

[共同研究成果]

八木-宇田アレーアンテナから成る
忍者アレーアンテナの実験的検討今野 佳祐[†], 陳 強[†]東北大学大学院工学研究科 通信工学専攻[†]

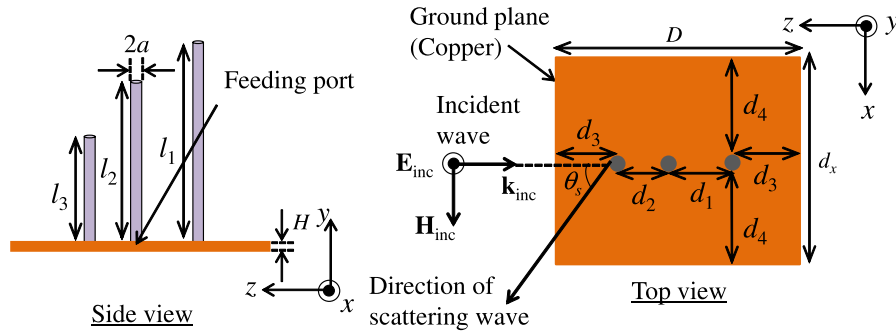
1 まえがき

フェーズドアレーアンテナは、レーダーや無線通信、マイクロ波イメージングなどの様々な用途で用いられてきた [1]。フェーズドアレーアンテナは、しばしば同一素子から成る周期構造として設計され、その後方散乱波の振幅は大きくなる。大きな後方散乱波は、他の電子機器への干渉問題を引き起こしかねないので、可能な限り抑圧すべきである。

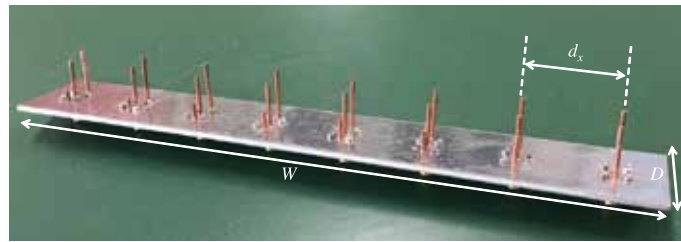
フェーズドアレーアンテナの後方散乱波を低減するために様々な手法が提案されてきた。最も効果的な手法の 1 つは、散乱体を用いてアレーアンテナを囲う、あるいは覆うことである。このような手法の一種として、いわゆるメタサーフェスがフェーズドアレーアンテナのレーダー散乱断面積 (Radar cross section, RCS) を低減するのに応用されてきた。メタサーフェスを装荷した低 RCS のフェーズドアレーアンテナがいくつも提案され、その散乱/放射特性が数値的・実験的に明らかにされてきた [2]-[4]。これらのメタサーフェスは、いずれもそれらの散乱波がフェーズドアレーアンテナおよび反射板のそれと打ち消し合うように設計されている。メタサーフェスを装荷したフェーズドアレーアンテナに関する過去の研究では、フェーズドアレーアンテナの RCS 低減に注目したものが多く、その放射特性、とりわけビーム走査特性に注目したものはなかった。このようなメタサーフェスを装荷したフェーズドアレーアンテナの欠点の 1 つは、フェーズドアレーにメタサーフェスという余計な散乱体を装荷することによる構造の複雑さである。

近年、我々のグループは新しい低後方散乱のフェーズドアレーアンテナを提案し、そのアレーアンテナを日本古来の諜報員になぞらえて忍者アレーアンテナと名付けた [5]-[7]。忍者アレーアンテナは、非同一素子からなる低後方散乱フェーズドアレーアンテナである。非同一素子の寸法を調整することで、忍者アレーアンテナの散乱波を鏡面反射方向 (つまり、入射波が到来する方向) からずらすことができる。その結果、忍者アレーアンテナの後方散乱波の振幅は、その動作周波数帯域に亘って小さくなる。メタサーフェスを装荷したフェーズドアレーアンテナと比較して、忍者アレーアンテナの大きな利点の 1 つは、余計な散乱体の装荷がないことによる構造の単純さである。また、メタサーフェスを装荷したフェーズドアレーアンテナは後方散乱が小さくなるように設計されるのに対して、忍者アレーアンテナは散乱パターン設計に自由度があり、アレーエレメントパターンを用いた非同一素子の励振方法も明らかにされている。これまでの研究では、忍者アレーアンテナの散乱パターンとビーム走査性能が数値シミュレーションに示された一方で、実験的にその特性は明らかにされていない。

本報告では、前年度の報告で述べた忍者アレーアンテナの低後方散乱性能を実験的に明らかに



(a) 有限の反射板を有する八木-宇田モノポールアンテナ素子の構造.



(b) 試作した8つの八木-宇田モノポール素子から成る1次元忍者アレーアンテナ.

図 1: 八木-宇田アンテナ素子と試作した忍者アレーアンテナ.

する [8]. モーメント法によって設計された非同一の八木-宇田モノポールアンテナから成る 1 次元忍者アレーアンテナを設計・試作した. 試作した忍者アレーアンテナの散乱/放射パターンが測定され, 試作した忍者アレーアンテナがビーム走査性能を損なうことなく低後方散乱性能を示すことが明らかにされる.

2 忍者アレーアンテナの設計

八木-宇田アンテナ素子から成る忍者アレーアンテナの散乱/放射特性が過去の研究で明らかにされているのに倣い, 本報告では忍者アレーアンテナ素子として八木-宇田アンテナ素子を用いた [5]. 測定の際に平衡-不平衡変換器が不要なことから, 文献 [5] で用いられた八木-宇田ダイポール素子の代わりに, 本報告では有限の反射板を有する八木-宇田モノポール素子が用いられる.

有限の反射板を有する八木-宇田モノポール素子の構造は図 1(a) に示す. 忍者アレーアンテナはパッシブな散乱体ではなくフェーズドアレーアンテナであるので, 数値シミュレーションの際に素子の給電ポートは $50 \, \Omega$ 抵抗で終端する. 動作周波数は $f = 4 \, \text{GHz}$ であり, 忍者アレーアンテナは散乱波の主ビーム方向が $(\theta, \phi) = (\theta_s, \phi_s)$ に向くように設計される. 本報告では一例として, $(\theta_s, \phi_s) = (20^\circ, 0)$ として忍者アレーアンテナを設計した. 導波器長 ($= l_3$) を除く八木-宇田モノポール素子の寸法は数値シミュレーションの前に予め設計されており, $l_1 = 23 \, \text{mm}$, $l_2 = 19 \, \text{mm}$,

$a = 0.5$ mm, $H = 0.3$ mm, $d_1 = 10$ mm, $d_2 = 5$ mm, $d_3 = 15$ mm, $d_4 = 19$ mm, $d_x = 38$ mm, and $D = 45$ mm とした. 八木-宇田モノポール素子は垂直入射の平面波で励振され, (θ_s, ϕ_s) 方向への散乱波の位相が l_3 の関数として求められる. 数値シミュレーションの結果, l_3 を 5 mm から 19 mm に変化させると 250° に亘る線形な位相変化が得られることが分かった.

散乱波の位相の数値シミュレーション結果に基づき, 8 素子の八木-宇田素子から成る 1 次元忍者アレーアンテナが設計/試作された. 試作された忍者アレーアンテナは図 1(b) に示す. 各素子の散乱波の位相が (θ_s, ϕ_s) で同相となるように設計されているため, 各アレー素子における導波器長 ($= l_3$) が非同一であることに注意されたい. ここでは 1 例として, 図 1(b) の左端にあるアンテナ素子の導波器長が 5 mm として忍者アレーアンテナを設計した. 図 1(b) の左端から見て, 他のアンテナ素子の導波器長 l_e はそれぞれ 5, 10, 14, 16, 19, 5, 7, 10 mm である. アレー素子間隔は $d_x = 38$ mm ($= 0.507\lambda@4$ GHz) であり, 反射板のサイズは $W \times D = 304 \times 45$ mm² である. なお, 忍者アレーアンテナの設計の詳細については文献を参考にされたい [5], [8].

3 測定結果

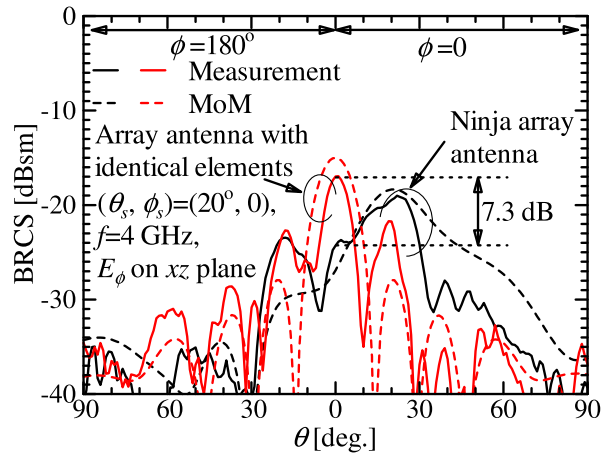
3.1 散乱特性

試作した 1 次元忍者アレーアンテナのバイスタティックレーダー散乱断面積 (Bistatic radar cross section, BRCS) は電波無響室で測定した. 送受信アンテナとしてダブルリッジドホーンアンテナ (Schwarzbeck BBHA9120D) を用いた. 送信アンテナと被測定アンテナとの間隔は 0.7 m, 受信アンテナと被測定アンテナとの間隔は 2.4 m とした. これらのアンテナ間隔は, この測定環境で得られる最大のものであるが, 被測定アンテナは送受信アンテナから見て遠方界の距離にない (つまり, 測定した遠方界に近傍界が含まれる) ことに注意されたい. 測定の間, 忍者アレーアンテナの給電素子は 50Ω で終端されている.

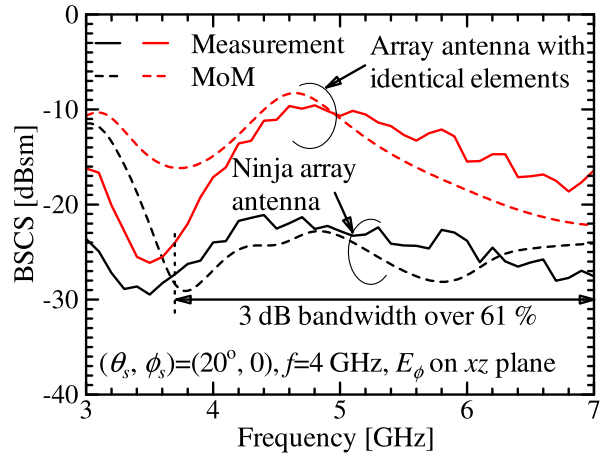
試作した忍者アレーアンテナの BRCS パターンは図 2(a) に示す. 参考までに, 同一素子 ($l_3 = 15$ mm で, その他の寸法は忍者アレーアンテナのそれと同じ) から成る八木-宇田アレーアンテナの BRCS パターンのシミュレーション/測定結果が示されている. BRCS の測定結果およびシミュレーション結果はよく一致していることが分かる. 設計された忍者アレーアンテナの主ビームは $(\theta, \phi) = (\theta_s, \phi_s)$ に向いており, 鏡面反射方向には向いていない. その結果, 試作した忍者アレーアンテナの後方散乱波の振幅は, 同一素子から成る八木-宇田アレーアンテナのそれと比較して 7.3 dB 低くなっている. その一方で, 測定した後方散乱断面積 (Backscattering cross section, BSCS) の周波数特性は図 2(b) に示す. ここで, BSCS の 3 dB 帯域は以下の式で定義される.

$$3 \text{ dB bandwidth} = \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1} \times 200 \quad [\%]. \quad (1)$$

f_1 と f_2 は, 試作した忍者アレーアンテナの BSCS が, 試作した八木-宇田アレーアンテナのそれと比較して 3 dB 低くなる周波数の下限と上限である. $f_1 = 3.7$ GHz, $f_2 > 7$ GHz であることから, 試作した忍者アレーアンテナの BSCS の 3 dB 帯域は, 61%以上であることが分かる. これら



(a) BRCS パターン.



(b) BSCS の周波数特性.

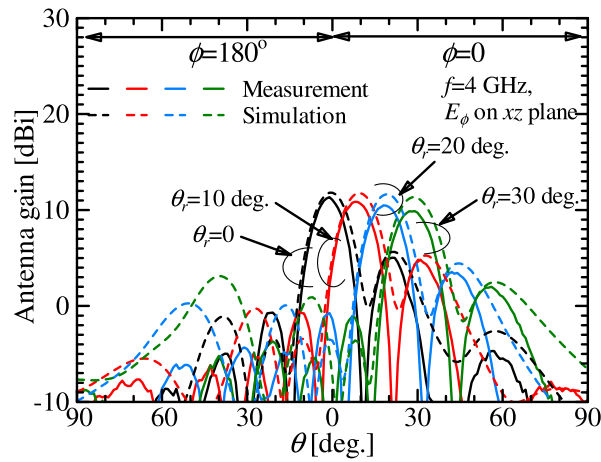
(c) アンテナ利得パターン (主ビーム方向は $\theta = \theta_r$).

図 2: 設計/試作した八木-宇田モノポールアンテナ素子から成る忍者アレーアンテナの性能の数値計算/実験結果 (図中の MoM および Simulation はモーメント法による数値計算結果.).

の測定結果から、設計した忍者アレーアンテナの低後方散乱性能が実験的に示されたと言える。測定結果とシミュレーション結果との間の違いは、試作誤差や測定誤差、および近傍界の影響によるものと考えられる。

3.2 放射特性

xz 面でのアレーエレメントパターンの測定結果から、試作した忍者アレーアンテナの放射特性を求めた。忍者アレーアンテナのアンテナ利得パターンは、アレーエレメントパターンの重み付き和として求めた。過去の研究では、アレーエレメントパターンを用いて重みを求め、忍者アレーアンテナのビーム走査を可能にする手法を提案したが、ここでは簡単のため、近似的にアレーファクタを用いて重みを与える [5]。

試作した忍者アレーアンテナのアンテナ利得パターンは図 2(c) に示す。アンテナ利得パターンの実験結果は、アレーエレメントパターンの重み付き和として求めたのに対し、数値シミュレーション結果は同じ重みを与えたアレーアンテナの Full-wave 解析から得た。数値シミュレーション結果と実験結果がよく一致していることが分かる。測定結果とシミュレーション結果との間の違いは、試作誤差や測定誤差、および近傍界の影響によるものと考えられる。

4 まとめ

本報告では、忍者アレーアンテナの散乱/放射特性が実験的に明らかにされた。忍者アレーアンテナは、非同一の八木-宇田モノポールアンテナから成る。8 素子の八木-宇田モノポール素子から成る 1 次元の忍者アレーアンテナが試作され、その低後方散乱性能とビーム走査性能が実験的に明らかにされた。

謝辞

本研究成果は、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータ SX-ACE を用いて得られた成果 [5] および [6] を発展させたものであり、その内容は学術論文 [7] として採録された。スタッフをはじめ、関係各位に深く感謝する。

参考文献

- [1] R.C. Hansen, Phased Array Antennas, John Wiley & Sons, 1998.
- [2] Y. Zhao, X. Cao, J. Gao, L. Xu, X. Liu, and L. Cong, “Broadband Low-RCS Circularly Polarized Array Using Metasurface-Based Element,” IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. 16, pp. 1836-1839, 2017.

- [3] L. Cong , X. Cao, J. Gao, and T. Song, “Ultra-Wideband Low-RCS Circularly-Polarized Metasurface-Based Array Antenna Using Tightly-Coupled Anisotropic Element,” *IEEE Access*, vol. 6, pp.41738-41744, 2018.
- [4] Y. Zhao, J. Gao, X. Cao, T. Liu, L. Xu, X. Liu, and L. Cong, “In-Band RCS Reduction of Waveguide Slot Array Using Metasurface Bars,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, no. 2, pp.943-947, Feb. 2017.
- [5] K. Konno, Q. Yuan, and Q. Chen, “Ninja Array Antenna: Novel Approach for Low Backscattering Phased Array Antenna,” *IET Microw. Antennas Propag.*, vol.12, no.3, pp.346-353, 2018.
- [6] K. Konno, Q. Chen and Q. Yuan, “Scattering and Radiation Performance of Ninja Array Antennas,” *Proc. APMC2018*, FR3-IF-30, pp.1-3, Nov. 2018.
- [7] K. Konno, K. Morita, Q. Chen, and Q. Yuan, “Experimental Study of Ninja Array Antenna Composed of Yagi-Uda Antennas,” *IEICE Commun. Express*, vol. 8, no.12, pp.554-559, Dec. 2019.
- [8] 今野 佳祐, 陳 強, “忍者アレーアンテナ -後方散乱の小さいフェーズドアレーアンテナ-, ” 東北大学サイバーサイエンスセンター広報誌 SENAC, vol. 51, no. 4, pp.1-9, 2018 年 10 月.