

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、波動を用いて、領域内の物体に含まれる散乱体の構造を可視化する映像化装置等に関する。

背景技術

[0002] 波動を用いて領域内の物体に含まれる散乱体の構造を可視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、波動を用いて、領域内の物体に含まれる散乱体の構造を可視化することは容易ではない。具体的には、領域内の状態が既知である場合において、領域に入射された波動に対して領域から放射される散乱波のデータを求めることは、順方向問題と呼ばれ、容易である。一方、散乱波のデータが既知である場合において、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、例えば、送信素子及び受信素子の様々な配置によって、多様な計測データが得られる。これにより、散乱体の構造の可視化における空間分解能を高めることが可能になると想定される。一方、送信素子及び受信素子の様々な配置によって、演算処理が複雑化し、処理遅延が増大する。したがって、散乱体の構造の可視化における空間分解能を高めることは困難である。

[0007] そこで、本開示は、波動を用いて、領域内の物体に含まれる散乱体の構造を可視化することができ、演算処理の複雑化を抑制しつつ、散乱体の構造の可視化における空間分解能を高め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、直線上に配列され、計測対象の領域へ波動を送信する複数の送信器を含む送信器列と、前記複数の送信器が配列される直線に平行な別の直線上に配列され、前記領域から前記波動を受信する複数の受信器を含み、前記送信器列から間隔が設けられた受信器列と、前記複数の送信器と前記複数の受信器との全部又は一部の組み合わせによって得られる計測データ、及び、前記複数の送信器が配列される直線と前記複数の受信器が配列される直線との間の距離に従って、前記波動の散乱に関する散乱場関数に対応する映像化関数を導出し、前記映像化関数を用いて、前記領域内の物体に含まれる散乱体の構造を可視化する情報処理回路とを備える。

[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] 本開示の一態様によれば、波動を用いて、領域内の物体に含まれる散乱体の構造を可視化することが可能になり、演算処理の複雑化を抑制しつつ、散

乱体の構造の可視化における空間分解能を高めることが可能になる。

図面の簡単な説明

- [図1] 図1は、参考例におけるマルチスタティックアンテナを示す図である。
- [図2] 図2は、実施の形態におけるS-Arrayマルチスタティックアンテナの例を示す図である。
- [図3] 図3は、実施の形態におけるS-Arrayに関する各座標の例を示す図である。
- [図4] 図4は、実施の形態におけるS-Arrayの外観図である。
- [図5] 図5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6] 図6は、送信点及び受信点の関係を示す概念図である。
- [図7] 図7は、送信点及び受信点の座標を示す概念図である。
- [図8] 図8は、前方散乱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9] 図9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10] 図10は、曲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11] 図11は、複数列リニアアレイアンテナを示す図である。
- [図12] 図12は、マルチスタティックアレイアンテナの送信位置及び受信位置の組み合わせを示す概念図である。
- [図13] 図13は、曲面上の準2次元アレイアンテナを示す図である。
- [図14] 図14は、実施の形態における映像化装置の基本構成を示すブロック図である。
- [図15] 図15は、実施の形態における映像化装置の基本動作を示すフローチャートである。
- [図16] 図16は、実施の形態における映像化装置の具体的な構成を示すブロック図である。

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、直線上に配列され、計測対象の領域へ波動を送信する複数の送信器を含む送信器列と、前記複数の送信器が配列される直線に平行な別の直線上に配列され、前記領域から前記波動を受信する複数の受信器を含み、前記送信器列から間隔が設けられた受信器列と、前記複数の送信器と前記複数の受信器との全部又は一部の組み合わせによって得られる計測データ、及び、前記複数の送信器が配列される直線と前記複数の受信器が配列される直線との間の距離に従って、前記波動の散乱に関する散乱場関数に対応する映像化関数を導出し、前記映像化関数を用いて、前記領域内の物体に含まれる散乱体の構造を可視化する情報処理回路とを備える。

[0013] これにより、映像化装置は、送信器列の複数の送信器と、受信器列の複数の受信器との様々の組み合わせに従って、十分な情報を計測データとして取得することができる。また、映像化装置は、送信器列と受信器列との間に間隔が設けられているため、領域へ波動を適切に送信することができ、領域から波動を適切に受信することができる。そして、映像化装置は、波動の計測データ、及び、送信器列と受信器列との間の距離に従って導出される映像化関数を用いて、散乱体の構造を適切に可視化することができる。

[0014] さらに、映像化装置は、送信器及び受信器の配置が2つの直線上に拘束されるため、送信器及び受信器が任意に配置される場合よりも演算処理を簡素化することができる。したがって、映像化装置は、演算処理の複雑化を抑制することができる。すなわち、映像化装置は、波動を用いて、領域内の物体に含まれる散乱体の構造を可視化することができ、演算処理の複雑化を抑制しつつ、散乱体の構造の可視化における空間分解能を高めることができる。

[0015] 例えば、前記情報処理回路は、前記計測データ及び前記距離に従って前記散乱場関数を導出し、前記散乱場関数に従って前記映像化関数を導出し、前記散乱場関数は、

[数1]

$$\varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z) = \iiint_D \frac{e^{ik\rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{ik\rho_2}}{\rho_2} \varepsilon(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta$$

で表現される関数であり、 ρ_1 及び ρ_2 は、

[数2]

$$\rho_1 = \sqrt{(x_1 - \xi)^2 + (y_1 - \eta)^2 + (z - \zeta)^2}$$

$$\rho_2 = \sqrt{(x_2 - \xi)^2 + (y_2 - \eta)^2 + (z - \zeta)^2}$$

で定められ、 (x_1, y_1, z) は、前記波動の送信位置を示し、 (x_2, y_2, z) は、前記波動の受信位置を示し、 k は、前記波動の波数を示し、 D は、前記領域を示し、 (ξ, η, ζ) は、前記波動の反射位置に対応し、 ε は、前記反射位置における未知の反射率に対応する。

[0016] これにより、映像化装置は、送信位置及び受信位置が同一の z 座標を有することを前提として定められる散乱場関数を導出することができ、その散乱場関数に従って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、領域の平面境界に沿って、送信器列の複数の送信器と、受信器列の複数の受信器とを用いて得られる測定データに従って、適切に散乱場関数及び映像化関数を導出することができる。

[0017] 例えば、前記情報処理回路は、前記散乱場関数が満たす方程式を解くことにより、前記散乱場関数を導出し、前記方程式は、

[数3]

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

で表現され、 Δ_s は、

[数4]

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

で定められ、 c は、前記波動の伝搬速度を示し、 t は、前記波動の送信から受信までの時間を示す。

[0018] これにより、映像化装置は、散乱場関数が満たす方程式の解を散乱場関数として解析的に導出することができる。したがって、映像化装置は、効率的に適切な散乱場関数を導出することができる。

[0019] また、例えば、前記映像化関数は、

[数5]

$$\rho(x, y, z) = \int_0^{\infty} \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) dk$$

で表現され、(x、y、z)は、映像化対象位置を示す。

[0020] これにより、映像化装置は、散乱場関数の極限操作に従って、映像化関数を導出することができる。そして、これにより、映像化装置は、領域内の散乱の状態を可視化することができ、領域内の物体に含まれる散乱体の構造を適切に可視化することができる。

[0021] また、例えば、前記情報処理回路は、

[数6]

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

を前記散乱場関数として導出し、 k_x 、 s_3 及び s_4 は、

[数7]

$$\begin{aligned} k_x &= k_{x_1} + is_3 \\ s_3 &= \frac{-ik_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-ik_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ s_4 &= i\sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + is_3)^2} \end{aligned}$$

で定められ、 k_{x_1} 、 k_{y_1} 及び k_{y_2} は、前記散乱場関数の x_1 、 y_1 及び y_2 に関する波数を示し、 d は、前記距離を示し、

[数8]

$$\tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

は、 x_1 、 y_1 及び y_2 に関してフーリエ変換された前記計測データを示す。

[0022] これにより、映像化装置は、波動の計測データ、及び、送信器列と受信器列との間の距離を散乱場関数に適切に反映することができる。したがって、映像化装置は、散乱の状態を適切に表す散乱場関数を導出することができる。

[0023] また、例えば、前記情報処理回路は、

[数9]

$$\begin{aligned}
 & \rho(x, y, z) \\
 &= \int \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) dk \\
 &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{s_4 z} e^{\frac{i dk_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}} \\
 & \quad \cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
 &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{i k_z z} e^{\frac{i dk_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}} \\
 & \quad \cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \left(\frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk_z
 \end{aligned}$$

を前記映像化関数として導出し、 k_x 、 k_z 、 k 、 dk/dk_z 及び s_4 は、

[数10]

$$\begin{aligned}
 k_x &= k_{x_1} + i s_3 \\
 k_z &= \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2} \\
 k &= \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}} \\
 \frac{dk}{dk_z} &= \frac{k_z \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{k(k_x^2 + k_z^2)} \\
 s_4 &= i k_z = i \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + i s_3)^2}
 \end{aligned}$$

で定められ、 s_3 は、

[数11]

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

で定められ、 (x, y, z) は、映像化対象位置を示し、 k_{x_1} 、 k_{y_1} 及び k_{y_2} は、前記散乱場関数の x_1 、 y_1 及び y_2 に関する波数を示し、 d は、前記距離を示し、

[数12]

$$\tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

は、 x_1 、 y_1 及び y_2 に関してフーリエ変換された前記計測データを示す。

[0024] これにより、映像化装置は、波動の計測データ、及び、送信器列と受信器列との間の距離を映像化関数に適切に反映することができる。映像化装置は、散乱の状態を適切に表す映像化関数を導出することができる。

[0025] また、例えば、前記映像化装置は、前記送信器列として複数の送信器列、前記受信器列として複数の受信器列、又は、前記送信器列及び前記受信器列として複数の送信器列及び複数の受信器列を備える。

[0026] これにより、映像化装置は、送信器列及び受信器列に関する複数の組み合わせに従って、十分な情報を計測データとして取得することができる。また、映像化装置は、送信器列及び受信器列に対して平行方向と直交方向との2つの方向に関してマルチスタティックの関係を構築することができる。したがって、映像化装置は、領域内の物体に含まれる散乱体の構造を適切に可視化することができる。

[0027] また、例えば、前記情報処理回路は、前記映像化装置が前記送信器列及び前記受信器列として備える1列の送信器列及びn列の受信器列に対して、

[数13]

$$\begin{aligned}
& \rho(x, y, z) \\
&= \int_0^\infty \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) dk \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{s_4 z} \\
&\quad \cdot \sum_{j=1, n} \left\{ \exp \left(\frac{i d_j k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \right) \tilde{\Phi}_j(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \right\} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{i k_z z} \\
&\quad \cdot \sum_{j=1, n} \left\{ \exp \left(\frac{i d_j k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \right) \tilde{\Phi}_j(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \right\} \left(\frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk_z
\end{aligned}$$

を前記映像化関数として導出し、 k_x 、 k_z 、 k 、 dk/dk_z 及び s_4 は、

[数14]

$$\begin{aligned}
k_x &= k_{x_1} + i s_3 \\
k_z &= \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2} \\
k &= \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}} \\
\frac{dk}{dk_z} &= \frac{k_z \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{k(k_x^2 + k_z^2)} \\
s_4 &= i k_z = i \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + i s_3)^2}
\end{aligned}$$

で定められ、 s_3 は、

[数15]

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

で定められ、 (x, y, z) は、映像化対象位置を示し、 k_{x_1} 、 k_{y_1} 及び k_{y_2} は、前記散乱場関数の x_1 、 y_1 及び y_2 に関する波数を示し、 d_j は、前記距離を示し、

[数16]

$$\tilde{\Phi}_f(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

は、 x_1 、 y_1 及び y_2 に関してフーリエ変換された前記計測データを示す。

[0028] これにより、映像化装置は、波動の計測データ、及び、送信器列と受信器列との間の距離を映像化関数に適切に反映することができる。具体的には、映像化装置は、送信器列及び受信器列に関する複数の組み合わせに従って得られる計測データに対して、送信器列と受信器列との間の距離に対応する線形加算を行うことで、散乱の状態を適切に表す映像化関数を導出することができる。

[0029] また、例えば、前記情報処理回路は、前記領域において前記反射率に対応する誘電率が周波数依存性を有する場合、

[数17]

$$\begin{aligned} & \rho(x, y, z) \\ &= \int \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}}^{\infty} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) d\omega \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^{\infty} d\omega \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{s_4 z} e^{\frac{i d k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}} \\ & \quad \cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{i k_z z} e^{\frac{i d k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}} \\ & \quad \cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \left(\frac{d\omega}{dk} \right) \left(\frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk_z \end{aligned}$$

を前記映像化関数として導出し、 k_x 、 k_z 、 k 、 dk/dk_z 、 $d\omega/dk$ 及び s_4 は、

[数18]

$$\begin{aligned}
k_x &= k_{x_1} + i s_3 \\
k_z &= \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2} \\
k &= \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}} \\
\frac{dk}{dk_z} &= \frac{k_z \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{k(k_x^2 + k_z^2)} \\
\frac{d\omega}{dk} &= \frac{c_0^2 k + \alpha c_0^2 \omega^2 k}{(a+b)\omega + 2\alpha\omega^2 - \alpha c_0^2 \omega k^2} \\
s_4 &= i k_z = i \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + i s_3)^2}
\end{aligned}$$

で定められ、 s_3 は、

[数19]

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

で定められ、 (x, y, z) は、映像化対象位置を示し、 k_{x_1} 、 k_{y_1} 及び k_{y_2} は、前記散乱場関数の x_1 、 y_1 及び y_2 に関する波数を示し、 d は、前記距離を示し、 ω は、前記波動の角周波数を示し、 c_0 は、真空中の前記波動の伝搬速度を示し、 a 、 b 及び α は、デバイ緩和に関するパラメータを示し、

[数20]

$$\tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

は、 x_1 、 y_1 及び y_2 に関してフーリエ変換された前記計測データを示す。

[0030] これにより、映像化装置は、デバイ緩和に関するパラメータが反映された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、波動の周波数に依存して生じる精度劣化を抑制することができる。

[0031] また、例えば、前記情報処理回路は、前記計測データ及び前記距離に従って前記散乱場関数を導出し、前記散乱場関数に従って前記映像化関数を導出し、前記散乱場関数は、

[数21]

$$\varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) = \iint_D \frac{e^{ik\rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{ik\rho_2}}{\rho_2} \varepsilon(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta$$

で表現される関数であり、 ρ_1 及び ρ_2 は、

[数22]

$$\rho_1 = \sqrt{(x_1 - \xi)^2 + (y_1 - \eta)^2 + (z_1 - \zeta)^2}$$

$$\rho_2 = \sqrt{(x_2 - \xi)^2 + (y_2 - \eta)^2 + (z_2 - \zeta)^2}$$

で定められ、 (x_1, y_1, z_1) は、前記波動の送信位置を示し、 (x_2, y_2, z_2) は、前記波動の受信位置を示し、 k は、前記波動の波数を示し、 D は、前記領域を示し、 (ξ, η, ζ) は、前記波動の反射位置に対応し、 ε は、前記反射位置における未知の反射率に対応する。

[0032] これにより、映像化装置は、送信位置及び受信位置が異なる z 座標を有し得ることを前提として定められる散乱場関数を導出することができ、その散乱場関数に従って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、曲面境界を有する領域の接平面に沿って、送信器列の複数の送信器と、受信器列の複数の受信器とを用いて得られる測定データに従って、適切に散乱場関数及び映像化関数を導出することができる。

[0033] 例えば、前記情報処理回路は、前記散乱場関数が満たす方程式を解くことにより、前記散乱場関数を導出し、前記方程式は、

[数23]

$$\{\Delta_6 - 2(ik)^2\} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) = 0$$

で表現され、 Δ_6 は、

[数24]

$$\Delta_6 = \partial_{x_1}^2 + \partial_{x_2}^2 + \partial_{y_1}^2 + \partial_{y_2}^2 + \partial_{z_1}^2 + \partial_{z_2}^2$$

で定められる。

[0034] これにより、映像化装置は、散乱場関数が満たす方程式の解を散乱場関数として解析的に導出することができる。したがって、映像化装置は、効率的

に適切な散乱場関数を導出することができる。

[0035] また、例えば、前記映像化関数は、

[数25]

$$\rho(x, y, z) = \int_0^{\infty} \varphi(x, y, x, y, z, k) dk$$

で表現され、(x、y、z)は、映像化対象位置を示す。

[0036] これにより、映像化装置は、映像化対象位置が入力された散乱場関数を用いて、映像化関数を導出することができる。そして、これにより、映像化装置は、領域内の散乱の状態を可視化することができ、領域内の物体に含まれる散乱体の構造を適切に可視化することができる。

[0037] また、例えば、前記情報処理回路は、

[数26]

$$\begin{aligned} & \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{z_1}z_1)} \sum_{I,J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\ & \quad \cdot e^{i(k_{x_2}x_2 + k_{y_2}y_2 + k_{z_2}z_2)} e^{-s_3 d} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} e^{s_3 x_2} e^{s_4 z_1} e^{s_5 z_2} \frac{d(k_x + is_3)}{dk_{x_1}} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \end{aligned}$$

を前記散乱場関数として導出し、 k_x 、 s_3 、 s_4 及び s_5 は、

[数27]

$$\begin{aligned} k_x &= k_{x_1} + is_3 \\ s_3 &= \frac{-ik_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-ik_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ s_4 &= \frac{i\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ s_5 &= \frac{i\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \end{aligned}$$

で定められ、 k_{x_1} 、 k_{y_1} 及び k_{y_2} は、前記散乱場関数の x_1 、 y_1 及び y_2 に関する波数を示し、 d は、前記距離を示し、 $\Phi(x_1, y_1, y_2, z_1, z_2,$

k) は、前記送信位置が (x_I, y_I, z_I) で前記受信位置が $(x_I + d, y_J, z_J)$ である場合における前記計測データを示す。

[0038] これにより、映像化装置は、波動の計測データ、及び、送信器列と受信器列との間の距離を散乱場関数に適切に反映することができる。したがって、映像化装置は、散乱の状態を適切に表す散乱場関数を導出することができる。

[0039] また、例えば、前記情報処理回路は、

[数28]

$$\begin{aligned}
 & \rho(x, y, z) \\
 &= \int_0^\infty \varphi(x, y, x, y, z, z, k) dk \\
 &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty dk \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x - k_{y1} y_1 + k_{y2} y_2)} e^{-s_3 d} e^{ik_z z} \sum_{I,J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\
 & \quad \cdot e^{i(k_x x_I + k_{y1} y_I + k_{y2} y_J)} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} dk_x dk_{y1} dk_{y2} \\
 &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty dk \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_{y1} y_1 + k_{y2} y_2)} e^{-s_3 d} e^{ik_z z} \sum_{I,J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\
 & \quad \cdot e^{i(k_x x_I + k_{y1} y_I - k_{y2} y_J)} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} \left(\frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y1} dk_{y2} dk_z
 \end{aligned}$$

を前記映像化関数として導出し、 k_x 、 k_z 、 k 、 dk/dk_z 、 s_3 、 s_4 及び s_5 は、

[数29]

$$\begin{aligned}
k_x &= k_{x_1} + i s_3 \\
k_z &= \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2} \\
k &= \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}} \\
\frac{dk}{dk_z} &= \frac{k_z \left\{ 1 - \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{(k_x^2 + k_z^2)^2} \right\}}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}}} \\
s_3 &= \frac{-i k_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-i k_x \left(\sqrt{k_x^2 + k_z^2} - \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \\
s_4 &= \frac{i k_z \left(\sqrt{k_x^2 + k_z^2} + \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \\
s_5 &= \frac{i k_z \left(\sqrt{k_x^2 + k_z^2} - \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2}}
\end{aligned}$$

で定められ、 (x, y, z) は、映像化対象位置を示し、 k_{x1} 、 k_{y1} 及び k_{y2} は、前記散乱場関数の x_1 、 y_1 及び y_2 に関する波数を示し、 d は、前記距離を示し、 $\Phi(x_1, y_1, y_2, z_1, z_2, k)$ は、前記送信位置が (x_1, y_1, z_1) で前記受信位置が $(x_1 + d, y_2, z_2)$ である場合における前記計測データを示す。

[0040] これにより、映像化装置は、波動の計測データ、及び、送信器列と受信器列との間の距離を映像化関数に適切に反映することができる。映像化装置は、散乱の状態を適切に表す映像化関数を導出することができる。

[0041] また、例えば、前記情報処理回路は、前記送信器列及び前記受信器列に関する複数の組み合わせに対する複数の散乱場関数の合成を用いて前記映像化関数を導出し、前記複数の散乱場関数のそれぞれは、前記散乱場関数に対応し、

[数30]

$$\begin{aligned} & \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{z_1}z_1)} \sum_{I,J} \{ \Phi(x_I, y_I, z_I, k) \\ & \quad \cdot e^{i(k_{x_I}x_I + k_{y_I}y_I + k_{z_I}z_I)} e^{-s_3 d} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} e^{s_3 x_2} e^{s_4 y_1} e^{s_5 z_2} \frac{d(k_{x_1} + is_3)}{dk_{x_1}} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{z_1} \end{aligned}$$

で表現され、 k_x 、 s_3 、 s_4 及び s_5 は、

[数31]

$$\begin{aligned} k_x &= k_{x_1} + is_3 \\ s_3 &= \frac{-ik_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-ik_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ s_4 &= \frac{i \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{\left(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \right)^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ s_5 &= \frac{i \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{\left(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \right)^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \end{aligned}$$

で定められ、 k_{x_1} 、 k_{y_1} 及び k_{y_2} は、前記散乱場関数の x_1 、 y_1 及び y_2 に関する波数を示し、 d は、前記距離を示し、 $\Phi(x_I, y_I, z_I, k)$ は、前記送信位置が (x_I, y_I, z_I) で前記受信位置が $(x_I + d, y_I, z_I)$ である場合における前記計測データを示す。

[0042] これにより、映像化装置は、波動の計測データ、及び、送信器列と受信器列との間の距離が反映された複数の散乱場関数の合成によって、散乱の状態を適切に表す映像化関数を導出することができる。

[0043] また、例えば、前記情報処理回路は、前記領域において前記反射率に対応する誘電率が周波数依存性を有する場合、

[数32]

$$\begin{aligned}
& \rho(x, y, z) \\
&= \int_0^\infty \varphi(x, y, x, y, z, z, k) d\omega \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty d\omega \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_{y1} y_1 + k_{y2} y_2)} e^{-s_3 d} e^{ik_z z} \sum_{I, J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\
&\quad \cdot e^{i(k_x x_I + k_{y1} y_I + k_{y2} y_J)} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} dk_x dk_{y1} dk_{y2} \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_{y1} y_1 + k_{y2} y_2)} e^{-s_3 d} e^{ik_z z} \sum_{I, J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\
&\quad \cdot e^{i(k_x x_I + k_{y1} y_I + k_{y2} y_J)} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} \left(\frac{d\omega}{dk} \right) \left(\frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y1} dk_{y2} dk_z
\end{aligned}$$

を前記映像化関数として導出し、 k_x 、 k_z 、 k 、 dk/dk_z 、 $d\omega/dk$ 、 s_3 、 s_4 及び s_5 は、

[数33]

$$\begin{aligned}
k_x &= k_{x_1} + iS_3 \\
k_z &= \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2} \\
k &= \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}} \\
\frac{dk}{dk_z} &= \frac{k_z \left\{ 1 - \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{(k_x^2 + k_z^2)^2} \right\}}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}}} \\
\frac{d\omega}{dk} &= \frac{c_0^2 k + \alpha c_0^2 \omega^2 k}{(a+b)\omega + 2a\alpha\omega^2 - \alpha c_0^2 \omega k^2} \\
S_3 &= \frac{-ik_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-ik_x \left(\sqrt{k_x^2 + k_z^2} - \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \\
S_4 &= \frac{ik_z \left(\sqrt{k_x^2 + k_z^2} + \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \\
S_5 &= \frac{ik_z \left(\sqrt{k_x^2 + k_z^2} - \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2}}
\end{aligned}$$

で定められ、 (x, y, z) は、映像化対象位置を示し、 k_{x_1} 、 k_{y_1} 及び k_{y_2} は、前記散乱場関数の x_1 、 y_1 及び y_2 に関する波数を示し、 d は、前記距離を示し、 ω は、前記波動の角周波数を示し、 c_0 は、真空中の前記波動の伝搬速度を示し、 a 、 b 及び α は、デバイ緩和に関するパラメータを示し、

[数34]

$$\tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

は、 x_1 、 y_1 及び y_2 に関してフーリエ変換された前記計測データを示す。

[0044] これにより、映像化装置は、デバイ緩和に関するパラメータが反映された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、波動の周

波数に依存して生じる精度劣化を抑制することができる。

[0045] また、本開示の一態様に係る映像化方法は、直線上に配列された複数の送信器を含む送信器列の前記複数の送信器によって、計測対象の領域へ波動を送信するステップと、前記複数の送信器が配列される直線に平行な別の直線上に配列された複数の受信器を含み、前記送信器列から間隔が設けられた受信器列の前記複数の受信器によって、前記領域から前記波動を受信するステップと、前記複数の送信器と前記複数の受信器との全部又は一部の組み合わせによって得られる計測データ、及び、前記複数の送信器が配列される直線と前記複数の受信器が配列される直線との間の距離に従って、前記波動の散乱に関する散乱場関数に対応する映像化関数を導出し、前記映像化関数を用いて、前記領域内の物体に含まれる散乱体の構造を可視化するステップとを含む。

[0046] これにより、送信器列の複数の送信器と、受信器列の複数の受信器との様々の組み合わせに従って、十分な情報を計測データとして取得することが可能になる。また、送信器列と受信器列との間に間隔が設けられているため、領域へ波動を適切に送信することが可能になり、領域から波動を適切に受信することが可能になる。そして、波動の計測データ、及び、送信器列と受信器列との間の距離に従って導出される映像化関数を用いて、散乱体の構造を適切に可視化することが可能になる。

[0047] さらに、送信器及び受信器の配置が2つの直線上に拘束されるため、送信器及び受信器が任意に配置される場合よりも演算処理を簡素化することが可能になる。したがって、演算処理の複雑化を抑制することが可能になる。すなわち、波動を用いて、領域内の物体に含まれる散乱体の構造を可視化することができ、演算処理の複雑化を抑制しつつ、散乱体の構造の可視化における空間分解能を高めることが可能になる。

[0048] 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。

[0049] 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に限られない。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。

[0050] (実施の形態)

本実施の形態における映像化装置は、波動を用いて、領域内の物体に含まれる散乱体の構造を可視化する。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。

[0051] <Ⅰ 概要>

本開示ではS-A r r a y (s u p e r - a r r a y) 散乱場理論によるマイクロ波イメージング技術について述べる。

[0052] 図1は、参考例におけるマルチスタティック(MS)アンテナを示す図である。マルチスタティックアンテナには、一列に、複数の送信アンテナ素子Tと、複数の受信アンテナ素子Rとが交互に配置される。送信アンテナ素子T及び受信アンテナ素子Rは、単に、送信素子及び受信素子とも表現され得る。

[0053] 各アンテナ素子は、半波長($\lambda/2$)のサイズである。したがって、y軸方向の分解能は半波長($\lambda/2$)である。これはナイキストのサンプリング条件を満たさないのでエイリアシングという現象が生じる。そのためにアンテナアレイを $\lambda/4$ だけy方向へずらしてx方向へ走査することが考えられる。或いは最初から独立な2個のアレイアンテナシステムを束ねて一緒に走査する方法も用いられる。

[0054] しかし、このタイプのアレイアンテナではy方向の長さの割には得られる

データ数が非常に少ない。

[0055] 例えば、図1のマルチスタティックアンテナで得られるデータは、マルチスタティックアンテナの位置Ⅰ、Ⅱでそれぞれ9対であり、合計18対である。さらに隣合せの送受素子間の電磁誘導による結合が排除される場合に得られるデータは、Ⅰ、Ⅱでそれぞれ4対であり、合計8対のみである。どのようなアンテナ素子の配置を考えてもナイキストのサンプリング定理を満たす単一のアレイアンテナシステムを実現することは困難である。

[0056] 図2は、本実施の形態におけるS-A r r a yマルチスタティックアンテナの例を示す図である。S-A r r a yマルチスタティックアンテナは、単に、S-A r r a yと表現される場合がある。この例では、S-A r r a yマルチスタティックアレイアンテナは、送信アレイアンテナT A及び受信アレイアンテナR Aの2列のアレイアンテナを含む。S-A r r a yマルチスタティックアレイアンテナでは、送受において36対のデータが得られる。

[0057] しかし、現在までにこのようなデータから対象物の正しい映像を得る逆散乱解析技術は事実上無かった。送受アレイアンテナ間の距離に基づく位相を正しく組込む理論の構築は、極めて困難な課題であった。

[0058] 本開示におけるS-A r r a y散乱場理論は、この課題を解決してナイキストのサンプリング条件を満たす図2の下側のような仮想的高密度S-A r r a yを実現する。つまり、S-A r r a y散乱場理論では、送信アレイアンテナT A及び受信アレイアンテナR Aの2列のアレイアンテナが一列の送受アレイアンテナに理論上変換される。したがって、y方向に $\lambda/4$ の分解能が得られる。また、x方向への走査によって、x方向に任意の分解能が得られる。

[0059] 本開示におけるS-A r r a y散乱場理論は、2次元アレイアンテナに関する既存の散乱場理論とは次の点で決定的に異なる。

[0060] 既存の方法では、サンプリング条件を満たすために2次元アレイアンテナがx方向へ走査される。これにより、散乱の逆解析アルゴリズムでの多重積分がS-A r r a yと比べて1次元大きくなる。そのため、解析に要する時

間が n 倍以上かかる。ここで、 n は、 x 方向におけるサンプル数であって、例えば、 n は、 $128 \sim 256$ である。したがって、2次元アレイアンテナに関する既存の散乱場解析法の実用化は、現状の計算機的能力では困難である。

[0061] 例えば、既存の2次元に関する方法では、平面格子状の2次元アレイアンテナにおける任意の素子から信号が送信され、その2次元アレイアンテナにおける他の任意の素子で信号が受信される。これにより、 n^4 組（ n は正方形の一辺の素子数）のデータが得られる。そして、各組のデータは、帯域が 10GHz 以上の時系列データである。こうした2次元のマルチスタティックデータから対象物の映像を再構成するアルゴリズムについて既に再構成理論が導かれている。

[0062] しかし、上述した通り、この2次元アレイアンテナを用いる映像化は、装置の複雑さ、及び、有効な分解能を得ることの難しさから必ずしも現実的ではない。また x 方向に走査が行われないかぎり分解能の面で課題がある。これに対して、 $S\text{-Array}$ 散乱場理論は、以下の通り非常に洗練されており、かつ、散乱の逆解析のアルゴリズムも既存の1次元のアルゴリズムから少しの変更で得られるため実現性が非常に高い。

[0063] 図3は、本実施の形態における $S\text{-Array}$ に関する各座標の例を示す図である。 $S\text{-Array}$ は、図3に示すような1列の送信アレイアンテナ TA と1列の受信アレイアンテナ RA との2つのリニアアレイアンテナで構成される準2次元アレイアンテナである。

[0064] 具体的には、送信アレイアンテナ TA 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 RA 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 TA の x 座標は x_1 で表現され、受信アレイアンテナ RA の x 座標は x_2 で表現され、送信アレイアンテナ TA と受信アレイアンテナ RA との間の x 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 個の送信素子と n 個の受信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。

[0065] 図4は、本実施の形態におけるS-Arrayの外観図である。複数の送信アンテナ素子Tを含む送信アレイアンテナTAと、複数の受信アンテナ素子Rを含む受信アレイアンテナRAとが離れて構成される。つまり、複数の送信アンテナ素子Tと、複数の受信アンテナ素子Rとが、準2次元に配列される。

[0066] このような準2次元的なアレイアンテナ配置の場合へ既存の2次元アレイアンテナに対する再構成理論を適用すると、次元が1つ高くなるために多大な計算時間がかかる。したがって、まだ実用化が困難である。複数の送信アンテナ素子T及び複数の受信アンテナ素子Rが1列上に配置されているリニアアレイアンテナの場合における解析解を用いた再構成のように、効率の優れた計算方法が要望される。効率の優れた計算方法は、準2次元アレイアンテナの実用化に有用である。

[0067] 驚くべきことに、つい最近この準2次元配列の場合の再構成の解析解が本発明者らによって得られた。つまり、1次元配列の理論と2次元配列の理論とを橋渡しする方法が発見され、準2次元配列の場合の再構成式が解析的に得られた。この理論（S-Array散乱場理論）によって、送信アレイアンテナTAと受信アレイアンテナRAとが空間的に離れたリニアアンテナである場合において、実用的な逆散乱理論の構築が可能になる。以下では、この理論の内容、及び、その適用について詳述する。

[0068] <II 既存の理論から準備>

<II-1 平面境界の1次元配列MS逆散乱理論>

1次元のアレイアンテナを用いた映像化装置において対象物の映像化に用いられている方法は、極めて簡単であり、単に次式(2-1-1)の波動方程式を解くだけである。

[0069] [数35]

$$\begin{aligned} (\Delta + k^2)\varphi &= 0 \\ \Delta &= \partial_x^2 + \partial_y^2 + \partial_z^2 \\ &\cdots (2-1-1) \end{aligned}$$

[0070] ここで、

[数36]

$$\varphi$$

は、未知関数を表す。kは波数を表す。Δは、ラプラス作用素を表す。∂は、サフィックスで示される変数の偏微分を表す。

[0071] この方法は、モノスタティックと呼ばれる。この方法では、送信素子と受信素子とが一体化されたペア素子がy軸に沿って配置される。送受のペア素子がn個あれば、n組のデータが得られる。しかし、この方法で得られる精度は、基本的に、送信及び受信の各アンテナ素子サイズの2倍である。したがって、高分解能の画像を得ることは困難である。

[0072] 図5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5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選択される場合、空間的な分解能が2倍になる。さらに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。

[0073] 図5のように、点P₁(x、y₁、z)から放射された電波が点P(ξ、η、ζ)で反射し、点P₂(x、y₂、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、P₂で受信される信号は、次式(2-1-2)のように表される。

[0074] [数37]

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

[0075] ここで、ε(ξ、η、ζ)は、点P(ξ、η、ζ)の誘電率の関数を示し、点P(ξ、η、ζ)での反射率に対応する。また、点P(ξ、η、ζ)は

、反射点に対応する。なお、 ε (ξ 、 η 、 ζ) は、未知である。また、時間の因子が $\exp(-i\omega t)$ 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 (2-1-3) の ϕ で表現される。

[0076] [数38]

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

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

[0077] 次に、この式 (2-1-3) 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 (2-1-4) のように定義される。

[0078] [数39]

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

$$\dots (2-1-4)$$

[0079] また、ここでは、式 (2-1-3) 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、 ϕ の各次数の微分結果が、以下の式 (2-1-5) のように表現される。

[0080]

[数40]

$$\begin{aligned}
\partial_x \phi &= ik(x-\xi) \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right) \phi + o(\rho^{-3}) & \partial_{y_1} \phi &= ik \frac{y_1 - \eta}{\rho_1} \phi + o(\rho^{-3}) \\
\partial_{y_2} \phi &= ik \frac{y_2 - \eta}{\rho_2} \phi + o(\rho^{-3}) & \partial_z \phi &= ik(z-\zeta) \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right) \phi + o(\rho^{-3}) \\
\partial_x \partial_x \phi &= (ik)^2 (x-\xi)^2 \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right)^2 \phi + o(\rho^{-3}) \\
\partial_z \partial_z \phi &= (ik)^2 (z-\zeta)^2 \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right)^2 \phi + o(\rho^{-3}) \\
\partial_{y_1} \partial_{y_1} \phi &= (ik)^2 \left(\frac{y_1 - \eta}{\rho_1} \right)^2 \phi + o(\rho^{-3}) \\
\partial_{y_2} \partial_{y_2} \phi &= (ik)^2 \left(\frac{y_2 - \eta}{\rho_2} \right)^2 \phi + o(\rho^{-3}) \\
&\dots (2-1-5)
\end{aligned}$$

[0081] 以下では、繁雑な $\circ$ (*) 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 (2-1-6) が得られる。

[0082] [数41]

$$\begin{aligned}
\Delta_4 \phi &= (\partial_x^2 + \partial_{y_1}^2 + \partial_{y_2}^2 + \partial_z^2) \phi \\
&= (ik)^2 \left\{ 2 + 2 \frac{(x-\xi)^2 + (z-\zeta)^2}{\rho_1 \rho_2} \right\} \phi \\
&\dots (2-1-6)
\end{aligned}$$

[0083] したがって、式 (2-1-6) から次式 (2-1-7) が得られる。

[0084] [数42]

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

[0085] 式 (2-1-7) の右辺の演算子を2回作用させることにより、次式 (2-1-8) が得られる。

[0086]

[数43]

$$\begin{aligned}\{\Delta_4 - 2(ik)^2\}^2 \phi &= 4(ik)^4 \frac{\{\rho_1^2 - (y_1 - \eta)^2\} \{\rho_2^2 - (y_2 - \eta)^2\}}{\rho_1^2 \rho_2^2} \phi \\ &= 4(ik)^4 \{1 - (ik)^{-2} \partial_{y_1}^2\} \{1 - (ik)^{-2} \partial_{y_2}^2\} \phi \\ &\dots (2-1-8)\end{aligned}$$

[0087] 式 (2-1-8) を整理して次式 (2-1-9) が得られる。

[0088] [数44]

$$\begin{aligned}&[\frac{1}{4} \{\Delta_4 - 2(ik)^2\}^2 - \partial_{y_1}^2 \partial_{y_2}^2 + (ik)^2 (\partial_{y_1}^2 + \partial_{y_2}^2) - (ik)^4] \phi = 0 \\ &\dots (2-1-9)\end{aligned}$$

[0089] この式 (2-1-9) は定常状態を仮定して導かれたが、この式 (2-1-9) 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 ∂_t 、及び、電波の伝搬速度を示す c を用いて、次式 (2-1-10) のような変数の置換えが行われる。

[0090] [数45]

$$\begin{aligned}-ik &\rightarrow \frac{1}{c} \partial_t \\ &\dots (2-1-10)\end{aligned}$$

[0091] 上記のプロセスによって、最終的に次式 (2-1-11) のような方程式が得られる。

[0092] [数46]

$$\begin{aligned}&\{\Delta_4^2 - \frac{4}{c^2} (\partial_t^2 \partial_x^2 + \partial_t^2 \partial_z^2) - 4 \partial_{y_1}^2 \partial_{y_2}^2\} \phi = 0 \\ &\Delta_4 = \partial_x^2 + \partial_{y_1}^2 + \partial_{y_2}^2 + \partial_z^2 \\ &\dots (2-1-11)\end{aligned}$$

[0093] 上記の式 (2-1-11) は、式 (2-1-3) の ϕ が解となる偏微分方程式である。式 (2-1-2) の積分核へ微分を適用することにより、式 (2-1-2) の

[数47]

 φ

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。

[0094] 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48]

 φ

が、次式（2-1-12）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。

[0095] [数49]

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

・・・（2-1-12）

[0096] z に関する微分が D_z と表現される場合、式（2-1-11）及び式（2-1-12）から以下の式（2-1-13）が得られる。

[0097] [数50]

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

・・・（2-1-13）

[0098] ここでは、 $\omega = ck$ 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（2-1-14）のように表現される。

[0099] [数51]

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

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

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

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

・・・（2-1-14）

[0100] 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（2-1-15）が得られる。

[0101] [数52]

$$\tilde{\varphi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, z, k) = a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{i \{ \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} - k_x \} z} \cdots (2-1-15)$$

[0102] この式（2-1-15）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（2-1-16）のように求まる。

[0103] [数53]

$$a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) = \tilde{\varphi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, 0, k) \cdots (2-1-16)$$

[0104] 最終的に、

[数54]

$$\varphi$$

が次式（2-1-17）のように求まる。

[0105] [数55]

$$\begin{aligned} \varphi(x, y_1, y_2, z, k) &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\ &\quad \cdot e^{i \{ \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} - k_x \} z} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \cdots (2-1-17) \end{aligned}$$

[0106] k 及び z が固定である条件下で式（2-1-17）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（2-1-18）のように求まる。

[0107]

[数56]

$$\begin{aligned}
\phi(x, y, y, z, k) &= \lim_{y_2 \rightarrow y_1 = y} [\phi(x, y, y_2, z, k)] \\
&= \lim_{y_2 \rightarrow y_1 = y} \left[\frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y_2)} a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \right. \\
&\quad \left. \cdot e^{i\{\sqrt{(k^2 - k_{y_1}^2) + \sqrt{(k^2 - k_{y_2}^2)^2 - k_x^2}}\}z} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \right] \\
\rho(x, y, z) &= \int_0^{\infty} \phi(x, y, y, z, k) dk \\
&\cdots (2-1-18)
\end{aligned}$$

[0108] 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。しかし、1次元配列中に送信素子と受信素子とを配置するという大きな制約がある。また、送信素子と受信素子との誘導結合を避けるためにギャップを設けるべきであること、及び、アクティブバランを採用した場合には送受の役割を切り替えられないことなどのハードウェア上の課題がある。さらに、計測の並列化が困難であるためデータの取得時間が長くなるという課題もある。

[0109] <11-2 後方散乱及び曲面境界の1次元配列MS逆散乱理論>

領域の境界面が曲面の場合の逆散乱理論について述べる。

[0110] 図6は、送信点及び受信点の関係を示す概念図である。図6は、 r_1 から出た波動が点 ξ ($\xi_1, \xi_2, \dots$)で反射して点 r_2 へ戻ってくる状況を示している。

[0111] 例えば、角周波数 ω ($=2\pi f$)が一定という条件で、波動の送信点 r_1 と受信点 r_2 とが、ある拘束条件を満たしながら、 x 断面Dの内部を独立に自由に動く。このときに得られるデータが関数 $G(r_1, r_2, \omega)$ で表現される場合、この関数 $G(r_1, r_2, \omega)$ は領域内の反射点の分布に関係しているはずである。

[0112] ここで、 $G(r_1, r_2, \omega)$ は全ての点 ξ からの反射信号の和である。また、領域内に多くの反射点があるので、 $G(r_1, r_2, \omega)$ は次式(2-2-1)のように表現され得る。

[0113]

[数57]

$$G(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) = \iiint_D \varphi(\mathbf{r}_1 \rightarrow \xi \rightarrow \mathbf{r}_2, \omega) d\xi$$

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

[0114] ここで、

[数58]

$$\varphi(\mathbf{r}_1 \rightarrow \xi \rightarrow \mathbf{r}_2, \omega)$$

は、 $\mathbf{r}_1$ から出て点 ξ で反射して点 $\mathbf{r}_2$ へ戻る波動の信号強度を示す。

[0115] また、波動の送信点 $\mathbf{r}_1$ と受信点 $\mathbf{r}_2$ とに課せられた拘束条件は、 $\mathbf{r}_1$ と $\mathbf{r}_2$ との x 座標が常に等しいということである。

[0116] 以下に、この関数 $G(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega)$ を用いて、散乱の逆問題の理論的構造を説明する。また、ここでは、3次元空間の部分領域が D と表現され、その境界が ∂D と表現される。この場合、関数 $G(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega)$ が領域 D の内部で次式 (2-2-2) のような微分方程式の解となる。

[0117] [数59]

$$L\left(\frac{\partial}{\partial t}, \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}_1}, \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}_2}\right) \bar{G}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, t) = 0$$

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

[0118] ここで、

[数60]

$$\bar{G}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, t)$$

は、関数 $G(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega)$ を ω に関してフーリエ変換すること得られる関数である。境界 ∂D での $G(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega)$ の値は、受信素子による計測値である。上記方程式がこの境界条件のもとに解かれる。その結果から $\rho(\mathbf{r})$ が次式 (2-2-3) のように定義される。

[0119] [数61]

$$\rho(\mathbf{r}) = \lim_{t \rightarrow 0} \left[\text{Tr} \left[\bar{G}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, t) \right] \right] = \bar{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}, 0)$$

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

[0120] ここで、 Tr は、トレース演算を示す。この $\rho(r)$ が、求めようとする領域D内の誘電率の勾配に関係した関数である。実際には、ここに現れる微分作用素 $L(\partial/\partial t, \partial/\partial r_1, \partial/\partial r_2)$ を求めることが難しい。

[0121] 以下では、この微分作用素を求める方法について述べる。任意曲線上において、 r_1 と r_2 とは、 y 座標及び z 座標について必ずしも等しくない。具体的には、 r_1 及び r_2 は、 $r_1 = (x, y_1, z_1)$ 及び $r_2 = (x, y_2, z_2)$ で表現される。そして、関数 G は次のように定義される。

[0122] [数62]

$$G(r_1, r_2, \omega) = \iiint_D \varphi(r_1 \rightarrow \xi \rightarrow r_2, \omega) d\xi \\ \dots (2-2-4)$$

[0123] 次に、関数 $G(r_1, r_2, \omega)$ の満たす方程式が検討される。ここで、 $\omega = ck$ である。 c は伝搬速度であり、 k は波数である。波長が λ である場合、 $k = 2\pi/\lambda$ の関係が成立する。

[0124] 図7は、送信点及び受信点の座標を示す概念図である。図7において、送信点は、 $P_1(x, y_1, z_1)$ に位置し、受信点は、 $P_2(x, y_2, z_2)$ に位置する。送信点 P_1 から放射した波動が点 $P(\xi, \eta, \zeta)$ で反射して受信点 P_2 へ到達する。

[0125] 例えば、 z_1 及び z_2 は、任意である。送信点 P_1 及び受信点 P_2 に対応する計測点は、断面曲線 S 上を動く。断面曲線 S は、 $z = f(y)$ で表現され得る。したがって、 $z_1 = f(y_1)$ 及び $z_2 = f(y_2)$ が成立する。また、 P_1 と P との距離は ρ_1 で表現され、 P_2 と P との距離は ρ_2 で表現される。

[0126] 上記の場合において、散乱場関数として、次式(2-2-5)のような関数 ϕ が導入される。

[0127] [数63]

$$\phi(x, y_1, y_2, z_1, z_2, \omega) = \iint_D \frac{e^{ik\rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{ik\rho_2}}{\rho_2} \varepsilon(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta \\ \rho_1 = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y_1-\eta)^2 + (z_1-\zeta)^2} \\ \rho_2 = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y_2-\eta)^2 + (z_2-\zeta)^2} \\ \dots (2-2-5)$$

[0128] ここで、 $\varepsilon(\xi, \eta, \zeta)$ は、点 (ξ, η, ζ) の誘電率の関数を示し、点 (ξ, η, ζ) での反射率に対応する。また、点 (ξ, η, ζ) は、反射点に対応する。なお、 $\varepsilon(\xi, \eta, \zeta)$ は、未知である。また、 k は、波数を示す。また、時間の因子が $\exp(-i\omega t)$ に比例すると仮定されている。上記の式 (2-2-5) の被積分項にある関数が式 (2-2-1) の

[数64]

$$\varphi$$

である。つまり、次式 (2-2-6) が成立する。

[0129] [数65]

$$\varphi = \frac{e^{ik\rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{ik\rho_2}}{\rho_2} \varepsilon(\xi, \eta, \zeta) \cdots (2-2-6)$$

[0130] 次に、式 (2-2-6) が高周波での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、微分の略記法が以下の式 (2-2-7) のように定義される。

[0131] [数66]

$$\frac{\partial}{\partial t} \rightarrow \partial_t, \frac{\partial}{\partial x} \rightarrow \partial_x, \frac{\partial}{\partial y_1} \rightarrow \partial_{y_1}, \frac{\partial}{\partial y_2} \rightarrow \partial_{y_2}, \frac{\partial}{\partial z_1} \rightarrow \partial_{z_1}, \frac{\partial}{\partial z_2} \rightarrow \partial_{z_2} \cdots (2-2-7)$$

[0132] 計算の結果、 ϕ が次式 (2-2-8) の方程式を満たすことが導かれる。

[0133] [数67]

$$\left[\frac{1}{4} \Delta_s^2 - (ik)^2 \partial_x^2 - (\partial_{y_1}^2 + \partial_{z_1}^2)(\partial_{y_2}^2 + \partial_{z_2}^2) \right] \phi = 0 \cdots (2-2-8)$$

[0134] 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。

[0135]

[数68]

$$-ik \rightarrow \frac{1}{c} \partial_t$$

・・・(2-2-9)

[0136] 最終的に次式(2-2-10)が得られる。

[0137] [数69]

$$\left[\frac{1}{4} \Delta_s^2 - \frac{1}{c^2} \partial_t^2 \partial_x^2 - (\partial_{y_1}^2 + \partial_{z_1}^2)(\partial_{y_2}^2 + \partial_{z_2}^2) \right] \phi = 0$$

・・・(2-2-10)

[0138] 次に、 ϕ の時間の因子が $\exp(-i\omega t)$ に比例すると仮定して、式(2-2-10)の解が検討される。まず、 ϕ を t 、 x 、 y_1 、 y_2 について多重フーリエ変換することで次式(2-2-11)が得られる。

[0139] [数70]

$$\begin{aligned} & \tilde{\phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, z_1, z_2, \omega) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} dt \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_{y_1} y_1} dy_1 \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_{y_2} y_2} dy_2 \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_x x} \phi(x, y_1, y_2, z_1, z_2, t) dx \end{aligned}$$

・・・(2-2-11)

[0140] z_1 、 z_2 に関する偏微分をそれぞれ D_{z_1} 、 D_{z_2} と表現することにより、以下の式(2-2-12)が得られる。

[0141] [数71]

$$\{(D_{z_1}^2 + D_{z_2}^2 - k_x^2 - k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2 - 4k^2 k_x^2 - 4(D_{z_1}^2 - k_{y_1}^2)(D_{z_2}^2 - k_{y_2}^2)\} \tilde{\phi} = 0$$

・・・(2-2-12)

[0142] 次に、式(2-2-12)の方程式を解くことが検討される。しかし、 z_1 及び z_2 の2変数が存在する。そのため、固定の (x, y_1, y_2) 又は (k_x, k_{y_1}, k_{y_2}) に関して、 (z_1, z_2) 空間の中の1次元の自由度を持った領域で境界条件が与えられなければ、式(2-2-12)の方程式を解くことは困難である。ところがレーダの計測により得られる境界条件は、 (z_1, z_2) 空間の中の1点 $(f(y_1), f(y_2))$ で与えられるに過ぎない。

[0143] この問題を解決するために、 $z_1 = z$ かつ $z_2 = z$ の場合の理論と、本節に

おける理論との整合性が利用される。すなわち、 z_1 及び z_2 が独立である本節の理論で導かれる解は、 $z_1 = z$ かつ $z_2 = z$ である特別の場合の解を含む。そこで、まず、式 (2-2-12) の解が次式 (2-2-13) のように仮定される。

[0144] [数72]

$$E(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, z_1, z_2) = \exp(is_1 z_1) \exp(is_2 z_2) \\ \dots (2-2-13)$$

[0145] $z_1 = z_2 = z$ の場合、次式 (2-2-14) が得られる。

[0146] [数73]

$$E(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, z_1, z_2) = \exp\{i(s_1 + s_2)z\} \\ \dots (2-2-14)$$

[0147] また、式 (2-2-14) を式 (2-2-12) へ代入することにより、次式 (2-2-15) が得られる。

[0148] [数74]

$$(s_1^2 + s_2^2 + k_x^2 + k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2)^2 - 4k^2 k_x^2 - 4(s_1^2 + k_{y_1}^2)(s_2^2 + k_{y_2}^2) = 0 \\ \dots (2-2-15)$$

[0149] さらに、もう1つの方程式が用いられる。具体的には、前節の式 (2-1-15) から、上記の整合性に従って、次式 (2-2-16) が得られる。

[0150] [数75]

$$s_1 + s_2 = \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2} \\ \dots (2-2-16)$$

[0151] 式 (2-2-15) 及び式 (2-2-16) から、 $s_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2})$ 及び $s_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2})$ が次式 (2-2-17) のように決定される。

[0152]

[数76]

$$s_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) = \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

$$s_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) = \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

・・・(2-2-17)

[0153] 上記の $s_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$ 及び $s_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$ を用いて式(2-2-10)の方程式の解が次式(2-2-18)のように導出される。

[0154] [数77]

$$\phi(x, y_1, y_2, z_1, z_2, k)$$

$$= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

$$\cdot e^{i s_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) z_1} e^{i s_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) z_2} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2}$$

・・・(2-2-18)

[0155] <11-3 前方散乱及び平面境界の1次元配列MS逆散乱理論>

図8は、前方散乱における送信点及び受信点の関係を示す概念図である。前方散乱が後方散乱(11-2)と異なる点は、送信点 r_1 の z 座標と受信点 r_2 の z 座標と間に全ての散乱点の z 座標が入っている点である。 r_1 と r_2 とがそれぞれ ∂D_1 上と ∂D_2 上とで同じ x 座標に位置するという拘束のもとに自由に移動し、散乱データが計測される。このシステムにおける散乱場関数は次式(2-3-1)のように定義される。

[0156] [数78]

$$\phi(x, y_1, y_2, z_1, z_2, \omega) = \iint_D \frac{e^{ik\rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{-ik\rho_2}}{\rho_2} \varepsilon(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta$$

$$\rho_1 = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y_1-\eta)^2 + (z_1-\zeta)^2}$$

$$\rho_2 = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y_2-\eta)^2 + (z_2-\zeta)^2}$$

・・・(2-3-1)

[0157] 後方散乱の例に関する式(2-2-5)と異なる点は、積分記号の中での $\exp(-ik\rho_2) / \rho_2$ の位相因子が負である点である。しかし、散乱場

関数は、後方散乱の例における式（2-2-10）と同じ次式（2-3-2）の偏微分方程式を満たす。

[0158] [数79]

$$\left[\frac{1}{4} \Delta_s^2 - \frac{1}{c^2} \partial_t^2 \partial_x^2 - (\partial_{y_1}^2 + \partial_{z_1}^2)(\partial_{y_2}^2 + \partial_{z_2}^2) \right] \phi = 0$$

・・・(2-3-2)

[0159] 次に、 ϕ の時間の因子が $\exp(-i\omega t)$ に比例すると仮定して、式（2-3-2）の解が検討される。まず、 ϕ を t 、 x 、 y_1 、 y_2 について多重フーリエ変換することで次式が得られる。

[0160] [数80]

$$\begin{aligned} & \tilde{\phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, z_1, z_2, \omega) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} dt \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_{y_1} y_1} dy_1 \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_{y_2} y_2} dy_2 \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_x x} \phi(x, y_1, y_2, z_1, z_2, t) dx \\ & \dots (2-3-3) \end{aligned}$$

[0161] z_1 、 z_2 に関する偏微分をそれぞれ D_{z_1} 、 D_{z_2} と表現することにより、以下の式（2-3-4）が得られる。

[0162] [数81]

$$\{(D_{z_1}^2 + D_{z_2}^2 - k_x^2 - k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2 - 4k^2 k_x^2 - 4(D_{z_1}^2 - k_{y_1}^2)(D_{z_2}^2 - k_{y_2}^2)\} \tilde{\phi} = 0$$

・・・(2-3-4)

[0163] 次に、式（2-3-4）の方程式を解くことが検討される。しかし、 z_1 、 z_2 の2変数が存在する。この問題を解決するために、 $z_1 = z$ かつ $z_2 = z$ の場合の理論と、本節における理論との整合性が利用される。すなわち、 z_1 及び z_2 が独立である本節の理論で導かれる解は、 $z_1 = z$ かつ $z_2 = z$ である特別の場合の解を含む。そこで、まず、式（2-3-4）の解が次式（2-3-5）のように仮定される。

[0164] [数82]

$$E(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, z_1, z_2) = \exp(is_1 z_1) \exp(-is_2 z_2)$$

・・・(2-3-5)

[0165] また、式（2-3-4）から次式（2-3-6）が得られる。

[0166] [数83]

$$(s_1^2 + s_2^2 + k_x^2 + k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2)^2 - 4k^2 k_x^2 - 4(s_1^2 + k_{y_1}^2)(s_2^2 + k_{y_2}^2) = 0$$

・・・(2-3-6)

[0167] 式（2-3-5）は、 $z_1 = z_2 = z$ の場合、次式（2-3-7）のように表現される。

[0168] [数84]

$$E(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, z_1, z_2) = \exp\{i(s_1 - s_2)z\}$$

・・・(2-3-7)

[0169] そして、式（2-2-16）と同じように次式（2-3-8）が得られる。

[0170] [数85]

$$s_1 - s_2 = \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}$$

・・・(2-3-8)

[0171] 式（2-3-6）及び式（2-3-8）から $s_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2})$ 及び $s_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2})$ が次式（2-3-9）のように決定される。

[0172] [数86]

$$s_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) = \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

$$s_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) = \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

・・・(2-3-9)

[0173] したがって、散乱場関数が次式（2-3-10）のように得られる。

[0174]

[数87]

$$\begin{aligned}
& \phi(x, y_1, y_2, z_1, z_2, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
&\quad \cdot e^{is_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)z_1} e^{-is_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)z_2} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&\quad \dots (2-3-10)
\end{aligned}$$

[0175] 次に、 ∂D_1 の z 座標が $z=0$ と定められ、 ∂D_2 の z 座標が $z=h$ と定められる。境界面で計測される散乱データが $\Phi(x, y_1, y_2, k)$ で表現される場合、次式(2-3-11)が成り立つ。

[0176] [数88]

$$\begin{aligned}
& \Phi(x, y_1, y_2, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
&\quad \cdot e^{-is_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)h} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&\quad \dots (2-3-11)
\end{aligned}$$

[0177] そして、 (x, y_1, y_2) に関して式(2-3-11)の両辺のフーリエ変換を行うことにより、次式(2-3-12)が得られる。

[0178] [数89]

$$\begin{aligned}
& \iiint e^{ik'_x x + ik'_{y_1} y_1 + ik'_{y_2} y_2} \Phi(x, y_1, y_2, k) dx dy_1 dy_2 \\
&= \iiint e^{ik'_x x + ik'_{y_1} y_1 + ik'_{y_2} y_2} \\
&\quad \cdot \left\{ \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{-is_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)h} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \right\} \\
&\quad \cdot dx dy_1 dy_2 \\
&= a(k'_x, k'_{y_1}, k'_{y_2}, k) e^{-is_2(k'_x, k'_{y_1}, k'_{y_2}, k)h} \\
&\quad \dots (2-3-12)
\end{aligned}$$

[0179] 上記の式(2-3-12)から次式(2-3-13)のように関数 a が求まる。

[0180]

[数90]

$$a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) = e^{is_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)h} \Phi(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\ \dots (2-3-13)$$

[0181] 上記の式 (2-3-13) を式 (2-3-10) へ代入することにより、
散乱場関数が次式 (2-3-14) のように求まる。

[0182] [数91]

$$\phi(x, y_1, y_2, z_1, z_2, k) \\ = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} \Phi(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\ \cdot e^{is_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)z_1} e^{is_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)(h-z_2)} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\ \dots (2-3-14)$$

[0183] <11-4 平面境界の2次元配列MS逆散乱理論>

まず、既存の2次元配列の場合の理論を説明する。

[0184] 図9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9に示すように点P₁から放射されたマイクロ波が標的上の点Pで反射し、点P₂で受信される。点P₁と点P₂は平面内の格子点上(2次元アンテナアレイ)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n⁴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。

[0185] 例えば、図9のように、点P₁(x₁, y₁, z)から放射された電波が点P(ξ, η, ζ)で反射し、点P₂(x₂, y₂, z)で受信される。点Pが領域D全体を動くときP₂で受信される信号は次式のように表される。

[0186] [数92]

$$\phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z) = \iiint_D \frac{e^{ik\rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{ik\rho_2}}{\rho_2} \varepsilon(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta \\ \rho_1 = \sqrt{(x_1 - \xi)^2 + (y_1 - \eta)^2 + (z - \zeta)^2} \\ \rho_2 = \sqrt{(x_2 - \xi)^2 + (y_2 - \eta)^2 + (z - \zeta)^2} \\ \dots (2-4-1)$$

[0187] 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（2-4-2）で表現される。

[0188] [数93]

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

・・・（2-4-2）

[0189] 次に、この式（2-4-2）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（2-4-3）のように定義される。

[0190] [数94]

$$\frac{\partial}{\partial t} \rightarrow \partial_t, \frac{\partial}{\partial x_1} \rightarrow \partial_{x_1}, \frac{\partial}{\partial x_2} \rightarrow \partial_{x_2}, \frac{\partial}{\partial y_1} \rightarrow \partial_{y_1}, \frac{\partial}{\partial y_2} \rightarrow \partial_{y_2}, \frac{\partial}{\partial z} \rightarrow \partial_z$$

・・・（2-4-3）

[0191] 式（2-4-3）を用いて、カーネル関数の各次数の微分は、以下の式（2-4-4）のように表現される。

[0192]

[数95]

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

・・・(2-4-4)

[0193] 以下では、複雑な $\circ$ （*）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（2-4-5）が得られる。

[0194] [数96]

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

・・・(2-4-5)

[0195] したがって、式（2-4-5）から次式（2-4-6）が得られる。

[0196]

[数97]

$$\begin{aligned}
\{\Delta_5 - 2(ik)^2\}\varphi &= 2(ik)^2 \frac{(z-\xi)^2}{\rho_1 \rho_2} \varphi \\
&= 2(ik)^2 \frac{\rho_1^2 - (x_1 - \xi)^2 - (y_1 - \eta)^2}{\rho_1 \rho_2} \varphi \\
&= 2(ik)^2 \frac{\rho_2^2 - (x_2 - \xi)^2 - (y_2 - \eta)^2}{\rho_1 \rho_2} \varphi \\
&\dots (2-4-6)
\end{aligned}$$

[0197] 上記の右辺の演算子を2回作用させることにより、次式(2-4-7)が得られる。

[0198] [数98]

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

[0199] 式(2-4-7)を整理して次式(2-4-8)が得られる。

[0200] [数99]

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

[0201] この式(2-4-8)は定常状態を仮定して導かれたが、この式(2-4-8)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(2-4-9)のような変数の置換えが行われる。

[0202] [数100]

$$\begin{aligned}
&-ik \rightarrow \frac{1}{c} \partial_t \\
&\dots (2-4-9)
\end{aligned}$$

[0203] この置換えにより、式(2-4-8)は時間を含んだ以下のような式(2-4-10)に変換される。

[0204]

[数101]

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

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

$$\cdots (2-4-10)$$

[0205] 上記の式(2-4-10)は、式(2-4-2)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(2-4-2)の積分核へ微分を適用することにより、 ϕ 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。

[0206] 次に、この方程式がフーリエ変換を用いて解かれる。まず、 ϕ が、次式(2-4-11)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。

[0207] [数102]

$$\tilde{\phi}(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, z, \omega)$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} dt \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(k_{x_1} x_1 + k_{y_1} y_1)} e^{i(k_{x_2} x_2 + k_{y_2} y_2)} \phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, t) dx_1 dy_1 dx_2 dy_2$$

$$\cdots (2-4-11)$$

[0208] z に関する微分が D_z と表現される場合、式(2-4-10)及び式(2-4-11)から以下の式(2-4-12)が得られる。

[0209] [数103]

$$\{(D_z^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_2}^2)^2 + 4k^2 D_z^2 - 4(k_{x_1}^2 + k_{y_1}^2)(k_{x_2}^2 + k_{y_2}^2)\} \tilde{\phi} = 0$$

$$\cdots (2-4-12)$$

[0210] ここでは、 $\omega = ck$ 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(2-4-13)のように表現される。

[0211]

[数104]

$$\begin{aligned}
 E_1 &= e^{i\{\sqrt{k^2-k_{x1}^2-k_{y1}^2}+\sqrt{k^2-k_{x2}^2-k_{y2}^2}\}z} \\
 E_2 &= e^{-i\{\sqrt{k^2-k_{x1}^2-k_{y1}^2}+\sqrt{k^2-k_{x2}^2-k_{y2}^2}\}z} \\
 E_3 &= e^{i\{\sqrt{k^2-k_{x1}^2-k_{y1}^2}-\sqrt{k^2-k_{x2}^2-k_{y2}^2}\}z} \\
 E_4 &= e^{-i\{\sqrt{k^2-k_{x1}^2-k_{y1}^2}-\sqrt{k^2-k_{x2}^2-k_{y2}^2}\}z}
 \end{aligned}$$

・・・(2-4-13)

[0212] 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(2-4-14)が得られる。

[0213] [数105]

$$\begin{aligned}
 \tilde{\phi}(k_{x1}, k_{y1}, k_{x2}, k_{y2}, z, k) &= a(k_{x1}, k_{y1}, k_{x2}, k_{y2}, k) e^{i\{\sqrt{k^2-k_{x1}^2-k_{y1}^2}+\sqrt{k^2-k_{x2}^2-k_{y2}^2}\}z} \\
 &\cdots (2-4-14)
 \end{aligned}$$

[0214] この式(2-4-14)に $z=0$ を代入することにより、 $a(k_{x1}, k_{y1}, k_{x2}, k_{y2}, k)$ が次式(2-4-15)のように求まる。

[0215] [数106]

$$\begin{aligned}
 a(k_{x1}, k_{y1}, k_{x2}, k_{y2}, k) &= \tilde{\phi}(k_{x1}, k_{y1}, k_{x2}, k_{y2}, 0, k) \\
 &\cdots (2-4-15)
 \end{aligned}$$

[0216] 以上から ϕ が次式(2-4-16)のように求まる。

[0217] [数107]

$$\begin{aligned}
 \phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x1}x_1+k_{y1}y_1)} e^{-i(k_{x2}x_2+k_{y2}y_2)} e^{i\{\sqrt{k^2-k_{x1}^2-k_{y1}^2}+\sqrt{k^2-k_{x2}^2-k_{y2}^2}\}z} \\
 &\quad \cdot a(k_{x1}, k_{y1}, k_{x2}, k_{y2}, k) dk_{x1} dk_{y1} dk_{x2} dk_{y2} \\
 &\cdots (2-4-16)
 \end{aligned}$$

[0218] 次に、 k 及び z が固定である条件下で式(2-4-16)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(2-4-17)が得られ

る。

[0219] [数108]

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

[0220] 次に、式（2-4-17）をkに関して積分することにより、次式（2-4-18）が映像化関数として得られる。

[0221] [数109]

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

[0222] 式（2-4-18）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、 $\exp(iz \cdot \cdot \cdot)$ 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（2-4-18）が変形されてもよい。

[0223] 例えば、式（2-4-17）の $\exp(iz \cdot \cdot \cdot)$ の iz の係数が、新しい変数 u を用いて以下の式（2-4-19）のように表現される。

[0224] [数110]

$$\begin{aligned}
 u &= \sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_2}^2} \\
 &\quad \cdot \cdot \cdot (2-4-19)
 \end{aligned}$$

[0225] 式(2-4-19)の右辺を有理化することにより、次式(2-4-20)が得られる。

[0226] [数111]

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

・・・(2-4-20)

[0227] 式(2-4-19)及び式(2-4-20)の2つの式から各平方根について解くことで、次式(2-4-21)が得られる。

[0228] [数112]

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

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

・・・(2-4-21)

[0229] したがって、kは、次式(2-4-22)のように表現される。

[0230] [数113]

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

・・・(2-4-22)

[0231] また、次に、式(2-4-19)の両辺のk及びuに関する微分によって、次式(2-4-23)が得られる。

[0232] [数114]

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

・・・(2-4-23)

[0233] 式(2-4-23)からdkについて解くことにより、次式(2-4-24)が得られる。

[0234]

[数115]

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

$$\dots (2-4-24)$$

[0235] 最後にまとめると式 (2-4-18) は次式 (2-4-25) のように変換される。

[0236] [数116]

$$\rho(x, y, z) = \int_0^\infty \Phi(x, y, z, k) dk = \int_0^\infty \phi(x, y, x, y, z, k) dk$$

$$= \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \left[\int_0^\infty \phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) dk \right]$$

$$= \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \left[\frac{1}{(2\pi)^4} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_{x_1} x_1 + k_{y_1} y_1)} e^{-i(k_{x_2} x_2 + k_{y_2} y_2)} e^{iz u} \right.$$

$$\left. \cdot a(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, k) dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{x_2} dk_{y_2} dk \right]$$

$$\dots (2-4-25)$$

[0237] この結果が、概要で述べた準2次元アレイアンテナ配列に適用された場合、 dk_{x_2} に関する分だけ積分の次元が大きくなる。したがって、現状の計算機の演算能力ではリアルタイムには程遠い計算時間がかかる。

[0238] <11-5 曲面境界の2次元配列MS逆散乱理論>

図10は、曲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。曲面の境界条件を用いるため、送信点と受信点のz座標が異なると仮定される。したがって、散乱場関数は、次式 (2-5-1) のように表現される。

[0239] [数117]

$$\varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, \omega) = \iint_D \frac{e^{ik\rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{ik\rho_2}}{\rho_2} \varepsilon(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta$$

$$\rho_1 = \sqrt{(x_1 - \xi)^2 + (y_1 - \eta)^2 + (z_1 - \zeta)^2}$$

$$\rho_2 = \sqrt{(x_2 - \xi)^2 + (y_2 - \eta)^2 + (z_2 - \zeta)^2}$$

$$\dots (2-5-1)$$

[0240] ここで、kは、波数を示す。また、時間の因子は、 $\exp(-i\omega t)$ に比例すると仮定されている。また、Dは領域を示し、図10における D_3 に対

応する。上式の被積分項のカーネル関数は、次式（2-5-2）で表現される。

[0241] [数118]

$$\varphi = \frac{e^{ik\rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{ik\rho_2}}{\rho_2} \varepsilon(\xi, \eta, \varsigma) \cdots (2-5-2)$$

[0242] 次に、この式（2-5-2）が送受信点のごく近傍の領域を除いて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、微分の略記法が以下の式（2-5-3）のように定義される。

[0243] [数119]

$$\frac{\partial}{\partial t} \rightarrow \partial_t, \frac{\partial}{\partial x_1} \rightarrow \partial_{x_1}, \frac{\partial}{\partial x_2} \rightarrow \partial_{x_2}, \frac{\partial}{\partial y_1} \rightarrow \partial_{y_1}, \frac{\partial}{\partial y_2} \rightarrow \partial_{y_2}, \frac{\partial}{\partial z_1} \rightarrow \partial_{z_1}, \frac{\partial}{\partial z_2} \rightarrow \partial_{z_2} \cdots (2-5-3)$$

[0244] この場合、前節と同様の計算により、カーネル関数が次式（2-5-4）の方程式を満たすことが導き出される。

[0245] [数120]

$$\{\Delta_6 - 2(ik)^2\} \varphi = \{\partial_{x_1}^2 + \partial_{x_2}^2 + \partial_{y_1}^2 + \partial_{y_2}^2 + \partial_{z_1}^2 + \partial_{z_2}^2 - 2(ik)^2\} \varphi = 0 \cdots (2-5-4)$$

[0246] 時間の因子が $e \times p(-i\omega t)$ に比例すると仮定して、上記の式（2-5-4）の解が検討される。まず、カーネル関数を t, x_1, x_2, y_1, y_2 について多重フーリエ変換することで次式が得られる。

[0247] [数121]

$$\tilde{\varphi}(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, z_1, z_2, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} dt \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_{y_1}y_1} dy_1 \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_{y_2}y_2} dy_2 \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_{x_1}x_1} dx_1 \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_{x_2}x_2} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, t) dx_2 \cdots (2-5-5)$$

[0248] 前節の式（2-4-12）と同様に式（2-5-4）から次式（2-5-6）が得られる。

[0249] [数122]

$$\{(D_{z_1}^2 + D_{z_2}^2 - k_{x_1}^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2) + 2k^2\} \tilde{\varphi} = 0$$

$$\cdots (2-5-6)$$

[0250] 次に、この方程式を解くことが検討される。しかし、 z_1 及び z_2 の2変数が存在する。そのため、固定の (x_1, x_2, y_1, y_2) 又は $(k_{x_1}, k_{x_2}, k_{y_1}, k_{y_2})$ に関して、 (z_1, z_2) 空間の中の1次元の自由度を持った領域で境界条件が与えられなければ、式(2-5-6)の方程式を解くことは困難である。ところがレーダの計測により得られる境界条件は、 (z_1, z_2) 空間の中の1点 $\{f(x_1, y_1), f(x_2, y_2)\}$ で与えられるに過ぎない。

[0251] この問題を解決するために、 $z_1 = z$ かつ $z_2 = z$ の場合の理論と、本節における理論との整合性が利用される。すなわち、 z_1 及び z_2 が独立である本節の理論で導かれる解は、 $z_1 = z$ かつ $z_2 = z$ である特別の場合の解を含む。そこで、まず、式(2-5-6)の解が次式(2-5-7)のように仮定される。

[0252] [数123]

$$E(k_{x_1}, k_{x_2}, k_{y_1}, k_{y_2}, z_1, z_2) = \exp(is_1 z_1) \exp(is_2 z_2)$$

$$\cdots (2-5-7)$$

[0253] 式(2-5-6)、式(2-5-7)及び上述した整合性に従って、以下の式(2-5-8)及び式(2-5-9)が得られる。

[0254] [数124]

$$s_1^2 + s_2^2 + k_{x_1}^2 + k_{x_2}^2 + k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2 - 2k^2 = 0$$

$$\cdots (2-5-8)$$

[0255] [数125]

$$s_1 + s_2 = \sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_2}^2}$$

$$\cdots (2-5-9)$$

[0256] これらから、 s_1 及び s_2 が次式(2-5-10)のように得られる。

[0257]

[数126]

$$s_1 = \sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2}$$

$$s_2 = \sqrt{k^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_2}^2}$$

$$\dots (2-5-10)$$

[0258] 上記のような $s_1 (k_x, k_{y1}, k_{y2})$ 及び $s_2 (k_x, k_{y1}, k_{y2})$ を用いて、方程式の解が次式 (2-5-11) のように表現される。

[0259] [数127]

$$\varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k)$$

$$= \frac{1}{(2\pi)^4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{x_2}x_2 + k_{y_2}y_2)} a(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2})$$

$$\cdot e^{is_1(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2})z_1} e^{is_2(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2})z_2} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{x_2} dk_{y_2}$$

$$\dots (2-5-11)$$

[0260] また、曲面Sの方程式が、例えば次式 (2-5-12) のように仮定される。

[0261] [数128]

$$z = f(x, y)$$

$$\dots (2-5-12)$$

[0262] 曲面S上で与えられる境界条件は、次式 (2-5-13) のように表現される。

[0263] [数129]

$$\varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, f(x_1, y_1), f(x_2, y_2), k)$$

$$= \frac{1}{(2\pi)^4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{x_2}x_2 + k_{y_2}y_2)} a(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2})$$

$$\cdot e^{i\{s_1(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2})f(x_1, y_1) + s_2(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2})f(x_2, y_2)\}} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{x_2} dk_{y_2}$$

$$\dots (2-5-13)$$

[0264] 式 (2-5-13) の方程式は、 $a (k_{x1}, k_{x2}, k_{y1}, k_{y2})$ を決定するために用いられる。以下では、次式 (2-5-14) のような簡略記法が用いられる。

[0265]

[数130]

$$\begin{aligned}
 a(\mathbf{k}) &= a(k_{x_1}, k_{x_2}, k_{y_1}, k_{y_2}) \\
 s_1(\mathbf{k}) &= s_1(k_{x_1}, k_{x_2}, k_{y_1}, k_{y_2}) \\
 s_2(\mathbf{k}) &= s_2(k_{x_1}, k_{x_2}, k_{y_1}, k_{y_2}) \\
 &\dots (2-5-14)
 \end{aligned}$$

[0266] 式 (2-5-14) の簡略記法を用いて、次式 (2-5-15) のような $a(\mathbf{k})$ に関する積分方程式が導き出される。

[0267] [数131]

$$\begin{aligned}
 &\varphi(x_1, x_2, y_1, y_2, f(x_1, y_1), f(x_2, y_2), k) \\
 &= \frac{1}{(2\pi)^4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{x_2}x_2 + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2)} a(\mathbf{k}) e^{i\{s_1(\mathbf{k})f(x_1, y_1) + s_2(\mathbf{k})f(x_2, y_2)\}} d\mathbf{k} \\
 &\dots (2-5-15)
 \end{aligned}$$

[0268] 上記の式 (2-5-15) から $a(\mathbf{k})$ が求めれば、散乱場関数は、次式 (2-5-16) のように表現され得る。

[0269] [数132]

$$\begin{aligned}
 &\varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\
 &= \frac{1}{(2\pi)^4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{x_2}x_2 + k_{y_2}y_2)} a(\mathbf{k}) e^{is_1(\mathbf{k})z_1} e^{is_2(\mathbf{k})z_2} d\mathbf{k} \\
 &\dots (2-5-16)
 \end{aligned}$$

[0270] 上記の式 (2-5-16) において、 $z_1 = z_2 = z$ が適用され、次に k に関してフーリエ変換が行われることで、映像化関数が次式 (2-5-17) のよう求まる。

[0271] [数133]

$$\begin{aligned}
 \rho(\mathbf{r}) &= \lim_{t \rightarrow 0} \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x, y, x, y, z, z, k) e^{-ickt} dk \right] \\
 &\dots (2-5-17)
 \end{aligned}$$

[0272] 上記のプロセスによって、最終的な映像化関数 $\rho(\mathbf{r})$ が求まる。

[0273] < I I I S - A r r a y 散乱場理論 >

< I I I - 1 平面境界及び準2次元配列の S - A r r a y 散乱場理論 >

ここでは、図3に示された構成が用いられる。また、2次元配列に関する式(2-4-10)が検討の出発点として用いられる。以下の式(3-1-1)は、式(2-4-10)と同じ式である。

[0274] [数134]

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

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

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

[0275] また、

[数135]

$$\varphi$$

の t 、 x_1 、 y_1 、 y_2 に関するフーリエ変換は次式(3-1-2)のように表現される。

[0276] [数136]

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

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

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

[0277] 以下では、変数 x_2 が u と表現される場合がある。式(3-1-1)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(3-1-3)が得られる。

[0278] [数137]

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

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

[0279] u 、 z に関する2次元偏微分方程式である上記の式(3-1-3)の解は、次式(3-1-4)のように仮定される。

[0280] [数138]

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

$$\dots (3-1-4)$$

[0281] ここで、 s_3 及び s_4 は、次式 (3-1-5) のような k_{x1} 、 k_{y1} 、 k_{y2} 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_{x1} 、 k_{y1} 、 k_{y2} 及び k によって定められる定数である。

[0282] [数139]

$$\begin{aligned} s_3 &= s_3(k_{x1}, k_{y1}, k_{y2}, k) \\ s_4 &= s_4(k_{x1}, k_{y1}, k_{y2}, k) \\ &\dots (3-1-5) \end{aligned}$$

[0283] 式 (3-1-4) を式 (3-1-3) へ代入することにより、次式 (3-1-6) が得られる。

[0284] [数140]

$$\begin{aligned} (s_3^2 + s_4^2 - k_{x1}^2 - k_{y1}^2 - k_{y2}^2)^2 + 4k^2 s_4^2 + 4(k_{x1}^2 + k_{y1}^2)(s_3^2 - k_{y2}^2) &= 0 \\ &\dots (3-1-6) \end{aligned}$$

[0285] 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 (3-1-4) が次式 (3-1-7) のように変更される。

[0286] [数141]

$$\begin{aligned} \tilde{\varphi}(k_{x1}, k_{y1}, u, k_{y2}, z, k) &= b(k_{x1}, k_{y1}, k_{y2}, k) e^{s_3 u} e^{s_4 z} \\ &\dots (3-1-7) \end{aligned}$$

[0287] 式 (3-1-7) を k_{x1} 、 k_{y1} 及び k_{y2} 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 (3-1-8) が得られる。

[0288] [数142]

$$\begin{aligned} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) \\ = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x1}x_1 + k_{y1}y_1 + k_{y2}y_2)} b(k_{x1}, k_{y1}, k_{y2}, k) e^{s_3 x_2} e^{s_4 z} dk_{x1} dk_{y1} dk_{y2} \\ \dots (3-1-8) \end{aligned}$$

[0289] 式 (3-1-8) に $x_2 = x_1 = x$ を適用することにより、次式 (3-1-9) が得られる。

[0290]

[数143]

$$\begin{aligned}
& \varphi(x, y_1, x, y_2, z, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2)} b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_3x} e^{s_4z} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\{(k_{x_1} + s_3)x + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2\}} b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_4z} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2)} b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_4z} \left(\frac{dk_{x_1}}{dk_x} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&\quad \dots (3-1-9)
\end{aligned}$$

[0291] ここで、 k_x は次式(3-1-10)で表現される。

[0292] [数144]

$$\begin{aligned}
& k_x = k_{x_1} + is_3 \\
& \dots (3-1-10)
\end{aligned}$$

[0293] 上記の式(3-1-9)は、1次元配列の散乱場方程式の解と一致するため、式(2-1-17)と一致するはずである。以下の式(3-1-11)は、式(2-1-17)と同じ式である。

[0294] [数145]

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

[0295] 式(3-1-9)と式(3-1-11)とを比較することにより、次式(3-1-12)が得られる。

[0296] [数146]

$$\begin{aligned}
& b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \left(\frac{dk_{x_1}}{d(k_{x_1} + is_3)} \right) = a(k_{x_1} + is_3, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
& s_4 = i\sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + is_3)^2} \\
& \dots (3-1-12)
\end{aligned}$$

[0297] 式(3-1-12)の第2式を2乗することにより、次式(3-1-3)

が得られる。

[0298] [数147]

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

$$\cdots (3-1-13)$$

[0299] 式(3-1-13)を式(3-1-6)へ代入することにより、次式(3-1-14)が得られる。

[0300] [数148]

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

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

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

$$\cdots (3-1-14)$$

[0301] 式(3-1-14)を整理することにより、次式(3-1-15)が得られる。

[0302] [数149]

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

$$\cdots (3-1-15)$$

[0303] この方程式の解は、重根であるので、次式(3-1-16)で表現される解が一意的に得られる。

[0304] [数150]

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

$$\cdots (3-1-16)$$

[0305] 上記のプロセスで得られる式(3-1-12)及び式(3-1-16)に従って、 s_3 及び s_4 が、解析的に求まる。そして、式(3-1-8)から散乱場関数が次式(3-1-17)のように得られる。

[0306]

[数151]

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

[0307] 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 (3-1-17) へ代入することにより、次式 (3-1-18) 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。

[0308] [数152]

$$\begin{aligned}
& \Phi(x_1, y_1, y_2, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2)} a(k_{x_1} + is_3, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
&\quad \cdot \left(\frac{d(k_{x_1} + is_3)}{dk_{x_1}} \right) e^{s_3(x_1 + d)} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\{(k_{x_1} + is_3)x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2\}} a(k_{x_1} + is_3, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
&\quad \cdot \left(\frac{d(k_{x_1} + is_3)}{dk_{x_1}} \right) e^{s_3d} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2)} a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_3d} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
& \dots (3-1-18)
\end{aligned}$$

[0309] 以後、次式 (3-1-19) で定義される k_x 及び s_3 が用いられる。

[0310] [数153]

$$k_x = k_{x_1} + is_3$$

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

・・・ (3-1-19)

[0311] 式 (3-1-18) 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 (3-1-20) が得られる。

[0312] [数154]

$$\tilde{\Phi}(k'_x, k'_{y_1}, k'_{y_2}, k)$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(k'_x x_1 + k'_{y_1} y_1 + k'_{y_2} y_2)} \Phi(x_1, y_1, y_2, k) dx_1 dy_1 dy_2$$

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

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(k'_x - k_x) \delta(k'_{y_1} - k_{y_1}) \delta(k'_{y_2} - k_{y_2}) a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_3 d} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2}$$

$$= a(k'_x, k'_{y_1}, k'_{y_2}, k) e^{s_3 d}$$

・・・ (3-1-20)

[0313] 式 (3-1-20) から関数 $a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$ が次式 (3-1-21) のように求まる。

[0314] [数155]

$$a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) = e^{-s_3 d} \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

$$= e^{\frac{i k_x d \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}} \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

・・・ (3-1-21)

[0315] したがって、散乱場関数である式 (3-1-17) が次式 (3-1-22) のように完全な形式で求まる。

[0316]

[数156]

$$\begin{aligned}
& \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1} x_1 + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} a(k_{x_1} + is_3, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
&\quad \cdot \left(\frac{d(k_{x_1} + is_3)}{dk_{x_1}} \right) e^{s_3 x_2} e^{s_4 z} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1} x_1 + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} e^{s_3 x_2} e^{s_4 z} e^{\frac{id(k_{x_1} + is_3)\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}} \\
&\quad \cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \left(\frac{d(k_{x_1} + is_3)}{dk_{x_1}} \right) dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&S_3 = \frac{-ik_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-ik_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
&S_4 = ik_z = i\sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + is_3)^2} \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (3 - 1 - 2 \ 2)
\end{aligned}$$

[0317] そして、映像化関数が次式（3-1-2 3）のように求まる。

[0318]

[数157]

$$\begin{aligned}
& \rho(x, y, z) \\
&= \int_0^\infty \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) dk \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{s_4 z} e^{\frac{i d k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}} \\
&\quad \cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{i k_z z} e^{\frac{i d k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}} \\
&\quad \cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \left(\frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk_z \\
& k_z = \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2} \\
& k = \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}} \\
& \frac{dk}{dk_z} = \frac{k_z \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{k(k_x^2 + k_z^2)} \\
& \dots (3-1-23)
\end{aligned}$$

[0319] 準2次元配列では、送信位置のx座標と受信位置のx座標との間に含まれる物質の情報を取得することが可能になる。特に、誘電率の高い障害物が手前に存在していても、x方向に回り込んで、電波を送信し波動を受信することが可能になる。したがって、y方向の1次元配列では取得することが困難な情報を取得することが可能になる。したがって、より適切な画像を再構成することが可能になる。

[0320] また、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。

[0321] <111-2 平面境界及び2次元配列のS-Array散乱場理論>

図11は、複数列リニアアレイアンテナを示す図である。図11に示された複数列リニアアレイアンテナは、1列の送信アレイアンテナTAと、n列

の受信アレイアンテナ RA_1 、 RA_2 、 RA_3 、 $\dots$ 、 RA_n とを含む。各アンテナ素子の偏波方向は、 x 方向のほかに y 方向の場合もありうる。また TA と RA とが入れ替わってもよい。このような配列の場合へ $111-1$ 節の準2次元配列MS逆散乱を応用する。

[0322] 複数の受信アレイアンテナ RA_1 、 RA_2 、 RA_3 、 $\dots$ 、 RA_n があるが、 (TA, RA_1) 、 (TA, RA_2) 、 (TA, RA_3) 、 $\dots$ 、 (TA, RA_n) の複数の組み合わせは、互いに独立に計測される。散乱場関数は、これらのデータから線形加算により得られる。したがって映像化関数も線形加算により得られる。送信素子列 TA と、 j 番目の受信素子列 RA_j との距離が d_j であり、各計測データが $\Phi_j(x_1, y_1, y_2, k)$ である場合、式(3-1-23)から次式(3-2-1)が得られる。

[0323] [数158]

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

[0324] 次に、本開示の準2次元配列が応用された $S-Array$ 2次元配列が用

いられる場合と、既存の2次元配列が用いられる場合との違いについて述べる。

[0325] S-A r r a y 2次元配列では、T A及びR Aはそれぞれ1次元配列であるという制約がある。この配列を用いた走査型のプローブでは、高画質の画像を取得できる可能性があり、画質を保持しながら走査時間を短縮できる可能性がある。あるいは、走査が省略されてもよい。

[0326] 一方、既存の2次元配列が用いられる場合、送信素子及び受信素子の配置に制約がない。しかし、例えば $n \times n$ の配列の場合、 n^4 のオーダの送受の組み合わせがあり、次元が大きくなる。したがって、 n が実用的な値（100等）である場合、システムが大規模になり、計測時間及び計算時間が莫大となる。したがって、医療診断及びインフラ診断には、既存の2次元配列は実用的でない。

[0327] 図12は、マルチスタティックアレイアンテナの送信位置及び受信位置の組み合わせを示す概念図である。図12には、マルチスタティックアレイアンテナとして、S-A r r a y 2次元配列が示されている。S-A r r a y 2次元配列では、走査が行われなくても、 x 方向にも y 方向にも複数の受信位置で計測データが取得される。つまり、S-A r r a y 2次元配列は、 x 方向にも y 方向にもマルチスタティックの特性を有する。したがって、十分な情報の取得が可能であり、走査の省略又は削減が可能である。

[0328] なお、上述した通り、送信と受信とが入れ替えられてもよい。この場合、複数の送信アレイアンテナが順次電波を送信する。より具体的には、複数の送信素子が順次電波を送信する。送信位置及び受信位置が入れ替えられても受信される散乱の量は同じであると想定される。したがって、送信と受信とが入れ替えられても、実質的に同じ結果が得られる。そして、複数の送信アレイアンテナが用いられる場合において、複数の受信アレイアンテナが用いられる場合と同じように線形加算が行われてもよい。

[0329] また、複数の送信アレイアンテナと複数の受信アレイアンテナとが用いられてもよい。そして、複数の送信アレイアンテナと複数の受信アレイアンテナ

ナとが交互に配置されてもよい。

[0330] また、S-A r r a y 2次元配列によって、走査が行われてもよい。これにより、より広い範囲の情報が得られる。

[0331] 上記の通り、送信アレイアンテナ及び受信アレイアンテナに関する複数の組み合わせに対する複数の散乱場関数の合成を用いて映像化関数が導出され得る。例えば、複数の散乱場関数が1つの散乱場関数に合成され、散乱場関数の極限操作によって、映像化関数が導出される。複数の散乱場関数のそれぞれは、式(3-1-23)で表現される散乱場関数であってもよいし、合成は、線形加算であってもよい。

[0332] <111-3 曲面境界のS-A r r a y 散乱場理論>

以下では、領域の境界すなわち散乱データを計測する境界面が、曲率の大きくない曲面である場合のS-A r r a y 散乱場理論を説明する。

[0333] 図13は、曲面上の準2次元アレイアンテナを示す図である。図13には、 $z=0$ の平面 $x-y$ へ投影した準2次元アレイアンテナが示されている。曲面の曲率が大きい場合、アレイアンテナの傾斜が無視することが許容されず、アンテナ素子間の $x-y$ 面での距離が場所により変化することを無視することが許容されない。しかし、曲率の大きくない曲面では近似的に素子間の $x-y$ 面での距離が一定とみなされ得る。

[0334] ここでは、11-5の理論を基礎として用いて、準2次元配列の場合の逆散乱理論が構築される。散乱場関数は、次式(3-3-1)のような関数である。

[0335] [数159]

$$\begin{aligned} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) &= \iint_D \frac{e^{ik\rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{ik\rho_2}}{\rho_2} \varepsilon(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta \\ \rho_1 &= \sqrt{(x_1 - \xi)^2 + (y_1 - \eta)^2 + (z_1 - \zeta)^2} \\ \rho_2 &= \sqrt{(x_2 - \xi)^2 + (y_2 - \eta)^2 + (z_2 - \zeta)^2} \\ &\cdots (3-3-1) \end{aligned}$$

[0336] 式(3-3-1)の散乱場関数が満たす方程式は、式(2-5-4)であって、次式(3-3-2)のように表現される。

[0337] [数160]

$$\begin{aligned}
& \left\{ \Delta_6 - 2(ik)^2 \right\} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\
& = \left\{ (\partial_{x_1}^2 + \partial_{x_2}^2 + \partial_{y_1}^2 + \partial_{y_2}^2 + \partial_{z_1}^2 + \partial_{z_2}^2) - 2(ik)^2 \right\} \\
& \quad \cdot \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\
& = 0 \\
& \dots (3-3-2)
\end{aligned}$$

[0338] また、ここでは、次式 (3-3-3) のようなフーリエ変換が用いられる

。

[0339] [数161]

$$\begin{aligned}
& \tilde{\varphi}(k_{x_1}, k_{y_1}, x_2, k_{y_2}, z_1, z_2, k) \\
& = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2)} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) dx_1 dy_1 dy_2 \\
& \dots (3-3-3)
\end{aligned}$$

[0340] 式 (3-3-2) 及び式 (3-3-3) から次式 (3-3-4) が得られる。

[0341] [数162]

$$\begin{aligned}
& \left\{ \partial_{x_2}^2 + \partial_{x_1}^2 + \partial_{z_2}^2 + 2k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2 \right\} \tilde{\varphi}(k_{x_1}, k_{y_1}, x_2, k_{y_2}, z_1, z_2, k) = 0 \\
& \dots (3-3-4)
\end{aligned}$$

[0342] 式 (3-3-4) の方程式の解として次式 (3-3-5) が仮定される。

[0343] [数163]

$$\begin{aligned}
& \tilde{\varphi}(k_{x_1}, k_{y_1}, x_2, k_{y_2}, z_1, z_2, k) = b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_3 x_2} e^{s_4 z_1} e^{s_5 z_2} \\
& s_3 = s_3(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
& s_4 = s_4(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
& s_5 = s_5(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
& \dots (3-3-5)
\end{aligned}$$

[0344] 式 (3-3-5) を式 (3-3-4) へ代入することにより、次式 (3-3-6) が得られる。

[0345] [数164]

$$\begin{aligned}
& s_3^2 + s_4^2 + s_5^2 + 2k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2 = 0 \\
& \dots (3-3-6)
\end{aligned}$$

[0346] 次に、

[数165]

$$\varphi$$

が、次式（3-3-7）のように表現される。

[0347] [数166]

$$\begin{aligned} & \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2)} b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_3 x_2} e^{s_4 z_1} e^{s_5 z_2} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\ & \dots (3-3-7) \end{aligned}$$

[0348] $x_2 \rightarrow x_1$ において、式（3-3-7）が、式（2-2-18）と一致する。
 $x_2 \rightarrow x_1$ において、式（3-3-7）は、次式（3-3-8）のように表現される。

[0349] [数167]

$$\begin{aligned} & \varphi(x_1, y_1, x_1, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\{(k_{x_1} + i s_3)x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2\}} b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_4 z_1} e^{s_5 z_2} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\ & \dots (3-3-8) \end{aligned}$$

[0350] また、式（2-2-18）と同じ式が、次式（3-3-9）のように表現される。

[0351] [数168]

$$\begin{aligned} & \phi(x, y_1, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2)} a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\ & \quad \cdot e^{i s_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) z_1} e^{i s_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) z_2} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\ & s_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) = \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ & s_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) = \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ & \dots (3-3-9) \end{aligned}$$

[0352] 式（3-3-8）と式（3-3-9）とが一致するため、次式（3-3-

10) が得られる。

[0353] [数169]

$$\begin{aligned}
 k_x &= k_{x_1} + is_3(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
 b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \left(\frac{dk_{x_1}}{dk_x} \right) &= a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
 s_4(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) &= is_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
 s_5(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) &= is_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
 &\dots (3-3-10)
 \end{aligned}$$

[0354] 次に、式 (3-3-6)、式 (3-3-9)、及び、(3-3-10) から、 s_3 に関する代数方程式が次式 (3-3-11) のように得られる。

[0355] [数170]

$$\begin{aligned}
 s_3^2 - \left\{ \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + is_3)^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \right\}^2 \\
 - \left\{ \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + is_3)^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \right\}^2 \\
 + 2k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2 = 0 \\
 \dots (3-3-11)
 \end{aligned}$$

[0356] 式 (3-3-11) について、2乗項を展開し、簡素化することにより、次式 (3-3-12) が得られる。

[0357] [数171]

$$\begin{aligned}
 s_3^2 + \frac{(2k^2 - k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)(k_{x_1} + is_3)^2}{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2} - k_{x_1}^2 = 0 \\
 \dots (3-3-12)
 \end{aligned}$$

[0358] さらに、式 (3-3-12) を整理することにより、次式 (3-3-13) が得られる。

[0359]

[数172]

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

$$\cdots(3-3-13)$$

[0360] 式(3-3-13)には、2つの解が存在する。しかし、式(3-3-13)の解は、111-1節の平面境界の場合と一致すべきである。そのため、式(3-1-16)に従って、次式(3-3-14)が解として選ばれるべきである。

[0361] [数173]

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

$$\cdots(3-3-14)$$

[0362] 以上をまとめると、散乱場関数が次式(3-3-15)のように得られる。

[0363] [数174]

$$\varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k)$$

$$= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1+k_{y_1}y_1+k_{y_2}y_2)} b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_3x_2} e^{s_4z_1} e^{s_5z_2} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2}$$

$$= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1+k_{y_1}y_1+k_{y_2}y_2)} a(k_{x_1}+is_3, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

$$\cdot e^{s_3x_2} e^{s_4z_1} e^{s_5z_2} \frac{d(k_{x_1}+is_3)}{dk_{x_1}} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2}$$

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

$$s_4 = \frac{i\sqrt{k^2-k_{y_1}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2-k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2-k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1}+is_3)^2}}{\sqrt{k^2-k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2-k_{y_2}^2}}$$

$$s_5 = \frac{i\sqrt{k^2-k_{y_2}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2-k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2-k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1}+is_3)^2}}{\sqrt{k^2-k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2-k_{y_2}^2}}$$

$$\cdots(3-3-15)$$

[0364] また、式(3-3-15)において、 k_{x_1} から k_x へ変数を変換することに

より、次式（3-3-16）が得られる。

[0365] [数175]

$$\begin{aligned}
 s_3 &= \frac{-ik_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
 s_4 &= \frac{i \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{\left(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}\right)^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
 s_5 &= \frac{i \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{\left(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}\right)^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
 &\dots (3-3-16)
 \end{aligned}$$

[0366] 次に、計測データ $\Phi(x_1, y_1, y_2, k)$ と $b(k_{x1}, k_{y1}, k_{y2}, k)$ とを結びつけることが検討される。曲面上の点 P_1 、 P_J で計測されたデータ $\Phi(x_1, y_1, x_1 + d, y_J, t)$ をフーリエ変換することで得られる関数は、次式（3-3-17）のように表現される。

[0367] [数176]

$$\begin{aligned}
 \Phi(x_I, y_I, y_J, k) &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ickt} \varphi(x_I, y_I, x_I + d, y_J, t) dt \\
 &\dots (3-3-17)
 \end{aligned}$$

[0368] 計測面である境界曲面の形は、次式（3-3-18）のように表現される

。

[0369] [数177]

$$\begin{aligned}
 z &= f(x, y) \\
 &\dots (3-3-18)
 \end{aligned}$$

[0370] ここで、 (x, y) は、 $z = 0$ での平面上の座標である。 P_1 、 P_J での z 座標は、次式（3-3-19）のように表現される。

[0371] [数178]

$$\begin{aligned}
 z_I &= f(x_I, y_I) \\
 z_J &= f(x_J, y_J) \\
 &\dots (3-3-19)
 \end{aligned}$$

[0372] $x_2 = x_1 + d$ を式（3-3-15）へ代入することにより、次式（3-3

－ 2 0) のような方程式が成立する。

[0373] [数179]

$$\begin{aligned} & \varphi(x_1, y_1, x_1 + d, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1} x_1 + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} a(k_{x_1} + is_3, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\ & \quad \cdot e^{s_3(x_1 + d)} e^{s_4 z_1} e^{s_5 z_2} \frac{d(k_{x_1} + is_3)}{dk_{x_1}} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\ & \quad \dots (3-3-20) \end{aligned}$$

[0374] 上記の式 (3-3-20) は、境界上の計測によって得られるデータ Φ を用いて、次式 (3-3-21) のように表現される。

[0375] [数180]

$$\begin{aligned} & \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \delta(x_1 - x_I) \delta(y_1 - y_I) \delta(y_2 - y_J) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1} x_1 + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} a_{I,J}(k_{x_1} + is_3, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\ & \quad \cdot e^{s_3(x_1 + d)} e^{s_4 z_I} e^{s_5 z_J} \frac{d(k_{x_1} + is_3)}{dk_{x_1}} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\ & \quad \dots (3-3-21) \end{aligned}$$

[0376] $\Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k)$ は、送信点 (x_I, y_I, z_I) 、受信点 $(x_I + d, y_J, z_J)$ 及び波数 k の計測データである。式 (3-3-21) の両辺のフーリエ変換によって、次式 (3-3-22) が得られる。

[0377] [数181]

$$\begin{aligned} & \iiint e^{i(k_{x_1}' x_1 + k_{y_1}' y_1 + k_{y_2}' y_2)} \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\ & \quad \cdot \delta(x_1 - x_I) \delta(y_1 - y_I) \delta(y_2 - y_J) dx_1 dy_1 dy_2 \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \iiint e^{i(k_{x_1}' x_1 + k_{y_1}' y_1 + k_{y_2}' y_2)} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1} x_1 + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} a_{I,J}(k_{x_1} + is_3, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\ & \quad \cdot e^{s_3(x_1 + d)} e^{s_4 z_I} e^{s_5 z_J} \frac{d(k_{x_1} + is_3)}{dk_{x_1}} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} dx_1 dy_1 dy_2 \\ & \quad \dots (3-3-22) \end{aligned}$$

[0378] そして、式 (3-3-22) における x_1, y_1, y_2 に関する積分の結果として、次式 (3-3-23) が得られる。

[0379] [数182]

$$\begin{aligned}
& \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) e^{i(k_{x_1}' x_I + k_{y_1}' y_I + k_{y_2}' y_J)} \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(k_{x_1} + is_3 - k_{x_1}') \delta(k_{y_1} - k_{y_1}') \delta(k_{y_2} - k_{y_2}') \\
&\quad \cdot a_{I,J}(k_{x_1} + is_3, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_3 d} e^{s_4 z_I} e^{s_5 z_J} \frac{d(k_{x_1} + is_3)}{dk_{x_1}} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&= a_{I,J}(k_{x_1}', k_{y_1}', k_{y_2}', k) e^{s_3' d} e^{s_4' z_I} e^{s_5' z_J} \\
&\quad s_3' = \frac{-ik_{x_1}' \sqrt{k^2 - k_{y_2}'^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}'^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}'^2}} \\
&\quad \dots (3-3-23)
\end{aligned}$$

[0380] 式(3-3-23)の結果を整理することにより、次式(3-3-24)が得られる。

[0381] [数183]

$$\begin{aligned}
& a_{I,J}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) = \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) e^{i(k_x x_I + k_{y_1} y_I + k_{y_2} y_J)} e^{-s_3 d} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \\
&\quad s_3 = \frac{-ik_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
&\quad \dots (3-3-24)
\end{aligned}$$

[0382] 式(3-3-24)に関する全てのI、Jの組に対する和によって、次式(3-3-25)が得られる。

[0383] [数184]

$$\begin{aligned}
& a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
&= \sum_{I,J} a_{I,J}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
&= \sum_{I,J} \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) e^{i(k_x x_I + k_{y_1} y_I + k_{y_2} y_J)} e^{-s_3 d} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \\
&\quad \dots (3-3-25)
\end{aligned}$$

[0384] 式(3-3-15)及び式(3-3-25)より、散乱場関数が、次式(3-3-26)のように求まる。

[0385]

[数185]

$$\begin{aligned}
& \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x_1 + k_y y_1 + k_z z_1)} \sum_{I,J} \{ \Phi(x_I, y_I, z_I, k) \\
&\quad \cdot e^{i(k_x x_I + k_y y_I + k_z z_I)} e^{-s_3 d} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} e^{s_3 x_2} e^{s_4 y_1} e^{s_5 z_2} \frac{d(k_x + i s_3)}{dk_{x_1}} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
& s_3 = \frac{-ik_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
& \dots (3-3-26)
\end{aligned}$$

[0386] 式(3-3-26)に対して、 $x_2 = x_1 = x$ 、 $y_1 = y_2 = y$ 、及び、 $z_1 = z_2 = z$ を適用し、 k について積分することで、映像化関数が得られる。次に、高速な演算を可能にするフーリエ変換で結果が得られるよう、映像化関数の式を改良することが検討される。基本的な変数は、 k_x 、 k_{y1} 、 k_{y2} 、 k_z であり、他の変数は、これらを用いて陽的に表される。映像化関数は、以下の手順で得られる。

[0387] まず、式(3-3-26)に、 $x_2 = x_1 = x$ 、 $y_1 = y_2 = y$ 、及び、 $z_1 = z_2 = z$ を適用することで、次式(3-3-27)が得られる。

[0388] [数186]

$$\begin{aligned}
& \varphi(x, y, x, y, z, z, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_y y_1 + k_z z_1)} e^{-s_3 d} e^{s_4 z} e^{s_5 z} \sum_{I,J} \{ \Phi(x_I, y_I, z_I, k) \\
&\quad \cdot e^{i(k_x x_I + k_y y_I + k_z z_I)} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
& s_3 = \frac{-ik_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
& \dots (3-3-27)
\end{aligned}$$

[0389] 映像化関数 ρ は、 k に関して積分することにより、次式(3-3-28)のように得られる。

[0390]

[数187]

$$\begin{aligned}
& \rho(x, y, z) \\
&= \int_0^\infty \varphi(x, y, x, y, z, z, k) dk \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty dk \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_{y1} y_1 + k_{y2} y_2)} e^{-s_3 d} e^{ik_z z} \sum_{I, J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\
&\quad \cdot e^{i(k_x x_I + k_{y1} y_{I1} + k_{y2} y_{J2})} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} dk_x dk_{y1} dk_{y2} \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_{y1} y_1 + k_{y2} y_2)} e^{-s_3 d} e^{ik_z z} \sum_{I, J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\
&\quad \cdot e^{i(k_x x_I + k_{y1} y_{I1} + k_{y2} y_{J2})} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} \left(\frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y1} dk_{y2} dk_z \\
& s_3 = \frac{-ik_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
& \dots (3-3-28)
\end{aligned}$$

[0391] この演算には、次式 (3-3-29) が用いられる。

[0392] [数188]

$$\begin{aligned}
k &= \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y1}^2 + k_{y2}^2)} + \frac{(k_{y1}^2 - k_{y2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2} \\
\frac{dk}{dk_z} &= \frac{k_z \left\{ 1 - \frac{(k_{y1}^2 - k_{y2}^2)^2}{(k_x^2 + k_z^2)^2} \right\}}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y1}^2 + k_{y2}^2)} + \frac{(k_{y1}^2 - k_{y2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}} \\
s_3 &= \frac{-ik_x \left(\sqrt{k_x^2 + k_z^2} - \frac{k_{y2}^2 - k_{y1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \\
s_4 &= \frac{ik_z \left(\sqrt{k_x^2 + k_z^2} + \frac{k_{y2}^2 - k_{y1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \\
s_5 &= \frac{ik_z \left(\sqrt{k_x^2 + k_z^2} - \frac{k_{y2}^2 - k_{y1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \\
& \dots (3-3-29)
\end{aligned}$$

[0393] 上記の説明では、準２次元配列が用いられているが、図１１のような２次元配列が用いられてもよい。この場合、送信アレイアンテナ及び受信アレイアンテナに関する複数の組み合わせに対する複数の散乱場関数の合成を用いて映像化関数が導出され得る。例えば、複数の散乱場関数が１つの散乱場関数に合成され、散乱場関数の極限操作によって、映像化関数が導出される。ここで、複数の散乱場関数のそれぞれは、式（３－３－２６）で表現される散乱場関数であってもよいし、合成は、線形加算であってもよい。

[0394] また、図１３において、領域の曲面境界として柱面が示されているが、領域の曲面境界は、柱面でなくてもよい。柱面の接平面に限られず、他の曲面境界の接平面に対して、上記のプロセスが適用されてもよい。

[0395] <ⅠⅤ 誘電率の周波数依存性>

<ⅠⅤ－１ 基礎理論>

ⅠⅠⅠ章で求められた再構成の式を用いるにあたり誘電率の分散性の有無が考慮されてもよい。誘電率の分散性がない場合、周波数 f と波数 k とは次式（４－１－１）のような簡単な関係を有する。ここで、 ε_r は比誘電率であり、 c_0 は真空中の電磁波の速度である。

[0396] [数189]

$$f = \frac{c_0 k}{2\pi\sqrt{\varepsilon_r}}$$

・・・（４－１－１）

[0397] 誘電率の分散性がない場合における f から k への変数変換は容易である。しかし、生体などへの応用では誘電率が周波数に依存して変化することが考慮されるべきである。以下では、誘電率に周波数依存性があることが考慮される。

[0398] １～５ＧＨｚの領域に比べ１４～２０ＧＨｚの領域では誘電率が約６０％になる。デバイ（Ｄｅｂｙｅ）の誘電率の周波数依存性の式は、以下の式（４－１－２）及び式（４－１－３）に示される。

[0399]

[数190]

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + i\omega\tau}$$

$$\varepsilon(0) = \varepsilon_s$$

$$\varepsilon(\infty) = \varepsilon_{\infty}$$

・・・(4-1-2)

[0400] [数191]

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty})}{1 + \omega^2\tau^2} - i \frac{\omega\tau(\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty})}{1 + \omega^2\tau^2}$$

$$\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty})}{1 + \omega^2\tau^2} = a + \frac{b}{1 + \alpha\omega^2}$$

・・・(4-1-3)

[0401] ここで、 ω は、角周波数を示す。 $\varepsilon(\omega)$ は、 ω における複素誘電率を示す。 i は、虚数単位を示す。 τ は、緩和時間を示す。 $\varepsilon_r(\omega)$ は、 ω における複素誘電率の実部を示す。 a 、 b 及び α は、定数を示す。具体的には、 a 、 b 及び α は、デバイ緩和に従って周波数変化と誘電率変化との対応関係を示すパラメータである。

[0402] また、電波の速度と周波数と波数との関係は以下の式(4-1-4)及び式(4-1-5)のように表現される。

[0403] [数192]

$$c(\omega) = \frac{c_0}{\sqrt{\varepsilon_r(\omega)}}$$

$$\omega = c(\omega)k$$

・・・(4-1-4)

[0404] [数193]

$$\omega = \frac{c_0 k}{\sqrt{a + \frac{b}{1 + \alpha\omega^2}}}$$

・・・(4-1-5)

[0405] ここで、 $c(\omega)$ は、 ω における伝搬速度を示す。 ω と f とは、 $\omega = 2\pi f$ の関係をもつ。また、式(4-1-5)から次式(4-1-6)が得られる。

[0406] [数194]

$$\omega = \sqrt{\frac{-(a+b-c_0^2\alpha k^2) + \sqrt{(a+b-c_0^2\alpha k^2)^2 + 4a\alpha c_0^2 k^2}}{2a\alpha}}$$

$$\cdots (4-1-6)$$

[0407] さらに、式(4-1-6)から次式(4-1-7)も得られる。

[0408] [数195]

$$\frac{d\omega}{dk} = \frac{c_0^2 k + \alpha c_0^2 \omega^2 k}{(a+b)\omega + 2a\alpha\omega^2 - \alpha c_0^2 \omega k^2}$$

$$\cdots (4-1-7)$$

[0409] <IV-2 平面境界及び分散性媒質のS-Array散乱場理論>

ここでは、平面境界においてS-Arrayによってデータを計測して、誘電分散性媒質の内部の映像を生成するための映像化関数が検討される。時間の因子が $e^{-i\omega t}$ であるため、誘電率に周波数依存性があることが考慮される場合、式(3-2-1)において k の代わりに周波数 ω で積分が行われる。これにより、以下の式(4-2-1)及び式(4-2-2)のように映像化関数が得られる。

[0410] [数196]

$$\rho(x, y, z)$$

$$= \int \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) d\omega$$

$$= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty d\omega \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_{y1} y + k_{y2} y)} e^{s_4 z} e^{\frac{i d k_x \sqrt{k^2 - k_{y2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y2}^2}}}$$

$$\cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k) dk_x dk_{y1} dk_{y2}$$

$$= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_{y1} y + k_{y2} y)} e^{i k_z z} e^{\frac{i d k_x \sqrt{k^2 - k_{y2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y2}^2}}}$$

$$\cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k) \left(\frac{d\omega}{dk} \right) \left(\frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y1} dk_{y2} dk_z$$

$$\cdots (4-2-1)$$

[0411]

[数197]

$$\begin{aligned}
k_z &= \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2} \\
k &= \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}} \\
\frac{dk}{dk_z} &= \frac{k_z \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{k(k_x^2 + k_z^2)} \\
\frac{d\omega}{dk} &= \frac{c_0^2 k + \alpha c_0^2 \omega^2 k}{(a+b)\omega + 2a\alpha\omega^2 - \alpha c_0^2 \omega k^2} \\
&\dots (4-2-2)
\end{aligned}$$

[0412] <IV-3 曲面境界及び分散性媒質のS-Array散乱場理論>

ここでは、曲面境界においてS-Arrayによってデータを計測して、誘電分散性媒質の内部の映像を生成するための映像化関数が検討される。時間の因子が $e^{-i\omega t}$ であるため、誘電率に周波数依存性があることが考慮される場合、式(3-3-28)において k の代わりに周波数 ω で積分が行われる。これにより、以下の式(4-3-1)及び式(4-3-2)のように映像化関数が得られる。

[0413] [数198]

$$\begin{aligned}
\rho(x, y, z) &= \int_0^\infty \varphi(x, y, x, y, z, z, k) d\omega \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty d\omega \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} e^{-s_3 d} e^{ik_z z} \sum_{I, J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\
&\quad \cdot e^{i(k_x x_I + k_{y_1} y_I + k_{y_2} y_J)} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} e^{-s_3 d} e^{ik_z z} \sum_{I, J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\
&\quad \cdot e^{i(k_x x_I + k_{y_1} y_I + k_{y_2} y_J)} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} \left(\frac{d\omega}{dk} \right) \left(\frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk_z \\
&\dots (4-3-1)
\end{aligned}$$

[0414]

[数199]

$$\begin{aligned}
k &= \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}} \\
\frac{dk}{dk_z} &= \frac{k_z \left\{ 1 - \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{(k_x^2 + k_z^2)^2} \right\}}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}}} \\
\frac{d\omega}{dk} &= \frac{c_0^2 k + \alpha c_0^2 \omega^2 k}{(a+b)\omega + 2a\alpha\omega^2 - \alpha c_0^2 \omega k^2} \\
s_3 &= \frac{-ik_x \left(\sqrt{k_x^2 + k_z^2} - \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \\
s_4 &= \frac{ik_z \left(\sqrt{k_x^2 + k_z^2} + \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \\
s_5 &= \frac{ik_z \left(\sqrt{k_x^2 + k_z^2} - \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \\
&\dots (4-3-2)
\end{aligned}$$

[0415] <V 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、波動を用いて領域内の物体に含まれる散乱体の構造を可視化する映像化装置の構成及び動作を示す。

[0416] ここで、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。領域内の物体は、生体、製造物又は自然素材などであってもよい。特に、映像化装置がマンモグラフィに用いられてもよく、物体は、乳房であってもよい。

[0417] また、領域内の物体に含まれる散乱体は、周辺の媒質の物理特性とは異なる物理特性を有する部分に対応する。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。そして、物体に含まれる散乱体は、鉄筋コンクリートに含まれる鉄筋、又は、乳房に含まれる腫瘍等であってもよい。また、計測対象の領域は、物体の領域と同等であってもよい。

[0418] 図14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14に示された映像化装置100は、送信器列101、受信器列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。

[0419] 送信器列101は、波動を送信する回路である。具体的には、送信器列101は、直線上に配列された複数の送信器111を含む。そして、各送信器111が波動を送信する。映像化装置100は、互いに平行な複数の送信器列101を備えていてもよい。

[0420] 受信器列102は、波動を受信する回路である。具体的には、受信器列102は、複数の送信器111が配列された直線に平行な別の直線上に配列された複数の受信器112を含む。そして、各受信器112が波動を受信する。また、受信器列102は、送信器列101から間隔を設けて配置されている。つまり、受信器列102は、送信器列101から離れている。映像化装置100は、互いに平行な複数の受信器列102を備えていてもよい。

[0421] 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、送信器列101及び受信器列102によって得られる計測データに基づいて、領域内の物体に含まれる散乱体の構造を可視化する。例えば、情報処理回路103は、計測データに基づいて散乱体の構造を可視化する際に、上述された理論に示される演算処理を行う。

[0422] 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、散乱体の構造を可視化する専用回路であってもよい。

[0423] また、情報処理回路103は、散乱体の構造を可視化するため、散乱体の

構造を示す画像を生成してもよい。

[0424] そして、情報処理回路103は、散乱体の構造を示す画像をディスプレイ104等に出力することにより、散乱体の構造を可視化してもよい。あるいは、情報処理回路103は、散乱体の構造を示す画像をプリンタ（図示せず）に出力することにより、散乱体の構造を可視化してもよい。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）に送信することにより、散乱体の構造を可視化してもよい。

[0425] 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。

[0426] 図15は、図14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14に示された映像化装置100の送信器列101、受信器列102及び情報処理回路103等が、図15に示された動作を行う。

[0427] まず、送信器列101の複数の送信器111は、計測対象の領域へ波動を送信する（S101）。例えば、複数の送信器111は、順次波動を送信する。また、受信器列102の複数の受信器112は、領域から波動を受信する（S102）。例えば、複数の受信器112は、並行して波動を受信する。受信される波動は、散乱波とも表現され得る。そして、情報処理回路103は、複数の送信器列101及び複数の受信器列102によって得られる計測データを用いて、領域内の物体に含まれる散乱体の構造を可視化する（S103）。

[0428] 情報処理回路103は、散乱体の構造を可視化する際、まず、計測データ及び距離に従って、波動の散乱に関する散乱場関数に対応する映像化関数を導出する。ここで、計測データは、複数の送信器111と複数の受信器112との全部又は一部の組み合わせによって得られる計測データである。また

、距離は、複数の送信器 1 1 1 が配列される直線と複数の受信器 1 1 2 が配列される直線との間の距離である。そして、情報処理回路 1 0 3 は、映像化関数を用いて、領域内の物体に含まれる散乱体の構造を可視化する。

[0429] これにより、映像化装置 1 0 0 は、送信器列 1 0 1 の複数の送信器 1 1 1 と、受信器列 1 0 2 の複数の受信器 1 1 2 との様々な組み合わせに従って、十分な情報を計測データとして取得することができる。また、映像化装置 1 0 0 は、送信器列 1 0 1 と受信器列 1 0 2 との間に間隔が設けられているため、領域へ波動を適切に送信することができ、領域から波動を適切に受信することができる。

[0430] そして、映像化装置 1 0 0 は、波動の計測データ、及び、送信器列 1 0 1 と受信器列 1 0 2 との間の距離に従って導出される映像化関数を用いて、散乱体の構造を適切に可視化することができる。

[0431] さらに、映像化装置 1 0 0 は、送信器 1 1 1 及び受信器 1 1 2 の配置が 2 つの直線上に拘束されるため、送信器 1 1 1 及び受信器 1 1 2 が任意に配置される場合よりも演算処理を簡素化することができる。したがって、映像化装置 1 0 0 は、演算処理の複雑化を抑制することができる。すなわち、映像化装置 1 0 0 は、波動を用いて、領域内の物体に含まれる散乱体の構造を可視化することができ、演算処理の複雑化を抑制しつつ、散乱体の構造の可視化における空間分解能を高めることができる。

[0432] 例えば、情報処理回路 1 0 3 は、計測データ及び距離に従って散乱場関数を導出してもよい。そして、情報処理回路 1 0 3 は、散乱場関数に従って映像化関数を導出してもよい。

[0433] ここで、散乱場関数は、

[数200]

$$\varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z) = \iiint_D \frac{e^{ik\rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{ik\rho_2}}{\rho_2} \varepsilon(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta$$

で表現される関数である。また、 ρ_1 及び ρ_2 は、

[数201]

$$\rho_1 = \sqrt{(x_1 - \xi)^2 + (y_1 - \eta)^2 + (z - \zeta)^2}$$

$$\rho_2 = \sqrt{(x_2 - \xi)^2 + (y_2 - \eta)^2 + (z - \zeta)^2}$$

で定められる。

[0434] また、 (x_1, y_1, z) は、波動の送信位置を示す。 (x_2, y_2, z) は、波動の受信位置を示す。 k は、波動の波数を示す。 D は、領域を示す。 (ξ, η, ζ) は、波動の反射位置に対応する。 ε は、反射位置における未知の反射率に対応する。

[0435] これにより、映像化装置 100 は、送信位置及び受信位置が同一の z 座標を有することを前提として定められる散乱場関数を導出することができ、その散乱場関数に従って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、領域の平面境界に沿って、送信器列 101 の複数の送信器 111 と、受信器列 102 の複数の受信器 112 とを用いて得られる計測データに従って、適切に散乱場関数及び映像化関数を導出することができる。

[0436] 例えば、情報処理回路 103 は、散乱場関数が満たす方程式を解くことにより、散乱場関数を導出してよい。

[0437] ここで、散乱場関数が満たす方程式は、

[数202]

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

で表現される。また、 Δ_5 は、

[数203]

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

で定められる。

[0438] また、 c は、波動の伝搬速度を示す。 t は、波動の送信から受信までの時間を示す。

[0439] これにより、映像化装置 100 は、散乱場関数が満たす方程式の解を散乱

場関数として解析的に導出することができる。したがって、映像化装置 100 は、効率的に適切な散乱場関数を導出することができる。

[0440] また、例えば、映像化関数は、

[数204]

$$\rho(x, y, z) = \int_0^{\infty} \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) dk$$

で表現されてもよい。ここで、(x、y、z)は、映像化対象位置を示す。

[0441] これにより、映像化装置 100 は、散乱場関数の極限操作に従って、映像化関数を導出することができる。そして、これにより、映像化装置 100 は、領域内の散乱の状態を可視化することができ、領域内の物体に含まれる散乱体の構造を適切に可視化することができる。

[0442] また、例えば、情報処理回路 103 は、

[数205]

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

を散乱場関数として導出してもよい。

[0443] ここで、 k_x 、 s_3 及び s_4 は、

[数206]

$$\begin{aligned} k_x &= k_{x_1} + is_3 \\ s_3 &= \frac{-ik_{x_1}\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-ik_x\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ s_4 &= i\sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + is_3)^2} \end{aligned}$$

で定められる。

[0444] また、 k_{x_1} 、 k_{y_1} 及び k_{y_2} は、散乱場関数の x_1 、 y_1 及び y_2 に関する波数を示す。dは、距離を示す。

[0445] また、

[数207]

$$\tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

は、 x_1 、 y_1 及び y_2 に関してフーリエ変換された計測データを示す。

[0446] これにより、映像化装置100は、波動の計測データ、及び、送信器列101と受信器列102との間の距離を散乱場関数に適切に反映することができる。したがって、映像化装置100は、散乱の状態を適切に表す散乱場関数を導出することができる。

[0447] また、例えば、情報処理回路103は、

[数208]

$$\begin{aligned} \rho(x, y, z) &= \int \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) dk \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{s_4 z} e^{\frac{i d k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}} \\ &\quad \cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{i k_z z} e^{\frac{i d k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}} \\ &\quad \cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \left(\frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk_z \end{aligned}$$

を映像化関数として導出してもよい。

[0448] ここで、 k_x 、 k_z 、 k 、 dk/dk_z 及び s_4 は、

[数209]

$$\begin{aligned}
k_x &= k_{x_1} + i s_3 \\
k_z &= \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2} \\
k &= \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}} \\
\frac{dk}{dk_z} &= \frac{k_z \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{k(k_x^2 + k_z^2)} \\
s_4 &= i k_z \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + i s_3)^2}
\end{aligned}$$

で定められる。

[0449] また、 s_3 は、

[数210]

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

で定められる。

[0450] また、 (x, y, z) は、映像化対象位置を示す。 k_{x_1} 、 k_{y_1} 及び k_{y_2} は、散乱場関数の x_1 、 y_1 及び y_2 に関する波数を示す。 d は、距離を示す。

[0451] また、

[数211]

$$\tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

は、 x_1 、 y_1 及び y_2 に関してフーリエ変換された計測データを示す。

[0452] これにより、映像化装置100は、波動の計測データ、及び、送信器列101と受信器列102との間の距離を映像化関数に適切に反映することができる。映像化装置100は、散乱の状態を適切に表す映像化関数を導出することができる。

[0453] また、例えば、映像化装置100は、送信器列101として複数の送信器列101、受信器列102として複数の受信器列102、又は、送信器列101及び受信器列102として複数の送信器列101及び複数の受信器列102を備えてもよい。

[0454] これにより、映像化装置100は、送信器列101及び受信器列102に関する複数の組み合わせに従って、十分な情報を計測データとして取得することができる。また、映像化装置100は、送信器列101及び受信器列102に対して平行方向と直交方向との2つの方向に関してマルチスタティックの関係を構築することができる。したがって、映像化装置100は、領域内の物体に含まれる散乱体の構造を適切に可視化することができる。

[0455] また、例えば、情報処理回路103は、映像化装置100が備える1列の送信器列101及びn列の受信器列102に対して、

[数212]

$$\begin{aligned}
 & \rho(x, y, z) \\
 &= \int \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) dk \\
 &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y1} y - k_{y2} y)} e^{s_4 z} \\
 & \cdot \sum_{j=1, n} \left\{ \exp \left(\frac{i d_j k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \right) \tilde{\Phi}_j(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \right\} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk \\
 &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y1} y - k_{y2} y)} e^{i k_z z} \\
 & \cdot \sum_{j=1, n} \left\{ \exp \left(\frac{i d_j k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \right) \tilde{\Phi}_j(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \right\} \left(\frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk_z
 \end{aligned}$$

を映像化関数として導出してもよい。

[0456] また、 k_x 、 k_z 、 k 、 dk/dk_z 及び s_4 は、

[数213]

$$\begin{aligned}
 k_x &= k_{x_1} + i s_3 \\
 k_z &= \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2} \\
 k &= \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}} \\
 \frac{dk}{dk_z} &= \frac{k_z \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{k(k_x^2 + k_z^2)} \\
 s_4 &= i k_z = i \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + i s_3)^2}
 \end{aligned}$$

で定められる。

[0457] また、 s_3 は、

[数214]

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

で定められる。

[0458] また、 (x, y, z) は、映像化対象位置を示す。 k_{x_1} 、 k_{y_1} 及び k_{y_2} は、散乱場関数の x_1 、 y_1 及び y_2 に関する波数を示す。 d_j は、距離を示す。

[0459] また、

[数215]

$$\tilde{\Phi}_j(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

は、 x_1 、 y_1 及び y_2 に関してフーリエ変換された計測データを示す。

[0460] これにより、映像化装置100は、波動の計測データ、及び、送信器列101と受信器列102との間の距離を映像化関数に適切に反映することができる。具体的には、映像化装置100は、送信器列101及び受信器列102に関する複数の組み合わせに従って得られる計測データに対して、送信器列101と受信器列102との間の距離に対応する線形加算を行うことで、散乱の状態を適切に表す映像化関数を導出することができる。

[0461] また、例えば、情報処理回路103は、領域において反射率に対応する誘電率が周波数依存性を有する場合、

[数216]

$$\begin{aligned}
\rho(x, y, z) &= \int \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) d\omega \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty d\omega \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{s_4 z} e^{\frac{i d k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}} \\
&\quad \cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{i k_z z} e^{\frac{i d k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}} \\
&\quad \cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \left(\frac{d\omega}{dk} \right) \left(\frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk_z
\end{aligned}$$

を映像化関数として導出してもよい。

[0462] また、 k_x 、 k_z 、 k 、 dk/dk_z 、 $d\omega/dk$ 及び s_4 は、

[数217]

$$\begin{aligned}
k_x &= k_{y_1} + i s_3 \\
k_z &= \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2} \\
k &= \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}} \\
\frac{dk}{dk_z} &= \frac{k_z \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{k(k_x^2 + k_z^2)} \\
\frac{d\omega}{dk} &= \frac{c_0^2 k + \alpha c_0^2 \omega^2 k}{(a+b)\omega + 2a\alpha\omega^2 - \alpha c_0^2 \omega k^2} \\
s_4 &= i k_z = i \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{y_1} + i s_3)^2}
\end{aligned}$$

で定められる。

[0463] また、 s_3 は、

[数218]

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

で定められる。

[0464] また、 (x, y, z) は、映像化対象位置を示す。 k_{x1} 、 k_{y1} 及び k_{y2} は、散乱場関数の x_1 、 y_1 及び y_2 に関する波数を示す。 d は、距離を示す。 ω は、波動の角周波数を示す。 c_0 は、真空中の波動の伝搬速度を示す。 a 、 b 及び α は、デバイ緩和に関するパラメータを示す。

[0465] また、

[数219]

$$\tilde{\Phi}(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k)$$

は、 x_1 、 y_1 及び y_2 に関してフーリエ変換された計測データを示す。

[0466] これにより、映像化装置 100 は、デバイ緩和に関するパラメータが反映された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、波動の周波数に依存して生じる精度劣化を抑制することができる。

[0467] また、例えば、情報処理回路 103 は、計測データ及び距離に従って散乱場関数を導出してもよい。そして、情報処理回路 103 は、散乱場関数に従って映像化関数を導出してもよい。

[0468] ここで、散乱場関数は、

[数220]

$$\varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) = \iint_D \frac{e^{ik\rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{ik\rho_2}}{\rho_2} \varepsilon(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta$$

で表現される関数である。

[0469] また、 ρ_1 及び ρ_2 は、

[数221]

$$\begin{aligned} \rho_1 &= \sqrt{(x_1 - \xi)^2 + (y_1 - \eta)^2 + (z_1 - \zeta)^2} \\ \rho_2 &= \sqrt{(x_2 - \xi)^2 + (y_2 - \eta)^2 + (z_2 - \zeta)^2} \end{aligned}$$

で定められる。

[0470] また、 (x_1, y_1, z_1) は、波動の送信位置を示す。 (x_2, y_2, z_2) は、波動の受信位置を示す。 k は、波動の波数を示す。 D は、領域を示し、 (ξ, η, ζ) は、波動の反射位置に対応する。 ε は、反射位置における未

知の反射率に対応する。

[0471] これにより、映像化装置 100 は、送信位置及び受信位置が異なる z 座標を有し得ることを前提として定められる散乱場関数を導出することができ、その散乱場関数に従って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、曲面境界を有する領域の接平面に沿って、送信器列 101 の複数の送信器 111 と、受信器列 102 の複数の受信器 112 とを用いて得られる計測データに従って、適切に散乱場関数及び映像化関数を導出することができる。

[0472] 例えば、情報処理回路 103 は、散乱場関数が満たす方程式を解くことにより、散乱場関数を導出してよい。

[0473] ここで、散乱場関数が満たす方程式は、

[数222]

$$\{\Delta_6 - 2(ik)^2\} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) = 0$$

で表現される。

[0474] また、 Δ_6 は、

[数223]

$$\Delta_6 = \partial_{x_1}^2 + \partial_{x_2}^2 + \partial_{y_1}^2 + \partial_{y_2}^2 + \partial_{z_1}^2 + \partial_{z_2}^2$$

で定められる。

[0475] これにより、映像化装置 100 は、散乱場関数が満たす方程式の解を散乱場関数として解析的に導出することができる。したがって、映像化装置 100 は、効率的に適切な散乱場関数を導出することができる。

[0476] また、例えば、映像化関数は、

[数224]

$$\rho(x, y, z) = \int_0^\infty \varphi(x, y, x, y, z, z, k) dk$$

で表現されてもよい。ここで、 (x, y, z) は、映像化対象位置を示す。

[0477] これにより、映像化装置 100 は、映像化対象位置が入力された散乱場関数を用いて、映像化関数を導出することができる。そして、これにより、映

像化装置 100 は、領域内の散乱の状態を可視化することができ、領域内の物体に含まれる散乱体の構造を適切に可視化することができる。

[0478] また、例えば、情報処理回路 103 は、

[数225]

$$\begin{aligned} & \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{z_1}z_1)} \sum_{I,J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\ & \quad \cdot e^{i(k_{x_I}x_I + k_{y_I}y_I + k_{z_I}z_I)} e^{-s_3 d} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} e^{s_3 x_2} e^{s_4 z_1} e^{s_5 z_2} \frac{d(k_x + i s_3)}{dk_{x_1}} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \end{aligned}$$

を散乱場関数として導出してもよい。

[0479] ここで、 k_x 、 s_3 、 s_4 及び s_5 は、

[数226]

$$\begin{aligned} k_x &= k_{x_1} + i s_3 \\ s_3 &= \frac{-i k_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-i k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ s_4 &= \frac{i \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ s_5 &= \frac{i \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \end{aligned}$$

で定められる。

[0480] また、 k_{x_1} 、 k_{y_1} 及び k_{y_2} は、散乱場関数の x_1 、 y_1 及び y_2 に関する波数を示す。 d は、距離を示す。 $\Phi(x_1, y_1, y_J, z_1, z_J, k)$ は、送信位置が (x_1, y_1, z_1) で受信位置が $(x_1 + d, y_J, z_J)$ である場合における計測データを示す。

[0481] これにより、映像化装置 100 は、波動の計測データ、及び、送信器列 101 と受信器列 102 との間の距離を散乱場関数に適切に反映することができる。したがって、映像化装置 100 は、散乱の状態を適切に表す散乱場関数を導出することができる。

[0482] また、例えば、情報処理回路 103 は、

[数227]

$$\begin{aligned}
 & \rho(x, y, z) \\
 &= \int_0^\infty \varphi(x, y, x, y, z, z, k) dk \\
 &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty dk \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_{y1} y_1 + k_{y2} y_2)} e^{-s_3 d} e^{ik_z z} \sum_{I, J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\
 & \quad \cdot e^{i(k_x x_I + k_{y1} y_{I1} + k_{y2} y_{I2})} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} dk_x dk_{y1} dk_{y2} \\
 &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty dk \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_{y1} y_1 + k_{y2} y_2)} e^{-s_3 d} e^{ik_z z} \sum_{I, J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\
 & \quad \cdot e^{i(k_x x_I + k_{y1} y_{I1} + k_{y2} y_{I2})} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} \left(\frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y1} dk_{y2} dk_z
 \end{aligned}$$

を映像化関数として導出してもよい。

[0483] ここで、 k_x 、 k_z 、 k 、 dk/dk_z 、 s_3 、 s_4 及び s_5 は、

[数228]

$$\begin{aligned}
 k_x &= k_{y1} + is_3 \\
 k_z &= \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y2}^2})^2 - k_x^2} \\
 k &= \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y1}^2 + k_{y2}^2) + \frac{(k_{y1}^2 - k_{y2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}} \\
 \frac{dk}{dk_z} &= \frac{k_z \left\{ 1 - \frac{(k_{y1}^2 - k_{y2}^2)^2}{(k_x^2 + k_z^2)^2} \right\}}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y1}^2 + k_{y2}^2) + \frac{(k_{y1}^2 - k_{y2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}}} \\
 s_3 &= \frac{-ik_x \sqrt{k^2 - k_{y2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y1}^2}} = \frac{-ik_x \left(\sqrt{k_x^2 + k_z^2} - \frac{k_{y2}^2 - k_{y1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \\
 s_4 &= \frac{ik_z \left(\sqrt{k_x^2 + k_z^2} + \frac{k_{y2}^2 - k_{y1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \\
 s_5 &= \frac{ik_z \left(\sqrt{k_x^2 + k_z^2} - \frac{k_{y2}^2 - k_{y1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2}}
 \end{aligned}$$

で定められる。

[0484] また、 (x, y, z) は、映像化対象位置を示す。 k_{x1} 、 k_{y1} 及び k_{y2} は、散乱場関数の x_1 、 y_1 及び y_2 に関する波数を示す。 d は、距離を示す。また、 $\Phi(x_1, y_1, y_J, z_1, z_J, k)$ は、送信位置が (x_1, y_1, z_1) で受信位置が $(x_1 + d, y_J, z_J)$ である場合における計測データを示す。

[0485] これにより、映像化装置100は、波動の計測データ、及び、送信器列101と受信器列102との間の距離を映像化関数に適切に反映することができる。映像化装置100は、散乱の状態を適切に表す映像化関数を導出することができる。

[0486] また、例えば、情報処理回路103は、送信器列101及び受信器列102に関する複数の組み合わせに対する複数の散乱場関数の合成を用いて映像化関数を導出してもよい。

[0487] ここで、複数の散乱場関数のそれぞれは、

[数229]

$$\begin{aligned} & \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x1}x_1 - k_{y1}y_1 + k_{y2}y_2)} \sum_{I, J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\ & \quad \cdot e^{i(k_{x1}x_1 + k_{y1}y_1 + k_{y2}y_2)} e^{-s_3 d} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} e^{s_3 x_2} e^{s_4 z_1} e^{s_5 z_2} \frac{d(k_x + is_3)}{dk_{x1}} dk_{x1} dk_{y1} dk_{y2} \end{aligned}$$

で表現される。

[0488] また、 k_x 、 s_3 、 s_4 及び s_5 は、

[数230]

$$\begin{aligned} k_x &= k_{x1} + is_3 \\ s_3 &= \frac{-ik_{x1}\sqrt{k^2 - k_{y2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y1}^2}} = \frac{-ik_{x1}\sqrt{k^2 - k_{y2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y2}^2}} \\ s_4 &= \frac{i\sqrt{k^2 - k_{y1}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y2}^2}} \\ s_5 &= \frac{i\sqrt{k^2 - k_{y2}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y2}^2}} \end{aligned}$$

で定められる。

[0489] また、 k_{x1} 、 k_{y1} 及び k_{y2} は、散乱場関数の x_1 、 y_1 及び y_2 に関する波数を示す。 d は、距離を示す。また、 $\Phi(x_1, y_1, y_J, z_1, z_J, k)$ は、送信位置が (x_1, y_1, z_1) で受信位置が $(x_1 + d, y_J, z_J)$ である場合における計測データを示す。

[0490] これにより、映像化装置100は、波動の計測データ、及び、送信器列101と受信器列102との間の距離が反映された複数の散乱場関数の合成によって、散乱の状態を適切に表す映像化関数を導出することができる。

[0491] また、例えば、情報処理回路103は、領域において反射率に対応する誘電率が周波数依存性を有する場合、

[数231]

$$\begin{aligned} \rho(x, y, z) &= \int_0^\infty \varphi(x, y, x, y, z, z, k) d\omega \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty d\omega \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_{y1} y_1 + k_{y2} y_2)} e^{-s_3 d} e^{ik_z z} \sum_{I, J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\ &\quad \cdot e^{i(k_x x_I + k_{y1} y_I + k_{y2} y_J)} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} dk_x dk_{y1} dk_{y2} \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_{y1} y_1 + k_{y2} y_2)} e^{-s_3 d} e^{ik_z z} \sum_{I, J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\ &\quad \cdot e^{i(k_x x_I + k_{y1} y_I + k_{y2} y_J)} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} \left(\frac{d\omega}{dk} \right) \left(\frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y1} dk_{y2} dk_z \end{aligned}$$

を映像化関数として導出してもよい。

[0492] ここで、 k_x 、 k_z 、 k 、 dk/dk_z 、 $d\omega/dk$ 、 s_3 、 s_4 及び s_5 は、

[数232]

$$\begin{aligned}
k_x &= k_{x_1} + i s_3 \\
k_z &= \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2} \\
k &= \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}} \\
\frac{dk}{dk_z} &= \frac{k_z \left\{ 1 - \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{(k_x^2 + k_z^2)^2} \right\}}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}}} \\
\frac{d\omega}{dk} &= \frac{c_0^2 k + \alpha c_0^2 \omega^2 k}{(a+b)\omega + 2a\alpha\omega^2 - \alpha c_0^2 \omega k^2} \\
s_3 &= \frac{-i k_x \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-i k_x \left(\sqrt{k_x^2 + k_z^2} - \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \\
s_4 &= \frac{i k_z \left(\sqrt{k_x^2 + k_z^2} + \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \\
s_5 &= \frac{i k_z \left(\sqrt{k_x^2 + k_z^2} - \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2}}
\end{aligned}$$

で定められる。

[0493] また、(x、y、z)は、映像化対象位置を示す。k_{x1}、k_{y1}及びk_{y2}は、散乱場関数のx₁、y₁及びy₂に関する波数を示す。dは、距離を示す。ωは、波動の角周波数を示す。c₀は、真空中の波動の伝搬速度を示す。a、b及びαは、デバイ緩和に関するパラメータを示す。

[0494] また、

[数233]

$$\tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

は、x₁、y₁及びy₂に関してフーリエ変換された計測データを示す。

[0495] これにより、映像化装置100は、デバイ緩和に関するパラメータが反映された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、波動の周波数に依存して生じる精度劣化を抑制することができる。

[0496] また、例えば、散乱場関数は、波動の送信位置及び波動の受信位置が入力されて受信位置における波動を示す値が出力される関数として定められてもよい。また、映像化関数は、送信位置及び前記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値に基づいて定められてもよい。

[0497] そして、情報処理回路 103 は、計測データを境界条件として用いて、散乱場関数を導出し、散乱場関数を用いて、映像化関数を導出してよい。ここで、散乱場関数及び映像化関数には、複数の送信器 111 が配列される直線と複数の受信器 112 が配列される直線との間の距離が反映されていてもよい。

[0498] 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送信器列 101、受信器列 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。

[0499] 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。

[0500] 図 16 は、図 14 に示された映像化装置 100 の具体的な構成を示すブロック図である。

[0501] 図 14 に示された映像化装置 100 の送信器列 101 及び受信器列 102 は、マルチスタティックアレイアンテナ 1008 に含まれていてもよい。図 14 に示された映像化装置 100 の情報処理回路 103 は、図 16 に示された複数の構成要素のうちの 1 つ以上に対応していてもよい。具体的には、例えば、情報処理回路 103 は、信号処理計算機 1005 に対応していてもよい。また、図 14 に示されたディスプレイ 104 は、信号モニタ装置 1006 に対応していてもよい。

- [0502] 映像化装置100において用いられるマイクロ波の信号は、DC～20GHzの周波数成分を持った擬似ランダム時系列信号（PN符号：Pseudo Noise Code）である。この信号は、PN符号生成用FPGAボード1002から出力される。より具体的には、この信号は2種類ある。一方の種類の信号（LO信号：local oscillator signal）は、遅延回路（デジタル制御ボード1003）を通してRF検波回路（RF検波ボード1007）へ送られる。
- [0503] 他方の種類の信号（RF信号：Radio Frequency Signal）は、マルチスタティックアレイアンテナ1008の送信用マイクロ波UWBアンテナへ送られ放射される。マイクロ波の散乱信号がマルチスタティックアレイアンテナ1008の受信用UWBアンテナで受信され、RF検波回路（RF検波ボード1007）へ送られる。ここで送受信信号はアンテナ素子選択スイッチ（UWBアンテナRFスイッチ1004）を通る。
- [0504] また、遅延される信号（LO信号）は、PN符号の値が変化する時間の $1/2^n$ 倍（ n は2よりも大きい整数）の時間ずつ遅延される。検波した信号は、IF信号（Intermediate Frequency Signal）として、信号処理計算機1005でA/D変換され記憶される。また、検波した信号を示す情報が、信号モニタ装置1006に表示されてもよい。
- [0505] これら一連の動作のタイミングは、距離計1001からの信号（距離信号又はフリーラン信号）に同期するように、デジタル制御ボード1003内のマイクロプロセッサによって制御される。例えば、デジタル制御ボード1003内のマイクロプロセッサは、Switch切替信号、及び、PN符号掃引トリガ等を送信する。
- [0506] また、信号処理計算機1005は、A/D変換され記憶された信号を用いて、3次元再構成を行い、3次元画像表示を行う。また、信号処理計算機1005は、信号校正を行ってもよい。また、信号処理計算機1005は、生波形表示を行ってもよい。また、例えば、信号処理計算機1005は、3次元画像等をメモリ1009に保存してもよい。

[0507] 図16に示された構成は例であって、映像化装置100の構成は、図16に示された構成に限られない。図16に示された構成の一部が省略されてもよいし、変更されてもよい。

[0508] (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。

[0509] また、映像化装置の各構成要素が行う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。

[0510] 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。

[0511] 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。

[0512] 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

りを参照して、上記の映像化方法を実行してもよい。

- [0513] 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。

産業上の利用可能性

- [0514] 本開示の一態様は、波動を用いて、領域内の物体に含まれる散乱体の構造を可視化する映像化装置に有用であり、物理探査又は医療診断等に適用可能である。

符号の説明

- [0515]
- 100 映像化装置
 - 101 送信器列
 - 102 受信器列
 - 103 情報処理回路
 - 104 ディスプレイ
 - 111 送信器
 - 112 受信器
 - 1001 距離計
 - 1002 PN符号生成用FPGAボード
 - 1003 デジタル制御ボード
 - 1004 UWBアンテナRFスイッチ
 - 1005 信号処理計算機
 - 1006 信号モニタ装置
 - 1007 RF検波ボード
 - 1008 マルチスタティックアレイアンテナ
 - 1009 メモリ

請求の範囲

[請求項1] 直線上に配列され、計測対象の領域へ波動を送信する複数の送信器を含む送信器列と、

前記複数の送信器が配列される直線に平行な別の直線上に配列され、前記領域から前記波動を受信する複数の受信器を含み、前記送信器列から間隔が設けられた受信器列と、

前記複数の送信器と前記複数の受信器との全部又は一部の組み合わせによって得られる計測データ、及び、前記複数の送信器が配列される直線と前記複数の受信器が配列される直線との間の距離に従って、前記波動の散乱に関する散乱場関数に対応する映像化関数を導出し、前記映像化関数を用いて、前記領域内の物体に含まれる散乱体の構造を可視化する情報処理回路とを備える

映像化装置。

[請求項2] 前記情報処理回路は、前記計測データ及び前記距離に従って前記散乱場関数を導出し、前記散乱場関数に従って前記映像化関数を導出し、

、

前記散乱場関数は、

[数1]

$$\varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z) = \iiint_D \frac{e^{ik\rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{ik\rho_2}}{\rho_2} \varepsilon(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta$$

で表現される関数であり、

ρ_1 及び ρ_2 は、

[数2]

$$\rho_1 = \sqrt{(x_1 - \xi)^2 + (y_1 - \eta)^2 + (z - \zeta)^2}$$

$$\rho_2 = \sqrt{(x_2 - \xi)^2 + (y_2 - \eta)^2 + (z - \zeta)^2}$$

で定められ、

(x_1 、 y_1 、 z) は、前記波動の送信位置を示し、(x_2 、 y_2 、 z) は、前記波動の受信位置を示し、 k は、前記波動の波数を示し、

Dは、前記領域を示し、 (ξ, η, ζ) は、前記波動の反射位置に対応し、 ε は、前記反射位置における未知の反射率に対応する

請求項1に記載の映像化装置。

[請求項3] 前記情報処理回路は、前記散乱場関数が満たす方程式を解くことにより、前記散乱場関数を導出し、

前記方程式は、

[数3]

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

で表現され、

Δ_5 は、

[数4]

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

で定められ、

cは、前記波動の伝搬速度を示し、tは、前記波動の送信から受信までの時間を示す

請求項2に記載の映像化装置。

[請求項4] 前記映像化関数は、

[数5]

$$\rho(x, y, z) = \int_0^\infty \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) dk$$

で表現され、

(x, y, z) は、映像化対象位置を示す

請求項2又は3に記載の映像化装置。

[請求項5] 前記情報処理回路は、

[数6]

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

を前記散乱場関数として導出し、

k_x 、 s_3 及び s_4 は、

[数7]

$$\begin{aligned}
k_x &= k_{x_1} + is_3 \\
s_3 &= \frac{-ik_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-ik_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
s_4 &= i\sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + is_3)^2}
\end{aligned}$$

で定められ、

k_{x_1} 、 k_{y_1} 及び k_{y_2} は、前記散乱場関数の x_1 、 y_1 及び y_2 に関する波数を示し、 d は、前記距離を示し、

[数8]

$$\tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

は、 x_1 、 y_1 及び y_2 に関してフーリエ変換された前記計測データを示す

請求項2又は3に記載の映像化装置。

[請求項6]

前記情報処理回路は、

[数9]

$$\begin{aligned}
& \rho(x, y, z) \\
&= \int \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) dk \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{s_4 z} e^{\frac{i d k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}} \\
&\quad \cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{i k_z z} e^{\frac{i d k_x \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}} \\
&\quad \cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \left(\frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk_z
\end{aligned}$$

を前記映像化関数として導出し、

k_x 、 k_z 、 k 、 dk/dk_z 及び s_4 は、

[数10]

$$\begin{aligned}
k_x &= k_{y_1} + i s_3 \\
k_z &= \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2} \\
k &= \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}} \\
\frac{dk}{dk_z} &= \frac{k_z \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{k(k_x^2 + k_z^2)} \\
s_4 &= i k_z = i \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{y_1} + i s_3)^2}
\end{aligned}$$

で定められ、 s_3 は、

[数11]

$$s_3 = \frac{-i k_{y_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-i k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

で定められ、

(x, y, z) は、映像化対象位置を示し、 k_{x1} 、 k_{y1} 及び k_{y2} は、前記散乱場関数の x_1 、 y_1 及び y_2 に関する波数を示し、 d は、前記距離を示し、

[数12]

$$\tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

は、 x_1 、 y_1 及び y_2 に関してフーリエ変換された前記計測データを
示す

請求項2又は3に記載の映像化装置。

[請求項7]

前記映像化装置は、前記送信器列として複数の送信器列、前記受信
器列として複数の受信器列、又は、前記送信器列及び前記受信器列と
して複数の送信器列及び複数の受信器列を備える

請求項1に記載の映像化装置。

[請求項8]

前記映像化装置は、前記送信器列として複数の送信器列、前記受信
器列として複数の受信器列、又は、前記送信器列及び前記受信器列と
して複数の送信器列及び複数の受信器列を備える

請求項2又は3に記載の映像化装置。

[請求項9]

前記情報処理回路は、

[数13]

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

を前記散乱場関数として導出し、

k_x 、 s_3 及び s_4 は、

[数14]

$$\begin{aligned} k_x &= k_{x_1} + is_3 \\ s_3 &= \frac{-ik_{x_1}\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-ik_x\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ s_4 &= i\sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + is_3)^2} \end{aligned}$$

で定められ、

k_{x1} 、 k_{y1} 及び k_{y2} は、前記散乱場関数の x_1 、 y_1 及び y_2 に関する波数を示し、 d は、前記距離を示し、

[数15]

$$\tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

は、 x_1 、 y_1 及び y_2 に関してフーリエ変換された前記計測データを示す

請求項8に記載の映像化装置。

[請求項10]

前記情報処理回路は、前記映像化装置が前記送信器列及び前記受信器列として備える1列の送信器列及び n 列の受信器列に対して、

[数16]

$$\begin{aligned} & \rho(x, y, z) \\ &= \int_0^\infty \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) dk \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{i s_4 z} \\ & \quad \cdot \sum_{j=1, n} \left\{ \exp \left(\frac{i d_j k_x \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \right) \tilde{\Phi}_j(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \right\} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{i k_z z} \\ & \quad \cdot \sum_{j=1, n} \left\{ \exp \left(\frac{i d_j k_x \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \right) \tilde{\Phi}_j(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \right\} \left(\frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk_z \end{aligned}$$

を前記映像化関数として導出し、

k_x 、 k_z 、 k 、 dk/dk_z 及び s_4 は、

[数17]

$$\begin{aligned} k_x &= k_{x_1} + i s_3 \\ k_z &= \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2} \\ k &= \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}} \\ \frac{dk}{dk_z} &= \frac{k_z \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{k(k_x^2 + k_z^2)} \\ s_4 &= i k_z = i \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + i s_3)^2} \end{aligned}$$

で定められ、 s_3 は、

[数18]

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

で定められ、

(x 、 y 、 z)は、映像化対象位置を示し、 k_{x_1} 、 k_{y_1} 及び k_{y_2} は、前記散乱場関数の x_1 、 y_1 及び y_2 に関する波数を示し、 d_j は、前記距離を示し、

[数19]

$$\tilde{\Phi}_j(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

は、 x_1 、 y_1 及び y_2 に関してフーリエ変換された前記計測データを示す

請求項8に記載の映像化装置。

[請求項11]

前記情報処理回路は、前記領域において前記反射率に対応する誘電率が周波数依存性を有する場合、

[数20]

$$\begin{aligned} & \rho(x, y, z) \\ &= \int_0^\infty \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) d\omega \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty d\omega \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{s_4 z} e^{\frac{ik_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}} \\ & \quad \cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{ik_z z} e^{\frac{ik_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}} \\ & \quad \cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \left(\frac{d\omega}{dk} \right) \left(\frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk_z \end{aligned}$$

を前記映像化関数として導出し、

k_x 、 k_z 、 k 、 dk/dk_z 、 $d\omega/dk$ 及び s_4 は、

[数21]

$$\begin{aligned}
k_x &= k_{x_1} + i s_3 \\
k_z &= \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2} \\
k &= \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}} \\
\frac{dk}{dk_z} &= \frac{k_z \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{k(k_x^2 + k_z^2)} \\
\frac{d\omega}{dk} &= \frac{c_0^2 k + \alpha c_0^2 \omega^2 k}{(a+b)\omega + 2a\alpha\omega^2 - \alpha c_0^2 \omega k^2} \\
s_4 &= i k_z = i \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + i s_3)^2}
\end{aligned}$$

で定められ、

 s_3 は、

[数22]

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

で定められ、

(x 、 y 、 z) は、映像化対象位置を示し、 k_{x_1} 、 k_{y_1} 及び k_{y_2} は、前記散乱場関数の x_1 、 y_1 及び y_2 に関する波数を示し、 d は、前記距離を示し、 ω は、前記波動の角周波数を示し、 c_0 は、真空中の前記波動の伝搬速度を示し、 a 、 b 及び α は、デバイ緩和に関するパラメータを示し、

[数23]

$$\tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

は、 x_1 、 y_1 及び y_2 に関してフーリエ変換された前記計測データを示す

請求項 2 又は 3 に記載の映像化装置。

[請求項 12]

前記情報処理回路は、前記計測データ及び前記距離に従って前記散

乱場関数を導出し、前記散乱場関数に従って前記映像化関数を導出し

、

前記散乱場関数は、

[数24]

$$\varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) = \iint_D \frac{e^{ik\rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{ik\rho_2}}{\rho_2} \varepsilon(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta$$

で表現される関数であり、

ρ_1 及び ρ_2 は、

[数25]

$$\rho_1 = \sqrt{(x_1 - \xi)^2 + (y_1 - \eta)^2 + (z_1 - \zeta)^2}$$

$$\rho_2 = \sqrt{(x_2 - \xi)^2 + (y_2 - \eta)^2 + (z_2 - \zeta)^2}$$

で定められ、

(x_1 、 y_1 、 z_1) は、前記波動の送信位置を示し、(x_2 、 y_2 、 z_2) は、前記波動の受信位置を示し、 k は、前記波動の波数を示し、 D は、前記領域を示し、(ξ 、 η 、 ζ) は、前記波動の反射位置に対応し、 ε は、前記反射位置における未知の反射率に対応する

請求項 1 に記載の映像化装置。

[請求項13]

前記情報処理回路は、前記散乱場関数が満たす方程式を解くことにより、前記散乱場関数を導出し、

前記方程式は、

[数26]

$$\{\Delta_6 - 2(ik)^2\} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) = 0$$

で表現され、

Δ_6 は、

[数27]

$$\Delta_6 = \partial_{x_1}^2 + \partial_{x_2}^2 + \partial_{y_1}^2 + \partial_{y_2}^2 + \partial_{z_1}^2 + \partial_{z_2}^2$$

で定められる

請求項 1 2 に記載の映像化装置。

[請求項14] 前記映像化関数は、

[数28]

$$\rho(x, y, z) = \int_0^{\infty} \varphi(x, y, x, y, z, k) dk$$

で表現され、

(x 、 y 、 z) は、映像化対象位置を示す

請求項 1 2 又は 1 3 に記載の映像化装置。

[請求項15] 前記情報処理回路は、

[数29]

$$\begin{aligned} & \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 - k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2)} \sum_{I,J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\ & \quad \cdot e^{i(k_x x_I + k_{y_1} y_I + k_{y_2} y_J)} e^{-s_3 d} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} e^{s_3 x_2} e^{s_4 z_1} e^{s_5 z_2} \frac{d(k_x + i s_3)}{dk_{x_1}} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \end{aligned}$$

を前記散乱場関数として導出し、

k_x 、 s_3 、 s_4 及び s_5 は、

[数30]

$$\begin{aligned} k_x &= k_{x_1} + i s_3 \\ s_3 &= \frac{-i k_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-i k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ s_4 &= \frac{i \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{\left(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \right)^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ s_5 &= \frac{i \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{\left(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \right)^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \end{aligned}$$

で定められ、

k_{x_1} 、 k_{y_1} 及び k_{y_2} は、前記散乱場関数の x_1 、 y_1 及び y_2 に関する波数を示し、 d は、前記距離を示し、 $\Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k)$ は、前記送信位置が (x_I, y_I, z_I) で前記受信位置

が $(x_I + d, y_J, z_J)$ である場合における前記計測データを示す
請求項 12 又は 13 に記載の映像化装置。

[請求項 16] 前記情報処理回路は、

[数 31]

$$\begin{aligned} \rho(x, y, z) &= \int_0^\infty \varphi(x, y, x, y, z, z, k) dk \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty dk \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{i(k_x x + k_y y_1 + k_{y_2} y_2)} e^{-s_3 d} e^{ik_z z} \sum_{I, J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\ &\quad \cdot e^{i(k_x x_I + k_y y_I + k_{y_2} y_{I,J})} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_y y_1 + k_{y_2} y_2)} e^{-s_3 d} e^{ik_z z} \sum_{I, J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\ &\quad \cdot e^{i(k_x x_I + k_y y_I + k_{y_2} y_{I,J})} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} \left(\frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk_z \end{aligned}$$

を前記映像化関数として導出し、

k_x 、 k_z 、 k 、 dk/dk_z 、 s_3 、 s_4 及び s_5 は、

[数32]

$$\begin{aligned}
k_x &= k_{x_1} + i s_3 \\
k_z &= \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2} \\
k &= \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}} \\
\frac{dk}{dk_z} &= \frac{k_z \left\{ 1 - \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{(k_x^2 + k_z^2)^2} \right\}}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}}} \\
s_3 &= \frac{-i k_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-i k_x \left(\sqrt{k_x^2 + k_z^2} - \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \\
s_4 &= \frac{i k_z \left(\sqrt{k_x^2 + k_z^2} + \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \\
s_5 &= \frac{i k_z \left(\sqrt{k_x^2 + k_z^2} - \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2}}
\end{aligned}$$

で定められ、

(x 、 y 、 z) は、映像化対象位置を示し、 k_{x_1} 、 k_{y_1} 及び k_{y_2} は、前記散乱場関数の x_1 、 y_1 及び y_2 に関する波数を示し、 d は、前記距離を示し、 $\Phi(x_1, y_1, y_2, z_1, z_2, k)$ は、前記送信位置が (x_1 、 y_1 、 z_1) で前記受信位置が ($x_1 + d$ 、 y_2 、 z_2) である場合における前記計測データを示す

請求項 12 又は 13 に記載の映像化装置。

[請求項 17]

前記映像化装置は、前記送信器列として複数の送信器列、前記受信器列として複数の受信器列、又は、前記送信器列及び前記受信器列として複数の送信器列及び複数の受信器列を備える

請求項 12 又は 13 に記載の映像化装置。

[請求項 18]

前記情報処理回路は、

[数33]

$$\begin{aligned}
& \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{z_1}z_1)} \sum_{I,J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\
&\quad \cdot e^{i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{z_1}z_1)} e^{-s_3 d} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} e^{s_3 x_2} e^{s_4 z_1} e^{s_5 z_2} \frac{d(k_x + i s_3)}{dk_{x_1}} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{z_1}
\end{aligned}$$

を前記散乱場関数として導出し、

k_x 、 s_3 、 s_4 及び s_5 は、

[数34]

$$\begin{aligned}
k_x &= k_{x_1} + i s_3 \\
s_3 &= \frac{-i k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-i k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
s_4 &= \frac{i \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
s_5 &= \frac{i \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}
\end{aligned}$$

で定められ、

k_{x_1} 、 k_{y_1} 及び k_{y_2} は、前記散乱場関数の x_1 、 y_1 及び y_2 に関する波数を示し、 d は、前記距離を示し、 $\Phi(x_1, y_1, y_J, z_1, z_J, k)$ は、前記送信位置が (x_1, y_1, z_1) で前記受信位置が $(x_1 + d, y_J, z_J)$ である場合における前記計測データを示す請求項17に記載の映像化装置。

[請求項19]

前記情報処理回路は、前記送信器列及び前記受信器列に関する複数の組み合わせに対する複数の散乱場関数の合成を用いて前記映像化関数を導出し、

前記複数の散乱場関数のそれぞれは、前記散乱場関数に対応し、

[数35]

$$\begin{aligned} & \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{z_1}z_1)} \sum_{I,J} \{ \Phi(x_I, y_I, z_I, x_J, y_J, z_J, k) \\ & \quad \cdot e^{i(k_{x_2}x_2 + k_{y_2}y_2 + k_{z_2}z_2)} e^{-s_3 d} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} e^{s_3 x_2} e^{s_4 z_1} e^{s_5 z_2} \frac{d(k_x + is_3)}{dk_{x_1}} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{z_1} \end{aligned}$$

で表現され、

 k_x 、 s_3 、 s_4 及び s_5 は、

[数36]

$$\begin{aligned} k_x &= k_{x_1} + is_3 \\ s_3 &= \frac{-ik_x \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-ik_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ s_4 &= \frac{i\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ s_5 &= \frac{i\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \end{aligned}$$

で定められ、

k_{x_1} 、 k_{y_1} 及び k_{y_2} は、前記散乱場関数の x_1 、 y_1 及び y_2 に関する波数を示し、 d は、前記距離を示し、 $\Phi(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, k)$ は、前記送信位置が (x_1, y_1, z_1) で前記受信位置が (x_2, y_2, z_2) である場合における前記計測データを示す請求項17に記載の映像化装置。

[請求項20]

前記情報処理回路は、前記領域において前記反射率に対応する誘電率が周波数依存性を有する場合、

[数37]

$$\begin{aligned}
& \rho(x, y, z) \\
&= \int_0^\infty \varphi(x, y, x, y, z, z, k) d\omega \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty d\omega \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_{y1} y_1 + k_{y2} y_2)} e^{-s_3 d} e^{ik_z z} \sum_{I, J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\
&\quad \cdot e^{i(k_x y_I + k_{y1} y_I + k_{y2} y_J)} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} dk_x dk_{y1} dk_{y2} \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_{y1} y_1 + k_{y2} y_2)} e^{-s_3 d} e^{ik_z z} \sum_{I, J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\
&\quad \cdot e^{i(k_x y_I + k_{y1} y_I + k_{y2} y_J)} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} \left(\frac{d\omega}{dk} \right) \left(\frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y1} dk_{y2} dk_z
\end{aligned}$$

を前記映像化関数として導出し、

k_x 、 k_z 、 k 、 dk/dk_z 、 $d\omega/dk$ 、 s_3 、 s_4 及び s_5 は、

[数38]

$$\begin{aligned}
k_x &= k_{y1} + is_3 \\
k_z &= \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y2}^2})^2 - k_x^2} \\
k &= \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y1}^2 + k_{y2}^2) + \frac{(k_{y1}^2 - k_{y2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}} \\
\frac{dk}{dk_z} &= \frac{k_z \left\{ 1 - \frac{(k_{y1}^2 - k_{y2}^2)^2}{(k_x^2 + k_z^2)^2} \right\}}{2\sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y1}^2 + k_{y2}^2) + \frac{(k_{y1}^2 - k_{y2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}}} \\
\frac{d\omega}{dk} &= \frac{c_0^2 k + \alpha c_0^2 \omega^2 k}{(a+b)\omega + 2\alpha\omega^2 - \alpha c_0^2 \omega k^2} \\
s_3 &= \frac{-ik_{y1} \sqrt{k^2 - k_{y2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y1}^2}} = \frac{-ik_x \left(\sqrt{k_x^2 + k_z^2} - \frac{k_{y2}^2 - k_{y1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \\
s_4 &= \frac{ik_z \left(\sqrt{k_x^2 + k_z^2} + \frac{k_{y2}^2 - k_{y1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \\
s_5 &= \frac{ik_z \left(\sqrt{k_x^2 + k_z^2} - \frac{k_{y2}^2 - k_{y1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2\sqrt{k_x^2 + k_z^2}}
\end{aligned}$$

で定められ、

(x 、 y 、 z) は、映像化対象位置を示し、 k_{x1} 、 k_{y1} 及び k_{y2} は、前記散乱場関数の x_1 、 y_1 及び y_2 に関する波数を示し、 d は、前記距離を示し、 ω は、前記波動の角周波数を示し、 c_0 は、真空中の前記波動の伝搬速度を示し、 a 、 b 及び α は、デバイ緩和に関するパラメータを示し、

[数39]

$$\tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

は、 x_1 、 y_1 及び y_2 に関してフーリエ変換された前記計測データを示す

請求項 12 又は 13 に記載の映像化装置。

[請求項21]

直線上に配列された複数の送信器を含む送信器列の前記複数の送信器によって、計測対象の領域へ波動を送信するステップと、

前記複数の送信器が配列される直線に平行な別の直線上に配列された複数の受信器を含み、前記送信器列から間隔が設けられた受信器列の前記複数の受信器によって、前記領域から前記波動を受信するステップと、

前記複数の送信器と前記複数の受信器との全部又は一部の組み合わせによって得られる計測データ、及び、前記複数の送信器が配列される直線と前記複数の受信器が配列される直線との間の距離に従って、前記波動の散乱に関する散乱場関数に対応する映像化関数を導出し、前記映像化関数を用いて、前記領域内の物体に含まれる散乱体の構造を可視化するステップとを含む

映像化方法。