

## 明 細 書

発明の名称：映像化装置及び映像化方法

### 技術分野

[0001] 本開示は、散乱波の計測データを用いて、計測領域における物体を映像化する映像化装置等に関する。

### 背景技術

[0002] 散乱波の計測データを用いて、計測領域における物体を映像化する映像化装置等に関する技術として、特許文献1、特許文献2、特許文献3、特許文献4及び特許文献5に記載の技術がある。

[0003] 例えば、特許文献1に記載の技術では、マイクロ波送出器から送出されたビームが検査対象に入射され、散乱したビームの振幅及び位相がマイクロ波検出器により検出される。そして、マイクロ波検出器の出力信号から誘電率の分布が計算され、検査対象における断層の像表示が行われる。

### 先行技術文献

#### 特許文献

- [0004] 特許文献1：特開昭62-66145号公報  
特許文献2：国際公開第2014/125815号  
特許文献3：国際公開第2015/136936号  
特許文献4：国際公開第2021/020387号  
特許文献5：国際公開第2021/053971号

### 発明の概要

#### 発明が解決しようとする課題

[0005] しかしながら、散乱波の計測データを用いて、計測領域における物体を映像化することは容易ではない。具体的には、計測領域内の状態が既知である場合において、計測領域に入射された波動に対して計測領域から放射される散乱波の計測データを推定することは、順方向問題と呼ばれ、容易である。一方、散乱波の計測データが既知である場合において、計測領域内の状態を

求めることは、逆方向問題と呼ばれ、容易ではない。

[0006] また、計測領域が大気中である場合、大気の濃度が高度によって異なるため、計測領域に入射された波動がまっすぐ進まない可能性がある。そのため、計測領域が大気中である場合、波動及び散乱波を用いて、物体を映像化することは容易ではない。

[0007] そこで、本開示は、大気中の計測領域における物体を高い精度で映像化することができる映像化装置等を提供する。

### 課題を解決するための手段

[0008] 本開示の一態様に係る映像化装置は、それぞれが大気中の計測領域へ波動を送信する複数の送信器と、それぞれが前記計測領域から前記波動の散乱波を受信する複数の受信器と、前記散乱波の計測データを用いて、前記計測領域における物体を映像化する情報処理回路とを備え、前記情報処理回路は、前記物体の映像化において、前記波動の送信位置及び前記散乱波の受信位置が入力されて前記受信位置における前記散乱波の量が出力される散乱場関数を、前記計測データを用いて導出し、映像化対象位置が入力されて前記映像化対象位置の画像強度が出力される映像化関数であって、前記送信位置及び前記受信位置として前記映像化対象位置を前記散乱場関数に入力することで前記散乱場関数から出力される量を用いて定められる映像化関数を導出し、前記映像化関数を用いて、前記計測領域における前記物体を映像化し、前記情報処理回路は、前記散乱場関数の導出において、前記大気中の高さによって前記大気中の屈折率が変化することに伴って前記波動の波数が変化することを前記散乱場関数に反映させる。

[0009] なお、これらの包括的又は具体的な態様は、システム、装置、方法、集積回路、コンピュータプログラム、又は、コンピュータ読み取り可能なＣＤ－ＲＯＭなどの非一時的な記録媒体で実現されてもよく、システム、装置、方法、集積回路、コンピュータプログラム、及び、記録媒体の任意な組み合わせで実現されてもよい。

### 発明の効果

[0010] 本開示によれば、大気中の計測領域における物体を高い精度で映像化することが可能である。

### 図面の簡単な説明

[0011] [図1]図1は、1次元マルチスタティックアレイアンテナを示す概念図である。

[図2]図2は、平面における送信点及び受信点の関係を示す概念図である。

[図3]図3は、準2次元アレイアンテナに関する各座標の例を示す概念図である。

[図4]図4は、地表面から $1^{\circ}$ の放射角で放射された1GHzの電磁波の軌道を示すシミュレーション図である。

[図5]図5は、地表面から $2.56^{\circ}$ の放射角で放射された1GHzの電磁波の軌道を示すシミュレーション図である。

[図6]図6は、多層構造の媒質を示す概念図である。

[図7]図7は、映像化装置の基本構成を示すブロック図である。

[図8]図8は、映像化装置の基本動作を示すフローチャートである。

### 発明を実施するための形態

[0012] 本開示の一態様に係る映像化装置は、それぞれが大気中の計測領域へ波動を送信する複数の送信器と、それぞれが前記計測領域から前記波動の散乱波を受信する複数の受信器と、前記散乱波の計測データを用いて、前記計測領域における物体を映像化する情報処理回路とを備え、前記情報処理回路は、前記物体の映像化において、前記波動の送信位置及び前記散乱波の受信位置が入力されて前記受信位置における前記散乱波の量が出力される散乱場関数を、前記計測データを用いて導出し、映像化対象位置が入力されて前記映像化対象位置の画像強度が出力される映像化関数であって、前記送信位置及び前記受信位置として前記映像化対象位置を前記散乱場関数に入力することで前記散乱場関数から出力される量を用いて定められる映像化関数を導出し、前記映像化関数を用いて、前記計測領域における前記物体を映像化し、前記情報処理回路は、前記散乱場関数の導出において、前記大気中の高さによ

て前記大気中の屈折率が変化することに伴って前記波動の波数が変化することを前記散乱場関数に反映させる。

[0013] これにより、映像化装置は、高度によって変化する大気屈折率が反映された散乱場関数及び映像化関数を導出することができる。したがって、映像化装置は、大気中の計測領域における物体を高い精度で映像化することができる。

[0014] 例えば、前記複数の送信器及び前記複数の受信器は、 $y$  軸に平行な直線上に配置され、前記大気中の前記計測領域は、複数の層に分割され、前記複数の層の第  $n$  層の前記散乱場関数は、

[数1]

$$\begin{aligned} \varphi_n(x, y_1, y_2, z, k_n) \\ = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y1} y_1 + k_{y2} y_2)} \tilde{\varphi}(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k_1) \\ \cdot e^{i\{\sqrt{(k_n^2 - k_{y1}^2) + \sqrt{(k_n^2 - k_{y2}^2)^2 - k_x^2}}\}(z - \sum_{j=1}^{n-1} h_j)} \prod_{j=1}^{n-1} e^{i\{\sqrt{(k_j^2 - k_{y1}^2) + \sqrt{(k_j^2 - k_{y2}^2)^2 - k_x^2}}\}h_j} dk_x dk_{y1} dk_{y2} \end{aligned}$$

で表現され、前記散乱場関数の  $x$  及び  $z$  は、前記送信位置及び前記受信位置の  $x$  座標及び  $z$  座標を示し、前記散乱場関数の  $y_1$  は、前記送信位置の  $y$  座標を示し、前記散乱場関数の  $y_2$  は、前記受信位置の  $y$  座標を示し、 $k_1$ 、 $k_j$  及び  $k_n$  は、前記複数の層の第 1 層、第  $j$  層及び第  $n$  層における前記波動の波数を示し、 $h_j$  は、第  $j$  層の高さを示し、 $k_x$ 、 $k_{y1}$  及び  $k_{y2}$  は、前記散乱場関数の  $x$ 、 $y_1$  及び  $y_2$  に関する波数に対応する変数を示し、

[数2]

$$\tilde{\varphi}$$

は、フーリエ変換された前記計測データを示す。

[0015] これにより、映像化装置は、直線上に配置された複数の送信器及び複数の受信器によって得られる計測データから層毎に導出される散乱場関数を用いて、大気中の計測領域における物体を高い精度で映像化することができる。

[0016] また、例えば、前記複数の層の第  $n$  層の前記映像化関数は、

[数3]

$$\begin{aligned} \rho_n(x, y, z) &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{ik_{zn}(z - \sum_{j=1}^{n-1} h_j)} \tilde{\varphi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k_1) \\ &\quad \cdot \prod_{j=1}^{n-1} e^{i \left\{ \sqrt{(k_j^2 - k_{y_1}^2) + \sqrt{(k_j^2 - k_{y_2}^2)^2 - k_x^2}} \right\} h_j} \cdot \left( \frac{dk_n}{dk_{zn}} \right) \left( \frac{d\omega}{dk_n} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk_{zn} \end{aligned}$$

で表現され、前記映像化関数の  $x$ 、 $y$  及び  $z$  は、前記映像化対象位置の  $x$  座標、 $y$  座標及び  $z$  座標を示し、 $\omega$  は、前記波動の角周波数を示し、 $k_{zn}$  は、

[数4]

$$k_{zn} = \sqrt{\left( \sqrt{k_n^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k_n^2 - k_{y_2}^2} \right)^2 - k_x^2}$$

で定められる。

[0017] これにより、映像化装置は、直線上に配置された複数の送信器及び複数の受信器によって得られる計測データから層毎に導出される映像化関数を用いて、大気中の計測領域における物体を高い精度で映像化することができる。

[0018] また、例えば、前記複数の送信器及び前記複数の受信器は、 $y$  軸に平行な直線上に配置され、前記散乱場関数は、

[数5]

$$\begin{aligned} \varphi(x, y_1, y_2, z, k) &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} \tilde{\varphi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k_1) \\ &\quad \cdot e^{i \int_0^z \sqrt{(k(z_a)^2 - k_{y_1}^2) + \sqrt{(k(z_a)^2 - k_{y_2}^2)^2 - k_x^2}} dz_a} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \end{aligned}$$

で表現され、前記散乱場関数の  $x$  及び  $z$  は、前記送信位置及び前記受信位置の  $x$  座標及び  $z$  座標を示し、前記散乱場関数の  $y_1$  は、前記送信位置の  $y$  座標を示し、前記散乱場関数の  $y_2$  は、前記受信位置の  $y$  座標を示し、 $k$  は、 $z$  座標が  $z$  である位置における前記波動の波数を示し、 $k_1$  は、 $z$  座標が  $0$  である位置における前記波動の波数を示し、 $k(z_a)$  は、 $z$  座標が  $z_a$  である位置における前記波動の波数を示し、 $z_a$  は、 $z$  座標に対応する変数を示し、 $k_x$

、 $k_{y1}$ 及び $k_{y2}$ は、前記散乱場関数の $x$ 、 $y_1$ 及び $y_2$ に関する波数に対応する変数を示し、

[数6]

$$\tilde{\varphi}$$

は、フーリエ変換された前記計測データを示す。

[0019] これにより、映像化装置は、直線上に配置された複数の送信器及び複数の受信器によって得られる計測データから導出される散乱場関数を用いて、大気中の計測領域における物体を高い精度で映像化することができる。

[0020] また、例えば、前記映像化関数は、

[数7]

$$\begin{aligned} \rho(x, y, z) &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y1} y + k_{y2} y)} \tilde{\varphi}(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k_1) \\ &\quad \cdot e^{i \int_0^z \left( \sqrt{k(z_a)^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k(z_a)^2 - k_{y2}^2} \right) - k_x^2 dz_a} dk_x dk_{y1} dk_{y2} d\omega \end{aligned}$$

で表現され、前記映像化関数の $x$ 、 $y$ 及び $z$ は、前記映像化対象位置の $x$ 座標、 $y$ 座標及び $z$ 座標を示し、 $\omega$ は、前記波動の角周波数に対応する変数を示す。

[0021] これにより、映像化装置は、直線上に配置された複数の送信器及び複数の受信器によって得られる計測データから導出される映像化関数を用いて、大気中の計測領域における物体を高い精度で映像化することができる。

[0022] また、本開示の一態様に係る映像化方法は、複数の送信器のそれぞれから、大気中の計測領域へ波動を送信するステップと、複数の受信器のそれぞれにおいて、前記計測領域から前記波動の散乱波を受信するステップと、前記散乱波の計測データを用いて、前記計測領域における物体を映像化するステップとを含み、前記物体を映像化するステップは、前記波動の送信位置及び前記散乱波の受信位置が入力されて前記受信位置における前記散乱波の量が出力される散乱場関数を、前記計測データを用いて導出するステップと、映像化対象位置が入力されて前記映像化対象位置の画像強度が出力される映像

化関数であって、前記送信位置及び前記受信位置として前記映像化対象位置を前記散乱場関数に入力することで前記散乱場関数から出力される量を用いて定められる映像化関数を導出するステップと、前記映像化関数を用いて、前記計測領域における前記物体を映像化するステップとを含み、前記散乱場関数を導出するステップでは、前記大気中の高さによって前記大気中の屈折率が変化することに伴って前記波動の波数が変化することを前記散乱場関数に反映させる。

[0023] これにより、高度によって変化する大気屈折率が反映された散乱場関数及び映像化関数を導出することが可能である。したがって、映像化装置は、大気中の計測領域における物体を高い精度で映像化することが可能である。

[0024] 以下、図面を用いて、実施の形態について説明する。なお、以下で説明する実施の形態は、いずれも包括的又は具体的な例を示す。以下の実施の形態で示される数値、形状、材料、構成要素、構成要素の配置位置及び接続形態、ステップ、ステップの順序等は、一例であり、請求の範囲を限定する主旨ではない。

[0025] また、以下の説明において、特に上記の特許文献2、特許文献3、特許文献4及び特許文献5に記載の技術等が既存の技術として参照され得る。また、以下の説明において、主にマイクロ波等の電波又は電磁波が波動として想定されているが、波動はマイクロ波等の電波又は電磁波に限られず、弾性波等であってもよい。また、散乱に基づく映像化は、散乱トモグラフィと表現され得る。したがって、以下の説明における映像化装置及び映像化方法は、それぞれ、散乱トモグラフィ装置及び散乱トモグラフィ方法とも表現され得る。

[0026] (実施の形態)

本実施の形態における映像化装置は、散乱波の計測データを用いて、計測領域における物体を映像化する。以下、本実施の形態における映像化装置をその基礎となる技術及び理論なども含めて、詳細に説明する。

[0027] <1 概要>

散乱場理論は、計測領域における物体の映像化に用いられる理論である。例えば、複数の送信位置のそれぞれから計測領域へ波動が送信され、複数の受信位置のそれぞれにおいて計測領域から波動の散乱波が受信される。そして、送信位置と受信位置との各組み合わせについて散乱波の計測データが得られる。そして、計測データを用いて、計測領域における物体が映像化される。その際、散乱場理論によって、計測データから計測領域における散乱の状態が算出され、散乱の状態に基づいて、物体が高精度に映像化される。

[0028] しかしながら、計測領域が大気中である場合、大気の濃度が高度によって異なるため、計測領域に送信された波動がまっすぐ進まない可能性がある。この現象は、大気屈折とも呼ばれる。そのため、計測領域が大気中である場合、波動及び散乱波を用いて、物体を映像化することは容易ではない。

[0029] そこで、本開示は、大気中の計測領域における物体を映像化するための散乱場理論を説明する。具体的には、まず、大気屈折率が考慮されていない散乱場理論を説明し、その後、大気屈折率が考慮された散乱場理論を説明する。

[0030] <2 大気屈折が考慮されていない散乱場理論>

本章では、大気屈折が考慮されていない散乱場理論を説明する。

[0031] <2-1 1次元配列>

図1は、1次元マルチスタティックアレイアンテナを示す概念図である。図1のように、 $n$ 個の素子の中から任意の2つが送信素子及び受信素子として用いられることにより、送信素子と受信素子とのペアが固定されたモノスタティック環境に比べて、近距離から遠距離まで高S/N比で信号が受信可能になる。したがって、最終的に得られる画像の質が大幅に改善される。当然データの量は $n$ 倍に増加するが、以下に述べる理論により再構成に要する時間も飛躍的に短縮される。

[0032] 図1のように、点 $P_1(x, y_1, z)$ から放射された電波が点 $P(\xi, \eta, \zeta)$ で反射し、点 $P_2(x, y_2, z)$ で受信される状況がここでは検討される。点 $P$ が領域 $D$ 全体を動くとき、 $P_2$ で受信される信号は、次式(2-1

－ 1 ) のように表される。

[0033] [数8]

$$\varphi(x, y_1, y_2, z) = \iint_D \frac{e^{ik\rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{ik\rho_2}}{\rho_2} \varepsilon(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta$$

$$\rho_1 = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y_1-\eta)^2 + (z-\zeta)^2}$$

$$\rho_2 = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y_2-\eta)^2 + (z-\zeta)^2}$$

$$\cdots (2-1-1)$$

[0034] ここで、 $\varepsilon(\xi, \eta, \zeta)$  は、点 P ( $\xi, \eta, \zeta$ ) の誘電率の関数を示し、点 P ( $\xi, \eta, \zeta$ ) での反射率に対応する。また、点 P ( $\xi, \eta, \zeta$ ) は、反射点に対応する。なお、 $\varepsilon(\xi, \eta, \zeta)$  は、未知である。また、時間の因子が  $e \times p(-i\omega t)$  に比例すると仮定されている。上式の被積分項にあるカーネル関数は、次式 (2-1-2) の  $\phi$  で表現される。

[0035] [数9]

$$\phi = \frac{e^{ik\rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{ik\rho_2}}{\rho_2}$$

$$\cdots (2-1-2)$$

[0036] 次に、この式 (2-1-2) が漸近的な解となる偏微分方程式が検討される。そのため、微分結果に生ずる  $1/\rho$  に関して高次の項を無視して計算が行われる。ここでは、微分の略記法が式 (2-1-3) のように定義される。

[0037] [数10]

$$\frac{\partial}{\partial t} \rightarrow \partial_t, \frac{\partial}{\partial x} \rightarrow \partial_x, \frac{\partial}{\partial y_1} \rightarrow \partial_{y_1}, \frac{\partial}{\partial y_2} \rightarrow \partial_{y_2}, \frac{\partial}{\partial z} \rightarrow \partial_z$$

$$\cdots (2-1-3)$$

[0038] また、ここでは、式 (2-1-2) が短波長 (高周波、或は  $k$  が大きい) で漸近的な解となるような偏微分方程式が検討される。このような偏微分方程式の解は、マイクロ波を用いる映像化ではほとんど厳密解であるとみなされ得る。まず、 $\phi$  の各次数の微分結果が、以下の式 (2-1-4) のように

表現される。

[0039] [数11]

$$\begin{aligned}
 \partial_x \phi &= ik(x-\xi) \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right) \phi + o(\rho^{-3}) & \partial_{y_1} \phi &= ik \frac{y_1 - \eta}{\rho_1} \phi + o(\rho^{-3}) \\
 \partial_{y_2} \phi &= ik \frac{y_2 - \eta}{\rho_2} \phi + o(\rho^{-3}) & \partial_z \phi &= ik(z-\zeta) \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right) \phi + o(\rho^{-3}) \\
 \partial_x \partial_x \phi &= (ik)^2 (x-\xi)^2 \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right)^2 \phi + o(\rho^{-3}) \\
 \partial_z \partial_z \phi &= (ik)^2 (z-\zeta)^2 \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right)^2 \phi + o(\rho^{-3}) \\
 \partial_{y_1} \partial_{y_1} \phi &= (ik)^2 \left( \frac{y_1 - \eta}{\rho_1} \right)^2 \phi + o(\rho^{-3}) \\
 \partial_{y_2} \partial_{y_2} \phi &= (ik)^2 \left( \frac{y_2 - \eta}{\rho_2} \right)^2 \phi + o(\rho^{-3}) \\
 &\dots (2-1-4)
 \end{aligned}$$

[0040] 以下では、複雑な  $o(\ast)$  の項は省略される。2階微分に関する4つの式の和に従って、次式(2-1-5)が得られる。

[0041] [数12]

$$\begin{aligned}
 \Delta_4 \phi &= (\partial_x^2 + \partial_{y_1}^2 + \partial_{y_2}^2 + \partial_z^2) \phi \\
 &= (ik)^2 \left\{ 2 + 2 \frac{(x-\xi)^2 + (z-\zeta)^2}{\rho_1 \rho_2} \right\} \phi \\
 &\dots (2-1-5)
 \end{aligned}$$

[0042] したがって、式(2-1-5)から次式(2-1-6)が得られる。

[0043] [数13]

$$\begin{aligned}
 \{\Delta_4 - 2(ik)^2\} \phi &= 2(ik)^2 \frac{\rho_1^2 - (y_1 - \eta)^2}{\rho_1 \rho_2} \phi \\
 &= 2(ik)^2 \frac{\rho_2^2 - (y_2 - \eta)^2}{\rho_1 \rho_2} \phi \\
 &\dots (2-1-6)
 \end{aligned}$$

[0044] 式(2-1-6)の演算を2回作用させることにより、次式(2-1-7)が得られる。

[0045] [数14]

$$\begin{aligned} \{\Delta_4 - 2(ik)^2\}^2 \phi &= 4(ik)^4 \frac{\{\rho_1^2 - (y_1 - \eta)^2\} \{\rho_2^2 - (y_2 - \eta)^2\}}{\rho_1^2 \rho_2^2} \phi \\ &= 4(ik)^4 \{1 - (ik)^{-2} \partial_{y_1}^2\} \{1 - (ik)^{-2} \partial_{y_2}^2\} \phi \\ &\dots (2-1-7) \end{aligned}$$

[0046] 式 (2-1-7) を整理して次式 (2-1-8) が得られる。

[0047] [数15]

$$\begin{aligned} \left[ \frac{1}{4} \{\Delta_4 - 2(ik)^2\}^2 - \partial_{y_1}^2 \partial_{y_2}^2 + (ik)^2 (\partial_{y_1}^2 + \partial_{y_2}^2) - (ik)^4 \right] \phi &= 0 \\ &\dots (2-1-8) \end{aligned}$$

[0048] この式 (2-1-8) は定常状態を仮定して導かれたが、この式 (2-1-8) を非定常状態へ拡張することは容易である。そのため、時間  $t$  に関する偏微分を示す  $\partial_t$ 、及び、電波の伝搬速度を示す  $c$  を用いて、次式 (2-1-9) のような変数の置換えが行われる。

[0049] [数16]

$$\begin{aligned} -ik &\rightarrow \frac{1}{c} \partial_t \\ &\dots (2-1-9) \end{aligned}$$

[0050] 上記のプロセスによって、最終的に次式 (2-1-10) のような方程式が得られる。

[0051] [数17]

$$\begin{aligned} \left\{ \Delta_4^2 - \frac{4}{c^2} (\partial_t^2 \partial_x^2 + \partial_t^2 \partial_z^2) - 4 \partial_{y_1}^2 \partial_{y_2}^2 \right\} \phi &= 0 \\ \Delta_4 &= \partial_x^2 + \partial_{y_1}^2 + \partial_{y_2}^2 + \partial_z^2 \\ &\dots (2-1-10) \end{aligned}$$

[0052] 上記の式 (2-1-10) は、式 (2-1-2) の  $\phi$  が解となる偏微分方程式である。式 (2-1-1) の積分核へ微分を適用することにより、式 (2-1-1) の

[数18]

 $\varphi$ 

もまた上記偏微分方程式を満たす。この方程式は5個の変数（ $t$ 、 $x$ 、 $y_1$ 、 $y_2$ 、 $z$ ）で構成される4次元の擬似波動方程式である。

[0053] 次に、この方程式がフーリエ変換を用いて解かれる。まず、

[数19]

 $\varphi$ 

が、次式（2-1-11）のように、 $t$ 、 $x$ 、 $y_1$ 、 $y_2$ について多重フーリエ変換される。

[0054] [数20]

$$\tilde{\varphi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, z, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} dt \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} \varphi(x, y_1, y_2, z, t) dx dy_1 dy_2$$

・・・(2-1-11)

[0055]  $z$ に関する微分が $D_z$ と表現される場合、式（2-1-10）及び式（2-1-11）から以下の式（2-1-12）が得られる。

[0056] [数21]

$$\{(D_z^2 - k_x^2 - k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2 + 4k^2(D_z^2 - k_x^2) - 4k_{y_1}^2 k_{y_2}^2\} \tilde{\varphi} = 0$$

・・・(2-1-12)

[0057] ここでは、 $\omega = c k$ の関係が用いられている。この方程式の4つの基本解は次式（2-1-13）のように表現される。

[0058] [数22]

$$E_1 = e^{i\{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}\}^2 - k_x^2\} z}$$

$$E_2 = e^{-i\{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}\}^2 - k_x^2\} z}$$

$$E_3 = e^{i\{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} - \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}\}^2 - k_x^2\} z}$$

$$E_4 = e^{-i\{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} - \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}\}^2 - k_x^2\} z}$$

・・・(2-1-13)

[0059] 時間の因子が $e^{-i\omega t}$ であること、放射電波のパスで位相が加算されること

、及び、物体で反射した電波が計測面（測定面）へ向かって跳ね返ってくることを考慮すると、 $E_1$ が唯一の意味のある解である。したがって、次式（2-1-14）が得られる。

[0060] [数23]

$$\tilde{\varphi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, z, k) = a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{i\{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} - k_x\}z}$$

・・・（2-1-14）

[0061] この式（2-1-14）に $z=0$ を代入することにより、 $a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$ が次式（2-1-15）のように求まる。

[0062] [数24]

$$a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) = \tilde{\varphi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, 0, k)$$

・・・（2-1-15）

[0063] 最終的に

[数25]

$$\varphi$$

が次式（2-1-16）のように求まる。

[0064] [数26]

$$\begin{aligned} \varphi(x, y_1, y_2, z, k) &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\ &\quad \cdot e^{i\{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} - k_x\}z} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \end{aligned}$$

・・・（2-1-16）

[0065]  $k$ 及び $z$ が固定である条件下で式（2-1-16）に極限操作（ $y_2 \rightarrow y_1 = y$ ）を適用し、その結果を $k$ に関して積分することにより、映像化関数が次式（2-1-17）のように求まる。

[0066]

[数27]

$$\begin{aligned}
\varphi(x, y, y, z, k) &= \lim_{y_2 \rightarrow y_1 = y} [\varphi(x, y, y_2, z, k)] \\
&= \lim_{y_2 \rightarrow y_1 = y} \left[ \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y_2)} a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \right. \\
&\quad \left. \cdot e^{i\{\sqrt{(k^2 - k_{y_1}^2) + \sqrt{(k^2 - k_{y_2}^2)^2 - k_x^2}}\}z} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \right] \\
\rho(x, y, z) &= \int_0^{\infty} \varphi(x, y, y, z, k) dk \\
&\cdots (2-1-17)
\end{aligned}$$

[0067] 上記の通り、1次元配列におけるマルチスタティック逆散乱問題を解析的に解くことが可能である。

[0068] <2-2 2次元配列>

本節では、2次元配列の場合の理論を説明する。

[0069] 図2は、平面における送信点及び受信点の関係を示す概念図である。図2に示すように点P<sub>1</sub>から放射されたマイクロ波が標的上の点Pで反射し、点P<sub>2</sub>で受信される。点P<sub>1</sub>と点P<sub>2</sub>は平面内の格子点上（2次元アレイアンテナ）の任意の点へ動く。このような仮定のもとでは標的上の点Pを通るマイクロ波のパスはn<sup>4</sup>通りある。このパスの多さが最終画像の質の向上に大いに貢献する。こうした複雑なデータを処理して画像を得る方法を以下に述べる。

[0070] 例えば、図2のように、点P<sub>1</sub>（x<sub>1</sub>、y<sub>1</sub>、z）から放射された電波が点P（ξ、η、ζ）で反射し、点P<sub>2</sub>（x<sub>2</sub>、y<sub>2</sub>、z）で受信される。点Pが領域D全体を動くときP<sub>2</sub>で受信される信号は次式のように表される。

[0071] [数28]

$$\begin{aligned}
\varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z) &= \iiint_D \frac{e^{ik\rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{ik\rho_2}}{\rho_2} \varepsilon(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta \\
\rho_1 &= \sqrt{(x_1 - \xi)^2 + (y_1 - \eta)^2 + (z - \zeta)^2} \\
\rho_2 &= \sqrt{(x_2 - \xi)^2 + (y_2 - \eta)^2 + (z - \zeta)^2} \\
&\cdots (2-2-1)
\end{aligned}$$

[0072] ここで、時間の因子は、exp（-iωt）に比例すると仮定されている。上式の被積分項のカーネル関数は、次式（2-2-2）で表現される。

[0073] [数29]

$$\phi = \frac{e^{ik\rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{ik\rho_2}}{\rho_2} \cdots (2-2-2)$$

[0074] 次に、この式（2-2-2）が短波長で漸近的な解となる偏微分方程式が検討される。そのため、微分結果に生ずる  $1/\rho$  に関して高次の項を無視して計算が行われる。ここでは、微分の略記法が、式（2-2-3）のように定義される。

[0075] [数30]

$$\frac{\partial}{\partial t} \rightarrow \partial_t, \frac{\partial}{\partial x_1} \rightarrow \partial_{x_1}, \frac{\partial}{\partial x_2} \rightarrow \partial_{x_2}, \frac{\partial}{\partial y_1} \rightarrow \partial_{y_1}, \frac{\partial}{\partial y_2} \rightarrow \partial_{y_2}, \frac{\partial}{\partial z} \rightarrow \partial_z \cdots (2-2-3)$$

[0076] 式（2-2-3）を用いて、カーネル関数の各次数の微分は、以下の式（2-2-4）のように表現される。

[0077] [数31]

$$\begin{aligned} \partial_{x_1} \phi &= ik \frac{x_1 - \xi}{\rho_1} \phi + o(\rho^{-3}) & \partial_{x_2} \phi &= ik \frac{x_2 - \xi}{\rho_2} \phi + o(\rho^{-3}) \\ \partial_{y_1} \phi &= ik \frac{y_1 - \eta}{\rho_1} \phi + o(\rho^{-3}) & \partial_{y_2} \phi &= ik \frac{y_2 - \eta}{\rho_2} \phi + o(\rho^{-3}) \\ \partial_z \phi &= ik(z - \zeta) \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right) \phi + o(\rho^{-3}) \\ \partial_{x_1} \partial_{x_1} \phi &= (ik)^2 \left( \frac{x_1 - \xi}{\rho_1} \right)^2 \phi + o(\rho^{-3}) \\ \partial_{y_1} \partial_{y_1} \phi &= (ik)^2 \left( \frac{y_1 - \eta}{\rho_1} \right)^2 \phi + o(\rho^{-3}) \\ \partial_{x_2} \partial_{x_2} \phi &= (ik)^2 \left( \frac{x_2 - \xi}{\rho_2} \right)^2 \phi + o(\rho^{-3}) \\ \partial_{y_2} \partial_{y_2} \phi &= (ik)^2 \left( \frac{y_2 - \eta}{\rho_2} \right)^2 \phi + o(\rho^{-3}) \\ \partial_z \partial_z \phi &= (ik)^2 (z - \zeta)^2 \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right)^2 \phi + o(\rho^{-3}) \\ &\cdots (2-2-4) \end{aligned}$$

[0078] 以下では、複雑な○（＊）の項は省略される。2階微分に関する5つの式の和に従って、次式（2-2-5）が得られる。

[0079] [数32]

$$\begin{aligned}\Delta_5\phi &= (\partial_{x_1}^2 + \partial_{y_1}^2 + \partial_{x_2}^2 + \partial_{y_2}^2 + \partial_z^2)\phi \\ &= (ik)^2 \left\{ 2 + 2 \frac{(z-\xi)^2}{\rho_1 \rho_2} \right\} \phi \\ &\dots (2-2-5)\end{aligned}$$

[0080] したがって、式（2-2-5）から次式（2-2-6）が得られる。

[0081] [数33]

$$\begin{aligned}\{\Delta_5 - 2(ik)^2\}\phi &= 2(ik)^2 \frac{(z-\xi)^2}{\rho_1 \rho_2} \phi \\ &= 2(ik)^2 \frac{\rho_1^2 - (x_1 - \xi)^2 - (y_1 - \eta)^2}{\rho_1 \rho_2} \phi \\ &= 2(ik)^2 \frac{\rho_2^2 - (x_2 - \xi)^2 - (y_2 - \eta)^2}{\rho_1 \rho_2} \phi \\ &\dots (2-2-6)\end{aligned}$$

[0082] 式（2-2-6）の演算を2回作用させることにより、次式（2-2-7）が得られる。

[0083] [数34]

$$\begin{aligned}\{\Delta_5 - 2(ik)^2\}^2 \phi &= 4(ik)^4 \frac{\{\rho_1^2 - (x_1 - \xi)^2 - (y_1 - \eta)^2\} \{\rho_2^2 - (x_2 - \xi)^2 - (y_2 - \eta)^2\}}{\rho_1^2 \rho_2^2} \phi \\ &= 4(ik)^4 \{1 - (ik)^{-2} \partial_{x_1}^2 - (ik)^{-2} \partial_{y_1}^2\} \{1 - (ik)^{-2} \partial_{x_2}^2 - (ik)^{-2} \partial_{y_2}^2\} \phi \\ &\dots (2-2-7)\end{aligned}$$

[0084] 式（2-2-7）を整理して次式（2-2-8）が得られる。

[0085] [数35]

$$\begin{aligned}\left[ \frac{1}{4} \{\Delta_5 - 2(ik)^2\}^2 - (\partial_{x_1}^2 + \partial_{y_1}^2)(\partial_{x_2}^2 + \partial_{y_2}^2) \right. \\ \left. + (ik)^2 (\partial_{x_1}^2 + \partial_{y_1}^2 + \partial_{x_2}^2 + \partial_{y_2}^2) - (ik)^4 \right] \phi = 0 \\ \dots (2-2-8)\end{aligned}$$

[0086] この式（２－２－８）は定常状態を仮定して導かれたが、この式（２－２－８）を非定常状態へ拡張することは容易である。そのために次式（２－２－９）のような変数の置換えが行われる。

[0087] [数36]

$$-ik \rightarrow \frac{1}{c} \partial t$$

$$\dots (2-2-9)$$

[0088] この置換えにより、式（２－２－８）は時間を含んだ以下のような式（２－２－１０）に変換される。

[0089] [数37]

$$\{\Delta_5^2 - \frac{4}{c^2} \partial_t^2 \partial_z^2 - 4(\partial_{x_1}^2 + \partial_{y_1}^2)(\partial_{x_2}^2 + \partial_{y_2}^2)\} \phi = 0$$

$$\Delta_5 = \partial_{x_1}^2 + \partial_{y_1}^2 + \partial_{x_2}^2 + \partial_{y_2}^2 + \partial_z^2$$

$$\dots (2-2-10)$$

[0090] 上記の式（２－２－１０）は、式（２－２－２）に示されたカーネル関数が解となる偏微分方程式であり、式（２－２－１）の積分核へ微分を適用することにより、

[数38]

$$\varphi$$

もまた上記偏微分方程式を満たす。この方程式は６個の変数（ $t$ 、 $x_1$ 、 $y_1$ 、 $x_2$ 、 $y_2$ 、 $z$ ）で構成される５次元の擬似波動方程式である。

[0091] 次に、この方程式がフーリエ変換を用いて解かれる。まず、

[数39]

$$\varphi$$

が、次式（２－２－１１）のように、 $t$ 、 $x_1$ 、 $y_1$ 、 $x_2$ 、 $y_2$ について多重フーリエ変換される。

[0092]

[数40]

$$\begin{aligned} & \tilde{\phi}(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, z, \omega) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} dt \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(k_{x_1}x_1+k_{y_1}y_1)} e^{i(k_{x_2}x_2+k_{y_2}y_2)} \phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, t) dx_1 dy_1 dx_2 dy_2 \\ & \quad \cdot \cdot \cdot (2-2-11) \end{aligned}$$

[0093]  $z$  に関する微分が  $D_z$  と表現される場合、式 (2-2-10) 及び式 (2-2-11) から以下の式 (2-2-12) が得られる。

[0094] [数41]

$$\begin{aligned} & \{(D_z^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_2}^2)^2 + 4k^2 D_z^2 - 4(k_{x_1}^2 + k_{y_1}^2)(k_{x_2}^2 + k_{y_2}^2)\} \tilde{\phi} = 0 \\ & \quad \cdot \cdot \cdot (2-2-12) \end{aligned}$$

[0095] ここでは、 $\omega = c k$  の関係が用いられている。この方程式の4つの基本解は次式 (2-2-13) のように表現される。

[0096] [数42]

$$\begin{aligned} E_1 &= e^{i\{\sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_2}^2}\}z} \\ E_2 &= e^{-i\{\sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_2}^2}\}z} \\ E_3 &= e^{i\{\sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2} - \sqrt{k^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_2}^2}\}z} \\ E_4 &= e^{-i\{\sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2} - \sqrt{k^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_2}^2}\}z} \\ & \quad \cdot \cdot \cdot (2-2-13) \end{aligned}$$

[0097] 時間の因子が  $e^{-i\omega t}$  であること、放射電波のパスで位相が加算されること、及び、物体で反射した電波が計測面へ向かって跳ね返ってくることを考慮すると、 $E_1$  が唯一の意味のある解である。したがって、次式 (2-2-14) が得られる。

[0098] [数43]

$$\begin{aligned} & \tilde{\phi}(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, z, k) = a(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, k) e^{i\{\sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_2}^2}\}z} \\ & \quad \cdot \cdot \cdot (2-2-14) \end{aligned}$$

[0099] この式 (2-2-14) に  $z=0$  を代入することにより、 $a(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, k)$  が次式 (2-2-15) のように求まる。

[0100] [数44]

$$a(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, k) = \tilde{\varphi}(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, 0, k) \\ \cdots (2-2-15)$$

[0101] 以上から

[数45]

$$\varphi$$

が次式 (2-2-16) のように求まる。

[0102] [数46]

$$\varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) \\ = \frac{1}{(2\pi)^4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1)} e^{-i(k_{x_2}x_2 + k_{y_2}y_2)} e^{i\left(\sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_2}^2}\right)z} \\ \cdot a(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, k) dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{x_2} dk_{y_2} \\ \cdots (2-2-16)$$

[0103] 次に、 $k$  及び  $z$  が固定である条件下で式 (2-2-16) に極限操作 ( $y_1 \rightarrow y$  かつ  $y_2 \rightarrow y$ ) を適用することによって、次式 (2-2-17) が得られる。

[0104] [数47]

$$\Phi(x, y, z, k) = \varphi(x, y, x, y, z, k) \\ = \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} [\varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k)] \\ = \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \left[ \frac{1}{(2\pi)^4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1)} e^{-i(k_{x_2}x_2 + k_{y_2}y_2)} e^{i\left(\sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_2}^2}\right)z} \right. \\ \cdot a(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, k) dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{x_2} dk_{y_2} \left. \right] \\ \cdots (2-2-17)$$

[0105] 次に、式 (2-2-17) を  $k$  に関して積分することにより、次式 (2-2-18) が映像化関数として得られる。

[0106]

[数48]

$$\begin{aligned}
\rho(x, y, z) &= \int_0^{\infty} \Phi(x, y, z, k) dk = \int_0^{\infty} \varphi(x, y, x, y, z, k) dk \\
&= \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \left[ \int_0^{\infty} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) dk \right] \\
&= \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \left[ \frac{1}{(2\pi)^4} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1} x_1 + k_{y_1} y_1)} e^{-i(k_{x_2} x_2 + k_{y_2} y_2)} e^{iz \left( \sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_2}^2} \right)} \right. \\
&\quad \left. \cdot a(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, k) dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{x_2} dk_{y_2} dk \right] \\
&\quad \dots (2-2-18)
\end{aligned}$$

[0107] 式(2-2-18)において $k_{x1}$ 、 $k_{y1}$ 、 $k_{x2}$ 、 $k_{y2}$ に関する積分はフーリエ変換の形式になっていて計算機による処理に適している。一方、被積分関数のなかで、 $\exp(iz \dots)$ の項はフーリエ変換の形式になっていない。そのため、例えば、 $z$ の値を指定しながら $k$ について通常の積分が遂行される。あるいは、計算時間を削減するため、全体がフーリエ変換のみで表されるように、式(2-2-18)が変形されてもよい。

[0108] 例えば、式(2-2-17)の $\exp(iz \dots)$ の $iz$ の係数が、新しい変数 $u$ を用いて以下の式(2-2-19)のように表現される。

[0109] [数49]

$$\begin{aligned}
u &= \sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_2}^2} \\
&\quad \dots (2-2-19)
\end{aligned}$$

[0110] 式(2-2-19)の右辺を有理化することにより、次式(2-2-20)が得られる。

[0111] [数50]

$$\begin{aligned}
\frac{k_{x_2}^2 + k_{y_2}^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2}{u} &= \sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2} - \sqrt{k^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_2}^2} \\
&\quad \dots (2-2-20)
\end{aligned}$$

[0112] 式(2-2-19)及び式(2-2-20)の2つの式から各平方根について解くことで、次式(2-2-21)が得られる。

[0113]

[数51]

$$2\sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2} = u + \frac{k_{x_2}^2 + k_{y_2}^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2}{u}$$

$$2\sqrt{k^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_2}^2} = u - \frac{k_{x_2}^2 + k_{y_2}^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2}{u}$$

・・・(2-2-21)

[0114] したがって、kは、次式(2-2-22)のように表現される。

[0115] [数52]

$$k = \frac{1}{2} \sqrt{u^2 + \frac{(k_{x_2}^2 + k_{y_2}^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2)^2}{u^2} + 2(k_{x_2}^2 + k_{y_2}^2 + k_{x_1}^2 + k_{y_1}^2)}$$

・・・(2-2-22)

[0116] また、次に、式(2-2-19)の両辺のk及びuに関する微分によって、次式(2-2-23)が得られる。

[0117] [数53]

$$du = kdk \left( \frac{1}{\sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2}} + \frac{1}{\sqrt{k^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_2}^2}} \right)$$

・・・(2-2-23)

[0118] 式(2-2-23)からdkについて解くことにより、次式(2-2-24)が得られる。

[0119] [数54]

$$dk = \frac{1}{ku} \sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{k^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_2}^2} du$$

・・・(2-2-24)

[0120] 最後にまとめると式(2-2-18)は次式(2-2-25)のように変換される。

[0121]

[数55]

$$\begin{aligned}
\rho(x, y, z) &= \int_0^{\infty} \Phi(x, y, z, k) dk = \int_0^{\infty} \varphi(x, y, x, y, z, k) dk \\
&= \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \left[ \int_0^{\infty} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) dk \right] \\
&= \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \left[ \frac{1}{(2\pi)^4} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1} x_1 + k_{y_1} y_1)} e^{-i(k_{x_2} x_2 + k_{y_2} y_2)} e^{izu} \right. \\
&\quad \cdot a(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, k) dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{x_2} dk_{y_2} dk \left. \right] \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (2 - 2 - 2 \ 5)
\end{aligned}$$

[0122] &lt; 2 - 3 準 2 次元配列 &gt;

図 3 は、準 2 次元アレイアンテナに関する各座標の例を示す概念図である。この例において、準 2 次元アレイアンテナは、1 列の送信アレイアンテナ T A と 1 列の受信アレイアンテナ R A との 2 つのリニアアレイアンテナで構成される。このような準 2 次元アレイアンテナは、S - A r r a y ( s u p e r - a r r a y )、又は、S - A r r a y マルチスタティックアンテナとも表現される。

[0123] 送信アレイアンテナ T A は、n 個の送信アンテナ素子 T を含む。受信アレイアンテナ R A は、n 個の受信アンテナ素子 R を含む。送信アレイアンテナ T A の x 座標は  $x_1$  で表現され、受信アレイアンテナ R A の x 座標は  $x_2$  で表現され、送信アレイアンテナ T A と受信アレイアンテナ R A との間の x 軸方向における距離は d で表現される。この構成では走査方向の各点 x で n 個の送信アンテナ素子と n 個の受信アンテナ素子との任意の組み合わせの  $n^2$  個の時系列データが得られる。

[0124] 本節では、図 3 に示されるような準 2 次元アレイアンテナによって得られるデータから物体を映像化するための理論を説明する。まず、2 次元配列に関する式 ( 2 - 2 - 1 0 ) が検討の出発点として用いられる。以下の式 ( 2 - 3 - 1 ) は、式 ( 2 - 2 - 1 0 ) と同じ作用素である。

[0125]

[数56]

$$\{\Delta_5^2 - \frac{4}{c^2} \partial_t^2 \partial_z^2 - 4(\partial_{x_1}^2 + \partial_{y_1}^2)(\partial_{x_2}^2 + \partial_{y_2}^2)\} \varphi = 0$$

$$\Delta_5 = \partial_{x_1}^2 + \partial_{y_1}^2 + \partial_{x_2}^2 + \partial_{y_2}^2 + \partial_z^2$$

$$\dots (2-3-1)$$

[0126] また、

[数57]

$\varphi$

の  $t$ 、 $x_1$ 、 $y_1$ 、 $y_2$  に関するフーリエ変換は次式 (2-3-2) のように表現される。

[0127] [数58]

$$\tilde{\varphi}(k_{x_1}, k_{y_1}, x_2, k_{y_2}, z, k)$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} e^{ickt} dt \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(k_{x_1} x_1 + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, t) dx_1 dy_1 dy_2$$

$$\dots (2-3-2)$$

[0128] 以下では、変数  $x_2$  を  $u$  と表現する。式 (2-3-1) の両辺を  $t$ 、 $x_1$ 、 $y_1$ 、 $y_2$  に関してフーリエ変換することにより、次式 (2-3-3) が得られる。

[0129] [数59]

$$\left\{ (\partial_u^2 + \partial_z^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2 + 4k^2 \partial_z^2 + 4(k_{x_1}^2 + k_{y_1}^2)(\partial_u^2 - k_{y_2}^2) \right\} \tilde{\varphi} = 0$$

$$\dots (2-3-3)$$

[0130]  $u$ 、 $z$  に関する2次元偏微分方程式である上記の式 (2-3-3) の解は、次式 (2-3-4) のように仮定される。

[0131] [数60]

$$\tilde{\varphi} \propto e^{s_3 u} e^{s_4 z}$$

$$\dots (2-3-4)$$

[0132] ここで、 $s_3$  及び  $s_4$  は、次式 (2-3-5) のような  $k_{x_1}$ 、 $k_{y_1}$ 、 $k_{y_2}$  及び  $k$  に関する関数である。言い換えれば、 $s_3$  及び  $s_4$  は、 $k_{x_1}$ 、 $k_{y_1}$ 、 $k_{y_2}$

及び  $k$  によって定められる定数である。

[0133] [数61]

$$\begin{aligned} s_3 &= s_3(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\ s_4 &= s_4(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\ &\dots (2-3-5) \end{aligned}$$

[0134] 式 (2-3-4) を式 (2-3-3) へ代入することにより、次式 (2-3-6) が得られる。

[0135] [数62]

$$\begin{aligned} &\left(s_3^2 + s_4^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2\right)^2 + 4k^2 s_4^2 + 4(k_{x_1}^2 + k_{y_1}^2)(s_3^2 - k_{y_2}^2) = 0 \\ &\dots (2-3-6) \end{aligned}$$

[0136] この代数方程式だけでは  $s_3$  及び  $s_4$  が決定されない。次に、式 (2-3-4) が次式 (2-3-7) のように変更される。

[0137] [数63]

$$\begin{aligned} \tilde{\varphi}(k_{x_1}, k_{y_1}, u, k_{y_2}, z, k) &= b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_3 u} e^{s_4 z} \\ &\dots (2-3-7) \end{aligned}$$

[0138] 式 (2-3-7) を  $k_{x_1}$ 、 $k_{y_1}$  及び  $k_{y_2}$  に関して逆フーリエ変換して、その結果に  $u \rightarrow x_2$  を適用することにより、次式 (2-3-8) が得られる。

[0139] [数64]

$$\begin{aligned} &\varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1} x_1 + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_3 x_2} e^{s_4 z} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\ &\dots (2-3-8) \end{aligned}$$

[0140] 式 (2-3-8) に  $x_2 = x_1 = x$  を適用することにより、次式 (2-3-9) が得られる。

[0141]

[数65]

$$\begin{aligned}
& \varphi(x, y_1, x, y_2, z, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2)} b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_3x} e^{s_4z} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\{(k_{x_1} + is_3)x + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2\}} b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_4z} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2)} b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_4z} \left( \frac{dk_{x_1}}{dk_x} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&\quad \dots (2-3-9)
\end{aligned}$$

[0142] ここで、 $k_x$  は次式 (2-3-10) で表現される。

[0143] [数66]

$$\begin{aligned}
& k_x = k_{x_1} + is_3 \\
& \dots (2-3-10)
\end{aligned}$$

[0144] 上記の式 (2-3-9) は、1次元配列の散乱場方程式の解と一致するため、式 (2-1-16) と一致するはずである。以下の式 (2-3-11) は、式 (2-1-16) と同じ式である。

[0145] [数67]

$$\begin{aligned}
& \varphi(x, y_1, y_2, z, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2)} a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
&\quad \cdot e^{i\{\sqrt{(k^2 - k_{y_1}^2) + \sqrt{(k^2 - k_{y_2}^2)^2 - k_x^2}}\}z} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&\quad \dots (2-3-11)
\end{aligned}$$

[0146] 式 (2-3-9) と式 (2-3-11) とを比較することにより、次式 (2-3-12) が得られる。

[0147] [数68]

$$\begin{aligned}
& b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \left( \frac{dk_{x_1}}{d(k_{x_1} + is_3)} \right) = a(k_{x_1} + is_3, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
& s_4 = i\sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + is_3)^2} \\
& \dots (2-3-12)
\end{aligned}$$

[0148] 式 (2-3-12) の第2式を2乗することにより、次式 (2-3-13) が得られる。

[0149] [数69]

$$s_4^2 + s_3^2 = 2ik_{x_1}s_3 + k_{x_1}^2 - \left(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}\right)^2$$

$$\dots (2-3-13)$$

[0150] 式 (2-3-13) を式 (2-3-6) へ代入することにより、次式 (2-3-14) が得られる。

[0151] [数70]

$$\left\{ 2ik_{x_1}s_3 - k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2 - \left(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}\right)^2 \right\}^2$$

$$+ 4k^2 \left\{ -\left(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}\right)^2 + (k_{x_1} + is_3)^2 \right\}$$

$$+ 4(k_{x_1}^2 + k_{y_1}^2)(s_3^2 - k_{y_2}^2) = 0$$

$$\dots (2-3-14)$$

[0152] 式 (2-3-14) を整理することにより、次式 (2-3-15) が得られる。

[0153] [数71]

$$(k^2 - k_{y_1}^2)s_3^2 + 2\left(ik_{x_1}\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}\right)s_3 - k_{x_1}^2(k^2 - k_{y_2}^2) = 0$$

$$\dots (2-3-15)$$

[0154] この方程式の解は、重根であるので、次式 (2-3-16) で表現される解が一意的に得られる。

[0155] [数72]

$$s_3 = \frac{-ik_{x_1}\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}}$$

$$\dots (2-3-16)$$

[0156] 上記のプロセスで得られる式 (2-3-12) 及び式 (2-3-16) に従って、 $s_3$  及び  $s_4$  が、解析的に求まる。そして、式 (2-3-8) から散

乱場関数が次式（2-3-17）のように得られる。

[0157] [数73]

$$\begin{aligned}
 & \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) \\
 &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2)} b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_3x_2} e^{s_4z} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
 &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2)} a(k_{x_1} + is_3, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
 & \quad \cdot \left( \frac{d(k_{x_1} + is_3)}{dk_{x_1}} \right) e^{s_3x_2} e^{s_4z} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
 & s_3 = \frac{-ik_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} \\
 & s_4 = i \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + is_3)^2} \\
 & \dots (2-3-17)
 \end{aligned}$$

[0158] 次に、計測データ  $\Phi(x_1, y_1, y_2, k)$  と、 $a(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$  とを結びつけることが検討される。そのため、 $k_x = k_{x_1} + is_3$  と定め、 $z = 0$  及び  $x_2 = x_1 + d$  を式（2-3-17）へ代入することにより、次式（2-3-18）のような方程式が成立する。ここで、 $\Phi(x_1, y_1, y_2, k)$  は、送信点  $(x_1, y_1, 0)$ 、受信点  $(x_1 + d, y_2, 0)$  及び波数  $k$  の計測データである。

[0159]

[数74]

$$\begin{aligned}
& \Phi(x_1, y_1, y_2, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1} x_1 + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} a(k_{x_1} + i s_3, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
&\quad \cdot \left( \frac{d(k_{x_1} + i s_3)}{dk_{x_1}} \right) e^{s_3(x_1 + d)} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\{(k_{x_1} + i s_3)x_1 + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2\}} a(k_{x_1} + i s_3, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
&\quad \cdot \left( \frac{d(k_{x_1} + i s_3)}{dk_{x_1}} \right) e^{s_3 d} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x_1 + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_3 d} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (2-3-18)
\end{aligned}$$

[0160] 以後、次式(2-3-19)で定義される $k_x$ 及び $s_3$ が用いられる。

[0161] [数75]

$$\begin{aligned}
& k_x = k_{x_1} + i s_3 \\
& s_3 = \frac{-i k_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-i k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
& \cdot \cdot \cdot (2-3-19)
\end{aligned}$$

[0162] 式(2-3-18)の両辺を $x_1$ 、 $y_1$ 、 $y_2$ に関してフーリエ変換することにより次式(2-3-20)が得られる。

[0163]

[数76]

$$\begin{aligned}
& \tilde{\Phi}(k'_x, k'_{y_1}, k'_{y_2}, k) \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(k'_x x_1 + k'_{y_1} y_1 + k'_{y_2} y_2)} \Phi(x_1, y_1, y_2, k) dx_1 dy_1 dy_2 \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(k'_x x_1 + k'_{y_1} y_1 + k'_{y_2} y_2)} \\
&\quad \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\{(k_x x_1 + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)\}} a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_3 d} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dx_1 dy_1 dy_2 \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(k'_x - k_x) \delta(k'_{y_1} - k_{y_1}) \delta(k'_{y_2} - k_{y_2}) a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_3 d} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&= a(k'_x, k'_{y_1}, k'_{y_2}, k) e^{s_3 d} \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (2-3-20)
\end{aligned}$$

[0164] 式(2-3-20)から関数  $a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$  が次式(2-3-21)のように求まる。

[0165] [数77]

$$\begin{aligned}
a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) &= e^{-s_3 d} \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
&= e^{\frac{ik_x d \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}} \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (2-3-21)
\end{aligned}$$

[0166] したがって、散乱場関数である式(2-3-17)が次式(2-3-22)のように完全な形式で求まる。

[0167]

[数78]

$$\begin{aligned}
& \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2)} a(k_{x_1} + is_3, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
&\quad \cdot \left( \frac{d(k_{x_1} + is_3)}{dk_{x_1}} \right) e^{s_3x_2} e^{s_4z} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2)} e^{s_3x_2} e^{s_4z} e^{\frac{id(k_{x_1} + is_3)\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}} \\
&\quad \cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \left( \frac{d(k_{x_1} + is_3)}{dk_{x_1}} \right) dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
& s_3 = \frac{-ik_{x_1}\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-ik_x\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
& s_4 = ik_z = i\sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + is_3)^2} \\
& \dots (2 - 3 - 2 \ 2)
\end{aligned}$$

[0168]   そして、映像化関数が次式（2 - 3 - 2 3）のように求まる。

[0169]

[数79]

$$\begin{aligned}
& \rho(x, y, z) \\
&= \int_0^\infty \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) dk \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty dk \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{i k_z z} e^{\frac{i d k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}} \\
&\quad \cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{i k_z z} e^{\frac{i d k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}} \\
&\quad \cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \left( \frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk_z \\
& k_z = \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2} \\
& k = \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}} \\
& \frac{dk}{dk_z} = \frac{k_z \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{k(k_x^2 + k_z^2)} \\
& \dots (2 - 3 - 2 \ 3)
\end{aligned}$$

[0170] 1次元配列に比べて、準2次元配列では、多くの送信素子及び多くの受信素子が配置され得る。よって、より効率的に情報を取得することが可能になる。

[0171] <3 大気屈折が考慮された散乱場理論>

本章では、大気屈折が考慮された散乱場理論を説明する。

[0172] <3-1 大気屈折率のモデル>

地表面から高度が大きくなるにつれて、大気が希薄になる。そして、成層圏を超える宇宙空間は真空状態である。この大気の濃度は、屈折率に直接結びついている。屈折率は、地表で、 $n \doteq 1.0003$ 程度であり、真空値に極めて近い。しかし、電波の伝搬距離が長くなるにつれて、電波の伝搬軸は少しずつ屈折していく。大気屈折率の高度への依存性は、次式（3-1-1）で与えられる。

[0173] [数80]

$$n(z) = 1 + (n_0 - 1)e^{-c_e z} \\ \dots (3-1-1)$$

[0174] ここで、 $z$ は、高度を示し、 $n(z)$ は、高度 $z$ における屈折率を示す。  
 $n_0$ は、地表面( $h=0$ )での屈折率を示す。また、 $c_e$ は、高度の変化に対する屈折率の変化の速さを表す係数である。

[0175]  $n_0$ 及び $c_e$ は、米国内の実測値に基づいて、CRPL (Central Radio Propagation Laboratory) Exponential Reference Atmosphereの定数として発表されている。具体的には、 $n_0$ は、地表屈折率と呼ばれる $N_s$ に対して次式(3-1-2)の関係を有する。

[0176] [数81]

$$N_s = (n_0 - 1) \times 10^6 \\ \dots (3-1-2)$$

[0177] 標準モデルとして、これらの定数が次式(3-1-3)のように与えられている。

[0178] [数82]

$$N_s = 313 \\ c_e = 0.1439 \text{ km}^{-1} \\ \dots (3-1-3)$$

[0179] したがって、以下の式(3-1-4)が成立する。

[0180] [数83]

$$n_0 = 1 + 313 \times 10^{-6} \\ n(z) = 1 + 313 \times 10^{-6} e^{-0.1439 z} \\ n(z) = \frac{c_0}{c(z)} \\ \dots (3-1-4)$$

[0181]  $c_0$ は、真空中の電波の速度を示し、 $c(z)$ は、高度 $z$ における電波の速度を示す。

[0182] <3-2 平面波の伝搬と屈折>

例えば、レーダの電磁波は、屈折率が緩やかに変化する広大な空間中を伝搬する。このようなレーダの電磁波の軌道は、幾何光学を用いて表現され得る。具体的には、まず、電磁場が、次式(3-2-1)のように表現される。

[0183] [数84]

$$f = ae^{i\phi} \dots (3-2-1)$$

[0184] 式(3-2-1)において、aは、振幅を示し、 $\phi$ は、アイコナールと呼ばれる位相を示す。 $\phi$ は、時間因子を分けることで、次式(3-2-2)のように表現される。

[0185] [数85]

$$\phi = -\omega t + \phi_0(x, y, z) \dots (3-2-2)$$

[0186] 式(3-2-2)において、 $\omega$ は、角周波数を示し、tは、時間を示し、 $\phi_0(x, y, z)$ は、(x, y, z)の初期位相を示す。次式(3-2-3)が、成立する。

[0187] [数86]

$$\mathbf{k} = \frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{r}} \quad \omega = -\frac{\partial \phi}{\partial t} \dots (3-2-3)$$

[0188] 式(3-2-3)において、kは、波数ベクトルを示し、rは、位置ベクトルを示す。アイコナール方程式は、次式(3-2-4)のように表現される。

[0189] [数87]

$$(\nabla \phi_0)^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \dots (3-2-4)$$

[0190] 式(3-2-4)において、cは、位相速度を示す。波面は、 $\phi_0(x, y$

、 $z$ ）が同じ値を有する面（等位相面）の族である。さらに、アイコナル方程式は、次式（3-2-5）のように表現される。

[0191] [数88]

$$\left(\frac{\partial}{\partial x}\phi_0\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial y}\phi_0\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial z}\phi_0\right)^2 = \frac{\omega^2}{c^2}$$

・・・(3-2-5)

[0192]  $y$  軸方向への依存性がない（ $x$ 、 $z$ ）面において、電磁波の軌道が次のように求められる。まず、 $x$  軸方向の波数を示す  $k_x$  が一定である場合、次式（3-2-6）が得られる。

[0193] [数89]

$$k_x^2 + k_z(z)^2 = \frac{\omega^2}{c(z)^2}$$

・・・(3-2-6)

[0194] 式（3-2-6）において、 $k_z(z)$  は、 $z$  軸方向の波数を示し、 $z$  に依存する。式（3-2-6）から、 $k_z(z)$  は、次式（3-2-7）のように表現される。

[0195] [数90]

$$k_z(z) = \pm \sqrt{\frac{\omega^2}{c(z)^2} - k_x^2}$$

・・・(3-2-7)

[0196] 以下では、式（3-2-7）の2つの解のうち、符号が正である解が用いられる。波動の伝搬方向（波数ベクトルの方向）は、次式（3-2-8）のように表現される。

[0197] [数91]

$$\mathbf{k} = (k_x, 0, k_z) = \left(k_x, 0, \sqrt{\frac{\omega^2}{c(z)^2} - k_x^2}\right)$$

・・・(3-2-8)

[0198] そして、軌道の接線は、次式（3-2-9）のように表現される。

[0199]

[数92]

$$\frac{dz}{dx} = \frac{\sqrt{\frac{\omega^2}{c(z)^2} - k_x^2}}{k_x}$$

・・・(3-2-9)

[0200] したがって、電波の伝搬軌道は、次式(3-2-10)で与えられる。

[0201] [数93]

$$x = \int_0^z \frac{k_x}{\sqrt{\frac{\omega^2}{c(z)^2} - k_x^2}} dz$$

・・・(3-2-10)

[0202] 図4は、地表面から1°の放射角で放射された1GHzの電磁波の軌道を示すシミュレーション図である。図4には、屈折率が考慮された軌道と、屈折率が考慮されていない軌道とが示されている。屈折率が考慮された軌道は、式(3-2-10)に基づいて導出された軌道であって、実際の軌道に近いと想定される。

[0203] 図5は、地表面から2.56°の放射角で放射された1GHzの電磁波の軌道を示すシミュレーション図である。図5には、図4と同様に、屈折率が考慮された軌道と、屈折率が考慮されていない軌道とが示されている。屈折率が考慮された軌道は、式(3-2-10)に基づいて導出された軌道であって、実際の軌道に近いと想定される。

[0204] 図4及び図5に示されるように、大気屈折率が考慮されるか否かによって異なる軌道が想定される。これらの差異が、物体の映像化における誤差となって生じる可能性がある。

[0205] <3-3 大気屈折を考慮した散乱場理論>

層構造の媒質中では、屈折の影響を受けるため、媒質中の物体を映像化することが困難であるように思われる。しかし、多重散乱を無視することが許容される場合、散乱場理論を用いることにより、以下のように、比較的容易に媒質中の物体を映像化することが可能である。

[0206] 図6は、多層構造の媒質を示す概念図である。例えば、図6において、 $z$ 軸方向は、鉛直方向に対応し、 $x$ 軸方向は、水平方向に対応する。

[0207] そして、媒質は、 $z$ 軸方向に、第1層から第 $n$ 層までの $n$ 層を有している。第1層、第2層、 $\dots$ 、第 $n$ 層は、 $h_1$ 、 $h_2$ 、 $\dots$ 、 $h_n$ の高さを有している。また、第1層、第2層、 $\dots$ 、第 $n$ 層は、 $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 、 $\dots$ 、 $\varepsilon_n$ の誘電率を有している。第1層、第2層、 $\dots$ 、第 $n$ 層において、波動の伝搬速度は、 $c_1$ 、 $c_2$ 、 $\dots$ 、 $c_n$ であり、角周波数が $\omega$ である波動に対して波動の波数は、 $k_1$ 、 $k_2$ 、 $\dots$ 、 $k_n$ である。

[0208] 式(2-1-16)に従って、第1層内の散乱場関数は、次式(3-3-1)のように表現される。

[0209] [数94]

$$\begin{aligned} & \varphi_1(x, y_1, y_2, z, k_1) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} a_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k_1) \\ & \quad \cdot e^{i\{\sqrt{(k_1^2 - k_{y_1}^2) + \sqrt{(k_1^2 - k_{y_2}^2)^2 - k_x^2}}\}z} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\ & a_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k_1) = \tilde{\varphi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k_1) \\ & \quad \dots (3-3-1) \end{aligned}$$

[0210] ここで、

[数95]

$$\tilde{\varphi}$$

は $z=0$ における計測データである。

[0211] 第2層内の散乱場関数は、次式(3-3-2)のように表現される。

[0212] [数96]

$$\begin{aligned} & \varphi_2(x, y_1, y_2, z, k_2) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} a_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k_2) \\ & \quad \cdot e^{i\{\sqrt{(k_2^2 - k_{y_1}^2) + \sqrt{(k_2^2 - k_{y_2}^2)^2 - k_x^2}}\}z} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\ & \quad \dots (3-3-2) \end{aligned}$$

[0213] 式(3-3-2)における未知関数  $a_2(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k_2)$  は、次のように求められる。

[0214] 具体的には、式(3-3-1)及び式(3-3-2)の2つの散乱場関数は、電磁場の層界面に平行な成分で構成される。そして、層界面における反射によって第2層へ入る電磁場の強度が小さくなることを無視することが可能である場合、マックスウェルの方程式から不連続面の両側において2つの散乱場関数の出力値が等しいことが導かれる。したがって、層間の境界面に関して、次式(3-3-3)が成立する。

[0215] [数97]

$$\begin{aligned} \varphi_1(x, y_1, y_2, h_1, k_1) &= \varphi_2(x, y_1, y_2, 0, k_2) \\ &\dots (3-3-3) \end{aligned}$$

[0216] 式(3-3-3)の両辺の逆フーリエ変換によって、次式(3-3-4)が得られる。

[0217] [数98]

$$\begin{aligned} a_2(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k_2) &= a_1(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k_1) e^{i\{\sqrt{k_1^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k_1^2 - k_{y2}^2}\}^2 - k_x^2\} h_1} \\ &= \tilde{\varphi}(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k_1) e^{i\{\sqrt{k_1^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k_1^2 - k_{y2}^2}\}^2 - k_x^2\} h_1} \\ &\dots (3-3-4) \end{aligned}$$

[0218] 同様の手順により、一般に次式(3-3-5)が成り立つ。

[0219] [数99]

$$\begin{aligned} a_n(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k_n) &= a_{n-1}(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k_{n-1}) e^{i\{\sqrt{k_{n-1}^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k_{n-1}^2 - k_{y2}^2}\}^2 - k_x^2\} h_{n-1}} \\ &= \tilde{\varphi}(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k_1) \prod_{j=1}^{n-1} e^{i\{\sqrt{k_j^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k_j^2 - k_{y2}^2}\}^2 - k_x^2\} h_j} \\ &\dots (3-3-5) \end{aligned}$$

[0220] したがって、第n層内の散乱場関数は、次式(3-3-6)のように表現される。

[0221]

[数100]

$$\begin{aligned}
& \varphi_n(x, y_1, y_2, z, k_n) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} \tilde{\varphi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k_1) \\
&\quad \cdot e^{i\left\{\sqrt{(k_n^2 - k_{y_1}^2 + \sqrt{k_n^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}\right\}\left(z - \sum_{j=1}^{n-1} h_j\right)} \prod_{j=1}^{n-1} e^{i\left\{\sqrt{(k_j^2 - k_{y_1}^2 + \sqrt{k_j^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}\right\}h_j} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (3-3-6)
\end{aligned}$$

[0222] 映像化関数は、次式（3-3-7）のように表現される。

[0223] [数101]

$$\begin{aligned}
& \rho_n(x, y, z) \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} \lim_{y_1 \rightarrow y_2 = y} [\varphi_n(x, y_1, y_2, z, k_n)] d\omega \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} \\
&\quad \cdot e^{ik_{zn} z} a_n(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k_n) \left(\frac{dk_n}{dk_{zn}}\right) \left(\frac{d\omega}{dk_n}\right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk_{zn} \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{ik_{zn} \left(z - \sum_{j=1}^{n-1} h_j\right)} \tilde{\varphi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k_1) \\
&\quad \cdot \prod_{j=1}^{n-1} e^{i\left\{\sqrt{(k_j^2 - k_{y_1}^2 + \sqrt{k_j^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}\right\}h_j} \cdot \left(\frac{dk_n}{dk_{zn}}\right) \left(\frac{d\omega}{dk_n}\right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk_{zn} \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (3-3-7)
\end{aligned}$$

[0224] ここで、媒質に誘電分散がないと仮定される場合、次式（3-3-8）が成立する。

[0225] [数102]

$$\begin{aligned}
& k_{zn} = \sqrt{\left(\sqrt{k_n^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k_n^2 - k_{y_2}^2}\right)^2 - k_x^2} \\
& k_n = \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_{zn}^2 + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_{zn}^2} + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2)} \\
& \frac{dk_n}{dk_{zn}} = \frac{k_{zn} \sqrt{k_n^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{k_n^2 - k_{y_2}^2}}{k_n (k_x^2 + k_{zn}^2)} \\
& \cdot \cdot \cdot (3-3-8)
\end{aligned}$$

[0226] 式(3-3-6)及び式(3-3-7)の□内の指数関数の部分は、 $h_j \rightarrow 0$ の極限操作によって積分で表現される。したがって、大気屈折が考慮された散乱場関数は、以下の式(3-3-9)のように表現される。

[0227] [数103]

$$\begin{aligned} & \varphi(x, y_1, y_2, z, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} \tilde{\varphi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k_1) \\ & \quad \cdot e^{i \int_0^z \left( \sqrt{k(z_a)^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k(z_a)^2 - k_{y_2}^2} \right) - k_x^2 dz_a} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\ & \quad \dots (3-3-9) \end{aligned}$$

[0228] ここで、 $k$ は、 $z = z$ における波動の波数に対応し、 $k(z_a)$ は、 $z = z_a$ における波動の波数に対応し、 $k_1$ は、 $z = 0$ における波動の波数に対応する。すなわち、 $k$ 、 $k(z_a)$ 及び $k_1$ は、次式(3-3-10)のように表現され得る。

[0229] [数104]

$$\begin{aligned} k &= \frac{\omega}{c(z)} = \frac{\omega(1 + 313 \times 10^{-6} e^{-0.1439 z})}{c_0} \\ k(z_a) &= \frac{\omega}{c(z_a)} = \frac{\omega(1 + 313 \times 10^{-6} e^{-0.1439 z_a})}{c_0} \\ k_1 &= k(0) \\ & \quad \dots (3-3-10) \end{aligned}$$

[0230] また、大気屈折が考慮された映像化関数は、以下の式(3-3-11)のように表現される。

[0231] [数105]

$$\begin{aligned} & \rho(x, y, z) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} \tilde{\varphi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k_1) \\ & \quad \cdot e^{i \int_0^z \left( \sqrt{k(z_a)^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k(z_a)^2 - k_{y_2}^2} \right) - k_x^2 dz_a} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} d\omega \\ & \quad \dots (3-3-11) \end{aligned}$$

[0232] <3-4 変形例>

本章において、1次元配列の例に、大気屈折が考慮された散乱場理論が適用されている。しかしながら、さらに、2次元配列及び準2次元配列の例に、大気屈折が考慮された散乱場理論が適用されてもよい。

[0233] また、本章において、大気屈折率のモデルが示されている。しかしながら、本章において示されたモデルとは別に定められる大気屈折率が用いられてもよい。例えば、実際の設置場所において各高度で計測された大気屈折率が用いられてもよい。

[0234] <4 映像化装置の構成及び動作>

上述された内容に基づいて、以下に、散乱波の計測データを用いて計測領域における物体を映像化する映像化装置の構成及び動作を示す。

[0235] ここで、散乱波の計測に用いられる波動は、例えば、電波であり、マイクロ波、ミリ波又はテラヘルツ波等であってもよい。また、波動として光又は音等が用いられてもよい。また、計測領域は、空中の領域であってもよく、物体は、飛翔体であってもよい。計測領域における物体は、周辺の媒質の物理特性とは異なる物理特性を有する。具体的には、この物理特性は、波動の反射率に対応する物理特性である。波動として電波が用いられる場合、物理特性は誘電率であってもよい。

[0236] 図7は、本実施の形態における映像化装置の基本構成図である。図7に示された映像化装置100は、複数の送信器101、複数の受信器102及び情報処理回路103を備える。また、映像化装置100は、ディスプレイ104を備えていてもよい。

[0237] 各送信器101は、波動を送信する回路である。具体的には、各送信器101は、計測領域へ波動を送信する。また、各送信器101は、送信アンテナであってもよいし、複数の送信アンテナ素子等のような複数の送信素子で構成されていてもよい。

[0238] 各受信器102は、波動の散乱波を受信する回路である。具体的には、各受信器102は、計測領域から波動の散乱波を受信する。また、各受信器102は、受信アンテナであってもよいし、複数の受信アンテナ素子等のよう

な複数の受信素子で構成されていてもよい。

[0239] 複数の送信器 101 及び複数の受信器 102 は、1 次元配列で配置されてもよいし、2 次元配列で配置されてもよいし、準 2 次元配列で配置されていてもよい。

[0240] 情報処理回路 103 は、情報処理を行う回路である。具体的には、情報処理回路 103 は、散乱波の計測データを取得し、散乱波の計測データを用いて、計測領域における物体を映像化する。例えば、情報処理回路 103 は、計測データを用いて物体を映像化する際に、上述された理論に示される演算処理を行う。

[0241] また、情報処理回路 103 は、コンピュータ、又は、コンピュータのプロセッサであってもよい。情報処理回路 103 は、メモリからプログラムを読み出し、プログラムを実行することにより情報処理を行ってもよい。また、情報処理回路 103 は、計測データに基づいて、計測領域における物体を映像化する専用回路であってもよい。

[0242] また、情報処理回路 103 は、複数の送信器 101 及び複数の受信器 102 と通信可能であってもよい。そして、情報処理回路 103 は、複数の送信器 101 及び複数の受信器 102 の動作を制御してもよい。また、情報処理回路 103 は、複数の送信器 101 及び複数の受信器 102 から位置情報及び計測データを取得してもよい。

[0243] また、情報処理回路 103 は、物体の映像化において、物体を示す画像を生成してもよい。そして、情報処理回路 103 は、物体を示す画像をディスプレイ 104 等に出力してもよい。あるいは、情報処理回路 103 は、物体を示す画像をプリンタ（図示せず）に出力してもよい。あるいは、情報処理回路 103 は、有線又は無線の通信によって画像を電子データとして他の装置（図示せず）に送信してもよい。

[0244] ディスプレイ 104 は、液晶ディスプレイ等のディスプレイ装置である。なお、ディスプレイ 104 は、任意の構成要素であって、必須の構成要素ではない。また、ディスプレイ 104 は、映像化装置 100 を構成しない外部

の装置であってもよい。

[0245] 図8は、図7に示された映像化装置100の基本動作を示すフローチャートである。具体的には、図7に示された映像化装置100の複数の送信器101、複数の受信器102及び情報処理回路103等が、図8に示された動作を行う。

[0246] まず、各送信器101は、大気中の計測領域へ波動を送信する(S101)。そして、各受信器102は、計測領域から波動の散乱波を受信する(S102)。そして、情報処理回路103は、散乱波の計測データを用いて、計測領域における物体を映像化する(S103、S104、S105)。

[0247] 具体的には、情報処理回路103は、物体の映像化において、まず、散乱場関数を、計測データを用いて導出する(S103)。ここで、散乱場関数は、波動の送信位置及び散乱波の受信位置が入力されて受信位置における散乱波の量が出力される関数である。情報処理回路103は、散乱場関数の導出において、大気中の高さによって大気中の屈折率が変化することに伴って波動の波数を変化することを散乱場関数に反映させる。

[0248] 次に、情報処理回路103は、散乱場関数を用いて、映像化関数を導出する(S104)。ここで、映像化関数は、映像化対象位置が入力されて映像化対象位置の画像強度が出力される関数であって、送信位置及び受信位置として映像化対象位置を散乱場関数に入力することで散乱場関数から出力される量を用いて定められる関数である。

[0249] 最後に、情報処理回路103は、映像化関数を用いて、計測領域における物体を映像化する(S105)。

[0250] これにより、映像化装置100は、高度によって変化する大気屈折率が反映された散乱場関数及び映像化関数を導出することができる。したがって、映像化装置100は、大気中の計測領域における物体を高い精度で映像化することができる。

[0251] 例えば、複数の送信器101及び複数の受信器102は、y軸に平行な直線上に配置されてもよい。また、大気中の計測領域は、複数の層に分割され

てもよい。

[0252] そして、複数の層の第  $n$  層の散乱場関数は、

[数106]

$$\begin{aligned} & \varphi_n(x, y_1, y_2, z, k_n) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y1} y_1 + k_{y2} y_2)} \tilde{\varphi}(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k_1) \\ & \cdot e^{i\{\sqrt{(k_n^2 - k_{y1}^2 + \sqrt{k_n^2 - k_{y2}^2})^2 - k_x^2}\}(z - \sum_{j=1}^{n-1} h_j)} \prod_{j=1}^{n-1} e^{i\{\sqrt{(k_j^2 - k_{y1}^2 + \sqrt{k_j^2 - k_{y2}^2})^2 - k_x^2}\}h_j} dk_x dk_{y1} dk_{y2} \end{aligned}$$

で表現されてもよい。

[0253] ここで、散乱場関数の  $x$  及び  $z$  は、送信位置及び受信位置の  $x$  座標及び  $z$  座標を示す。散乱場関数の  $y_1$  は、送信位置の  $y$  座標を示す。散乱場関数の  $y_2$  は、受信位置の  $y$  座標を示す。  $k_1$ 、  $k_j$  及び  $k_n$  は、複数の層の第 1 層、第  $j$  層及び第  $n$  層における波数の波数を示す。  $h_j$  は、第  $j$  層の高さを示す。  $k_x$ 、  $k_{y1}$  及び  $k_{y2}$  は、散乱場関数の  $x$ 、  $y_1$  及び  $y_2$  に関する波数に対応する変数を示す。

[0254] また、

[数107]

$$\tilde{\varphi}$$

は、フーリエ変換された前記計測データを示す。

[0255] これにより、映像化装置 100 は、直線上に配置された複数の送信器 101 及び複数の受信器 102 によって得られる計測データから層毎に導出される散乱場関数を用いて、大気中の計測領域における物体を高い精度で映像化することができる。

[0256] また、例えば、複数の層の第  $n$  層の映像化関数は、

[数108]

$$\begin{aligned} \rho_n(x, y, z) &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y1} y_1 + k_{y2} y_2)} e^{ik_{zn}(z - \sum_{j=1}^{n-1} h_j)} \tilde{\varphi}(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k_1) \\ &\quad \cdot \prod_{j=1}^{n-1} e^{i \left\{ \sqrt{(k_j^2 - k_{y1}^2 + \sqrt{k_j^2 - k_{y2}^2})^2 - k_x^2} \right\} h_j} \cdot \left( \frac{dk_n}{dk_{zn}} \right) \left( \frac{d\omega}{dk_n} \right) dk_x dk_{y1} dk_{y2} dk_{zn} \end{aligned}$$

で表現されてもよい。

[0257] ここで、映像化関数の  $x$ 、 $y$  及び  $z$  は、映像化対象位置の  $x$  座標、 $y$  座標及び  $z$  座標を示す。 $\omega$  は、波動の角周波数を示す。

[0258] また、 $k_{zn}$  は、

[数109]

$$k_{zn} = \sqrt{\left( \sqrt{k_n^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k_n^2 - k_{y2}^2} \right)^2 - k_x^2}$$

で定められる。

[0259] これにより、映像化装置 100 は、直線上に配置された複数の送信器 101 及び複数の受信器 102 によって得られる計測データから層毎に導出される映像化関数を用いて、大気中の計測領域における物体を高い精度で映像化することができる。

[0260] また、例えば、複数の送信器 101 及び複数の受信器 102 は、 $y$  軸に平行な直線上に配置されてもよい。

[0261] そして、散乱場関数は、

[数110]

$$\begin{aligned} \varphi(x, y_1, y_2, z, k) &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y1} y_1 + k_{y2} y_2)} \tilde{\varphi}(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k_1) \\ &\quad \cdot e^{i \int_0^z \sqrt{\left( \sqrt{k(z_a)^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k(z_a)^2 - k_{y2}^2} \right)^2 - k_x^2} dz_a} dk_x dk_{y1} dk_{y2} \end{aligned}$$

で表現されてもよい。

[0262] ここで、散乱場関数の  $x$  及び  $z$  は、送信位置及び受信位置の  $x$  座標及び  $z$

座標を示す。散乱場関数の  $y_1$  は、送信位置の  $y$  座標を示す。散乱場関数の  $y_2$  は、受信位置の  $y$  座標を示す。  $k$  は、  $z$  座標が  $z$  である位置における前記波動の波数を示す。  $k_1$  は、  $z$  座標が  $0$  である位置における波動の波数を示す。  $k(z_a)$  は、  $z$  座標が  $z_a$  である位置における波動の波数を示す。  $z_a$  は、  $z$  座標に対応する変数を示す。  $k_x$ 、  $k_{y_1}$  及び  $k_{y_2}$  は、散乱場関数の  $x$ 、  $y_1$  及び  $y_2$  に関する波数に対応する変数を示す。

[0263] また、

[数111]

$$\tilde{\varphi}$$

は、フーリエ変換された前記計測データを示す。

[0264] これにより、映像化装置 100 は、直線上に配置された複数の送信器 101 及び複数の受信器 102 によって得られる計測データから導出される散乱場関数を用いて、大気中の計測領域における物体を高い精度で映像化することができる。

[0265] また、例えば、映像化関数は、

[数112]

$$\begin{aligned} \rho(x, y, z) &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} \tilde{\varphi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k_1) \\ &\quad \cdot e^{i \int_0^z \left( \sqrt{k(z_a)^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k(z_a)^2 - k_{y_2}^2} \right) - k_x^2} dz_a dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} d\omega \end{aligned}$$

で表現されてもよい。

[0266] ここで、映像化関数の  $x$ 、  $y$  及び  $z$  は、映像化対象位置の  $x$  座標、  $y$  座標及び  $z$  座標を示す。  $\omega$  は、前記波動の角周波数に対応する変数を示す。

[0267] これにより、映像化装置 100 は、直線上に配置された複数の送信器 101 及び複数の受信器 102 によって得られる計測データから導出される映像化関数を用いて、大気中の計測領域における物体を高い精度で映像化することができる。

[0268] また、例えば、波動は、マイクロ波であってもよい。これにより、映像化

装置 100 は、計測領域における水分で波動が減衰することをより短波長の電磁波に比べて抑制することができる。

[0269] また、例えば、上記の基本構成及び基本動作において示された複数の送信器 101、複数の受信器 102、情報処理回路 103、散乱場関数及び映像化関数等には、本実施の形態において示された他の構成要素、式及び変数等が適宜適用され得る。また、本実施の形態において示された散乱場関数及び映像化関数等は、適宜変形して適用されてもよい。例えば、上述された数式と実質的に同じ内容を他の表現で示す数式が用いられてもよいし、上述された理論に基づいて導出される他の数式が用いられてもよい。

[0270] (補足)

以上、映像化装置の態様を実施の形態に基づいて説明したが、映像化装置の態様は、実施の形態に限定されない。実施の形態に対して当業者が思いつく変形が施されてもよいし、実施の形態における複数の構成要素が任意に組み合わせられてもよい。例えば、実施の形態において特定の構成要素によって実行される処理を特定の構成要素の代わりに別の構成要素が実行してもよい。また、複数の処理の順序が変更されてもよいし、複数の処理が並行して実行されてもよい。

[0271] また、映像化装置の各構成要素で行われるステップを含む映像化方法が、任意の装置又はシステムによって実行されてもよい。例えば、映像化方法の一部又は全部が、プロセッサ、メモリ及び入出力回路等を備えるコンピュータによって実行されてもよい。その際、コンピュータに映像化方法を実行させるためのプログラムがコンピュータによって実行されることにより、映像化方法が実行されてもよい。

[0272] また、非一時的なコンピュータ読み取り可能な記録媒体に、上記のプログラムが記録されていてもよい。

[0273] また、映像化装置の各構成要素は、専用のハードウェアで構成されてもよいし、上記のプログラム等を実行する汎用のハードウェアで構成されてもよいし、これらの組み合わせで構成されてもよい。また、汎用のハードウェア

は、プログラムが記録されたメモリ、及び、メモリからプログラムを読み出して実行する汎用のプロセッサ等で構成されてもよい。ここで、メモリは、半導体メモリ又はハードディスク等でもよいし、汎用のプロセッサは、CPU等でもよい。

[0274] また、専用のハードウェアが、メモリ及び専用のプロセッサ等で構成されてもよい。例えば、専用のプロセッサが、計測データを記録するためのメモリを参照して、上記の映像化方法を実行してもよい。

[0275] また、映像化装置の各構成要素は、電気回路であってもよい。これらの電気回路は、全体として1つの電気回路を構成してもよいし、それぞれ別々の電気回路であってもよい。また、これらの電気回路は、専用のハードウェアに対応していてもよいし、上記のプログラム等を実行する汎用のハードウェアに対応していてもよい。

[0276] また、映像化装置は、物理的に一体の装置であることに限られず、分散して配置された複数のサブ装置を備えていてもよい。また、映像化装置は、映像化システムと表現されてもよい。

### 産業上の利用可能性

[0277] 本開示の一態様は、散乱波の計測データを用いて、計測領域における物体を映像化する映像化装置に有用であり、大気中の計測領域における物体を探索する探索システム等に適用可能である。

### 符号の説明

[0278]   100   映像化装置  
          101   送信器  
          102   受信器  
          103   情報処理回路  
          104   ディスプレイ

### 請求の範囲

- [請求項1]           それぞれが大気中の計測領域へ波動を送信する複数の送信器と、  
それぞれが前記計測領域から前記波動の散乱波を受信する複数の受信器と、  
前記散乱波の計測データを用いて、前記計測領域における物体を映像化する情報処理回路とを備え、  
前記情報処理回路は、前記物体の映像化において、  
前記波動の送信位置及び前記散乱波の受信位置が入力されて前記受信位置における前記散乱波の量が出力される散乱場関数を、前記計測データを用いて導出し、  
映像化対象位置が入力されて前記映像化対象位置の画像強度が出力される映像化関数であって、前記送信位置及び前記受信位置として前記映像化対象位置を前記散乱場関数に入力することで前記散乱場関数から出力される量を用いて定められる映像化関数を導出し、  
前記映像化関数を用いて、前記計測領域における前記物体を映像化し、  
前記情報処理回路は、前記散乱場関数の導出において、前記大気中の高さによって前記大気中の屈折率が変化することに伴って前記波動の波数が変化することを前記散乱場関数に反映させる  
映像化装置。
- [請求項2]           前記複数の送信器及び前記複数の受信器は、 $y$  軸に平行な直線上に配置され、  
前記大気中の前記計測領域は、複数の層に分割され、  
前記複数の層の第  $n$  層の前記散乱場関数は、

[数1]

$$\begin{aligned} & \varphi_n(x, y_1, y_2, z, k_n) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} \tilde{\varphi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k_1) \\ & \quad \cdot e^{i\left\{\sqrt{k_n^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k_n^2 - k_{y_2}^2} - k_x^2\right\}\left(z - \sum_{j=1}^{n-1} h_j\right)} \prod_{j=1}^{n-1} e^{i\left\{\sqrt{k_j^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k_j^2 - k_{y_2}^2} - k_x^2\right\}h_j} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \end{aligned}$$

で表現され、

前記散乱場関数の  $x$  及び  $z$  は、前記送信位置及び前記受信位置の  $x$  座標及び  $z$  座標を示し、前記散乱場関数の  $y_1$  は、前記送信位置の  $y$  座標を示し、前記散乱場関数の  $y_2$  は、前記受信位置の  $y$  座標を示し、 $k_1$ 、 $k_j$  及び  $k_n$  は、前記複数の層の第1層、第  $j$  層及び第  $n$  層における前記波動の波数を示し、 $h_j$  は、第  $j$  層の高さを示し、 $k_x$ 、 $k_{y_1}$  及び  $k_{y_2}$  は、前記散乱場関数の  $x$ 、 $y_1$  及び  $y_2$  に関する波数に対応する変数を示し、

[数2]

$$\tilde{\varphi}$$

は、フーリエ変換された前記計測データを示す

請求項1に記載の映像化装置。

[請求項3]

前記複数の層の第  $n$  層の前記映像化関数は、

[数3]

$$\begin{aligned} & \rho_n(x, y, z) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{ik_{zn}\left(z - \sum_{j=1}^{n-1} h_j\right)} \tilde{\varphi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k_1) \\ & \quad \cdot \prod_{j=1}^{n-1} e^{i\left\{\sqrt{k_j^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k_j^2 - k_{y_2}^2} - k_x^2\right\}h_j} \cdot \left(\frac{dk_n}{dk_{zn}}\right) \left(\frac{d\omega}{dk_n}\right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk_{zn} \end{aligned}$$

で表現され、

前記映像化関数の  $x$ 、 $y$  及び  $z$  は、前記映像化対象位置の  $x$  座標、 $y$  座標及び  $z$  座標を示し、 $\omega$  は、前記波動の角周波数を示し、 $k_{zn}$

は、

[数4]

$$k_{zn} = \sqrt{\left(\sqrt{k_n^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k_n^2 - k_{y_2}^2}\right)^2 - k_x^2}$$

で定められる

請求項 2 に記載の映像化装置。

[請求項4]

前記複数の送信器及び前記複数の受信器は、 $y$  軸に平行な直線上に配置され、

前記散乱場関数は、

[数5]

$$\begin{aligned} & \varphi(x, y_1, y_2, z, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} \tilde{\varphi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k_1) \\ & \quad \cdot e^{i \int_0^z \left( \sqrt{k(z_a)^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k(z_a)^2 - k_{y_2}^2} \right) - k_x^2 dz_a} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \end{aligned}$$

で表現され、

前記散乱場関数の  $x$  及び  $z$  は、前記送信位置及び前記受信位置の  $x$  座標及び  $z$  座標を示し、前記散乱場関数の  $y_1$  は、前記送信位置の  $y$  座標を示し、前記散乱場関数の  $y_2$  は、前記受信位置の  $y$  座標を示し、 $k$  は、 $z$  座標が  $z$  である位置における前記波動の波数を示し、 $k_1$  は、 $z$  座標が 0 である位置における前記波動の波数を示し、 $k(z_a)$  は、 $z$  座標が  $z_a$  である位置における前記波動の波数を示し、 $z_a$  は、 $z$  座標に対応する変数を示し、 $k_x$ 、 $k_{y_1}$  及び  $k_{y_2}$  は、前記散乱場関数の  $x$ 、 $y_1$  及び  $y_2$  に関する波数に対応する変数を示し、

[数6]

$$\tilde{\varphi}$$

は、フーリエ変換された前記計測データを示す

請求項 1 に記載の映像化装置。

[請求項5]

前記映像化関数は、

[数7]

$$\begin{aligned} \rho(x, y, z) &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y1} y + k_{y2} y)} \tilde{\varphi}(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k_1) \\ &\quad \cdot e^{i \int_0^z \left( \sqrt{k(z_a)^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k(z_a)^2 - k_{y2}^2} \right)^2 - k_x^2 dz_a} dk_x dk_{y1} dk_{y2} d\omega \end{aligned}$$

で表現され、

前記映像化関数の  $x$ 、 $y$  及び  $z$  は、前記映像化対象位置の  $x$  座標、 $y$  座標及び  $z$  座標を示し、 $\omega$  は、前記波動の角周波数に対応する変数を示す

請求項 4 に記載の映像化装置。

[請求項 6]

複数の送信器のそれぞれから、大気中の計測領域へ波動を送信するステップと、

複数の受信器のそれぞれにおいて、前記計測領域から前記波動の散乱波を受信するステップと、

前記散乱波の計測データを用いて、前記計測領域における物体を映像化するステップとを含み、

前記物体を映像化するステップは、

前記波動の送信位置及び前記散乱波の受信位置が入力されて前記受信位置における前記散乱波の量が出力される散乱場関数を、前記計測データを用いて導出するステップと、

映像化対象位置が入力されて前記映像化対象位置の画像強度が出力される映像化関数であって、前記送信位置及び前記受信位置として前記映像化対象位置を前記散乱場関数に入力することで前記散乱場関数から出力される量を用いて定められる映像化関数を導出するステップと、

前記映像化関数を用いて、前記計測領域における前記物体を映像化するステップとを含み、

前記散乱場関数を導出するステップでは、前記大気中の高さによっ

て前記大気中の屈折率が変化することに伴って前記波動の波数が変化する  
ことを前記散乱場関数に反映させる  
映像化方法。