

UWB パルスレーダのためのバイスタティックアンテナ型 高速物体形状推定法の開発

木寺正平*, 阪本卓也, 佐藤 亨 (京都大学大学院 情報学研究科)

An Fast Imaging Algorithm with Bi-static Antenna
for UWB Pulse Radar Systems.

Shouhei Kidera, Takuya Sakamoto and Toru Sato (Kyoto University)

Abstract

Target shape estimation with UWB pulse radars is promising as an imaging technique for household robots. We have already proposed a fast imaging algorithm called SEABED(Shape Estimation Algorithm based on BST and Extraction of Directly scattered wave) based on a reversible transform BST(Boundary Scattering Transform) between the received signals and the target shape. SEABED can be applied only for a mono-static radar system. In order to obtain a high-resolution imaging we have to scan an antenna along a straight line with a small interval, which requires too long time. In order to avoid this difficulty, we utilize a linear array antenna. In this paper, we expand the conventional SEABED method to a bi-static radar system with the array antenna. By a numerical simulation, we clarify that the proposed method has a much higher resolution in imaging than the conventional SEABED method.

キーワード : UWB パルスレーダ、SEABED、バイスタティックアンテナ、高速物体像推定、高解像度
(UWB pulse radar system, SEABED, Bi-static antenna, Fast imaging algorithm, High-resolution)

1. 序 論

室内ロボット等のための高速かつ高解像度な近傍空間測定技術が必要となっている。これに対して光学的な画像化手法が多数提案されている。光学的な手法は水平分解能の点で優れているが、ステレオ視などの画像処理を用いても十分な距離分解能が得られない。一方で高距離分解能を持つ形状推定法としてレーダシステムを用いた手法が多数提案されている [1] ~ [4]。更に近年 FCC で認可された UWB(Ultra Wide-Band) 信号を用いたレーダシステムが従来よりも非常に高い距離分解能を持つ技術として注目されている。しかし従来の画像化手法では、何れも膨大な計算時間を必要としリアルタイムでの処理は困難である。これに対し、以前に我々は高速立体像推定法として SEABED 法と呼ばれる手法を提案している [5] ~ [7]。この手法は、受信された波形画像から抽出された直接散乱波を用いて、散乱波の遅延時間変化と目標形状への可逆な変換関係を利用することにより境界

面を推定する方法である。SEABED 法は受信画像が得られれば、非常に高速な画像化処理が可能であり従来の問題点を大幅に改善する手法である。しかし、この手法では送受信アンテナを走査することを前提とするため、十分な画像分解能を得るには走査間隔を十分小さくする必要があり、データ取得に時間がかかるという問題点を有する。更に走査間隔が十分でない時、推定分解能が劣化するという問題点もある。

本稿では SEABED 法のリアルタイム性を生かすため線形アレイアンテナを用いた高速形状推定法を提案する。本稿では送受信素子を切り離したバイスタティックアンテナにおいても到来時間特性と物体境界面の間で可逆な変換式が成立することを示し、この変換式を利用した形状推定手法を提案する。数値計算により、提案手法は SEABED 法と比較しアンテナ走査を必要とせずに高解像度の像を得ることが可能であること、及び雑音環境下においても安定した推定が可能であることを示す。

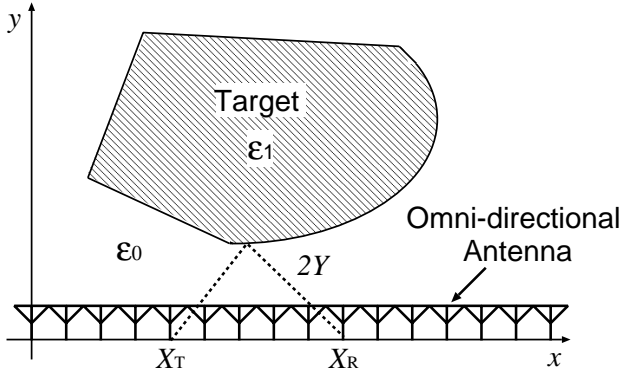


図1 システムモデル
Fig.1 System model.

2. システムモデル

図1にシステムモデルを示す。本稿ではTE波、2次元問題及び凸型形状物体を仮定する。伝搬空間は非分散等方性媒質を仮定し、目標物体は一樣な誘電率を持ち、明瞭な境界を持つ凸形状物体とする。目標物体は $y > 0$ の領域に存在すると仮定する。無指向性アンテナを直線上に等間隔に配置しアレイアンテナを構成する。アレイアンテナ素子数を N とする。送信素子に与える電流波形をモノサイクルパルスとする。目標物体が存在する空間を r 空間と定義し、その空間は送信電流の中心波長 λ で正規化する。素子を x 軸上に配置し、送信素子 $(x, y) = (X_T, 0)$ 、受信素子 $(x, y) = (X_R, 0)$ と定義する。この時の時間領域での受信電界を $s'(X_T, X_R, Y)$ とする。但し $Y = ct/(2\lambda)$ 、 c は光速とする。 $s(X_T, X_R, Y)$ を送信波形を整合フィルタとした時の出力波形とする。この出力波形のピーク値をつないだ3次元曲面を (X_T, X_R, Y) とし d 空間と定義する。本稿では d 空間から r 空間への変換により目標形状推定を実現する。

3. 従来手法

本節では、近傍界物体を対象とした形状推定法である従来のSEABED法(以下、モノスタティックSEABED法と呼ぶ)について述べる。この手法ではモノスタティックレーダーを目標物体に対し直線状に走査する。送受信素子位置 $(x, y) = (X, 0)$ とし送信波形を整合フィルタとする出力波形を $s(X, Y)$ とする。 $s(X, Y)$ のピーク値を求め擬似波面 (X, Y) を得る。図2にモノスタティックSEABED法での (X, Y) と物体境界上の点 (x, y) の関係を示す。 r 空間で (X, Y) と (x, y) が同図に示す関係を満たす時、両空間の間

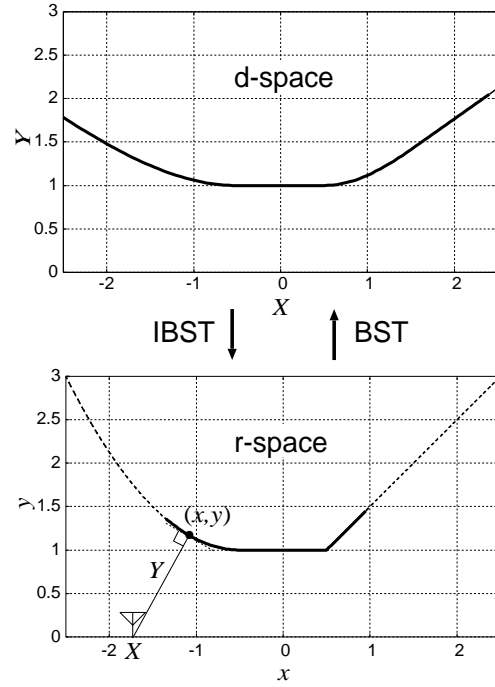


図2 モノスタティックSEABED法での r 空間と d 空間の関係
Fig.2 Relationship of r -space and d -space in monostatic SEABED.

には $|dY/dX| \leq 1$ という条件下で次の可逆な変換式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} X &= x + ydy/dx \\ Y &= y\sqrt{1 + (dy/dx)^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} x &= X - YdY/dX \\ y &= Y\sqrt{1 - (dY/dX)^2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

前者(1)を境界散乱変換(Boundary Scattered Transform;BSTと略称)、後者(2)を逆境界散乱変換(Inverse BST;IBSTと略称)と呼ぶ。この可逆な変換関係により、直接散乱波から抽出される擬似波面より直接的に物体境界面を推定することができる。

この手法は受信波形画像が与えられた時、非常に高速な目標形状推定を実現する。しかし送受信一体型アンテナを仮定するために、推定点数の最大総数は N となる。よって十分な解像度を得るには走査間隔を小さくする必要があり、受信波形画像取得に時間がかかるという問題点がある。また N が小さい時、走査間隔と比較して小さな目標物体に対しては推定像が劣化するという問題点を有する。

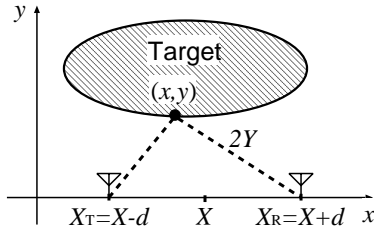


図3 物体とバイスタティックアンテナの位置
Fig. 3 Arrangement of bi-static antenna and target.

4. 提案手法

前節での問題点を解決するため、本稿では線形アレイアンテナを用いた高速高解像度形状推定法を提案する。本手法ではIBSTをバイスタティックアンテナ型に拡張する。これを用いた形状推定法をバイスタティックSEABED法と呼ぶ。その変換式をアレイアンテナシステムに適用し、推定点数を増大させる。以下にその詳細を示す。

各送受信素子より得られる受信波形画像 $s'(X_R, X_T, Y)$ を求める。送信波形を整合フィルタとしその出力波形 $s(X_R, X_T, Y)$ を求める。 $s(X_R, X_T, Y)$ よりピーク値を抽出し、擬似波面 (X_R, X_T, Y) を得る。擬似波面から $X_T = X_R + 2d$ を満たす直線上における断面を取り、擬似波線 (X, Y) を抽出する。但し d は定数とし、 $X = (X_T + X_R)/2$ とする。また ΔX はアレイアンテナ間隔の最小値とし、 d は $2d = k\Delta X$, ($k = 0, \pm 1, \dots, \pm N - 1$) を満たすように選ぶ。この時 (X, Y) と目標物体境界 (x, y) の間には、次の可逆な変換式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} X &= x + \frac{2y(y^2 + d^2)}{y(1 - \dot{y}^2) + \sqrt{y^2(1 + \dot{y}^2)^2 + 4d^2\dot{y}^2}} \\ Y &= \frac{\sqrt{y^2 + d^2} + y\dot{y}(X - x)}{\sqrt{y^2 + d^2}} \end{aligned} \right\} (3)$$

$$\left. \begin{aligned} x &= X - \frac{2Y^3\dot{Y}}{Y^2 - d^2 + \sqrt{(Y^2 - d^2)^2 + 4d^2Y^2\dot{Y}^2}} \\ y &= \frac{\sqrt{Y^2 - d^2}}{Y} \sqrt{Y^2 - (x - X)^2} \end{aligned} \right\} (4)$$

但し、 $\dot{y} = dy/dx$, $\dot{Y} = dY/dX$ とする。図3にバイスタティック型境界散乱変換における素子と目標物体の位置関係を示す。式(3)をBST-BS(BST-BiStatic type)、式(4)をIBST-BSと呼ぶ(付録1参照)。抽出される (X, Y) にIBST-BSを適用することにより推定形状点列を得る。図4に擬似波面曲面 (X_R, X_T, Y) と d をパラメータとした断面 (X, Y) 及び実空間 (x, y) の関係を示す。定数 d を上記の範囲で変化させることにより最大で $N(N - 1)/2$ 個の独立し

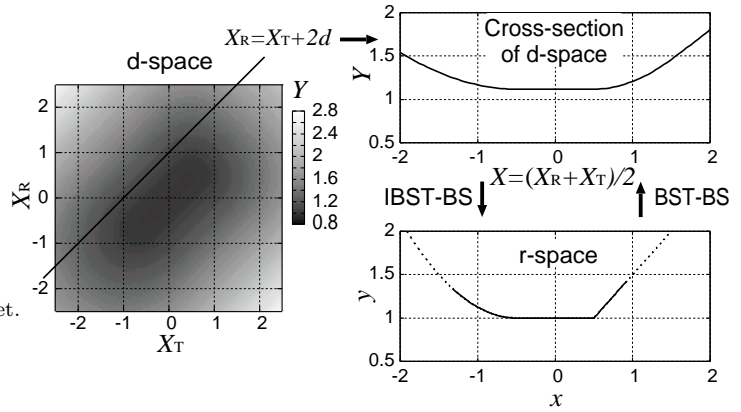


図4 擬似波面 (d空間) とその断面及び r 空間
Fig. 4 Quasi wavefronts and its cross section (d-space) and r-space.

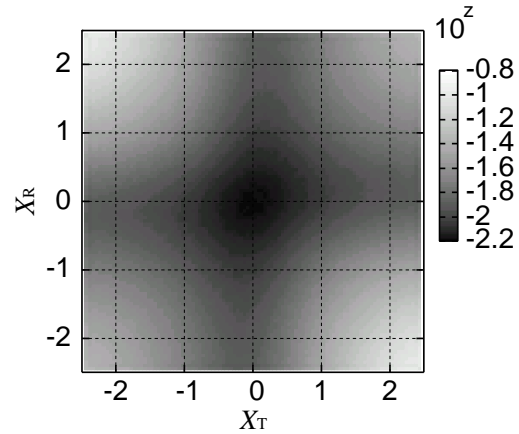


図5 各素子での推定誤差 (点目標)
Fig. 5 Error of a point target.

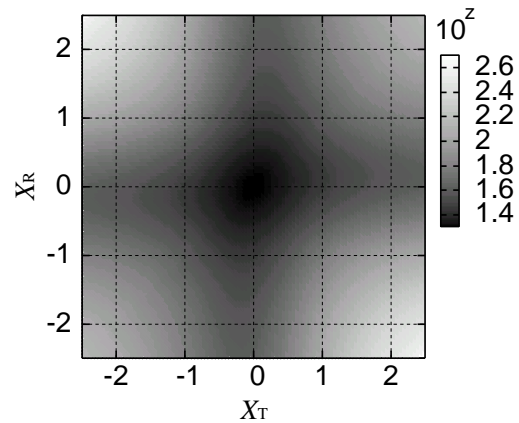


図6 各素子での評価値 (点目標)
Fig. 6 Evaluation value in a point target.

た推定点列を得る。

IBST-BS では dY/dX を用いているため雑音に起因する擬似波面の揺らぎに対して著しい推定像の劣化が伴う。提案手法ではこの問題を解決するため次の評価値を導入する。評価値を決定するために以下のベクトル w を定義する。

$$w = \left(\frac{\partial x}{\partial Y}, \frac{\partial y}{\partial Y}, \frac{1}{\Delta X} \frac{\partial x}{\partial Y}, \frac{1}{\Delta X} \frac{\partial y}{\partial Y} \right) \quad (5)$$

w は擬似波面より推定される (Y, \dot{Y}) から計算する (付録 2 参照)。このベクトルのノルム $w = |w|$ を評価値として設定する。評価値の妥当性を示すために図 5、6 に形状推定誤差と評価値の例を示す。点目標物体 $(x, y) = (1, 0)$ を与える。図 5 では真の擬似波面に標準偏差 0.005 の揺らぎを与え、各送受信素子における推定点と真値との誤差を示す。同様に図 6 では (Y, \dot{Y}) から求まる評価値 w を示す。両図より評価値は誤差特性そのスケールにおいてほぼ一致し、妥当な評価値であることが確認出来る。 w の小さい時には、到来時間の微小変化に対し安定した推定値が得られる。この評価値を用いてある閾値 ϵ を設定し、 $\epsilon < w$ を満たす推定点を推定点系列から除外する。

5. バイスタティック SEABED 法の特性評価

以下では提案手法の特性評価を行う。アレイアンテナ本数 $N = 11$ とし、 $-2.5\lambda \leq x \leq 2.5\lambda$ の範囲に等間隔に並べる。最小アンテナ間隔は $\Delta X = 0.5\lambda$ である。真の擬似波面に標準偏差 0.001 の揺らぎを与え形状推定精度を評価する。目標物体は放物線形状 $y = (x - 0.25)^2 + 1$, ($0 \leq x \leq 0.5$) を与える。図 7 は、SEABED 法による形状推定である。推定点数は 9 点である。同図より目標物体の中央部分において十分な分解能が得られないことが確認できる。また物体端部において擬似波面の不規則成分に起因する推定精度の劣化が確認できる。図 8 は従来手法において評価値による推定点選択を行った場合を示す。 $\epsilon = 3\epsilon_0$ とする。但し ϵ_0 は評価値の最小値を表す。推定点数は 4 点である。同図より推定精度の低い点は除去されるが、中央部分においての分解能は十分でないことが確認できる。

図 9 はバイスタティック SEABED 法において評価値による推定点選択を用いなかった場合である。推定点数は 41 点である。同図より従来手法よりも推定点数は飛躍的に増大することが確認できる。しかし特に物体の物体端部及び曲率の大きな中央付近において推定精度が劣化していることが分かる。図 10 は提案手法による推定境界面を表す。推定点は 22 点である。同図から物体端部における推定精度の劣化を抑えることが可能であり、曲率の大きな場所においても推定面を滑らかに推定することができる。

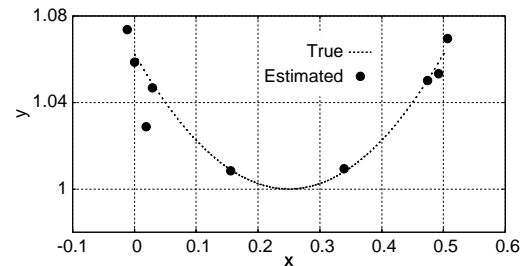


図 7 モノスタティック SEABED 法による推定境界面 (推定点選択なし)

Fig. 7 Estimated boundary by monostatic SEABED without EV (Evaluation Value)

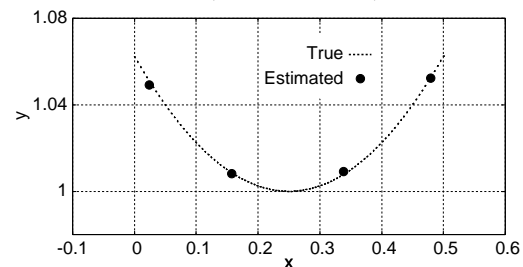


図 8 モノスタティック SEABED 法による推定境界面 (推定点選択あり)

Fig. 8 Estimated boundary by monostatic SEABED with EV

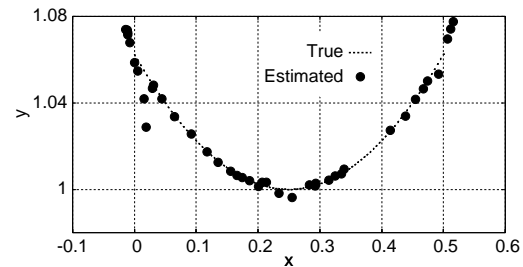


図 9 バイスタティック SEABED 法による推定境界面 (推定点選択なし)

Fig. 9 Estimated boundary by bistatic SEABED without EV

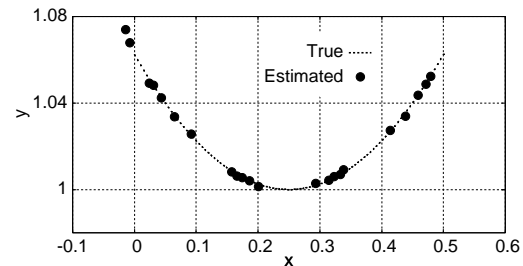


図 10 バイスタティック SEABED による推定境界面 (推定点選択あり)

Fig. 10 Estimated boundary by bistatic SEABED with EV

6. ま と め

直線型アレイアンテナを用いた高速高解像度形状推定法を提案した。パイスタティックアンテナ型の境界散乱変換が存在することを示し、これをアレイアンテナシステムに適用した。パイスタティック SEABED 法により少数のアンテナ素子で高分解能な形状推定が可能であることを示した。また雑音耐性を改善するための評価値を設定し、擬似波面の揺らぎに対して安定した形状推定が可能であることを示した。今後は本手法を 3 次元問題に拡張し、また実験により提案手法の特性を評価する必要がある。

謝 辞

本研究の一部は 21 世紀 COE プログラムによる (Grant No. 14213201)。

文 献

- [1] C. Chiu, C. Li, and W. Chan, "Image reconstruction of a buried conductor by the genetic algorithm," *IEICE Trans. Electron.*, vol. E84-C, no. 12, pp. 1946–1951, 2001.
- [2] T. Takenaka, H. Jia, and T. Tanaka, "Microwave imaging of an anisotropic cylindrical object by a forward-backward time-stepping method," *IEICE Trans. Electron.*, vol. E84-C, no. pp. 1910–1916, 2001.
- [3] T. Sato, K. Takeda, T. Nagamatsu, T. Wakayama, I. Kimura and T. Shinbo, "Automatic signal processing of front monitor radar for tunneling machines," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.35, no.2, pp.354–359, 1997.
- [4] T. Sato, T. Wakayama, and K. Takemura, "An imaging algorithm of objects embedded in a lossy dispersive medium for subsurface radar data processing," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.38, no.1, pp.296–303, 2000.
- [5] T. Sakamoto and T. Sato, "A target shape estimation algorithm for pulse radar systems based on boundary scattering transform," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E87-B, no.5, pp. 1357–1365, 2004.
- [6] T. Sakamoto and T. Sato, "A phase compensation algorithm for high-resolution pulse radar systems," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E87-B, no.6, pp. 1631–1638, 2004.
- [7] T. Sakamoto and T. Sato, "A fast algorithm of 3-dimensional imaging for pulse radar systems," *2004 IEEE AP-S International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting*, vol. 3, pp. 2099–2102, 2004.

付 録

1. IBST-BS 及び BST-BS の導出

以下では IBST-BS の導出を述べる。図 3 の通り $X_T = X + d$, $X_R = X - d$ とする。この時物体境界上の点 (x, y) は次式を満たす。

$$\frac{(x - X)^2}{Y^2} + \frac{y^2}{Y^2 - d^2} = 1 \quad (\text{A}\cdot 1)$$

但し、 $Y > d > 0$ とする。ここで $G(X, Y)$ を

$$G(X, Y) = (Y^2 - d^2)(x - X)^2 + Y^2 y^2 - Y^2(Y^2 - d^2) \quad (\text{A}\cdot 2)$$

と定義する。 (x, y) が物体境界線上にある時、 $G(X, Y) = 0$, $\partial G(X, Y)/\partial X = 0$ を満たす。この 2 式を用いて y を消去すると、

$$d^2 \dot{Y}(x - X)^2 - Y(Y^2 - d^2)(x - X) - Y^4 \dot{Y} = 0 \quad (\text{A}\cdot 3)$$

を得る。ここで $\dot{Y} = dY/dX$ としている。よって $d \neq 0$ かつ $\dot{Y} \neq 0$ の時、式 (A.3) を $(x - X)$ について解くと、

$$x = X - \frac{2Y^3 \dot{Y}}{Y^2 - d^2 \pm \sqrt{(Y^2 - d^2)^2 + 4d^2 Y^2 \dot{Y}^2}} \quad (\text{A}\cdot 4)$$

となる。ここでそれぞれの解を x_+ , x_- とおく。添字の符号は各解の平方根の前の符号と一致する。両解の絶対値について $d \rightarrow 0$ を取ると、

$$\lim_{d \rightarrow 0} |x_+| = |X - Y \dot{Y}| \quad (\text{A}\cdot 5)$$

$$\lim_{d \rightarrow 0} |x_-| = \infty \quad (\text{A}\cdot 6)$$

よって $d \rightarrow 0$ で x は有界であるという条件を満たす解は

$$x = X - \frac{2Y^3 \dot{Y}}{Y^2 - d^2 + \sqrt{(Y^2 - d^2)^2 + 4d^2 Y^2 \dot{Y}^2}}, \quad (d \neq 0, \dot{Y} \neq 0) \quad (\text{A}\cdot 7)$$

である。また式 (A.1) で $\dot{Y} = 0$ とすると、

$$x = X \quad (\text{A}\cdot 8)$$

となり、同式において $d = 0$ とすると、

$$x = X - Y \dot{Y} \quad (\text{A}\cdot 9)$$

となる。この二つの解は、式 (A.7) での $\dot{Y} = 0$ 及び $d = 0$ の時の各解と一致し、式 (A.1) を用いると散乱点 (x, y) を表す式 (4) を得る。

同様に BST-BS は $g(x, y)$ を

$$g(x, y) = (Y^2 - d^2)(x - X)^2 + Y^2 y^2 - Y^2(Y^2 - d^2) \quad (\text{A}\cdot 10)$$

とおき、 $g(x, y) = 0$, $\partial g(x, y)/\partial x = 0$ を連立させて解くことにより求まる。

2. 評価値の導出

以下に提案手法で用いる評価値の導出を行う。 Y の微少変化に対する x, y の変化 dx, dy は次式で与えられる。

$$dx = \frac{\partial x}{\partial Y} dY + \frac{\partial x}{\partial \dot{Y}} d\dot{Y} \quad (\text{A}\cdot\text{11})$$

$$dy = \frac{\partial y}{\partial Y} dY + \frac{\partial y}{\partial \dot{Y}} d\dot{Y} \quad (\text{A}\cdot\text{12})$$

ここで、アレイアンテナ間隔を ΔX とすると次の近似式が成立する。

$$d\dot{Y} \simeq \frac{dY}{\Delta X} \quad (\text{A}\cdot\text{13})$$

微少な揺らぎ dY に対する (x, y) の変化を評価するため、次の評価値を表す 4 次元ベクトル w を以下の通り定義する。

$$w = \left(\frac{\partial x}{\partial Y}, \frac{\partial y}{\partial Y}, \frac{1}{\Delta X} \frac{\partial x}{\partial \dot{Y}}, \frac{1}{\Delta X} \frac{\partial y}{\partial \dot{Y}} \right) \quad (\text{A}\cdot\text{14})$$

但し、

$$\frac{\partial x}{\partial Y} = \frac{X' \left((Y^2 - 3d^2)F(Y, \dot{Y}) + 8d^2 Y^2 \dot{Y}^2 \right)}{Y F(Y, \dot{Y}) \sqrt{(Y^2 - d^2)^2 + 4d^2 Y^2 \dot{Y}^2}} \quad (\text{A}\cdot\text{15})$$

$$\frac{\partial x}{\partial \dot{Y}} = \frac{X'(Y^2 - d^2)}{\dot{Y} \sqrt{(Y^2 - d^2)^2 + 4d^2 Y^2 \dot{Y}^2}} \quad (\text{A}\cdot\text{16})$$

$$\frac{\partial y}{\partial Y} = \frac{(d^2 - X'^2)Y + (Y^2 - d^2)X' \partial X' / \partial Y}{Y \sqrt{(Y^2 - d^2)(Y^2 - X'^2)}} \quad (\text{A}\cdot\text{17})$$

$$\frac{\partial y}{\partial \dot{Y}} = -\frac{\sqrt{(Y^2 - d^2)} X' \partial X' / \partial \dot{Y}}{Y(Y^2 - X'^2)} \quad (\text{A}\cdot\text{18})$$

である。ここで $F(Y, \dot{Y}) = Y^2 - d^2 + \sqrt{(Y^2 - d^2)^2 + 4d^2 Y^2 \dot{Y}^2}$, $X' = x - X$ としている。