

マッシュルーム型リフレクタレー素子の散乱特性の数値シミュレーション

伊東 大貴, 今野 佳祐, 陳 強 (東北大学大学院工学研究科),

概要: 伝搬環境の改善を目的として, 近年では平面型のリフレクタレーアンテナが用いられている. しかし, 実効開口面積が著しく小さくなり, 利得が低下することから, 平面型リフレクタレーで広角な散乱角を実現することは困難である. 本報告ではマッシュルーム構造を持つリフレクタレー素子を提案する. マッシュルーム構造を持つリフレクタレー素子は立体構造であるため, 広い角度範囲に亘って強い散乱波を出すことが予想され, 広角なリフレクタレーを実現する素子として期待できる. 以下ではモーメント法を用いた数値シミュレーションによりマッシュルーム構造を有するリフレクタレー素子の散乱特性を評価する. また, 平面波を垂直に入射した場のリフレクタレー素子の反射係数の位相特性をそれぞれ算出する.

キーワード: リフレクタレー, マッシュルーム構造

1. まえがき

現在の移動体通信システムにおいて, 高層ビルによって基地局アンテナからの電波がビル間に届きにくいという問題が発生している. このような電波の届かない地帯は不感地帯と呼ばれる. 電波は周波数が高くなるにつれて, 電波の直進性は高くなり, 電波はビル間へ届きにくくなる. また, 周波数が高くなると伝搬損失も増大するため, 今後この不感地帯はさらに増加すると予測される. このような不感地帯の増加は, 移動体通信システムの信頼性を損なうため, 高層ビルが存在する都市部での伝搬環境を改善し, 不感地帯を解消することが必要である. そこでリフレクタレーをビルに設置し, 基地局からの電波を不感地帯の方向に散乱させることで伝搬環境を改善するという試みが報告されている [1]-[3].

リフレクタレーとは入射波を設計した所望の方向に強く散乱させることができる散乱体であり, マイクロストリップ素子から成る平面型のリフレクタレーがよく用いられる [4]. リフレクタレーは一次放射器と反射面で構成され, 反射面は大きさの異なる多数のリフレクタレー素子から成る. 先行研究では, 垂直方向からの入射波を 60° 方向に散乱させる平面型リフレクタレーが設計されている [5]. そして, 設計したリフレクタレーをビル屋上に配置することで, 市街地の伝搬環境が改善できることを実験的に明らかにした [6]. しかしながら, 2次元的な構造を有する平面型のリフレクタレーでは, 所望の散乱波の角度が垂直方向からずれるほど実行開口面積が小さくなり, 利得が低下するという問題がある. 従って, 平面型リフレクタレーでは 60° を超える散乱角の実現は困難である.

本報告では, マッシュルーム構造を持つリフレクタレー素子を提案する. マッシュルーム構造を有したリフレクタレー素子は立体的な形をしているため, 垂直方向から大きくずれた方向でも一定の実効開口面積を保つことができる. 従って, マッシュルーム構造を持つ素子から成るリフレクタレーには, 広角な散乱特性が期待で

きる. マッシュルーム構造の 1 つである T 型ダイポール素子の散乱特性を数値的に求め, 一般的なダイポール素子の散乱特性と比較した. また, 平面波を垂直に入射した場合のリフレクタレー素子の反射係数の位相特性をそれぞれ数値的に求め, T 型ダイポールの構造パラメータに対して, 散乱波の位相と振幅がどのように変わるかを明らかにした.

本報告の構成を以下に示す. まず 2 章では解析モデルを示し, 散乱特性の数値シミュレーション法について述べる. 3 章では数値シミュレーションによるリフレクタレー素子の散乱特性を示した後, 4 章にてまとめる.

2. 解析モデル

2.1 リフレクタレーの原理

ここではリフレクタレーの基本的な原理について説明する. 図 1 に示すように, 各リフレクタレー素子に一次放射器から電波が入射されるとする. このとき, 各アレー素子は入射された電磁波を散乱させる. 各々のアレー素子と一次放射器の距離が異なること, 及びリフレクタレー素子の位置が異なることから各リフレクタレー素子に入射する電磁波の位相や振幅は異なる. よってアレー素子毎に散乱電界の位相と振幅は異なったものとなる. θ, ϕ 方向における M 個のアレー素子からの散乱電界の和 $\mathbf{E}_t(\theta, \phi)$ は以下のようになる.

$$\mathbf{E}_t(\theta, \phi) = \sum_{m=1}^M \mathbf{E}_m(\theta, \phi) \quad (1)$$

$\mathbf{E}_m(\theta, \phi)$ は θ, ϕ 方向における m 番目のアレー素子の散乱電界である. 式 (1) より入射波を所望の方向に強く散乱させるためには全素子の散乱電界がその方向において同相となれば良いことが分かる. しかしながら, 一次放射器とリフレクタレー素子との距離がそれぞれ異なるため, アレー素子の位置に応じた経路差が発生し, 各素子からの散乱電界には以下の式で表される位相差 φ が生じる.

$$\varphi = k_0 m d \sin \theta \quad (2)$$

ここで k_0 は自由空間における波数, d はアレー素子間隔である. したがって, 所望の方向で各素子の散乱電界を同相にするためには素子の大きさを変えて位相差 φ を補償することが必要である.

このように, 素子の大きさを変えることで, 入射波の位相を回転させ, 所望の方向に強いビームを形成する構造がリフレクタレーである. 従って, リフレクタレーを設計する際には, 素子の大きさと位相の回転量との関係を定量的に知っておく必要がある.

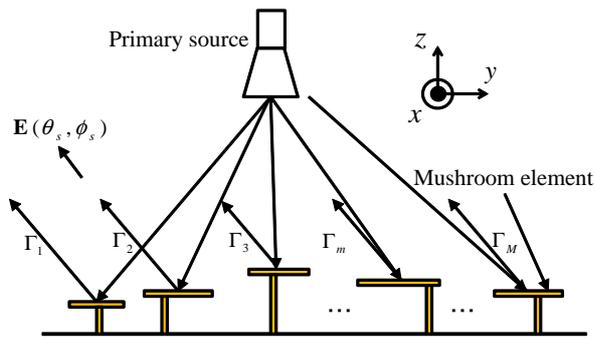


図 1: マッシュルーム型素子を用いたリフレクタレー

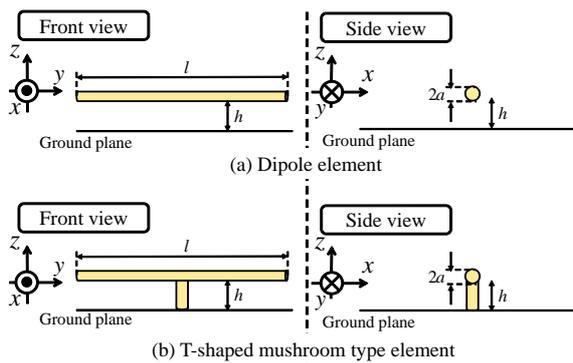


図 2: リフレクタレー素子

2.2 マッシュルーム型リフレクタレー素子

ダイポール素子から無限大のグラウンド板に対しショートピンを接続したマッシュルーム型シフレクタレー素子と無限大の反射板付きダイポール素子のモデルを図 2 に示す。ダイポール素子は長さ l を変えて入射波の位相を回転させるのに対し、マッシュルーム型素子はダイポール素子部の長さ l 、ショートピンの長さ h 、ショートピンの位置 y を変えることで入射波の位相を回転させる。従って、マッシュルーム型素子の方が、ダイポール素子と比べて設計の自由度が大きい。

3. 数値シミュレーション結果

初めに 2 つのリフレクタレー素子の散乱特性の算出法について説明する。まず、2 つの素子に対して平面波を垂直方向に入射させる。次にモーメント法を用いて各素子の電流を算出する。このとき、グラウンド板による影響を考慮するため鏡像法を使う。そして、得られた電流から素子の遠方界を計算する。ここで、入射波の角度を (θ_{in}, ϕ_{in}) 、算出した散乱波の角度を (θ_s, ϕ_s) とした。

3.1 RCS パターン

RCS(Radar Cross Section) パターンによって、素子の散乱電界の振幅の方向特性を評価する。RCS とは散乱体

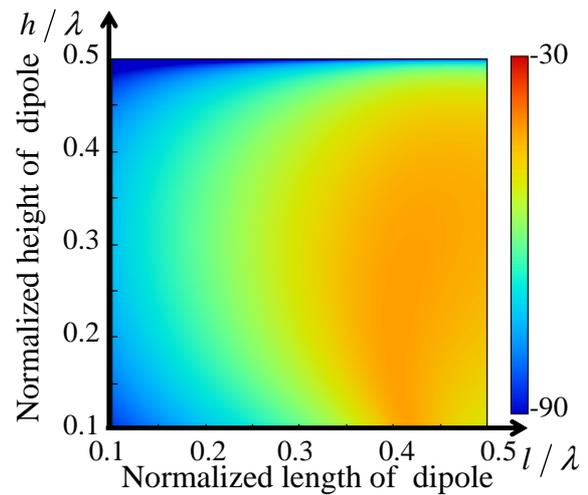


図 3: ダイポール素子の RCS 特性

がに電波を散乱させる能力の尺度であり、以下の式で示される。

$$RCS = \lim_{R \rightarrow \infty} \left[4\pi R^2 \frac{|\mathbf{E}_s|^2}{|\mathbf{E}_i|^2} \right] \quad (3)$$

ここで R は散乱体から観測点までの距離、 \mathbf{E}_s は散乱電界強度、 \mathbf{E}_i は入射電界強度である。図 3 及び図 4 に垂直入射時のダイポール素子と T 型マッシュルーム素子のそれぞれの RCS 特性を示す。このとき、入射波の方向は、 $(\theta_{in}, \phi_{in}) = (0^\circ; 90^\circ)$ 、散乱波の方向は $(\theta_s, \phi_s) = (70^\circ; 90^\circ)$ であり、ショートピンは素子の中心にある。図中の縦軸は波長で規格化された素子の高さ、横軸は波長で規格化されたダイポールの長さを表している。図 3, 4 からダイポール素子と T 型マッシュルーム素子位相特性は同様な値を示した。これにより、ショートピンが中心にある場合には、ショートピンの影響がほとんど得られないことが確認された。また図 5 に T 型マッシュルーム素子のショートピンの位置を移動させたときの反射係数の位相特性を示す。図中の縦軸はショートピンの位置、横軸はダイポールの長さを表している。このときのショートピンの長さは 0.1λ である。図 5 より、ショートピンの位置は中心にある場合よりもそれ以外の地点に設置させた方が入射波を 70° 方向に強く散乱させることが分かった。

3.2 反射係数の位相特性

まずリフレクタレー素子の散乱波の位相特性に求められている性能について説明する。その 1 つとしてリフレクタレー素子の散乱波の最大と最小の位相の差が 360° 程度以上あることが挙げられる。各リフレクタレー素子に入射される平面波はリフレクタレー素子の位置がそれぞれ異なり、各素子と一次放射器との経路差は様々である。リフレクタレーではそれぞれの素子でこの位相差を補償し、所望の方向に置いて反射係数の位相を同

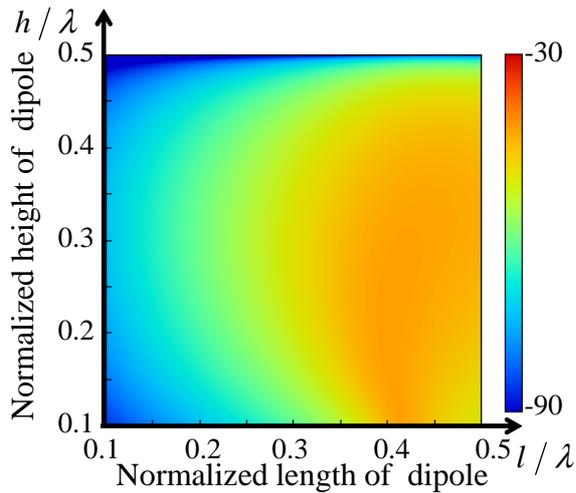


図 4: T 型マッシュルーム素子の RCS 特性

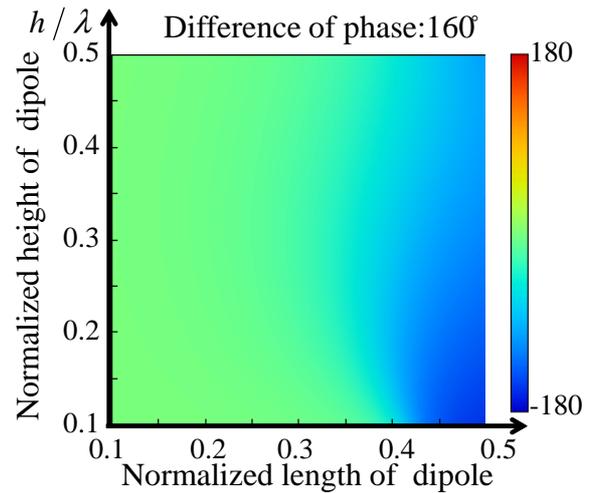


図 6: ダイポール素子の反射係数

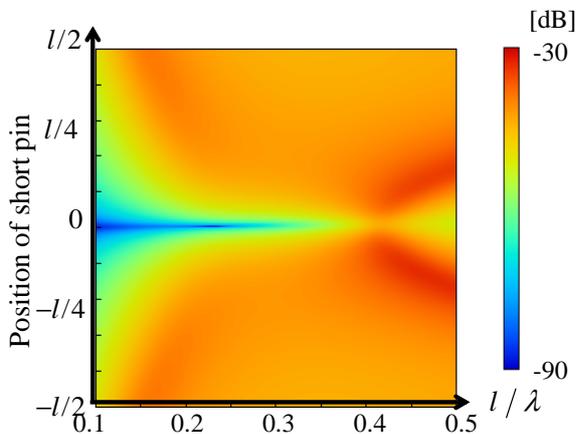


図 5: T 型マッシュルーム素子のショートピンの位置の変化による RCS 特性

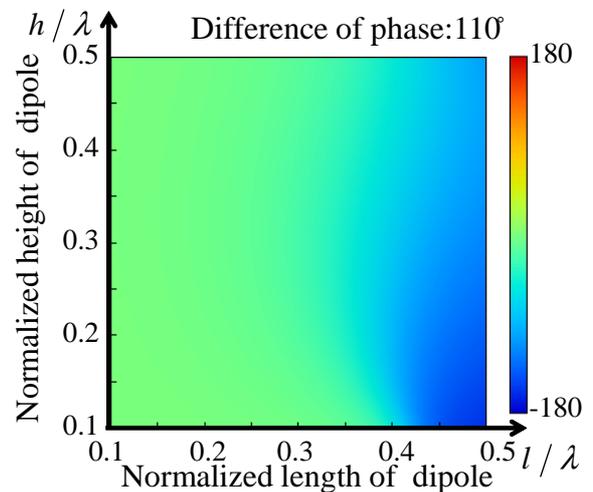


図 7: T 型マッシュルーム素子の反射係数

相にしなければならないため、 360° 全体を補償できることが望ましい。図 6, 7 に平面波を垂直方向から入射した時のダイポール素子と T 型マッシュルーム素子の反射係数の位相特性をそれぞれ示す。このとき、入射波の方向は、 $(\theta_{in}, \phi_{in}) = (0^\circ, 90^\circ)$ 、散乱波の方向は $(\theta_s, \phi_s) = (70^\circ, 90^\circ)$ であり、ショートピンは素子の中心にある。図中の縦軸は波長で規格化された素子の高さ、横軸は波長で規格化されたダイポールの長さを表している。図 6, 7 からダイポール素子の位相差は 160° であり、T 型マッシュルーム素子の位相差は 110° となった。これはリフレクタレー素子としては十分な位相差ではなく、素子の長さや高さを変えただけではリフレクタレー素子に求められている性能は得られないことが言える。図 8 に T 型マッシュルーム素子のショートピンの位置を移動させたときの反射係数の位相特性を示す。横軸はダイポールの長さ、縦軸はショートピンの位置をダイポールの長さで規格化した値を表して。このときのショートピンの長さ

は 0.1λ である図 8 よりショートピンの位置を変えることで 440° に近い位相差を得ることができた。これはリフレクタレーの素子として十分な位相差を得られたといえる。

4. むすび

立体的な構造を持つマッシュルーム型リフレクタレー素子を提案し、その散乱特性を数値的に明らかにした。ダイポール素子とマッシュルーム素子に平面波を垂直入射させたときの散乱特性を数値シミュレーションにより求め、2 つの素子を比較した。その結果、マッシュルーム型素子からの散乱波の位相回転量と振幅は、ショートピンの位置に対して最も依存することが分かった。

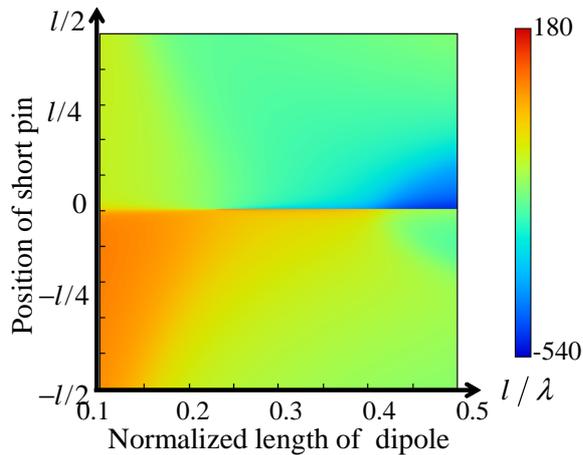


図 8: ショートピンの位置と位相特性の関係

参考文献

- [1] 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 Wireless Propag. Lett.*, vol. 8, pp. 881-885, Aug.2009.
- [2] 陳 強, 澤谷 邦男, "メタリフレクタを用いた伝搬環境の改善技術, " *信学総大*, BI-2-2, pp . 65-66 , 2012 年 3 月 .
- [3] L. Li, Q. Chen, Q. W. Yuan, K. Sawaya, T. Maruyama, T. Furuno, and S. Ue-bayashi, " Frequency selective reflectarray using crossed-dipole elements with squareloops for wireless communication applications, " *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, no. 1, pp. 89-99, 2011.
- [4] J. Huang, "Analysis of a microstrip reflectarray antenna for microspacecraft applications," *TDA Progress Report 42-120*, Feb. 1995, pp. 153-173.
- [5] J.-F. Li, Q. Chen, Q. Yuan, and K. Sawaya, " Reflectarray Element Using Interdigital Gap Loading Structure," *Electronics Letters*, vol. 47, no. 2, pp. 83-85, Jan. 2011.
- [6] Q. Chen, J.-F Li, Y. Kurihara, and K. Sawaya, "Measurement of Reflectarray for Improving MIMO Channel Capacity of Outdoor NLOS Radio Channel," 2013 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI National Radio Science Meeting (AP-S 2013), Orlando, Florida, USA, Jul. 7-13, 2013.