

平成 30 年 5 月 24 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06087

研究課題名(和文)透過型メタサーフェス板を前置した低姿勢アンテナ構造体による多偏向ビーム形成

研究課題名(英文)Formation of tilted beams by transmitting metasurface plates above a low-profile antenna system

研究代表者

中野 久松 (NAKANO, Hisamatsu)

法政大学・その他部局等・名誉教授

研究者番号：00061234

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：メタサーフェス板の特性を利用した電磁波通信機器が国内外で開発されつつある。本研究では透過型メタサーフェス板を創造し、これを給電アンテナ前方に配置することで、所望の1方向に1つ、あるいは異なる複数の方向に、それぞれ1つの電磁波ビームを放射できるように、新たなアンテナ構造体を実現した。この構造体は、薄型・低姿勢になっている。本構造体を実現するにあたり、(A)周期的に配列された新たな素子から成るメタサーフェス板の電磁界を明らかにし、(B)メタサーフェス板の電磁界と給電アンテナからの放射界とを考慮して、1つ、あるいは複数の電磁波ビームを放射させるために、周期配列素子の最適構造と配列法を解明した。

研究成果の概要(英文)：Electromagnetic communication devices that make use of the characteristics of a metasurface are being developed at home and abroad. In this research, a new metasurface has been developed and placed above a fed antenna in order to form a single beam or a multibeam in specific directions. This antenna system is distinguished from conventional antennas in that it has thin and low-profile structure. For realizing such antenna system, (A)the electromagnetic characteristics of a metasurface composed of periodically arrayed elements has been revealed, and (B) the optimization of the array elements and array structure has been performed such that the antenna system radiates a single beam or a multibeam, taking into account the radiation fields from the metasurface and the fed antenna.

研究分野：電磁波工学

キーワード：超表面 アンテナ ビーム成形

1. 研究開始当初の背景

(1) 超表面 (メタサーフェスとよぶ) の特性を利用した新しい機能を有する電磁波通信機器が国内外で開発されつつある。動作波長に比べて小さな金属素子を平面上に周期的にならべると、通常とは異なる電磁界現象が現れる。このような平板は、通常、金属板 (接地板) によって裏打ちされている。この金属板のついた人工表面板を『反射型メタサーフェス板』とよぶ。

(2) これに対し、接地板をもたない人工表面薄板を『透過型メタサーフェス薄板 (T-MS 薄板)』とよぶ。従来、T-MS 薄板をアンテナ前方に配置すると、「先鋭化された放射ビームがアンテナの正面方向に1つ形成される」ことが明らかになっている。しかしながら、所望の方向へビームを放射する『T-MS 板前置アンテナ構造体』の研究は少ない状況にある。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、『T-MS 板』を創造し、これを給電アンテナ前方に配置することで、電磁波を所望の1方向に、あるいは異なる複数の方向に放射できるように、新たなアンテナ構造体を実現する。この構造体は薄型・低姿勢になっている。

(2) 本構造を実現するために、(A) 周期的に配列された新たな素子から成る『T-MS 板』の電磁界特性を明らかにし、(B) T-MS 板の電磁界と給電アンテナからの放射界とを考慮して、1つ、あるいは複数の電磁波ビームを放射させるために、周期配列素子の最適構造と配列法を解明する。

3. 研究の方法

(1) 波長に比べて小さな金属正方形ループ (一辺 S 、線幅 W) を多数個周期配列して T-MS 薄板を構成する。電磁波が T-MS 薄板に入射した場合の透過係数を求め、この透過係数の位相を制御することにより所望の方向にビームを形成する。

(2) $+x$ 方向へ1ビームを形成するためには、一辺 S を固定し、線幅 W を T-MS 薄板の末端から $+x$ 方向に沿って変えていく。 $\pm x$ 方向に2ビームを得るためには、一辺 S を固定し、線幅 W を T-MS 薄板の中心から $\pm x$ 方向に沿って変えていく。 $\pm x$ 方向および $\pm y$ 方向に4ビームを得るためには、一辺 S を固定し、線幅 W を T-MS 薄板の中心から $\pm x$ および $\pm y$ 方向に沿って変えていく。

4. 研究成果

(1) 零元透過型メタサーフェス薄板 (零元 T-MS 薄板)

図1に『T-MS 薄板』を示す。同じループが $\pm x$ 方向および $\pm y$ 方向に周期配列されている。ループは正方形であり、一辺 S とループ線幅

W は全て同じものになっている。つまり、均一ループ配列によって T-MS 薄板が作られている。これを零元 T-MS 薄板とよぶ。本研究が開始される以前に、筆者は引用文献1のなかで零元 T-MS 薄板についての学術調査結果を一部公表している。この調査結果が本研究を始める原点になっている。

本研究に於いては、初めに、ループの一辺 S を固定し、線幅 W のみが異なる零元 T-MS 薄板を複数枚作成し、これらに電磁波が入射した場合を解析している。この場合の散乱係数 S-matrix を考察し、結果として「ループ線路幅 W を狭くすることで S_{21} の位相を遅らせることができる」という事実を得ている。

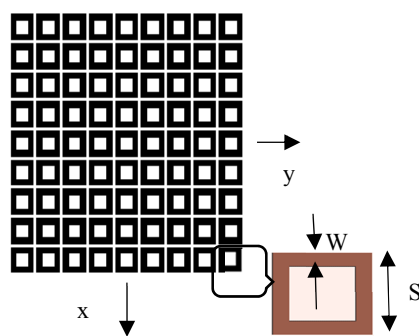


図1. 零元 T-MS 薄板。

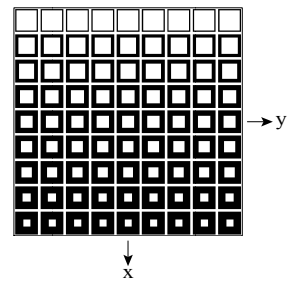
(2) 一元、二元、および4元 T-MS 薄板

電磁界解析は「位相の遅れる方向に放射ビームが形成される」という事実を導いている。この事実を基に、次に、放射ビームを1方向、2方向、4方向へ向けるための T-MS 薄板を構築している。これを図2に示す。

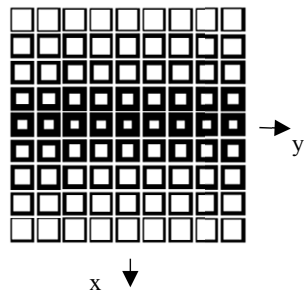
図2(a)は零元 T-MS 薄板の一変形である。零元 T-MS 薄板の場合と同じように一辺 S を固定し、T-MS 薄板の末端から $-x$ 方向に向かってループ線幅 W を減少させている。これを一元 T-MS 薄板とよぶ。一元 T-MS 薄板への入射電磁波は、位相減少によって $-x$ 方向へ偏向したビームを形成する。

図2(b)は一元 T-MS 薄板の変形であり、ループ線幅 W を T-MS 薄板の中心から $\pm x$ 方向に向かって減少させている。これを二元 T-MS 薄板とよぶ。このとき、二元 T-MS 薄板への入射電磁波は、 $\pm x$ 方向への偏向ビームを形成する。つまり、偏向2ビームを形成する。

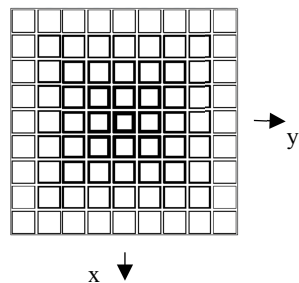
図2(c)は二元 T-MS 薄板の変形であり、ループ線幅 W を T-MS 薄板の中心から $\pm x$ および $\pm y$ 方向に向かって減少させている。これを四元 T-MS 薄板とよぶ。位相変化は4方向で起り、その結果、四元 T-MS 薄板への入射電磁波は、 $\pm x$ および $\pm y$ 方向への偏向ビームを形成する。



(a)



(b)



(c)

図2. (a)一元 T-MS 薄板. (b)二元 T-MS 薄板. (c)四元 T-MS 薄板.

(3) 実験検証

前記の1, 2, 4方向へ偏向したビームを検証するために実験を遂行している. 実験では入射電磁波源に小型パッチアンテナを使用している. このとき, パッチアンテナから T-MS 薄板までの距離を使用波長の1/2に選んでいる. これは「距離1/2波長のもとで電磁波が一元 T-MS 薄板に入射すると高利得の偏向ビームを形成する」という知見による.

距離1/2波長のもとで遂行した実験により, 所望方向への偏向ビーム形成を確認している. 特記すべき点は, 一元 T-MS 薄板部を使用した場合の偏向ビームの利得である. この利得が, 一元 T-MS 薄板部の効果により「パッチアンテナの利得に比べ 10 dB以上増強されている」という点である. 図3は引用文献2で公表してきた偏向2ビームの形成例

を示している. このとき二元 T-MS 薄板が使用されている.

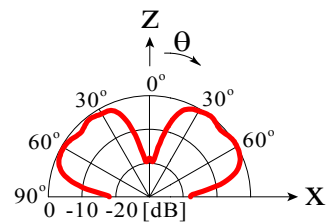


図3. 偏向2ビーム.

(4) ビーム偏向角の増加

本研究では, 前節で述べた1枚の T-MS 薄板によって得られる正面方向からの偏向ビーム角を, 更に増加することをも検討している. 電磁界解析は「同じ T-MS 薄板を複数重ねることで偏向ビーム角を増加できる」と結論している. 筆者はこの事実を引用文献3の中で公表している.

図4にビーム偏向角増強のためのアンテナ構造を示す. ここではパッチアンテナ上方に一元 T-MS 薄板を3枚配置している. この多層化によるビーム偏向角増強法は二元, 四元 T-MS 薄板の場合にも適用できる.

パッチアンテナから最底面の一元 T-MS 薄板までの距離を使用波長の1/2に選び, 隣り合う T-MS 薄板間距離を使用波長の1/4としている. 解析は「最上面の一元 T-MS 薄板の位相分布の傾きが, 最下面の T-MS 薄板のそれと比較すると大きくなる」ことを導いている. 従って, 放射ビームはより大きく正面方向から傾く. つまり偏向角は増強される.

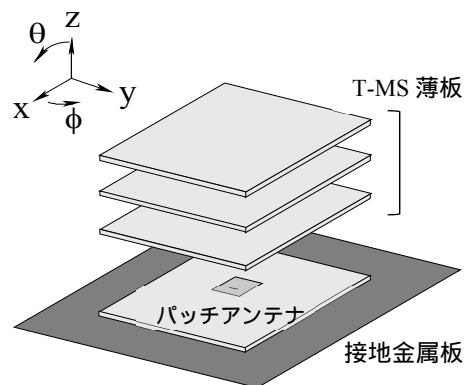


図4. 偏向ビーム角増強のための構造.

図5は一元 T-MS 薄板を3枚としたときの放射ビームの解析結果を示している. 比較のために一元 T-MS 薄板を1枚としたときの放射ビームも併記している. 1枚の T-MS 薄板

の場合、偏向角は約 30 度であり、3 枚の場合、偏向角は 60 度となっている。この数値は実験によっても確認されている。

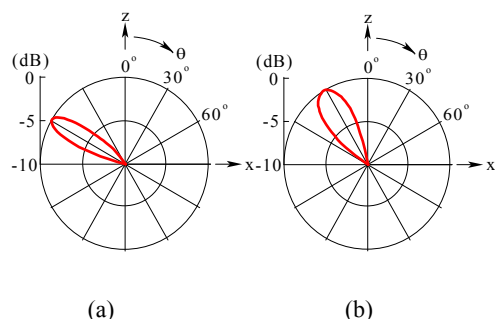


図 5. 一元 T-MS 薄板使用時の放射ビーム。(a)3 枚の場合。(b)1 枚の場合。

< 引用文献 >

H. Nakano, S. Mitsui, and J. Yamauchi, "Tilted-beam high gain antenna system composed of a patch antenna and periodically arrayed loops," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 62, no. 6, pp. 2917–2925, Jun 2014.

H. Nakano, M. Toida, S. Okabe, and J. Yamauchi, "Tilted beam formation using parasitic loop-based plates," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 1475-1478, 2016.

H. Nakano, T. Yoshida, and J. Yamauchi, "Tri-band metaloop antenna," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 1981-1984, 2017.

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

H. Nakano, T. Yoshida, and J. Yamauchi, "Tri-band metaloop antenna," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 査読有, vol. 16, pp. 1981-1984, 2017.

DOI: 10.1109/LAWP.2017.2691047.

H. Nakano, M. Toida, S. Okabe, and J. Yamauchi, "Tilted beam formation using parasitic loop-based plates," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 査読有, vol. 15, pp. 1475-1478, 2016.

DOI: 10.1109/LAWP.2015.2513671.

[学会発表] (計 7 件)

H. Nakano, Y. Kameta, and J. Yamauchi, "An I-slab system for tilted beam formation," *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, 査読有, Boston, USA, July 8-13, 2018 (March 3, 2018: accepted).

H. Nakano, Y. Kameta, and J. Yamauchi, "Effects of finite ground plane size on radiation characteristics for a tilted-beam antenna system," *Asia Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*, 査読有, pp. 1-3, Xi'an, China, October 16-19, 2017.

亀田, 山内, 中野, "3 枚の周期配列素子板を設置したチルトビームアンテナの実験検討," *電子情報通信学会ソサイエティ大会*, B-1-57, 2017 年 9 月 13 日, 東京都市大学 (東京都).

亀田, 山内, 中野, "周期ループ板による円偏波コニカルビームの形成," *電子情報通信学会ソサイエティ大会*, B-1-101, 2016 年 9 月 23 日, 北海道大学 (北海道).

H. Nakano, Y. Kameta, and J. Yamauchi, "Radiation beam with a large tilt angle," *2016 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC)*, 査読有, pp. 11-12, Cairns, Australia, September 2016.

DOI: 10.1109/APWC.2016.7738104

戸井田, 山内, 中野, "大きさの異なる 2 枚の周期ループ板を装着した双方ビームアンテナの実験検討," *電子情報通信学会総合大会*, B-1-157, 2016 年 3 月 18 日, 九州大学 (福岡県).

戸井田, 山内, 中野, "大きさの異なる 2 枚の周期ループ板を装着した双方ビームアンテナ," B-1-105, *電子情報通信学会ソサイエティ大会*, 2015 年 9 月 11 日, 東北大学 (宮城県).

[図書] (計 1 件)

H. Nakano, "Low-Profile Natural and Metamaterial Antennas," 304 pages, IEEE Press, Piscataway, NJ, USA, September 2016.

ISBN: 978-1-118-85979-7

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中野 久松 (NAKANO, Hisamatsu)
法政大学・その他部局・名誉教授
研究者番号: 0 0 0 6 1 2 3 4

(2) 連携研究者

三牧 宏彬 (MIMAKI, Hiroaki)
法政大学・理工学部・専任講師
研究者番号: 6 0 1 2 0 8 3 8

(3) 研究協力者

戸井田 光雄 (TOIDA, Mitsuo)
法政大学大学院・理工学研究科・大学院生
岡部 秀平 (OKABE, Syuhei)
法政大学大学院・理工学研究科・大学院生
亀田 悠平 (KAMETA, Yuhei)
法政大学大学院・理工学研究科・大学院生