

令和 6 年 6 月 15 日現在

機関番号：17701

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14608

研究課題名（和文）波長よりも大きな物体を隠せる透明マントの設計理論の確立および実現

研究課題名（英文）Establishment of the design theory of invisibile cloaks for hiding larger objects than the wavelength and the realization

研究代表者

永山 務（Nagayama, Tsutomu）

鹿児島大学・理工学域工学系・助教

研究者番号：80781997

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、波長よりも大きな物体を隠すことができる透明マントのためのメタマテリアル設計理論を確立した。設計には1次元ミアンダ伝送線路モデルを用い、線路長を決定する理論式を導出した。提案した理論に基づき、1次元ミアンダマイクロストリップ線路構造を用いて透過型透明マントおよび反射型透明マント（カーペットクローク）を設計した。それらの動作および理論の妥当性を全波シミュレーションによる計算結果から確認した。また、カーペットクロークについては誘電体基板上に実装し、近傍電界測定を行なった動作を調べた。その結果、理論通り波長よりも大きな物体を隠すことができることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果により、波長よりも大きな物体を隠すことができ、かつ非常に広帯域な特性を持つ透明マントを、回路モデルを用いて理論的に設計することが可能になった。本研究では、電磁透明マントの設計・試作・実証実験を行なったが、将来的に理論を拡張して光の領域まで動作帯域を引き上げることができれば、全ての光に対して動作可能な透明マントの実現に繋がる可能性がある。また、研究代表者の従来からの研究から、回路モデルを用いた設計法は光・電磁波に限らず、音波など異分野の波に対しても適用可能であることが分かっており、例えば音波に対して波長よりも大きな物体を隠せる音響透明マントへの展開も期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this research, the metamaterial design theory for invisible cloaks hiding a larger object than the wavelength has been established. A one-dimensional meander transmission-line model has been used for the design, and the theoretical formula for determining the line length has been derived. Based on the proposed theory, a transmission-type invisible cloak and a reflection one (carpet cloak) have been designed by using a one-dimensional meander microstrip-line structure, and it has been demonstrated by calculating complex electric field distributions with full-wave simulations that those can hide a much larger object than the wavelength. Also, the designed carpet cloak has been implemented on a dielectric substrate and the operation has been verified by near-field measurements with a network analyzer and an electric probe. The measurement results have shown that the fabricated carpet cloak can hide a much larger object than the wavelength.

研究分野：マイクロ波工学、電磁メタマテリアル

キーワード：透明マント カーペットクローク 電磁メタマテリアル 回路モデル

1. 研究開始当初の背景

申請者は、覆った物体を見えなくする透明マントの実現に必要なメタマテリアルの設計理論が提案し、数値計算に頼らずに低損失特性と広帯域特性を兼ね揃えた透明マントを実現できることを実験的に実証している(文献)。しかし、設計式から得られるメタマテリアルの構造パラメータの実現性の問題により、波長に比べて非常に小さな物体しか隠すことができないという欠点があり、日常的に使用されるマイクロ波・ミリ波向け通信機器への適用が不可能であった。また、仮に同理論を拡張して光まで動作帯域を引き上げることができた場合に、殆ど目視できない大きさの物体しか隠せないという課題が出る。

2. 研究の目的

従来の方法に変わる透明マントのためのメタマテリアル設計理論を確立し、波長よりも大きな物体を隠せる透明マントを実現することを目的とする。具体的には、1次元ミアング分布定数線路モデルを用い、線路の折り曲げにより透明マントの入出力面間の経路が同じになるように、理論的に線路長を決めて設計する新しいメタマテリアル設計理論を確立する。最終的には、理論の妥当性を示すために、理論に基づいて透明マントを設計し、有限要素法に基づく数値解析および実証実験により動作確認を行う。

3. 研究の方法

- (1)反射型透明マントであるカーペットクロークおよび透過型透明マントを1次元分布定数線路モデルを用いて構成する方法を考え、モデルの線路長を決められる理論式を導出する。
- (2)各透明マントの仕様を決め、導出した理論式から線路長を算出する。
- (3)1次元ミアング線路構造を用いて各透明マントを構成する。
- (4)有限要素法に基づく電磁界シミュレーションを行い、動作検証をする。
- (5)ネットワークアナライザおよび電界プローブを用いて近傍電界測定を行い、動作を実証する。

4. 研究成果

A. 反射型透明マント(カーペットクローク)

(1)1次元ミアング分布定数線路モデルを用いてカーペットクロークを構成し、平らな導体面に対して平面波を垂直入射した時と同じ反射位相を得るためのモデルの線路長の理論式を検討し、導出した。その結果、以下の式を得ることができた(詳細は文献を参照)。

$$l = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{\text{eff}b}}{\varepsilon_{\text{eff}}}} \frac{h}{\frac{A|x|}{p\Delta d} + \frac{h-A}{\Delta d}} \quad (1)$$

p は隠す物体(形状は三角形を想定)の底辺の半分の大きさ、 A は物体の高さ、 h はカーペットクロークの高さを表し、線路長と単位セルの大きさの関係は、 $l > d = l_b$ としている。また、 $\varepsilon_{\text{eff}b}$ および ε_{eff} はそれぞれ背景媒質に用いる2次元分布定数線路モデルおよびカーペットクロークを構成する1次元ミアング分布定数線路モデルの実効比誘電率を表す。 x は物体の底辺に座標系を定義してその中央を原点とした時の幅方向の位置を意味し、式中の $\sqrt{2}$ は2次元の効果を意味している(文献)。なお、式(1)には周波数の関数が含まれていないため、本節の理論に基づけば、非常に広帯域な動作をし、かつ波長よりも大きな物体を隠せるカーペットクロークを設計することができる。

(2)式(1)に基づき、誘電体基板上に1次元ミアングマイクロストリップ線路構造を用いてカーペットクロークを構成した。実現性や実証実験のし易さを考慮して、 p 、 A 、 h 、および d はそれぞれ70 mm、70 mm、100mm、10 mmとし、基板は日本ピラー工業株式会社のNPC-F220Aを想定して、厚み、比誘電率、および誘電正接をそれぞれ0.254 mm、2.2、および0.0007に設定した。このカーペットクロークの動作を検証するため、有限要素法に基づく電磁界シミュレーションを行った。今回の解析では、できるだけ計算領域を大きくするため、カーペットクロークを横に3つ並べ、それらの上に450 × 300 mm²の大きさの背景媒質の領域(=2次元の直線のマイクロストリップ線路構造を45 × 30セル並べて構成)を設けている。

図1は、基板表面上の複素電界 E_z の振幅分布と位相分布の計算結果で、比較のため三角形の物体の場合(=カーペットクロークなしの場合)と平らな導体面の場合(=物体なしの場合)の結果も載せている。周波数は3.477 GHzで、物体の大きさ(=図1において導体パターンがない三角形の領域の1個分の大きさ)に対する波長の大きさの関係は面積比で0.422倍となっており、波長に比べて遥かに物体の方が大きい設定にしている。カーペットクロークの場合と平らな導体面の場合を見ると振幅も位相も同じような分布が得られていて、波源(入力ポート)の方向に波が反射して定在波を形成している様子が分かる。一方、三角形の物体の場合は、散乱波が発生

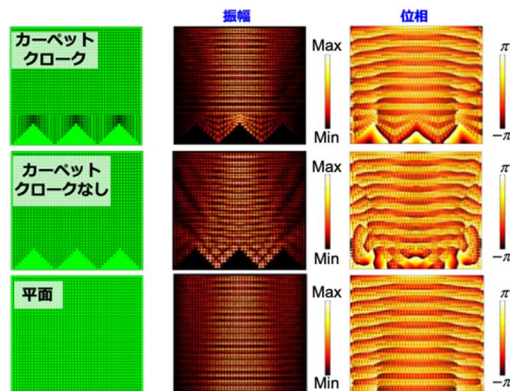


図 1 4.109 GHz における基板表面上の複素電界 E_z の計算結果. 物体 1 個分(導体パターンのない三角形の領域 1 個分)の大きさに対する波長の大きさの関係は面積比で 0.422 倍となっている.

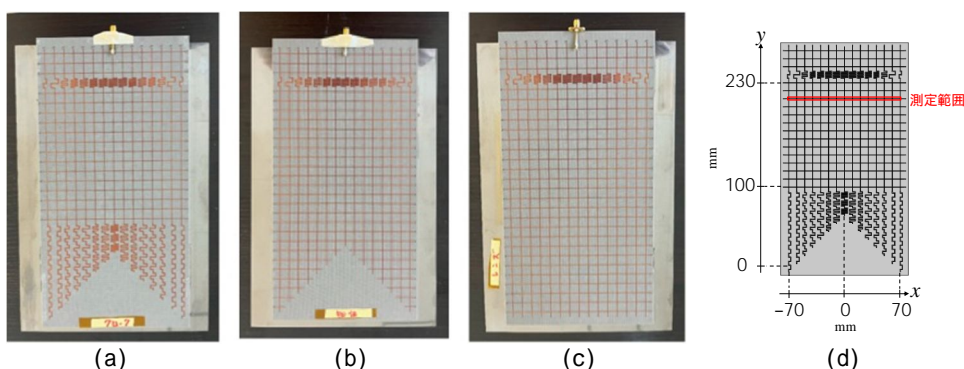


図 2 試作したカーペットクロックと比較用の試作物および測定範囲. (a) カーペットクロックの場合. (b) 三角形の物体の場合(カーペットクロックなしの場合). (c) 平らな導体面の場合(物体なしの場合). (d) 測定範囲. 平面波を入射するために上側にメタサーフェスレンズを構成(文献)に基づき構成)しており, レンズの焦点の位置に同軸コネクタを接続している.

し波面が乱れている. これらの結果から, 構成したカーペットクロックが動作し, 波長よりも遥かに大きな物体を隠すことができていることが分かった. なお, 少なくとも, 物体の大きさに対する波長の大きさの関係が面積比で 0.302 倍となる周波数(4.109 GHz)よりも低い全ての周波数で動作することを確認しており, (1)および(2)に示した内容も含め本節の成果は国際会議で発表し, 査読付き論文(文献)にまとめている.

(3)設計したカーペットクロックを試作して近傍電界測定を行い, 電界分布を比較することでカーペットクロックの動作を実験的に確認した. 図 2(a)-(c)はそれぞれカーペットクロックの場合, 三角形のぶったうの場合(=カーペットクロックなしの場合), および平らな導体面の場合(=物体なしの場合)の試作物(関西電子工業株式会社に依頼, リソグラフィにより作成)に対応している. 写真の上側から下側に向かって平面波を入射するために, 各試作物の上から 4 セル目に 1 次元ミアンダマイクロストリップ線路構造で構成したメタサーフェスレンズを配置し(文献にて成果を報告, これに基づき設計), レンズの焦点の位置に同軸コネクタ(=入力ポートとして利用)を半田付けして, これに同軸ケーブルを接続した. 三角形の領域を含む下側の境界のノードの先にはスルーホールビアを設けて裏面の接地導体(ベタパターン)と接続し, 短絡境界としている. これらと上側の同軸コネクタが半田付けされた箇所以外のノードについては, 各ノードから 1cm 程度離れた位置にランドとスルーホールビアを設け, ランドとノードとの間に整合用の 50 のチップ抵抗を半田付けして, 境界で反射波が発生しないようにしている. また, 図 2(d)は今回の実験における測定範囲を表しており, 測定範囲内において基板表面のパターンからおよそ 0.5 mm 上に電界プローブが位置するように吊るして近傍電界を測定した(=具体的には電界プローブと同軸ケーブルで接続されたネットワークアナライザが表示する S_{21} の振幅と位相を記録した). このとき, 試作物は z 軸ステージ(中央精機 LV-147-1)の上に水平になるように配置し, それを xy ステージ(シグマ光機株式会社 OSMS33-500(XY)-M6)に載せて, 測定範囲の上側を 0.25 mm 間隔で動かして測定を行った.

図 3(a)-(c)に周波数が 3 GHz の時の近傍電界の振幅と位相分布の測定結果(オレンジの点)と電磁界シミュレーションによる計算結果(青の点)を示している. 振幅の結果は最大値で規格化している. 図 3(a)および(c)の結果を見ると, カーペットクロックと平らな導体面の場合には振

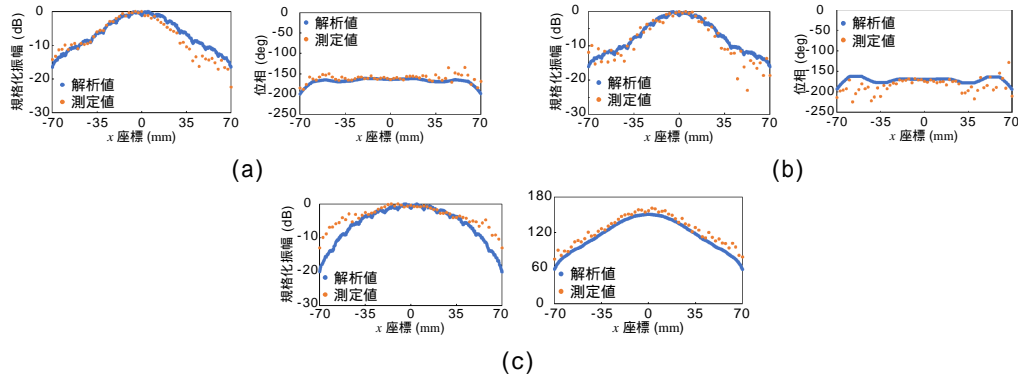


図3 3 GHzにおける近傍電界 E_2 の振幅(最大値で規格化)および位相分布の測定結果. (a) カーペットクロークの場合. (b) 三角形の導体の場合(カーペットクロークなしの場合). (c) 平らな導体面の場合(物体なしの場合). オレンジの点は測定値, 青の点は電磁界シミュレーションによる解析値で, 各グラフの横軸は図2(d)の測定範囲の x 座標に対応している.

幅も位相も同様な分布が得られ, 電磁界シミュレーションによる計算結果ともよく一致していることが分かる. 一方, 同図(b)の三角形の物体の場合は, 三角形の物体に起因して反射波の軌道が曲がる(=波源方向への反射波成分が少なくなる)影響から, 他とは明らかに異なる分布となっており, 各場合の電磁界シミュレーションの結果を比較しても同じような傾向となっている. 以上のことから, 試作したカーペットクロークが動作していると判断できる. また, 3 GHzの時の物体の大きさに対する波長の大きさの関係は面積比で 0.567 倍であり, 非常に大きな物体をカーペットクロークで隠すことができていることが分かる.

以上より, 波長よりも大きな物体を隠せるカーペットクロークの設計理論の構築から実証実験まで行うことができた. 今後は, 周波数や測定範囲を変えた実験を行なって試作したカーペットクロークの評価を行い, 結果をまとめて論文誌に投稿する予定である. その後は, 動作周波数の引き上げや音波に対して物体を見えなくする音響カーペットクロークへの展開を検討する.

B. 透過型透明マント

(1)紙面の都合上詳細は省略するが, 1次元直線分布定数線路(線路長 l_1)および1次元ミアンダ分布定数線路モデル(線路長 l_2)を用いて透過型透明マントを構成し, 入射した平面波が物体を迂回するように透明マントの内部を通して出力された場合でも, 平面波の形状が維持されるように, 透明マントの出口における透過位相を調整するための線路長の理論式を検討した. その結果, 以下のような式を得た.

$$l_1 = \sqrt{\left(\frac{a}{\sqrt{2}}\right)^2 + \{A(n-1) + B - n\Delta d\}^2}, \quad l_2 = \frac{\frac{b}{2} - \frac{a}{\sqrt{2}} + a - l_1}{\frac{b}{2} - \frac{a}{\sqrt{2}}} \Delta d \quad (2)$$

ただし,

$$A = \frac{\frac{b}{2} - \frac{a}{\sqrt{2}} - \Delta d + \frac{\sqrt{2}a\Delta d}{b}}{\frac{b}{2\Delta d} - 1}, \quad B = \frac{a}{\sqrt{2}} + \Delta d - \frac{a\Delta d}{b\sqrt{2}} \quad (3)$$

と置いている. a , b , および d はそれぞれ物体の1辺の長さ(正方形を45度回転させた形状を想定)および透明マントの1辺の長さ(形状は正方形を想定), 分布定数線路モデルの1辺の大きさを表し, n は透明マントの内部の経路番号(配置した回路モデルの行番号)を表す(それぞれの詳細は文献の査読付き国際会議論文を参照). カーペットクロークの場合と同様, 周波数の関数が含まれていないため, 本理論に基づけば, 非常に広帯域な動作をし, かつ波長よりも大きな物体を隠せる透過型透明マントを設計することができる.

(2)同様に紙面の都合上説明を簡略化するが, 式(2)および(3)に基づき, 誘電体基板上に1次元ミアンダマイクロストリップ線路構造および1次元直線マイクロストリップ線路構造を用いて透過型透明マントを実装することを検討した. その結果, 全体の構成は図4(a)のようになり, これに対して電磁界シミュレーションを行って左から平面波を入射した時の複素電界分布の計算結果は図4(b)のようになった. 同図から透明マントとして機能している(=透明マントを通過

後も入射平面波は反射・散乱せず、平面波の形状が維持されている)ことがはっきりと分かる。また、物体の大きさに対する波長の大きさの関係が面積比で 0.331 倍となる周波数で解析しているため、設計した透過型透明マントは非常に大きな物体を隠すことができることが分かる。

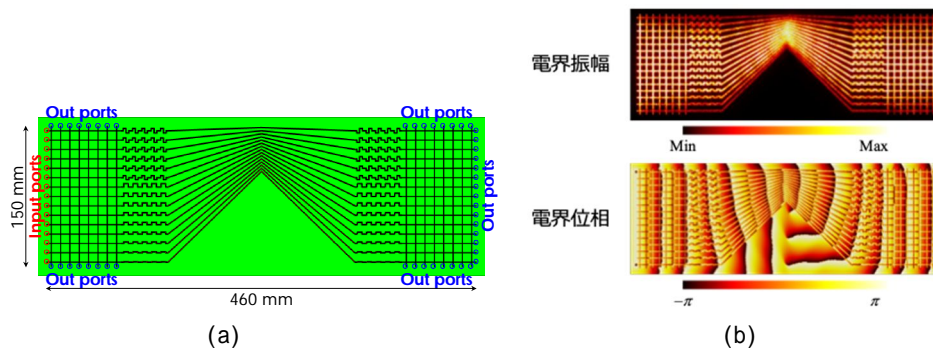


図 4 構成した透過型透明マントおよび 3.930 GHz における複素電界分布の計算結果。(a) 透過型透明マントの構成図。(b) 複素電界の振幅および位相分布。

(3) 図 5 に試作した透過型透明マントを示す。カーペットクロークと同様に平面波を入射するために、左から 4 セル目にメタサーフェスレンズを配置しており、レンズの焦点は左端の列の中央の単位セルの左側のノードの位置に設定している。この部分以外の境界のノードには 1cm 程度離れた位置にランドとスルーホールビアを設け、ノードとランド間を整合用の 50 Ω のチップ抵抗を半田付けして接続している。

透過型透明マントについては実験は未実地のため、今後はカーペットクロークの場合とほぼ同様の方法で近傍電界測定を行い、性能評価を行う予定である。その後は論文誌への投稿や、音波に対して動作する透過型音響透明マントへの展開等を行う予定である。

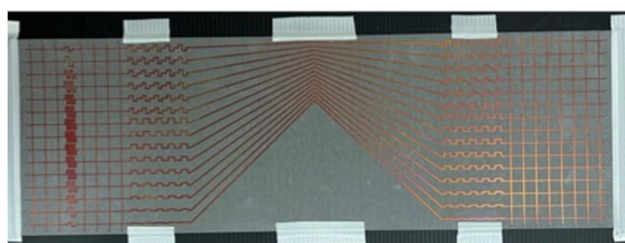


図 5 試作した透過型透明マント。平面波を入射するために左側にメタサーフェスレンズを構成しており、同レンズの焦点の位置(左端の列の中央のノード)に同軸コネクタおよび同軸ケーブルを接続し、そこから電磁波を入射することを想定して試作している。

<引用文献>

T. Nagayama and A. Sanada, "Planar distributed full-tensor anisotropic metamaterials for transformation electromagnetics," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-63, no. 12, pp. 3851-3861, 2015.

Y. Sonoda, T. Nagayama, T. Watanabe and S. Fukushima, "Design of a Broadband Carpet Cloak for Hiding Larger Objects than the Wavelength by Using One-Dimensional Meander Microstrip-Line Structures," in *2022 IEEE Asia-Pacific Microw. Conf. (APMC)*, Nov. 2022, pp.76-78.

C. Christopoulos, *The Transmission-Line Modeling Method: TLM*. New York, NY, USA: IEEE, 1995.

I. Suhara, T. Nagayama, S. Fukushima, and T. Watanabe, "Design of a Broadband Flat Metasurface Lens by Using One-Dimensional Meander Microstrip-Line Structures", in *2023 Photonics and Electromagnetics Research Symposium*, July 2023, pp. 1899-1904.

T. Nagayama, "Design Method for Broadband Invisible Cloaks by Using Straight and Meander Transmission-Lines," in *2022 IEEE Int. RF and Microw. Conf. (RFM)*, Dec. 2022, pp. 1-4.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Nagayama Tsutomu	4. 巻 -
2. 論文標題 Design Method for Broadband Invisible Cloaks by Using Straight and Meander Transmission-Lines	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 2022 IEEE International RF and Microwave Conference (RFM)	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/RFM56185.2022.10065136	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 Sonoda Yuki, Nagayama Tsutomu, Watanabe Toshio, Fukushima Seiji	4. 巻 -
2. 論文標題 Design of a Broadband Carpet Cloak for Hiding Larger Objects than the Wavelength by Using One-Dimensional Meander Microstrip-Line Structures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 2022 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)	6. 最初と最後の頁 76-78
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.23919/apmc55665.2022.9999886	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 Suhara I., Nagayama T., Fukushima S., Watanabe T.	4. 巻 -
2. 論文標題 Design of a Broadband Flat Metasurface Lens by Using One-Dimensional Meander Microstrip-Line Structures	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 2023 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)	6. 最初と最後の頁 1899-1904
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/piers59004.2023.10221359	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0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

永山研究室ホームページ
https://www.eee.kagoshima-u.ac.jp/~t-nagayama/

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
研究協力者	福島 誠治 (Fukushima Seiji) (10610214)	理工学域工学系・教授 (17701)	*2022年度, 2023年度
研究協力者	渡邊 俊夫 (Watanabe Toshio) (90524124)	理工学域工学系・准教授 (17701)	*2022年度, 2023年度
研究協力者	園田 悠希 (Sonoda Yuki)	理工学研究科 (17701)	*2022年度のみ(修士2年次のみ)
研究協力者	須原 出海 (Suhara Izumi)	理工学研究科 (17701)	*2022年度, 2023年度(修士1年, 2年)

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