

令和 2 年 5 月 25 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03263

研究課題名(和文) 高周波電磁波のポインティングベクトル分布計測に関する研究

研究課題名(英文) Study on measurement of Poynting vector distributions of radio waves

研究代表者

八木谷 聡 (Yagitani, Satoshi)

金沢大学・電子情報通信学系・教授

研究者番号：30251937

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：電子機器等から放射される高周波(GHz帯)電磁波のポインティングベクトル(エネルギーの流れ)の空間分布を計測する手法を開発した。メタサーフェス構造を利用することで、電磁界ベクトルの2次元分布計測センサを考案し、ポインティングベクトル分布計測・可視化システムを構築した。また電磁波ノイズ源周辺におけるポインティングベクトルの振る舞いを詳細に解析し、波源から放射された電磁界エネルギーがどのように伝搬し、センサに結合して計測されるかを調べた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今回開発した電磁界ベクトルセンサを用いると、電磁波ノイズエネルギーの発生・伝搬及び他機器への結合を包括的に計測・評価できるようになり、環境電磁工学やアンテナ・伝搬分野における学術的意義は大きい。またこれは従来にない電磁環境計測手法であり、今後無線通信を利用するIoT機器が急増する社会において、電子機器における電磁波ノイズ発生源の探査や、ノイズが他機器へどのように伝搬し影響を与えるか等の実測評価にきわめて有用である。

研究成果の概要(英文)：A novel measurement technique was developed for Poynting vector (electromagnetic energy flow) distributions of radio waves emitted from electronic devices at GHz frequencies. A two-dimensional array of electromagnetic vector sensors was formed on a metasurface structure, and a measurement and visualization system for Poynting vector distributions was constructed. Based on a detailed analysis of Poynting vector behaviors around a radio wave source, propagation and coupling of electromagnetic energy between the source and the sensors were investigated.

研究分野：電波情報工学

キーワード：ポインティングベクトル計測 高周波電磁界センサ メタサーフェス 電磁界エネルギー 電磁環境計測

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

電子機器から放射された電磁波ノイズが他機器や自分自身に干渉し、誤動作の原因となることが懸念されている。それらに対処するには機器における電磁波ノイズの発生源を特定しシールド等の対策を施すことが必要である。そのためには機器周辺で電磁波ノイズの空間分布を計測することが有用である。従来、電界あるいは磁界センサを空間走査することで電磁界の空間分布が計測されてきた。一方研究代表者らにより、波長より短い周期導体構造を持つ薄板(メタサーフェス)を用いた電界 2 次元分布の高速計測手法が開発されていた。しかし電磁波ノイズの伝搬・結合経路を詳細に調べるためには電界に加え磁界を同時に計測し、そこから電磁波エネルギーの流れ(ポインティングベクトル)を計測することが重要であり、電磁界分布の同時計測手法が求められていた。

2. 研究の目的

電子機器等から放射される高周波(GHz 帯)電磁波のポインティングベクトル(エネルギーの流れ)の空間分布を高速に計測・評価する手法を開発する。波長より短い周期導体構造を持つ薄板(メタサーフェス)を電界及び磁界の 2 次元分布を計測するためのセンサとして利用し、表面に入射した電磁波のポインティングベクトル分布を同時に計測する。電磁波エネルギーの伝搬を表すポインティングベクトルの時間平均に加え、エネルギーの蓄積に対応する振動成分の計測を同時に行うことで、電磁波エネルギーの発生・蓄積・伝搬を包括的に評価する手法を確立する。これらは従来にない電磁環境計測手法であり、電子機器における電磁波ノイズ発生源の探查や、ノイズが他機器へどのように伝搬し影響を与えるか等の実測評価にきわめて有用となる。

3. 研究の方法

(1) メタサーフェス板を 2 次元センサとして利用し、電磁界ベクトル分布検出手法の検討を行う。電磁界シミュレーションによりその構造を設計し、性能を評価する。それに基づき電磁界ベクトル計測メタサーフェスを試作し、ポインティングベクトル計測システムを構築する。またその際、効果的な電磁界やポインティングベクトルの可視化手法も検討する。

(2) 電磁波ノイズ源周辺におけるポインティングベクトルの振る舞いを、理論及び電磁界シミュレーションにより解析する。時間平均成分と振動成分を詳細に評価し、波源から放射された電磁界エネルギーが周辺に置かれた物質(電磁界センサ等)へどのように伝搬し結合するかを調べる。

4. 研究成果

(1) メタサーフェス構造を利用した磁界ベクトル分布検出手法の検討

入射電波の磁界成分を検出するためのメタサーフェス板として、裏面にグラウンド層を持つ誘電体基板の表面に直交 3 軸(x, y, z)方向を向いたループを配列して磁界ベクトル成分を検出する構造を電磁界シミュレーションにより検討した(図 1)。それぞれのループは抵抗(図 1 の青円筒部)で終端し、ループ面を鎖交する磁界成分により生じる電圧を裏面で計測する。2 GHz 付近の周波数帯を検出する磁界分布検出メタサーフェス板(ループサイズ 10 mm、センサ板サイズ 30 cm × 30 cm)を設計・試作し、性能を評価した。(引用文献)

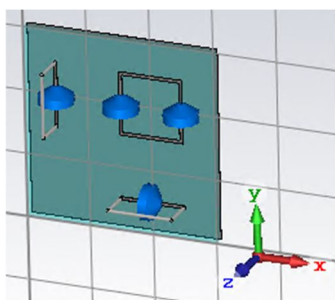
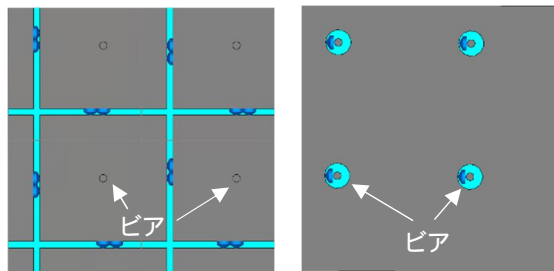


図 1: 磁界計測用メタサーフェス



(a) 表面 (b) 裏面
図 2: 電界計測用メタサーフェス

(2) メタサーフェス構造を利用した電界ベクトル分布検出手法の検討

裏面にグラウンド層を持つ誘電体基板の表面に方形金属パッチを配列した従来のメタサーフェスでは、パッチ間に縦横に挿入した抵抗に生じる電圧を計測することで、表面に平行な電界 2 成分の検出が可能であった。ここでは、パッチとグラウンド層を接続するビア(パッチ中央)の根元(グラウンド側)に抵抗を挿入することで、表面に垂直な電界成分を検出する新たな構造を電磁界シミュレーションにより検討した(図 2)。2 GHz 付近の周波数帯を検出する電界分布検出メタサーフェス板(パッチサイズ 10 mm、センサ板サイズ 30 cm × 30 cm)を設計・試作し、性能を評価した。(引用文献)

(3) メタサーフェス構造による電磁界ベクトル分布検出センサの開発

(1)の磁界ベクトル検出構造及び(2)の電界ベクトル検出構造を組み合わせ、電磁界ベクトル 6 成分を同時に検出できるメタサーフェス板の構成を考案した(図 3(a))。電界検出用パッチを十

字型に変更し、パッチ間の空いたスペースに磁界検出用ループを装荷した。図 3(b)のように、2 GHz 付近の周波数帯を検出する電磁界ベクトル分布検出センサ（パッチサイズ 31.5 mm、ループサイズ 10 mm、センサ板サイズ 30 cm × 30 cm）を設計・試作し、性能を評価した。

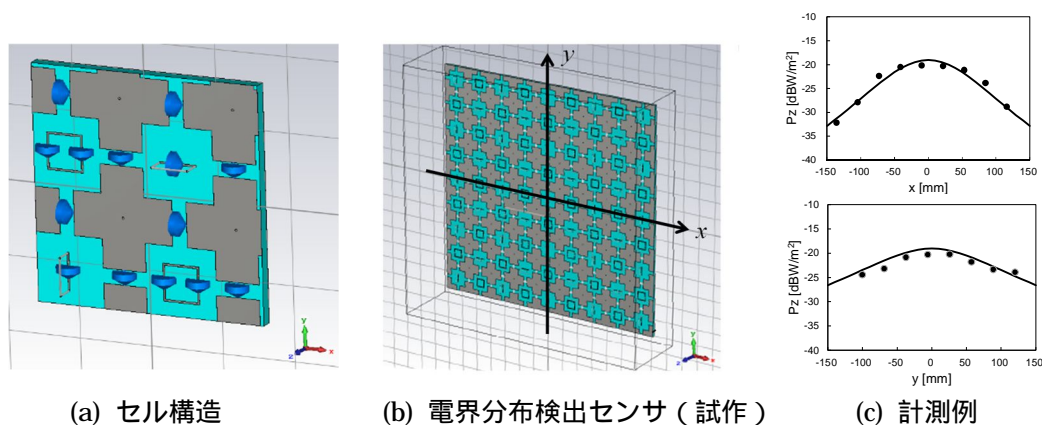


図 3：電磁界計測用メタサーフェス

(4) 電磁界ベクトル及びポインティングベクトル測定システムの構築

(3)で試作した電磁界ベクトル検出センサを用い、電界ベクトル 3 成分及び磁界ベクトル 3 成分の振幅・位相を計測する装置の検討を行った。メタサーフェス板上の各計測点において検出された電磁界信号（電圧）を選択し、2ch 入力を有するソフトウェア無線機を利用して、Ch.1 には計測信号を、Ch.2 にはメタサーフェス上の基準点で計測された位相基準信号を入力することで、数 GHz の高周波信号に対する電磁界 6 成分の振幅・位相情報を計測できるようにした。図 3(b)に示すセンサ板中心から距離 10 cm に置いた水平ダイポールアンテナから 2.4 GHz の電波を放射し、x 軸（水平）及び y 軸（垂直）上のポインティングベクトル分布を計測した例を図 3(c)に示す。計測値（印）は理論値（実線）と 2 dB 以内の誤差で一致している様子が分かる。

(5) 電磁界分布可視化手法の検討

透過型ヘッドマウントディスプレイを利用し、電磁界センサで計測された電磁界やポインティングベクトルを、センサが見えている場所に重ねて表示することで、強度やベクトル分布を直感的に可視化する手法を開発した。また、計測された電磁界分布から波源を推定し、波源から周辺に電磁波が放射される様子を 3 次元的に表示する手法を開発した。あたかも実際に計測されている電磁波がその場で見えるようになった。（引用文献）

(6) 電磁波源周辺におけるポインティングベクトルの解析

ダイポールアンテナ等の有限サイズ波源近傍におけるポインティングベクトル（電磁界エネルギーの流れ）を理論及び電磁界シミュレーションにより詳細に解析した。波源周辺の 3 次元空間におけるポインティングベクトルの時間平均（放射電力）及び電磁波の 2 倍周波数で振動する成分（リアクティブ電力）の振る舞いを調べ、3 次元分布として表示・可視化することで、波源近傍における電磁界エネルギーの流れ、並びに周辺に置かれた物質（金属等）による電磁界エネルギーの乱れを評価した。

(7) メタサーフェス板によるポインティングベクトル吸収・計測機構の解析

ダイポールアンテナ等から放射された高周波電波を周辺に置いたメタサーフェス板により計測する際、その電界成分及び磁界成分並びにポインティングベクトルがメタサーフェス構造によりどのように吸収・計測されるかのメカニズムを詳細に解析し、メタサーフェス板周辺における電磁界エネルギーの伝搬・結合の様子を明らかにした。（引用文献）

< 引用文献 >

- S. Yagitani et al., “Magnetic field distribution measurement with a metasurface structure,” Proc. URSI AP-RASC 2019, Th-BO11-4, 2019.
- 坂野 他, “メタサーフェス電波吸収体による電界ベクトル計測手法の検討,” 電子情報通信学会総合大会, B-4-32, 2020.
- S. Yagitani et al., “Development of a mixed-reality system for radio wave measurement and visualization,” Proc. EMC Sapporo & AP EMC 2019, ThuPM2Po.17, pp.743, 2019.
- S. Yagitani et al., “Analysis of power absorption on a metasurface structure,” Proc. URSI EMTS 2019, B09-7, 2019.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Satoshi Yagitani, Mitsunori Ozaki, and Tomohiko Imachi	4. 巻 -
2. 論文標題 Analysis of power absorption on a metasurface structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of 2019 URSI Commission B International Symposium on Electromagnetic Theory	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Satoshi Yagitani, Hirofumi Segawa, Takuya Tsubota, Atsuya Sakano, Mitsunori Ozaki, and Tomohiko Imachi	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of a mixed-reality system for radio wave measurement and visualization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of 2019 Joint International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility Sapporo	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Satoshi Yagitani, Takuya Tsubota, Tomohiko Imachi, Naoki Tonooka, Mitsunori Ozaki	4. 巻 -
2. 論文標題 Near-field absorption and measurement using a metasurface structure	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. 2nd URSI Atlantic Radio Science Conference	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Satoshi Yagitani, Takuya Tsubota, Hirofumi Segawa, Tomohiko Imachi, Mitsunori Ozaki	4. 巻 -
2. 論文標題 Magnetic field distribution measurement with a metasurface structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. 2019 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Satoshi Yagitani, Ryohei Kanaura, Mitsunori Ozaki, and Tomohiko Imachi	4. 巻
2. 論文標題 Numerical analysis and visualization of spherical waves absorbed by a thin metamaterial absorber	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. 2017 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications	6. 最初と最後の頁 808-809
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICEAA.2017.8065372	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Satoshi Yagitani, Naoki Tonooka, Ryohei Kanaura, Mitsunori Ozaki, Tomohiko Imachi, Yoshiyuki Yoshimura, and Hirokazu Sugiura	4. 巻
2. 論文標題 Field distribution measurement and source estimation using metamaterial absorber	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. 6th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation	6. 最初と最後の頁 1-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 Satoshi Yagitani, Mitsunori Ozaki, and Tomohiko Imachi
2. 発表標題 Analysis of power absorption on a metasurface structure
3. 学会等名 2019 URSI Commission B International Symposium on Electromagnetic Theory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Yagitani, Hirofumi Segawa, Takuya Tsubota, Atsuya Sakano, Mitsunori Ozaki, and Tomohiko Imachi
2. 発表標題 Development of a mixed-reality system for radio wave measurement and visualization
3. 学会等名 2019 Joint International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility Sapporo (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Fajri Darwis, Satoshi Yagitani, Mitsunori Ozaki, and Tomohiko Imachi
2. 発表標題 Analysis of near-field electromagnetic fields and Poynting vector scattered by metasurface absorber
3. 学会等名 2019 URSI-Japan Radio Science Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Atsuya Sakano, Takuya Tsubota, Hirofumi Segawa, Satoshi Yagitani, Mitsunori Ozaki, and Tomohiko Imachi
2. 発表標題 Development of electromagnetic wave visualization system using metasurface radio wave absorber
3. 学会等名 2019 URSI-Japan Radio Science Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂野敦哉, 瀬川浩史, 坪田卓也, 清水健介, 西真詞郎, 八木谷聡, 井町智彦, 尾崎光紀
2. 発表標題 メタサーフェス電波吸収体による電界ベクトル計測手法の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Satoshi Yagitani, Takuya Tsubota, Tomohiko Imachi, Naoki Tonooka, Mitsunori Ozaki
2. 発表標題 Near-field absorption and measurement using a metasurface structure
3. 学会等名 2nd URSI Atlantic Radio Science Conference (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takuya Tsubota, Naoki Tonooka, Hirohumi Segawa, Satoshi Yagitani, Tomohiko Imachi, Mitsunori Ozaki
2. 発表標題 Measurement of two-dimensional power and phase distributions of radio waves
3. 学会等名 40th Progress In Electromagnetic Research Symposium (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hirohumi Segawa, Takuya Tsubota, Naoki Tonooka, Atsuya Sakano, Satoshi Yagitani, Mitsunori Ozaki, Tomohiko Imachi
2. 発表標題 In-situ visualization system for radio waves using a head-mounted display
3. 学会等名 40th Progress In Electromagnetic Research Symposium (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 坪田卓也, 瀬川浩史, 八木谷聡, 井町智彦, 尾崎光紀
2. 発表標題 メタサーフェスによる磁界分布計測手法の基礎検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 瀬川浩史, 坪田卓也, 坂野敦哉, 八木谷聡, 尾崎光紀, 井町智彦
2. 発表標題 複合現実による電磁波放射・伝搬その場可視化システム
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Satoshi Yagitani
2. 発表標題 In-situ measurement and visualization of RF field distributions using metasurface structures
3. 学会等名 6th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Yagitani, Takuya Tsubota, Hirofumi Segawa, Tomohiko Imachi, Mistunori Ozaki
2. 発表標題 Magnetic field distribution measurement with a metasurface structure
3. 学会等名 2019 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naaki Tonooka, Ryohei Kanaura, Satoshi Yagitani, Tomohiko Imachi, Mitsunori Ozaki, Yoshiyuki Yoshimura, and Hirokazu Sugiura
2. 発表標題 MUSIC localization of radio-frequency sources using field distributions measured by metasurface absorber
3. 学会等名 32nd URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Satoshi Yagitani, Ryohei Kanaura, Mitsunori Ozaki, and Tomohiko Imachi
2. 発表標題 Numerical analysis and visualization of spherical waves absorbed by a thin metamaterial absorber
3. 学会等名 2017 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA 2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Satoshi Yagitani, Naoki Tonooka, Ryohei Kanaura, Mitsunori Ozaki, Tomohiko Imachi, Yoshiyuki Yoshimura, and Hirokazu Sugiura
2. 発表標題 Field distribution measurement and source estimation using metamaterial absorber
3. 学会等名 6th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP 2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 坪田卓也, 瀬川浩史, 外岡直樹, 坂野敦哉, 八木谷聡, 井町智彦, 尾崎光紀
2. 発表標題 複合現実による電磁波分布可視化システム
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 瀬川浩史, 坪田卓也, 外岡直樹, 坂野敦哉, 八木谷聡, 井町智彦, 尾崎光紀
2. 発表標題 複合現実による電磁波放射・伝搬その場可視化手法の基礎検討
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計3件

産業財産権の名称 磁界空間分布検出装置	発明者 八木谷 聡, 坪田 卓也, 瀬川 浩史	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-158302	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 波源情報提示システム、波源情報提示方法、およびプログラム	発明者 八木谷聡, 瀬川浩史, 外岡直樹, 坪田卓也, 坂野敦也	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-043574	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 電波センサ、および電界成分検出装置	発明者 八木谷 聡, 坂野 敦哉, 瀬川 浩史, 坪田 卓也	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-032711	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

・金沢大学研究者情報（八木谷聡）
<http://ridb.kanazawa-u.ac.jp/public/detail.php?id=2281>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	尾崎 光紀 (Ozaki Mitsunori) (70422649)	金沢大学・電子情報通信学系・准教授 (13301)	
研究 分 担 者	井町 智彦 (Imachi Tomohiko) (60372489)	金沢大学・総合メディア基盤センター・准教授 (13301)	