

10.非相反回路

10.1.回路の無損失性

(1)アイソレータ

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \mathbf{S}\mathbf{a}$$

アイソレータは無損失回路で構成できるか？ → 散乱行列のユニタリー性を確認する。

$$\mathbf{S}\mathbf{S}^+ = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \neq \mathbf{I}$$

光アイソレータは、必ず損失の機構が設けられている。

(2)サーキュレータ

例えば3端子サーキュレータで考える。

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{S}\mathbf{S}^+ = \mathbf{I}$$

すなわち、サーキュレータは無損失回路で構成することができる。

10.2.磁性体のマイクロ波応答

外部から磁界を印加しないとき、磁性体中の磁化方向はランダムに分布し、その透磁率はスカラー量

$$\mu = \mu' - j\mu''$$

で表される。

外部から磁界を印加すると、磁化が一定の方向に揃い、透磁率はテンソルで表される。直流磁界 $\mathbf{H}_0$ を z 方向（電磁波の伝搬方向）に印加すると、透磁率は次のようになる（ポルダーテンソル）。

$$[\mu] = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu_r & -j\kappa & 0 \\ j\kappa & \mu_r & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{rz} \end{bmatrix} \quad (10.1)$$

$$\mu_{rz} \approx 1$$

$$\omega_0 = -\gamma H_0 \quad (\gamma = -2.8 \text{ MHz/Oe})$$

$$\omega_s = -\gamma M_s \quad (M_s : \text{飽和磁化})$$

ω : 動作周波数

$$\mu_r = 1 + \frac{\omega_0 \omega_s}{\omega_0^2 - \omega^2}$$

$$\kappa = \frac{-\omega_s \omega}{\omega_0^2 - \omega^2}$$

ここで、電磁波の磁界及び磁束密度をそれぞれ $\mathbf{h}e^{j\omega t}$ 、 $\mathbf{b}e^{j\omega t}$ （小文字 $\mathbf{h}$ 、 $\mathbf{b}$ で表現）で表すこととして、電磁界の磁界及び磁束密度の関係を次の条件で調べる。

(i) $\mathbf{h}$ が右回り円偏波の場合

観測面を固定すると、電界ベクトルが時間とともに時計方向に回転する偏波を右回り円偏波とよぶ（+z 方向に向かって観測点を移動すると、左回転）。この偏波の磁界 x 成分 h_x 及び y 成分 h_y は、次の関係になる。

$$\mathbf{h}_+ = \mathbf{i}h_x + \mathbf{j}h_y$$

$$h_y = -jh_x$$

なお、瞬時値を調べると次のようになる。

$$h_x = \text{Re}[e^{j\omega t}] = \cos \omega t \quad (10.2.a)$$

$$h_y = \text{Re}[-je^{j\omega t}] = \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = \sin \omega t \quad (10.2.b)$$

このとき、磁束密度 $\mathbf{b}$ は、 $\mathbf{b}_+ = [\mu]\mathbf{h}_+$ より、

$$b_x = \mu_0(\mu_r - \kappa)h_x \quad (10.3.a)$$

$$b_y = -j\mu_0(\mu_r - \kappa)h_x \quad (10.3.b)$$

となるので、 $\mathbf{b}$ も右回り円偏波となる。さらに、 $\mathbf{b}_+ = \mu_0(\mu_r - \kappa)\mathbf{h}_+$ と表されるから、右回り円偏波に対してはスカラー透磁率 $\mu_+ = \mu_0(\mu_r - \kappa)$ を感じることになる。

(ii) 左回り円偏波

偏波の回転方向が逆の左回り円偏波（ $\mathbf{h}_- = \mathbf{i}h_x + \mathbf{j}(+jh_x)$ ）に対しても同じように考えると、透磁率はスカラー $\mu_- = \mu_0(\mu_r + \kappa)$ となる。

すなわち、右回り・左回りの円偏波に対して、異なるスカラー透磁率をもつ材料として働く。その結果、

- ・ 右回り・左回り円偏波は、各々の偏波状態を保ったまま異なる伝搬定数で伝搬する。
- ・ 両偏波を合成すると直線偏波になるが、伝搬に伴って偏波の方向が変化する（ファラデー回転）。

[ファラデー回転]

$z = 0$ で $e_x = E_0 \cos \omega t$ 、 $e_y = e_z = 0$ なる直線偏波が入射する場合を考える。

$$\mathbf{i}e_x = \mathbf{i}E_0 \cos \omega t$$

$$= \frac{E_0}{2} \{\mathbf{i} \cos \omega t + \mathbf{j} \cos(\omega t - \frac{\pi}{2})\} + \frac{E_0}{2} \{\mathbf{i} \cos \omega t + \mathbf{j} \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})\} \quad (10.4)$$

と分解できる。右辺第 1 項は右回り円偏波、第 2 項は左回り円偏波を表し、それぞれ比透磁率 $\mu_+ = \mu_0(\mu_r - \kappa)$ 、 $\mu_- = \mu_0(\mu_r + \kappa)$ を感じるため、右回り・左回りの円偏波の伝搬定数は各々次の

ようになる。

$$\begin{aligned}\beta_+ &= \omega\sqrt{\varepsilon\mu_+} \\ \beta_- &= \omega\sqrt{\varepsilon\mu_-}\end{aligned}$$

したがって、距離 z だけ伝搬した後では、

右回り円偏波：

$$\begin{aligned}& \frac{E_0}{2} \{ \mathbf{i} \cos(\omega t - \beta_+ z) + \mathbf{j} \cos(\omega t - \frac{\pi}{2} - \beta_+ z) \} \\ &= \frac{E_0}{2} \{ \mathbf{i} \cos(\omega t - \beta_+ z) + \mathbf{j} \sin(\omega t - \beta_+ z) \} \quad (10.5.a)\end{aligned}$$

左回り円偏波：

$$\frac{E_0}{2} \{ \mathbf{i} \cos(\omega t - \beta_- z) - \mathbf{j} \sin(\omega t - \beta_- z) \} \quad (10.5.b)$$

となり、この点における電界の x 、 y 成分は各々次のようになる。

$$e_x = \frac{E_0}{2} \{ \cos(\omega t - \beta_+ z) + \cos(\omega t - \beta_- z) \} = E_0 \cos\left(\frac{\beta_- - \beta_+}{2} z\right) \cos\left(\omega t - \frac{\beta_- + \beta_+}{2} z\right) \quad (10.6.a)$$

$$e_y = \frac{E_0}{2} \{ \sin(\omega t - \beta_+ z) - \sin(\omega t - \beta_- z) \} = E_0 \sin\left(\frac{\beta_- - \beta_+}{2} z\right) \cos\left(\omega t - \frac{\beta_- + \beta_+}{2} z\right) \quad (10.6.b)$$

・ $\cos\left(\omega t - \frac{\beta_- + \beta_+}{2} z\right)$ の項は、 e_x 、 e_y で共通であり、時間的に同相で振動することを表す。

→ すなわち、直線偏波

・ x 成分、 y 成分の振幅が、各々 $\cos\left(\frac{\beta_- - \beta_+}{2} z\right)$ 、 $\sin\left(\frac{\beta_- - \beta_+}{2} z\right)$

→ 偏波の方向が x 軸から角度 $\theta_F = \frac{\beta_- - \beta_+}{2} z = \frac{\omega\sqrt{\varepsilon}}{2} (\sqrt{\mu_-} - \sqrt{\mu_+}) z$ 傾いている。

したがって、入射直線偏波は距離 z 伝搬後に角度 θ_F だけ傾いた直線偏波になる。また、角度 θ_F は伝搬距離 z に比例する。

→ ファラデー回転

さらに、外部磁界の方向を反転すると、式(10.1)の関係から次のようにパラメータが変化する。

$$\begin{aligned}H_0 &\rightarrow -H_0 \\ M_s &\rightarrow -M_s\end{aligned}$$

すなわち、各円偏波が感じるスカラー透磁率は $\mu_+ = \mu_0(\mu_r + \kappa)$ 、 $\mu_- = \mu_0(\mu_r - \kappa)$ となる。その結果、直線偏波の回転角度は $-\theta_F$ になる。

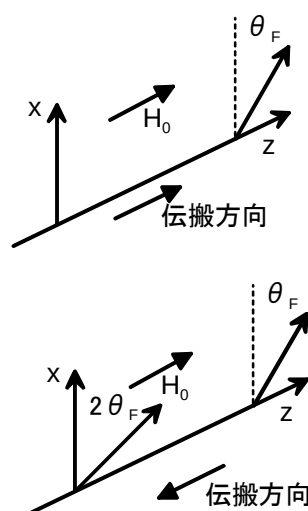


Fig.10.1 ファラデー回転

10.3 アイソレータ

- ・偏光子（偏波分離素子）＋ファラデー回転子＋偏光子（偏波分離素子）
- ・エッジガイドモード

10.4 サーキュレータ

- ・マイクロストリップ形サーキュレータ(1～30GHz)
- ・集中定数形サーキュレータ(小西形:30MHz～5GHz)
- ・エッジガイド形

→ 共振器構造を使わないので広帯域。伝送線路とエッジガイドモードのインピーダンス不整合で帯域が制限される。(例:中心周波数 5GHz、帯域幅 35%)

- ・非可逆移相器を用いたサーキュレータ

10.5 サーキュレータの利用例

- (1)双方向伝送
- (2)無反射終端と組み合わせてアイソレータ
- (3)位相変調器への応用
- (4)Add-Drop Multiplexer

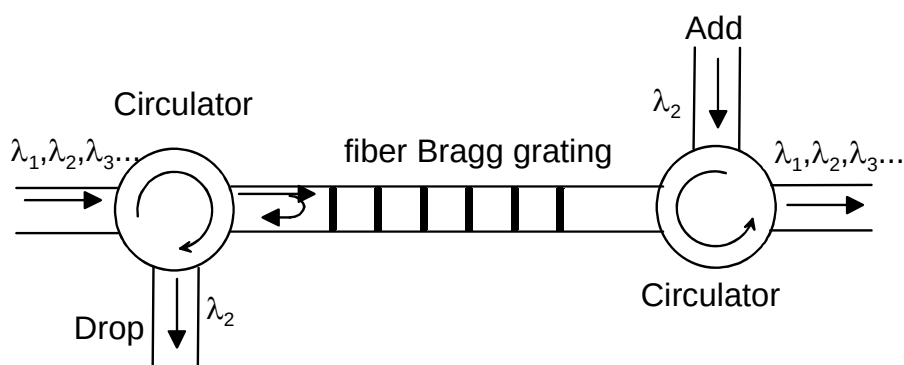


Fig.10.2 Add-Drop Multiplexer