

# ジャイレータを含む左手系回路と非可逆性アンテナ

堤 誠<sup>+</sup>

## Left Handed Gyrator Circuits and their Application to Nonreciprocal Antenna.

Makoto Tsutsumi

This paper treats left handed gyrator circuits with both theory and experiments including nonreciprocal small ferrite antenna as an application. After derivation on scattering parameters of the circuit, nonreciprocal characteristic was estimated through secular determinant of two port circuit parameters. Experiments were undertaken using five pieces of single crystal of yig ferrite. Based on the theory and experiment on scattering characteristic of the left handed gyrator line, small left handed gyrator antenna was designed and nonreciprocal leaky wave phenomenon was demonstrated experimentally.

### 1. まえがき

誘電率と透磁率が同時に負となる左手系、あるいはメタマテリアルと呼ばれる媒質、回路の研究が最近富に活発に行われ、多くの特異な回路、デバイスが提案されている[1]-[4]。一方、フェライトを用いた集中定数回路型ジャイレータは小型で低損失であることから、マイクロ波非可逆性回路、特に携帯電話に多く使われている[5]。ここではこのジャイレータ回路に従来の右手形の分布定数線路を周期的に装荷し、左手系回路を構成した場合の伝送特性を理論的ならびに実験的に明らかにするとともに、応用として非可逆性を示す小型アンテナを提案する。

### 2. 理論

ジャイレータは磁化されたフェライト基板上に構成された直交する線状アンテナからなる。この場合、フェライトの大きさは使用する電磁波の波長に比べて十分小さいものとする。この事はジャイレータを集中定数回路素子として取り扱うことが出来る。その等価回路は図1に示すように、理想ジャイレータ  $a$  と相互結合回路  $M$  で現わすことが出来る[5]。ここでは、回路特性に一般性を持たせるためにジャイレータ回路に抵抗  $R$  と容量  $C$  を並列に装荷する。

---

<sup>+</sup> 宇宙通信工学科

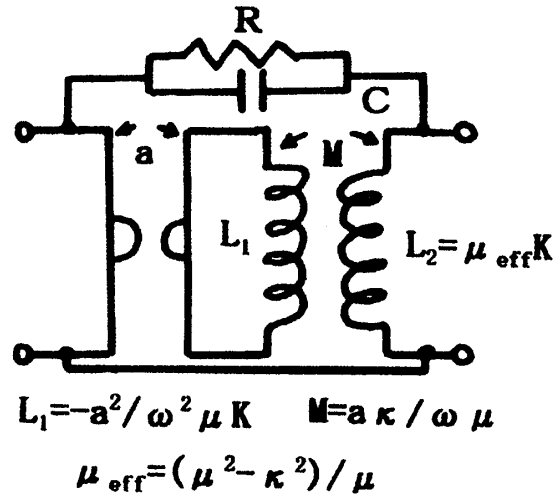


図1 並列負荷を含むジャイレータ回路

図1に示すジャイレータ回路におけるアドミタンス行列  $Y$  は

$$\begin{aligned} Y_{11} &= 1/R + j\omega(C + \mu k / |z|) \\ Y_{12} &= -[1/R + \omega \kappa k / |z| + j\omega C] \\ Y_{21} &= -[1/R + \omega \kappa k / |z| + j\omega C] \\ Y_{22} &= Y_{11}, \quad |z| = \omega^2 k^2 (\kappa^2 - \mu^2) \end{aligned} \quad (1)$$

で与えられる。ここに  $\mu$ 、 $\kappa$  はフェライトの透磁率の対角項と非対角項を、 $k$  はフェライト-コア結合係数  $10^{-9}$  である。このジャイレータ回路に長さ  $L$  の右手形の分布定数回路を装荷すると、ユニット回路当りの四端子定数  $F$  は

$$F = \begin{bmatrix} \cos(\beta L/2) & jZ_0 \sin(\beta L/2) \\ j \sin(\beta L/2) / Z_0 & \cos(\beta L/2) \end{bmatrix} \cdot F_0 \cdot \begin{bmatrix} \cos(\beta L/2) & jZ_0 \sin(\beta L/2) \\ j \sin(\beta L/2) / Z_0 & \cos(\beta L/2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

の形で求まる。ここに  $F_0$  は (1) 式から求まるジャイレータ回路の4端子定数、 $\beta$  および  $Z_0$  は右手系回路の伝搬定数と特性インピーダンスである。

図2はユニット回路を5段縦続接続して数値的に評価した散乱パラメータ  $S_{21}$  である。用いた数値的なパラメータは周期  $L=10$  mm, 飽和磁化  $M=0.173$  T, 印加磁界の強さ  $H_0=0.1$  T, 短絡スラブの長さ 5 mm で容量  $C$  を変化している。この図から容量を 10 pF 迄増やすと、左手系を示すフィルタ帯域が 4 GHz から 1 GHz まで低い周波数へと移動すると共にフィルタの帯域が狭まることが分かる。概して図2に示す散乱特性はすでに報告されている誘電体装荷左手系回路[1],[2]に類似する。

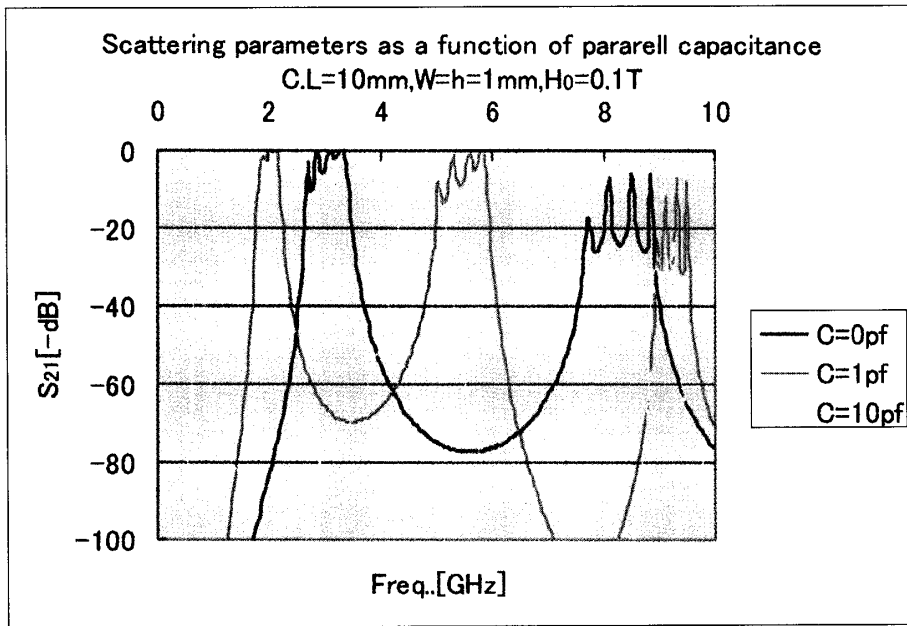


図2 並列容量  $C$  を変えた左手系ジャイレータ回路の散乱特性  
 $\epsilon_r=2.6, R=\infty, H_0=0.1T$

(2)式を5段縦続接続して求まる四端子定数  $F_T$  から、

$$F_T = A_T D_T - B_T C_T \quad (3)$$

を実部と虚部に分け、数値的に評価し、 $R=\infty$ で容量を加えた場合と加えない場合の  $F_T$  を示した結果を図3に示す。この図から容量負荷がないと  $F_T$  は-1 となり、この回路は純粋な非可逆性左手系の回路として動作することになる。一方、1pfの容量が負荷されると、 $F_T$  が-1 となる周波数帯域が狭くなるとともに、 $F_T$  が+1 となる帯域も現れて来る。これは容量を負荷すると、ジャイレータの作用がなくなり、非可逆性が失われる事を意味する。

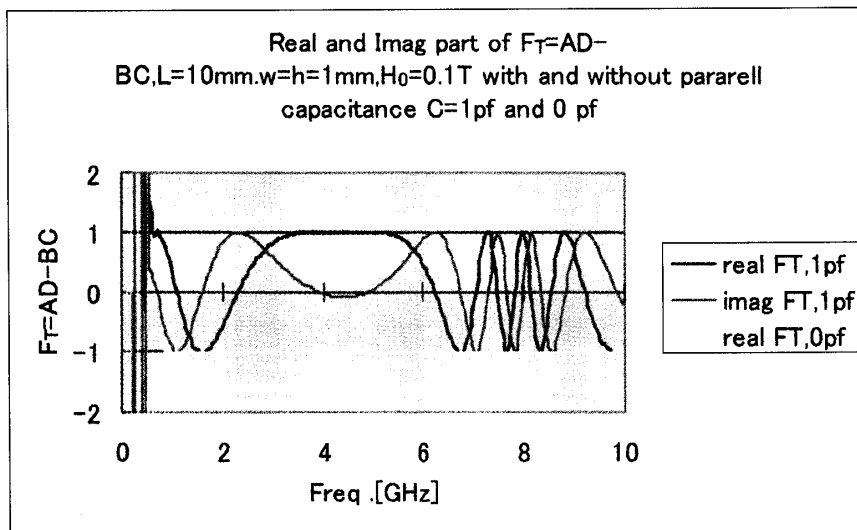


図3 可逆、非可逆特性の判別

一方、並列負荷に抵抗を選ぶと、 $F_T$  を零にすることが可能で、アイソレータを構成できる。図4は  $R$  を  $100\Omega$  と  $300\Omega$  に選んだ場合の左手系のアイソレータ特性を示す。この場合  $S_{21}$  と  $S_{12}$  の差が  $30\text{db}$  以上もあり、ダイナミックレンジの大きい左手系のアイソレータが実現出来ることになるが、この設計例では挿入損が  $20\text{db}$  とかなり大きい。なお、左手系のアイソレータは後退波特性を示す。

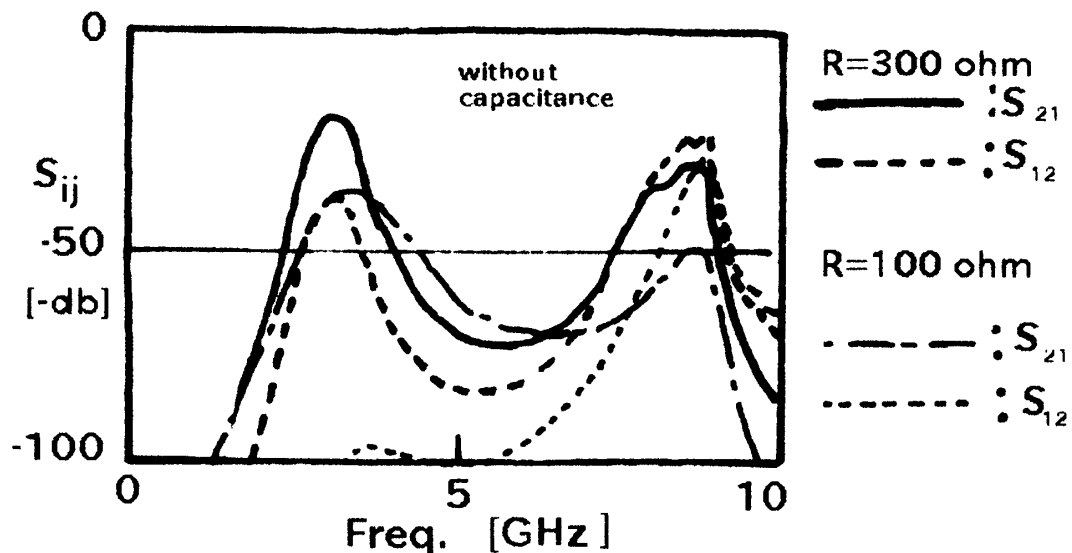


図4 並列抵抗  $R$  を  $100\Omega$  と  $300\Omega$  に変えた場合の左手系のアイソレータの特性

### 3. 実験結果

実験は  $1 \times 5 \times 10\text{mm}^3$  のフェライト(YIG)単結晶を5個用いて行った。図5は試作された左手系ジャイレータ回路を示す。回路の寸法は  $70 \times 25\text{mm}$  で、周期  $L$  が  $10\text{mm}$ 、 $C = 1\text{pF}$  の容量が5個、短絡スラブと共に装荷されている。又、フェライト上には  $100\mu$  径の線状アンテナが  $30$  度の角度で交叉し、ジャイレータを構成する。なお、入出力間を絶縁するために薄いマイカが線状アンテナ間に挿入されている。



図5 試作された左手系ジャイレータ回路

図6は左手系ジャイレータ回路の伝送特性である。この場合寸法  $100 \times 130 \times 50\text{mm}$  で空隙  $70\text{mm}$  の永久磁石中にこの回路を挿入し、フェライトを面に垂直に磁化する。空隙を調節して、磁界の強さを  $H_0 = 2500\text{G}(0.25\text{T})$ ,  $1740\text{G}(0.174\text{T})$ ,  $142\text{G}(0.142\text{T})$  と変えている。こ

の実験結果から左手系特有のフィルタ特性が 1GHz 前後で現れ、磁界により周波数特性を 100MHz/1000G 程度制御できる。図 7 は図 6 と同じ周波数帯域で測定された遅延特性である。この図から最大 35nsec の遅延が求まると共に 1GHz 付近の帯域で周波数が高くなると、遅延が小さくなる典型的な左手系の特性が現われる。いま、図 2 に示す理論値で帯域を 3GHz 以下に限り、図 6 に示す実験値と比較すると、 $C=2\text{pf}$  で 2GHz 前後で現われる帯域通過特性が実験値では 1.2GHz(1200MHz)で現われるものの、概して両者の傾向が類似する。次に容量を除き、純粋な左手系のジャイレータ回路とした場合の伝送特性の実験結果を図 8 と図 9 に示す。図 8 は磁界が 1990G(0.199T)の場合で、図 9 は 2070G(0.207T) の場合である。すでに図 3 で論じたように図 8 では非可逆性が 2GHz 付近の周波数で  $S_{21}$  と  $S_{12}$  の違いで現れるが、磁界が強いと、静磁波が励振され、図 9 に示すように非可逆性は無くなる。

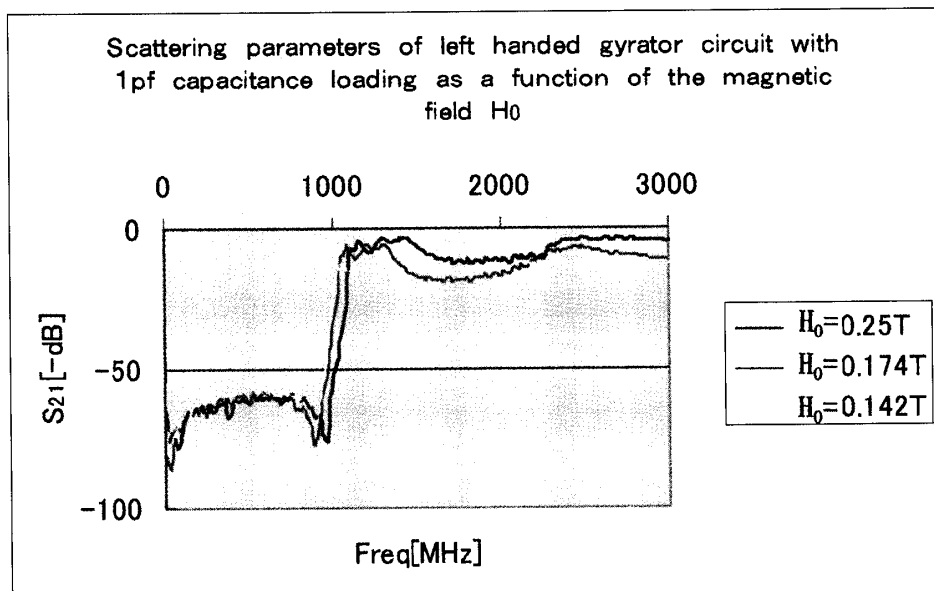


図 6 測定された容量負荷左手系ジャイレータ回路の伝送特性

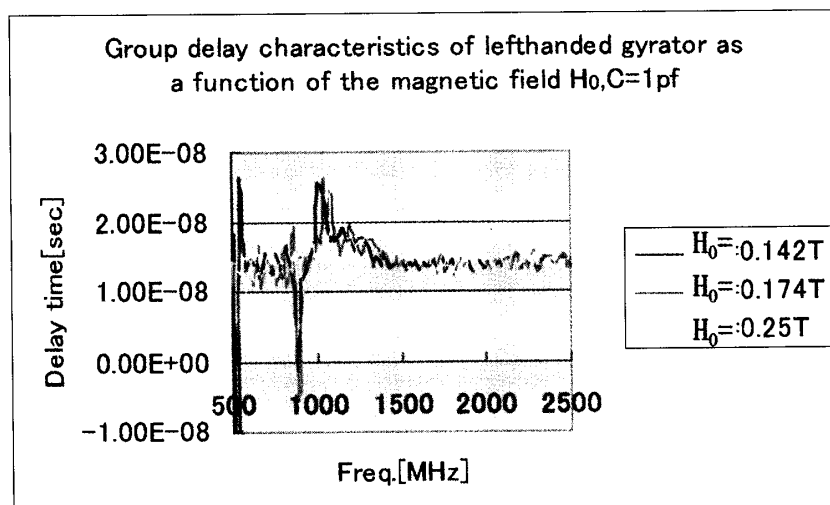


図 7 測定された容量負荷左手系ジャイレータ回路の群遅延特性

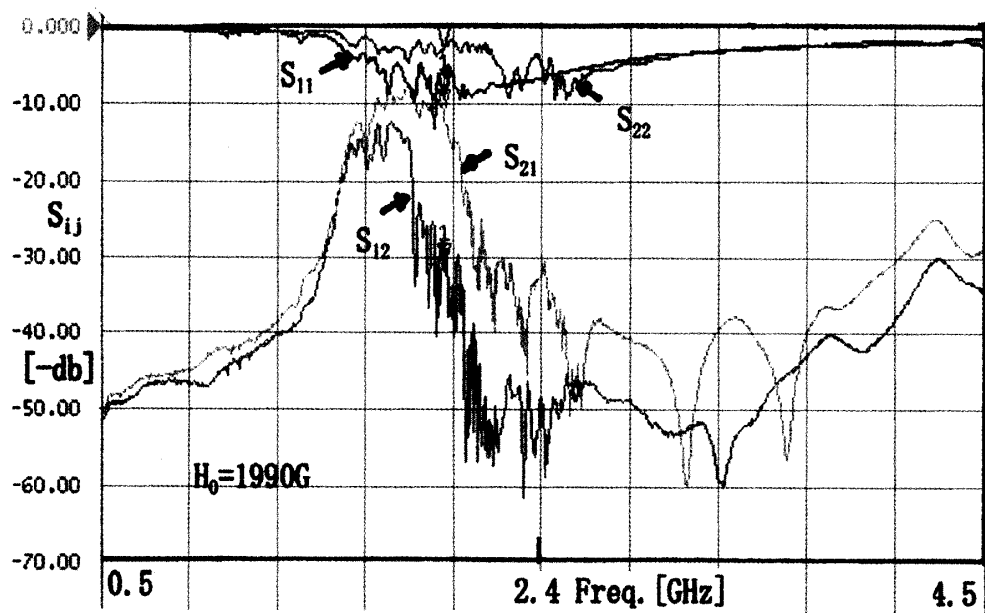


図8 左手系フェライトジャイレータ回路の伝送特性、磁界が弱い場合

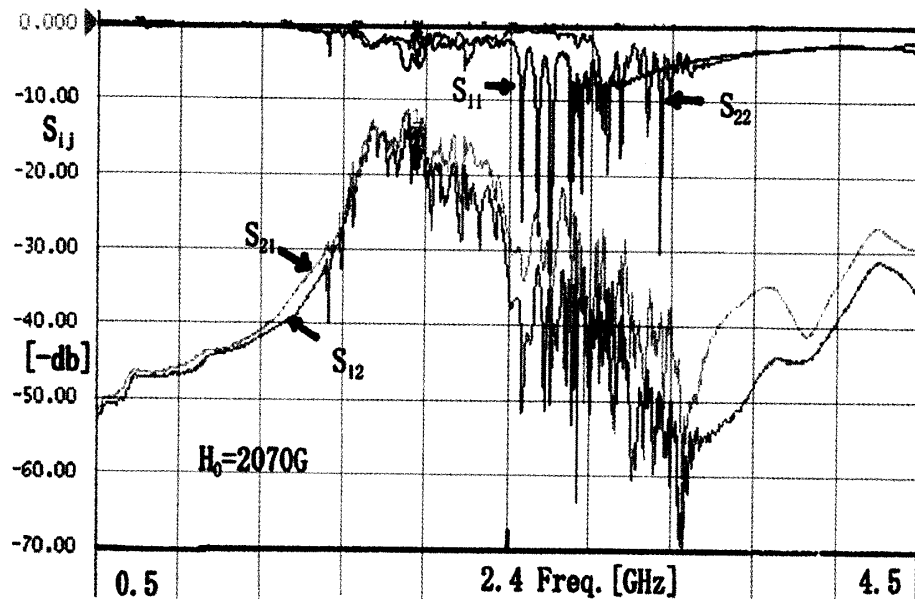


図9 左手系フェライトジャイレータ回路の伝送特性、磁界が強い場合

### 3. 非可逆性のアンテナへの応用

図3で論じたように容量を含まないジャイレータ回路は(3)式で $F_T=1$ を満足する。この条件で5段従属接続した左手回路の伝播定数 $\Gamma$ は

$$\sinh(\Gamma L) = (A_T + D_T)/2 \quad (4)$$

の関係を満足する。一方、従来知られている可逆性の回路では

$$\cosh(\Gamma L) = (A_T + D_T)/2 \quad (5)$$

となる。

図10は $\Gamma = j\beta$ として、 $\beta$ と $\omega$  ( $\omega = 2\pi f$ )の関係である分散ダイアグラムを(4)式から求め

たものである。この図で 4GHz 付近に左手系の特性が現われ、5GHz での遮断特性を介して 8GHz に右手形の特性が表れる。また、 $\beta L = \pi/2$  にブラッグ周波数が現われ、曲線が P 点で交わる。特にこの P 点で  $+\beta L$  と  $-\beta L$  の曲線が非対称であることに注目すべきである。通常 P 点の周りでは (5) 式で表せるように  $\Gamma$  は cosh 状で対称に分布する。曲線がこのような非対称に分布することは、図 10 に示す 1 点鎖線で示す曲線  $\beta_0^2 = \omega^2 \epsilon_0 \mu_0$  で囲む帯域は放射波の領域であるから、この領域で放射波に非可逆性が現れることになる。

ここではこの p 点付近での漏洩波(放射波)を左手系ジャイレータアンテナとして動作させた場合の放射特性の測定を行う。用いたアンテナは図 5 に示す回路で容量を除いた構造である。このアンテナの放射特性を良好にするために最大 2000G (0.2T) の小型永久磁石、寸法、 $10 \times 20 \times 3\text{mm}$  を 5 個用いた。図 11 は磁界を 1065G (0.1065T) に選んで測定された放射パターンである。周波数は 1482MHz で 1400MHz に同調するパッチアンテナを 180 度回転する被測定アンテナから 1.2m 離して測定された。図 11 から放射パターンは右側へ 10 度程度傾く弱い左手形の特性と、 $S_{21}$  と  $S_{12}$  の差が 5db 位異なる非可逆性が見られるが、図 10 で述べた分散特性を説明する様な十分な非可逆特性は観測されていない。

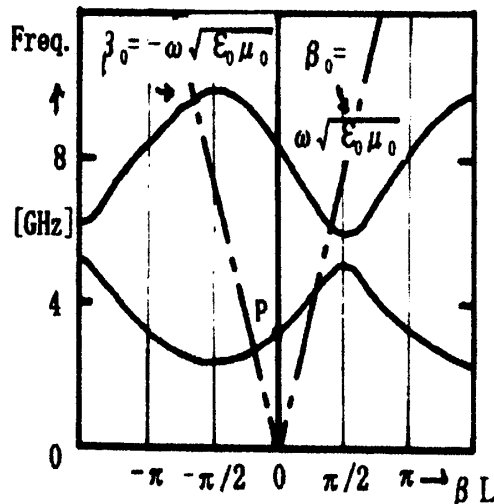


図 10 分散特性

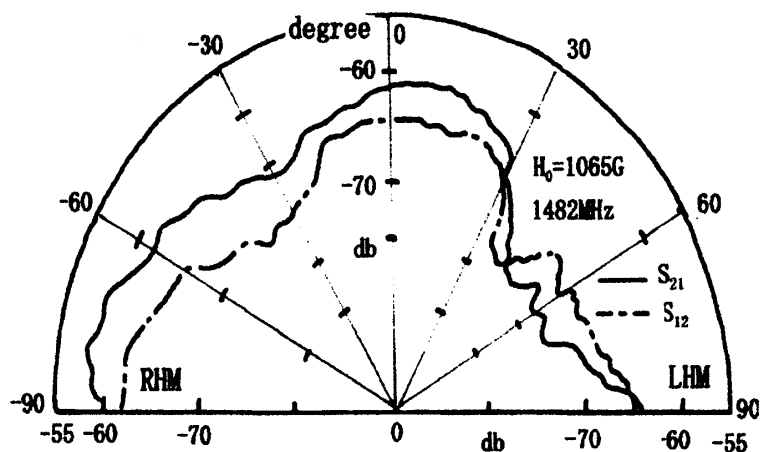


図 11 測定された非可逆性の放射パターン

#### 4 むすび

良く知られたフェライトジャイレータ回路を用いて左手系回路を構成した。結果として非可逆性を含む左手系回路の特性が明らかになると共に、応用として、電子制御左手系フィルタおよび非可逆性アンテナを提案した。フィルタの場合、現在のところ 100MHz/1000G と電子制御率が弱く、これを向上させるには一つはフェライト上に設置された線状アンテナによる入出力間の結合を強めること、他に入出力端子間の整合を最適化することであるとする。非可逆性左手系のアンテナに関しては小型のアンテナが実現できるが、この場合通常のアンテナよりもセンサとして動作させると、特異な機能をアンテナに持たせることが出来る。

#### 文献

- 1]C.Caloz and T.Itoh," Electromagnetic Metamaterials:Transmission Line Theory and Microwave Applications" ,Wiley-IEEE press 2005,
- 2]George V.Eletheriades and Keith G. Balmain," Negative-Refraction Metamaterials" , Wiley-IEEE press 2005.
- 3]堤誠” 負の屈折率伝送媒質とマイクロ波回路への応用” 電子情報通信学会、vol. 88, o. 1, pp. 23-27 (平成 17 年 1 月)
- 4]堤誠 “左手系マイクロ波回路技術とその応用” 電子情報通信学会、vol. J89C, no. 5, pp. 191-197 (平成 18 年 9 月)
- 5] S.Takeda,H.Mikami and K.Ichikawa," Improved lumped-element two port isolator" ," MTT-S International Microwave Symposium Digest, TU6D-2, June 2004.
- 6] K. Okubo and M. Tsutsumi, " On the Quasi Left -Handed Transmission Line with Gyrator Loading" , IEICE vol. E89-c, no. 9, pp. 1312-1317 (sept. 2006).

(平成 20 年 3 月 31 日受理)