

# アレーアンテナによる Null 形成を含む 適応型ビームフォーミングを用いたマルチパス誤差低減

栗井睦（大阪府立大学）、大澤壮志（JAXA）、藤原健（JAXA）、辻井利昭（大阪府立大学）

## 1. はじめに

近年 GNSS を用いた衛星航法によるアプリケーションが増加しているが、一方で GNSS 信号は環境により様々な誤差が発生し、脆弱性への懸念も高まっている。中でも信号が建物などに反射して複数の経路を経て届くマルチパスの影響や、欺瞞信号や妨害信号といった不要信号による測位誤差は重大な誤差要因の一つである。

本研究では、アレーアンテナという複数のアンテナ素子を規則的に配置したマルチアンテナを用いて、これらの不要信号の低減を目的とする。各素子で受信した信号を重み付け合成することでアンテナの指向性を制御し、所望 GNSS 信号を増幅させ、不要信号を低減することで測位精度の向上を目指す。本稿ではアレーアンテナの信号合成手法のひとつである DCMP(Directionally Constrained Minimization of Power: 方向拘束付き出力電力最小化法)アダプティブアレーアルゴリズムを用いて、マルチパス低減の有効性を検証する。

## 2. アレーアンテナについて

アレーアンテナとは複数のアンテナ素子を規則的に配列したアンテナを指す。各素子の受信信号を重み付け合成することで指向性を制御できるという特徴がある。指向性を制御することで、不要信号方向の受信電圧を抑えることができ、マルチパスだけでなく、欺瞞信号や妨害信号などの干渉波の影響を低減することが期待できる。図 1 に 6 素子等間隔リニアアレーの指向性パターンの例を示す。各信号の位相が揃うように合成され、振幅が最大になる方向をメインローブ、振幅が最大ではないが極大となる方向をサイドローブ、各信号の位相が打ち消し合うように合成され、振幅がゼロとなる方向をヌルと呼ぶ。

アレーアンテナを運用するにはハードウェアバイアスの較正が必要となる。ハードウェアバイアスとは受信機における遅延誤差のことで、各アンテナやデータを取得するハードウェアとアンテナをつなぐケーブルなどが固有に持つバイアスである。ハードウェアバイアスにより、各素子の受信信号に遅延誤差が生じるため、信号合成の際に適切な指向性を持たせることができなくなる。そのため信号合成前に各素子間のハードウェアバイアスを評価し、較正

する必要がある。

[1]ではハードウェアバイアスの較正方法について示されており、本稿では[1]で使用している較正方法を採用する。

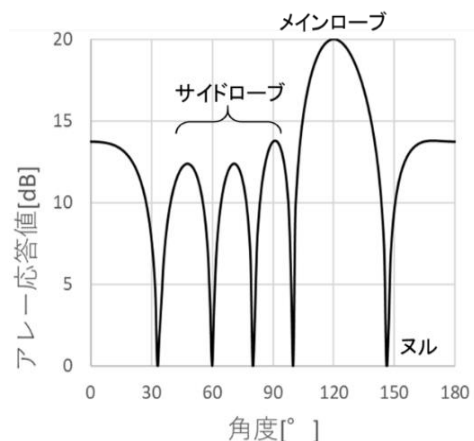


図 1. 6 素子半波長間隔アレーの指向性パターン例

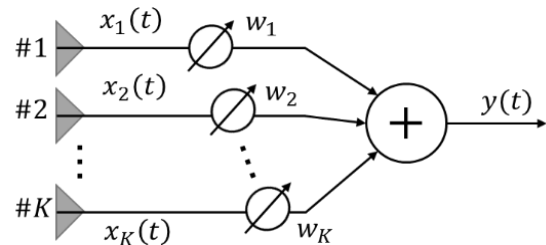


図 2.  $K$  素子アダプティブアレーの信号合成

## 3. DCMP アダプティブアレー

DCMP アダプティブアレーとは、アレーアンテナにおける信号合成手法の一つで、特定の方向の受信電圧を保護もしくは Null (受信電圧のゼロ点) に拘束できるアルゴリズムであり、拘束条件で保護された所望信号方向の受信電圧は高く保ったまま、不要信号方向の電力最小化を行うことで高い SNR が実現でき、測位精度の向上が期待できる。

次にアルゴリズムを説明する (詳細は参考文献[2]を参照)。図 2 のような  $K$  素子アレーにおいて、各素子で受信した信号を  $\mathbf{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_K(t)]^T$ 、重みを  $\mathbf{W} = [w_1, w_2, \dots, w_K]^T$  と置く。アレーアンテナでは次のように各素子の受信信号に重みを掛けることで信号合成を行い、アレー全体の出力  $y(t)$  を得る。

$$y(t) = W^H X(t) \quad (1)$$

$N$ 個の拘束があるとき、拘束条件式は一般に

$$C^T W^* = H \quad (2)$$

$$C = [C_1, C_2, \dots, C_N], H = [H_1, H_2, \dots, H_N]^T \quad (3)$$

とおける。 $C_n$ は拘束ベクトルといい、拘束する方角や素子配置から求まる $K$ 次ベクトルである。また、 $H_n$ を $C_n$ に対する拘束応答値と呼び、 $n$ 番目の拘束が不要波の場合 $H_n = 0$ 、所望波の場合 $H_n = 1$ （所望波の電力を増幅させる場合は1以上の定数）と設定する。

次に不要波成分を抑制するために、電力の最小化を定式化する。 $C^T W^* = H$ のもとで、

$$\min_W \left( P_{out} = \frac{1}{2} W^H R_{xx} W \right) \quad (4)$$

を満たす最適ウェイトはLagrangeの未定係数法を用いて解くことができる。 $R_{xx}$ は入力信号の相関行列( $R_{xx} = E[X(t)X^H(t)]$ )であり、これを解くと、最適ウェイト $W_{opt}$ が得られる。

$$W_{opt} = R_{xx}^{-1} C (C^H R_{xx}^{-1} C)^{-1} H^* \quad (5)$$

このように、合成の過程で適切な重みを与えることで意図した指向性パターンを作ることができる。

#### 4. マルチパス誤差低減実験

DCMP アルゴリズムを用いて直接波方向の受信強度を保護し、マルチパスが到来すると考えられる方向の受信強度を下げることで、マルチパス誤差の低減を目指す。マルチパスの評価方法として、擬似距離と搬送波位相から求まる距離の差分から推定する手法を用いる。時刻 $t$ における疑似距離[meter]、搬送波位相[cycle]をそれぞれ $\rho(t), \phi(t)$ として、観測方程式からマルチパス評価関数 $\varepsilon(t)$ を次のように定める。

$$\varepsilon(t) = \left( \rho(t) - \frac{c}{f} \phi(t) \right) - \left( \rho(t_0) - \frac{c}{f} \phi(t_0) \right) \quad (6)$$

$c$ は光速、 $f$ は搬送波周波数である。これにより、受信機の時計誤差、衛星時計誤差、対流圏遅延誤差がキャンセルされる。電離圏遅延誤差とマルチパス誤差について基準時刻 $t_0$ からの変動が残るが、今回の実験のように短時間では電離圏遅延誤差の変動は微小であるため無視できる。よって観測方程式からマルチパスによる影響が(6)式のように評価できる。

実験手順は以下のとおりである。まず、マルチパス環境下（図3、西側に壁がある環境）における静止データを300秒取得した。取得時の衛星配置で、直接波がアンテナに入り測位に使用できた衛星を図4に示す（すべてGPS衛星で番号は衛星番号）。

アレーアンテナは7NF-7CGL1L2A2L-XT-1-RoHS（Antcom社）を使用し、7素子のうち正三角形形状に配置された3素子を用いた（図5、各素子間距離は

0.11m）。フロントエンドはコア社の多周波RFデータストリーマを使用し、取得したデジタルデータはGNSS-SDRLIB[3]に読み込ませ、RINEX (Receiver Independent Exchange) Formatで出力し、RTKLIB[4]で測位を行った。



図3. データ取得環境

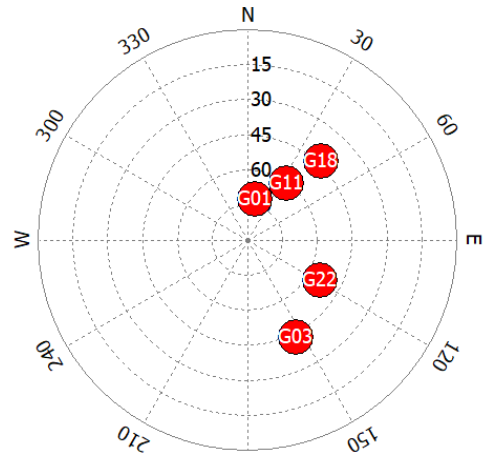


図4. 測位に使用する衛星の配置

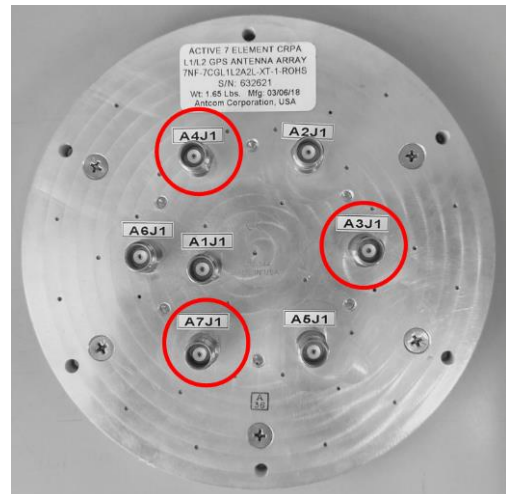


図5. 実験で使用したアレーアンテナ（○印は使用した素子）

マルチパス誤差低減実験の比較対象として単一アンテナで取得した際のマルチパス誤差を評価する必要があるが、ここではアレーアンテナの第1素子で取得したデータを単一データとして使用する。

次にDCMPの拘束条件を考える。図3,4を見ると、測位で用いる5衛星について、西側の壁によってマルチパス誤差が発生している可能性が高いと考えられる。そこで、衛星方向の受信強度を保護し、壁側の受信強度が低下するような拘束条件を作る。シミュレーションにより得られた指向性パターンを図6に示す。この拘束条件の下で信号合成を行う。

単一アンテナの結果と、DCMPによる合成データの結果を次に示す。図7は測位結果の平均値を原点に置いたときの水平方向の変位を表す。次に各衛星のマルチパス誤差の評価関数 $\epsilon(t)$ を求め、例としてG22衛星のマルチパス誤差の評価関数を図8にプロットし、標準偏差 $\sigma$ と低減率を表1に示す。

以上の結果より、DCMPによる合成データでは単一アンテナデータより、マルチパス誤差を5~46%低減でき、測位精度が向上していることが確認できた。

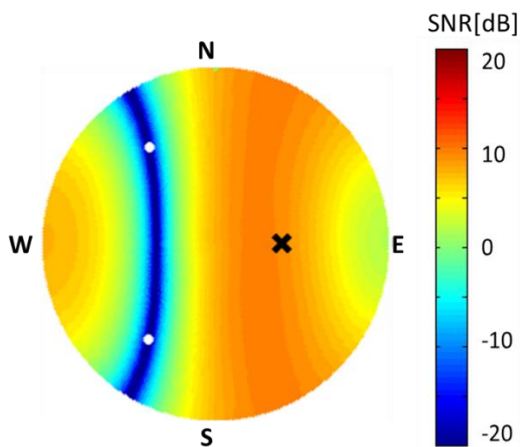


図6. 信号合成後の受信強度予想図 (○:ヌル ×:保護)

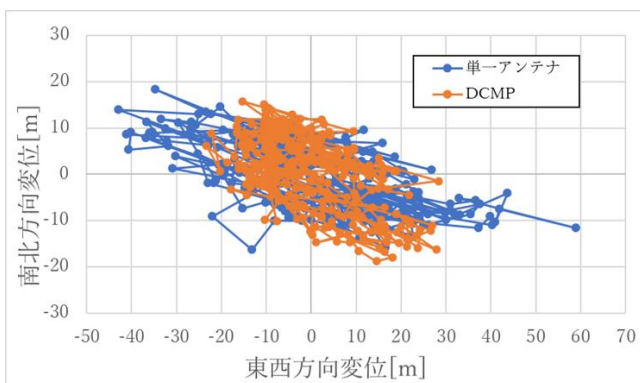


図7. 平均からの水平方向変位

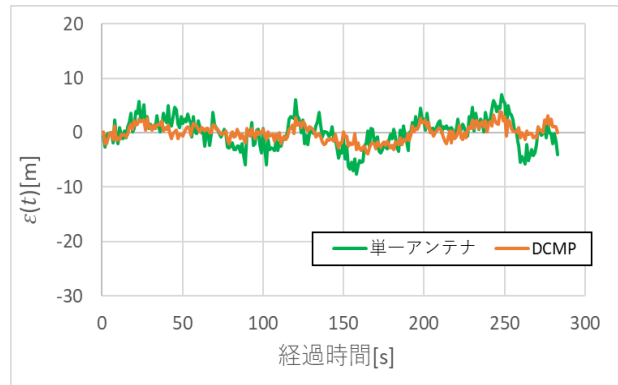


図8. マルチパス評価関数 (G22)

表1. マルチパス誤差の標準偏差 $\sigma$

	G1	G3	G11	G18	G22
単一[m]	1.87	2.72	3.44	5.81	2.69
DCMP[m]	1.77	2.27	3.20	3.72	1.45
低減率[%]	5.02	16.16	6.64	35.88	46.03

## 5. まとめ

GNSS測位における不要信号対策として、DCMPアルゴリズムを用いたマルチパス誤差低減実験を行い、不要波低減の有効性を確認した。所望GNSS信号を増幅し、不要波を低減する技術により、マルチパスだけでなく欺瞞信号や妨害信号の対策にも有効であると期待できる。

今回はマルチパス波の到来方向を正確に推定できなかったため、壁側全体の受信強度を下げる拘束を行った(図6)。しかし、ピンポイントに不要波の到来方向が解ればDCMPアルゴリズムをより活かすことができると考える。従って今後は不要波の信号到来方向推定技術にも着目し、DCMPアルゴリズムと組み合わせることで、不要波に対しより頑健なシステムの構築を目指す。

## 6. 謝辞

本研究の一部はJAXA航空技術イノベーションチャレンジに採択されJAXA航空技術部門次世代航空イノベーションハブと共同で実施されたものである。

## 7. 参考文献

- 1) 米林健太, 藤原健, 大澤壮志, 辻井利昭, CRPA技術による衛星航法のマルチパス誤差低減, 日本航空宇宙学会 第56回飛行機シンポジウム JSASS-2018-5196, 2018.
- 2) 菊間信良, アレーアンテナによる適応信号処理, 科学技術出版, 1998.
- 3) Taro Suzuki, GNSS-SDRLIB <https://github.com/taroz/GNSS-SDRLIB>
- 4) Tomoji Takasu, RTKLIB <http://www.rtklib.com/>