[依頼講演] IRS アンテナ向け液晶材料物性

○†藤澤 宣・†佐藤弘康・††藤掛英夫・†陳 強(東北大)

[†]東北大学大学院 工学研究科 通信工学専攻 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05 ^{††}東北大学大学院工学研究科 電子工学専攻

E-mail: [†]{toru.fujisawa.a2, hiroyasu.sato.b1, qiang.chen.a5}@tohoku.ac.jp, ^{††}hideo.fujikake.e6@tohoku.ac.jp

あらまし 液晶を用いた IRS アンテナの特性向上を目的に, GHz 帯とバイアス電圧の低周波帯の液晶物性につい て検討している. 1-50GHz の範囲で同軸線路により比誘電率及び損失正接を測定し, 損失正接を低減させる手法を 明らかにして低損失正接を示す液晶を得る. 更に, IRS の特徴であるビームステアリングに必要な位相変化量を担保 して応答性の向上に関して述べる.

キーワード インテリジェント・リフレクティング・サーフェス,液晶,損失正接,比誘電率,同軸線路,周波 数依存性,ギガヘルツ帯

[Invited Talk] Physical Properties of Liquid Crystals for IRS antenna

[†]Toru Fujisawa, [†]Hiroyasu Sato, ^{††}Hideo Fujikake, [†]Qiang Chen (Tohoku Univ.)

[†]Communications Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University

Aoba 6-6-05, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8579, Japan

^{††}Electric Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University

E-mail: [†]{toru.fujisawa.a2, hiroyasu.sato.b1, qiang.chen.a5}@tohoku.ac.jp, ^{††}hideo.fujikake.e6@tohoku.ac.jp

Abstract Aiming at the improvement for the characteristics of an IRS antenna using liquid crystal, we are investigating the characterization of liquid crystal properties in the gigahertz band and low frequency band of bias voltage. Measurement of the relative permittivity and loss tangent using a coaxial line in the range of 1-50GHz is performed to reveal a method to reduce the loss tangent. In addition, we are discussing the means for improvement of responsiveness coexisted with ensuring the phase change requiring for beam steering to be a feature of IRS.

Keywords Intelligent Reflective Surfaces, Liquid crystals, Loss tangent, Relative permittivity, Coaxial line, Frequency dependence, Gigahertz band

1. まえがき

IRS(Intelligent Reflective Surface)アンテナは、平面 アレイアンテナアレイである.アンテナ基板の下層に 誘電体層が配置されており、誘電体に液晶を使用して、 バイアス電圧を液晶へ印加することにより誘電体層の 比誘電率を可変することが可能になり、ミリ波帯の電 磁波を任意の方向へ反射させるビームステアリング機 能を示す[1],[2],[3].反射方向制御は、各アンテナエレ メントの位相を個別に制御して行われるが、これらの 制御特性は誘電体層の液晶物性に大きく依存して、1) 十分な位相変化が可能な誘電異方性、2)反射損失低 減に必要な低損失正接 tanô、3)移動体通信に対応で きる速い応答性、を兼ね備えた液晶が必要になる.

1)は、位相を 360%以上変化させることが必要にな

るので、これを担保するためには誘電体層の厚さを 100µm 近くに増し、液晶の誘電異方性に大きい液晶を 用いることが求められる.ここで、誘電体層厚は3) の応答性に大きく影響を及ぼし、特に、液晶の OFF 応 答時間が液晶層の厚さの二乗に比例して長くなるので 厚さが 100µm 近くになると数十秒に達し応答性が著 しく低下する.誘電異方性は、液晶分子の形状が棒状 であることに由来して、棒状分子の長軸方向に対し垂 直方向の比誘電率を $\epsilon_r l$ 、その長軸に対して平行方向 の比誘電率を $\epsilon_r l$ 、その長軸に対して平行方向 の比誘電率を $\epsilon_r l$ とすると、 $\epsilon_r l$ から $\epsilon_r l$ を引いた差を正 の誘電率異方性 $\Delta \epsilon_r$ として定義される[4].液晶は外部 からの配向規制力と電界方向により棒状分子の長軸方 向が変化する性質を利用して比誘電率を可変できるこ とが液晶の特徴であるので、比誘電率の可変範囲は

- 90 -

εr上から εr//になり、バイアス電圧が無印加では、誘電 率が最小の εrLを示し、バイアス電圧を増加させて飽 和状態にすると誘電率が最大で ε,//になる.従って、十 分な位相変化量を担保するには GHz 帯域での Δεr が大 きい液晶を用いることで位相変化量を大きくすること が可能になる, GHz 帯域の Δεr は、光の屈折率異方性 ∆n の二乗である光波長帯域の誘電率と相関性が高い ので、ディスプレイ用途への応用研究で多くの知見が 得られている液晶分子構造と屈折率異方性との関係性 [5]から Δn の高い液晶化合物の選定により比較的容易 に位相変化量を大きくすることができる.一方、屈折 率の高い液晶化合物は[6]、液晶の応答性に影響及ぼし、 液晶物性である回転粘性 y1 が比較的高くなるので OFF 応答時間を長くする傾向がある.即ち、1)と3)はト レードオフの関係があり、1)の位相変化量を担保す るには、GHz 帯の誘電異方性と最適化された誘電体層 の厚さ、及び3)の応答性の多面的な要素を考慮し、 それらに対応する液晶組成物を見出すことが重要にな る.

 の低損失正接 tanδ は、多数ある液晶化合物から 低 tanδ を示す化合物を見出し、他の重要な液晶物性と の両立が求められる. tanδ は、周波数及びバイアス電 圧に依存する.報告されている液晶を使用したアンテ ナや位相器等に使われる周波数帯に対する tanδの値は、 文献等に多数記載されており、標準的に用いられる液 晶組成物 E7 では 0.1-0.02 程度である[4]. 我々の IRS アンテナに E7 を用いると共振周波数に於ける S11 振 幅は、E7のtanδの影響で減少が大きく、更なるtanδの 低減が求められる.低減には、多数ある液晶化合物か ら低 tanδ を示す化合物を見出して,前述したように回 転粘性や比誘電率等の液晶物性を満たすように低 tanδ 液晶化合物を調合して液晶組成物を得る. 調合する全 の化合物が低 tanδ を示す液晶化合物を用いるのが最善 策であるが、現状では全てを網羅するには至っていな いため、低減効果は必然と制限を受ける点が課題とし て挙げられる.このような観点から,IRSアンテナに適 した液晶組成物を検討して、液晶物性を評価した.

本報告では、GHz 帯の液晶物性で重要である比誘電 率と損失正接tanδ評価を行うために同軸線路を用いて 1GHz~50GHz の高周波数範囲で測定した.又、応答性 については、誘電体層厚と OFF 応答時間、及び ON 応 答時間は静電容量変化を時間分解で測定した結果につ いて述べる.

2. 測定方法

複素比誘電率を測定する方法には、フリースペース 法、共振器法、開放端同軸プローブ法、同軸線路法が 挙げられ、それぞれに特徴がある[4].液晶評価用には 液体である液晶を封入できる事、測定周波数帯域が広 い事,バイアス電圧を液晶に印加可能である事を考慮 に入れ選定すると同軸線路法が有用と考えられる [7],[8]. 同軸線路の伝搬特性は、Keysight P5008A VNA (Vector Network Analyzer)を用いて S-パラメータの周 波数特性を測定し、 S21 から複素比誘電率を抽出する 測定方法を検討した. 使用する Device Under Test(DUT)同時線路は, AC-2.4 規格のセミリジット同軸 線路を用い,外部導体と内部導体に挟まれた誘電体層 である Polytetrafluoroethylene (PTFE)の一部を液晶に 置き換えたものである.同軸線路の一部が液晶に置き 換えられると液晶による挿入損失による減衰,及び位 相遅延等が同軸線路の伝送特性に変化が起こり、S21の 振幅及び位相にそれらの影響が現れる.これらの変化 は、伝達定数 γ で表される. 伝達定数 γ は、実数部の減 衰定数αと虚数部の位相定数βから成る複素数で定義 される.



図 1(a)同軸線路に於ける位相定数 β の周波数依存性. βl: 液晶 DUT の位相定数, βp: PTFE の位相定数



図 1(b)同軸線路に於ける減衰定数 α の周波数依存性. all:液晶 DUT の減衰定数, app: PTFE の減衰定数

PTFE 同軸線路と液晶 DUT 同軸線路に於ける減衰定 数 α と位相定数 β の周波数依存性を図 1 (a)-(b)に示す. 図 1(a)の位相定数 β は, PTFE 同軸線路の βp に比べ液 晶 DUT の βl は全測定周波数帯で高い値を示す. 図 1(b) の減衰定数 α は, PTFE 同軸線路の αpp と比較して液晶 が挿入されたことで液晶 DUT の all は増加し, 周波数 10GHz を超えると増加が顕著になる.液晶の減衰定数 alx は, PTFE 同軸線路の αpp と DUT 同軸線路の all と の差異から抽出する. 両線路の S_{21} の位相差から液晶 の比誘電率 $ε_r を算出して位相定数 βl を求める. 得られ$ た両定数 αlx と βl から複素比誘電率を式(1)と(2)を用 $いて比誘電率 <math>ε_r と ε_r'/ε_r'$ の比から損失正接 tanð を得る.

| $\varepsilon_r' = -\frac{(\alpha l x^2 - \beta l^2)c_0^2}{\omega^2}$ | (1) |
|---|-----|
| $\varepsilon_r^{\prime\prime} = \frac{j(2\alpha lx\beta l)c_0^2}{\omega^2}$ | (2) |

この方法にすると各周波数の測定点から直接複素 比誘電率を求められるので,数値モデルによるカーブ フィッティングなしで周波数依存性が抽出されるのが 特徴である.

バイアス電圧印加回路は、VNA に接続されている高 周波回路へ影響が及ばさないように DUT 同軸線路両 端に接続されている DC ブロックとバイアスティーで 低周波 30Hz のサイン波をカットし、バイアスティー を介して同軸線路の中心導体のみに最大 50Vrms まで のサイン波を印加する.これにより,液晶の配向方向 (液晶分子長軸方向)を変化させた状態で測定できる のが特徴である.言い換えると比誘電率を変化させた 状態で同軸線路の伝送特性を測定することを可能にし ている.同軸線路の液晶にバイアス電圧を印加すると, 中心導体面に接している液晶棒状分子の長軸方向が中 心導体からの電界方向(法線方向)へ揃うようになり 垂直配向状態を示す.一方で,電圧が無印加時は分子 長軸方向が無秩序なのでランダムな配向状態を示す. これらの二状態の比誘電率を測定して, 垂直配向状態 の比誘電率 εr//と、ランダム配向状態の比誘電率から 換算式(3)を用いて平行配向状態の比誘電率 εrL を求 め、 ϵ_r //と $\epsilon_r \perp$ の差から比誘電異方性 $\Delta \epsilon_r$ を求める[8]. 損 失正接 tanδの場合も比誘電率を同様の取り扱い方で垂 直配向状態とランダム配向状態の損失正接を複素比誘 電率から求める.

$$\varepsilon_r \perp = \frac{3\varepsilon_{avr} - \varepsilon_r \|}{2} \tag{3}$$

3. 液晶物性

IRS に使用される液晶 TD1020 は,前項で述べた観 点から得られた液晶である.ここでは,標準液晶であ る E7 の物性と IRS 用液晶 TD1020 の物性を比較して 相違点を説明する.



図 2(a) 液晶 TD1020 と E7 の比誘電率に於ける 周波数依存性



図 2(b) 液晶 TD1020 と E7 の損失正接 tanδ に於 ける周波数依存性

3.1. GHz 帯の液晶物性

液晶 DUT 同軸線路による S_{21} から得た周波数 1-50GHz 範囲の比誘電率を図 2(a)に示す. 測定値の確度 を比較するため比誘電率が既知の PTFE を参照用とし て記す. PTFE 同軸線路電圧を 50Vrms 印加した場合の 比誘電率 ϵ_r //は, 45GHz で比較すると E7 で 3.18, TD1020 で 3.25 を示し両液晶とも同等である. 一方, 電圧無印 加時の比誘電率 $\epsilon_r \perp$ は, E7 で 2.62, TD1020 で 2.48 と TD1020 は E7 に比べて低くなっているが, 比誘電異方 性($\Delta \epsilon_r = \epsilon_r$ //- $\epsilon_r \perp$)で見ると TD1020 の方が大きくなって いる.周波数依存性は、周波数が増加すると供に僅か に減少する傾向を両液晶とも示す.試作した IRS(石 英ガラス基板厚:700 μ m,液晶層厚:100 μ m)では、位相 変化量が E7($\Delta \varepsilon_r$:0.56)では約 230° @ 36.0GHz, TD1020($\Delta \varepsilon_r$:0.77)では約 410° @39.5GHz で、 $\Delta \varepsilon_r$ が大き い液晶にすると位相変化量が大きくなることが確認さ れている.又、液晶層厚の観点から見ると、TD1020の 位相変化量が 360°を超えているので液晶層厚を 100 μ m以下に減少できることを示唆している.

損失正接 tan δ を表 1 と図 2(b)に示す. 45GHz の tan δ で比較すると次のようになる. バイアス電圧 50Vrms 印加時の tan δ を//で表すと, E7 が 0.015 で TD1020 が 0.010 を示し TD1020 の方が低い損失正接 δ である. バ イアス電圧が無印加時の tan δ を1で表し, E7 が 0.036 で TD1020 が 0.020 なので無電圧印加でも TD1020 の tan δ は低い. tan δ は比誘電率異方性と同様にバイアス 電圧に依存して変化するが,比誘電率とは反対の傾向 を示し、バイアス電圧を高くすると tan δ は減少する. tan δ を周波数変化で見ると, 図 2(b)に示すように, 10GHz を超えると変化度合が小さい傾向を示し30GHz を超えると周波数依存性が最小になり,周波数が増加 することで tan δ が向上することが判明した.

3.2. 液晶化合物と損失正接 tanð

高周波帯でのtanδと液晶組成物との関係性について 記述した論文は多いが,液晶化合物との関係性につい ては少ない.液晶組成物の低tanδ化を進展させるには 低tanδの化合物を特定することが材料開発では必要不 可欠である.液晶組成物は,液晶相温度範囲,屈折率, 誘電率,回転粘性等の実用的な物性を得られるように 10 種類程度の化合物で調整する.そのため,多様な要 因が液晶組成物の物性に重なり複雑にしている.本検 討では,組成を単純化して低tanδ化する手法について 検討した.液晶化合物の環構造との関連性について比 較した.環構造数が2個の液晶組成物 65CBのtanδを 基準液晶として,様々な液晶化合物を添加してtanδの 影響を調べた.その結果,環構造数が3 個以上の液晶

| 表 1 | 周波数 | 45GHz | と | 1kHz | に於け | る | 液晶物性 |
|-----|-----|-------|---|------|-----|---|------|
|-----|-----|-------|---|------|-----|---|------|

化合物に比較的 $tan\delta$ を低くする効果が見られた. バイ アス電圧を 50Vrms 印加した場合の $tan\delta$ 低減効果の一 例を図 3 に示す. 環構造数が 2 個の液晶組成物 65CB を基準にして,液晶化合物環構造数が 3 個の 5CT を 65CB に 20wt%添加した液晶組成物と比較すると,5CT の添加で $tan\delta$ が低減する傾向を示した.即ち,5CT の 増量,又は類似の 3 環構造液晶化合物の増量により $tan\delta$ を低減できることが示唆される.しかし,液晶相 温度範囲等の他の物性に影響を及ぼすので,その添加 量が制限される.我々の IRS に使用する液晶 TD1020 は,図 3 に示す知見を基に,70 wt%を超える 5CT の類 似液晶化合物を含有量させることで $tan\delta$ の低減を図っ ている.



図 3 2 環構造液晶と 3 環構造液晶を添加した場 合による tanδの比較

3.3. 低周波帯の液晶物性

IRS の特徴であるビームステアリングは,液晶の応 答特性に大きく影響される.ここでは,応答性に関連 する物性について述べる.液晶の応答性で一番重要な 物性は回転粘性 γ1 である.表1に,E7 と TD1020 の比 較を示す.γ1 が E7 は 252 [mPa s]に対して TD1020 は 107 [mPa s]で半減以下になっている.これにより,液 晶層厚 100μm での OFF 応答時間が E7 では 22 秒あっ

| LC mixture | 45GHz | | | | 1kHz | | | V _{th} | γ1 | τ _d (Decaytime) | Tr (Rise time) | |
|---------------|--------------------------|----------------------|-----------------|------------------------|-----------------|----------------------------|------------------------|------------------------|--------|-------------------------------|----------------------|----------------------|
| | $	an \delta_{\parallel}$ | $	an \delta_{\perp}$ | € _{r∥} | $\varepsilon_{r\perp}$ | Δε _r | $\mathcal{E}_{r\parallel}$ | $\varepsilon_{r\perp}$ | $\Delta \varepsilon_r$ | [Vrms] | [mPa s] | [sec.] @100µm gap | [sec.] @100µm gap |
| E7 | 0.015 | 0.036 | 3.2 | 2.6 | 0.6 | 14.4 | 4.2 | 10.2 | 0.8 | 252 | 22 | 0.5 |
| TD1020 | 0.010 | 0.020 | 3.3 | 2.5 | 0.8 | 3.8 | 3.1 | 0.7 | 5.0 | 107 | 10 | 1.9 |

たのが TD1020 では 10 秒になり応答性が進展してい る. E7 の γ₁ が高いのは、分極に必要な強い極性基を有 する化合物が100%含有している点が主な要因である. この点から, γ1 が低くい液晶化合物を導入すれば良い ことになるので、TD1020では非極性基を有する化合物 の含有量を増加させて γιの低減を図っている.一方, 1kHzの比誘電率(ε_r//, ε_r⊥, Δε_r)は、極性基を有する化 合物の種類と含有量に比例するので,極性基を有する 化合物を減量した分 TD1020 の比誘電率は E7 に比べ て低くなる. ON 応答時間は, Δεr と電界強度の二乗に反 比例するため[4], 比誘電率が低い TD1020 では ON 応 答時間が長くなり応答性が遅くなる. IRS の場合は約 10Vrms から 30Vrms の範囲で位相を制御できるので、 高い電圧印加により ON 応答時間が改善され, TD1020 は層を薄くした効果で電界強度が高くなることに起因 して、20Vrms 印加で 100µm に於いては 1.9 秒である が 50µm に於いて 0.38 秒を示し TD1020 の欠点を補完 している.

液晶の応答性で重要なパラメータは、回転粘性 γ1の 他に液晶層厚がある.図4にOFF応答の液晶層の厚さ 依存性を示す.OFF 応答時間が厚さの二乗に比例して 増加するので[4],100μm では10秒前後で遅くなる. 50μm にすると1/4の2.5秒に向上する.IRS で位相変 化量と応答性向上が担保できる液晶層の厚さを検証す ると厚さが50μm で両立することが確認された.ON 応答時間は、電界強度と比誘電異方性に依存し、OFF 応答時間は、回転粘性と液晶層厚に依存する.回転粘 性は、比誘電異方性とトレードオフの関係があるので、 ON 応答時間とOFF 応答時間の両方を液晶物性の調整



図 4 液晶 TD1020 の場合の OFF 応答 (Decay time τ_d)の液晶層の厚さ依存性

で同時に短くさせることは難しい. IRS 用液晶は, 比誘 電率異方性 Δεr を制限して低回転粘性化を優先するこ とで OFF 応答時間を短くさせ、更に、電界強度を高く することで ON 応答時間を短くする手法で応答性を向 上させている.

4. まとめ

本報告では、IRS 用液晶材料物性について述べた.1-50GHz帯での液晶物性を、DUT 同軸線路を用いて評価 した.比誘電率と損失正接の周波数依存性は、周波数 の増加で減少する傾向を示し、30GHz を超えると減少 が抑制され 40GHz 帯で動作させる IRS には有用であ ることが判明した. IRS のビームステアリング特性で は液晶の応答性と位相変化量の確保が重要になる. IRS 用液晶には、標準液晶 E7 に比べ回転粘性 γ1 を 58% 低減させた点,液晶層の厚さを 100µm から 50µm にす る点により OFF 応答時間を従来の 1/4 に短くすること ができた.又、同時に、必要な位相変化量も確保する ことができた. 損失正接 tanδ の低減では, 三環型液晶 化合物の tanδ が低いことを見出し、この液晶化合物の 含有量を増量した液晶組成物 TD1020 により、標準液 晶 E7 の tanδ が 0.015 を 0.010 へ低減させることがで きた.これらの検討結果から低損失正接で、且つ IRS でのビームステアリングが可能な液晶を得ることがで きた.

5. 謝辞

本研究開発は総務省の電波資源拡大のための研究 開発(JPJ000254)として実施された.

文 献

- X. Li, H. Sato, Y. Shibata, T. Ishinabe, H. Fujikake, and Q. Chen, "Liquid crystal based reflectarray for reconfigurable intelligent surface applications," IEICE Commun. Express, Vol.12, No.6, 265–270, Mar. 2023.
- [2] Y. Cui, H. Sato, Y. Shibata, T. Ishinabe, H. Fujikake, Q. Chen, "A Low-Cost Structure for Reducing Reflection Loss in Intelligent Reflecting Surface of Liquid Crystal," IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., VOL. 22, NO. 12, Dec. 2023.
- [3] X. Li, H. Sato, Y. Shibata, T. Ishinabe, H. Fujikake, and Qiang Chen, "Development of beam Steerable Reflectarray with Liquid Crystal for Both E-Plane and H-Plane," IEEE Access, Vol. 10 pp. 26177-26185, Feb. 2022
- [4] D. C. Zografopoulos, A. Ferraro, And R. Beccherelli:
 "Liquid -Crystal High-Frequency Microwave Technology, Materials and Characterization," Adv. Mater. Technol. 4, 1800447, Feb. 2019
- [5] M. Hird, "Fluorinated liquid crystals-properties and applications," Chem. Soc. Rev., 36, 2070–2095, 2007,
- [6] S.Gauza, P. Kula, X. Liang, Shin-Tson Wu, and R. Dabrowski, "High birefringence and Low Viscosity

Liquid Crystals with Negative Dielectric Anisotropy," Mol. Cryst. Liq. Cryst., Vol. 509, pp. 47/[789]– 59/[801], 2009

- [7] S. Mueller, A. Penirschke, C. Damm, P. Scheele, M. Wittek, C. Weil, and R. Jakoby, "Broad-Band Microwave Characterization of Liquid Crystals Using a Temperature-Controlled Coaxial Transmission Line," IEEE Trans. on Micro. Theory & Techniq., Vol. 53, NO. 6, June 2005.
- [8] T. Kamei, Y. Utsumi, H. Moritake, K. Toda, and H. Suzuki, "Measurements of the Dielectric Properties of Nematic Liquid Crystals at 10 kHz to 40 GHz and Application to a Variable Delay Line," Electronics Commun. In Japan Part 2, Vol. 86, 8, Aug. 2003.
- [9] Y. Murakami, Y. Shibata, H. Sato, T. Ishinabe, Q. Chen, and H. Fujikake, "Systematic Investigation of Molecular Structure of Nematic-phase Liquid Crystals for Reduction of Dielectric Loss in Microwave Control Applications," ITE Trans. On MTA Vol. 8, 4, pp-218-223 2020