

電波伝搬の実時間 3D 映像表示に向けて

塩沢 隆広[†] 高田 浩生[†] 土屋 昌弘[‡]

[†] 香川高等専門学校 〒769-1192 香川県三豊市詫間町香田 551

[‡] 情報通信研究機構 〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1

E-mail: [†] shiozawa@cn.kagawa-nct.ac.jp, [‡] mtsu@nict.go.jp

あらまし 本稿では、電波伝搬の実時間映像観察を新しい映像技術として位置付け、そのための装置および手法と撮像例、更に、撮像結果への 3次元 (3D) 表示適用について述べる。前半では、電波伝搬撮像の原理を説明し、その例として 100GHz 球面波の伝搬と反射・干渉を映像化した結果を紹介する。後半では、2種類の 3D 表示手法を適用した結果を紹介する。電波伝搬の映像技術に対して 3D 表示の有効性が認められたものとする。

1. はじめに

電波伝搬の様子を実時間で直観的に把握するには、映像観察が有効である。このような手法は、マイクロ波コンポーネントの設計、解析、故障診断を著しく効率化すると期待される。また、携帯電話や無線 LAN などの多くの場面で電波技術の恩恵を受けている日常生活において、電波伝搬の映像観察は、専門家とは限らない一般人が電波の理解を深める助けとなり得る。

数値シミュレーション技術は、電波伝搬の解析に多くの実績を持つ有効な手法であり、電波伝搬を映像化する一手法である。しかし、複雑な回路、事象に対してはモデルの構築、検証に時間を要する場合がある。他方、光技術を用いた低侵襲な電波伝搬の計測手法として、電気光学 (EO: Electrooptic) 効果を応用した電界プローブ [1]、また、磁気光学 (MO: Magneto optic) 効果を応用した磁界プローブ [2] が実用化されて

いるが、これらの方法で電波伝搬の映像を得るためにはプローブの 2次元走査が必要となり、実時間での映像化は難しい。

これに対して、著者らは電波伝搬を実時間で映像観察する装置および手法を独自に開拓した [3]-[8] (図 1)。この装置を電界カメラと称している。電界の強度分布だけでなく位相情報も含めた撮像が実時間で可能である。当初は、平面回路を伝搬する波動の観察に適用されたが、最近では、空間での電波伝搬に適用する方法の開発が試みられている [9], [10]。

他方、劇場映画においては 3次元 (3D: Three Dimensional) 映画が定着しつつある。3D テレビについては、衛星放送での定期的な放映があり、ゲーム機への普及も著しい。平面ディスプレイ技術の進歩に支えられた 3D モニタの入手は容易である。この状況は、電界映像に対して 3D 表示を導入する背景として好都合である。

電波伝搬では、3次元の要素を持つ電界ベクトルが 3次元空間に分布し時間変化する。この多次元に渡る情報を効果的に表示する手法への要請は大きい。著者の知る限り 3D 表示技術の適用例 [11] は僅かである。また、実験的に撮像した結果の 3D 表示例は無い。

著者らはこの両者の展開に挑戦している。本稿では、前半で電界カメラの原理を概説し、電波伝搬の観察例の幾つかを紹介する。後半では、3D モニタを適用した表示手法の試みについて述べる [12]。

Toward Real-Time Three Dimensional Imaging of Electromagnetic Wave Propagations

— Visualization Insight for Electromagnetic Wave Propagations (VIEW-P) —

Takahiro SHIOZAWA[†], Hiroki TAKADA[†], and Masahiro TSUCHIYA[‡]

[†] Kagawa National College of Technology 551 Koda Takuma-cho, Mitoyo, Kagawa, 769-1192 Japan

[‡] National Institute of Information and Communications Technology 4-2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo, 184-8795 Japan

Keyword Electromagnetic Propagation, Three Dimensional (3D) Image, Electrooptic (EO) Effects, Three Dimensional (3D) Monitor, Electric Field, Imaging

2. 電界カメラの原理・構成と撮像配置

電界カメラはレンズ無装着の撮像機器であり、面的センサである電気光学結晶板（EO プレート）を被写体である平面回路に密接させる（図 2 (a)）、もしくは、伝搬する電波に挿入する（図 2 (b)-(d)）ことで電界分布を瞬時に撮像する。EO プレートに印加された電界による屈折率変化をレーザー光ビームで読み出し、空間コヒーレンスを保つ周波数変換を経て、高速 CMOS（Complementary Metal Oxide Semiconductor）イメージセンサによる 10000pixel 映像化が実現される。

2.1. 電界カメラの原理

図 1 に電界カメラの高周波回路部と光学系のブロック図を示す[5], [8], [13]. 予め局部発振（LO: Local Oscillator）周波数 f_{LO} に強度変調された波長 780nm の半導体レーザー光が EO プレートに照射され、EO プレートの屈折率変化により電界周波数 f_{RF} で位相変調される。この位相変調は偏光光学系により強度変調に変換されるが、CMOS イメージセンサの受光面上では、 f_{LO} と f_{RF} の差周波数成分が生じ、次式で表される中間周波数（IF: Intermediate Frequency） f_{IF} として検出される。

$$f_{IF} = f_{RF} - f_{LO} \quad (1)$$

この周波数変換プロセスにおいて特筆すべきことは、高周波電界の空間的位相関係が保持される点である。

CMOS イメージセンサで光電変換された信号は、アナログ・デジタル変換の後に信号処理される。このとき、IF 周波数 f_{IF} と

$$\mathcal{f} = f_{IF} - f_{IS}/4 \quad (2)$$

の関係を満たすサンプリング周波数 f_{IS} を選ぶ。これにより周波数 \mathcal{f} の伝搬波として、元の高周波電界の空間位相が保持された映像が得られる。

図 1 右側の LED (Light-Emitting Diode) と CCD (Charge-Coupled Device) カメラは、試料位置や形状の実時間観察に用いる。EO プレートや関連光学系は、LED 光（波長 640nm）を透過する。電界映像を CCD 光学像に重畳させる実時間観察も可能である。

電気光学結晶には ZnTe を用いている。(100)

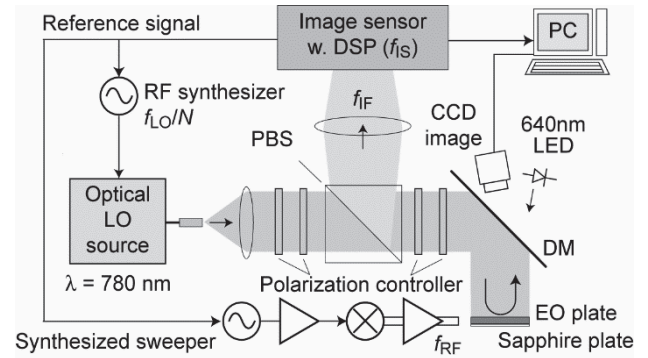


図 1 電界カメラの構成

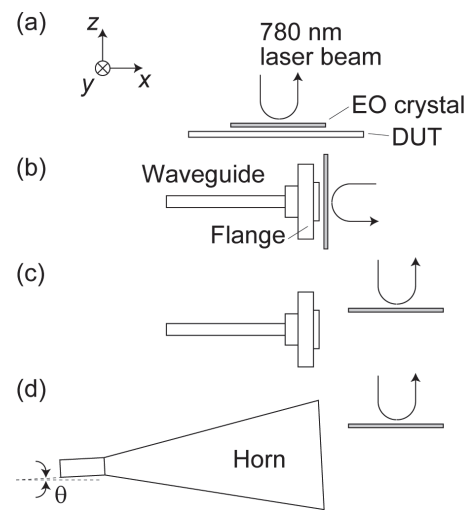


図 2 試料と電気光学結晶板の配置

面結晶を用いる場合には、図 2(a)における z 軸方向の電界 E_z のみが観察される。(110)面結晶を用い、結晶方位とレーザー光の偏光状態を調整することにより、 x 軸方向の電界 E_x 、または、 y 軸方向の電界 E_y が選択的に観察される。

2.2. 撮像配置

図 2 (b)-(d)は、電波伝搬を観察する際の典型的な配置を EO プレートとレーザー光に関して描いた図である。同図(b),(c)では、WR-10 導波管のフランジ端面開口 ($1.27 \times 2.54 \text{ mm}^2$) からの球面波放射を想定している。同図(d)では、ホーンアンテナからの平面波放射を想定している。同図(b)は近接界観察の配置であり、同図(c),(d)は波源から少し離れた位置での電波伝搬を観察する配置である。同図(d)では、EO プレート下の波動伝搬を撮像するために傾き角 θ を設けている。

3. 100GHz 波伝搬の撮像結果例

3.1. 球面波の伝搬

図 3 は、100GHz 球面波（導波管フランジ端面開口部からの放射波）の観察例である [9], [10]. 同図(a)には、導波管と EO プレートの配置を、同図(b)には、CCD 光学像を示す. 電界カメラでは、電界の振幅（Magnitude）像，位相（Phase）像，および振幅・位相の情報を持つフェーザ（Phasor）像の撮像が可能である. 同図(c)-(g)の左端の画像は、同図(a)に示す導波管フランジ端面開口から EO プレートまでの垂直距離 Δz をそれぞれ 0.2, 2.4, 4.8, 7.2, 9.4mm と変化させた場合の Phasor 像（実部）の撮像結果である.

同図では x の増大と共に波面の曲率半径が大きくなる様子が認められる. 更に、 Δz の増大と共に波面の曲率半径が大きくなる様子も認め

られる. これらは、球面波の波面が 3 次元的に再生されていることを意味する. また、同図(c)の Phasor 像では、波動ベクトルが EO プレート面内にあるため、波面間隔は波長に相当する. 図から読み取れる波長約 2.95mm は、100GHz の自由空間伝搬波の波長に近い値である.

同図(c)-(g)の左から 2 番目の画像は、Phasor 像（実部と虚部）を複素フーリエ変換した結果の波数空間像であり、座標は波数ベクトルの終端を、輝度はその波数を持つ伝搬波のパワーを表す. 波数空間内の k_x が正の領域には、3 つの右方向へ進む伝搬波（進行波）が、 k_x が負の領域には、3 つの左方向へ進む伝搬波（後退波）が分離されて現れている. 波数空間内の原点（中央）に一番近い伝搬波が空間伝搬波に対応し、他の伝搬波は、EO プレート内を伝搬する進行波（導波モード）に対応する. また、3 つの後退波は、進行波の EO プレート右端面での反射により生じたものと考えられる. 電界カメラでは、伝搬波の位相情報を取得できることが大きな特徴となっている. これにより複素フーリエ変換が適用できるので、波数空間での進行波と後退波の分離が可能となる.

波数空間像に 2 次元フィルタ処理を行い進行波の空間伝搬波のみを抽出して逆複素フーリエ変換することで得られた画像が、同図(c)-(g)の右から 2 番目の画像である. 同図右端の汎用電磁界シミュレータ HFSS により算出した空間伝搬波像と良く一致している.

3.2. 球面波の反射と干渉

図 4 に、100GHz 球面波が銅薄膜面で反射され、反射波が入射波と干渉する様子を撮像した結果を示す. 同図(a)の領域 α に、銅箔を貼付した発砲スチロールブロックを設置した（同図(b)左側 CCD 像）. 同図(b)右上側には、銅箔の角度を 45° とした場合の撮像結果を示す. 入射波と反射波、両者の干渉パターンが認められる. また、銅箔上端から背面に漏れた出た伝搬波も現れている. 同図(b)右下側には、銅箔の角度を 60° とした場合の撮像結果を示す. 45° の場合との差異が認められる. また、 45° の場合と同様に各伝搬波が認められる.

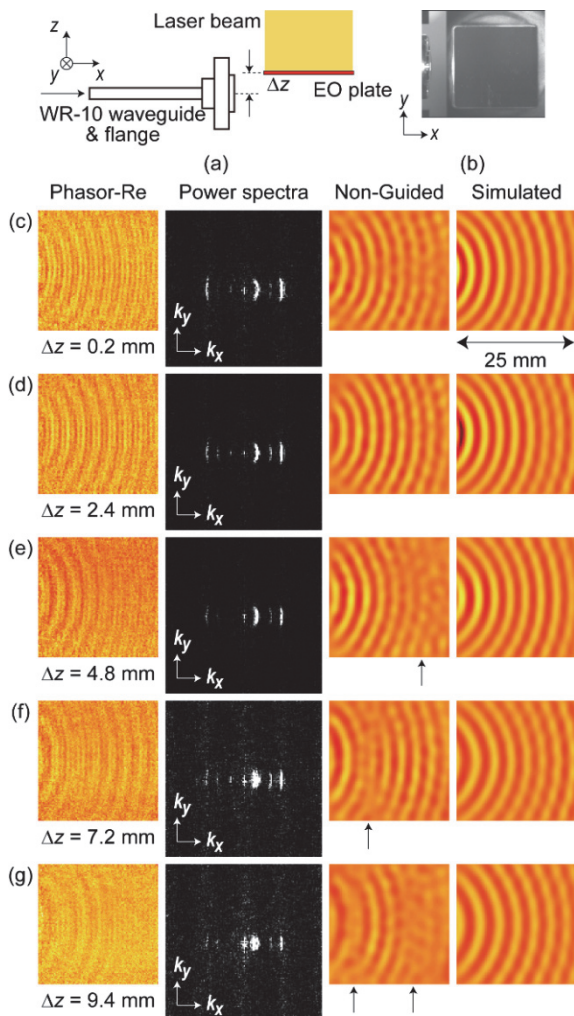


図 3 100GHz 球面波伝搬

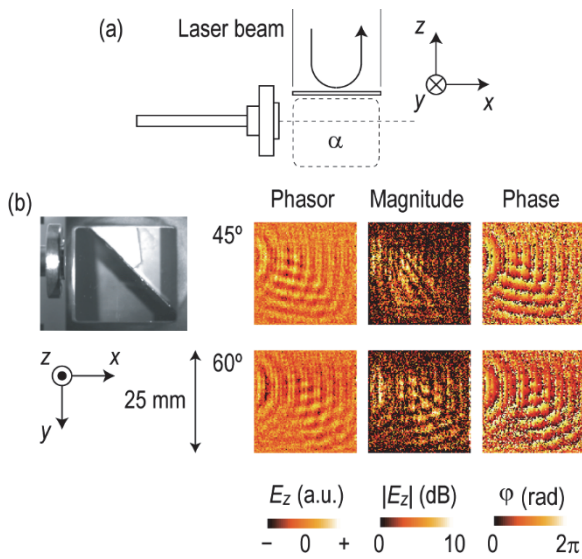


図 4 100GHz 球面波の反射および干渉

4. 電波伝搬の 3 次元映像表示

電波伝搬は、 $\vec{E}(x, y, z, t)$ と表記されるように、時間的に変化する多元的情報を含む。電界カメラによりそれらを網羅的に撮像することも可能である。なぜなら、2.1 で述べたように、電界カメラの EO プレート結晶面の選択とレーザ光の偏光調整によって有感度方位が選択される。これによって電界ベクトルの各成分を独立に撮像することが可能である。また、3.1 で示したように、電波伝搬を 3 次元的にスライスして撮像することも可能である。

この多元的情報を効率的効果的に表示するには、表示手法の次元を高めることが有効と考えられる。すなわち、電波伝搬の撮像結果には、3D 表示の適用が有効と考えられる。

ここでは、電界カメラ映像の 3D 表示の有効性を検証する試みを報告する。電界映像の 3D 表示の実時間化は、最大の効率と効果をもたらすと期待されるものの、その実現のためには現状システム的大幅改良が必要なため、今回は予備的結果の報告に留める。

4.1. 電波伝搬の 3 次元表示

ここでは、ステレオスコピック 3D (S3D: Stereoscopic 3D) による電波伝搬表示に着手した結果を報告する。図 5 に電界カメラと 3D モニタを用いる電波伝搬 S3D 表示の手順を示す。

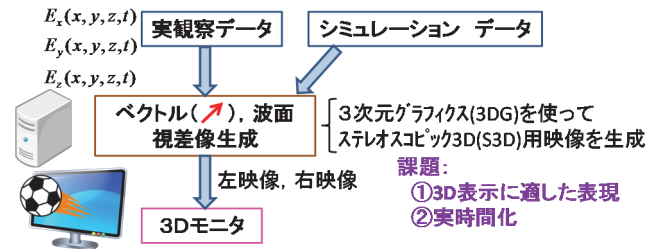


図 5 3 D 映像の作成

電界カメラで取得した電界映像データから 3 次元コンピュータグラフィック (3DCG: Three Dimensional Computer Graphics) 技術を活用して左右視差画像 (映像) を作成する。ここで、3D モニタの入力フォーマットに整合させる変換が必要な場合もある。

図 5 の手順には、二つの課題が残されており、今後の解決が望まれる。第一の課題は、3D 表示に適した表現手法である。電波伝搬の有する多次元情報を効率的効果的に 3D モニタ上で表現する手法の高度化が不可欠である。第二の課題は、実時間処理の実現である。3DCG 処理の実時間化だけでなく、電界カメラによる多次元データの実時間取得が求められる。

以下に示す視差像作成には、3DCG のオープンソースとして良く知られる OpenGL (Open Graphic Library) を用いた。また、電波伝搬の撮像データは、電界カメラ撮像結果を基に汎用電磁境界シミュレータ HFSS (High Frequency Structure Simulator) によって生成した。シミュレーションデータの利用は暫時の措置と位置付ける。

4.2. アレイアンテナからの放射 (波面表示)

図 6 は 4 パッチアレイアンテナからの電波放射の電界カメラ撮像例である。同図 (a) にパッチアレイアンテナの写真を示す。アンテナ全体の寸法は $17 \times 17 \text{mm}^2$ 、個々のパッチの寸法は $5 \times 5 \text{mm}^2$ 、信号周波数は 18GHz である。同図 (b) にアンテナ基板と EO プレートの配置を示す。EO プレートを基板面に対して垂直に配置し、図中の z 軸方向の電界を撮像した。撮像結果の Magnitude 像, Phasor 像を同図 (c) に示す。後者については時間間隔 11ps のストロボ像とした。

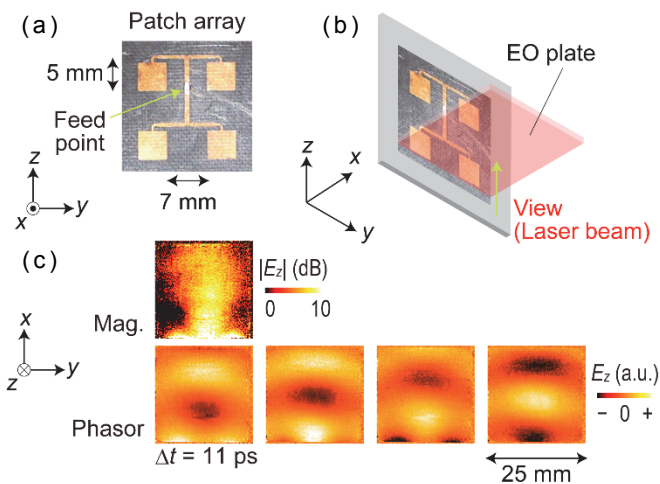
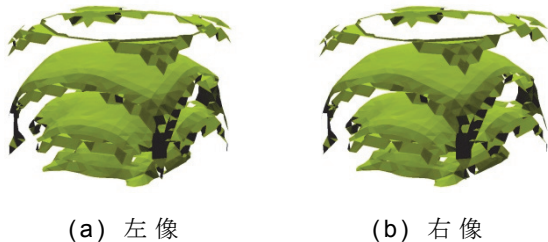


図 6 4パッチアレイアンテナ放射の撮像結果



(a) 左像 (b) 右像

図 7 4パッチアレイアンテナ放射の視差像 (波面表示)

放射から伝搬に遷移する様子が認められる。

図 7 は、図 8 を基に算出した伝搬波の位相データから波面（等位相面）を再構成することで作成した S3D 映像 1 フレームの左右視差像である。パッチアレイは下面に配置されている。

電磁界シミュレータには、3DCG 技術の一つであるソリッドモデル（立体を面の集まりとして扱い、陰影等を利用して立体感を与える手法）を用いて、電波伝搬の波面（等位相面）を表示する機能が提供されているものがある。同図は同様なソリッドモデルの波面表示を S3D 表示に発展させたものである。これにより波動伝搬の認識に立体感、現実感が付与されたと考えている。ただし、この表示手法では位相情報のみが利用されており、電界強度の空間分布は無視されている。

4.3. マイクロストリップ線路上の伝搬 (矢印表示)

電界はベクトルである。そこで、電波伝搬における電界ベクトルを端的に表現する方法とし

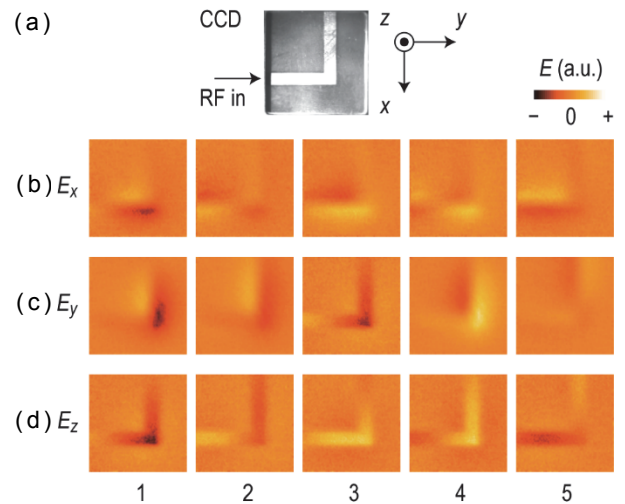


図 8 L字マイクロストリップ線路における電界ベクトル撮像結果

て 3D 矢印に着目し、この表現方法の適用を試みた。ここでは、3D 矢印表現の特長の表出が容易と考えられる L 字マイクロストリップ線路上の伝搬を対象としたが、4.4 では空間伝搬波への展開も試みる。

図 8 は電界カメラによる L 字マイクロストリップ線路上の信号伝搬のベクトル撮像例のストロボ像である。試料は、厚さ 1.6mm のガラスエポキシ基板上に幅約 3mm のマイクロストリップ線路を形成したもので、信号周波数は 3GHz である。個別に撮像した x, y, z 3 軸方向の Phasor 像を約 67ps 間隔で示した。伝搬と屈曲によるベクトル成分毎の変化の様子が現れている。

図 9 は図 8 を基に算出した伝搬波の電界ベクトルを 3D 矢印で表現することで作成した S3D 映像 1 フレームの左右視差像である。矢印の長さは電界強度に比例する。図 10 には、左視差像のストロボ像を示す。3D 矢印表示による効果が確認されたと考えている。例えば、屈曲部付近での電界ベクトルの 3 次元的な変化の様子がより容易に把握される。

4.4. 球面波の伝搬 (矢印表示 / 波面表示)

空間伝搬波を 3D 矢印表示した例も作成した。図 11 は、図 3 の撮像結果に対応するもので、WR-10 導波管フランジ端面開口から放射される 100GHz 波の電界ベクトルを 3D 矢印表現するこ

とで作成した S3D 映像 1 フレームの左右視差像である。前例と同様に矢印の長さは電界強度に比例する。幾つかの改善必要点を含むものの、電界ベクトルの方向とその 3 次元的な変化の把握について効果が確認されたと考えている。

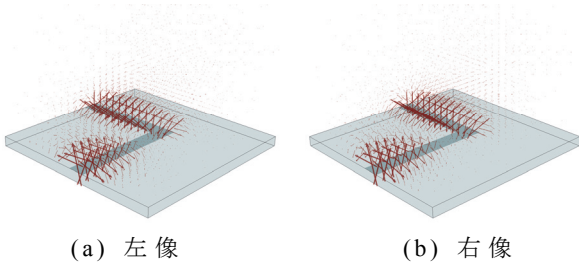


図 9 マイクロストリップ線路の電界の視差像 (矢印表示)

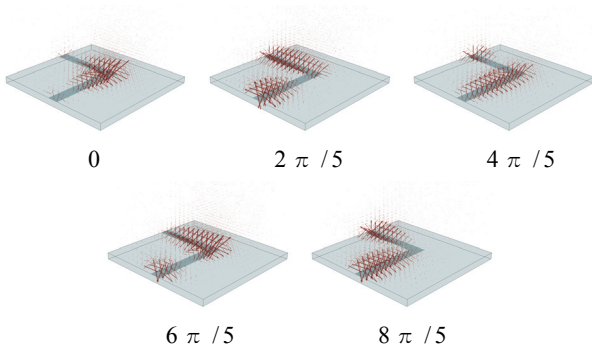


図 10 マイクロストリップ線路の左像 (位相展開)

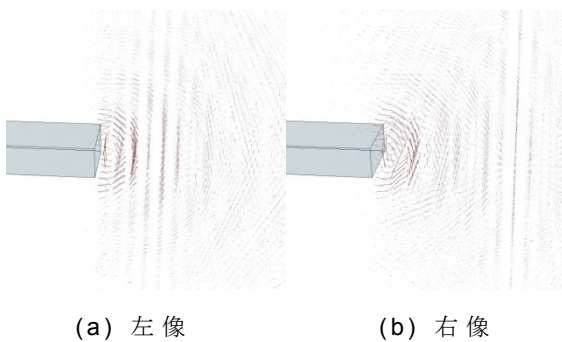


図 11 球面波の電界の視差像 (矢印表示)

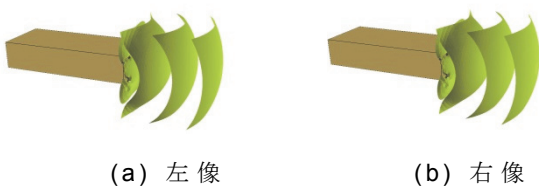


図 12 球面波の電界の視差像 (波面表示)

また、図 12 には、対応する波面表示を示した。補完する 3 次元情報を表示していると考えられる。

4.5. 検討

本稿では、波面表示と矢印表示という二つの手法で 3D 表示を試みた結果を述べている。波面表示では、電界の位相情報のみを用いたが、電界強度を色で表現することも良く行われる。電界の絶対値を色表示した場合でも、電界ベクトル（各成分の大きさ）の情報は失われる。他方、矢印の方向で電界ベクトルの向きを、矢印の長さで電界強度を表す手法は、電界ベクトルの情報の全てを含むが、表示密度に制約が生じる。本稿で示した例では、等間隔グリッド上の点における電界ベクトルを矢印で描いたが、グリッド間隔は目的に応じて調整されるべきと考えられる。また、不等間隔とする表示手法も選択肢と考えられる。

更に、設計、解析、故障診断、教育的な利用などの局面毎に、表示すべき情報が異なると考えられる。本稿で紹介した結果はいくつかの試みに留まるため、今後は、目的適合型の表示方法を開拓する必要がある。

5. おわりに

本稿では、電界カメラの原理を概述し、電波伝搬の観察手法を説明した。また、観察の対象例として球面波の伝搬と反射・干渉を紹介した。次に電波伝搬撮像結果の新たな表示方法としての S3D 表示に関する検討を行った。これらを通じて幾つかの課題が明らかになったが、これらに関する諸賢のご意見、ご批判を期待する。

日頃ご指導、ご助力頂く香川高専 福永哲也教授、100GHz 実験に貢献頂いた NICT 笹川清隆氏（現奈良先端大）、菅野敦史氏、3D 映像関連情報を提供頂いた元日本工業大 山田千彦特別研究員、FASE 中村康則氏、中村義則氏、3D 表示に関する初期の研究に貢献頂いた元香川高専 秋山祥慧氏に感謝致します。また、折に触れご支援頂く濱崎襄二東大名誉教授に感謝致します。

本研究は JSPS 科研費 24560432 の助成を受けたものです。

文 献

- [1] K. Yang, G. David, J.-G. Yook, I. Papapolymerou, L. P. B. Katehi, and J. F. Whitaker : “ Electrooptic mapping and Finite-Element Modeling of the Near-Filed Pattern of a Microstrip Patch Antenna” , IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 48, 2, pp.288-293 (Feb. 2000)
- [2] E. Yamazaki, S. Wakana, H. Park, M. Kishi, and M. Tsuchiya : “High-Frequency Magneto-Optic Probe Based on BiRIG Rotation Magnetization”, IEICE Trans. Electron., E86-C, 7, pp.1338-1344 (Jul. 2003)
- [3] M. Tsuchiya and T. Shiozawa : “Photonics Makes Microwaves Visible” , Research Highlights, IEEE Photonics Society Newsletter, 26, 6, pp.9-17 (Dec. 2012)
- [4] K. Sasagawa and M. Tsuchiya : “Real-Time Monitoring System of RF Near-Field Distribution Images on the Basis of 64-Channel Parallel Electro-Optic Data Acquisition” , IEICE Electron. Express, 2, 24, pp.600-606, (Dec. 2005)
- [5] K. Sasagawa, A. Kanno, T. Kawanishi, and M. Tsuchiya : “Live Electro-Optic Imaging System Based on Ultra-Parallel Photonic Heterodyne for Microwave Near-Fields” , IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 55, 12, pp.2782-2791, (Dec. 2007)
- [6] K. Sasagawa, A. Kanno, and M. Tsuchiya : “Instantaneous Visualization of K-band Electric Near-Fields by Live Electrooptic Imaging System Based on Double Sideband Suppressed Carrier Modulation” , J. Lightw. Technol., 26, 15, pp.2782-2788, (Sep. 2008)
- [7] M. Tsuchiya, K. Sasagawa, and T. Shiozawa : “Real-Time Observations and Analyses of RF Wave Propagations by Live Electrooptic Imaging Camera” , in Proc. 39th Eur. Microw. Conf. Rome, Italy, pp.787-790 (Sept. 2009)
- [8] M. Tsuchiya and T. Shiozawa : “RF Wave Visions for Circuit Analyses and Diagnoses by Live Electrooptic Imaging Camera” , Int. J. Microw. Wireless Technol., 2, 3-4, pp.341-347 (Aug. 2010)
- [9] M. Tsuchiya, K. Sasagawa, A. Kanno, and T. Shiozawa : “Live Electro-Optic Imaging of W-Band Waves” , IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 58, 11, pp.3011-3021 (Nov. 2010)
- [10] M. Tsuchiya and T. Shiozawa, "Phase-Space Analyses of Electrooptically Visualized 100 GHz Waves Employing Complex Phasor Images," Appl. Phys. Express, 7, 032401, pp. 1-4, Jun. 2014.
- [11] 前川耕一郎, 白井宏: “電磁界の可視化表現”, 信学総合大会, エレクトロニクス講演論文集 1, pp.S-23-S-24 (Mar. 2008)
- [12] 塩沢隆広, 高田浩生, 土屋昌弘: “電波伝搬を
実時間観察する電界映像技術”, 映情学技報,
BCT2013-34, Vol. 37, No. 6, pp.23-28 (Feb.
2013)
- [13] M. Tsuchiya, A. Kanno, K. Sasagawa, and T. Shiozawa, “Image and/or Movie Analyses of 100-GHz Traveling Waves on the Basis of Real-Time Observation with a Live Electrooptic Imaging Camera,” IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 57, 12, pp.3373-3379 (Dec. 2009)