

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04486

研究課題名（和文）アンテナ技術を駆使した高分解能センシングシステムのハードウェア開発

研究課題名（英文）Hardware development of high resolution sensing system using antenna technology

研究代表者

福迫 武（Fukusako, Takeshi）

熊本大学・大学院先端科学研究部（工）・教授

研究者番号：90295121

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、(1)近傍界を用いたセンシング技術、また、(2)レーダのような仕組みによる電波センシング技術として、アンテナにメタ表面を組み合わせた構造についての可能性を探ったものである。

(1)については、人体の心拍数や呼吸を例にとり、2.4GHz帯にて近傍界測定の可能性について検討した。

(2)については、主にメタ表面とそれを用いた到来方向推定方法について検討した。さらに、メタ表面の面積が有限であっても、無限の場合の特性に近づけるような特性補償法について検討した。さらに、UHF帯にて地中伝搬に関する基礎検討を行い、地中センシングの可能性について検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、ミリ波等によって多く検討されている電波センシングであるが、本研究の結果により、低い周波数でのセンシングの可能性を見出すことができた。これは、安価でシンプルなシステムが使用できるのみならず、鋭い指向性アンテナに頼らずとも、近よりであれば高角度の範囲でセンシング可能となり、近距離電波センシングの応用範囲が広がる。また、メタ表面を用いることで、高分解能なセンシングの可能性、実用性を考慮した有限面積のメタ表面の設計法等、多くの知見を得ることができた。さらに、UHF帯における地中伝搬実験を行い、基本的な地中センシングに関する知見を得た。

研究成果の概要（英文）：In this study, we explored the possibilities of (1) sensing technology using the near field and (2) radio wave sensing technology using a radar-like mechanism, in which a meta-surface is combined with an antenna.

For (1), the possibility of near-field measurement in the 2.4-GHz band was examined using the heart rate and respiration of the human body as examples.

For (2), the meta-surface and a method for estimating the direction of arrival using the meta-surface are discussed. Furthermore, even if the area of the meta-surface is finite, we studied a method of compensating the characteristics so that the characteristics can be made close to those of the infinite case. Furthermore, a basic study on underground propagation in the UHF band was conducted, and the possibility of underground sensing was discussed.

研究分野：アンテナ工学，電磁波工学

キーワード：アンテナ 電波センシング メタ表面 到来方向推定

1. 研究開始当初の背景

電波を用いたリモートセンシングは、合成開口レーダ技術等の技術で従来から行われているが、近年、自動車用ミリ波レーダ等、比較的近距离を対象とする電波を用いたセンシング技術が実用化されている。ミリ波レーダは使用する電波の周波数が高いため、比較的高分解能であるが、一方で、比較的低周波数において、実用的な電波センシングの技術は、比較的安価であると共に、電波有効活用の観点からも有用であり、その可能性についてもさらに興味が高まってきている。

また、電波の反射応答の様子を的確にとらえることは電波センシングにおいて重要な技術である。アレーアンテナを用いる技術も知られているが、各アンテナ素子に受信機が必要であるため、コストがかかると共に複雑なシステムとなる。よって、より単純な技術で広く使われるためには、アンテナは単素子が望ましい。一方で、アレーアンテナと同等な状況を生み出すために、基板上にほぼ周期的に金属素子を配置したメタ表面の使用を今回提案し、それに関する基本的な研究を行うことが求められる。

ただし、メタ表面を用いた場合、実用的にはその面積は有限である場合があり、端部の影響を受けやすい。その効果を打ち消す位相補償技術についても求められる。この技術を用いることができれば、メタ表面の設計はより簡単で現実にそった特性を得ることができる。

2. 研究の目的

本研究では、背景でも述べた観点に注目し、電波を用いたセンシング技術を念頭に、主にハード的な側面からアプローチし、新しい可能性について検討することを目的とする。

3. 研究の方法

代表的な技術として、主に近傍界によるアンテナセンサやレーダを考える。その内容は、(1)近傍界を用いたセンシング技術、さらに(2)レーダのような仕組みによる電波センシング技術、および(3)有限面積をもつメタ表面の位相補償技術であり、アンテナにメタ表面を組み合わせた構造についての可能性を探ったものである。

3.1 近傍界におけるセンシング技術

アンテナは、通常波長に比べて十分遠方（フラウンホーファー領域）に向けて平面波の電波を放射するが、アンテナに近いフレネル領域においては、球面波に近く、さらに近傍の領域ではその界分布は複雑になる。また、フレネル領域より近い領域では、アンテナ近傍の電界または磁界にエネルギーが蓄えられる。このエネルギーの分布に変化を与えればアンテナ特性の変化として現れるが、これを近距离測定のセンサーとして生かす。本研究では、人体の心拍数の測定を例に、この特性について考察した。なお、電波の出力は10mW程度であり、人体防護指針の基準以下となる。この仕組みを図1に示す。USRP（ソフトウェア無線機）の送信出力を、サーキュレータを通してアンテナで送信し、反射波としての信号はUSRPの受信機で受信する。この時、心拍については、心臓の動作に伴う周りの筋肉の動きにより、アンテナと人体間に生じる定在波がアンテナにおいて変化する。アンテナは同図のように4素子のアレーアンテナとし、アンテナから

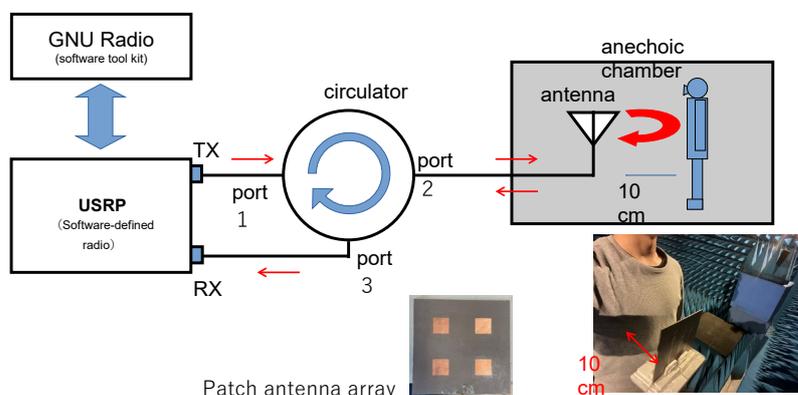


図1 アンテナ近傍界における心拍測定

10cm 程度の箇所測定する。本研究の意義は、これまで遠方界においてのみ行われた電波センシングであるが、近傍界の積極的利用の可能性を探ることにある。

3.2 メタ表面を用いたセンシングアルゴリズム

地中等の電波によるセンシング技術が注目されている。レーダのように送信波を対象となる物体で反射させ、反射波を受信するのに到来方向推定の技術が有用である。到来方向推定において、推定精度や推定波数を確保するための手段としてアンテナ数の増加が挙げられるが、それによりシステム構造の大型化、給電回路の複雑化、コスト・消費電力の増加などの問題が生じる。近年、電氣的に制御可能なメタ表面を用いた単一アンテナによる到来方向推定システムが実現されているが、メタ表面の各素子への制御が必要であり、回路の複雑性や消費電力の問題は残っている。本稿では、メタ表面反射板に対して電氣的制御を行わず、反射板付近に配置したダイポールアンテナ 1 素子で到来方向を推定する手法を提案する。そのシステムを図 2 に示す。提案システムではメタ表面反射板の物理的な回転と複数の周波数応答を用いて、異なる放射パターンを複数生成し、その放射パターンを行列 \mathbf{A} の構成要素とする。本検討では、4 つの反射板の回転角度と 3 つの周波数の組み合わせで生成された放射パターンの中から 6 つを選択し、観測行列 \mathbf{A} を構成する。また、角度分解能を 1° 、推定範囲を -90° から 90° とする。よって、今回の検討では放射パターンの数 M を 6、到来角の分割数 N を 181 とする。提案システムでは圧縮センシングの 1 つである Iterative Shrinkage Thresholding Algorithm (ISTA) を用いる。

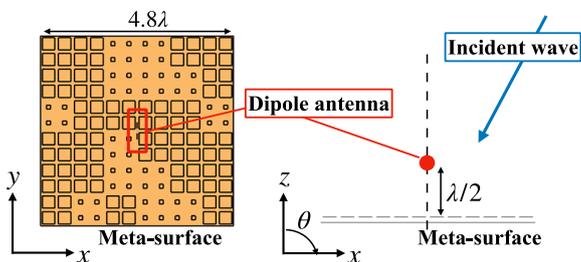


図 2. メタ表面と単一アンテナ素子による到来方向推定システム

3.3 有限面積を持つメタ表面の位相補償設計

メタ表面で重要なのは、電波反射時の位相変化が所望量であるかどうかである。周期条件を用いた単位セルによるメタ表面の設計は無限面積の場合に相当するが、有限面積であっても無限面積と同等な位相の振る舞いを実現するための位相補償技術についても検討した。具体的には、図 3 のような概念にもとづくが、メタ表面の単位セル間では、等価的に直列共振回路が形成されるのに対し、有限面積の端部においては、並列共振回路を形成する。このために、図 4 のようなノッチとスロットを組み合わせた構造を提案した。本検討では、ノッチサイズは 3×3 mm、スロットサイズは、 2.0×6.8 mm である。図 4 は図 3 のうちの一系列のさらにその半分の図であるが、周期的な構造で考えているため完全導体 (PEC)、完全磁気導体 (PMC) で囲んだモデルについて、PEC に垂直な電界を入射させることで、等価的に図 3 と同等となる。

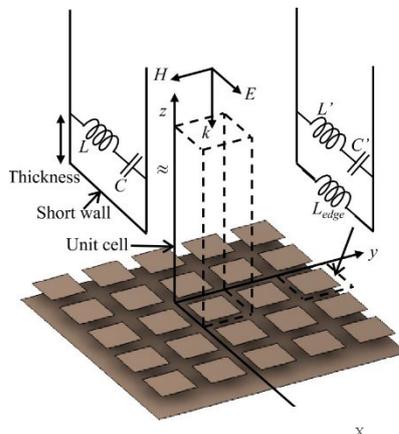


図 3 位相補償構造と用いたメタ表面の概念

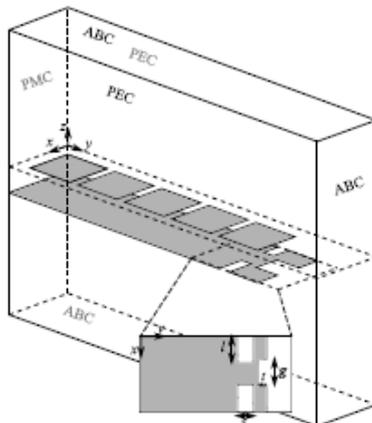


図 4 位相補償技術のための構造

4. 研究成果

4.1 近傍界における心拍測定結果

図5に心拍数が60回/分の被験者について、その測定結果の一例を示す。ピークが見られ、これらは心電図におけるR波に相当するが、前述の筋肉の動きに関連する理由により、少し心臓の動きとずれが生じる。しかし、別途測定した心拍数と同じ間隔でピークがみられ、測定可能であることがわかる。遠方界測定に比べ、アンテナの指向性の関係にとらわれずに、広角な測定が可能となる。

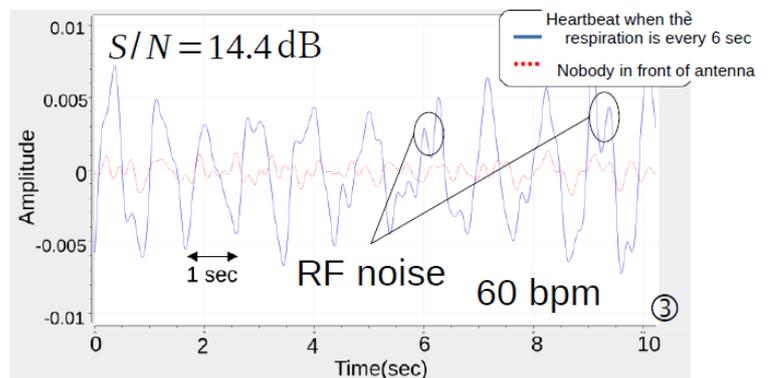


図5 心拍の測定例

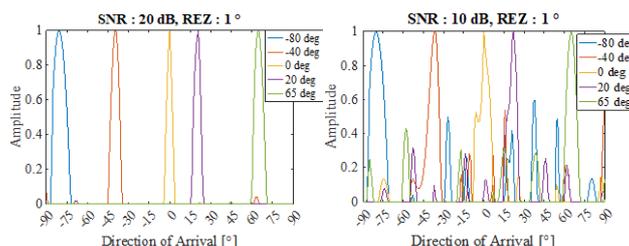


図6. 擬似信号を用いた到来方向の推定結果

SNR: (a)20 dB (b) 10 dB

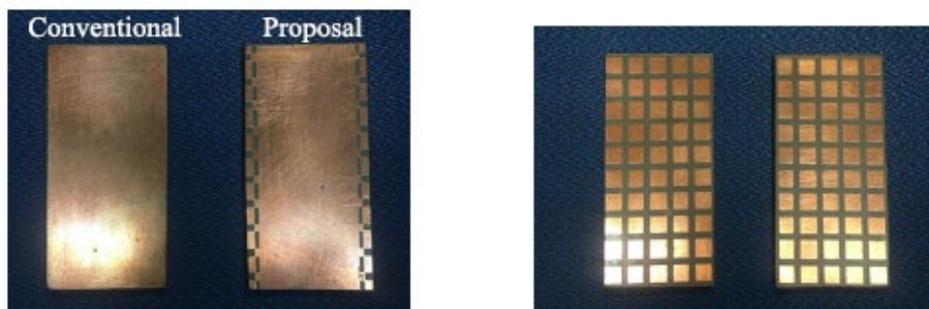
4.2 到来方向推定結果

図6にガウス分布に基づく雑音成分を持つ擬似信号を用いた推定結果を示す。図6(a), (b)は信号対雑音比(Signal to Noise Ratio : SNR)がそれぞれ20 dB, 10 dBのときの推定結果である。(a), (b)ともに推定結果のピークは正しい角度を示しているが、SNRが低下するとあらゆる角度で雑音のピークが確認できる。これは観測行列**A**の直交性が十分でないことが原因だと考えられる。この問題を解決するために、メタ表面反射板の素子配置や素子形状の最適化を行い、観測行列**A**の直交性を高める必要がある。以上の結果は、アンテナ単素子による高分解能な到来方向推定が可能であることを始めて示した結果である。

4.3 位相補償結果

メタ表面の位相補償技術について、通常の構造のメタ表面と提案構造の比較について、本報告では実験結果を示す。図7に試作したメタ表面の写真を示す。

それぞれの反射位相特性について、位相補償結果を図8に示す。無限面積に相当する”Unit Cell”に基づく設計で得られた結果は、有限面積をもつ本結果”Proposed”に近い。一方、端部にスロットやノッチが存在しない通常(Conventional)の有限面積のメタ表面ではUnit Cellの場合からかけ離れており、本提案構造の有用性が分かる。



(a) 裏面 (左: 通常, 右: 提案構造) (b) 表面 (左: 通常, 右: 提案構造)

図7 試作したメタ表面の写真

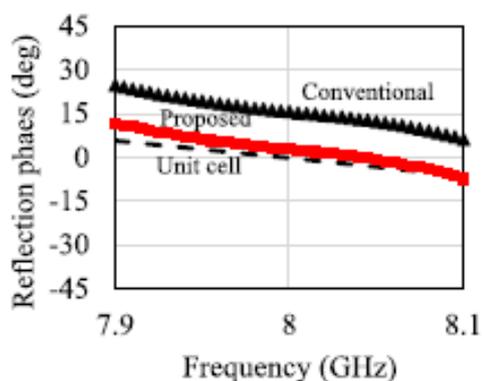


図8 反射位相特性の比較

以上、本研究では、新たな電波センシングの形態についていくつか提案するものである。一つは近傍界を用いたセンシングであり、これは、心拍に合わせた人体等の物理的動きをとらえるセンシングであり、比較的低い周波数(2.4 GHz帯など)の電波を用いて近距離であるものの微小な動きを敏感にとらえることができる。また、メタ表面を用いたセンシングは、反射波の方位方向の分布を高い分解能でとらえることができ、地中やコンクリート内のような物体内部の様子をとらえる技術となる。本研究の結果についてはさらに発展させ、今後の電波センシング技術の発展に貢献できればと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Ryuji Kuse, Takeshi Fukusako and Akira Matsushima	4. 巻 early access
2. 論文標題 Reflection Phase Compensation for Finite Meta-surface using Notches and Slots on the Backing Conductor	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Antennas and Propagation	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TAP.2023.3269155	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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 椎葉響, 久世竜司, 福迫武
2. 発表標題 パッシブなメタ表面反射板と単一のダイポールアンテナを用いた到来方向システム
3. 学会等名 映像情報メディア学会放送技術研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 椎葉響, 久世竜司, 福迫武
2. 発表標題 メタ表面反射板を用いたアンテナ1素子での到来方向推定に関する一検討
3. 学会等名 映像情報メディア学会放送技術研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Shiiba, R. Kuse, T. Fukusako
2. 発表標題 DoA Estimation Using Single Dipole Antenna With Meta-Surface Reflector
3. 学会等名 IEEE Conference on Antenna Measurements and Applications (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 椎葉 響, 久世竜司, 福迫 武
2. 発表標題 能動素子を用いないメタ表面反射板付きアンテナによる到来方向推定の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kento Kubota, Ryuji Kuse and Takeshi Fukusako
2. 発表標題 Non-contact heartbeat measurement using antenna near-field
3. 学会等名 電気・情報関係学会九州支部連合大会(国際セッション)(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hibiki Shiiba, Ryuji Kuse and Takeshi Fukusako,
2. 発表標題 DoA Estimation Using a Single Dipole Antenna with a Reflector Consisting of Various Meta-Surface Blocks
3. 学会等名 電気・情報関係学会九州支部連合大会(国際セッション)(国際学会)
4. 発表年 2022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
研究 分担者	久世 竜司 (Kuse Ryuji) (40808929)	熊本大学・大学院先端科学研究部(工)・助教 (17401)	

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