

M-1

広角反射特性を実現するメタサーフェス反射板の素子位相分布の検討

Study of element phase distribution of Meta-surface reflector realizing wide-angle reflection

○田中大智¹, 瀧川道生², 三枝健二²

*Daichi Tanaka¹, Michio Takikawa², Kenji Saegusa²

Abstract : We studied the element-phase distribution of the Meta-surface reflector to achieve wide-angle reflection. We calculated the reflection pattern by using the element-phase of the Meta-surface reflector as the excitation phases of the array factor. The results show that a finer element-phase spacing leads to wide-angle reflection.

1. まえがき

近年、移動体通信では28GHz帯を利用したミリ波通信が導入されている[1]。ミリ波通信は、広帯域で高速な通信が実現できる一方、電波の回折特性により図1に示すような、ビルの影にカバレッジホールが生じる。この課題を解決するため、メタサーフェス反射板の研究が進められている[2]。メタサーフェス反射板は、周期的に配置された素子の形状を設計することにより、反射波を制御する。基地局から電波を広範囲に反射させるメタサーフェス反射板の最適な素子位相分について検討したので報告する。

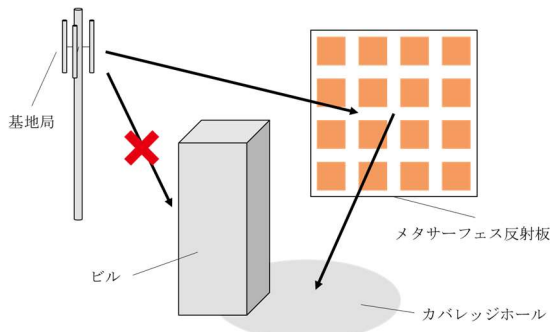


図1 メタサーフェス反射板構造

2. 設計方法

基地局からの電波がメタサーフェス反射板に垂直入射したときを考える。メタサーフェス反射板の素子位相を、アレーファクターの励振位相としてモデル化し、広角な反射波を実現するための素子位相分布を設計する。アレーファクターを式(1)に示す。x軸上に32素子を配置したモデルにおいて、素子位相分布を、左右対称と非対称の2通りで設計する。設計には、遺伝的アルゴリズムを用いて最適化する。

目的関数を式(2)に示す。目的関数が最大になるように最適化する。最適化条件を表1に、設計条件を表2に示す。

$$AF(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^{N_s-1} e^{j\left\{\left(\frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta \times x_n \cos \varphi\right) - \delta_n\right\}} \quad (1)$$

N_s : 素子数, x_n : n 番目の素子点,

δ_n : n 番目の素子位相

$$\begin{aligned} & \max(F(a, \alpha)) \\ & = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha-1} \sum_{i=1}^{\alpha} (a_i - \bar{a})^2 + 1\right)} \end{aligned} \quad (2)$$

i : 各観測角度数, α : 全観測角度数の総和,

a_i : 各観測角の値[dB], \bar{a} : 全観測角の平均値[dB]

表1 最適化条件

| | |
|--------|-------|
| 個体数 | 2000 |
| 世代数 | 30000 |
| 突然変異確率 | 10% |
| 交叉確率 | 90% |

表2 設計条件

| | |
|--------|----------------------|
| 素子間隔 | $\lambda/2$ |
| 素子数 | 32 |
| 素子位相間隔 | 10°, 30°, 180°, 設定なし |

3. 結果

表3に素子配置を対称にしたときと、非対称にしたときの素子位相間隔別のリップルレベル、目的関数、素子位相量、必要素子種類の数を示す。素子種類とは、そのときの反射波の角度特性を形成するために必要な素子位相の種類である。

素子位相間隔設定なしの結果を図2に示す。素子位相対称ではヌル点が存在するため、観測角 -70°から70°の範囲で最適化した。非対称はヌル点が存在しないため、観測角 -90°から90°の範囲を最適化する。表3よ

1 : 日大理工・院(前)・電子 2 : 日大理工・教員・電子

り、レベル差は0.1[dB]となりほぼ変わらない結果となった。

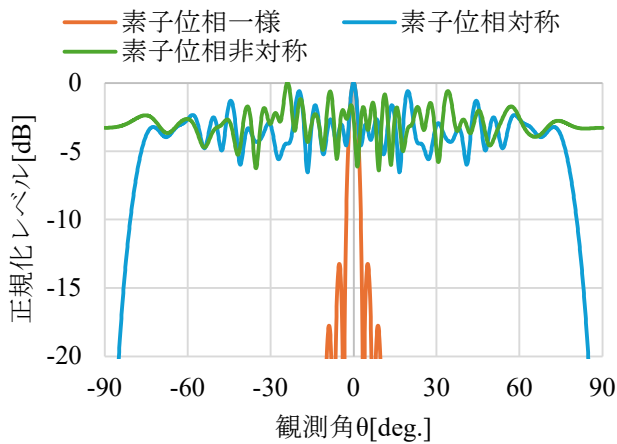


図2 素子位相間隔設定なしの反射波の角度特性

表3より非対称のときは、位相間隔180°の方がリップルレベルは1.85[dB]低い、目的関数は30°の方が0.07高い。よって、広角反射出来ているのは位相間隔30°の方となった。位相間隔30°の結果でリップルレベルが180°より大きくなった理由は、30°の位相間隔には180°の位相間隔も含まれるため、本来少なくとも同等の結果が得られるはずである。したがって、この差異は最適化過程で局所解に陥ったことが原因と考える。このときの反射波の角度特性を図2に示す。

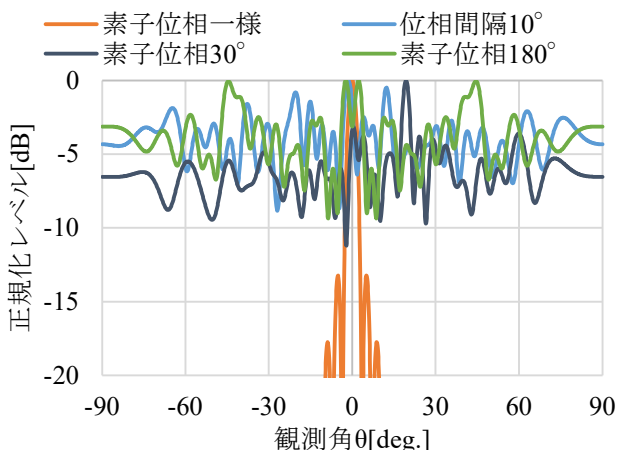


図3 位相分布非対称の反射波の角度特性

表3より、位相間隔を細かくするほど、リップルは低下し、広角な反射波の角度特性になる。素子位相を対称にすることで、必要素子数は低下する。

位相間隔ありで最も高い目的関数になったのは、位相間隔10°の時である。リップルレベルでは対称の方が0.23[dB]低い、非対称の方は目的関数が0.04高くな

ったことから、位相間隔設定ありでは、非対称の10°間隔が最も広角反射する結果になった。

表3 各計算時の結果

| 対称 | | | | |
|------|---------|------|---------|------|
| 位相間隔 | リップルレベル | 目的関数 | 位相量 | 素子種類 |
| なし | 6.55 | 0.43 | 0~357.7 | 16 |
| 10 | 8.60 | 0.28 | 0~350 | 8 |
| 30 | 9.11 | 0.23 | 0~330 | 8 |
| 180 | 46.99 | 0.03 | 0,180 | 2 |
| 非対称 | | | | |
| 位相間隔 | リップルレベル | 目的関数 | 位相量 | 素子種類 |
| なし | 6.41 | 0.48 | 0~351.3 | 32 |
| 10 | 8.83 | 0.32 | 0~350 | 24 |
| 30 | 11.20 | 0.31 | 0~330 | 12 |
| 180 | 9.35 | 0.24 | 0,180 | 2 |

4. まとめ

本稿では、28GHz帯通信によるカバレッジホール改善のためのメタサーフェス反射板設計として、アレーファクターの数式を用いて、広角な反射波の角度特性になるような素子位相分布の最適化について検討した。

結果は、位相間隔を細かくするほど目的関数が高く、リップルレベルが低い値となり、より広角な反射波の角度特性になることが分かった。しかし、素子を作成するときは金属パッチの形状を変化させ所望の素子位相を設計する。そのため、少数点までを考慮し作成することは非現実的である。よって、広角な反射を優先するのならば、非対称構造の位相間隔10°で作成すると良いと考えられる。

参考文献

- [1] 総務省：WX推進戦略アクションプランの進捗状況について、情報通信審議会 情報通信技術分科会電波有効利用委員会（第2回）資料2-1, pp.4, 令和7年5月。
- [2] Y. Murakami et al : “Optimization and Performance of Metamaterial-Based Electromagnetic Scattering Sheet for Coverage improvement in 28 GHz Band”, IEEE Access, vol. 12, pp. 17090-17101, Jan. 2024.