

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420401

研究課題名(和文) マイクロセル環境における高速移動体通信のための3次元構造マルチアンテナシステム

研究課題名(英文) 3D multiantenna system for high-speed mobile communication in micro-cell environment

研究代表者

市毛 弘一 (Ichige, Koichi)

横浜国立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10313470

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、3次元構造マルチアンテナシステムを提案し、その性能評価を実施した。まず、複数の正四面体構造を組み合わせた3次元マルチアンテナアレー構造を提案し、このアレー構造が直方体アレーを含む拡張となっていることを示した。シミュレーションを通して、この構造により、方位角・天頂角方向の推定精度を改善した。また、一部のアレー素子位置を変化させることで、推定精度をさらに高めることが可能となることを示した。

研究成果の概要(英文)：A novel 3-D array configuration using multiple regular tetrahedra was proposed, which enables high resolution 2-D DOA estimation. The proposed array configuration has almost the same DOA estimation performance as that of the conventional configuration for uncorrelated waves. Moreover, the proposed configuration can form cuboid array so that we can estimate DOAs of correlated waves where the conventional configuration is unable to do so.

研究分野：信号処理

キーワード：アレーアンテナ 到来方向推定

### 1. 研究開始当初の背景

移動体通信技術の発達により、動画像など大規模データ転送を実現する高速デジタル通信システムが実用化され、伝送される情報量は加速度的に増えている。これに伴い電波の飽和現象が現れており、移動体通信の高速化・高品質化・大容量化を実現する技術開発が必須である。こうした技術のひとつとして、マイクロセルやフェムトセル構造への移行といったセル領域の縮小が検討されている。セル領域を縮小することにより、地理的な周波数利用効率を高めることが可能であり、マルチパスの影響を軽減することもできる。

他方、移動体通信トラフィックの増大に伴い、屋外の電波伝搬環境は非常に複雑になっているため、セル設計において電波伝搬の構造を正確に把握することは不可欠である。従来、セルの設計は平面(2次元)的に行われていたが、セル半径を狭めることで既存の無線基地局に対して電波の到来角が高仰角になるため、仰角方向を含めた空間(3次元)での電波伝搬環境推定技術が重要となる。

電波伝搬環境推定手法としては、複数のアンテナで受信した信号の相関特性を代数的に解析することで、電波の到来方向を特定する手法が用いられている[1],[2]。仰角方向を含めた空間(3次元)での電波伝搬環境を推定するためには、アンテナ素子を平面上に並べた等間隔矩形アレーアンテナ(URA)や円形アレーアンテナ(UCA)の利用が一般的である。しかしながら、こうした平面アレーアンテナでは、高仰角の場合に各アンテナ素子での受信信号間の位相差が小さくなり、推定精度が著しく劣化するという問題がある。こうした問題に対して、矩形アレーアンテナを階層的に並べた構造(multi-URA)[3]が提案されているが、アンテナ素子数が膨大になることから、受信器コストおよび受信信号処理時間が増大し、実用化には問題が残る。

### 2. 研究の目的

本研究は、3次元電波伝搬環境を高精度に推定するための、3次元構造マルチアンテナシステムを開発することを目的とする。また、電波暗室内・屋外での実験を通して有効性を検証する。本研究では、マイクロセル・フェムトセル構造への移行による基地局カバーエリアの縮小と、それに伴う3次元電波伝搬構造の重要性を踏まえて、従来の平面(2次元)伝搬構造の問題から、空間(3次元)マルチパス伝搬構造の問題へと発展させること、およびそのための推定システム開発を目指している。

### 3. 研究の方法

本研究課題における研究方法の一例を以下に示す。

#### (1) アレー開口面の拡張に基づいた正四面体構造アレーアンテナ

3次元構造アレーのひとつとして、図1に示すような正四面体構造アレーアンテナを提案した。1つの正四面体は4つの頂点を持つため、各頂点の位置にアンテナ素子を配置することによって4素子の3次元構造アレーアンテナを形成できるが、本研究ではアンテナ全体の開口面をより拡張するために、正四面体の重心の位置にも同様にアンテナ素子を配置することによって頂点間の距離をより拡大した、合計で5素子から成る3次元構造アレーアンテナを基本構造とする。

以上の考察をもとに、対称構造を持つ正四面体をz軸方向に複数連結させて得られるような3次元構造アレーアンテナを提案する。これにより、z軸方向のアレー開口面が拡大するため、天頂角方向の推定精度の改善が期待できる。

#### (2) 3次元アレー構造の定量的評価と到来方向推定

上記(1)で提案した3次元アレー構造は、3次元に素子を配置することにより、天頂角方向のアレー開口面を大きく確保でき、従来の平面アレーよりも天頂角方向の推定精度の改善を実現していた。しかし、この直方体3次元構造アレーアンテナでは、直方体の重心の位置に配置された素子と直方体の各頂点に配置された素子との間隔を全て到来波の半波長以下の長さに設定する必要があることから、アレー開口面の確保に限界がある。

ここでは、より大きなアレー開口面を確保できる図2のような最適3次元構造アレーを提案する。このアレー構造では、方位角方向の

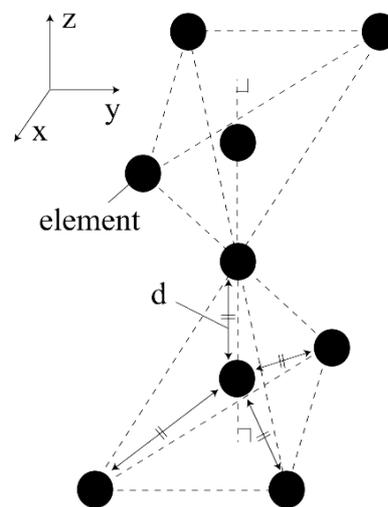
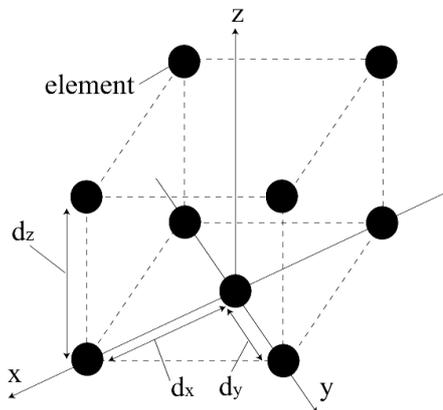
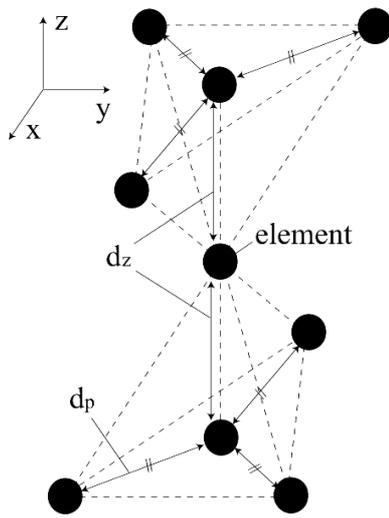


図1: 2つの正四面体から形成される3次元構造アレーアンテナ



(a) 直方体型



(b) 四面体型

図 2： 最適 3 次元アレー構造

アレー開口面が最大になるように中心にある素子を底面に下し，方位角方向この場合， $xy$  平面の素子間隔を半波長間隔に取る． $z$  軸方向は半波長間隔を超えて素子間隔を取ることが可能となる．

#### 4. 研究成果

本研究課題における研究成果の一例を以下に示す．

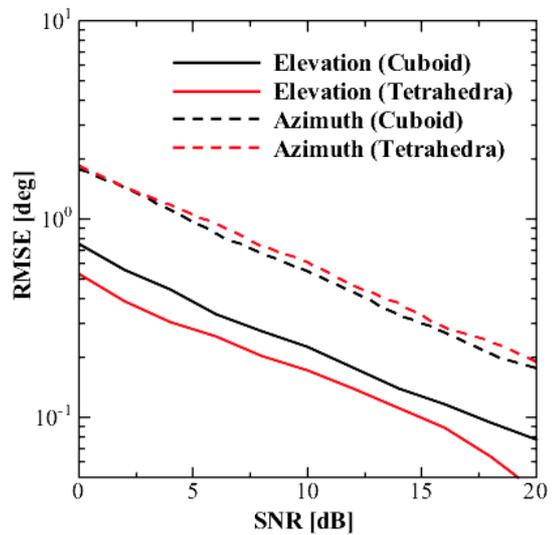
##### (1) アレー開口面の拡張に基づいた正四面体構造アレーアンテナ

図 1 のアンテナの到来方向推定精度を評価した一例を図 3 に示す．到来波数は 2 波．到来角は(天頂角, 方位角)で  $(20^\circ, -100^\circ)$  ,  $(60^\circ, -120^\circ)$  , 素子間隔は半波長, スナップショット数は 200 回, アルゴリズムは MUSIC 法, 試行回数は 500 回である．赤線が提案するアンテナ構造, 黒線は従来(矩形)構造, 実線が方位角, 破線が天頂角を表す．

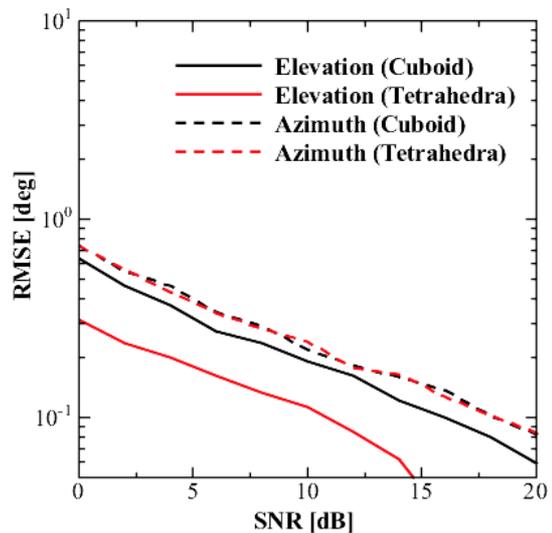
図 3 の結果を見ると, 1 波目, 2 波目ともに

著しい推定精度の劣化は見られず, 2 波推定に十分な角度分解能を持っていることがわかる．

方位角方向 (Azimuth) については 1 波目, 2 波目ともに 2 つのアンテナ構造間ではほぼ同程度の推定精度が得られていることがわかる．また, 天頂角方向 (Elevation) については, 正四面体 3 次元構造アレーアンテナ (Tetrahedra) のほうが直方体 3 次元構造アレーアンテナ (Cuboid) に比べて, 1 波目, 2 波目ともに推定精度が改善することが確認できるが, 特に到来角が水平面に近い 2 波目の場合に遠くに大きく改善しており, 提案構造の有効性が確認できる．また, この結果に関しても, 1 波の CRLB の検討結果に沿う結果となっており, 1 波での検討結果が複数波推定においても適用できることがわかる．



(a) 1 波目:  $(20^\circ, -100^\circ)$



(b) 2 波目:  $(60^\circ, -120^\circ)$

図 3： 2 つの正四面体から形成される 3 次元構造アレーアンテナ

## (2) 3次元アレー構造の定量的評価と到来方向推定

図2に示す3次元構造アレーにおいて、 $dx, dy$ を半波長に固定し、 $dz$ のみを変化させた場合のRMSE特性を図4に示す。諸元は、ランダムな到来角の1は、SNRは0dB、スナップショット数は200回、試行回数は500回である。図4(a)が図3(a)の直方体型(底面素子)の特性、図4(b)が図3(b)である四面体型(底面素子)の特性である。

図4(a)(b)より、直方体型(底面素子)、四面体型(底面素子)ともに、 $dz$ が半波長を超えた場合でも方位角方向のグレーティングの影響を受けずに推定でき、 $dz$ が大きくなるほど天頂角方向の推定精度が向上することが確認できる。

## (3) その他の研究成果

その他の研究成果として、こうした3次元アレー構造の定量的な評価や、高次統計量と組み合わせた到来方向推定精度の改善に関する検討を実施した。また、本研究課題からの応用として得られた研究成果としては、信号相関行列における要素間の関係を利用した到来方向推定、拡張アレー処理に基づいた低コストアレー、中心対称性を利用した拡張アレーによる到来方向推定などが挙げられる。これらの詳細は以下の発表論文を参照されたい。

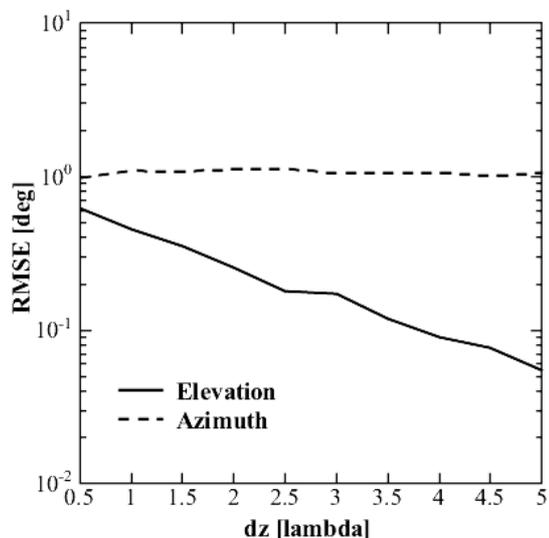
### <引用文献>

菊間, アダプティブアンテナ技術, オーム社, 2004年。  
山田, "高分解能到来方向推定法の基礎と実際", 電子情報通信学会第33回アンテナ伝搬ワークショップ, 2006年。  
堀田他, "3次元アレーを用いた伝搬パラメータ推定", 信学技報, no. AP2005-87, 2005年10月。

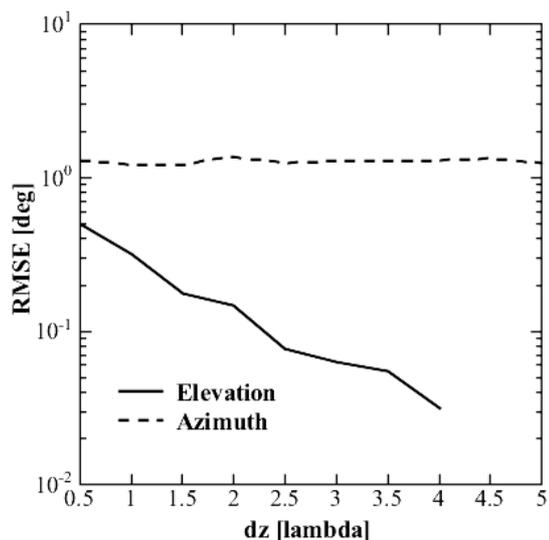
## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計3件)

K. Ichige, Y. Iwabuchi, "Array Correlation Matrix Element Properties and Their Application to Low-Cost DOA Estimation", IEICE Trans. Communications, Aug. 2016 (accepted, in press) (査読あり)。



(a) 直方体型



(b) 四面体型

図4: 素子間隔  $dz$ -RMSE 特性

松野宏己, 中野雅之, 堀裕介, 鹿川悠太, 土居勇輝, 市毛弘二, 新井宏之, "2次元到来方向推定用ピラミッド型アレーアンテナ", 信学論B, vol. J97-B, no. 9, pp. 752-761, Sep. 2014 (査読あり)。  
Y. Doi, H. Moriya, K. Ichige, H. Arai, T. Hayashi, H. Matsuno, M. Nakano, "High Resolution 2-D DOA Estimation by Low-Cost Antenna Array Based on Synthesized Covariance Matrix via Antenna Switching", IEICE Trans. Fundamentals, vol. E96-A, no. 10, pp. 1962-1971, Oct. 2013 (査読あり)。

[学会発表](計17件)

K. Ichige, Y. Iwabuchi, "An Efficient Direction-Of-Arrival Estimation

Method for Uniform Rectangular Array Based on Array Covariance Matrix Element Properties", Proc. IEEE workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing (CAMSAP), pp. 357-360, Cancun, Mexico, Dec. 2015.

Y. Iizuka, K. Ichige, "Multiple Snapshot Spatial Smoothing with Improved Effective Array Aperture for High-Resolution Direction-Of-Arrival Estimation", Proc. International Conference on Information, Communications, and Signal Processing (ICICS), no. P0185, Singapore, Singapore, Dec. 2015.

飯塚裕貴, 市毛弘一, "アレーの中心対称性を利用した拡張アレーによる到来方向推定", 電子情報通信学会総合大会, no. B-1-187, 草津, Mar. 2015.

山田慧太, 市毛弘一, "拡張アレー処理に基づいた低コストアレーによる到来波数推定", 電子情報通信学会技術報告, no. SIP2014-102, 岡山, Jan. 2015.

鹿川悠太, 市毛弘一, "高次統計量を用いた多重スペクトル合成と2次元到来方向推定", 電子情報通信学会技術報告, no. SIP2014-103, 岡山, Jan. 2015.

Y. Iwabuchi, K. Ichige, "Accurate and Low-Cost DOA Estimation Method Using Array Covariance Matrix Elements", Proc. IEEE Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS), pp. 531-534, Ishigaki island, Japan, Nov. 2014.

岩淵有生, 市毛弘一, "矩形アレーアンテナの受信信号相関行列における要素間の関係を利用した到来方向推定", 電子情報通信学会信号処理シンポジウム, no. B1-3, 京都, Nov. 2014.

Y. Doi, K. Ichige, H. Arai, H. Matsuno, M. Nakano, "3-D Array Configuration Using Multiple Regular Tetrahedra for High-Resolution 2-D DOA Estimation", Proc. European Signal Processing Conference (EUSIPCO), no. FR-P1-11, Lisbon, Portugal, Sep. 2014.

鹿川悠太, 市毛弘一, "アレー開口面の拡張による最適3次元アレー構造の定量的評価と高分解能到来方向推定", 電子情報通信学会回路とシステムワークショップ, pp. 161-166, 淡路島, Aug. 2014.

市毛弘一, 岩淵有生, "On the Covariance Matrix in Array Signal Processing", 電子情報通信学会技術報告, no. AP2014-87, 新潟, Aug. 2014.

Y. Iwabuchi, H. Li, K. Ichige, "Direction-Of-Arrival Estimation of Coherent Sources for ULA Based on The Relation between Array

Covariance Matrix Elements", Proc. International Symposium on Communications, Control, and Signal Processing (ISCCSP), pp. 701-704, Athens, Greece, May 2014.

Y. Doi, K. Ichige, H. Arai, H. Matsuno, M. Nakano, "Antenna Switching based on the relation between the relative location of array elements for High Resolution 2-D DOA Estimation", Proc. International Symposium on Communications, Control, and Signal Processing (ISCCSP), pp. 470-473, Athens, Greece, May 2014.

岩淵有生, 李寒陽, 市毛弘一, "Property of Array Covariance Matrix Elements and Its Application to DOA Estimation by Uniform Linear Array", 電子情報通信学会信号処理シンポジウム, pp. 182-187, 下関, Nov. 2013.

土居勇輝, 市毛弘一, 新井宏之, 松野宏己, 中野雅之, "A Novel 3-D Array Configuration Using Multiple Regular Tetrahedra for High Resolution 2-D DOA Estimation", 電子情報通信学会信号処理シンポジウム, pp. 194-199, 下関, Nov. 2013.

H. Moriya, Y. Doi, K. Ichige, H. Arai, T. Hayashi, H. Matsuno, M. Nakano, "Cuboid Array: A Novel 3-D Array Configuration for High Resolution 2-D DOA Estimation", Proc. International Workshop on Signal Processing Systems (SiPS), pp. 77-82, Taipei, Taiwan, Oct. 2013.

Y. Doi, H. Moriya, K. Ichige, H. Arai, T. Hayashi, H. Matsuno, M. Nakano, "Low-Cost Antenna Array via Antenna Switching for High Resolution 2-D DOA Estimation", Proc. International Workshop on Signal Processing Systems (SiPS), pp. 83-88, Taipei, Taiwan, Oct. 2013.

堀裕介, 土居勇輝, 守屋裕樹, 市毛弘一, 新井宏之, 松野宏己, 林高弘, "ピラミッド構造アレーによる2次元到来方向推定の精度に関する検討", 電子情報通信学会ソサイエティ大会, no. B-1-209, 福岡, Sep. 2013.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

市毛 弘一 (ICHIGE, Koichi)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号： 10313470