

3次元構造マルチアンテナシステムにおける超分解能スペクトル合成技術

代表研究者 市毛 弘一 横浜国立大学 大学院 工学研究院 准教授

1 はじめに

移動体通信技術は著しく進歩しており、スマートフォンなど通信量が膨大な端末の普及により要求される通信トラフィック量は急速に増加している。このように無数の電波が多重に伝搬するマルチパス環境においては、より効率的な通信を行うために電波伝播環境を詳細に把握する必要があり、中でも電波の到来方向 (Direction Of Arrival; DOA) 推定は重要な技術となっている [1, 2]。

DOA 推定手法としては、MUSIC (Multiple Signal Classification) 法 [3] などに代表される高分解能到来方向推定手法がよく知られており、無線通信における様々なアプリケーションに応用されている。これらのアプリケーションにおいては従来の到来波の方位角のみを推定する 1 次元推定に加え、より詳細な伝搬環境の把握のために到来波の天頂角を加えた 2 次元推定を行う必要性が高まっている。一般に 2 次元 DOA 推定は、アンテナを平面上に複数並べた等間隔矩形アレー (URA) や円形に並べた等間隔円形アレー (UCA) などが用いられる。しかしこれらの平面アレーによる DOA 推定では天頂角方向のアレー開口面が小さくなることから、方位角に比べて天頂角の推定精度が劣化しやすいという問題点がある。

著者らはこれまでの研究において、天頂角方向のアレー開口面を大きくするために簡易な 3 次元構造アレーを提案し、天頂角方向の推定精度を改善させることに成功した [4],[5]。さらに、3 次元構造アレーのアレーモードベクトルの形状に着目し、高さ方向のアンテナ素子間隔を半波長を超えた長さに設定してもグレーティングの影響を受けにくく、天頂角方向により大きなアレー開口面を確保できるアレー構造を実現している [6]。しかし、CRLB (Cramer-Rao Lower Bound) [7] が大きく、より高精度な推定を実現するアレー構造が求められる。

本稿では、アレー開口面の拡張した 3 次元アレー構造において、CRLB の評価式を用いることで、定量的に 3 次元アレー構造の性能を評価し、高精度な 2 次元到来方向推定が可能となることを検証することで、最適な 3 次元構造アレーを提案する。

以下に本稿の構成を示す。第 2 章では、著者らがこれまでに考案している 3 次元構造アレーアンテナの概要や、3 次元構造アレーにおける高さ方向のアレー開口面の拡張方法について述べる。第 3 章では、CRLB の式を用いて、3 次元アレー構造の定量的な評価を行い、最適な 3 次元構造アレーを提案する。第 4 章ではシミュレーションによりその有効性を確認する。最後に第 5 章でまとめと今後の課題について述べる。

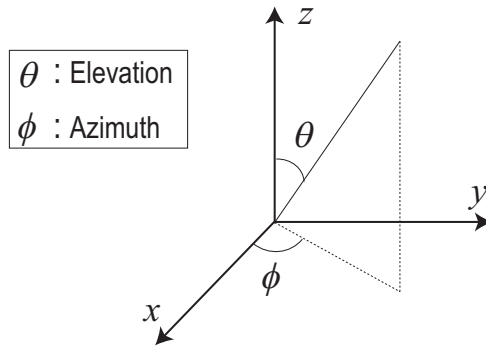


図 1: 到来角の設定

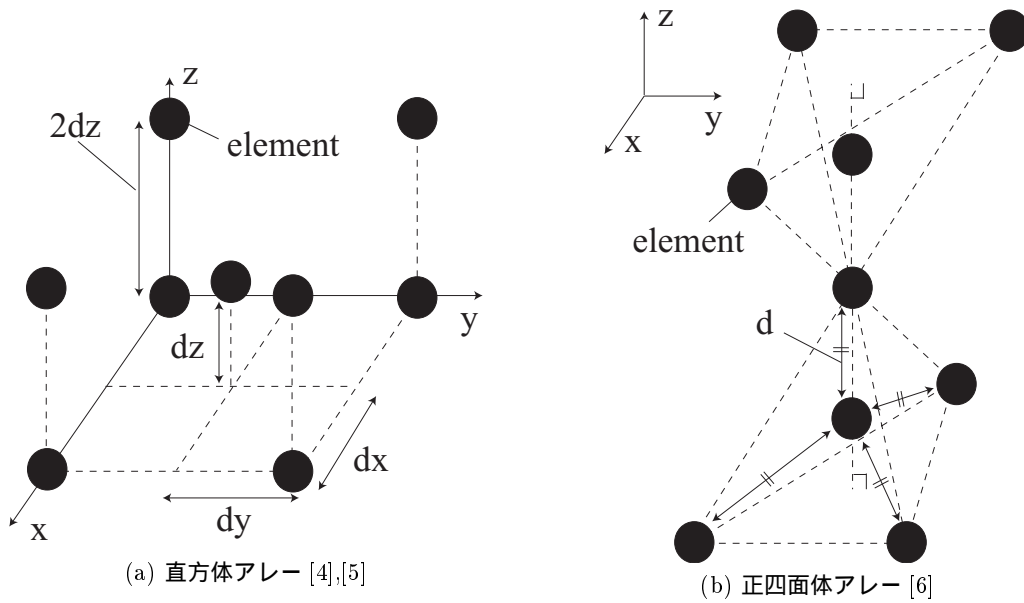


図 2: 従来の 3 次元アレー構造

2 3次元構造アレーアンテナ

2.1 直方体，正四面体 3次元構造アレー

いま P 素子のアレーアンテナに K 波が到来している場合を考える．到来角を図 1 のように設定し， k 番目の信号が振幅 $s_k(t)$ ，天頂角 θ_k ，方位角 ϕ_k の方向から到来しているとする．図 2(a) に示す直方体アレー [4],[5] は，3次元に素子を配置することにより，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る．しかし，この構造はアレー開口面の確保に限界がある．そこで，直方体の一例である立方体が 2つの正四面体から形成されることに着目し，高さ方向のアレー開口面が拡張するような図 2(b) の 3次元構造アレー [6] を提案する．この構造により，方位角の推定精度を劣化させることなく天頂角の推定精度を改善させる．

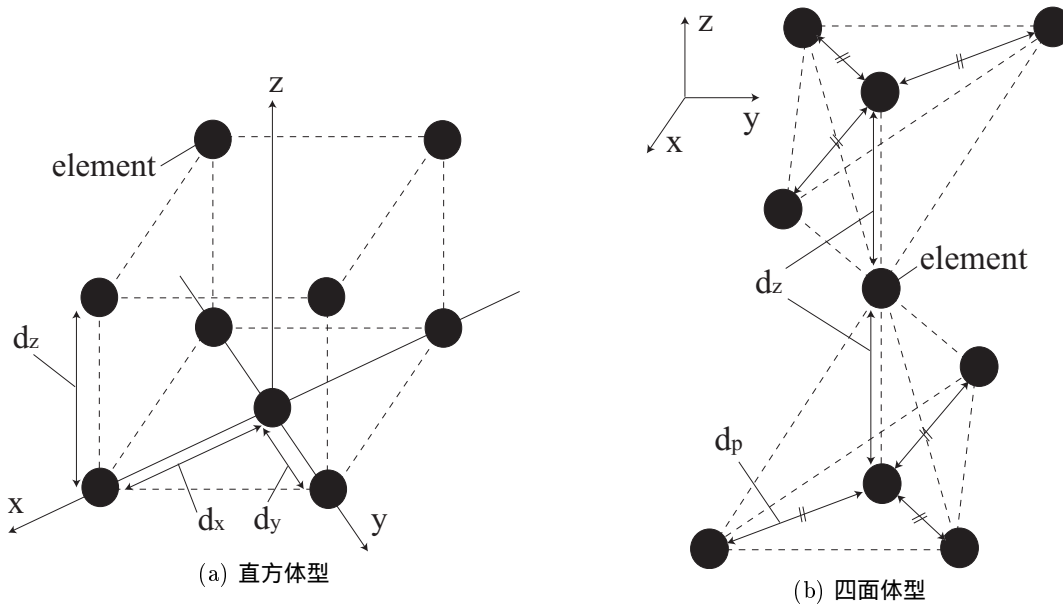


図 3: 最適 3 次元アレー構造

2.2 アレーモードベクトルに基づいたアレー開口面拡張

一般的な平面アレーによる DOA 推定では、近接した素子間隔が搬送波の半波長を越えたときにグレーティングが発生するため、その長さは半波長以下に設定する必要があるが、3次元構造アレーではその構造の複雑さから、必ずしもその条件に従うとは限らない。そのため、ここでは各構造間で差異のあるアレーモードベクトルに着目した検討を示す。

一般的に、 p 素子目 ($p = 1, \dots, P$) のアレーモードベクトル $\mathbf{a}_p(\theta_k, \phi_k)$ は以下のように定義される [1, 2] .

$$\mathbf{a}_p(\theta_k, \phi_k) = \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{r}_p^T \mathbf{L}(\theta_k, \phi_k) \right] \quad (1)$$

ただし、

$$\mathbf{L}(\theta_k, \phi_k) = [\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi, \cos \theta]^T \quad (2)$$

である。ここで、 \mathbf{r}_p は素子の空間的位置を表す位置ベクトル、 $\mathbf{L}(\theta_k, \phi_k)$ は到来角成分を含んだ視方向ベクトルと呼ばれる項であり、それぞれ (x, y, z) の 3 軸方向の成分から形成される。平面アレーによる 2 次元 DOA 推定では、 x 軸方向と y 軸方向成分のみを考慮するだけで十分であったが、3次元構造アレーではそれらに加えて z 軸方向の成分を考慮する必要がある。ここで $\mathbf{L}(\theta_k, \phi_k)$ に注目すると、 x 軸方向と y 軸方向の成分が天頂角 θ と方位角 ϕ を両方含んだ項で表されるのに対し、 z 軸方向の成分は ϕ を含まず θ のみで表されるのがわかる。このことから、 z 軸方向に沿った素子間隔は方位角 ϕ の推定に寄与しないことがわかる。つまり、 x - y 平面方向の素子間隔を搬送波の半波長以下に設定しておけば、 z 軸方向に沿った素子間隔を半波長を超えて設定した場合でも方位角方向のグレーティングは発生しない。よって、 z 軸方向に沿った素子間隔を大きく設定し、アレー開口面を拡張することにより、天頂角方向の推定精度を大幅に向上させることが期待できる。

3 アレー開口面の拡張した3次元アレー構造における定量的評価

3.1 提案する3次元アレー構造

2.2節より最も大きなアレー開口面を確保できる図3のような最適3次元構造アレーを提案する．実際に図3に示す3次元構造アレーにおいて， d_x, d_y を半波長に固定し， d_z のみを変化させた場合のRMSE特性を図4に示す．この結果から， d_z 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， d_z 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．

3.2 提案する3次元アレー構造におけるAR

ここではアレー構造に着目したCRLB[7]の定式化を示し，その式に基づいて3次元構造アレーの有効性を示す．このときCRLB行列 V は以下ようになる．

$$\begin{aligned} V &= \begin{bmatrix} \text{var}(\omega_1) & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \text{var}(\omega_K) \end{bmatrix} \\ &= \frac{\sigma^2}{2N_s} \text{Re} \left[(\mathbf{B}^H \mathbf{P}_N \mathbf{B}) \odot \mathbf{S}^T \right]^{-1} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\mathbf{S} = E[s(t)s(t)^H] \quad (4)$$

$$\mathbf{P}_N = \mathbf{I} - \mathbf{A}(\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \quad (5)$$

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1, \phi_1), \mathbf{a}(\theta_2, \phi_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_K, \phi_K)] \quad (6)$$

$$\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_K(t)]^T \quad (7)$$

$$\mathbf{B} = [\mathbf{b}(\theta_1), \mathbf{b}(\theta_2), \dots, \mathbf{b}(\theta_K)] \quad (8)$$

$$\mathbf{b}(\omega) = \frac{\partial \mathbf{a}}{\partial \omega} \quad (9)$$

ここで \odot , $\text{Re}[\cdot]$, σ^2 , N_s , $E[\cdot]$, \mathbf{I} はそれぞれアダマール積，実部，雑音電力，スナップショット数，アンサンブル平均，単位行列となっており， ω は推定パラメータである θ もしくは ϕ である．到来波が1波の場合，CRLBは以下のように展開できる．

$$\text{var}(\omega) = \frac{\sigma^2}{2N_s P_s} \cdot \frac{1}{AR} \cdot \left(\frac{\lambda}{2\pi} \right)^2 \quad (10)$$

$$AR = \left(\frac{\lambda}{2\pi} \right)^2 \cdot \left(\mathbf{b}^H \mathbf{b} - \mathbf{b}^H \mathbf{a} (\mathbf{a}^H \mathbf{a})^{-1} \mathbf{a}^H \mathbf{b} \right) \quad (11)$$

ここで P_s は信号電力で， AR がアレー構造のみに依存する項となっている．つまりアレー構造により AR を最大化することでCRLBを最小化することが可能となる．

従来および提案する3次元構造アレーの AR を示す．中心素子がある図2(a)の直方体アレー（中心），図2(b)の四面体アレー（中心）の AR を $AR_{Cuboid-center}$, $AR_{Tetra-center}$ とする．中心素子を底面に下した図3(a)の直方体アレー（底面），図3(b)の四面体アレー（底面）の AR を $AR_{Cuboid-bottom}$, $AR_{Tetra-bottom}$ と

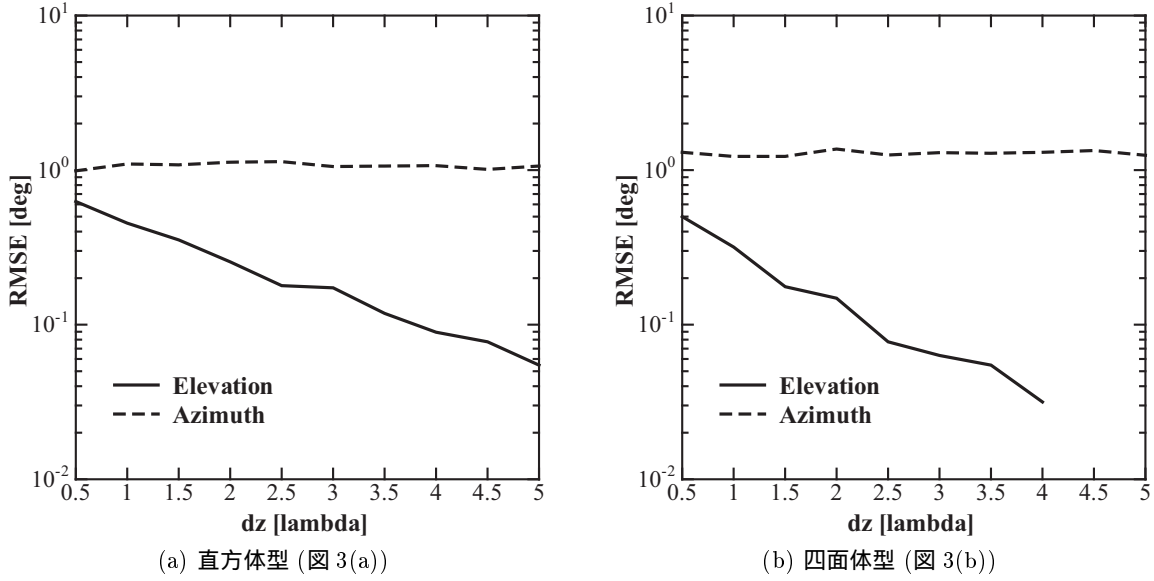


図 4: 素子間隔 d_z -RMSE 特性

する．天頂角 θ ，方位角 ϕ それぞれに関する図 2(a) の構造の AR は

$$AR_{\theta, Cuboid-center} = \left(\frac{8}{3}\right) (d_x \cos \theta \cos \phi)^2 + \left(\frac{8}{3}\right) (d_y \cos \theta \sin \phi)^2 + \left(\frac{8}{3}\right) (d_z \sin \theta)^2 \quad (12)$$

$$AR_{\phi, Cuboid-center} = \left(\frac{8}{3}\right) (d_x \sin \theta \cos \phi)^2 + \left(\frac{8}{3}\right) (d_y \sin \theta \sin \phi)^2 \quad (13)$$

となる．図 2(b) の構造の AR は

$$AR_{\theta, Tetra-center} = \left(\frac{8}{3}\right) (d_x \cos \theta \cos \phi)^2 + \left(\frac{8}{3}\right) (d_y \cos \theta \sin \phi)^2 + \left(\frac{38}{3}\right) (d_z \sin \theta)^2 \quad (14)$$

$$AR_{\phi, Tetra-center} = \left(\frac{8}{3}\right) (d_x \sin \theta \cos \phi)^2 + \left(\frac{8}{3}\right) (d_y \sin \theta \sin \phi)^2 \quad (15)$$

となる．図 3(a) の構造の AR は

$$AR_{\theta, Cuboid-bottom} = 4(d_x \cos \theta \cos \phi)^2 + 4(d_y \cos \theta \sin \phi)^2 + \left(\frac{20}{9}\right) (d_z \sin \theta)^2 \quad (16)$$

$$AR_{\phi, Cuboid-bottom} = 4(d_x \sin \theta \cos \phi)^2 + 4(d_y \sin \theta \sin \phi)^2 \quad (17)$$

となる．図 3(b) の構造の AR は

$$AR_{\theta, Tetra-bottom} = 3(d_x \cos \theta \cos \phi)^2 + 3(d_y \cos \theta \sin \phi)^2 + 8(d_z \sin \theta)^2 \quad (18)$$

$$AR_{\phi, Tetra-bottom} = 3(d_x \sin \theta \cos \phi)^2 + 3(d_y \sin \theta \sin \phi)^2 \quad (19)$$

となる．ただし，全てのアレーの d_x, d_y は半波長となっている．天頂角 θ に関しては，底面型の式 (16),(18) において d_z が拡張可能となっており，中心型よりも AR を大きく取ることが可能である．方位角 ϕ に関しては，直方体アレー（底面）の式 (17) において AR が最大となっている．

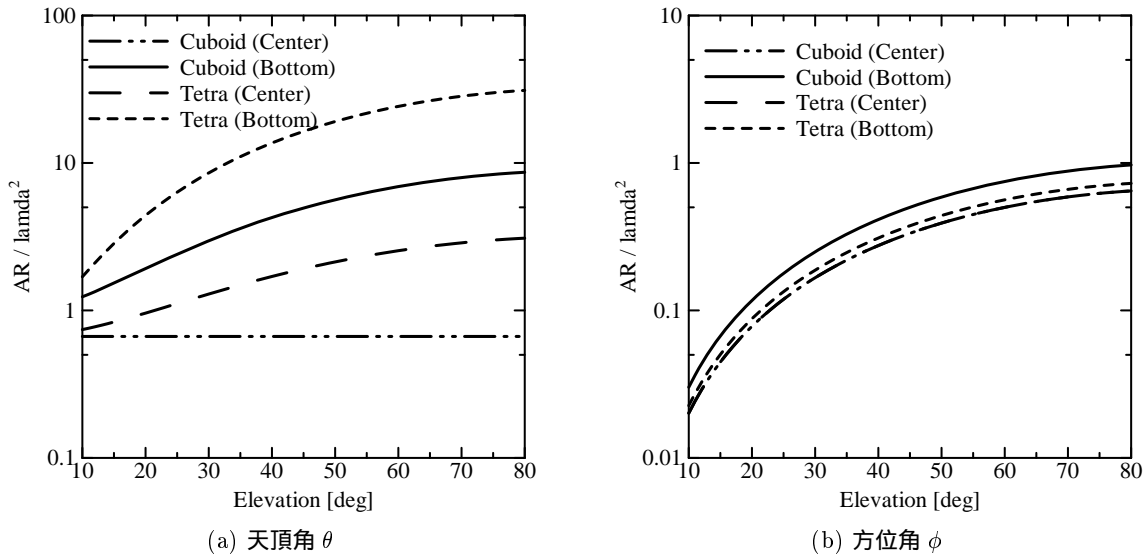


図 5: 天頂角 θ -AR 特性

3.3 提案する 3 次元アレー構造における AR の評価

天頂角 θ を変化させた場合の AR 特性を図 5 に示す．縦軸は AR を波長 λ の 2 乗の除算で，横軸は図 5(a) が天頂角 θ ，図 5(b) が方位角 ϕ である． d_x, d_y は半波長 0.5λ で，中心型の d_z は半波長 0.5λ ，底面型の d_z は 2λ である．到来波は 1 波で，方位角 ϕ は 120° で固定で，天頂角 θ は $10^\circ \sim 80^\circ$ である．

図 5 より，天頂角 θ に関しては，底面型の AR が大きい値となっていて，四面体アレーの方が直方体アレーよりも大きくなっているが， d_z を拡張することで AR を大きくすることが可能なので，方位角 ϕ の AR を大きく取れる方が有効である．方位角 ϕ に関しては，直方体アレー（底面）の AR が最大となっている．これは，図 3 のように，四面体アレー（底面）では $x-y$ 底面にアンテナ素子を 4 素子配置する一方で，直方体アレー（底面）では $x-y$ 底面にアンテナ素子を 5 素子配置しており，方位角方向のアレー開口面がより大きく確保できるためだと考えられる．以上のことから，四面体アレー（底面）よりも直方体アレー（底面）を用いる方が，限られたアンテナ素子数から構成される 3 次元構造アレーアンテナにおいて方位角方向のアレー開口面を最大化できる．その上で d_z を一辺だけ設定して天頂角方向のアレー開口面を確保したほうが，天頂角・方位角両方の推定特性を改善するためにより効率的だと考えられる．

4 シミュレーション

提案する 3 次元構造アレーの推定精度を確認するため CRLB, RMSE を用いた評価を行う．天頂角 θ を変化させた場合の CRLB 特性を図 6 に示す．縦軸は，CRLB で，横軸は，図 6(a) が天頂角 θ ，図 6(b) が方位角 ϕ である． $d_x = d_y = 0.5\lambda$ で，中心型は $d_z = 0.5\lambda$ ，底面型は $d_z = 2\lambda$ である．到来波は 1 波で，方位角 ϕ は 120° で固定で，天頂角 θ は $10^\circ \sim 80^\circ$ である．SNR は 0dB，スナップショット数は 200 である．

図 7 に天頂角 θ を変化させた場合の RMSE 特性を示す．縦軸は，RMSE で，横軸は，図 7(a) が天頂角 θ で，図 7(b) が方位角 ϕ である．諸元は図 6 と同一である．RMSE は MUSIC 法により天頂角 θ ，方位角 ϕ を推定する．

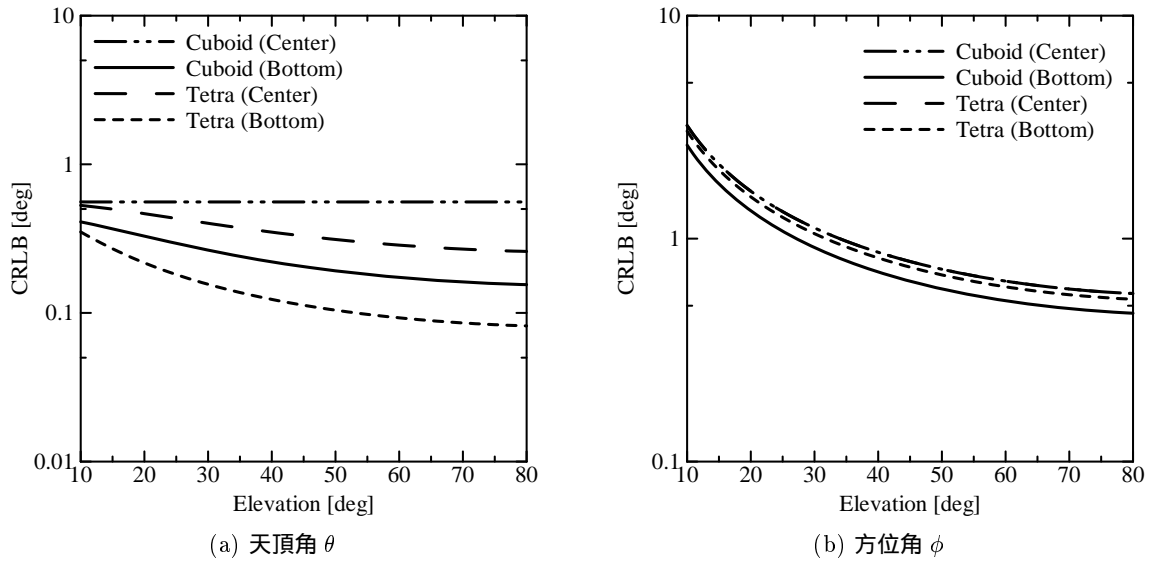


図 6: 天頂角 θ -CRLB 特性

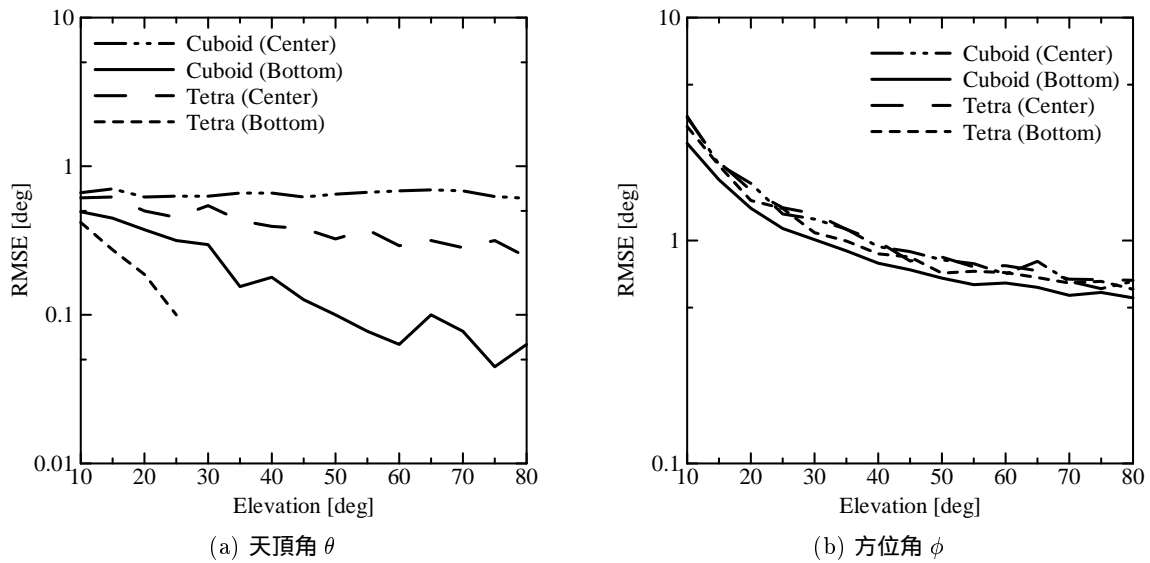


図 7: 天頂角 θ -RMSE 特性

図 6,7 において、推定精度の優劣関係は同一となっていることが確認できる。天頂角 θ に関しては、四面体アレー (底面) の方が直方体アレー (底面) よりも推定精度が良好で AR と同じ関係となっているが、 d_z を拡張することで精度を向上することが可能である。方位角 ϕ についても、直方体アレー (底面) が高精度で AR と同じ関係となっている。以上のことから、四面体アレー (底面) よりも直方体アレー (底面) を用いるほうが、限られたアンテナ素子数から構成される 3 次元構造アレーアンテナにおいて、天頂角・方位角両方の推定特性を改善するためにより有効であることが確認された。

5 まとめと今後の課題

本稿では，アレー開口面の拡張した3次元アレー構造において，CRLBの評価式を用いることで，その推定性能を定量的に評価し，最適な3次元構造アレーを提案した．シミュレーションにおいてその有効性を確認した．3次元アレー構造による方位角方向の推定精度の改善が今後の課題となる．

参考文献

- [1] 菊間 信良: "アダプティブアンテナ技術", オーム社, 2004.
- [2] 山田 寛喜: "高分解能到来方向推定法の基礎と実際", 第33回アンテナ・伝搬における設計・解析手法ワークショップ, 2006
- [3] R. O. Schmidt: "Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation", IEEE Trans. Antenna and Propagation, vol. 34, pp. 276-280, Mar. 1986.
- [4] 守屋 裕樹, 市毛 弘一, 新井 宏之, 松野 宏己, 林 高弘, 中野 雅之: "3次元構造アレーアンテナによる高精度2次元DOA推定", 信学ソ大, no. B-1-226, 2011年9月.
- [5] H. Moriya, K. Ichige, H. Arai, T. Hayashi, H. Matsuno and M. Nakano: "Improving Elevation Estimation Accuracy in DOA : How Planar Arrays Can Be Modified into 3-D Configuration", IEICE Trans. Fundamentals, vol.E95-A, no.10, pp.1658-1666, Oct. 2012.
- [6] Y. Doi, H. Moriya, K. Ichige, H. Arai, H. Matsuno and M. Nakano : "A Novel 3-D Array Configuration Using Multiple Regular Tetrahedra for High Resolution 2-D DOA Estimation", 第28回信号処理シンポジウム, pp. 194-199, 2013年11月.
- [7] P. Stoica and A. Nehorai: "MUSIC, maximum likelihood, and Cramer-Rao bounds", IEEE Trans. Acoust., Speech and Signal Processing, vol. ASSP-37, no.5, pp. 720-741, 1989.

発表資料

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
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講演論文集	2014年8月
拡張アレー処理を用いた近接波の到来波数推定に関する一検討	電子情報通信学会 回路とシステムワークショップ講演論文集	2014年8月
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	2015年1月
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	2015年1月