

部分的に液晶を充填したメアンダ構造付スロット線路の設計

阿部 新司, 佐藤 弘康, 陳 強, 柴田 陽生, 石鍋 隆宏, 藤掛 英夫 (東北大学大学院工学研究科),

概要: 液晶(Liquid Crystal, LC) は電界を加えることにより分子の異方性が変化する物質である。液晶を用いた位相可変線路が期待されており, 線路としてはマイクロストリップ線路やコプレーナ線路を利用した遅延線路が検討されている。本研究は, フェーズドアレーの位相器として液晶を利用することを目的として, 液晶を基板層の一部に充填したメアンダ構造付スロット線路構造を提案し, 電圧印加による伝送特性の変化について述べる。

キーワード: 液晶, スロット線路, 位相器

1. まえがき

近年の無線通信技術において, 電波伝播環境が変化しても送受信が安定して行えるような, 所謂アダプティブ技術が注目されている。アダプティブ技術を実現するための要素技術の1つとして, 高周波信号の振幅, 位相や周波数などを電子的に変えられるリコンフィギュラブルデバイスが重要となっている。このようなリコンフィギュラブルデバイスを実現するための方法としては, 例えば高周波信号の伝送線路を構成する磁性体の透磁率や誘電体の誘電率を何らかの方法で変化させるという手法が挙げられる。これまで, 線路を構成する導体間の誘電体基板の誘電率を機械的に変化させることにより, マイクロ波・ミリ波の位相や振幅などの伝送特性を制御する技術はすでに提案されており, M字型誘電体を利用した位相器などが挙げられる[1]。

その一方で, 誘電率を電氣的に制御できる材料の一つに液晶が挙げられる。液晶は, 外部からのバイアス電界に応じて分子の配向が変化し, 誘電率が変化することが知られている。この性質は, マイクロ波伝送線路の特性を外部から電界によって電氣的に制御できるリコンフィギュラブルデバイスに応用できる。これまで, ネマティック液晶を用いたマイクロストリップライン型可変遅延線[2]やコプレーナ線路に浮遊電極を配した液晶装荷マイクロ波位相器[3]等, 液晶を伝送線路に応用したデバイスの開発が報告されている。バイアス電圧の有無によって前者は液晶装荷線路長が 193 mm, 周波数が 20 GHz の場合で 370°, 後者は液晶装荷線路長が 15 mm, 周波数が 20 GHz の場合で 14°の位相変化が実現できることが分かっている。これまで, 液晶を用いたマイクロストリップラインアンテナ及びデバイスの研究は盛んにおこなわれてきたが, 液晶を用いたスロットアンテナやスロット線路への応用例はあまり報告されていない[4], [5]。

本報告ではスロット線路と液晶に着目し, フェーズドアレーの位相器として液晶を利用することを目的として, 液晶を装荷したスロット線路を設計して, その特性と電界印加による位相の変化について評価を行うことを目的としている。

2. 液晶装荷スロット線路の解析モデル

液晶を部分的に充填したスロット線路を図1に示す。線路の電気長を大きくするためにメアンダライン構造を取り入れた。厚さ 0.8 mm, 誘電率 3.3 の誘電体基板に幅 0.1 mm のスロットを設け, スロット部の誘電体基板厚を h_{LC} だけ減少して液晶を充填するための容器とする。一方, メアンダライン構造を石英基板にパターンニングした石英基板を上記の誘電体基板にかぶせ, 容器に充填された液晶を封止する構造である。本構造は, 液晶が誘電体基板に設けられた容器部分の, 電磁界が集中していると考えられる部分のみに充填される点の特徴であり, スロット線路の導体間にバイアス電圧をかけることにより液晶の誘電率を変化することができる。線路の長さが $L=20$ mm とし, 図1中の Port 1 及び Port 2 を給電したときの S パラメータを, 液晶の比誘電率 ϵ_{LC} を変化して求め, 位相変化量を FDTD 解析により解析した。ただし, 誘電体の損失は無視した。

3. 解析結果

液晶は, 長軸方向の比誘電率が $\epsilon_{LC}=3.2$, 短軸方向の比誘電率が $\epsilon_{LC}=2.6$ の BL-008 を仮定し, 損失を無視して解析を行った[2]。液晶の厚さが $h_{LC}=0.4$ mm のときの S21 の振幅及び各誘電率の位相差の周波数特性を図2に示す。位相差には最小二乗曲線を一点鎖線で示した。周期的な振幅の変化が観測されており, これは基板サイズ L に起因するものと考えられる。伝送損失は周波数の増加に伴い増加した。また, ϵ_{LC} の変化に伴う S21 の位相差も周波数の増加に伴い増加した。最小二乗近似曲線から 12 GHz における位相差は 40.3 deg/20 mm であり, この値は文献[2]におけるマイクロストリップ線路構造を利用した場合の単位長さあたりの位相差と

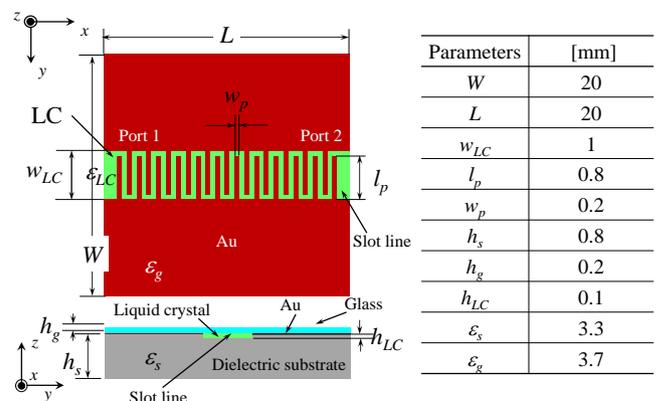


図1 液晶を部分的に装荷したスロット線路の構造

ほぼ等しい。石英ガラスの有無， h_{LC} の変化及びメアンダライン構造の有無に対する位相差の変化を表 1 に示す。この表 1 における各条件の概要は図 3 石英ガラスの有無に対する位相差の変化がわかであること， h_{LC} が大きいほど大きな位相差変化が得られること，及びメアンダライン構造によって大きな位相差変化が得られることがわかった。これらのことから， h_{LC} を大きくし，メアンダ構造を用いて電気長を大きくすることで大きな位相差変化が得られることがわかった。

4. 液晶装荷スロット線路の測定モデル

測定に用いた液晶装荷伝送線路の構造を図 4 に示す。測定を行うにあたって変更した点を以下で述べる。メアンダラインの両端にスロット・MSL 変換器を装荷することで，同軸ケーブルを用いて測定を行えるようにした。また，スリットとしてスロット線路を追加することで，メアンダラインの上部と下部が電気的に遮断され，バイアス電圧を印加して液晶部分に電界を掛けることができるようになる。

メアンダラインを石英基板ではなく誘電体基板のほうにパターンニングし，銅部分の上に液晶の領域を確保することで液晶をメアンダ部分に充填しやすくした。これにより誘電体基板のメアンダライン部分を軽く削るだけで垂直配向処理面とメアンダラインが離れ，配向膜による配向固定の影響が減りバイアス電圧によって配向が変化しやすくなる。そして石英ガラス基板と誘電体基板間にスペーサーとして PET フィルムを挟むことで液晶の漏れを抑制することができる。これに伴い，メアンダライン幅を 0.2 mm から 0.5 mm，メアンダ長を 0.8 mm から 2.5 mm に変更し，メアンダラインとスロット線路の接続部分をテーパ状に変更した。

また，長軸方向の誘電率が 3.0，短軸方向の誘電率が 2.5 の誘電率異方性を持つ液晶 E-7 を実験モデルに用いた。

以上の変更点を元に試作した局所液晶充填メアンダ線路とスロット線路を図 5 に示し，これらの伝送特性について測定を行った。

表 1 構造変化に対する位相差の比較

Glass substrate	Thick of LC h_{LC} [mm]	Meander Line	Phase difference [deg.]
Without	0.1mm	With	32.3
		Without	3.9
	0.8mm	With	44.7
		Without	3.5
With	0.1mm	With	31.3
		Without	3.5
	0.4mm	With	40.3

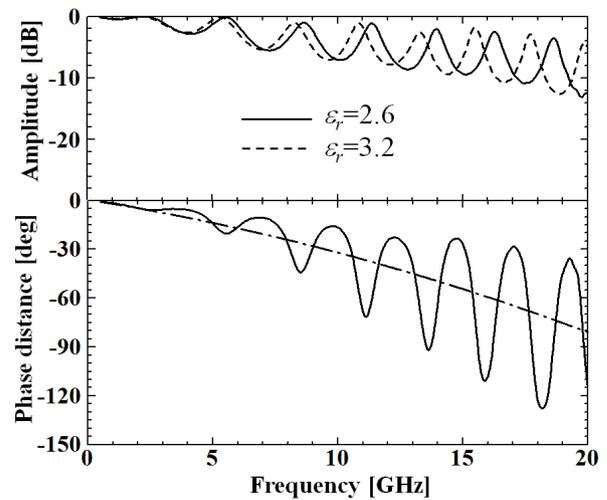
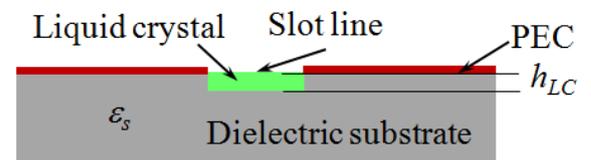
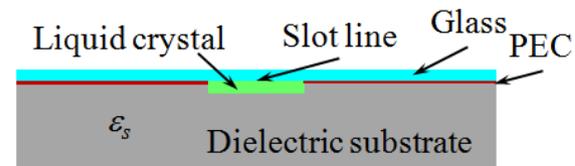


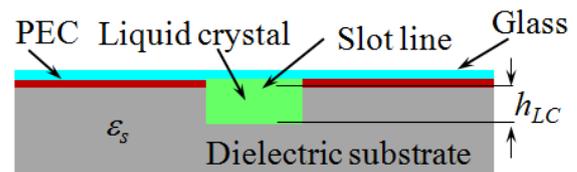
図 2 S21 の振幅 (上) 及び配向変化時の位相差 (下)



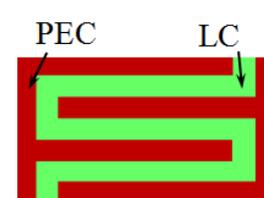
(a) $h_{LC}=0.1$ mm, ガラス基板無



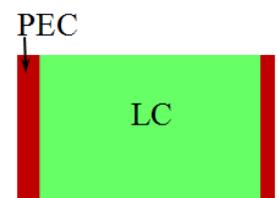
(b) $h_{LC}=0.1$ mm, ガラス基板有



(c) $h_{LC}=0.4$ mm, ガラス基板有



(d) メアンダライン有



(e) メアンダライン無

図 3 解析時におけるモデルの比較

5. 試作モデルの測定結果

図4(c)のメアンダ線路2の試作品についてスロット線路にバイアス電圧を印加した状態と印加していない状態の二つの場合で、ネットワークアナライザを用いて実際にS21を測定した結果を図6に示す。なお、バイアス電圧を印加したときの電圧は82V、印加していないときの電圧は1Vとなっている。周波数12GHzにおいてS21はメアンダ線路2で-11dB、メアンダ線路1で-18dB、スロット線路で-9dBと低いが、これらの原因について、付加スロットによる電磁波の漏れやMSL-Slot変換部分とSlot-メアンダライン変換部分における整合損失、液晶部分の構造の変化とメアンダライン構造による損失などが考えられる。また、図6において、使用想定周波数12GHzに対する3dB帯域幅が7%と小さかった。この理由として、Slot-メアンダライン変換部分を周波数12GHzに対して設計していることが挙げられる。

3モデルにおいてバイアス電圧を印加した時と印加していないときのS21の位相の差をとったものを図7に示す。図より、S21の振幅が-40dB以下の周波数において位相の変化が他の周波数とは大きく異なっていたが、これはS21の振幅が非常に小さいためにノイズが位相に影響したと推測される。バイアス電圧の有無により位相が変化したことから電圧により液晶の配向が変化したことがわかり、線路における液晶部分の長さが2cm、周波数が12GHzの場合においてメアンダ線路2で39.5°、メアンダ線路1で26°の位相変化を得ることができた。一方、スロット線路においても比較的S21の振幅が大きい12GHzにおいて位相変化を得られたことから電圧印加によって配向変化とそれによる誘電率変化が発生していることが推測される。

6. まとめ

本報告ではメアンダライン構造を有する部分的液晶装荷スロット線路を提案し、モデルの試作と特性の評価を行った。解析モデルでは液晶の誘電率を2.6から3.2まで変化させたときに位相変化40deg/20mm、試作モデルではバイアス電圧を1Vから82Vまで変化させたときに位相変化40deg/20mmを得ることができた。しかし、試作モデルにおいて3dB帯域幅が7%と小さく、損失が-11dB/(2cm+変換&スリット部分)と非常に大きかった。これらの結果を踏まえ、伝送線路の損失・帯域の改善と、この伝送線路を利用したアンテナの製作と実験を行っていきたい。

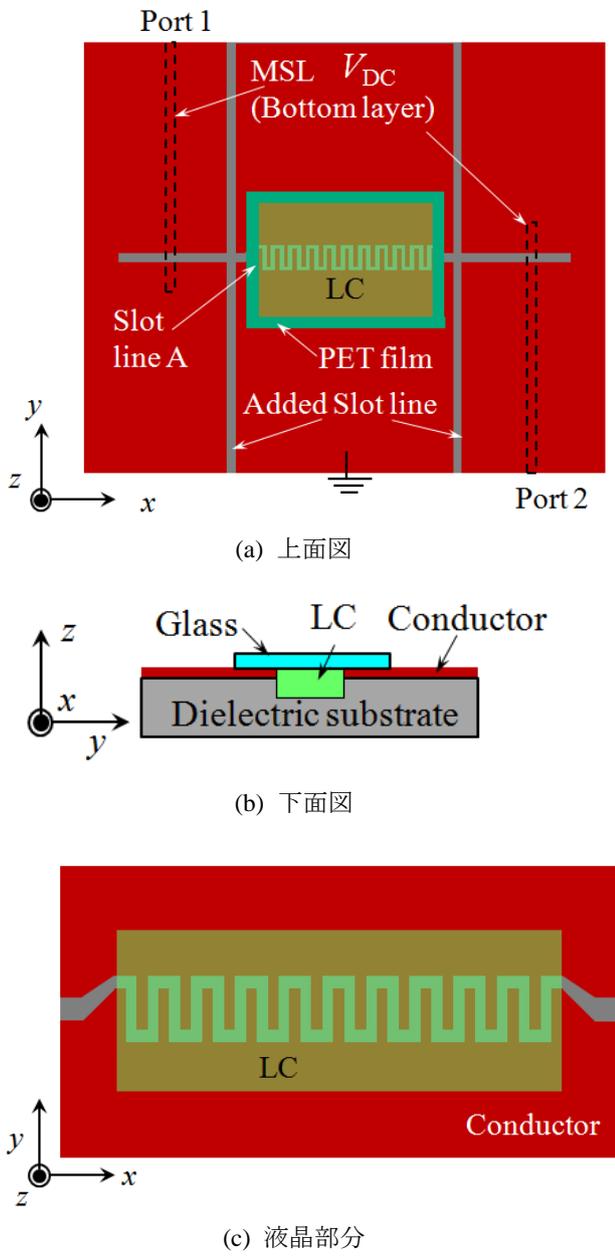


図4 試作モデルの構造



(a)スロット線路 (b)メアンダ線路1 (付加スロット幅0.1mm) (c)メアンダ線路2 (付加スロット幅1mm)

図5 実際に作成したモデル

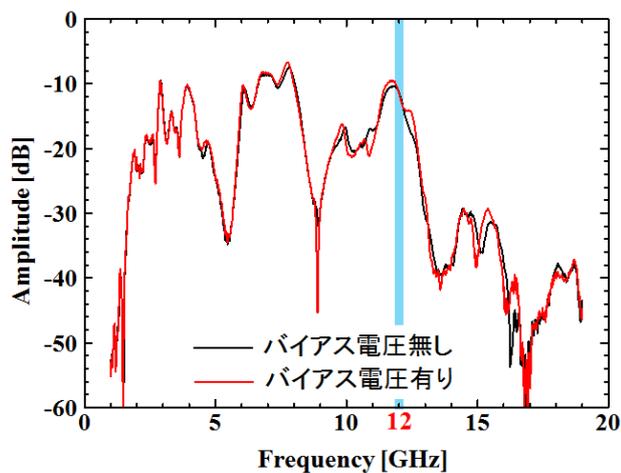


図6 メアンダ線路2の透過係数

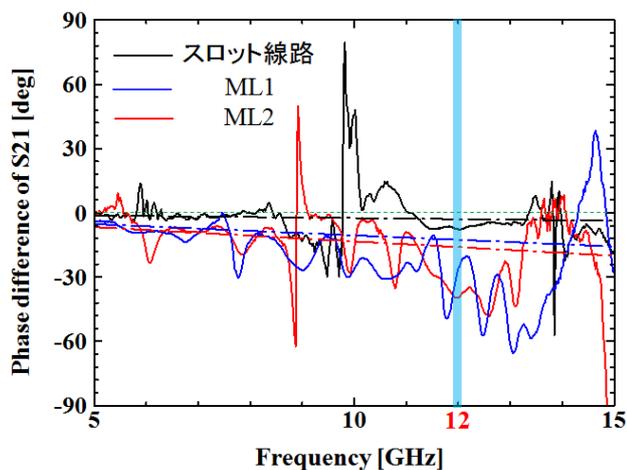


図7 電圧印加と位相変化の関係

[4] Lev Pazin and Yehuda Leviatan, "A Compact 60-GHz Tapered Slot Antenna Printed on LCP Substrate for WPAN Applications," IEEE Antennas and Wireless Propag. Lett., vol.9, pp.272-275, 2010

[5] Symeon Nikolaou, George E. Ponchak, John Papapolymerou and Manos M. Tentzeris, "Conformal Double Exponentially Tapered Slot Antenna (DETTSA) on LCP for UWB Applications," IEEE Trans. Antennas and Propag., vol.54, pp.1663-1669, Jun. 2006.

参考文献

[1] Kengo Nishimoto, Takeshi Oshima, Toru Fukasawa, Hiroaki Miyashita, Yoshihiko Konishi, Manabu Kurihara and Yoshiyuki Chatani, "M-Shaped Dielectric Phase Shifter for Beam-Steerable Base-Station Antenna," IEICE Trans. Commun., vol.E96-B, no.8, pp.2095-2101, Aug. 2013.

[2] 九鬼, 藤掛, 野本, 内海, "液晶を用いたマイクロ波可変遅延線の設計とその挿入損に関する一考察," 信学論(C), vol.J84-C, no.2, pp.90-96, Feb. 2001.

[3] 内海, ゲンタインバク, 亀井, 尾崎, 森武, "液晶装荷 CPW-FE 位相器における誘電異方性と応答時間のマイクロ波測定及び理論計算," 信学論(C), vol. J92-C, no.12, pp.778-788, Dec. 2009.