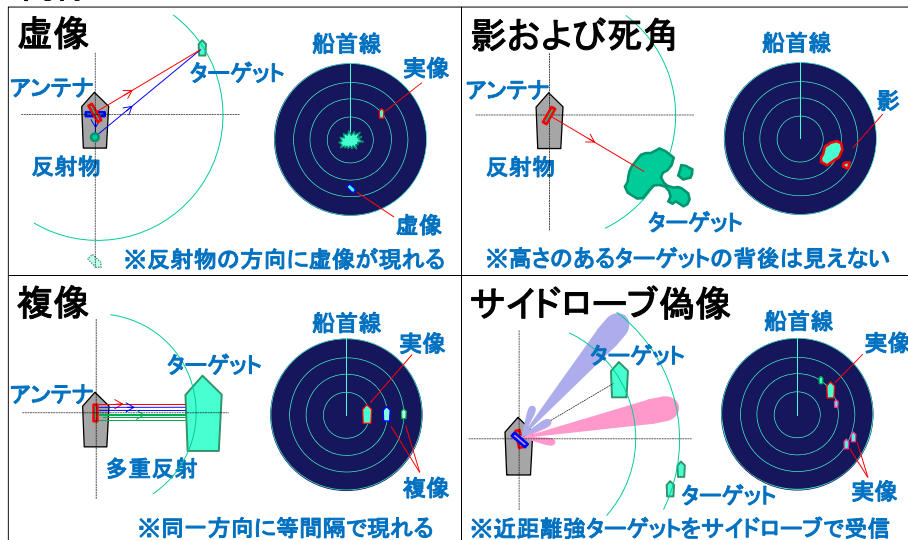
1. 地面からの反射 (Ground Clutter)
2. 海面からの反射 (Sea Clutter)
3. 雨, 雪および雲からの反射 (Weather Clutter)
4. 鳥, 昆虫の集団, 大気のゆらぎからの反射 (Angel Clutter)
5. ほかのレーダの干渉 (Radar Interference)
6. 他の反射物による偽像 (False Echo)
7. アンテナのサイドローブ偽像 (Spurious Echo, Side-lobe Echo)
8. 人為的な妨害 (Chaff Clutter)

西谷, ``電波計器`` p.106, 成山堂, 2002.

偽像の種類

19

偽像 実際には存在しないターゲットが画面上に表示される現象

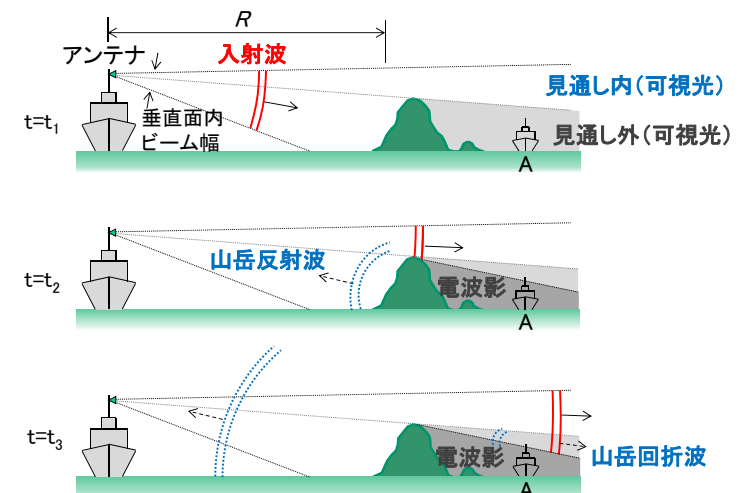


吉村, ``レーダ工学の基礎`` pp.132, 啓学出版, 1972.

FURUNO FR-7061 取扱説明書

見通し外ターゲットの検出限界

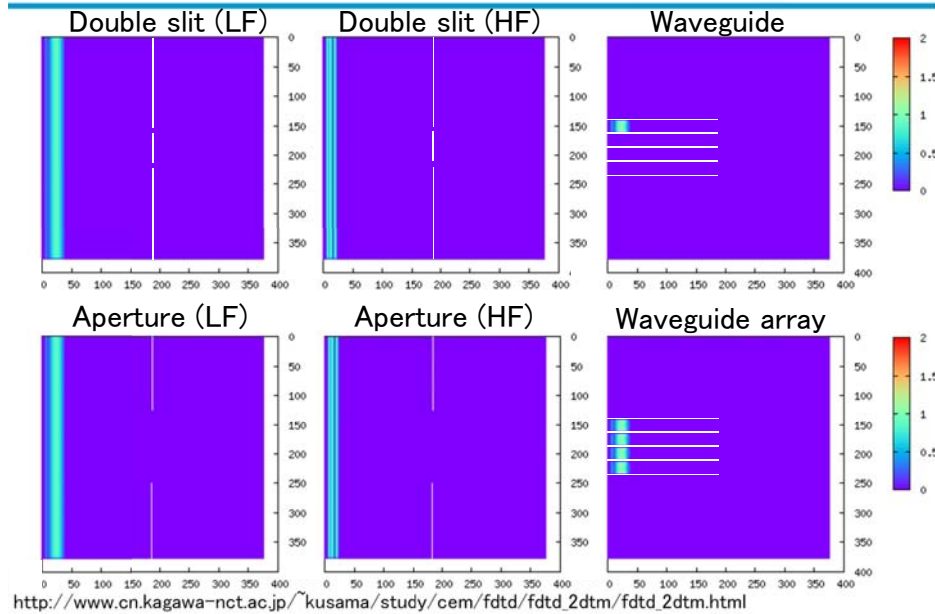
20



落合, 茂在, ``レーダの理論と実際`` pp.20-21, 海文堂, 1959

回折のシミュレーション

21



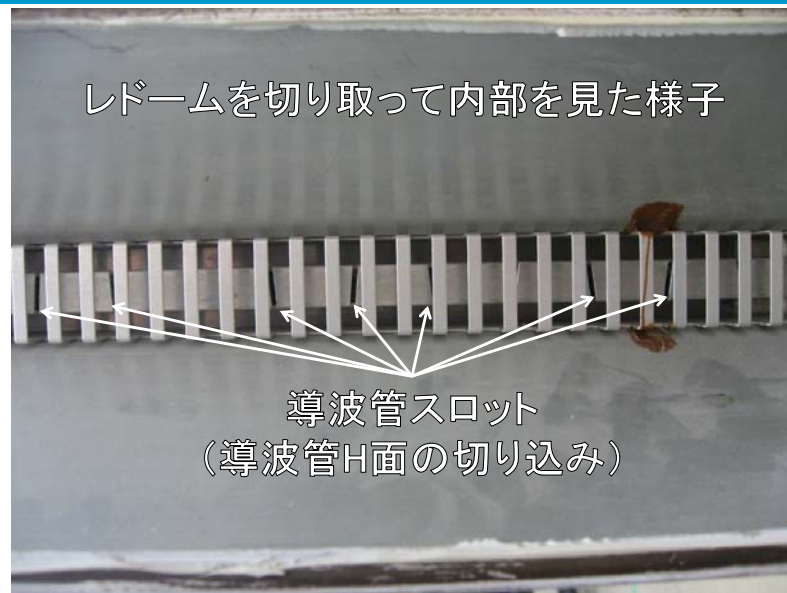
レーダアンテナの概観

22



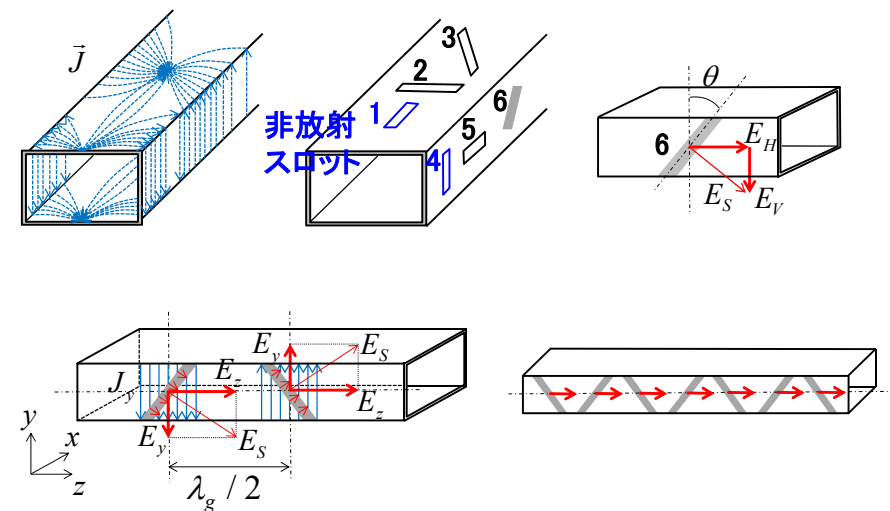
レーダアンテナの開口部

23



レーダアンテナと偏波

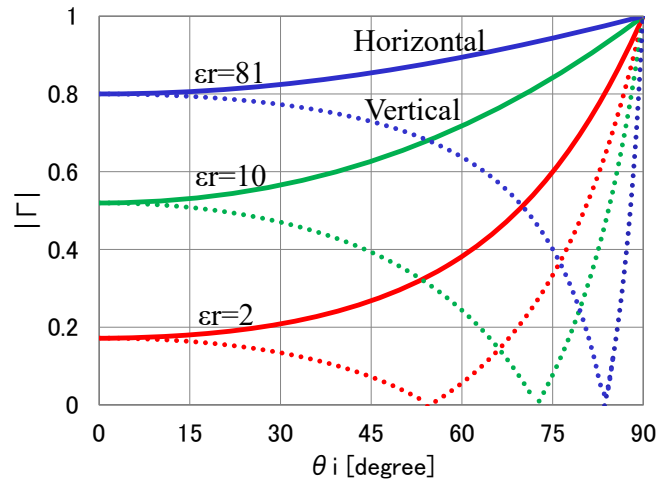
24



偏波による反射係数の違い

25

空気から誘電体へ斜入射したときの反射率

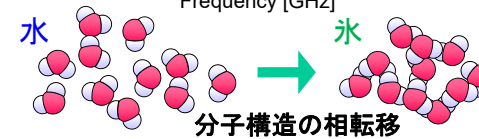
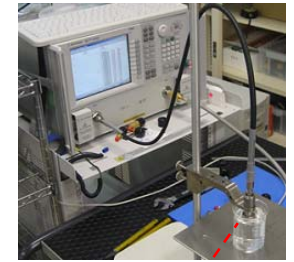
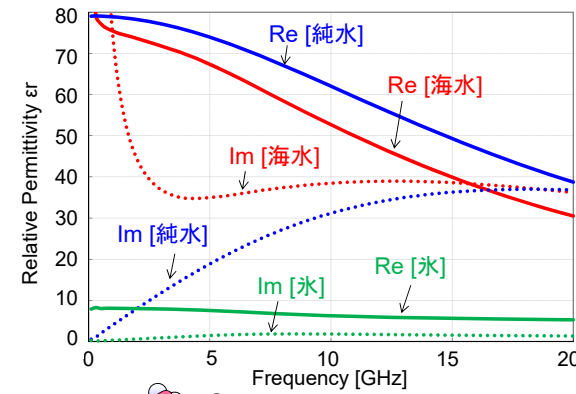


—水平偏波と垂直偏波では反射率が異なる—

比誘電率（その1）

26

純水・海水・氷の複素比誘電率の違い

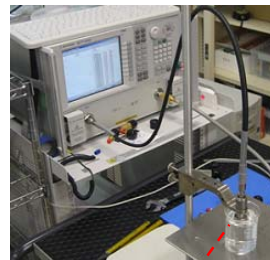
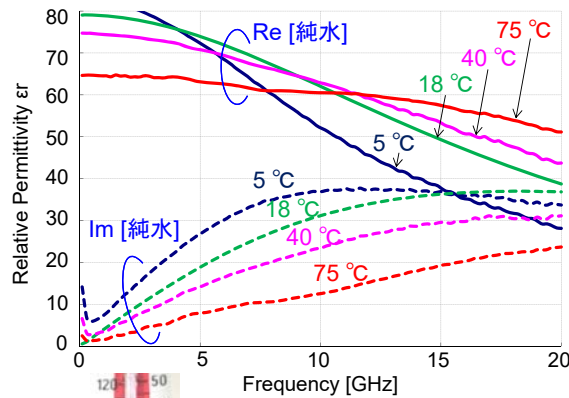


前田, ``同軸プローブ法による複素誘電率測定'', 詫間電波高専卒業研究論文集, T-2011 (H23) ※仏教では観の転換

比誘電率（その2）

27

温度による純水の複素比誘電率の違い



抵抗(導電率)に温度特性があるように、分子の格子振動によって誘電率にも温度特性がある

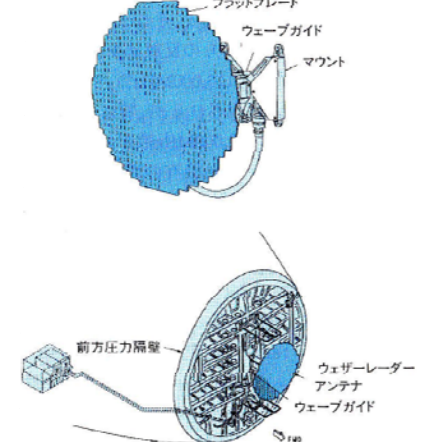
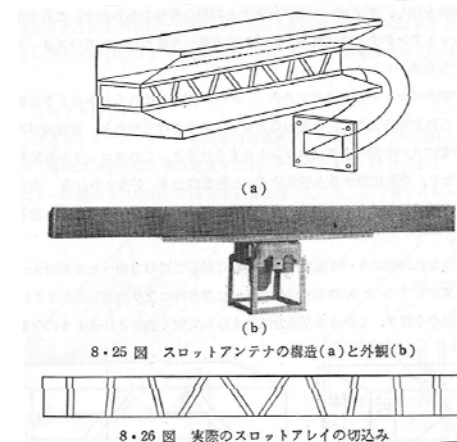
前田, ``同軸プローブ法による複素誘電率測定'', 詫間電波高専卒業研究論文集, T-2011 (H23) ※仏教では縁起

レーダアンテナの例1

28

船舶アンテナの例

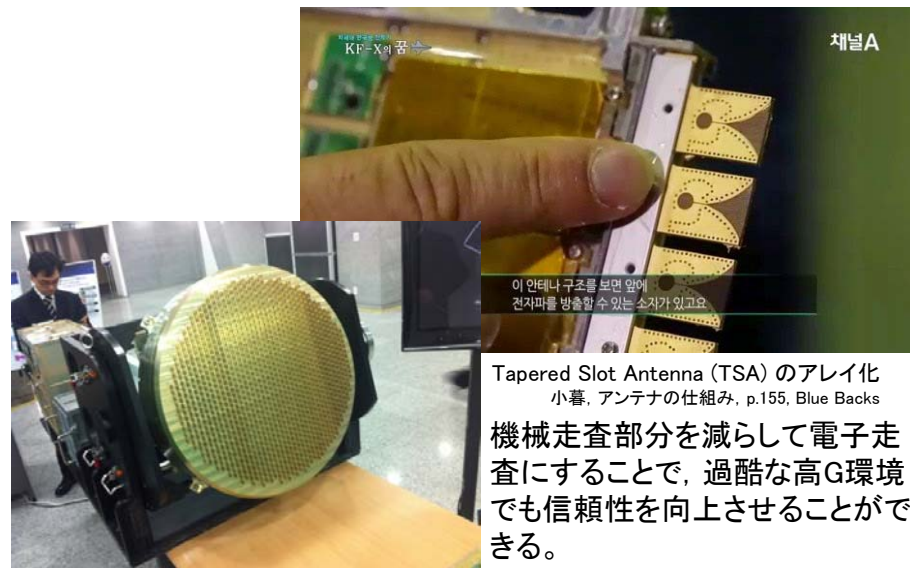
B747-400のレドーム内部



吉村, ``レーダ工学の基礎'' pp.146, 啓学出版, 1972. より引用
日本航空広報部, ``最新 航空実用ハンドブック'' p.185, 朝日新聞出版, 2014 より引用

レーダアンテナの例2

29



http://bemil.chosun.com/nbrd/bbs/view.html?b_bbs_id=10040&num=83747

レーダアンテナの例3

30



屋上取り付け実験局アンテナ1

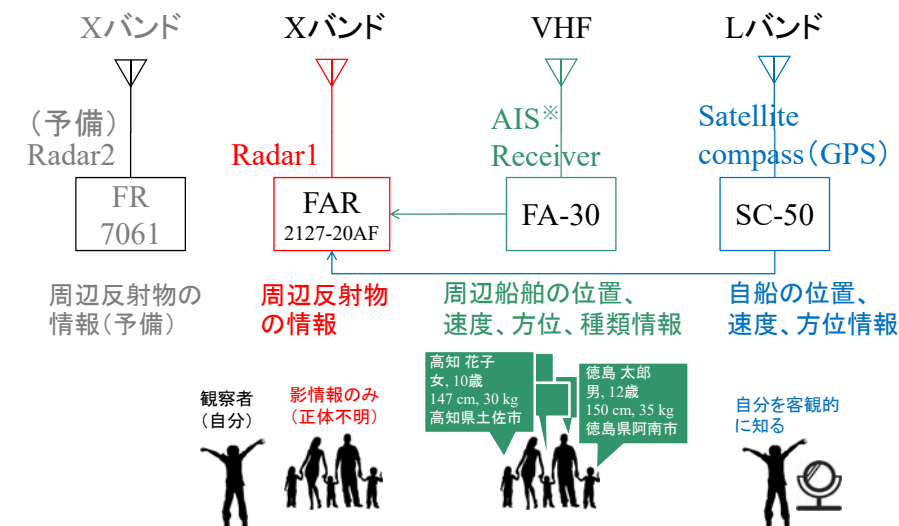
31



屋上取り付け実験局アンテナ2

32

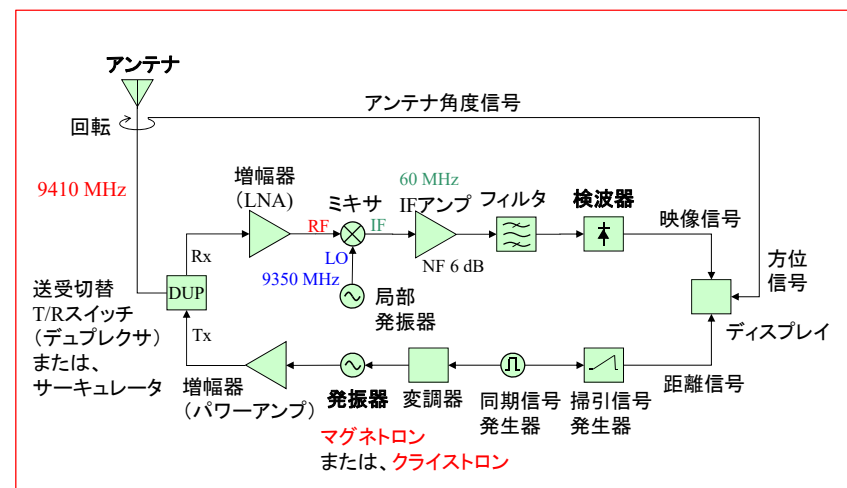




1次レーダはいわば自分を中心とした世の中の見方で、偽像・虚像や死角といった間違いがよく起きる。このため、AISやGPSの情報と照らし合わせる必要がある。システム全体は人間とよく似ている。

※ Automatic Identification System (AIS) : 船舶自動識別装置 300トン以上の全ての船舶に搭載義務あり

Radar1



問:なぜヘテロダインを使ってダウンコンバートするのか？

【参考】 FURUNO FAR-2107/2807 シリーズ 25 kW, 9410 MHz

答え 集中定数回路が使えるため

STCとFTC

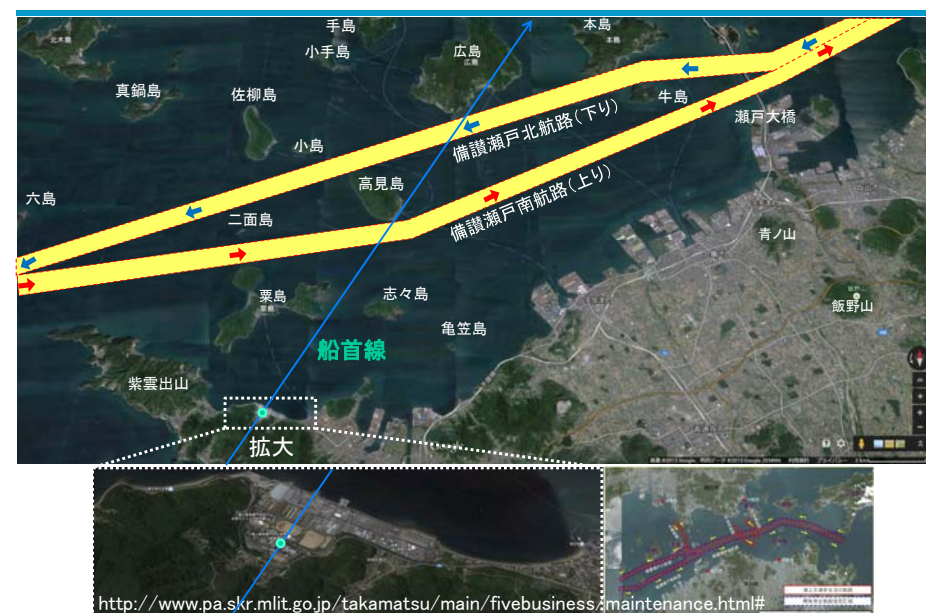
Sensitivity Time Control (STC) or Anti-clutter Sea

海面反射は距離と共に急激に弱くなるため、送信パルスが発射された瞬間に受信器の感度を一旦下げ、海面反射の影響が少なくなるまで徐々に感度を戻すことで、海面反射の影響をある程度消すことができる方法

Fast Time Constant Circuit (FTC) or Anti-clutter Rain

検波後に時定数の小さい微分回路を挿入し、比較的弱い雨粒群の散乱エコーをカットして、強い物体エコーだけを表示する方法

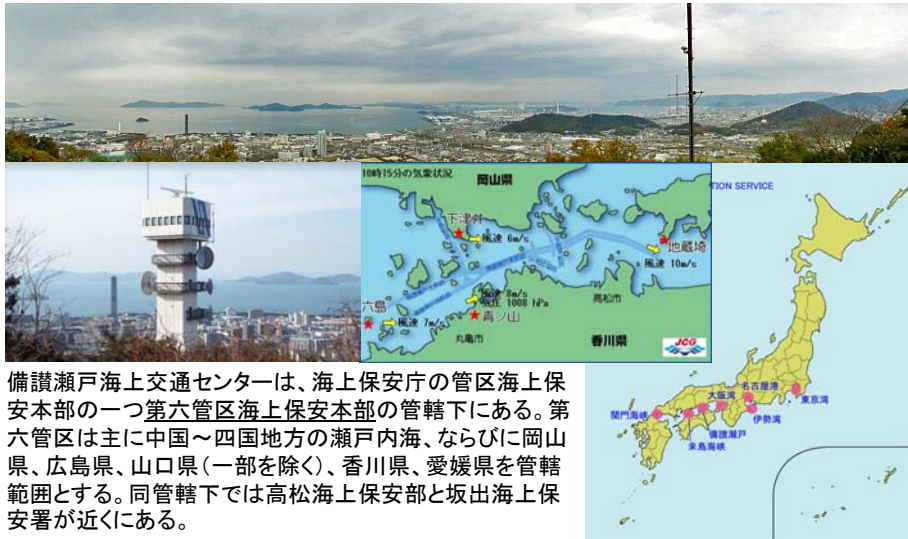
実験局の周辺地図と航路



備讃瀬戸海上交通センター

37

備讃瀬戸海上交通センター(香川県綾歌郡宇多津町青ノ山)



備讃瀬戸海上交通センターは、海上保安庁の管区海上保安本部の一つ第六管区海上保安本部の管轄下にある。第六管区は主に中国～四国地方の瀬戸内海、ならびに岡山県、広島県、山口県(一部を除く)、香川県、愛媛県を管轄範囲とする。同管轄下では高松海上保安部と坂出海上保安署が近くにある。

<http://youyou.main.jp/c7/kagawa/aonoyama.htm>

レーダ画面表示例

38



レーダ画面表示(1次+2次)

39

表示画面+プロッターを選択



ノースアップ
の状態

ローレンツ力

40

【演習】 電子の円運動の周期に対応する周波数を求めよ。ただし、 $B=0.1T$ とする。

ローレンツ力と円運動の向心力より

$$F = m \frac{v^2}{r} = evB$$

$$\Rightarrow m \frac{(r\omega)^2}{r} = e(r\omega)B$$

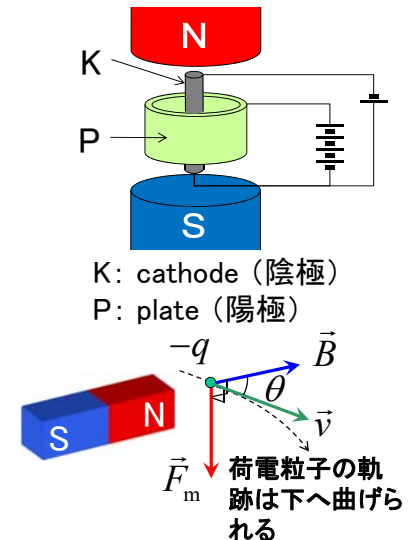
$$\Rightarrow \omega = \frac{eB}{m}$$

ここから振動周波数を求めると

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{eB}{m} = \frac{1}{2 \times 3.14} \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 0.1}{9.1 \times 10^{-31}}$$

$$= 2.8 \text{GHz}$$

の電気振動が得られる。



マグネトロン発振器

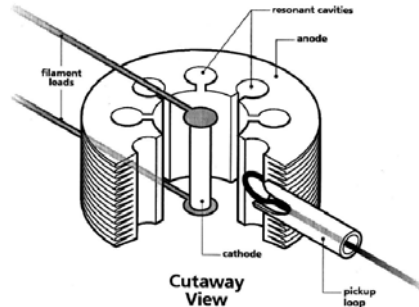
41

Magnetron は電子に働くローレンツ力(磁気力)を利用しているので、**磁電管**とも呼ばれる。

実用周波数範囲: 1-200 GHz

出力: 1-2 kW, 25-100 kW(レーダ用ではパルス出力尖頭値が数MW)

家庭用では電子レンジで、 2450 ± 50 MHz, 出力 500 Wが主流



応用例

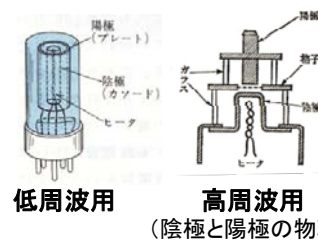
- レーダの発振器
- 電子レンジの発振器
- 薄膜のスパッタリング

B. Hammack, P. Ryan, N. Ziech, "Eight amazing engineering stories," pp.153-163, Articulate Noise Books, 2012.
吉村, 倉持, 安居院, "図解入門 よくわかる最新電波と周波数の基本としくみ," pp.129-130, 秀和システム

真空管の問題点

42

- 陰極(カソード:K)を出た電子は有限の時間をかけて陽極(プレート:P)に到達する。このため周波数が高くなると電子の走行中に陰極が陽転するため、整流作用(エジソン効果)が成立しなくなる。
- 配線のESL(等価直列インダクタンス)、ESR(等価直列抵抗)および、電極間キャパシタンスが無視できない大きくなり、共振回路として使えない素子になる。



- の問題を解決する一つ的手段として、電子の走行時間が無視できるよう電子管を極小サイズにする方法がある。これを板極管または灯台管と呼ぶ。

(陰極と陽極の物理長を短くする)

中島 "マイクロ波工学," p.217-218, 森北出版

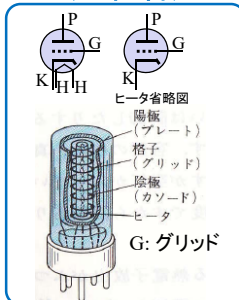
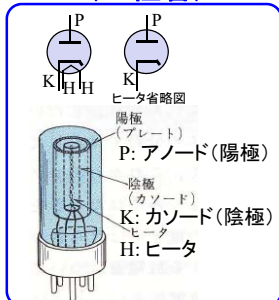
真空管

43

電子管 (Electron tube) は**放電管** (ガス中の電子のはたらきを利用) と**真空管** (真空(完全ではない)中の電子のはたらきを利用) の両方を含む。電子管とは...陰極(カソード)から飛び出した熱電子の作用を利用

D: ダイオード (二極管)

T: トライオード (三極管)



真空管

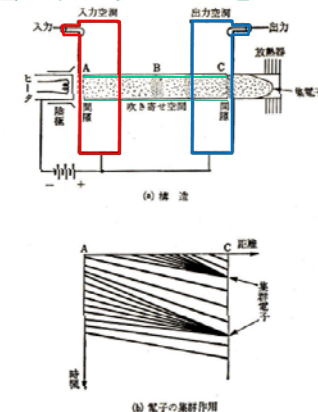
若山, 鈴木 "やさしい電気と電子の理論," pp.123-126, 近代科学社

問:なぜ陰極(cathode)にKを使うのか?

クライストロン発振器

44

クライストロン (Klystron) は**直進形** (電子の粗密波を利用して増幅器として利用) と**反射形** (電子の粗密波を利用して発振器として利用) の両方を含む。真空管の問題点(電子の走行時間が有限であること)を積極的に利用



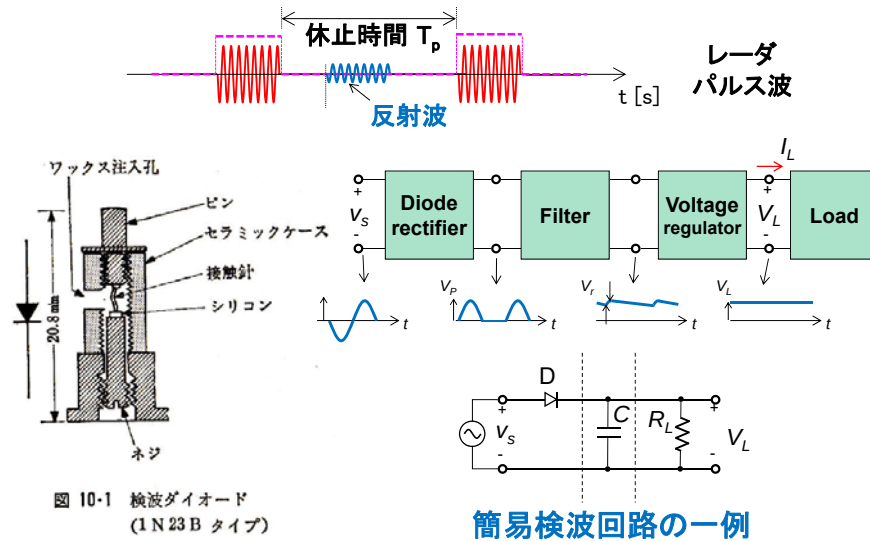
- 陰極を出た電子はまず、入力空洞の間隙Aを通過する。このとき、入力信号に応じて発生している電界によって速度変調を受ける。この電子は出力空洞に達するまでの区間Bで集群作用を受ける(A点において、あるとき減速された電子は、次に加速された電子に追いつかれてC点で凝集する)。
- C点の間隙には電子の粗密波が生じ、これによって出力空洞に電界が誘導される。即ち、熱電子の粗密波を使って出力空洞に強い電界を生じさせることができるので、増幅器としての利用ができる。

中島 "マイクロ波工学," p.219-221, 森北出版
より引用

クライストロンという名称は、浜辺で"波が砕ける"という意味のギリシア語 klyzo からつけられた。 <http://kids.kek.jp/jiten/matter/>

検波器

45



中島将光, ``マイクロ波工学 基礎と原理,`` p.237, 森北出版, 1975. より引用

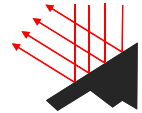
ステルスとは？

46

Steal : こっそり盗む, 盗塁する
Stealth : こっそりすること, 忍び, 内密, 隠密

【航空機の場合には次の3つを意味する】

1. レーダー(電波・マイクロ波ステルス)
...吸収 or 反射を逸らす工夫
2. 赤外線(熱源・赤外線(IR)ステルス)
...排気温度を下げる工夫
3. 肉眼(可視光ステルス)
...迷彩・カモフラージュ, 飛行機雲消去



航空自衛隊 <http://www.mod.go.jp/asdf/equipment/sentouki/F-2/index.html>

Jwings, ``世界のステルス戦闘機 完全ガイド,`` p.38, イカロス出版, 2012.

富士山レーダー(記念館)

47



富士山レーダーの概要

48

- (1) 1963年(昭和34年)の伊勢湾台風(死者5000人)当時の気象レーダーはスポット的で探知範囲が狭く無力。国土全体を見渡せるものはなかった。
- (2) 1963年(昭和34年)暮れに富士山山頂に決定。候補であった鳥島(東京から南へ555km)は火山活動の活発化でNGになる。責任者は気象庁測器課の新田次郎(電通大卒)。
- (3) 1963年(昭和38年)6月着工。翌年1964年(昭和39年)9月完成。工事関係者9000人。
- (4) 風速100m/sに耐える設計。2.88GHz(波長10cm)、1500kWマグネトロン発振、直径5mのレーダー。直径9mのレドーム。探知距離 500km以上、最大800km程度。
- (5) レドーム材料の着氷テストのほか、105km離れた東京の気象庁からマイクロ波回線よりリモート操作するため、夜間に火と望遠鏡を使って見通しテスト等の事前調査試験を実施。測量と実地調査のために行う必要があった冬山の富士山はヒマラヤよりも危険と言われている。
- (6) 雨と地面反射エコーをデータ処理して分離。雨エコー強度に色を付けて雨の強さを階調表示。FRP製三角形レドームの枚数は135枚。技術担当は三菱電機。
- (7) 工事搬入資材総量は500t以上。最初は馬方と剛力を使っていたが、高山と重量で馬が涙を流す。動物虐待で馬は使えないため、馬方と剛力を諦めてブルドーザーを導入する。酸素は地上の2/3で、高山病による頭痛と吐き気から、頭を使う簡単な計算や精密な組み立て作業はできなくなる。雷が近づくと髪の毛が逆立ち、紫色の放電をすることも。工事途中に暴風雨や雪が降ると組み立てたものが分解するため、工事有効期間は7-8月の60-40日間のみ。工事担当は大成建設。
- (8) 重量600kgのジュラルミン製レドーム枠だけを地上で組み立てて空輸。ヘリ重量オーバーで副操縦士席や内装を外し、さらに燃料を半分に減らして飛んだ。ヘリは早朝から10時までの晴れた日しか使えない。空輸1回当たり約400kgが限界で、一日あたりでは7回のフライト=3t程度まで。
- (9) 1978年に従来の真空管(壊れやすく交換が必須)方式から半導体回路に改良した2代目に更新。
- (10) 1999年に気象レーダーとして35年の役割を終え、気象衛星にその役割を移した。
- (11) 2000年にIEEEマイルストーンに登録。(日本では、東北大の八木宇田アンテナも登録)
- (12) 2004年に道の駅「富士吉田」に富士山レーダードームとして移設保存。

計算1. レーダ方程式

49

【例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。

【例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。

【例3】送信パルス幅を τ [μ s] としたとき、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 $\Delta l_{\min}$ はどのような式で表現されるか。

【例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。

テキスト 答え: (1) 約4 km (2) 約0.5 km (3) 150τ [m] (4) $2L/c$ [s]

計算2. レーダ方程式

50

【問144】レーダ方程式において、最大探知距離 R [m] の説明として正しいものを下の番号から選べ。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であり、送信利得と受信利得は同じとする。

- (1) 送信電力を2倍にすると、 R の値は $(\sqrt{2})$ 倍になる。
- (2) 最小受信電力が2倍の受信機を用いると、 R の値は $(\sqrt{2})$ 倍になる。
- (3) 送信電力を2倍にし、最小受信電力が2倍の受信機を用いると、 R の値は $(\sqrt{2})$ 倍になる。
- (4) 物標の有効反射断面積が2倍になると、 R の値は $(\sqrt{2})$ 倍になる。
- (5) アンテナの利得を2倍にすると、 R の値は $(\sqrt{2})$ 倍になる。

吉川、一陸技試験問題集第3集、第2部 無線工学A、p.141、東京電機大学出版局

答 (5)

計算3. レーダ方程式

51

【問146】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を用いて求めたときの最小値として、正しいものを下の番号から選べ。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 π^2 [m^2] 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。

- (1) 140 W
- (2) 280 W
- (3) 560 W
- (4) 1,200 W
- (5) 2,000 W

吉川、一陸技試験問題集第3集、第2部 無線工学A、p.143、東京電機大学出版局

答 (5)

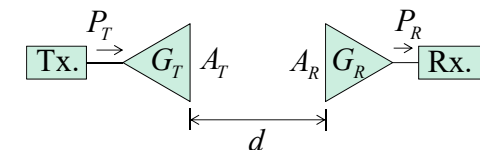
計算4. フリスの伝達公式

52

【問182】frisの伝送公式の誘導について述べたものである。() 内に入れるべき字句の正しい組み合わせを下の番号から選べ。ただし、図に示すように、送信アンテナに供給される電力を P_T [W]、送信および受信アンテナの絶対利得をそれぞれ G_T および G_R (真数)、送信および受信アンテナの実効面積をそれぞれ A_T [m^2] および A_R [m^2]、受信アンテナから取り出し得る有能受信電力(受信最大有効電力)を P_R [W]、アンテナ間の距離を d [m]、波長を λ [m] とする。

- (1) 送信アンテナから d [m] の点の電力密度 W は (A) [W/m^2] である。
- (2) 式 (A) を A_T を用いて表すと、(B) [W/m^2] となる。
- (3) この電波を A_R のアンテナで受信したとき、 P_R は (C) [W] となる。

	A	B	C
1	$\frac{P_T G_T}{4\pi d^2}$	$\frac{P_T A_T}{\lambda^2 d^2}$	$\frac{A_T A_R}{d^2} P_T$
2	$\frac{P_T G_T}{4\pi d^2}$	$\frac{P_T A_T}{\lambda d^2}$	$\frac{A_T A_R}{\lambda^2 d^2} P_T$
3	$\frac{P_T G_T}{4\pi d^2}$	$\frac{P_T A_T}{\lambda^2 d^2}$	$\frac{A_T A_R}{\lambda^2 d^2} P_T$
4	$\frac{P_T G_T}{4\pi d}$	$\frac{P_T A_T}{\lambda d}$	$\frac{A_T A_R}{\lambda^2 d^2} P_T$
5	$\frac{P_T G_T}{4\pi d}$	$\frac{P_T A_T}{\lambda^2 d}$	$\frac{A_T A_R}{\lambda^2 d} P_T$



吉川、一陸技試験問題集第3集、第3部 無線工学B、p.185、東京電機大学出版局

答 (3)

計算5. フリスの伝達公式

53

【問183】 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 μWの最大出力を得るために必要な最小送信電力の値として、最も近いものを下の番号から選べ。ただし、送信アンテナの絶対利得を8(真数)とし、受信アンテナの実効面積を0.05m²、アンテナ間の距離を5 kmとする。

- (1) 2.1 kW
- (2) 3.9 kW
- (3) 6.5 kW
- (4) 7.7 kW
- (5) 9.4 kW

吉川、一陸技試験問題集第3集、第3部 無線工学B、p.185、東京電機大学出版局

答 (2)

計算6. フリスの伝達公式

54

【問184】 自由空間において、実効面積20 m²のアンテナを周波数100 MHzで用いるとき、このアンテナの相対利得(真数)の値として、最も近いものを下から選べ。

- (1) 10
- (2) 12
- (3) 17
- (4) 27
- (5) 44

吉川、一陸技試験問題集第3集、第3部 無線工学B、p.185、東京電機大学出版局

答 (3)

計算7. レーダ方程式

55

【問】 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にしたかったら、RCSは幾らに減らさなければならないか。

$$R_{\max} = \left(\frac{P_t G A_e \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_{\min}} \right)^{1/4}$$

where

$R_{\max}$: Maximum Detectable Range

P_t : Peak Transmitting Power

G : Gain

A_e : Effective Aperture

λ : Wavelength

σ : Radar Cross Section

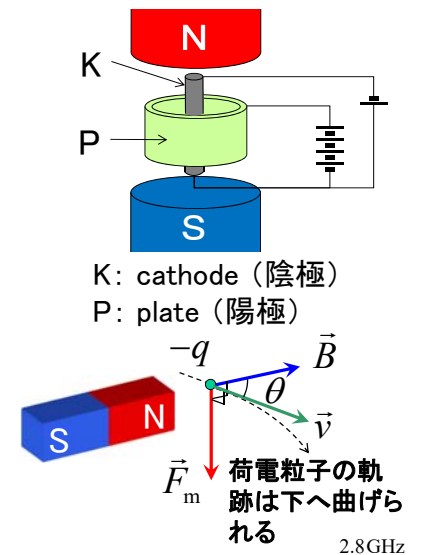
$P_{\min}$: Minimum Detectable Power

青木ほか、`世界のステルス戦闘機完全ガイド、` p.37、イカロス出版

計算8. マグネトロン

56

【問】 電子の円運動の周期に対応する周波数を求めよ。ただし、 $B=0.1\text{T}$ とする。



好村 `光と電波` pp.135-136、培風館