

液晶を用いたマイクロ波・ミリ波帯機能デバイスの研究

代表研究者 内 海 要 三 防衛大学校電気情報学群通信工学科教授

共同研究者 亀 井 利 久 防衛大学校電気情報学群通信工学科助手

1. 研究調査の目的

21世紀初頭は通信と放送の融合が進み、多メディア、多チャンネルのサービスが衛星通信、移動体通信やデジタル放送など様々な伝送路を通じて受信者に届けられる時代である。従って変化する無線環境や異なる伝送方式によるサービスをシームレスに送受信できる、いわゆるアダプティブ技術が重要となる。この要求に対して、ソフトウェア無線技術の研究がすでに始まっているが、ベースバンドと IF 段の技術にとどまっているのが現状である。コンピュータの処理速度とリアルタイム処理の困難さを考えるとマイクロ波やミリ波帯でのアダプティブ技術は当面アダプティブなハードウェアを開発し、それをコンピュータで制御する手法が現実的である。

マイクロ波・ミリ波帯でのアダプティブデバイスとしては磁性体の磁界によるコントロールや誘電体の電界によるコントロールが考えられるが、本研究では液晶のマイクロ波・ミリ波帯として電界可変型の遅延線、位相器や整合デバイスを開発し、高周波帯でのアダプティブ技術を実現することを目的としている。

2. 方法

研究の重点は次の2点において進める。

(1) マイクロ波・ミリ波帯でのアダプティブデバイスに最適な液晶材料の提案

(2) 低損失と高速応答を兼ね備えた液晶遅延線構造の提案

(1) については、遅延線の変位相量を決定する2つの方向の印加電界に対応する誘電率 ($\epsilon'_{//}, \epsilon'_{\perp}$) とそれぞれの誘電損を与える $\tan \delta_{//}, \tan \delta_{\perp}$ を屈折率 n の異なる液晶材料を TEM 伝送路に挿入し、2種類の方法で3～33GHzにわたりマイクロ波・ミリ波帯技術を用いて測定する。また応答特性については viscosity (液晶の粘性係数) の異なる液晶材料にレーザ光を投射する方法で光学的に測定する。

(2) については、代表研究者等の研究でマイクロストリップ型遅延線の挿入損失は導体損が支配的で損失を低減するためには液晶層を厚くすればよいが、厚くすると液晶層厚の2乗に比例して応答速度が遅くなっていることがわかっている。本研究では、ベクトルネットワークアナライザを中心とするマイクロ波実験とソフトウェアによる電磁界シミュレーションを使い、低損失化のための遅延線構造の新規提案を含め具体的なマイクロ波・ミリ波低損失可変遅延デバイスの実現を目指す。

3. 結果

3.1 マイクロ波・ミリ波帯でのアダプティブデバイスに最適な液晶材料の提案

3.1.1 カットバック法による誘電特性の測定 ^{[1],[2],[5]}

光ファイバの伝送特性（減衰特性や伝送帯域幅など）の決定に用いられているカットバック法をマイクロ波・ミリ波帯での誘電特性の測定に応用した。液晶の複素比誘電率を $\hat{\epsilon}$ 、その実部を ϵ' 、虚部 ϵ'' を及び液晶の誘電体としての損失角を $\tan \delta$ とし、それらの関係を式(1)で表す。

$$\hat{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon'', \quad \epsilon'' = \epsilon' \cdot \tan \delta \quad (1)$$

同軸管の内導体と外導体の間隙に液晶を充填した長さの異なる2本の同軸管の通過特性と群遅延を測定すると発表資料^[1]より ϵ' と $\tan \delta$ を(2)(3)式で求められる。

$$\epsilon' = \left(\frac{\Delta\tau_g}{\Delta\tau_c} \right)^2 \cdot \frac{2}{\sqrt{1 + \tan^2 \delta} + 1} \quad (2)$$

$$\tan \delta = \frac{1}{91f} \left(\frac{10^6 \cdot L_{(\Delta L)}}{\sqrt{\epsilon'} \cdot \Delta L} - 1.451 \sqrt{f} \cdot \sqrt{\rho} \cdot \frac{D+d}{dD \ln(D/d)} \right) \quad (3)$$

ただし, ΔL [mm]: 長さの異なる 2 つの同軸管 (L_1, L_2) の差 ($\Delta L = L_1 - L_2$), $\Delta\tau_g$ [sec]: ΔL だけ伝搬したときの群遅延量 (Group delay), $\Delta\tau_c$ [sec]: ΔL を光が進む時間, f : 測定周波数 [MHz], d, D : 内, 外部導体の径 [mm], ρ : 内, 外部導体の体積固有抵抗 [$\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{km}$], $L_{(\Delta L)}$: ΔL の長さを伝搬したときの伝送損である。

式(2)を式(3)に代入し, $\tan \delta$ に初期値 0 を与えて初期値から微小ステップで値を増加し, 両辺が一致して収束するまでコンピュータによる計算を繰り返し行う。このように $\tan \delta$ の値が決定すると式(2)より誘電率の実数部 ϵ' も決定できる。

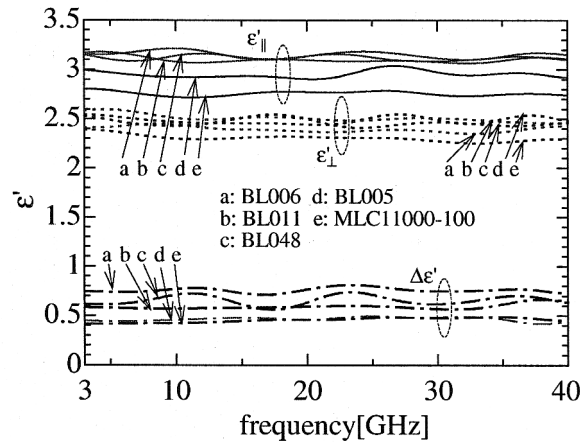


図1 液晶誘電率の周波数 ($\epsilon'_{\parallel}, \epsilon'_{\perp}, \Delta\epsilon'$)

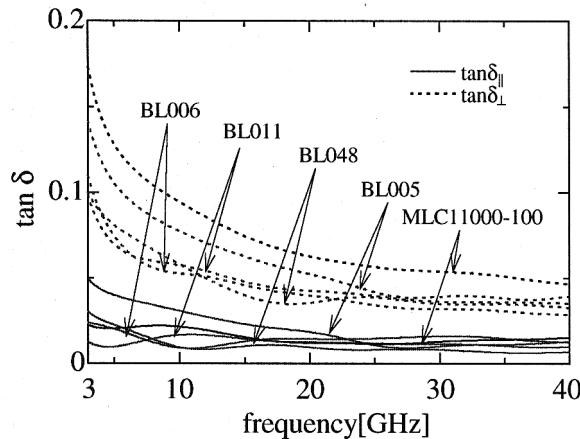


図2 液晶の損失角の周波数特性 ($\tan \delta_{\parallel}, \tan \delta_{\perp}$)

5 種類の MERCK 社製ネマチック液晶材料をマイクロ波帯で測定した結果を図1, 図2に示す。なお 10kHz~3GHz の誘電特性については発表資料^[1]に示すように誘電緩和現象が確認できた。3~40GHz の周波数帯で連続的な周波数変化に対応する形で誘電特性を測定した結果, $\epsilon'_{\parallel}$ (液晶分子の長軸が高周波電界 E_{rf} と平行のときの複素誘電率 $\hat{\epsilon}_{\parallel}$ の実数部) と $\epsilon'_{\perp}$ (液晶分子の長軸が高周波電界 E_{rf} と垂直のときの複素誘電率 $\hat{\epsilon}_{\perp}$ の実数部) は極めて広帯域にほぼ一定の値を示した。液晶の 2 つの配向状態における誘電率の差 (誘電異方性) を $\Delta\epsilon' (= \epsilon'_{\parallel} - \epsilon'_{\perp})$ とすると $\Delta\epsilon'$ は材料によって 0.4-0.8 の値を示した。

これらの結果から明らかなように 3-40GHz では誘電緩和もなく、広帯域に $\Delta\epsilon'$ はほぼ一定で比較的低損失な誘電特性を示すことから、これらの材料を用いたアダプティブデバイスは、広帯域に伝送特性を電圧で制御できることが期待できる。

3.1.2 誘導結合（L結合）型リング共振器を用いたマイクロストリップライン型デバイスの実効的な誘電特性の測定 [2],[3],[4],[6],[7],[10],[11]

本節ではマイクロ波・ミリ波帯で可変遅延線など多くのアダプティブデバイスの開発が進められているマイクロストリップライン構造で液晶材料の実効的な誘電率を直接測定した結果を述べる。

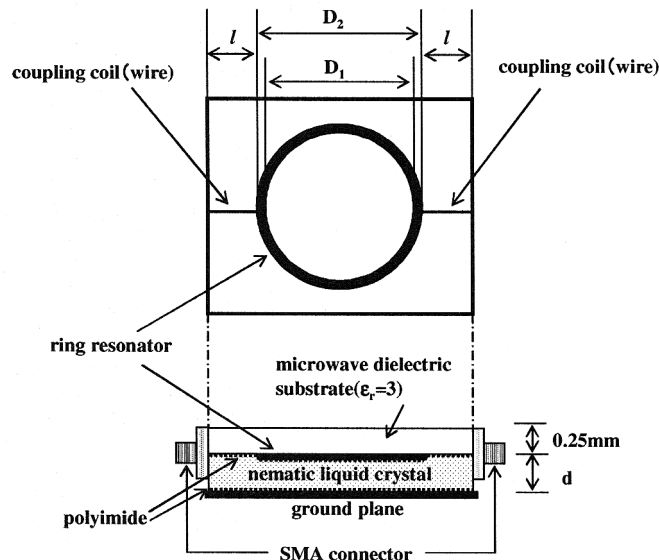


図3 液晶を充填したL結合リング共振器の構造

図3は新たに開発した誘導結合（L結合）型リング共振器である。コネクタの芯線とリング共振器が直流的に接続されている L 結合型リング共振器を用いて外部のバイアス T よりリング共振器と接地導体との間に直流電圧（バイアス電圧）が印加される構造となっている。このリングと接地導体間の間隙に液晶材料を充填し、電圧印加時と無印加時における高周波が感じる誘電率の変化を共振器の共振周波数変化として観測する。リング共振器と接地導体間にバイアス電圧を印加したとき、液晶分子の長軸方向が伝搬する高周波（TEM波）の電磁界 E_H と平行になり、比誘電率 $\epsilon'_{//}$ を示す。またバイアス電圧を印加しないとき、液晶分子はラビング処理を行ったポリイミド膜の機械的な配向力により高周波電界 E_H に垂直となり $\epsilon'_{\perp}$ を示す。

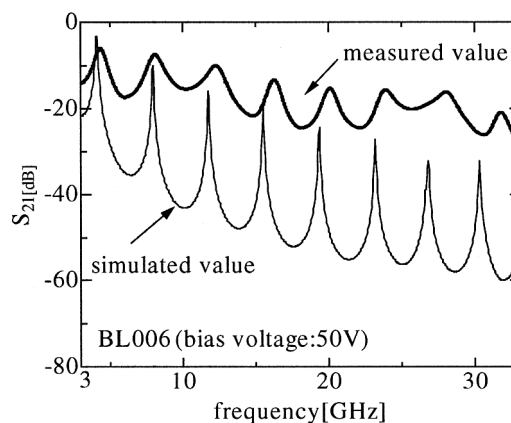


図4 BL006の周波数特性（電圧印加時）

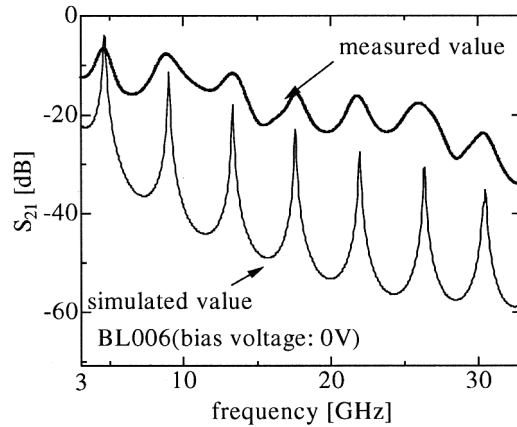


図5 BL006の周波数特性（電圧無印加時）

図4,5に BL006 を用いた液晶層をマイクロ波基板としたときの L 結合型リング共振器の通過特性 (S_{21}) の周波数依存性を示す。図4は d.c.50V を印加したときの S_{21} の実験値とネマティック液晶の誘電率を 3.17（カットバック法による $\epsilon'_{\parallel}$ の平均値）とした場合の S_{21} のシミュレーション値を示している。実験結果の各共振周波数はシミュレーションの計算値よりも高くなっていることがわかる。図5は電圧を印加しないときの S_{21} の実験値とネマティック液晶の誘電率を 2.38（カットバック法による $\epsilon'_{\perp}$ の平均値）とした場合の S_{21} のシミュレーション値を示している。実験結果の各共振周波数がシミュレーションの計算結果と良く一致していることがわかる。

以上提案した方法を用いて、一例として BL006 の誘電率と誘電異方性の測定結果を図6に示す。カットバック

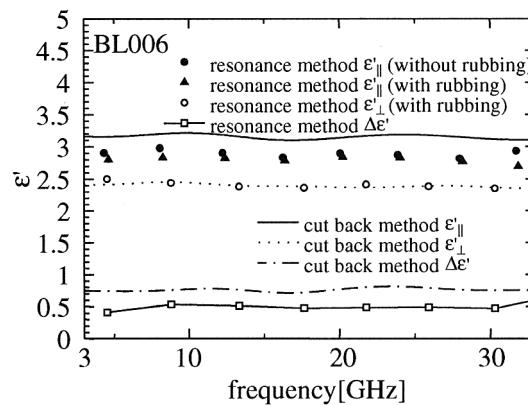


図6 誘導率と誘電異方性（BL006）

法での測定結果は、誘電緩和もなく広帯域にわたって $\epsilon'_{\parallel}$, $\epsilon'_{\perp}$, $\Delta\epsilon'$ の値がほぼ一定である。また離散的な値で示しているのが L 結合リング共振器を用いた測定法により決定された誘電率の値である。ここでポリイミド配向膜によるラビング処理を施した場合（▲, ○）と施さない場合（●）について測定を行った。ラビング処理を行った場合の $\epsilon'_{\parallel rub}$ 値 2.8, ラビング処理を行わない場合の $\epsilon'_{\parallel}$ 値 2.9 となり、ラビング処理がバイアス電圧印加による配向制御に影響を与えていることがわかる。またこれらの値はカットバック法で測定した $\epsilon'_{\parallel}$ 値 3.1 よりも低い値になった。一方 $\epsilon'_{\perp}$ の値はカットバック法で求めた値約 2.4 と良く一致する結果を得たため、 $\Delta\epsilon'$ はカットバック法で求めた値 0.8 から減少し 0.5 となった。この他の材料についても同様の測定を行い比較検討したところ、材料によって測定値に若干のばらつきがみられるが、誘電率 $\epsilon'_{\perp}$ は測定法が異なっても良く一致しているのに対し、 $\epsilon'_{\parallel}$ （ラビング有、無）についてはマイクロストリップライン構造での測定法の方が小さいという結果を得た。

3.1.3 液晶の実効配向係数 [2][3][4][8][12]

リング直下の液晶分子はほぼ分子の長軸が E_{rf} に揃うのに対し、リングから離れたところの液晶分子は電界の強度が弱くなり、印加されたバイアス電圧による影響を受けにくく配向力が弱くなるため、 E_{rf} の向きに長軸が揃わない液晶分子もあり、それら全ての液晶分子の平均が誘電率 $\epsilon'_{\parallel}$ の値になると考えられる。従って、ラビング処理を行わない場合においても同軸管構造とマイクロストリップライン構造の2つの測定法による誘電率と値が一致しなかった理由が理解できる。また通常は液晶分子の初期配向を決定するラビング処理を行うため、その機械的拘束に打ち勝つための直流電界強度が要求され、さらに小さい値になるものと思われる。従って、マイクロストリップライン構造の場合の実効的な誘電率は、液晶材料の粘性係数 (viscosity) とマイクロストリップライン構造 (線路の特性インピーダンスなど) により影響を受ける実効配向係数を材料の値にかけることで見積もらなければならない。

液晶材料自身の誘電率をカットバック法で得られた値 $\epsilon'_{\parallel}$ と仮定し、 $\epsilon'_{\parallel c}$ とすると実効配向係数 η_a は次式で表される。

$$\eta_a = \epsilon'_{\parallel s} / \epsilon'_{\parallel c} \quad (4)$$

ここで $\eta_a < 1$, $\epsilon'_{\parallel s}$: マイクロストリップライン構造で E_{rf} の向きに液晶分子がほぼ平行に揃っているときの誘電率, $\epsilon'_{\parallel c}$: カットバック法で測定された E_{rf} の向きに液晶分子が完全に平行に揃っているときの誘電率である。

図7は 8GHz において粘性係数の異なる3種類のネマティック液晶に対するそれぞれの η_a を求めたものである。実線はラビング処理が行われていない場合で、破線はラビング処理がある場合を示している。この図から粘性係数が大きい材料はリング直下の液晶分子を除いて、初期配向の状態から直流電圧の印加方向に長軸の方向が完全には配向しにくく、 η_a が1より小さくなっていることが分る。どちらの η_a も 0.95 から 0.89 に減少している。

図8は3種類のリング共振器 (リング幅はそれぞれ 2mm, 1mm, 0.5mm) の特性インピーダンスに対する η_a

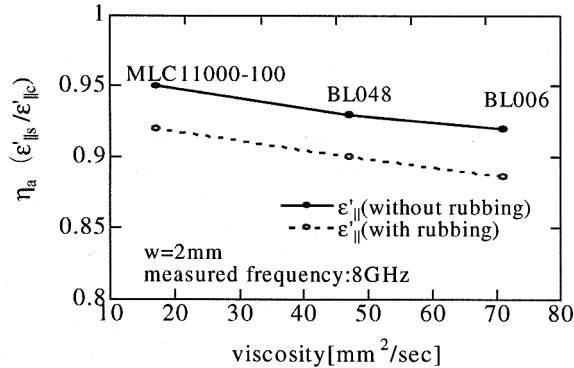


図7 viscosityに対する実効配向係数

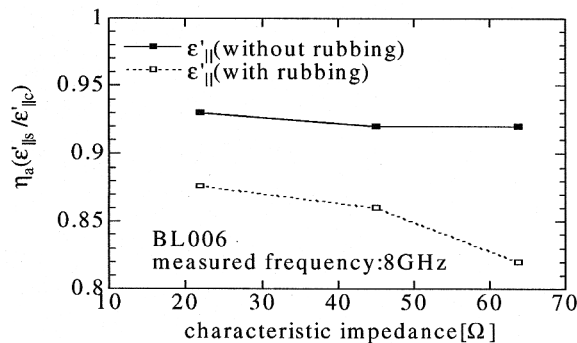


図8 特性インピーダンスに対する実効配向係数

を示している。

一例として BL006 の材料を選び 8GHz での値を示した。特にラビング処理を行った場合には、液晶分子に対する配向膜の機械的な拘束力が強いと特性インピーダンスが高いリングでは特性インピーダンスの低いリングと比較して、 η_a の値が小さくなる。特性インピーダンスが高くなると基板厚に対するストリップ導体幅が相対的に狭くなることを考えると、 η_a がより小さくなることが明らかである。

3.1.4 液晶材料の光学系による応答時間特性の測定結果^{[1],[9]}

バイアス電圧印加に対するネマティック液晶の応答時間特性を He-Ne レーザ (632.8nm) をツイストネマティック構造の液晶セル (TNセル) に照射することにより光学的手法で測定した。図9に厚さ 50 μm の TN セルにした3種のネマティック液晶材料 (BL005, BL011, MLC11000-100) に対する光学応答の立ち上がりおよび立ち下がり時間の印加電圧依存性を示す。電圧印加時の立ち上がり時間 τ_r は印加電圧の増加に対してほぼ単調に減少していることがわかる。また粘性が大きい材料ほど大きく、バイアス電圧を十分に印加すると 10ms 程度と比較的高速応答を示すことがわかる。一方、立ち下がり時間 τ_d はバイアス電圧に依存せずほぼ一定であり、液晶材料により異なるが 900~2500ms と非常に長いことが分る。アダプティブデバイスの用途、目的にもよるが、一般に τ_r と τ_d は共に小さな値であることが望ましい。図9から明らかなように両者とも液晶材料に依存するが、 τ_r は十分なバイアス電圧の印加により高速になるが、 τ_d は τ_r に比べはるかに大きな値を示す。可変遅延線への応用では応答特性の高速化には τ_d の減少がポイントとなる。小さな τ_d 値を得るためには、 τ_d が液晶層厚 d の2乗に比例するため d の減少が最も効果的であるが、 d の減少はマイクロストリップライン構造の遅延線などでは伝送損失の増大をもたらす。従って、高周波的には d の値を減少させず、液晶の初期配向状態に戻す配向力に影響を与える2つのラビング層間の実効的な厚さを極力小さくするための構造的工夫が重要となる。

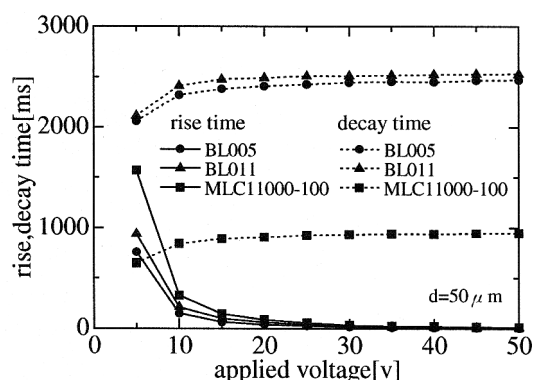


図9 応答時間特性 (BL011, BL005, MLC11000-100)

3.2 低損失と高速応答を兼ね備えた液晶遅延線構造の提案

本節で述べる液晶可変遅延線については、3.1.3 で述べた実効配向係数 η_a を考慮しておらず、設計の初段階として液晶材料そのものの誘電特性に基づく設計手法を示している。 η_a を考慮したものについては現在研究中である。

3.2.1 液晶を用いた可変遅延線設計のための考察^[1]

図1, 図2に示す測定結果から $\Delta\epsilon'$ が最大と最小の2種のネマティック液晶 BL006 と MLC11000-100 を選び、20, 30, 40GHz で可変位相範囲が 360° となる遅延線の設計を行った。遅延線の構造は図10に示すようなマイクロストリップライン型とし、液晶層の厚さ d は 50 μm で、マイクロストリップラインの基板としての役割を果たしている。厚さ 1 μm のストリップ導体はガラス板 (厚さ 500 μm , 比誘電率 3.77, $\tan \delta = 10^{-4}$) にメッキされている。また液晶層をはさむ接地導体上面とガラス板下面はポリイミド膜がスピンコートされ、ラビング処理がほどこされているものとする。そしてストリップ導体と接地導体間にはバイアス電圧が印加できる構造となっている。

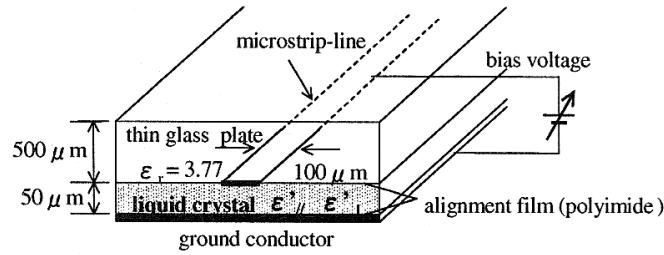


図10 設計対象とした可変遅延線の構造

設計に用いた2種の液晶の20, 30, 40GHzでの誘電定数の値を表1にまとめた。 $\epsilon'_{//}$ と $\tan \delta_{//}$ の値はカットバック法で用いる同軸管の内、外部導体間にバイアス電圧を150V印加し、液晶の長軸が高周波電界 E_H の方向に十分平行に配向したときの値を用いている。また、マイクロストリップラインの幅は特性インピーダンスを約50Ωとするため100μmとした。設計にあたって伝送モードは完全なTEMモードを仮定し、入出力端における不整合損や線路からの輻射損は無視し、伝送損失はストリップ導体の導体損と液晶層とガラス板の誘電体損の和で表されるものとしている。

表1 BL006,MLC1000-100の誘電定数

液晶名	BL006			MLC1000-100		
項目	20GHz	30GHz	40GHz	20GHz	30GHz	40GHz
$\epsilon'_{//}$	3.135	3.117	3.153	2.773	2.746	2.743
$\tan \delta_{//}$	0.0144	0.016	0.0125	0.0121	0.0128	0.0151
$\epsilon'_{\perp}$	2.367	2.369	2.427	2.316	2.271	2.294
$\tan \delta_{\perp}$	0.03982	0.03208	0.02883	0.06246	0.05404	0.04674

図10に示すマイクロストリップラインの構造で電磁界シミュレーションを行い、液晶のそれぞれの状態での実効比誘電率 $\epsilon'_{//eff}$ と $\epsilon'_{\perp eff}$ を求めたが、上部に配したガラス板（比誘電率3.77）の影響で実効比誘電率が液晶の比誘電率より大きくなっている。

液晶層にバイアス電圧を印加したときと無バイアスのときとの位相差を360°まで可変できる遅延線を作る場合に必要な遅延線の長さを $l_{2\pi}$ とする。また $l_{2\pi}$ の長さをTEM波が伝搬したときのそれぞれの場合での総合の伝送損失 $L_{//,t}$ 、 $L_{\perp,t}$ およびその内訳である導体損を $L_{//,c}$ 、 $L_{\perp,c}$ および誘電体損を $L_{//,d}$ 、 $L_{\perp,d}$ で表すことにする。また λ_0 は自由空間波長を示す。

表2 BL006,MLC1000-100を用いた360°可変遅延線シミュレーション効果

液晶名	BL006			MLC1000-100		
項目	20GHz	30GHz	40GHz	20GHz	30GHz	40GHz
$\epsilon'_{//eff}$	3.36	3.33	3.35	3.09	3.07	3.06
$\epsilon'_{\perp eff}$	2.8	2.79	2.83	2.76	2.72	2.73
$l_{2\pi}$ [mm]	93.2	64.1	50	152	97.1	78.1
$L_{//,t}$ [dB]	7.39	7.14	6.16	10.7	9.24	9.88
$L_{//,c}$ [dB]	4.35	3.67	3.33	6.79	5.34	4.98
$L_{//,d}$ [dB]	3.04	3.47	2.83	3.87	3.9	4.9
$L_{\perp,t}$ [dB]	11.1	9.26	8.62	24.3	19.7	18.3
$L_{\perp,c}$ [dB]	3.99	3.38	3.07	6.43	5.05	4.72
$L_{\perp,d}$ [dB]	7.12	5.88	5.55	17.9	14.6	13.6

2種のネマティック液晶の20, 30, 40GHzにおけるシミュレーション結果を表2に示す。表2からわかるように $\Delta\epsilon'$ の大きいBL006は360°の位相変化を与える $l_{2\pi}$ が $\Delta\epsilon'$ の小さいMLC1000-100より短くなり、360°あたりの総合の伝送損失も小さくなっている。また、誘電体損についても材料の $\tan \delta$ が小さいBL006の方が小さい値を示している。ただし、両材料共に $\tan \delta_{\perp}$ の値が $\tan \delta_{//}$ の値より大きいため $L_{\perp,d}$ が $L_{//,d}$ より大きくなっている。つまりこれらの材料を用いて可変遅延線を構成する場合、無バイアス時の伝送損失 $L_{\perp,t}$ がバイアス電圧印加時の伝送損失 $L_{//,t}$ より大きな値になることに注意しなければならない。

マイクロストリップラインの導体損と誘電体損の総合の伝送損失における割合については、BL006のバイア

ス電圧印加時の誘電体損 $L_{//,d}$ についてはほぼ同等であるが、その他の場合については誘電体損が支配的である。特に MLC11000-100 の無バイアス時の誘電体損 $L_{//,d}$ は、大きな $\tan \delta_{\perp}$ 値に基づき、大きな劣化を示すことになる。また 20, 30, 40GHz と周波数が高くなると、総合の伝送損失 $L_{//,t}$ および $L_{\perp,t}$ は小さくなっていく。これは材料の誘電体損が減少することの他に 360° の位相変化を与える線路長あたりの導体損 $L_{//,c}$ および $L_{\perp,c}$ が減少するからである。この理由は、導体の表面抵抗 R_s が $\sqrt{f}$ に比例して増加する反面 360° の位相変化を与える線路長 $l_{2\pi}$ が f に反比例して減少するからである。

これらの考察をもとに液晶を可変遅延線の伝送媒体に用いる場合、 $\Delta\epsilon'$ が大きく $\tan \delta_{//}$, $\tan \delta_{\perp}$ の小さい材料が望ましいが、高速な可変応答を得るために特に立ち下がり時間 τ_d を減少させるための可変遅延線の液晶層の構造上の問題を検討することが重要である。つまり τ_d は液晶層の厚さ d の2乗に比例し、高速化については d を小さくする必要がある。このことはマイクロストリップラインの導体損の増加をもたらすことになる。従って低損失で τ_d の小さい遅延線を開発するためには、実際の液晶層厚 d を減少させずに配向効果を増加させる、すなわち実効的に d を減少させる効果のある構造を設計することが今後の課題となる。発表資料^[13]に示すようにポリマー分散液晶を用いることで応答時間特性が改善されることを確認し、継続研究中である。

3.3 まとめ

以上述べてきたように、(1)マイクロ波・ミリ波帯でのアダプティブデバイスに最適な液晶材料の提案(2)低損失と高速応答を兼ね備えた液晶遅延線構造の提案の2点に調査目的を絞り研究を行った。(1)については①カットバック法による液晶誘電率の測定法の提案と測定結果②L結合型リング共振器を用いた液晶誘電率の決定法の提案と測定結果③実効配向係数の提案を行い、(2)については④液晶装荷可変遅延線設計のための考察を行った。(2)については継続して高速化のための検討を行っており、従来液晶ディスプレイ応用で検討されることがほとんどであったため、光学測定系を用いた応答時間特性の測定が一般的であったが、我々はマイクロ波帯での誘電率変化の速度としての応答時間を直接測定できる方法についても研究中である。また、液晶デバイスの高速化を目指し、現在研究中のポリマー分散液晶^[13]の他、実効的に d を小さくするための構造などについて今後さらに研究を進めていく予定である。

〈発 表 資 料〉

題 名	掲 載 誌 ・ 学 会 名 等	発 表 年 月
[1] 10kHz～40GHz におけるネマティック液晶の誘電測定と可変遅延線への応用	電子情報通信学会論文誌 C, Vol.J-85-C, No.12, pp.1149-1158.	2002年12月
[2] Dielectric permittivity measurements of liquid crystal in the microwave and millimeter wave ranges	Journal of Molecular crystals and liquid crystals (to be published)	2003年
[3] Measurements of effective dielectric permittivity of microstrip-line-type liquid crystal devices using an inductive coupled ring resonator.	Electronics Letters Vol.39, No.11, pp.849-850.	2003年 5 月
[4] マイクロストリップライン構造可変機能液晶デバイスの誘電特性	電子情報通信学会論文誌 C, Vol.J-86-C, (投稿中)	2003年
[5] Fundamental properties of liquid crystal in microwave and millimeter wave ranges	Book of Abstract of ILCC2002, p.72	2002年 6 月
[6] Dielectric permittivity measurements of liquid crystal using inductive coupled ring resonator in microwave range	Book of Abstract of ILCC2002, p.73	2002年 6 月
[7] マイクロ波帯における液晶誘電特性の測定	電子情報通信学会技術研究報告, MW2002-76, pp.37-41.	2002年 9 月
[8] ネマティック液晶の実効配向係数	電子情報通信学会技術研究報告, MW2002-78, pp.49-53.	2002年 9 月
[9] ネマティック液晶材料の応答時間特性の測定法	電子情報通信学会技術研究報告, MW2002-79, pp.55-59.	2002年 9 月
[10] L 結合型リング共振器を用いた誘電率測定法	2002年電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-2-61.	2002年 9 月
[11] L 結合型リング共振器による液晶誘電率の測定	2002年電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-2-62.	2002年 9 月
[12] 液晶の実効配向係数	2002年電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-2-63.	2002年 9 月
[13] ポリマー分散液晶の応答時間特性	2003年電子情報通信学会総合大会, C-2-55.	2003年 3 月