

電波の届かない領域をなくすための 方向制御反射板の研究

高い周波数を用いた高速広帯域通信の実現に向けて、見通し以外の場所に電波が届かないという問題を改善し、反射波の方向制御を可能とする反射板について検討を行った。その結果、偏波共用素子と周波数選択板を組み合わせ、所望波のみを不感地に向けて散乱し、他のシステムには影響を与えない方向制御反射板を実現した。なお、本研究は東北大学大学院 工学研究科 電磁波工学分野 澤谷研究室（澤谷 邦男教授）との共同研究により実施した。また、本論文の研究内容はISAP2008において「Best Paper Award」を受賞した。

先進技術研究所

まるやま たまみ みるの たつお
丸山 珠美 古野 辰男うえばやし しんじ †
上林 真司

1. まえがき

近年、高い周波数を用いた無線通信システムの研究と、その標準化が進んでいる[1]。高い周波数帯では、高速大容量通信に必要な、広い帯域を確保することが期待できる。しかし、周波数が高くなるにつれて、反射や回折による伝搬損失が多くなり見通し外でのエリアの確保が困難になるため、移動通信において高い周波数を用いることは難しかった。

そこで、反射板をビルなどの屋上、あるいは窓に設置し反射波を利用する不感地解消法について検討を行った。通常の金属反射板は電波を鏡面反射するため、反射方向が限られてしまう。例えば、水平方向から伝搬してきた電波を高層ビルの陰に

向けるためには、反射板を大きくせり出さなくてはならず、実用的ではない。そのため、著者らは任意の方向に反射波を制御することの可能な方向制御反射板を用いたシステムを提案し[2][3]、リフレクター^{*1}[2][4][5]およびメタマテリアル[3][6]を応用した反射方向制御法について検討を行った。従来のリフレクターは大型反射鏡アンテナの反射鏡や一次放射器^{*2}に使用されており、マイクロストリップアレー^{*3}が主に用いられている[4][7][8]。

本稿では、移動通信環境でリフレクターを使用するため、構造物からの反射・回折による偏波の回転に対応するとともに、周波数選択性をもち所望波のみ反射方向を制御し、ほかの周波数では透明な存在と

なる新たな構造として、クロスダイポール・ループリフレクター^{*4}[2]を提案する。なお、本研究は、日本のアンテナ・伝搬工学および電波伝送工学の分野において長く実績のある東北大学 澤谷研究室との共同研究によって得た、新たなリフレクターに関する成果である[2]。

2. 偏波共用・周波数選択リフレクター

移動通信におけるリフレクターを用いた不感地解消方法の概観を図1に示す。図1のような高層ビルなどの影では電波が届きにくくなる。これに対して反射板からの散乱波を応用した伝搬環境改善が考えられるが、金属反射板を図1のようにビルの屋上に設置すると、入射角

† 現在、中京大学 情報理工学部

*1 リフレクター：反射板を反射素子のアレー（配列）で構成したもの。
*2 一次放射器：パラボラアンテナのように反射鏡を含む構成のアンテナにおいて、反射鏡に向けて電波を放射する装置。

*3 マイクロストリップアレー：リフレクターを構成するアレー素子がマイクロストリップアンテナのように方形パッチで構成されているもの。

θ_i と反射させたい方向 θ_r が異なるため、所望方向に反射波を散乱させることができなかつた。また、金属反射板の場合は、反射板に入射するすべての電波を鏡面反射してしまうため、他のシステムで用いている電波も反射し、干渉発生あるいは反射板の裏側が届きにくくなるなどの問題が考えられる。また屋外移動通信環境では、送信アンテナから垂直偏波で送信された電波が、屋外の複雑な構造物からの散乱による偏波の回転のため、垂直成分と水平成分を併せもった電波として反射板に到来すると考えられる。そこで、垂直と水平の両成分に反射板を対応させるため、偏波共用可能な素子と周波数選択性をもつ地板でアレーを構成する方向制御反射板として、クロスダイポール・ループリフレクタレーについて検討を行った。クロスダイポール・ループリフレクタレーの構造を図2に示す。本研究では高い周波数における方向制御反射板の適用に関する基本検討のため、解析に用いた周波数を24GHzとした。まず、提案する方向制御反射板の周波

数選択性について述べる。周波数を横軸にとってループアレーに対する反射係数および透過係数を解析した結果を図3に示す。このとき入射波は、ループアレーの上部から平面波で与えられる。ここでループの間隔は約半波長、ループの周囲長を約1波長とし、実際の値は誘電体基板^{*5}の電気定数を考慮したシミュレーションによって決めている。また解析は周期境界条件を用い、ループ構造の無限周期アレーとして扱っている。図3より、反射係数についてみると、本アレーが所望の24GHzで最も高い値となっていること、透過係数についてみると、24GHzで最も小さな値となっていることが分かる。すなわち、ループアレーが所望の周波数(24GHz)のみを反射させるとともに、それ以外の周波数を透過する周波数選択機能を有していることが確認できる。なお、基板の下面をループ、上面をクロスダイポールとした、クロスダイポールの長さに対する反射係数の値は、入射波の磁界が反射面に直交するTM入射^{*6}の場合も、入射波の電

界が反射面に直交するTE入射^{*7}の場合も、ほぼ同じ値となる。詳細は文献[2]を参照されたい。

次に、反射方向を制御するためのクロスダイポールの設計法について述べる。リフレクタレーに任意の方向から平面波が入射し、所望方向に向かって反射するときの伝搬距離は、図4のリフレクタレーに対する入射方向と反射方向を示すベクトル図で表される。送信点から反射板の各素子 (m, n^{th} patch) までの伝搬距離 $R_{mn} = |\vec{r}_{mn} - \vec{r}_T|$ 、および反射板の各素子から受信点までの伝搬距離 $\vec{r}_{mn} \cdot \hat{u}_0$ の素子ごとの違いによって生じる位相差が、所望反射方向に直交する面に対して揃うように、クロスダイポールの素子の反射位相 ϕ_{mn} を式(1)で与える。ここで k_0 は波数、 \vec{r}_{mn} は素子 (m, n^{th} patch) の位置ベクトル、 \hat{u}_0 は所望の反射方向の単位ベクトルを示している。

$$\phi_{mn} - k_0 (R_{mn} + \vec{r}_{mn} \cdot \hat{u}_0) = 2p\pi, \quad p=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1)$$

クロスダイポールの素子長と反射

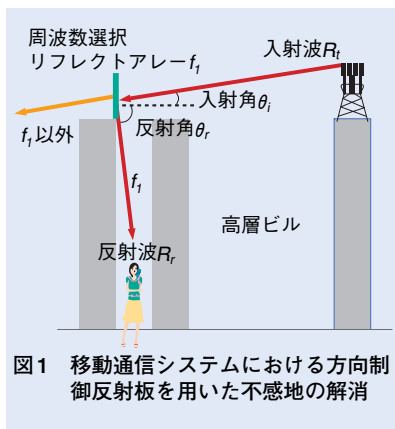


図1 移動通信システムにおける方向制御反射板を用いた不感地の解消

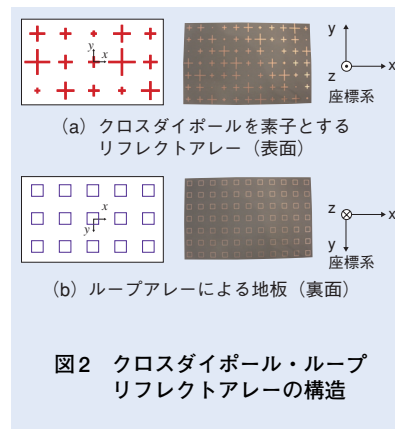


図2 クロスダイポール・ループリフレクタレーの構造

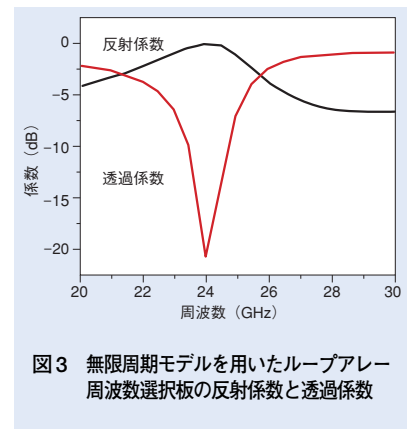


図3 無限周期モデルを用いたループアレー周波数選択板の反射係数と透過係数

*4 クロスダイポール・ループリフレクタレー：リフレクタレーを構成するアレー素子をクロスダイポールとし、リフレクタレーを構成する金属地板を方形ループのアレーで構成したリフレクタレーであり、共同研究の著者らによる本論文

にてはじめて提案された構成である。
*5 誘電体基板：直流を通さない絶縁体の基板であって、絶縁体として誘電性の高い材料を用いたもの。通常金属板と多層構成し、回路、アンテナなどの材料として用いる。

*6 TM入射：入射面に磁界が直交する電磁波の入射。
*7 TE入射：入射面に電界が直交する電磁波の入射。

位相の関係を図5に示す。ここで解析は、周期境界条件を用いて無限周期のクロスダイポールを構成し行った。クロスダイポール長を0.2~6.8mm変化させることにより、反射波の位相を約70~-230°の約300°の範囲で変化させられることが分かる。図2の構造は、基板に対して座標を図2に示すように定めたとときの球面座標を用いて、入射波の角度を $(\theta_i, \phi_i) = (20^\circ, -90^\circ)$ としたとき、反射波の方向が $(\theta_r, \phi_r) = (30^\circ, 0^\circ)$ となるように、各素子の長さを図5の反射位相と素子長の関係から求めた結果である。本研究では、反射板を伝搬における偏波の回転に対応させるため、垂直成分も水平成分も同じ方向に反射するように設計している。このため、水平方向の素子長も垂直方向の素子長も同じ長さとしており、反射位相は同じ値になる。本反射板の遠方散乱界^{*8}をシミュレーションによって求めた(図6)。図6は θ を横軸にとり図2の座標系のZX面($\phi = 0^\circ$ 面)における遠方散乱界を最大値で規格化して示している。Y軸に平行な入射に対して、Y軸方向のダイポール素子が動作し、X軸に平行な入射に対して、X軸方向のダイポール素子が動作しており、どちらの入射に対しても所望反射方向の $(\theta_r, \phi_r) = (30^\circ, 0^\circ)$ でレベルが高くなっている様子が分かる。図6において実線は正偏波^{*9}、破線は交差偏波^{*10}を示しており、交差偏波が小さいことが分かる。次に、測定はドコモ先進技術研究所電波暗室において構築した、

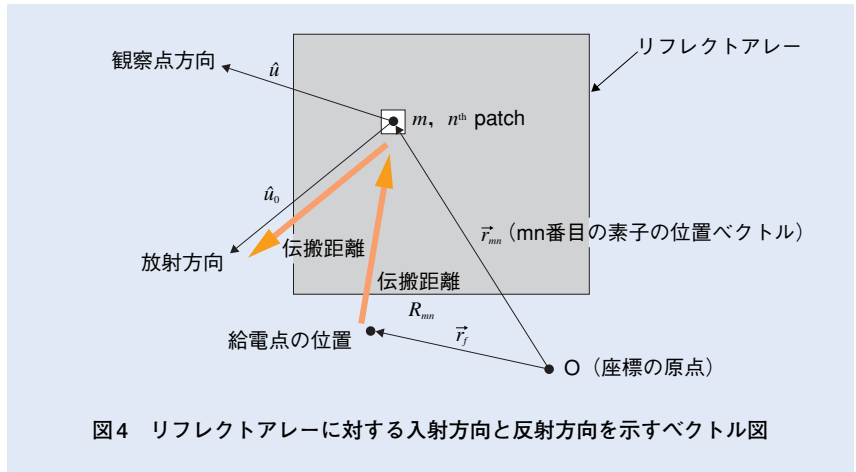


図4 リフレクトアレーに対する入射方向と反射方向を示すベクトル図

反射透過測定システムを用いて行った。実験の様子を図7に示す。送信アンテナを $(\theta_i, \phi_i) = (20^\circ, -90^\circ)$ となるように固定し、 $\psi = 0^\circ$ で一定となる面で受信アンテナを、中心から1,100mmの半径で動かして測定した。なお、測定は電波暗室全体の大きさと実験装置が適応可能な周波数を選択し12GHzを用いて行い、測定用の方向制御反射板も周波数スケールモデル^{*11}を用いて12GHzで作成した。X軸およびY軸に平行な入射に対する測定値を図8に示す。

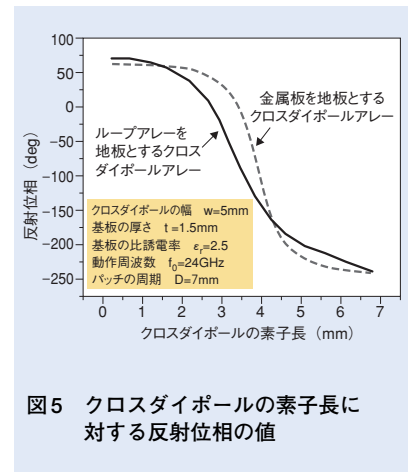


図5 クロスダイポールの素子長に対する反射位相の値

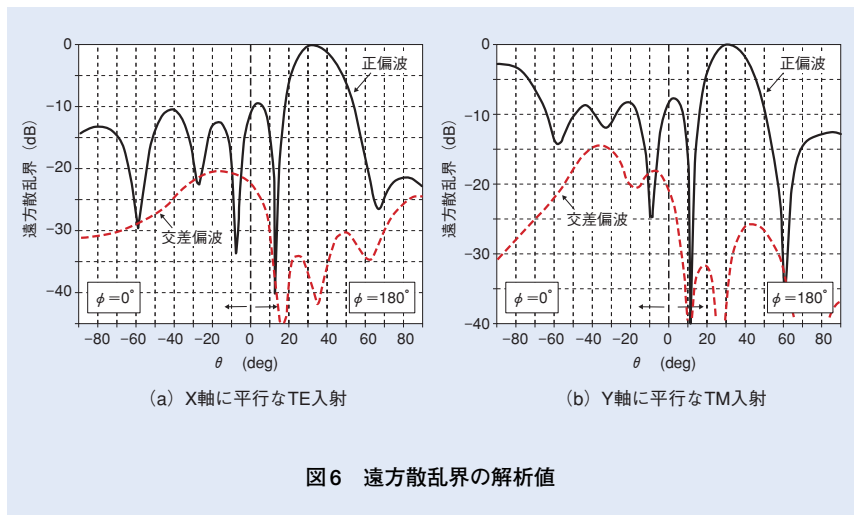


図6 遠方散乱界の解析値

*8 遠方散乱界：アンテナのように給電されて放射する電磁界を放射界と呼ぶのに対して、球体など構造物に電波が当たって散乱する電磁界を散乱界と呼ぶ。散乱電磁界は、散乱体の距離に比例する項、距離の2乗に比例する項、距離の3乗に比例

する項の和で表すことができる。遠方散乱界とは、距離に比例する項だけで近似できるほど十分に遠方における散乱電磁界のことである。

*9 正偏波：受信アンテナの偏波と同じ向きの偏波。

*10 交差偏波：受信アンテナの偏波と直交する向きの偏波。

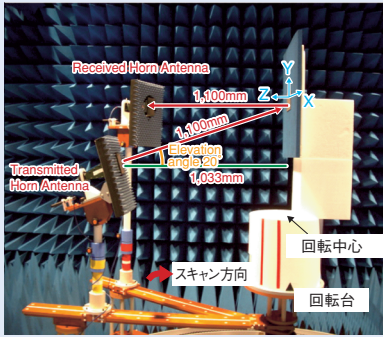


図7 リフレクトアレーの反射波および透過波の測定システム

どちらの偏波で入射した場合も解析値と同様に、反射波の方向が $(\theta_r, \psi_r) = (30^\circ, 0^\circ)$ となっていることが確認できる。なお、図8の測定においては送信と受信のケーブルを直結した場合の受信レベルを0dBと定義し、そこからの劣化量を示している。

表面をクロスダイポール、裏面を周波数選択ループアレーで構成したリフレクトアレーは、水平、垂直両偏波とも反射波を所望方向に制御できることおよび所望の周波数のみを反射させ、それ以外の周波数は透過できることを実験と解析によって明らかにした。

3. あとがき

将来の高速・広帯域通信システムの実現に向けて、周波数が高くなるにつれて問題となるエリア確保を可能とする、方向制御反射板について検討を行った。リフレクトアレーを構成する素子にクロスダイポール

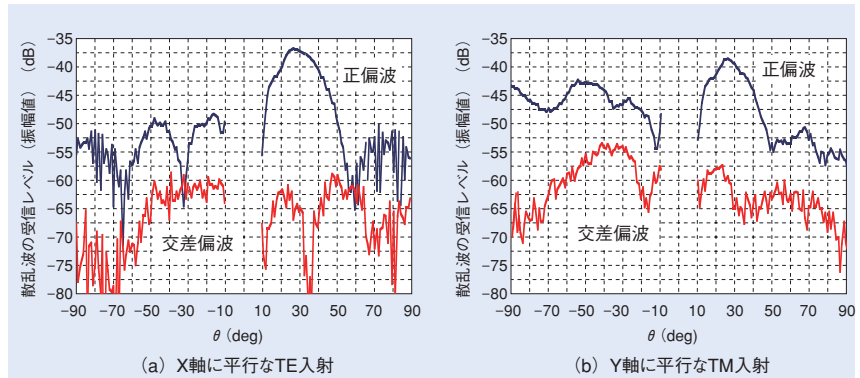


図8 遠方散乱界の測定値

を、地板にループアレーを用いた反射板は、水平・垂直いずれの偏波で到来してきた入射波に対して、どちらも同じ方向に制御することが可能であり、構造物による偏波の回転に対応させることができるとともに、地板に周波数選択性があるため、所望の周波数のみを制御して反射し、他の周波数は透過させることが可能である。このため、他のシステムに影響を与えない。今後は実伝搬環境における本反射板による伝搬環境改善効果の確認を行う予定である。

文献

[1] R. Fisher : "60 GHz WPAN Standardization within IEEE 802.15.3c," In Proc. ISSSE '07, pp. 103-105, 2007.
 [2] L. Li, Q. Chen, Q. Yuan, K. Sawaya, T. Maruyama, T. Furuno and S. Uebayashi : "Microstrip Reflectarray Using Crossed-Dipole with Frequency Selective Surface of Loops," ISAP2008, TP-C05, 1645278, 2008.
 [3] T. Maruyama, T. Furuno and S. Uebayashi : "Experiment and Analysis

of Reflect Beam Direction Control using a Reflector having Periodic Tapered Mushroom-like Structure," ISAP2008, MO-IS1, 1644929, p.9, 2008.

[4] D. M. Pozar, T. S. Targonsky and H. D. Syrigos : "Design of millimeter wave microstrip reflectarrays," IEEE Trans. Antennas Propagation, Vol. 45, No. 2, pp. 287-295, 1997.
 [5] L. Li, Q. Chen, Q. Yuan, K. Sawaya, T. Maruyama, T. Furuno and S. Uebayashi : "Novel Broadband Planar Reflectarray with Parasitic Dipoles for Wireless Communication Applications," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 8, pp. 881-885, 2009.
 [6] N. Engheta and W. Ziolkowski : "Metamaterials," IEEE press, pp. 285-311, 2006.
 [7] D. Pilz and W. Menzel : "Full wave analysis of a planar reflector antenna," In Proc. Asia-Pacific Microwave Conference, Vol.1, pp. 225-227, Dec. 1997.
 [8] J. Huang and R. J. Pogorzelski : "A Ka-band microstrip reflectarray with elements having variable rotation angles," IEEE Trans. Antennas Propagation, Vol. 46, pp. 650-656, May 1998.

* 11 スケールモデル：異なる周波数で設計寸法と同じ波長サイズとなるように設計したモデル。周波数が変わると波長の大きさが変わり寸法が変化するため、スケールモデルと呼ぶ。