

令和 5 年 5 月 1 日現在

機関番号：10106

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04514

研究課題名（和文）ミリ波帯における自由空間法の測定精度を決める要因の解明

研究課題名（英文）Factors Determining the Measurement Accuracy of the Free-Space Method in the Millimeter Wave Bands

研究代表者

平山 浩一（Hirayama, Koichi）

北見工業大学・工学部・教授

研究者番号：30218820

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：自由空間法は、平板状試料に垂直に電波を入射させ、その反射係数や透過係数の測定から試料の誘電率や透磁率を決定する。誘電体レンズ付き円錐型ホーンアンテナの焦点に試料を置いてSパラメータを測定する自由空間法について、測定された試料での透過係数がガウス形ビームに対する試料での透過係数に等しいとすることで、推定精度が改善することを示した。また、受信アンテナを移動させずにSパラメータを測定し、試料の誘電率を推定する方法を提案した。さらに、自由空間法の装置を従来型の2分の1のサイズに縮小しても、試料の誘電率の推定精度は同程度であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ミリ波レーダは自動車の安全運転や自動運転技術でのキーデバイスであり、いかにしてミリ波レーダにおける測定精度を向上させるかが問われている。ミリ波レーダを設計する上では、ごく近傍に存在する様々な材料（バンパー、エンブレム、塗料等）の電気的特性を把握しておくことが必須であり、その測定を、例えば材料開発の技術者にも利用しやすい方法で確立することは、ミリ波レーダの開発を促進して安価に広く提供されることにつながり、自動車の安全性向上に資するものである。本研究では、ミリ波帯での測定に適した自由空間法について材料定数測定の推定精度を向上させることに成功している。

研究成果の概要（英文）：The free-space method determines the permittivity and permeability of a sample by measuring the reflection and transmission coefficients of a radio wave perpendicularly incident on a flat-plate sample. We demonstrated that for the free-space method, in which the S-parameters are measured by placing the sample at the focus of a conical horn antenna with a dielectric lens, the estimation accuracy is improved by assuming that the measured transmission coefficient at the sample is equal to the transmission coefficient at the sample for a Gaussian-shaped beam. We also proposed a method for estimating the permittivity of a sample by measuring the S-parameters without displacing the receiving antenna. Furthermore, we showed that the estimation accuracy of the permittivity of a sample is comparable even when the size of the apparatus for the free-space method is reduced to one-half the size of the conventional method.

研究分野：電磁波工学

キーワード：自由空間法 電磁ホーンアンテナ 誘電体レンズ ガウス形ビーム

1. 研究開始当初の背景

平成30年交通安全白書(内閣府)によると、75歳以上の運転者の死亡事故件数は、75歳未満の運転者と比較して、免許人口10万人当たりの件数が2倍以上多く発生している。我が国の高齢化が進む中で、特に地方で買い物や通院のために高齢であっても自動車を手放せない状況がある中では、自動車の安全運転や自動運転の技術開発を加速させることは極めて重要な問題である。自動運転自動車は最近になって頓に注目されており、日本では2020年の東京オリンピックまでにレベル3(高速道路などではほぼ自動化、緊急時は運転者)について実用化することを目標としている。その技術開発の中で、ミリ波レーダは既に高級車を中心に一部の自動車に搭載され、衝突防止等に貢献している。ミリ波レーダでは、自動車のような金属の認識では測定可能距離が長くて優れているものの、歩行者のように金属ではないものの認識が難しかった。それがごく最近になって、電波の変調方式を変更することで解決する技術が開発されてきている。これにより、ミリ波レーダだけで衝突防止システムを構成することができて安価となり、普及が進むことが期待されているため、いかにしてミリ波レーダにおける測定精度を向上させるかが問われている。これは非常に基礎的な研究であり、大学等での学術的な研究機関で取り組むべき課題である。

自動車に搭載するミリ波レーダには、電波法の規定によりミリ波帯の60GHz帯、76GHz帯、79GHz帯が使用される。一方で自動車は商品であるため、当然のことながら見栄えも重要な要素であるから、ミリ波レーダはバンパーやエンブレム等に隠されて搭載される。さらに塗料等も含めて、ミリ波レーダを設計する上では、ごく近傍に存在するこれら様々な材料の電気的特性を把握しておくことが必須であり、その測定を、例えば材料開発の技術者にも利用しやすい方法で確立することは、ミリ波レーダの開発を促進して安価に広く提供されることにつながり、自動車の安全性向上に資するものである。

2. 研究の目的

本研究では、自由空間法に利点が多い一方で、他の測定法では測定が難しくなるミリ波帯、特に自動車用ミリ波レーダの動作周波数帯である60~90GHzに絞って、自由空間法の実際の測定系における電波の伝搬について理論的に詳細に検討し、自由空間法による材料定数測定の見積精度を決める要因を解明することで、見積精度の向上を図ることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 自由空間法における試料の誘電率推定精度の向上

本研究では、図1に示すように、電波の送受信に誘電体レンズ付き円錐型ホーンアンテナを用いる自由空間法を対象とする。この自由空間法に対する先行研究では、測定された試料での反射・透過係数を、平面波に対する試料での反射・透過係数に等しいとして試料の誘電率や透磁率を推定している。しかしながら、この推定法では、試料が空気(比誘電率1)である場合に対してもおよそ2%程度比誘電率が小さく推定されるため、自由空間法はやや推定精度の低い測定法になる。ところで、誘電体レンズ付き円錐型ホーンアンテナを用いて電波を出射するので、シート状試料にはガウス形ビームの電波が照射される。本研究では、測定された試料での透過係数を、ガウス形ビームに対する試料での透過係数に等しいとして試料の誘電率を推定する方法を検討する。

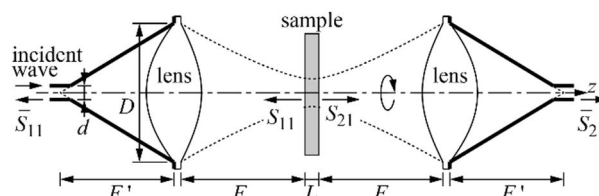


図1 本研究で対象とする自由空間法の測定系

(2) 自由空間法におけるアンテナを移動しない試料の誘電率推定法

自由空間法において、試料を挿入してSパラメータを測定する場合、従来では試料の厚さ分だけ受信側のホーンアンテナを後方に移動させる必要があるが、試料ごとに正確に移動させることは難しく、ずれが生じていれば試料の誘電率推定に対する誤差の要因となり、推定精度を劣化させることになる。そこで本研究では、受信側のホーンアンテナを移動させずにSパラメータを測定しても、試料の誘電率を正しく推定できる方法を検討する。

(3) 自由空間法における測定装置の小型化

自由空間法の測定装置は比較的大型である。装置を小型化することができれば、価格や使い勝手の面で利用者に有益である。そこで本研究では、図1において、ホーンアンテナの長さ $F' = 200\text{ mm}$ 、誘電体レンズの直径(=ホーンアンテナの開口径) $D = 150\text{ mm}$ 、誘電体レンズの焦点距離 $F = 280\text{ mm}$ の基準サイズに対して、すべて2分の1、4分の1のサイズに縮小したそれぞれの装置について、試料の誘電率の推定精度を検討する。

4. 研究成果

(1) 自由空間法における試料の誘電率推定精度の向上

電波の送受信に誘電体レンズ付き円錐型ホーンアンテナを用いる自由空間法において、測定された試料での透過係数を、ガウス形ビームに対する試料での透過係数に等しいとして試料の誘電率を推定する。ガウス形ビームに対する試料での透過係数は、文献[1]の結果を利用して求めることができたが、複雑な式となった。このガウス形ビームに対する試料での透過係数を平面波に対する試料での透過係数と比較したところ、位相シフト項を掛けるだけで近似的に一致していることを見出した。そこで、ガウス形ビームに対する試料での透過係数として、この近似式を用いて試料の誘電率推定を行う。

厚さ2 mmで比誘電率2.05 (テフロン相当)の試料を想定し、比誘電率及び誘電正接の推定結果を図2に示す。実線は平面波に対する透過係数により推定した結果、破線はガウス形ビームに対する透過係数により推定した結果を表す。平面波に対する透過係数により推定した場合には、比誘電率に1%程度の推定誤差が生じているが、ガウス形ビームに対する透過係数により推定した場合には、比誘電率の推定誤差は $\pm 0.2\%$ 以内であり、推定精度が向上していることがわかる。

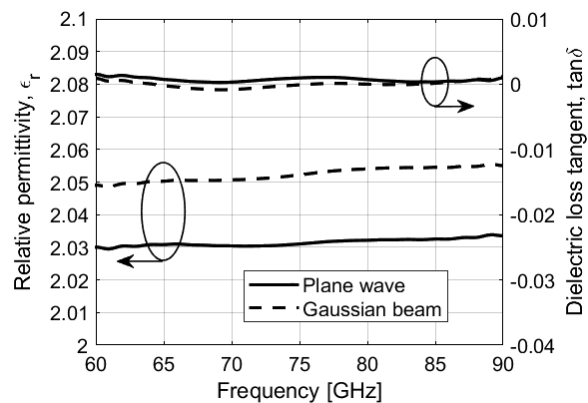


図2 比誘電率2.05の試料に対する比誘電率推定 (基準サイズの測定装置)

(2) 自由空間法におけるアンテナを移動しない試料の誘電率推定法

自由空間法において、試料を挿入してSパラメータを測定する際に、試料の厚さ分だけ受信側のホーンアンテナを後方に移動させる場合と移動させない場合で、それぞれのSパラメータを導出して比較したところ、簡単な変換式を用いることで、ネットワークアナライザで測定されたSパラメータを、受信側のホーンアンテナを後方に移動させない場合のSパラメータとして得られることを見出した。そこで、受信側のホーンアンテナを後方に移動させない場合で、試料の誘電率推定を行う。

厚さ2.1 mmの亚克力板に対して、受信側ホーンアンテナを後方に正しく2.1 mm移動させた場合、及び2.0 mmあるいは2.2 mm移動させた場合に、平面波あるいはガウス形ビームに対する透過係数により試料の比誘電率を推定した結果を図3に示す。 ± 0.1 mmでも移動に誤差があると、比誘電率の推定値に大きな差を与えることが示されており、ホーンアンテナを移動させない誘電率推定法は優れていることがわかる。

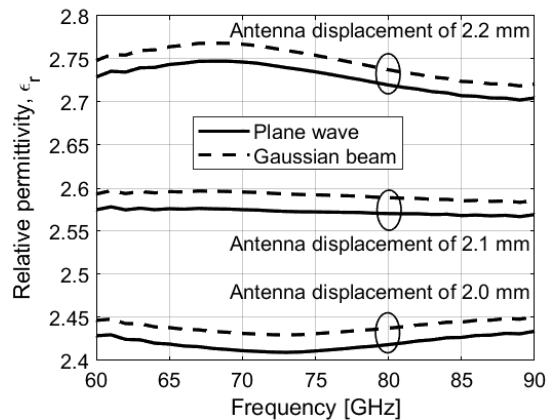


図3 厚さ2.1 mmの亚克力板に対する比誘電率推定

(3) 自由空間法における測定装置の小型化

自由空間法の装置の基準サイズに対して、すべて2分の1、4分の1のサイズに縮小したそれぞれの装置を用いた場合で、試料の誘電率推定を行う。

厚さ2 mmで比誘電率2.05 (テフロン相当)の試料を想定し、平面波あるいはガウス形ビームに対する透過係数により試料の比誘電率及び誘電正接を推定した結果を図4、図5に示す。図4に示されるように、2分の1のサイズでは、図2で示された推定結果と同程度の推定精度であり、2分の1サイズでも測定装置として十分有効であることがわかる。一方、図5に示されるように、4分の1のサイズでは、推定された誘電率が周

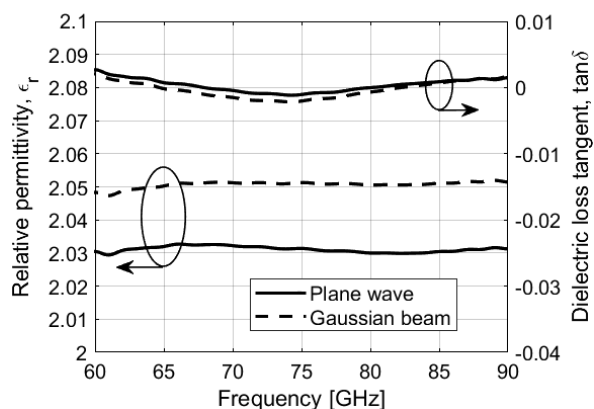


図4 比誘電率2.05の試料に対する比誘電率推定 (2分の1サイズの測定装置)

波数に対して細かに変動して推定されていることがわかる。4分の1のサイズでは試料とレンズの距離が近く、時間領域ゲーティングで試料とレンズの間での多重反射を取り除くことができていない恐れがある。そこで、時間領域ゲーティングの時間幅を1 nsから0.5 nsに変更すると、周波数に対する誘電率の細かな変動をほぼ取り除くことができることを確認している。

<引用文献>

[1] T. Ooya, M. Tateiba, and O. Fukumitsu, "Transmission and reflection of a gaussian beam at normal incidence on a dielectric slab," *Jour. Opt. Soc. Amer.*, vol. 65, no. 5, pp. 537-541, May 1975.

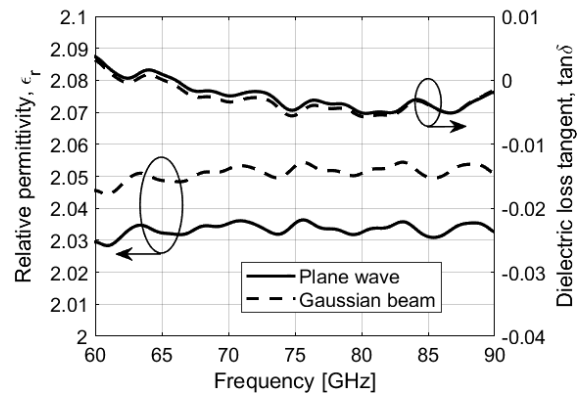


図5 比誘電率2.05の試料に対する比誘電率推定(4分の1サイズの測定装置)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 HIRAYAMA Koichi, YANAGIMOTO Yoshiyuki, SUGISAKA Jun-ichiro, YASUI Takashi	4. 巻 E106-C
2. 論文標題 Permittivity Estimation Based on Transmission Coefficient for Gaussian Beam in Free-Space Method	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	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） 10.1587/transele.2022ECP5030	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 K. Hirayama, Y. Yanagimoto, J. Sugisaka, T. Yasui	4. 巻 71
2. 論文標題 Permittivity Measurement Method for Thin Sheets Using Split-Cylinder Resonator with Protrusions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT	6. 最初と最後の頁 8002209
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TIM.2022.3157398	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7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 今井裕貴、平山浩一、杉坂純一郎、安井崇
2. 発表標題 アンテナを移動しない自由空間法による誘電率推定に関する検討
3. 学会等名 電子情報通信学会電磁界理論研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平山浩一、柳本吉之、杉坂純一郎、安井崇
2. 発表標題 Eバンドにおける自由空間法の小型化に関する検討
3. 学会等名 電子情報通信学会電磁界理論研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 秋生田恭雅、平山浩一、柳本吉之、杉坂純一郎、安井崇
2. 発表標題 突起を有する空洞共振器における試料の誘電率測定の検討
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 2021年

1. 発表者名 今井裕貴、平山浩一、杉坂純一郎、安井崇
2. 発表標題 自由空間法によるミリ波帯での誘電率推定の精度向上に関する検討
3. 学会等名 令和3年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平山浩一、柳本吉之、杉坂純一郎、安井崇
2. 発表標題 自由空間法における誘電率推定精度の改善に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会電磁界理論研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秋生田恭雅、平山浩一、柳本吉之、杉坂純一郎、安井崇
2. 発表標題 分離型矩形空洞共振器を用いた異方性材料の複素誘電率測定
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 2020年

1. 発表者名 秋生田恭雅、平山浩一、柳本吉之、杉坂純一郎、安井崇
2. 発表標題 温湿度依存性測定のためのスプリットシリンダーを用いた複素誘電率の推定
3. 学会等名 電子情報通信学会電磁界理論研究会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------