アンテナ製作実験

電気電子工学実験第２
選択実験

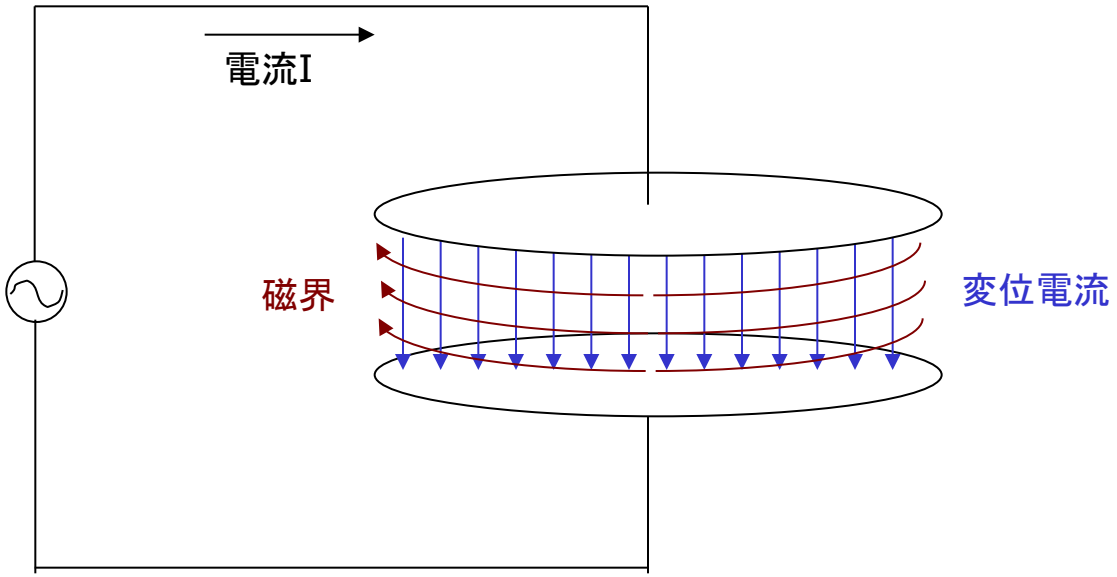
アンテナ

- 高周波数の電源が接続された導線では電子は振動している
- 電磁波を放射、受信するのをアンテナ(antenna)と呼ぶ
- アンテナの語源は昆虫の触角俗称「feelers」

  専門語では「antenna (antennae)」 または鹿の角「antler」から由来していると言われる

アンテナとは？

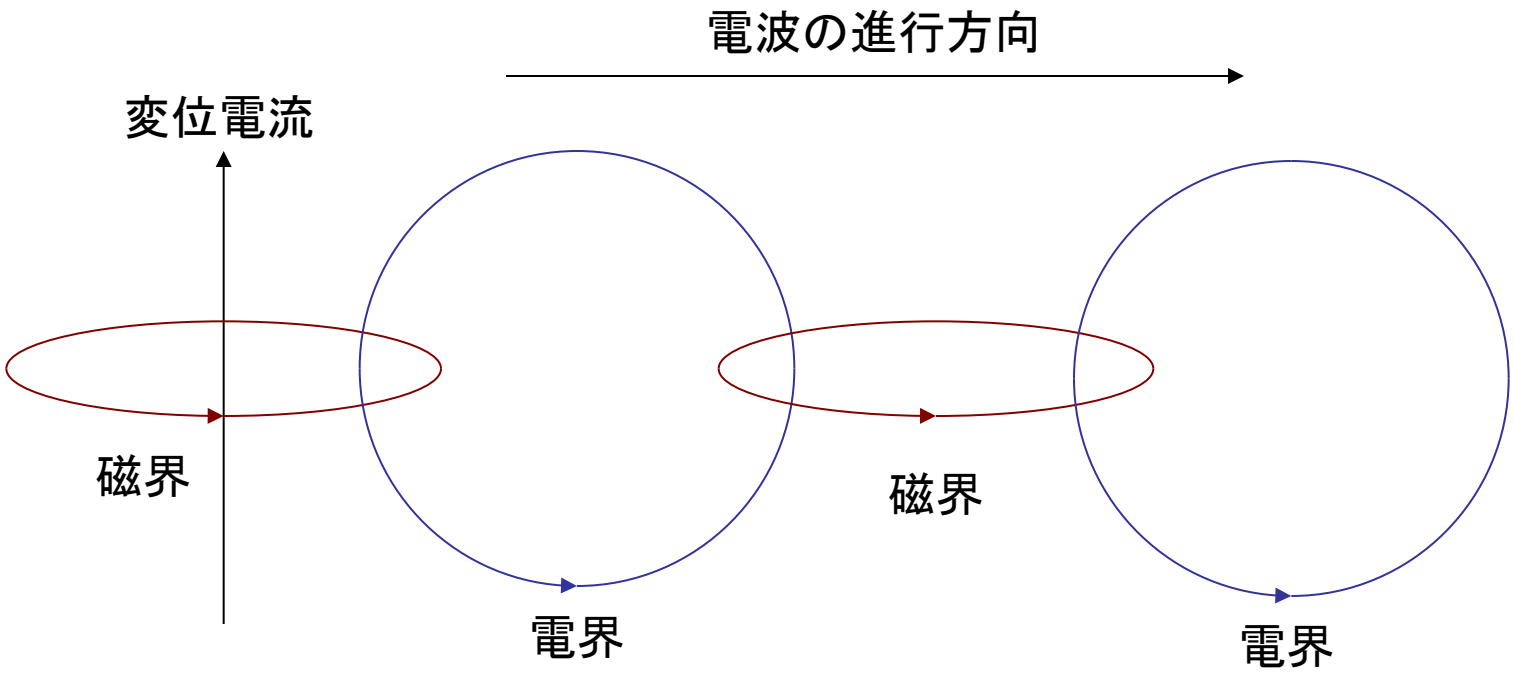
- コンデンサに交流を流すと

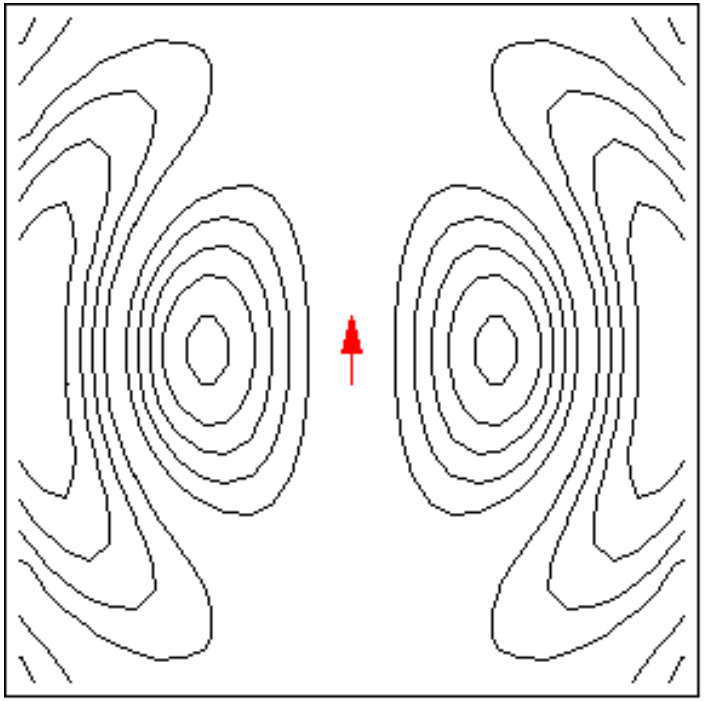


電流が流れているわけではないが電界が変化

⇒　電流が流れているのと同じ＝変位電流

- 変位電流の変化

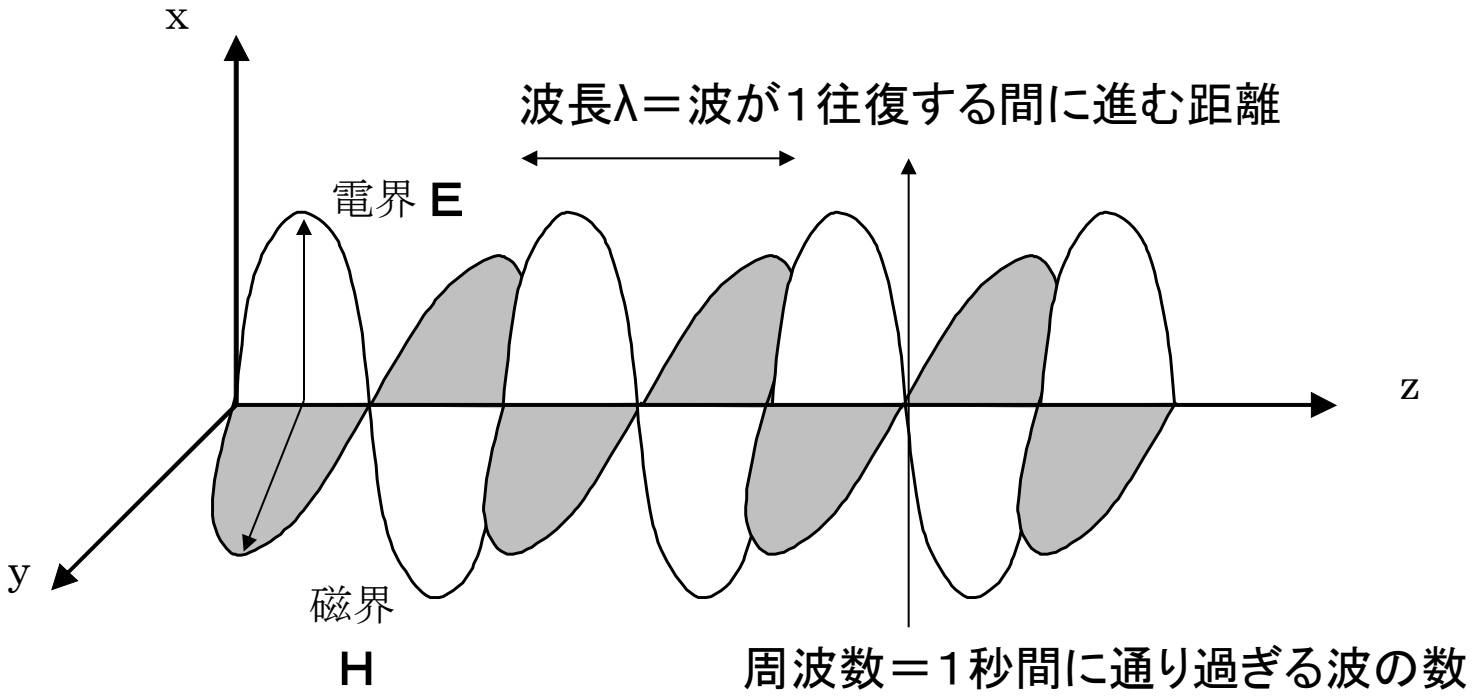




微小波元からの電気力線

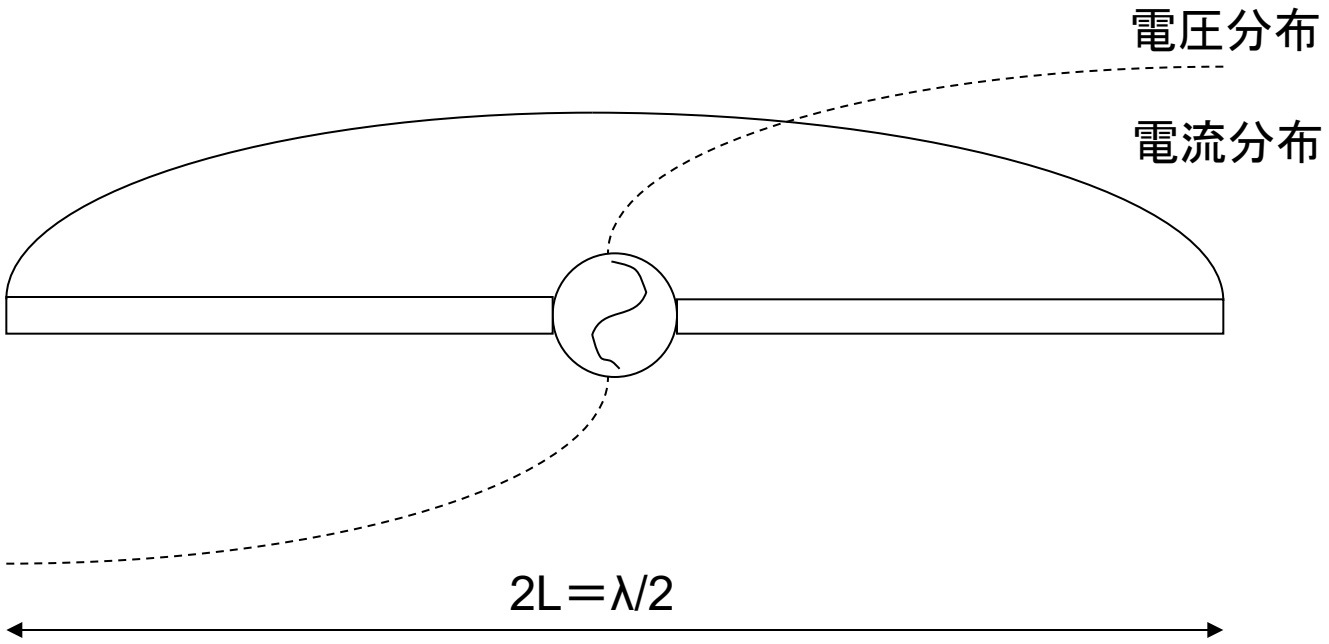
電波の周波数，波長

- アンテナから放射された電波は波として伝わっていく

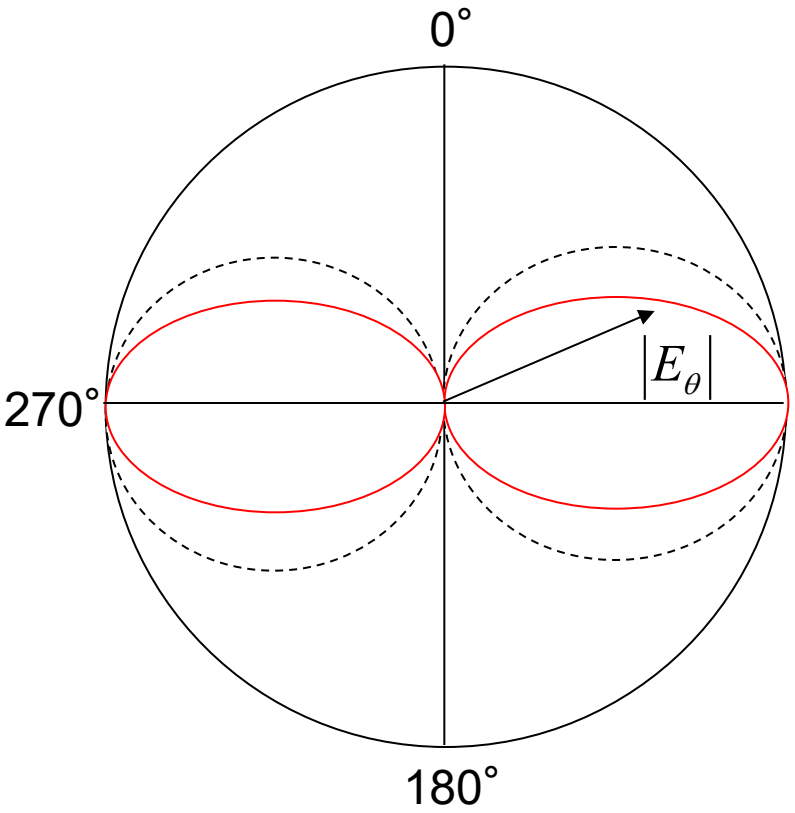


半波長ダイポールアンテナ

- 長さ2Lが1/2波長となるアンテナ



半波長ダイポールアンテナの指向性



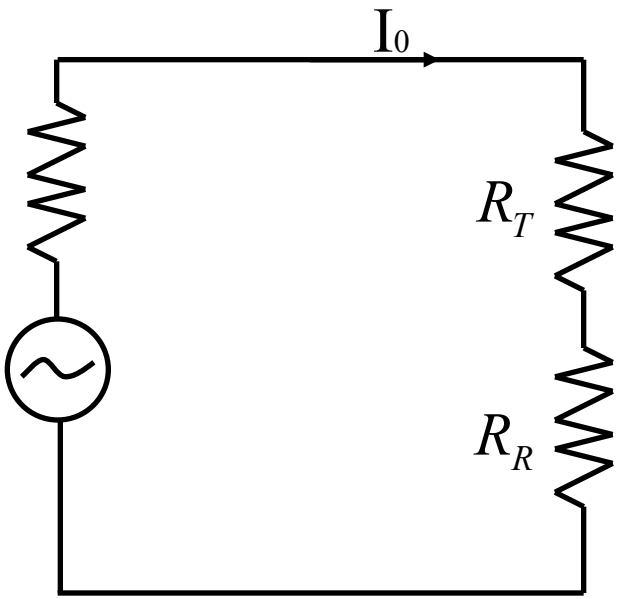
$$|E_\theta| = \frac{60\pi I_0}{r} \cdot \left| \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2}\cos\theta\right)}{\sin\theta} \right|$$

半波長アンテナの垂直指向性

共振状態アンテナの負荷抵抗

$Z_L = R_L$　　負荷抵抗

$R_L = R_T + R_R$　負荷抵抗＝放射抵抗＋損失抵抗（熱損失）



$P_T = I_0^2 R_T$　　P_T：放射電力

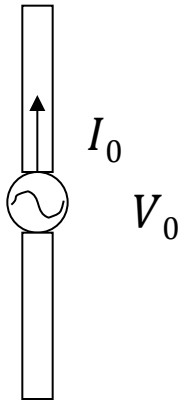
$P_R = I_0^2 R_R$　　P_I：損失電力

放射効率 $\eta = \dfrac{R_T}{R_T + R_R}$

アンテナのインピーダンス

- V_0の電源を接続したアンテナの端子の電流をI_0とするとインピーダンスは

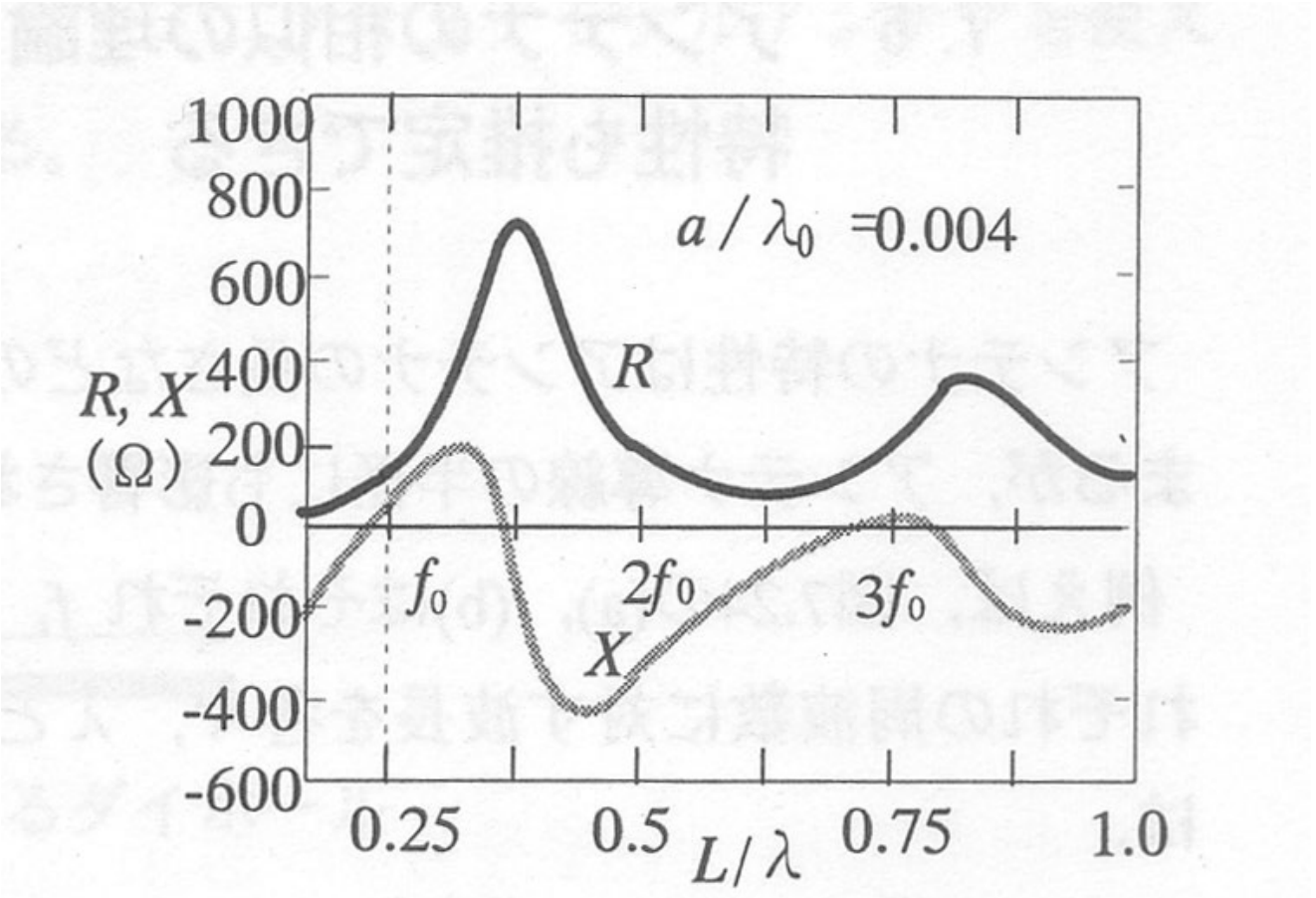
$$Z_{in} = \frac{V_0}{I_0}$$



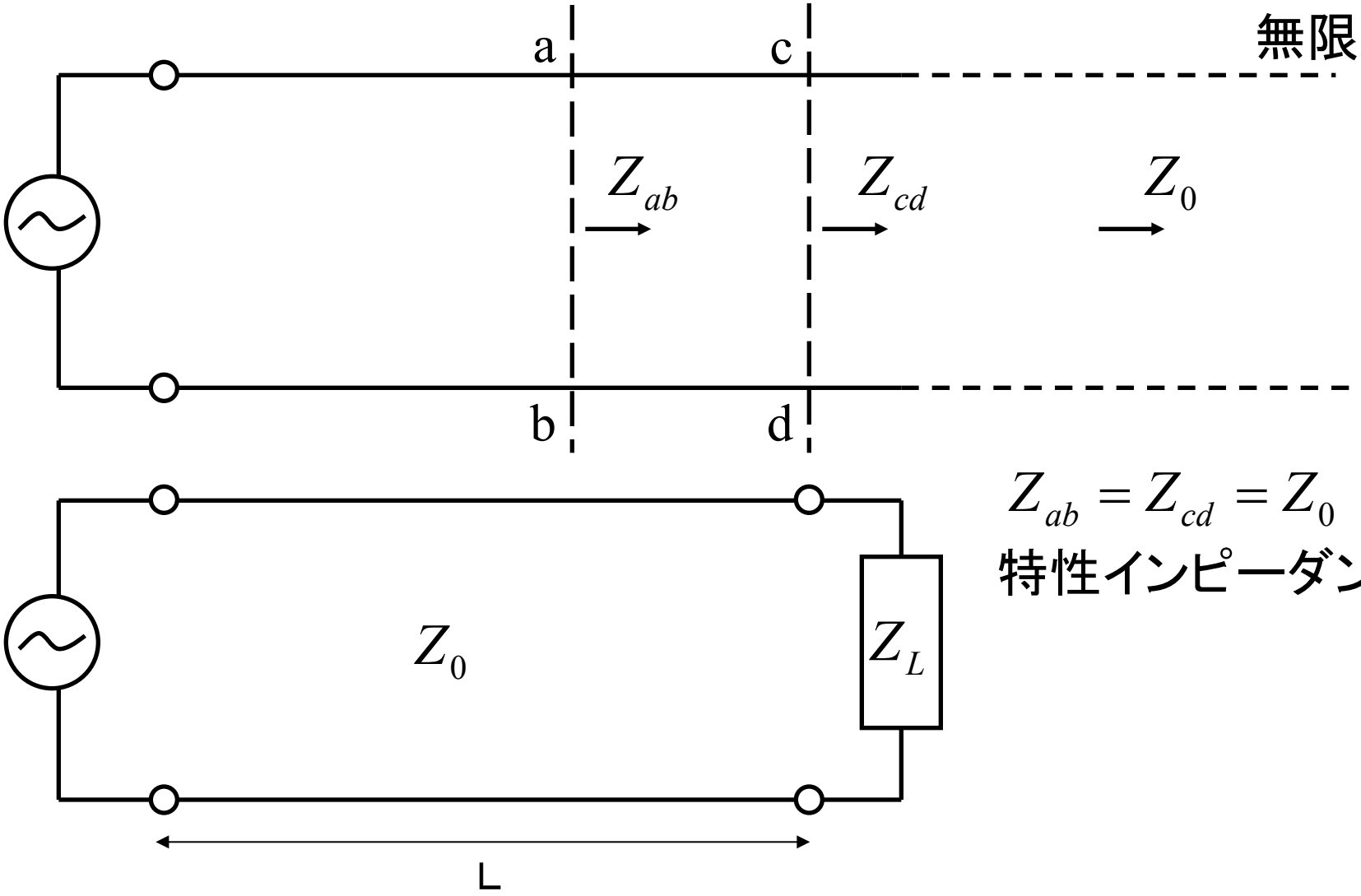
アンテナの電流分布を正確に求めることは困難

モーメント法，伝送線路近似などで求める

ダイポールアンテナのインピーダンス特性



伝送線路



$$Z_{ab} = Z_{cd} = Z_0$$

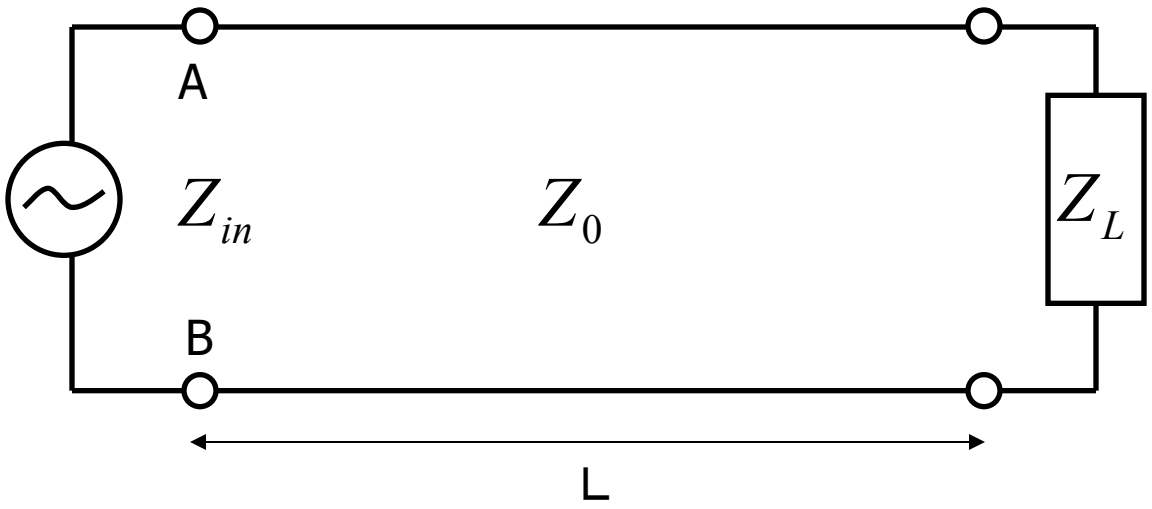
特性インピーダンス

伝送線路近似

- 端子AB間のインピーダンスは

$$Z_{in} = \frac{V}{I} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan kL}{Z_0 + jZ_L \tan kL}$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{k}$$



- 先端にR_Lの抵抗を接続した長さがLの伝送線路で近似.
イピーダンスは無損失線路($R_R = 0$)の基礎方程式から

$$Z_{in} = \frac{V}{I} = R_{in} + jX_{in}$$

$$= Z_0 \frac{R_L + jZ_0 \tan kL}{Z_0 + jR_L \tan kL}$$

$$R_{in} = \frac{1 + \tan^2 k\,L}{{Z_0}^2 + {R_T}^2 \tan^2 k\,L} {Z_0}^2 R_L$$

$$X_{in} = \frac{\left({Z_0}^2 - {R_L}^2\right) \tan k\,L}{{Z_0}^2 + {R_L}^2 \tan^2 k\,L} {Z_0}^2$$

- 半波長ダイポールは$L = \lambda/4$

$$\tan kL = \infty$$

- このとき入力インピーダンスは

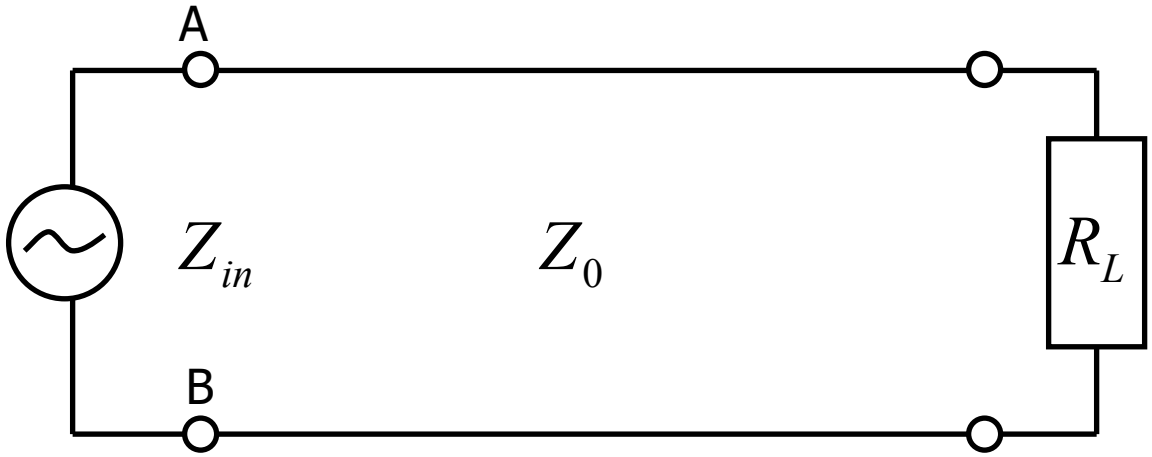
$$R_{in} = \frac{Z_0^{\,2}}{R_L}$$

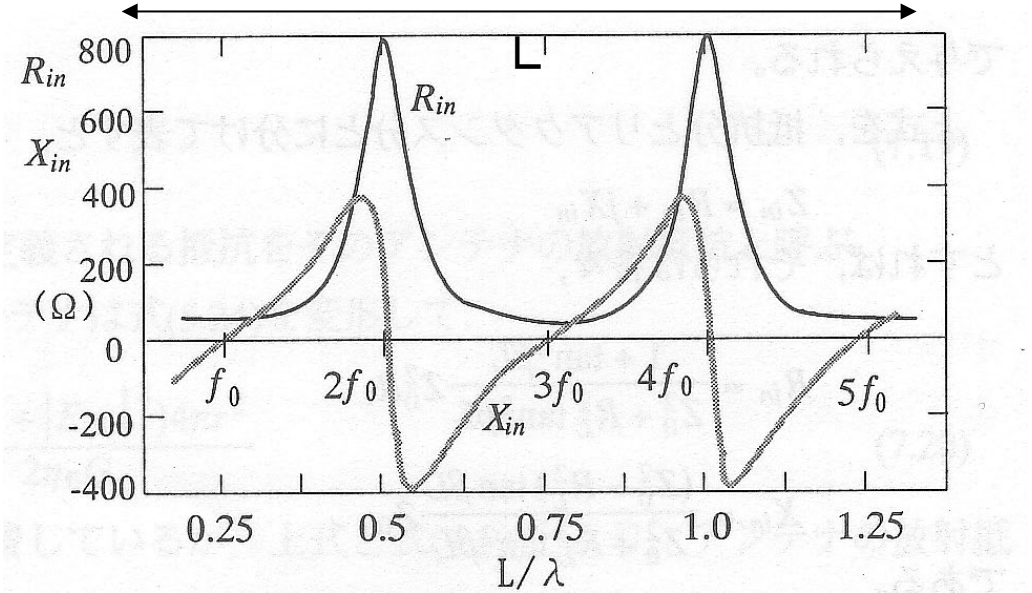
$$X_{in} = 0$$

- R_{in}はアンテナの放射抵抗に相当．$R_{in} = 73.1\Omega$のとき伝送線路のインピーダンスはダイポールアンテナのインピーダンスに近くなる．よってR_L

$$R_L = \frac{Z_0^{\,2}}{73.13}$$

ダイポールアンテナの伝送線路近似特性

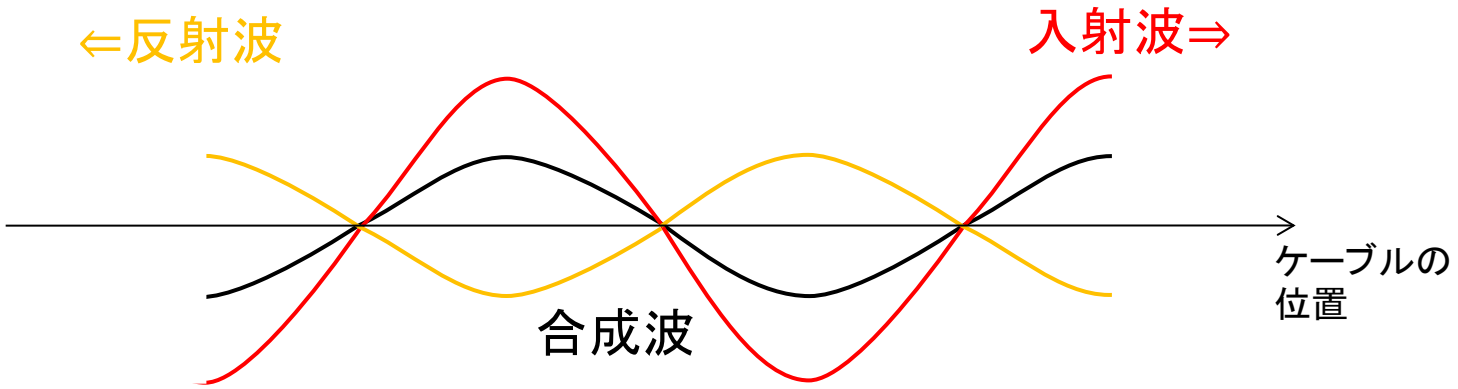




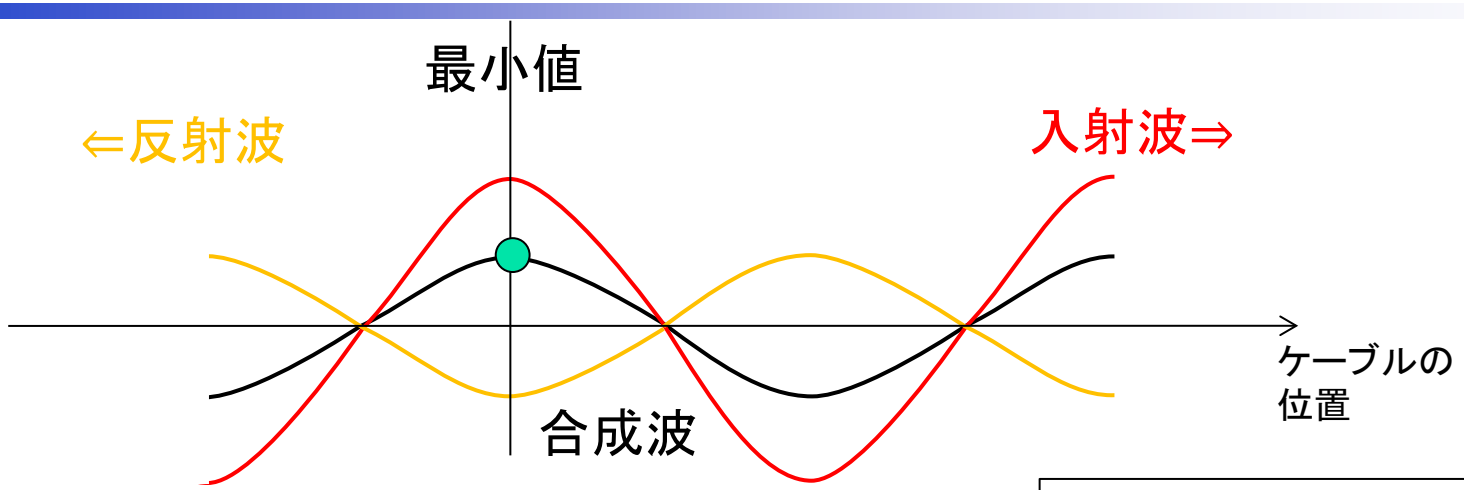
定在波

- 給電線の特性インピーダンスと接続した負荷のインピーダンスが異なると反射波が生じる.
- 進行波と反射波の合成が定在波

←送信機　　アンテナ（負荷抵抗）→

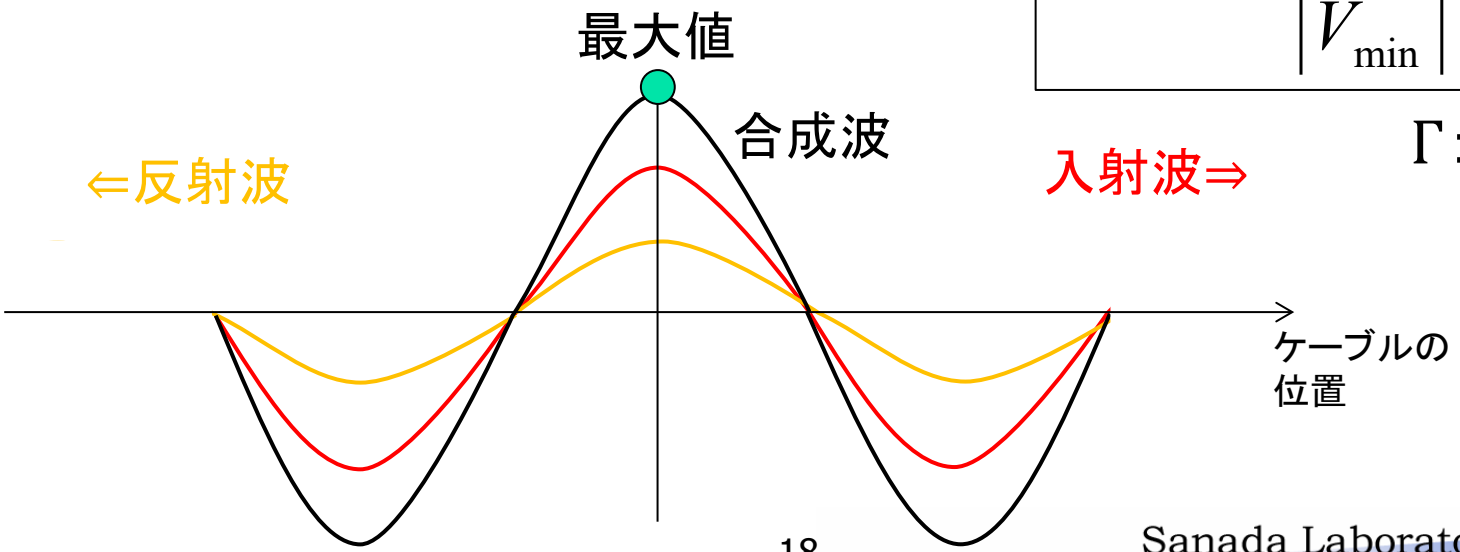


電圧定在波比
(Voltage Standing Wave Ratio: VSWR)



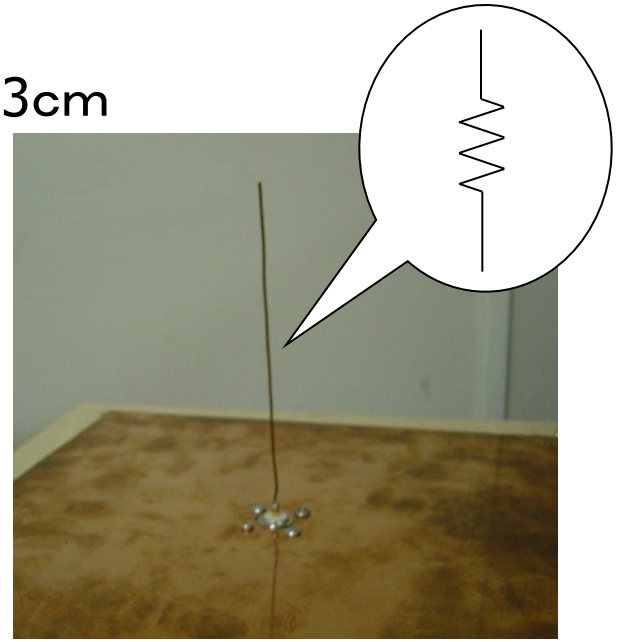
$$VSWR = \left| \frac{V_{max}}{V_{min}} \right| = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|}$$

Γ : 反射係数



VSWRの例

13cm



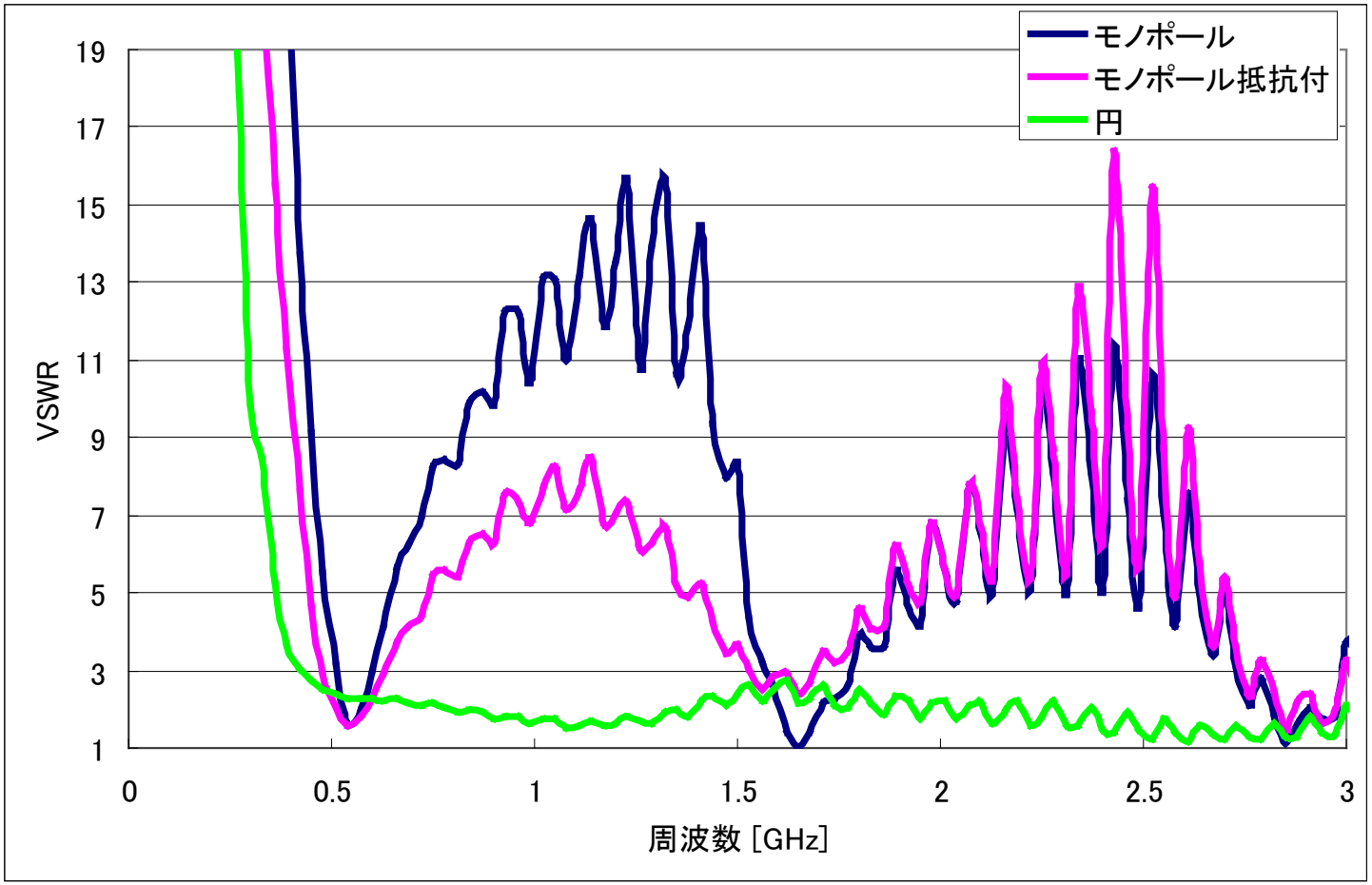
モノポールアンテナ

直径：12cm

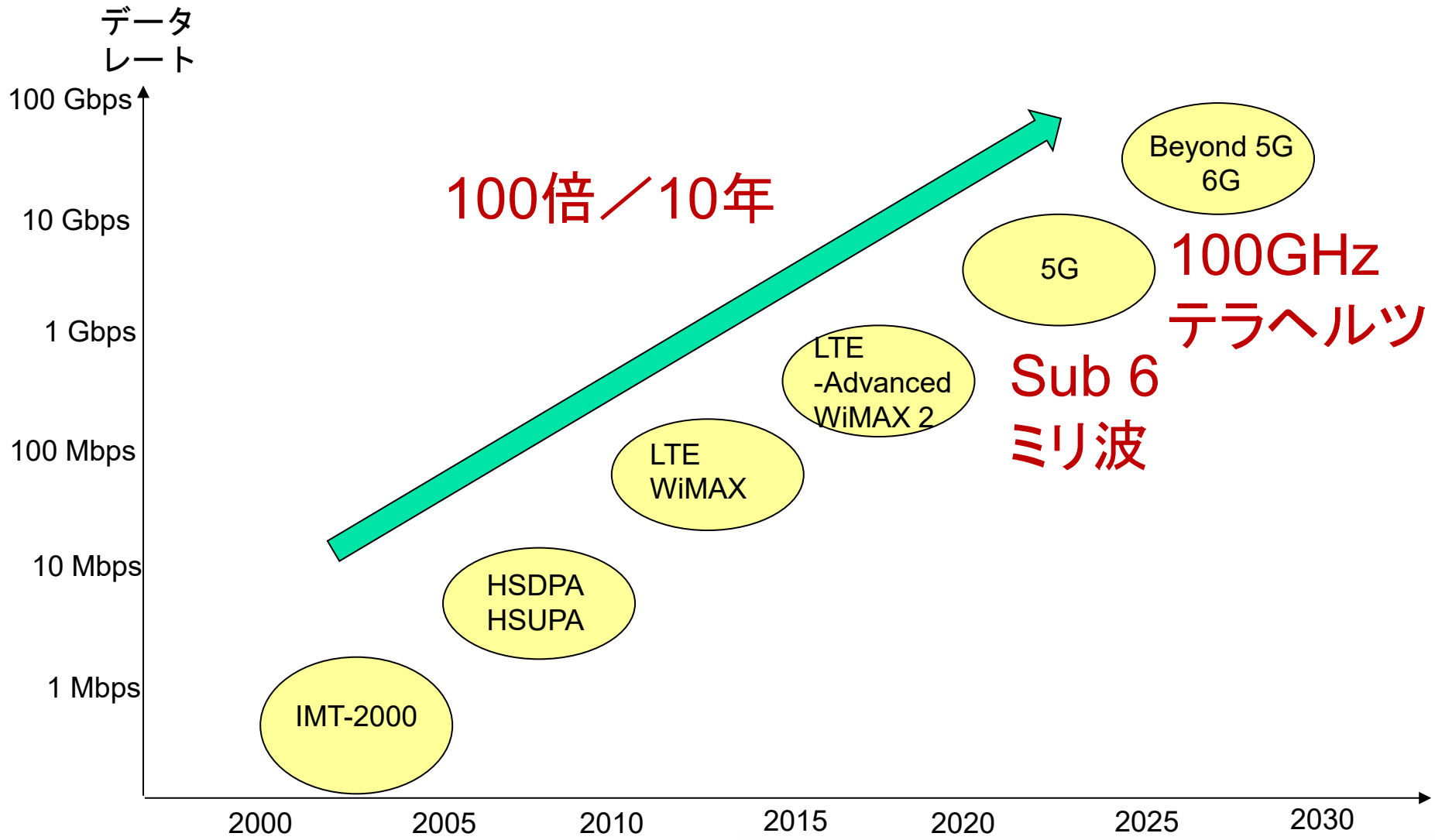


円形アンテナ

VSWR（測定値）

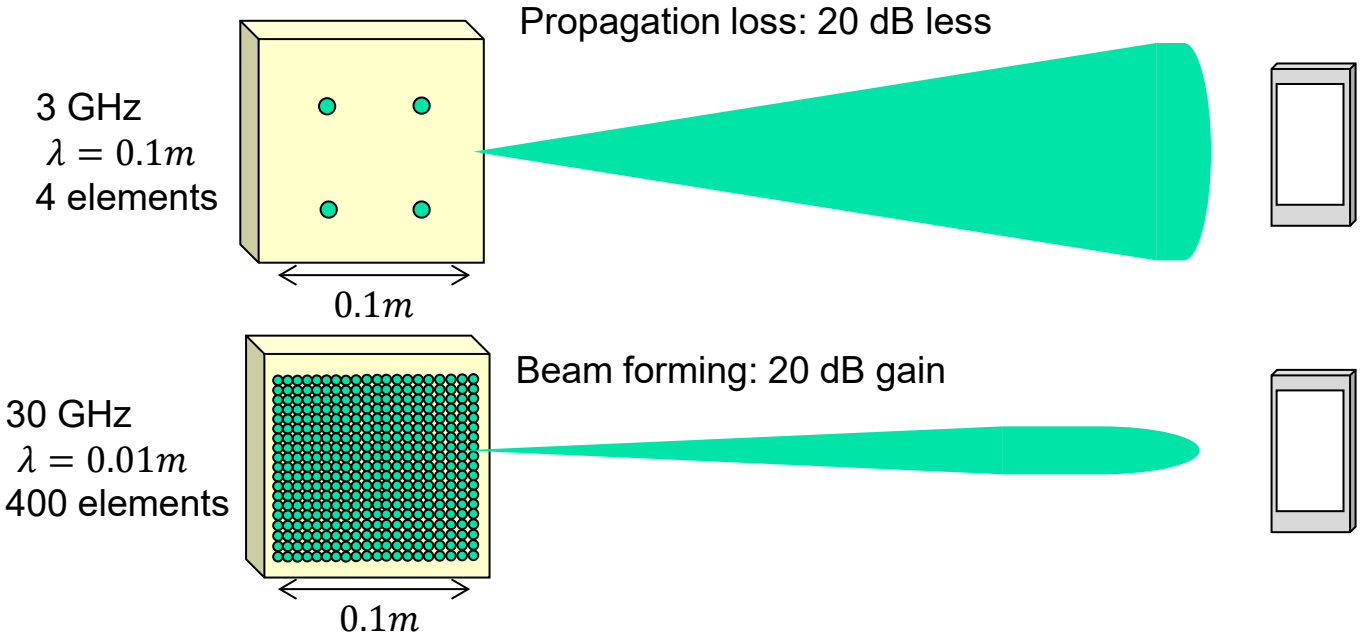


携帯電話の発展

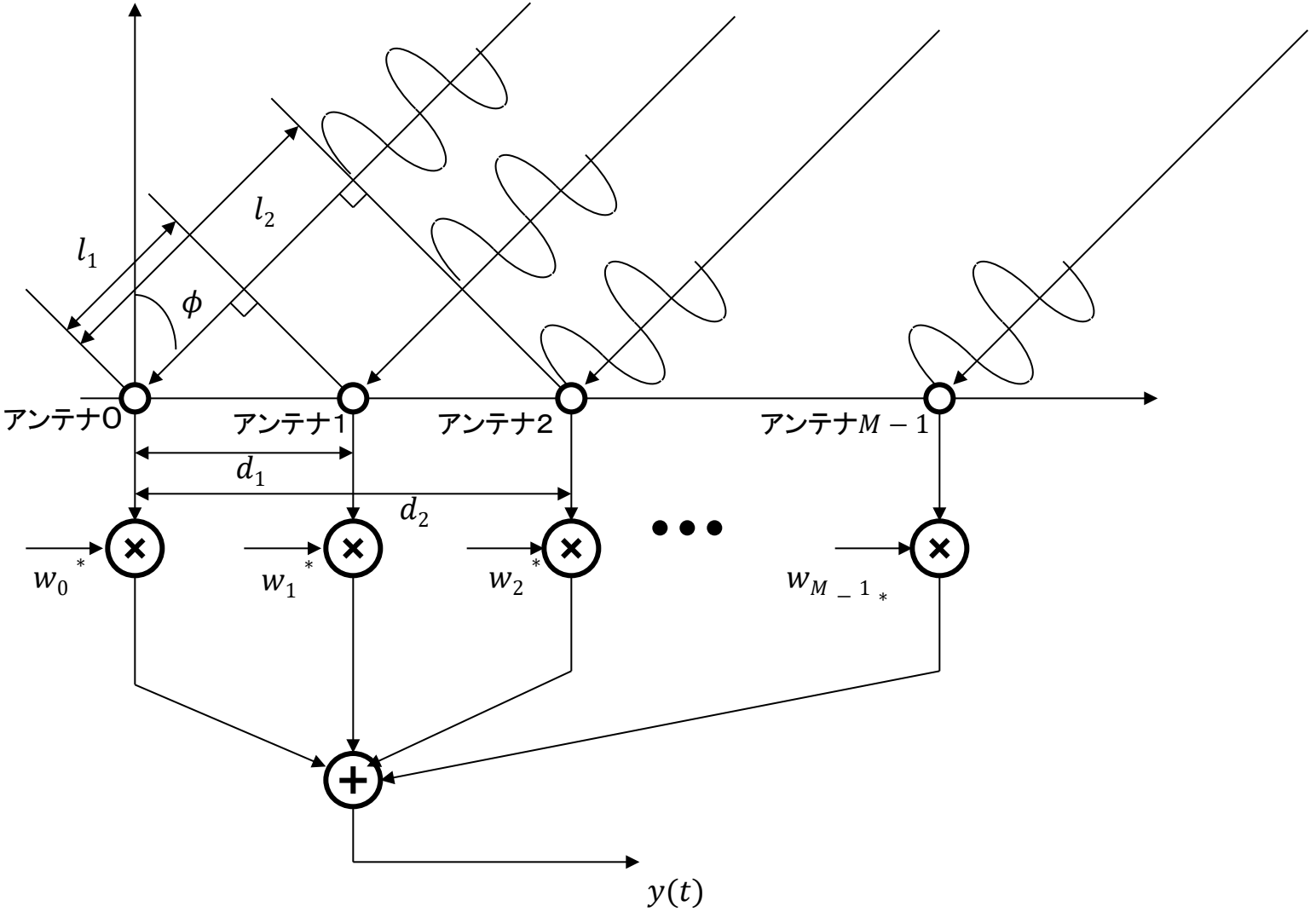

データ
レート
100 Gbps
10 Gbps
1 Gbps
100 Mbps
10 Mbps
1 Mbps
100倍／10年
IMT-2000
HSDPA
HSUPA
LTE
WiMAX
LTE
-Advanced
WiMAX 2
5G
Beyond 5G
6G
100GHz
テラヘルツ
Sub 6
ミリ波
2000
2005
2010
2015
2020
2025
2030

超多素子アンテナによるMassive MIMO

- 高周波数帯の利用
  - 高い伝搬損失
- 超多素子アンテナ
  - アナログもしくはディジタルビームフォーミング
  - 伝搬損失を補償



アレーアンテナの数式表現



- アンテナ0での受信信号

$$v_0(t) = s(t)\exp(j\omega_c t)$$

$$\begin{aligned} v_0(t) &= \sqrt{P}m_I \cos(2\pi f_c t) - \sqrt{P}m_Q \sin(2\pi f_c t) \\ &= \mathrm{Re}\left\{\sqrt{P}\left(m_I + jm_Q\right)(\cos(2\pi f_c t) + j\sin(2\pi f_c t))\right\} \\ &= \mathrm{Re}\{s(t)\exp(j2\pi f_c t)\} = \mathrm{Re}\{s(t)\exp(j\omega_c t)\} \end{aligned}$$

アンテナ0とアンテナ1の行路差は

$$l_1(t) = -d_1 \sin(\phi)$$

この行路差による到来時間差は

$$\tau = l_1/c = 2\pi l_1/\omega_c\lambda$$

ここでcは光速，λはキャリアの波長

したがってアンテナ1における受信信号は

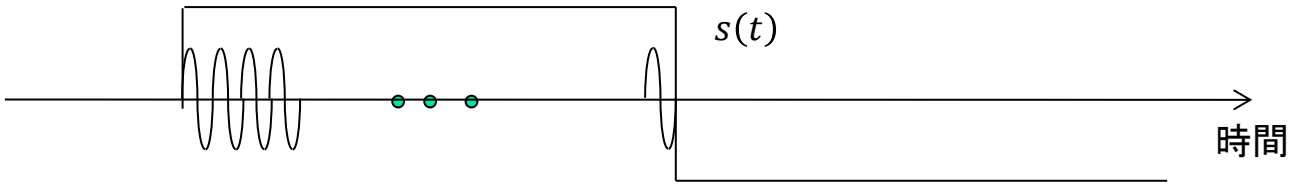
$$v_1(t) = s(t-\tau)\exp(j\omega_c t)\exp(-j\omega_c \tau)$$
$$= s(t-\tau)\exp(j\omega_c t)\exp(j2\pi d_1 \sin(\phi)/\lambda)$$

信号$s(t)$の周期は τに対して非常に長いので

$$v_1(t) = s(t)\exp(j\omega_c t)\exp(j2\pi d_1 \sin(\phi)/\lambda)$$

周波数変換後のベースバンド信号は

$$r_1(t) = s(t)\exp(j2\pi d_1 \sin(\phi)/\lambda)$$



すべてのアンテナ出力を重み付けして合成した出力は

$$y(t) = \sum_{m=0}^{M-1} w_m^* r_m(t)$$

$$= s(t) \sum_{m=0}^{M-1} w_m^* \exp(j2\pi d_m \sin(\phi)/\lambda)$$

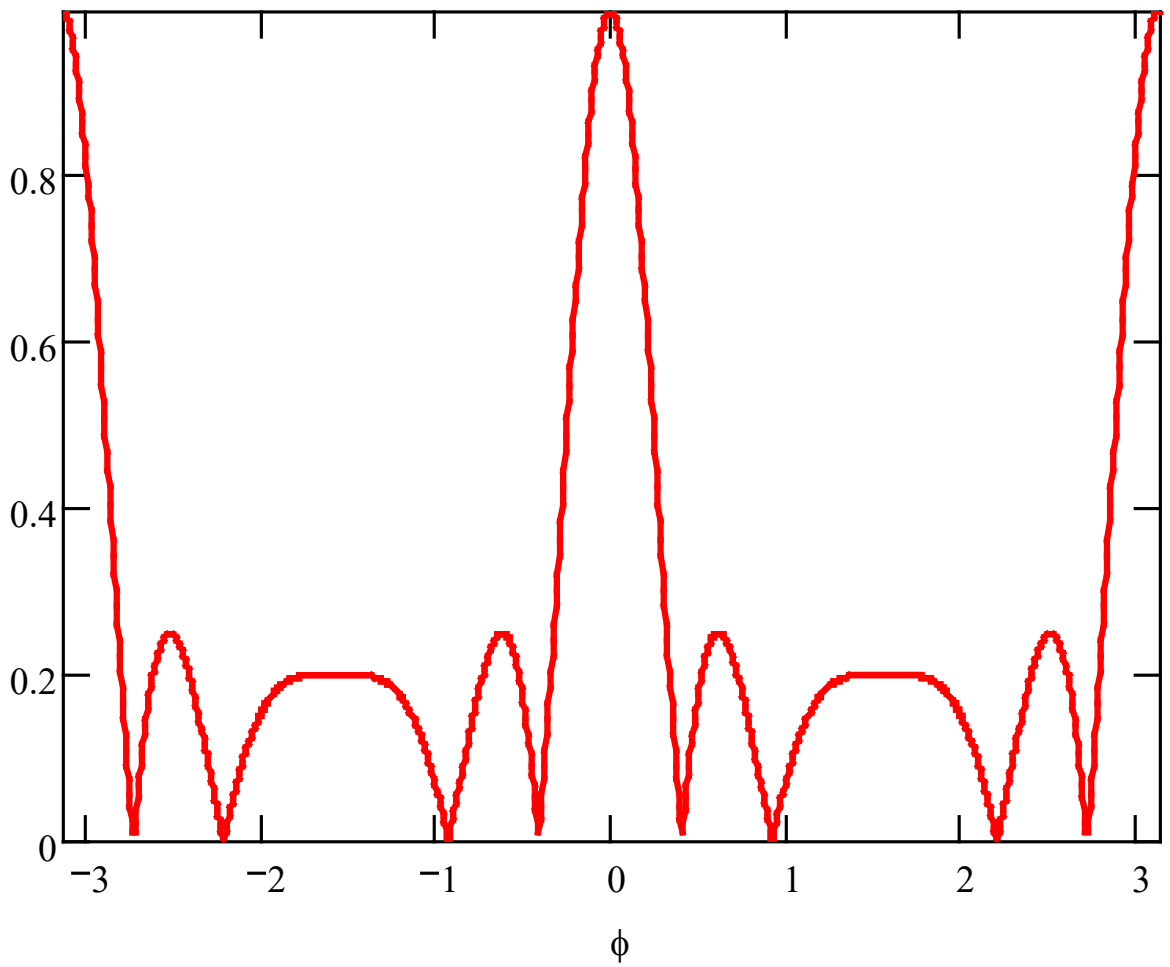
$$= s(t)G(\phi)$$

ただし

$$G(\phi) = \sum_{m=0}^{M-1} w_m^* \exp(j2\pi d_m \sin(\phi)/\lambda)$$

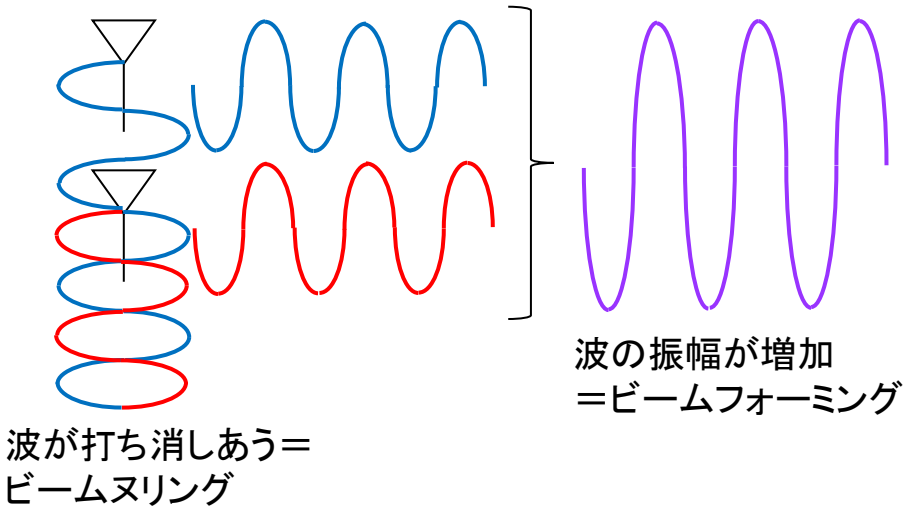
指向性利得

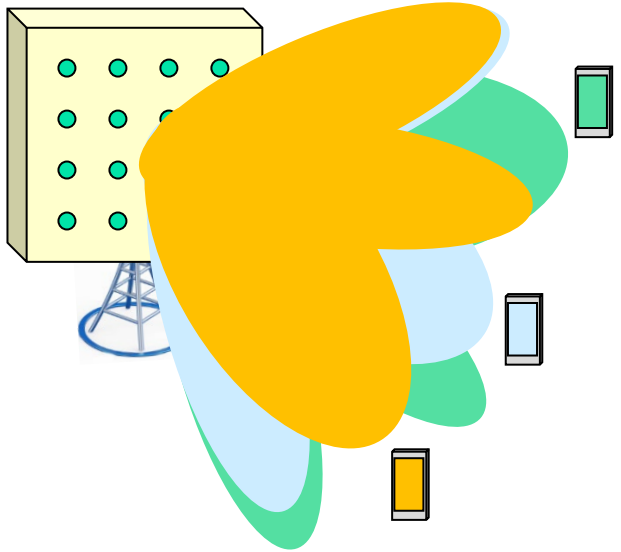
$M = 3$
$d = \lambda/2$
$w_m = 1$



Multiuser-MIMO (MU-MIMO)

- 多素子アンテナを用いた基地局
  - 端末のアンテナ数に制限
- ユーザ間干渉低減
  - ビームフォーミングとヌル制御
- 各端末へのチャネル応答が基地局側で必要





Array.m
初期設定

```
clear;
clf;
rng;
NoArray = 128;                          % アンテナ数
Interval = 0.5;                         % 波長で正規化したアンテナ間隔
Resolution = 360;                       % 角度分解能　360/Resolution度
Phase = -pi:2*pi/Resolution:pi;         % 到来角範囲±π
Beam_direction = pi/4;                  %% ビームフォーミング角度
Null_Direction = 0.3;                   %% ヌルフォーミング角度
Null_Thres = 0.001;                     % ヌルの深さ
Reserve_Gain = [];                      % 条件を満たすビームパターン
Reserve_Coeff = [];                     % 条件を満たす係数セット
result_index = 0;
```

Array.m
ループの開始，ビームパターンの生成

```
for Trial=1:10000
    Trial                                   % Trialの表示
    Gain = 0;
    Coeff = randi(2,1,NoArray)-1;           % 乱数による合成係数
%Coeff = ones(1,NoArray);                   % デバッグ用：合成係数1.0の場合
    for index=0:NoArray-1
        Gain = Gain + Coeff(index+1)/NoArray *
        (exp(1i*2*pi*Interval*index*sin(Phase-Beam_direction)));
    end
    Gain = abs(Gain)./max(abs(Gain));
```

Array.m
ヌル条件を満たす場合の処理

```
% ヌル条件を満たす場合の処理
    if abs(Gain(floor(Resolution/2*Null_Direction/pi)...
                                        +(Resolution/2+1))) < Null_Thres
        % Gainインデックスの表示
        floor(Resolution/2*Null_Direction/pi)+(Resolution/2+1)
         % ヌルの深さの表示
        abs(Gain(floor(Resolution/2*Null_Direction/pi)...
                +(Resolution/2+1)))
        result_index = result_index +1;
        % ビームパターンの保存
        Reserve_Gain = [ Reserve_Gain; Gain ];
        % 合成係数の保存
        Reserve_Coeff = [ Reserve_Coeff; Coeff ];
```

Array.m
ヌル条件を満たす場合の処理

```
            % 条件を満たすビームパターンの表示
            semilogy(Phase, abs(Gain)./max(abs(Gain)))
            hold on
            xlim([-pi pi])
            xlabel('¥phi [rad]')
            ylabel('|G(¥phi)|/N_v')
            ylim([10^-4 1])
%            k = waitforbuttonpress      % 処理中断, クリックで継続
    end
end
```

実験の注意

- 製作するアンテナは他の学生と異なる種類のものを選択してください.
- レポートのためにアンテナの写真を撮ってください
  - 計測結果の不具合がある場合，原因を確認するためにも使用
- VSWRは1～の値
  - 測定値は真値かdB領域の値か要確認
- 受信信号レベルは複数のチャネルで測定
  - VSWRとの整合性を確認
- アレーアンテナ
  - 合成係数は{0，−1，1，i, −i}のいずれかのみ

実験日程

- 1週目：製作するアンテナの調査
  - 専門書，論文，WEB等の調査
  - 必要な材料の洗い出し
- 2週目：アンテナの製作，測定
  - 材料の加工
  - VSWRの測定，受信特性
- 3週目：アレーアンテナの合成係数決定課題
  - 合成係数決定アルゴリズム実装
  - アレーアンテナ特性評価

ディスカッション

レポートのPPTには下記の内容を網羅すること

- アレーアンテナの計算機実験
  - アレーアンテナの合成係数決定アルゴリズムの説明
  - アレーアンテナ合成係数決定コードのソース（MS Word）
  - アレーパターン一覧
  - 制約条件の元で決定した合成係数一覧（MS Word）
- アンテナ製作・測定実験
  - 製作したアンテナの原理と特徴の説明
  - 製作したアンテナの写真
  - VSWRの測定結果，受信信号レベルの測定結果
  - アンテナを製作する際に工夫した点