

令和元年6月13日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18423

研究課題名（和文）誘電体導波線路一体型誘電体アンテナの研究

研究課題名（英文）Research on dielectric antenna integrated with dielectric waveguide

研究代表者

加藤 悠人 (Yuto, Kato)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究員

研究者番号：70635820

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：同軸線路の伝送損失が顕著になるミリ波・サブミリ波帯では、それに代わるフレキシブルな伝送線路として誘電体導波路が注目されている。誘電体導波路は同軸線路よりも伝送損失が低く、金属導波路とは異なりフレキシブルである一方で、金属線路との接合部におけるミスマッチの問題から産業応用が進んでいなかった。本研究では、誘電体導波路の産業応用の拡大を目指し、誘電体導波路と誘電体アンテナを一体化したこれまででない構成の考案・実証と、誘電体導波路の性能実証のために必要となる高精度な計測技術の確立を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

誘電体導波路を既存の金属線路と組み合わせて実装する際の障害として、金属線路との接合部におけるミスマッチによる反射があった。本研究では、誘電体線路と誘電体アンテナを一体化することでミスマッチを回避した新たな構造を提案した。また、ミスマッチの影響を除去することで、誘電体線路の高精度な伝搬測定を実現する計測手法を提案・実証した。これらの研究成果により、誘電体線路の応用可能性が広がり、5G無線通信や特にその基地局システムにおける産業利用が拡大することが期待される。

研究成果の概要（英文）：Dielectric waveguides have higher flexibilities than metallic waveguides and lower insertion losses than metallic coaxial lines; thus, they are expected to be used for various applications, especially at millimeter-wave frequencies. In order to demonstrate the high potential of the dielectric waveguides and expand their use in the industry, it is essential to establish a measurement method of the propagation characteristics of the dielectric waveguides with high accuracy. To improve the measurement accuracy of the propagation characteristics of dielectric waveguides, we proposed to apply the TRL calibration method with three devices made of the same dielectric waveguides as that to be characterized. By measuring a low-loss dielectric waveguide with the transmission loss of less than 1.0 dB/m designed for the 28 GHz-band, we experimentally demonstrated the practical usefulness of the proposed measurement technique.

研究分野：マイクロ波・ミリ波帯材料計測

キーワード：誘電体導波路 誘電体アンテナ Sパラメータ計測 不確かさ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

同軸線路の伝送損失が顕著になるミリ波・サブミリ波帯では、それに代わるフレキシブルな伝送線路として誘電体導波路が注目されている。誘電体導波路は同軸線路よりも伝送損失が低く、金属導波路とは異なりフレキシブルである一方で、金属線路との接合部におけるミスマッチの問題から産業応用が進んでいなかった。また、このミスマッチのために、誘電体導波路の高精度な伝送計測も実現されておらず、その優れた低損失伝送特性が十分には実証できていなかった。

### 2. 研究の目的

本研究では、誘電体導波路の産業応用の拡大を目指し、誘電体導波路と誘電体アンテナを一体化したこれまでにない構成の考案・実証と、誘電体導波路の性能実証のために必要となる高精度な計測技術の確立を目的とした。

この目標に向けて、本科研費事業の中では、28 GHz 帯で 1.5 dB/m 以下の伝送損失での信号伝送を可能とする誘電体導波路の構造設計・試作を行うとともに、誘電体導波路の信号損失を高精度に計測できる計測技術を開発した。信号の低損失化技術は、誘電体導波路や誘電体アンテナを無線通信応用へ実装する上で不可欠であるため、提案する一体型誘電体線路の実用化可能性を探る上で初めに検討すべき項目である。

### 3. 研究の方法

#### (1) 28 GHz 帯でシングルモードの信号伝送を行う誘電体導波路の構造設計・試作

誘電体導波路は、28 GHz 帯でシングルモード伝搬をし、電磁界のエネルギーが誘電体線路に十分に閉じ込められており、金属円形導波路と誘電体線路との変換部の反射損失が抑制された構造となるように設計した。

#### (2) 誘電体導波路の高精度伝送計測技術の開発

誘電体導波路構造の伝搬計測の高精度化のために、本研究では、被評価線路と同材料、同構造からなるTRL校正キットを開発し、金属線路の精密計測技術として確立しているTRL校正法を誘電体導波路線路の計測に拡張した。

### 4. 研究成果

#### (1) 28 GHz 帯でシングルモードの信号伝送を行う誘電体導波路の構造設計・試作

誘電体線路を含む高周波の伝送線路は、線路内を進行する電磁界の伝搬モードが単一のシングルモード線路と、伝搬モードが複数あるマルチモード線路に分類される。このうち、マルチモード線路では信号歪みが発生し、(2)で詳細を述べる伝搬計測の校正理論を構築することが困難になるため、シングルモード伝搬の誘電体線路を設計した。

PTFE (比誘電率 2.1, 誘電正接  $2 \times 10^{-4}$ ) を用いた円筒導波路構造に対し、線路径  $a=3.5$  mm を設計した。線路径  $a=3.5$  mm のときに解析的に計算される線路の分散関係を図 1 に示す。31.3 GHz 以下の帯域においては、円筒誘電体導波路の基底モードである HE<sub>11</sub> モードのみが伝搬するシングルモード伝搬となる。線路径が 3.5 mm より小さいときにも 28 GHz においてシングルモード伝搬となるが、径が小さいと、伝搬する電磁界の誘電体線路への閉じ込めが弱くなり、周囲への漏洩が顕著になる。誘電体線路同士のアイソレーションを向上するためには、電磁界のエネルギーが誘電体線路に十分に集中していることが必要となる。図 2 に 28 GHz における線路径  $a=3.5$  mm のときの誘電体線路の動径方向の電磁界分布を示す。この図より、設計した線路構造では、電磁界の誘電体線路への閉じ込めが十分に強くなっていることが確認できる。

誘電体導波路を既存の金属線路と組み合わせて実装することを考えると、異種線路の接続構

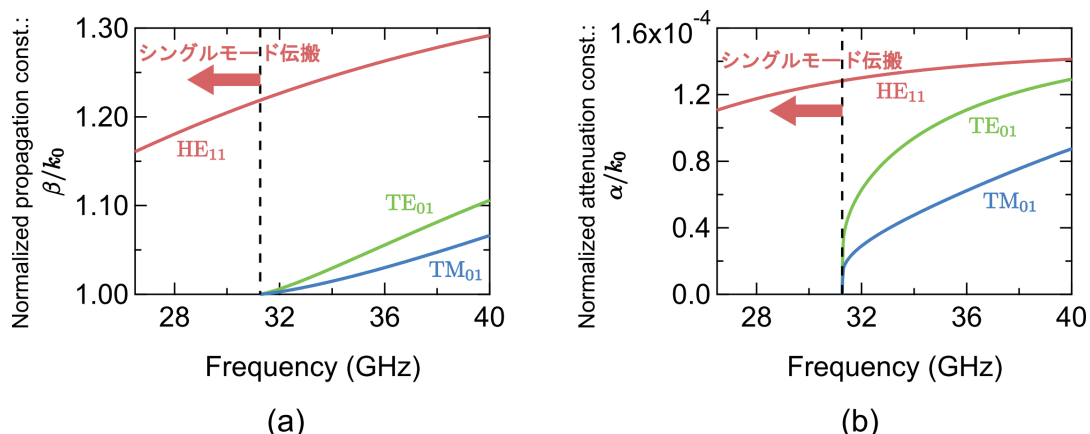


図 1. 解析的に計算された円筒誘電体導波路 (PTFE, 線路径  $a=3.5$  mm) の分散関係。

(a) 位相定数、(b) 減衰定数。

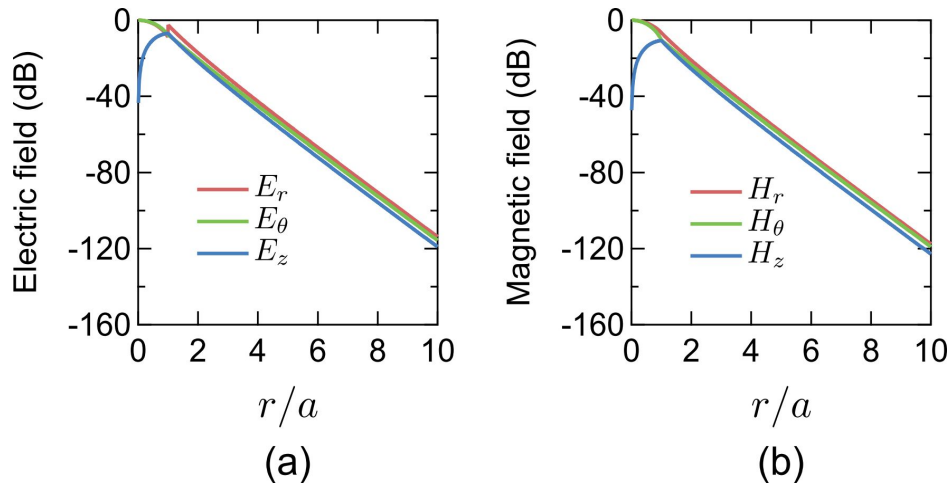


図 2. 28 GHz における円筒誘電体導波路 (PTFE, 線路径  $a=3.5$  mm) の動径方向の電磁界強度分布。(a) 電界強度分布、(b) 磁界強度分布。

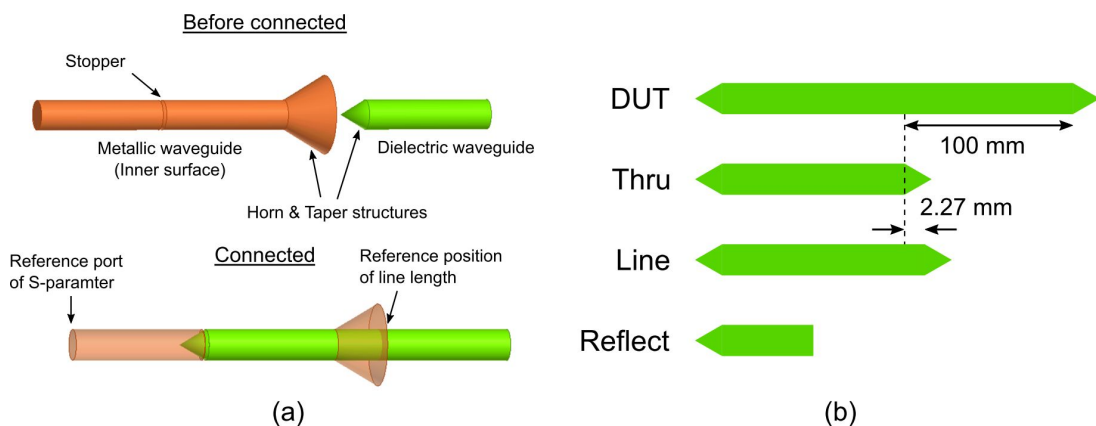


図 3. 開発した誘電体導波路の模式図。(a) 金属線路との接続構造、(b) 校正用デバイスと被評価用線路。

造を開発する必要がある。一般に異種の伝送線路ではモードやインピーダンスが異なるため、変換部の構造を最適化しないと接続箇所での反射が大きくなる。本研究では、テーパ構造を用いた円筒誘電体導波路と円筒金属導波路の接続構造を開発した (図 3(a))。

## (2) 誘電体導波路の高精度伝送計測技術の開発

高周波伝搬計測装置 (ベクトルネットワークアナライザ) の入出力部は金属の同軸・導波管線路であるため、誘電体導波路を計測するためには入出力ポートにおける変換が必要である。この変換は図 3(a) のような接続構造を用いたとしても有限の不整合反射損失を伴うため、その影響を除去することが精密計測の実現には必要である。そこで、金属線路に対する伝搬計測の校正手法として知られていた、Thru-Reflect-Line (TRL) 校正を誘電体導波路の計測に拡張することで、反射の影響を除去した計測技術の開発を行った。

誘電体導波路の計測に対する TRL 校正を確立するために、同一の誘電体導波路を用いて、以下の 3 種類の校正用デバイスを設計した (図 3(b))。

- Thru デバイス (2 port, 線路長: 60 mm)
- Reflect デバイス (1 port, 線路長: 30 mm (Thru の半分), 先端が金属でショートされる)
- 1/4 波長 Line デバイス (2 port, 線路長: 62.27 mm (Thru より誘電体導波路の管内波長の 1/4 だけ長い))

Thru, Reflect, Line の各デバイスに対して、誘電体導波路の伝搬特性や変換部の反射特性が同一であると仮定すると、これら 3 種類のデバイスに対する反射・透過特性 (S パラメータ) の計測結果を用いて、Thru の中央を校正面とする TRL 校正を実現できる。校正後に被測定物である誘電体線路 (DUT) を計測すると、変換部の反射の影響や金属線路の伝搬損失の影響等を解析的に除去可能であり、誘電体導波路の伝搬計測の高精度化が実現する。DUT には Thru よりも 100 mm 長い誘電体導波路を用いた (図 3(b))。TRL 校正により、差分の 100 mm に対する伝送損失が高精度に計測される。

設計した校正用デバイスと DUT を試作し、提案する計測手法の有用性を評価した。デバイスや実験システムの写真を図 4 に示し、DUT の TRL 校正前後に対する反射・透過特性の測定結果

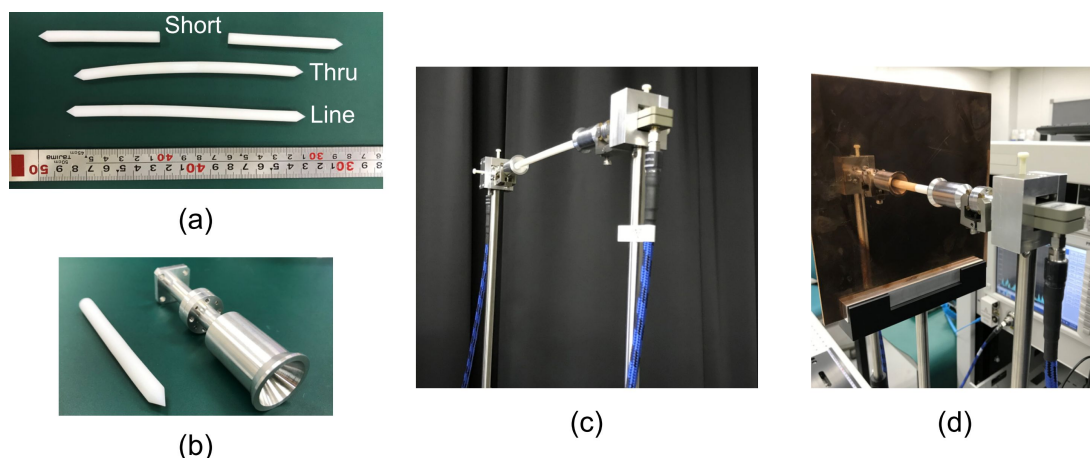


図 4. 誘電体導波路の実験の様子。(a) 校正用デバイス、(b) 誘電体導波路と接続構造、(c) Thru デバイスの測定、(d) Reflect デバイスの測定。

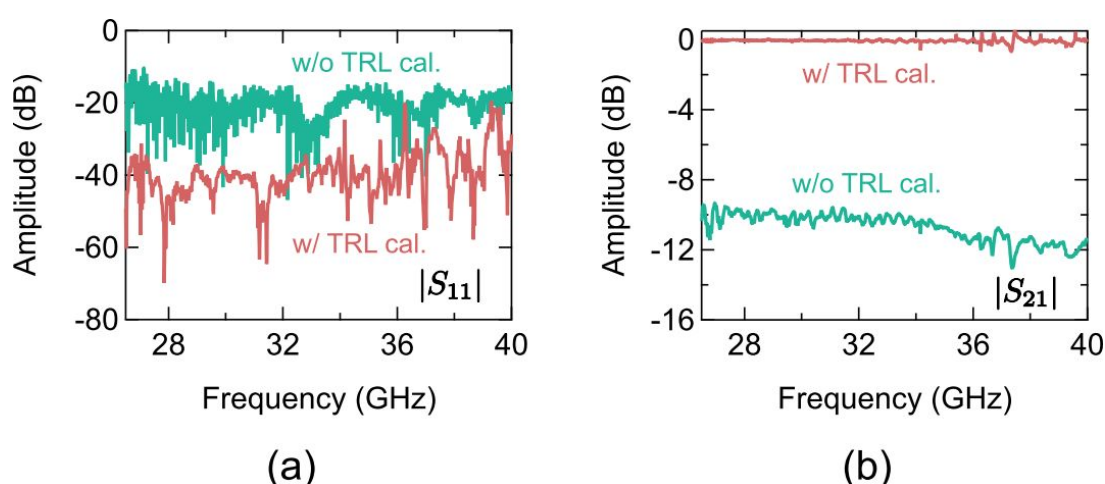


図 5. DUT の TRL 校正前後の反射・透過特性。(a) 反射特性、(b) 透過特性。

を図 5 に示す。図 5 より、誘電体導波路の反射は校正後の結果では抑えられ、特にシングルモード伝搬となる 31.3 GHz 以下では -30 dB 以下となった。校正後の透過特性においては、校正前にあらわれたリップルが抑制されたフラットな周波数特性を示しており、また変換部の反射損失等の影響が除去された結果として、非常に小さい伝搬損失を示している。TRL 校正を用いた測定結果より、28GHz 帯における伝送損失が 1.0 dB/m 以下であることが実証されるとともに、このような低損失誘電体導波線路を評価するためには、提案手法の利用が必須となることが明らかになった。また、提案手法の実用的な有用性を検証するために、提案手法における代表的な誤差要因として、校正キットの寸法ばらつきと S パラメータ測定の測定再現性の影響に着目し、それぞれを定量的に評価した。その結果として、これらの要因が誘電体導波路の伝搬特性の位相と振幅の測定の不確かさにそれぞれ大きく影響することを確認した。電磁界シミュレーションと実験から、これらの要因によって評価された誘電体導波路の伝搬特性計測の不確かさは、28 GHz 帯の PTFE 製の円筒誘電体導波路(100 mm 長)に対して、それぞれ 0.20 ラジアンと 0.5 dB 未満であることが確認された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Y. Kato and M. Horibe, "Improvement of Broadband Characterization of Dielectric Waveguide at the Ka-Band by Using TRL Calibration Method," 査読有, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 68, no. 6, pp. 1788-1795, June 2019.  
doi: 10.1109/TIM.2018.2882257

〔学会発表〕(計 1 件)

Y. Kato and M. Horibe, "Validity Evaluation of Application of TRL Calibration Method to Dielectric Waveguide Measurement by Electromagnetic Simulation," 2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018), Paris, 2018.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1)研究分担者

なし。

(2)研究協力者

なし。

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。