

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04055

研究課題名（和文）マントルクロークを用いたアンテナの結合抑制及び指向性維持同時達成法

研究課題名（英文）Simultaneous achievement of suppressing antenna coupling and maintaining radiation pattern by using a mantle cloak

研究代表者

道下 尚文（MICHISHITA, Naobumi）

防衛大学校（総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群）・電気情報学群  
・教授

研究者番号：30535357

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）：本研究では、到来する電波を迂回させるマントルクロークに着目し、アンテナ近傍に他のアンテナが近接配置されたときの相互結合の低減と、アンテナ特性の維持を同時に達成することを目的とする。ストリップ導体を用いたマントルクロークアンテナの設計法を確立し、クローキングの発生条件を体系的にまとめることで、動作原理を明らかにした。相互結合を低減するとともに、放射パターンを維持できることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

メタ材料は負の屈折率を実現できる媒質として、研究が進んできた。近年では、メタ表面による電波制御の研究が盛んである。メタ材料、メタ表面の発展形として、設置対象を電波的に透明化するクローキングは理論的には示されてきているが、その実用化はまだなされていない。

クローキングの実現方法の一つとして、設置対象の表面リアクタンスを調整する手法が提案されている。これをマントルクロークと呼ぶ。マントルクロークを構成する構造として本研究で提案したストリップ導体の周期配列は実用性が高く、アンテナの設置環境や、様々な周波数帯およびシステム間の周波数間隔を考えると、適用範囲は非常に広い。

研究成果の概要（英文）：This research focuses on mantle cloaking, which diverts incoming radio waves, and aims to simultaneously reduce mutual coupling and maintain antenna characteristics when other antennas are placed in close proximity to the antenna. We have established a design method for a mantle cloak antenna using a strip conductor and clarified the operating principle by systematically summarizing the conditions under which cloaking occurs. It is demonstrated that the antenna can reduce the mutual coupling while maintaining the radiation pattern.

研究分野：工学

キーワード：アンテナ メタ材料 メタ表面 マントルクローク 相互結合 放射パターン

### 1. 研究開始当初の背景

現在、IoTの普及に伴い、無線機器内外の電波干渉が深刻な問題となっている。すべてのモノは高性能化、高機能化と同時に、デザイン性などの理由で、アンテナやRFデバイスの実装環境は制限される。高密度に実装された機器内部のような過酷な電波環境で、干渉低減を実現するために、RFフロントエンドの代わりに電波吸収体を設置するなど、アンテナ周辺の空間を利用した干渉低減技術が求められている。

第5世代移動通信(5G)においても、massive MIMO用の超多素子アンテナや、スモールセル向けアンテナでは、電波干渉の基となるアンテナ素子間の相互結合の低減技術は大変重要な研究課題である。また、5G用の周波数帯として割り当てられたサブ6(3.7 GHz, 4.5 GHz)やミリ波(28 GHz)では既存業務との共用が必要不可欠であり、近接する多くの別システムへの電波干渉の低減は重要な課題といえる。自動車分野でもコネクテッドカー実現のために5Gの導入が必要であるが、自動車アンテナにはラジオやテレビなど様々なメディアの受信も求められるため、その設置環境はすでに限界が来ている。

学術的には、アンテナの相互結合低減方法として、アンテナ間隔の確保、直交偏波の利用、結合回路の挿入などが検討されてきた。近年では、メタマテリアル技術の利用により、近接周波数帯において結合を低減する方法も提案されている。しかし、いずれの技術も、結合は低減できるがアンテナの放射指向性は変化してしまう。つまり、本来、無指向性だったアンテナが指向性を持つことになり、システムで想定していたアンテナ特性を実現できず、5G実現の弊害となり得る。そこで、空間的にも近接に配置されたアンテナ間の近接周波数帯の相互結合を低減すると同時に、放射指向性を維持する技術の開発が重要となると考えられる。このような課題を解決するには、アンテナ素子自体の小型化技術と、アンテナ以外での電波制御技術を組み合わせる必要がある。

### 2. 研究の目的

共振周波数が異なる2個以上のアンテナを近接に配置した場合、アンテナ間の相互結合の影響により、入力インピーダンス特性や放射指向性は単独のアンテナ特性から大きく変化し、放射効率などのアンテナ性能は劣化する。アンテナ性能を維持するためには、アンテナ間の相互結合の低減が必要となるが、従来の低減技術では、放射指向性を維持することができない。本研究では、近年話題になっているマントルクロック技術を利用することでアンテナ間の相互結合の低減と放射指向性の維持を同時に達成することを目的とする。

### 3. 研究の方法

事前検討では、理想的なマントルクロックの表面リアクタンス値と、相互結合を低減する阻止周波数の関係を明らかにしてきた。また、その周波数においてマントルクロック内部は高次モードで共振していることもわかった。さらに、実構造として、ストリップ導体をアンテナ表面に周期配列したマントルクロックアンテナを試作、測定することで、シミュレーションの妥当性を示した。しかし、理想的な表面リアクタンス値と、実構造であるストリップ導体の周期構造との関係は明らかになっておらず、阻止帯域が現れる動作原理も不明である。そこで、アンテナの動作周波数、マントルクロックの帯域阻止周波数ならびにそれらの周波数間隔に対する影響を体系的にまとめることで、マントルクロックアンテナの設計法を確立する。

次に、事前検討で設計したマントルクロックアンテナは、動作周波数帯域に対して高域側に阻止帯域が現れる。そこで、アンテナの動作周波数帯域に対して低域側でも阻止帯域が現れるマントルクロックを検討する。設計したマントルクロックを共振周波数が異なる2つのダイポールアンテナに適用し、それぞれを近接に配置したときの相互結合低減およびアンテナ特性を確認する。また、周波数選択板によるマントルクロックを実現するための単位セル構造の設計を行う。設計したマントルクロックの性能を理論値および測定値と比較し、電磁界シミュレーションの妥当性を確認する。

### 4. 研究成果

#### (1) マントルクロックを用いたアンテナの相互結合低減

動作周波数がそれぞれ720 MHzおよび750 MHzの2つのダイポールアンテナに表面リアクタンスを設計したマントルクロックを覆うことで、アンテナ間の相互結合低減とアンテナ特性の維持を同時達成する手法について検討する。

図1に解析モデルを示す。図1の左側は厚さ2 mm、比誘電率 $\epsilon_r = 10.2$ の誘電体で覆われた動作周波数720 MHz、阻止周波数750 MHzのマントルクロックアンテナ(Ant-1)であり、アンテナ長は132 mmである。誘電体の表面にインピーダンス境界条件を適用し、表面リアクタンス $X_s = -1.0 \Omega$ を設定して

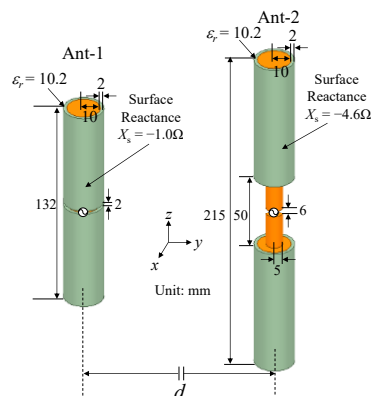


図1 マントルクロックアンテナ

いる。図1の右側は厚さ2 mm, 比誘電率  $\epsilon_r = 10.2$  の誘電体で覆われた動作周波数750 MHz, 阻止周波数720 MHzのマントルクロックアンテナ(Ant-2)である。Ant-2の給電部に長さ50 mmの空間を設け, その空間に半径5 mm, 長さ22 mmの2つの金属円柱を配置している。Ant-2の長さは215 mmであり, 給電部のギャップ長は6 mmである。誘電体の表面にインピーダンス境界条件を適用し, 表面リアクタンス  $X_s = -4.6 \Omega$  を設定している。また, 2つのマントルクロックアンテナの距離を  $d$  とする。解析には有限要素法を用いた。

まず, 2つのマントルクロックアンテナ間距離  $d$  を400 mm (750 MHzの1波長)とした場合のアンテナ間の相互結合を図2に示す。マントルクロックを用いると, 720 MHz および 750 MHzにおいて,  $|S_{21}|$ が急峻に減衰していることがわかる。また, 2つのマントルクロックアンテナの動作周波数はそれぞれ720 MHz および 750 MHzであり, 元のダイポールアンテナの動作周波数とほぼ一致していることがわかる。

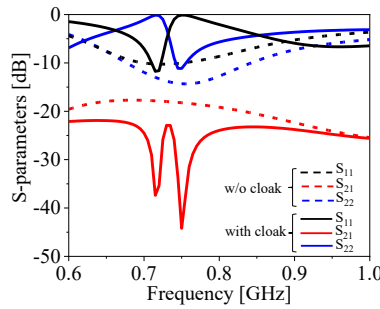


図2 Sパラメータ特性

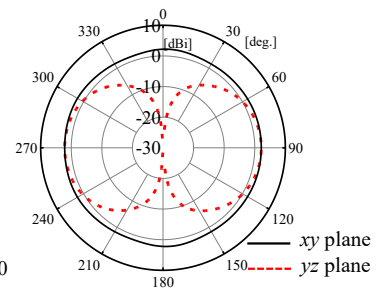


図3 放射パターン

図3に720 MHzにおけるAnt-1の放射パターンを示す。720 MHzでは,  $xy$  面は無指向性,  $yz$  面は8の字となり, 通常のダイポールアンテナの放射パターンとほぼ一致していることがわかる。なお, 750 MHzにおけるAnt-2の放射パターンも同様に通常のダイポールアンテナの放射パターンとほぼ一致した。また, アンテナ間距離は  $0.1\lambda$  まで近接してもアンテナ特性をほぼ維持できることを確認した。

以上より, マントルクロックを用いると, アンテナ間の相互結合を急峻に低減することができ, 自身のアンテナの動作周波数の放射パターンは維持できることがわかった。

## (2) マントルクロックアンテナの動作原理

阻止周波数720 MHz, 動作周波数750 MHzとなる角柱マントルクロックアンテナの実構造を検討する。解析モデルを図4に示す。一辺が10 mm, 全長177 mmの角柱ダイポールアンテナを, 比誘電率  $\epsilon_r = 10.9$ ,  $\tan\delta = 0.003$ , 厚さ1.65 mmの高誘電率材料で被覆し, 各面の中央に幅4.8 mmのストリップ導体を配置した。アンテナの中央部には間隔39 mmを設け, 一辺が5 mmの整合部を設置した。給電部はギャップ給電とし, 給電間隔を2 mmとした。

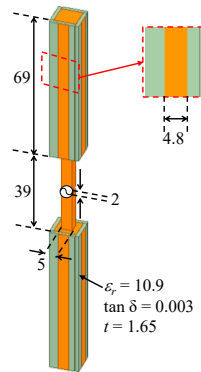


図4 マントルクロックアンテナ

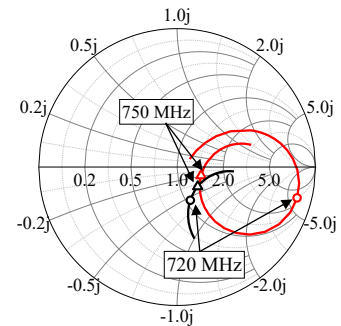


図5 インピーダンス特性

マントルクロックアンテナと750 MHzで動作するダイポールアンテナ単体のインピーダンス特性を図5に示す。マントルクロックアンテナはダイポールアンテナのインピーダンス特性に並列共振が追加されることで, 阻止帯域が得られることがわかった。

続いて, マントルクロックアンテナの阻止帯域である720 MHzにおけるストリップ導体表面, 裏面及び内部アンテナ表面の電流分布を図6に示す。ストリップ導体部分は阻止帯域において半波長で共振しており, 動作周波数と同一の共振モードとなることがわかった。また, ストリップ導体裏面と内部アンテナ表面の電流は逆相で, 打ち消している。よって, ストリップ導体に到来した電波は, 高インピーダンスとなる阻止帯域では, 給電部には到達しないことがわかった。

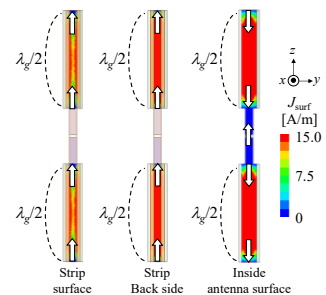


図6 電流分布

## (3) 動作周波数におけるアンテナ特性の維持と低域側における相互結合の低減の実証

試作したマントルクロックアンテナを図7に示す。アンテナの給電部は, 平行平板と同軸ケーブルにより給電し, 漏れ電流による影響を低減するため, 750 MHzに対応したシュベルトップバランを設置した。測定した反射特性を図8に示す。阻止周波数, 動作周波数ともに, 測定結果と解析結果はよく一致しており, 解析結果の妥当性を確認することができた。

クローキング効果を検証するため、給電部を  $50\ \Omega$  で終端し、 $z$  軸方向の電界を持つ  $720\ \text{MHz}$  の平面波を  $x$  軸方向から入射したときの電界分布を解析した。観測面は  $xy$  面とし、各アンテナ素子の中央部の高さで観測した。 $750\ \text{MHz}$  で動作するダイポールアンテナおよびマントルクロックアンテナの電界分布を図 9 に示す。ダイポールアンテナでは入射波が乱れていることがわかる。一方、マントルクロックアンテナは入射波を乱さずに迂回させ、反射、散乱を低減している。よって、設計したマントルクロックアンテナはクローキング効果を得ていることがわかった。

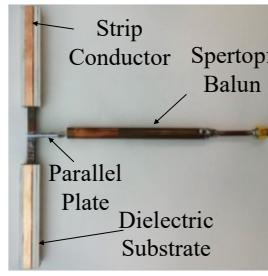


図 7 試作アンテナ

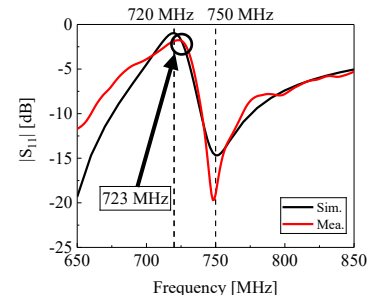
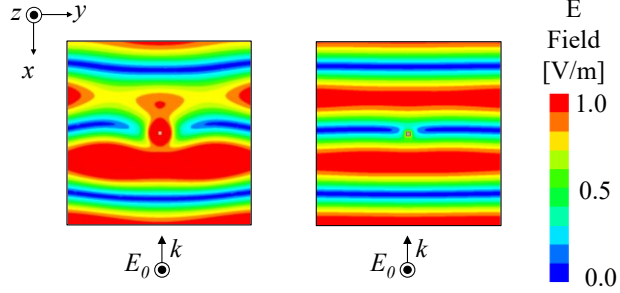


図 8 反射特性

設計したアンテナ間の相互結合低減効果を検証する。透過特性の測定環境を図 10(a) に示す。 $720\ \text{MHz}$  で動作するダイポールアンテナの給電部を Port 1、 $750\ \text{MHz}$  で動作するマントルクロックアンテナの給電部を Port 2 とした。アンテナ間の距離を  $0.1\lambda$  にしたときの透過特性の測定結果を図 10(b) に示す。マントルクロックアンテナが近接して配置されると  $720\ \text{MHz}$  付近で透過特性が大幅に減少し、解析結果とよく一致した。続いて、アンテナ間の距離を  $0.1\lambda$  にしたときの動作利得の放射パターンの測定結果を図 11(c) に示す。ダイポールアンテナ同士が近接すると、相互結合によって放射パターンが乱れるが、マントルクロックアンテナが接近した場合には放射パターンは乱れなかった。また、解析結果とよく一致し、解析結果の妥当性を確認することができた。

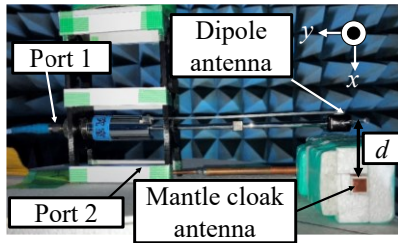


(a) ダイポール (b) マントルクロック

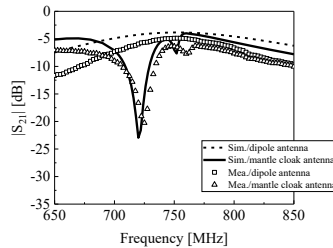
図 9 電界分布

以上より、動作周波数の低域側では相互結合を低減すると同時に、動作周波数では放射パターンを維持できることを実証した。

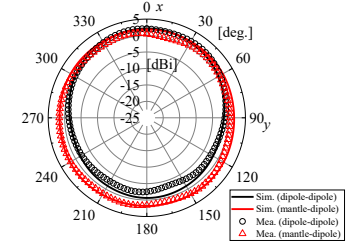
以上より、動作周波数の低域側では相互結合を低減すると同時に、動作周波数では放射パターンを維持できることを実証した。



(a) 測定環境



(b) 透過特性



(c)  $xy$  面放射パターン

図 10 マントルクロックアンテナの測定

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 2件）

1. 著者名 道下 尚文	4. 巻 J105-B
2. 論文標題 メタマテリアルを用いたアンテナ間の相互結合抑制	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌B	6. 最初と最後の頁 852 ~ 861
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14923/transcomj.2022API0001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 NGUYEN Thanh Binh, MICHISHITA Naobumi, MORISHITA Hisashi, MIYAZAKI Teruki, TADOKORO Masato	4. 巻 E105.B
2. 論文標題 Mantle-Cloak Antenna by Controlling Surface Reactance of Dielectric-Loaded Dipole Antenna	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 275 ~ 284
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transcom.2021EBP3026	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 OZAWA Shuhei, NISHIME Takumi, HASHIGUCHI Hiroshi, MICHISHITA Naobumi, SAKIMOTO Kiyoshi, MIYAZAKI Teruki, TADOKORO Masato	4. 巻 13
2. 論文標題 Square Rod Antenna Covered by Mantle Cloak with Rejection Band at Lower Frequency Side of Operating Frequency	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 190 ~ 194
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.23919/comex.2024SPL0017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 1件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 ゲンタインピン, 道下尚文, 森下久, 宮崎輝規, 田所真人
2. 発表標題 マントルクロークを用いたダイポールアンテナ間相互結合低減
3. 学会等名 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 NGUYEN Thanh Binh, HASHIGUCHI Hiroshi, MICHISHITA Naobumi, MORISHITA Hisashi, MIYAZAKI Teruki, TADOKORO Masato
2. 発表標題 Mantle Cloak Antenna Using Strip Conductors for Mutual Coupling Reduction at Frequency Lower Than Operating Frequency
3. 学会等名 International Symposium on Antennas and Propagation (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 NGUYEN Thanh Binh, HASHIGUCHI Hiroshi, MICHISHITA Naobumi, MORISHITA Hisashi, MIYAZAKI Teruki, TADOKORO Masato
2. 発表標題 Mantle Cloak Antenna with Rejection Band at Lower Frequency Side of Operating Frequency
3. 学会等名 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 グエンティンビン, 橋口弘, 道下尚文, 森下久, 宮崎輝規, 田所真人
2. 発表標題 電磁クローキングによるアンテナの相互結合抑制
3. 学会等名 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 道下尚文, 小澤修平, 橋口弘, 先本清志, 宮崎輝規, 田所真人
2. 発表標題 近接周波数に阻止帯域を有するマントルクロークアンテナ
3. 学会等名 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 OZAWA Shuhei, HASHIGUCHI Hiroshi, MICHISHITA Naobumi, MORISHITA Hisashi, SAKIMOTO Kiyoshi, MIYAZAKI Teruki, TADOKORO Masato
2. 発表標題 Scattering suppression by mantle cloak composed of strip conductors
3. 学会等名 URSI-General Assembly and Scientific Symposium (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小澤修平, 橋口弘, 道下尚文, 先本清志, 宮崎輝規, 田所真人
2. 発表標題 ストリップ導体を用いた角柱マントルクロックアンテナ
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 2023年

1. 発表者名 小澤修平, 橋口弘, 道下尚文, 先本清志, 宮崎輝規, 田所真人
2. 発表標題 ストリップ導体を用いた角柱マントルクロックによる相互結合抑制
3. 学会等名 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 MICHISHITA Naobumi, OZAWA Shuhei, HASHIGUCHI Hiroshi, SAKIMOTO Kiyoshi, MIYAZAKI Teruki, TADOKORO Masato
2. 発表標題 Scattering suppression from thick square rod by mantle cloak composed of strip conductors
3. 学会等名 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and ITNC-USNC-URSI Radio Science Meeting (国際学会)
4. 発表年 2024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
---------	---------