

明 細 書

発明の名称：映像化装置及び映像化方法

技術分野

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

背景技術

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

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

先行技術文献

特許文献

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

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0005] しかしながら、散乱波の計測データを用いて、計測領域における物体を映像化することは容易ではない。具体的には、計測領域内の状態が既知である場合において、計測領域に入射された波動に対して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、遠方の物体へ波動を送信し、遠方の物体から散乱波を受信することは、困難である。したがって、広範囲の計測領域における遠方の物体を高い精度で映像化することは、容易ではない。

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

課題を解決するための手段

[0008] 本開示の一態様に係る映像化装置は、それぞれが送信領域を有する複数の送信器であって、それぞれが前記送信領域から計測領域へ波動を送信する複数の送信器と、それぞれが受信領域を有する複数の受信器であって、それぞれが前記受信領域において前記計測領域から前記波動の散乱波を受信する複数の受信器と、前記散乱波の計測データを用いて、前記計測領域における物体を映像化する情報処理回路とを備え、前記送信領域及び前記受信領域のそれぞれは、有限サイズを有し、前記情報処理回路は、前記波動の送信位置及び前記散乱波の受信位置が入力されて前記受信位置における前記散乱波の量が出力される散乱場関数であって、前記有限サイズが反映された散乱場関数を、前記計測データを用いて導出し、映像化対象位置が入力されて前記映像化対象位置の画像強度が出力される映像化関数であって、前記送信位置及び前記受信位置として前記映像化対象位置を前記散乱場関数に入力することで前記散乱場関数から出力される量に基づいて定められる映像化関数を導出し、前記映像化関数を用いて、前記計測領域における前記物体を映像化する。

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

発明の効果

[0010] 本開示によれば、広範囲の計測領域における遠方の物体を高い精度で映像

化することが可能である。

図面の簡単な説明

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

[図2]図2は、送信点及び受信点の関係を示す概念図である。

[図3]図3は、送信点及び受信点の座標を示す概念図である。

[図4]図4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5]図5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6]図6は、準2次元アレイアンテナに関する各座標の例を示す概念図である。

[図7]図7は、曲面上の準2次元アレイアンテナを示す概念図である。

[図8]図8は、平面上に配置された複数の指向性アンテナで構成される準2次元アレイアンテナを示す概念図である。

[図9]図9は、有限サイズを有する送信アンテナ及び受信アンテナを示す概念図である。

[図10]図10は、斜面上に配置された複数の指向性アンテナで構成される準2次元アレイアンテナを示す概念図である。

[図11]図11は、アンテナの回転を示す概念図である。

[図12]図12は、 x 軸周りの回転の行列表示を示す概念図である。

[図13]図13は、 y 軸周りの回転の行列表示を示す概念図である。

[図14]図14は、回転走査を示す概念図である。

[図15]図15は、映像化装置の基本構成を示すブロック図である。

[図16]図16は、映像化装置の基本動作を示すフローチャートである。

発明を実施するための形態

[0012] 本開示の一態様に係る映像化装置は、それぞれが送信領域を有する複数の送信器であって、それぞれが前記送信領域から計測領域へ波動を送信する複数の送信器と、それぞれが受信領域を有する複数の受信器であって、それぞれが前記受信領域において前記計測領域から前記波動の散乱波を受信する複

数の受信器と、前記散乱波の計測データを用いて、前記計測領域における物体を映像化する情報処理回路とを備え、前記送信領域及び前記受信領域のそれぞれは、有限サイズを有し、前記情報処理回路は、前記波動の送信位置及び前記散乱波の受信位置が入力されて前記受信位置における前記散乱波の量が出力される散乱場関数であって、前記有限サイズが反映された散乱場関数を、前記計測データを用いて導出し、映像化対象位置が入力されて前記映像化対象位置の画像強度が出力される映像化関数であって、前記送信位置及び前記受信位置として前記映像化対象位置を前記散乱場関数に入力することで前記散乱場関数から出力される量に基づいて定められる映像化関数を導出し、前記映像化関数を用いて、前記計測領域における前記物体を映像化する。

[0013] これにより、映像化装置は、計測データを用いて計測領域の散乱の状態を導出することができる。したがって、映像化装置は、計測領域における物体を高い精度で映像化することができる。また、映像化装置は、有限サイズを有する送信領域及び受信領域の指向性に従って、遠方の物体へ波動を送信することができる、遠方の物体から散乱波を受信することができる。よって、映像化装置は、広範囲の計測領域における遠方の物体を高い精度で映像化することができる。

[0014] 例えば、前記有限サイズは、前記複数の送信器及び前記複数の受信器において同じである。

[0015] これにより、映像化装置は、複数の送信器及び複数の受信器において同じ演算処理を適用することができる。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。

[0016] また、例えば、前記送信領域及び前記受信領域のそれぞれは、矩形の領域である。

[0017] これにより、映像化装置は、単純な形状に対応する演算処理を行うことができる。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。

[0018] また、例えば、前記複数の送信器は、直線上に配列され、前記複数の受信

器は、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距離が前記散乱場関数に反映される。

[0019] これにより、映像化装置は、準2次元に配列された複数の送信器と複数の受信器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、複数の送信器と複数の受信器との間に間隔が設けられているため、映像化装置は、計測領域へ波動を効率的に送信することができ、計測領域から散乱波を効率的に受信することができる。

[0020] そして、映像化装置は、散乱波の計測データ、及び、複数の送信器と複数の受信器との間の距離に従って導出される散乱場関数を用いて、物体を高い精度で映像化することができる。

[0021] また、例えば、前記散乱場関数は、

[数1]

$$\begin{aligned} \Phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) \\ = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{z_2}z)} e^{-ik_{x_2}x_2} e^{ik_z z} \\ \cdot \left\{ \frac{2 \sin(k_{x_1} a)}{k_{x_1}} \frac{2 \sin(k_{y_1} b)}{k_{y_1}} \frac{2 \sin(k_{x_2} a)}{k_{x_2}} \frac{2 \sin(k_{y_2} b)}{k_{y_2}} \right\} \\ \cdot e^{ik_z d} \tilde{\Phi}(k_{x_1}, k_{y_2}, k) dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \end{aligned}$$

で表現され、 x_1 及び y_1 は、前記送信位置の x 座標及び y 座標を示し、 x_2 及び y_2 は、前記受信位置の x 座標及び y 座標を示し、 z は、前記送信位置及び前記受信位置の z 座標を示し、 k は、前記波動の波数を示し、 k_{x_1} 、 k_{y_1} 及び k_{y_2} は、積分変数を示し、 d は、前記距離を示し、

[数2]

$$\tilde{\Phi}(k_{x_1}, k_{y_2}, k)$$

は、 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し、 k_{x_1} 、 k_{x_2} 及び k_z は、

[数3]

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

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

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

で定められ、 a は、 x 軸方向における前記有限サイズの $1/2$ を示し、 b は、 y 軸方向における前記有限サイズの $1/2$ を示す。

[0022] 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 座標を有する場合の散乱場関数を用いて、物体を高い精度で映像化することができる。

[0023] また、例えば、前記映像化関数は、

[数4]

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

$$= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{ik_z z}$$

$$\cdot \left\{ \frac{2 \sin(k_{x_1} a)}{k_{x_1}} \frac{2 \sin(k_{y_1} b)}{k_{y_1}} \frac{2 \sin(k_{x_2} a)}{k_{x_2}} \frac{2 \sin(k_{y_2} b)}{k_{y_2}} \right\}$$

$$\cdot e^{ik_{x_2} d} \tilde{\Phi}(k_{y_1}, k_{y_2}, k) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk$$

で表現され、前記映像化関数に入力される x 、 y 及び z は、前記映像化対象位置の x 座標、 y 座標及び z 座標を示す。

[0024] 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 座標を有する場合の映像化関数を用いて、物体を高い精度で映像化することができる。

[0025] また、例えば、前記散乱場関数は、

[数5]

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

$$= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_{x_1} x_1 + k_{y_1} y_1 - k_{y_2} y_2)} e^{-ik_{x_2} x_2} e^{ik_{y_1} z_1} e^{ik_{y_2} z_2}$$

$$\cdot \left\{ \frac{2 \sin(k_{x_1} a)}{k_{x_1}} \frac{2 \sin(k_{y_1} b)}{k_{y_1}} \frac{2 \sin(k_{x_2} a)}{k_{x_2}} \frac{2 \sin(k_{y_2} b)}{k_{y_2}} \right\}$$

$$\cdot e^{ik_{x_2} d} e^{-ik_{x_1} h_1} e^{-ik_{y_2} h_2} \tilde{\Phi}(k_{y_1}, k_{y_2}, k) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2}$$

で表現され、 x_1 、 y_1 及び z_1 は、前記送信位置の x 座標、 y 座標及び z 座標を示し、 x_2 、 y_2 及び z_2 は、前記受信位置の x 座標、 y 座標及び z 座標を示し、 k は、前記波数の波数を示し、 k_x 、 k_{y1} 及び k_{y2} は、積分変数を示し、 d は、 x 軸方向における前記距離を示し、 h_1 は、前記計測データに対応する前記送信位置の z 座標を示し、 h_2 は、前記計測データに対応する前記受信位置の z 座標を示し、

[数6]

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

は、 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し、 k_{x1} 、 k_{x2} 、 k_{z1} 及び k_{z2} は、

[数7]

$$\begin{aligned} k_{x_1} &= \frac{k_x \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ k_{x_2} &= \frac{k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ k_{z_1} &= \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{\left(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}\right)^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ k_{z_2} &= \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{\left(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}\right)^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \end{aligned}$$

で定められ、 a は、 x 軸方向における前記有限サイズの $1/2$ を示し、 b は、 y 軸方向における前記有限サイズの $1/2$ を示す。

[0026] 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 座標を有し得る場合の散乱場関数を用いて、物体を高い精度で映像化することができる。

[0027] また、例えば、前記映像化関数は、

[数8]

$$\begin{aligned} \rho(x, y, z) &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{ik_{z_1} z} e^{ik_{z_2} z} \\ &\quad \cdot \left\{ \frac{2 \sin(k_{x_1} a)}{k_{x_1}} \frac{2 \sin(k_{y_1} b)}{k_{y_1}} \frac{2 \sin(k_{x_2} a)}{k_{x_2}} \frac{2 \sin(k_{y_2} b)}{k_{y_2}} \right\} \\ &\quad \cdot e^{ik_{x_2} d} e^{-ik_{z_1} h_1} e^{-ik_{z_2} h_2} \tilde{\Phi}(k_{y_1}, k_{y_2}, k) dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{x_2} dk_{y_2} \end{aligned}$$

で表現され、前記映像化関数に入力される x 、 y 及び z は、前記映像化対象位置の x 座標、 y 座標及び z 座標を示す。

[0028] 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 座標を有し得る場合の映像化関数を用いて、物体を高い精度で映像化することができる。

[0029] また、例えば、前記複数の送信器のそれぞれは、前記送信領域を機械的又は電氣的に回転させることにより、前記送信領域の面の法線方向を変化させ、前記複数の受信器のそれぞれは、前記受信領域を機械的又は電氣的に回転させることにより、前記受信領域の面の法線方向を変化させ、前記情報処理回路は、前記送信領域及び前記受信領域の回転後の前記計測データを用いて、前記計測領域における前記物体を映像化する。

[0030] これにより、映像化装置は、送信領域及び受信領域のそれぞれの面の法線方向を変化させることができる。したがって、映像化装置は、送信領域及び受信領域のそれぞれの指向性の方向を変化させることができる。よって、映像化装置は、指向性の方向を変化させ、その方向において遠方の物体を映像化することができる。

[0031] また、例えば、前記散乱場関数は、

[数9]

$$\begin{aligned}
& \Phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{z_1}z_1)} e^{-ik_{x_2}x_2} e^{ik_{y_1}y_1} e^{ik_{z_2}z_2} \\
&\quad \cdot \{f_1(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{z_1}) f_2(k_{x_2}, k_{y_2}, k_{z_2})\} \\
&\quad \cdot e^{ik_{x_2}d} e^{-ik_{z_1}h_1} e^{-ik_{z_2}h_2} \tilde{\Phi}(k_{y_1}, k_{y_2}, k) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2}
\end{aligned}$$

で表現され、 x_1 、 y_1 及び z_1 は、前記送信位置の x 座標、 y 座標及び z 座標を示し、 x_2 、 y_2 及び z_2 は、前記受信位置の x 座標、 y 座標及び z 座標を示し、 k は、前記波動の波数を示し、 k_x 、 k_{y_1} 及び k_{y_2} は、積分変数を示し、 d は、 x 軸方向における前記距離を示し、 h_1 は、前記計測データに対応する前記送信位置の z 座標を示し、 h_2 は、前記計測データに対応する前記受信位置の z 座標を示し、

[数10]

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

は、 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し、 k_{x_1} 、 k_{x_2} 、 k_{z_1} 及び k_{z_2} は、

[数11]

$$\begin{aligned}
k_{x_1} &= \frac{k_x \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
k_{x_2} &= \frac{k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
k_{z_1} &= \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
k_{z_2} &= \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}
\end{aligned}$$

で定められ、 f_1 及び f_2 は、

[数12]

$$\begin{aligned}
 & f_1(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{z_1}) \\
 &= \frac{2\sin(a(-k_{x_1}\cos\beta - k_{z_1}\cos\alpha\sin\beta))}{-k_{x_1}\cos\beta - k_{z_1}\cos\alpha\sin\beta} \frac{2\sin(b(-k_{y_1}\cos\alpha + k_{z_1}\sin\alpha))}{-k_{y_1}\cos\alpha + k_{z_1}\sin\alpha} \\
 & f_2(k_{x_2}, k_{y_2}, k_{z_2}) \\
 &= \frac{2\sin(a(-k_{x_2}\cos\beta - k_{z_2}\cos\alpha\sin\beta))}{-k_{x_2}\cos\beta - k_{z_2}\cos\alpha\sin\beta} \frac{2\sin(b(-k_{y_2}\cos\alpha + k_{z_2}\sin\alpha))}{-k_{y_2}\cos\alpha + k_{z_2}\sin\alpha}
 \end{aligned}$$

で定められ、 a は、 x 軸方向における前記有限サイズの $1/2$ を示し、 b は、 y 軸方向における前記有限サイズの $1/2$ を示し、 α は、前記送信領域及び前記受信領域の x 軸周りの機械的又は電氣的な回転角を示し、 β は、前記送信領域及び前記受信領域の y 軸周りの機械的又は電氣的な回転角を示す。

[0032] これにより、映像化装置は、指向性の方向を変化させることができる場合の散乱場関数を用いて、物体を高い精度で映像化することができる。

[0033] また、例えば、前記映像化関数は、

[数13]

$$\begin{aligned}
 & \rho(x, y, z) \\
 &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_y y + k_z z)} e^{ik_{x_1} z} e^{ik_{z_2} z} \\
 & \quad \cdot \{f_1(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{z_1}) f_2(k_{x_2}, k_{y_2}, k_{z_2})\} \\
 & \quad \cdot e^{ik_{x_2} d} e^{-ik_{z_1} h_1} e^{-ik_{z_2} h_2} \tilde{\Phi}(k_{y_1}, k_{y_2}, k) dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} dk
 \end{aligned}$$

で表現され、前記映像化関数に入力される x 、 y 及び z は、前記映像化対象位置の x 座標、 y 座標及び z 座標を示す。

[0034] これにより、映像化装置は、指向性の方向を変化させることができる場合の映像化関数を用いて、物体を高い精度で映像化することができる。

[0035] また、例えば、前記複数の送信器のそれぞれは、前記送信領域を複数の回転角で機械的又は電氣的に回転させることにより、前記送信領域の面の法線方向を複数の方向に変化させ、前記複数の受信器のそれぞれは、前記受信領域を前記複数の回転角で機械的又は電氣的に回転させることにより、前記受信領域の面の法線方向を前記複数の方向に変化させ、前記情報処理回路は、

機械的又は電氣的な前記複数の回転角に対する前記計測データを用いて、前記計測領域における前記物体を映像化する。

[0036] これにより、映像化装置は、送信領域及び受信領域のそれぞれの面の法線方向を複数の方向に変化させることができる。したがって、映像化装置は、送信領域及び受信領域のそれぞれの指向性の方向を複数の方向に変化させることができる。よって、映像化装置は、指向性の方向を複数の方向に変化させ、複数の方向において遠方の物体を映像化することができる。

[0037] また、例えば、前記散乱場関数は、

[数14]

$$\begin{aligned} & \Phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{z_1}z_1)} e^{-ik_{x_2}x_2} e^{ik_{z_1}z_1} e^{ik_{z_2}z_2} \\ & \quad \cdot \left\{ \sum_{\alpha} \sum_{\beta} f_1(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{z_1}, \alpha, \beta) \cdot f_2(k_{x_2}, k_{y_2}, k_{z_2}, \alpha, \beta) \cdot \tilde{\Phi}(k_{y_1}, k_{y_2}, k, \alpha, \beta) \right\} \\ & \quad \cdot e^{ik_{x_2}d} e^{-ik_{z_1}h_1} e^{-ik_{z_2}h_2} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \end{aligned}$$

で表現され、 x_1 、 y_1 及び z_1 は、前記送信位置の x 座標、 y 座標及び z 座標を示し、 x_2 、 y_2 及び z_2 は、前記受信位置の x 座標、 y 座標及び z 座標を示し、 k は、前記波動の波数を示し、 k_x 、 k_{y_1} 及び k_{y_2} は、積分変数を示し、 d は、 x 軸方向における前記距離を示し、 h_1 は、前記計測データに対応する前記送信位置の z 座標を示し、 h_2 は、前記計測データに対応する前記受信位置の z 座標を示し、

[数15]

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

は、 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し、 k_{x_1} 、 k_{x_2} 、 k_{z_1} 及び k_{z_2} は、

[数16]

$$\begin{aligned}
k_{x_1} &= \frac{k_x \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
k_{x_2} &= \frac{k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
k_{z_1} &= \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{\left(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}\right)^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
k_{z_2} &= \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{\left(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}\right)^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}
\end{aligned}$$

で定められ、 f_1 及び f_2 は、

[数17]

$$\begin{aligned}
&f_1(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{z_1}, \alpha, \beta) \\
&= \frac{2 \sin(a(-k_{x_1} \cos \beta - k_{z_1} \cos \alpha \sin \beta))}{-k_{x_1} \cos \beta - k_{z_1} \cos \alpha \sin \beta} \frac{2 \sin(b(-k_{y_1} \cos \alpha + k_{z_1} \sin \alpha))}{-k_{y_1} \cos \alpha + k_{z_1} \sin \alpha} \\
&f_2(k_{x_2}, k_{y_2}, k_{z_2}, \alpha, \beta) \\
&= \frac{2 \sin(a(-k_{x_2} \cos \beta - k_{z_2} \cos \alpha \sin \beta))}{-k_{x_2} \cos \beta - k_{z_2} \cos \alpha \sin \beta} \frac{2 \sin(b(-k_{y_2} \cos \alpha + k_{z_2} \sin \alpha))}{-k_{y_2} \cos \alpha + k_{z_2} \sin \alpha}
\end{aligned}$$

で定められ、 a は、 x 軸方向における前記有限サイズの $1/2$ を示し、 b は、 y 軸方向における前記有限サイズの $1/2$ を示し、 α は、前記送信領域及び前記受信領域の x 軸周りの機械的又は電氣的な回転角を示し、 β は、前記送信領域及び前記受信領域の y 軸周りの機械的又は電氣的な回転角を示す。

[0038] これにより、映像化装置は、指向性の方向を複数の方向に変化させることができる場合の散乱場関数を用いて、物体を高い精度で映像化することができる。

[0039] また、例えば、前記映像化関数は、

[数18]

$$\begin{aligned}
\rho(x, y, z) &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_{y1} y + k_{y2} y)} e^{ik_{z1} z} e^{ik_{z2} z} \\
&\quad \cdot \left\{ \sum_\alpha \sum_\beta f_1(k_{x1}, k_{y1}, k_{z1}, \alpha, \beta) \cdot f_2(k_{x2}, k_{y2}, k_{z2}, \alpha, \beta) \cdot \tilde{\Phi}(k_{y1}, k_{y2}, k, \alpha, \beta) \right\} \\
&\quad \cdot e^{ik_{x2} d} e^{-ik_{z1} h_1} e^{-ik_{z2} h_2} dk_x dk_{y1} dk_{y2} dk
\end{aligned}$$

で表現され、前記映像化関数に入力される x 、 y 及び z は、前記映像化対象位置の x 座標、 y 座標及び z 座標を示す。

[0040] これにより、映像化装置は、指向性の方向を複数の方向に変化させることができる場合の映像化関数を用いて、物体を高い精度で映像化することができる。

[0041] また、本開示の一態様に係る映像化方法は、それぞれが送信領域を有する複数の送信器のそれぞれによって、前記送信領域から計測領域へ波動を送信するステップと、それぞれが受信領域を有する複数の受信器のそれぞれによって、前記受信領域において前記計測領域から前記波動の散乱波を受信するステップと、前記散乱波の計測データを用いて、前記計測領域における物体を映像化するステップとを含み、前記送信領域及び前記受信領域のそれぞれは、有限サイズを有し、前記計測領域における前記物体を映像化するステップでは、前記波動の送信位置及び前記散乱波の受信位置が入力されて前記受信位置における前記散乱波の量が出力される散乱場関数であって、前記有限サイズが反映された散乱場関数を、前記計測データを用いて導出し、映像化対象位置が入力されて前記映像化対象位置の画像強度が出力される映像化関数であって、前記送信位置及び前記受信位置として前記映像化対象位置を前記散乱場関数に入力することで前記散乱場関数から出力される量に基づいて定められる映像化関数を導出し、前記映像化関数を用いて、前記計測領域における前記物体を映像化する。

[0042] これにより、計測データを用いて計測領域の散乱の状態を導出することが可能になる。したがって、計測領域における物体を高い精度で映像化するこ

とが可能になる。また、有限サイズを有する送信領域及び受信領域の指向性に従って、遠方の物体へ波動を送信し、遠方の物体から散乱波を受信することが可能になる。よって、広範囲の計測領域における遠方の物体を高い精度で映像化することが可能になる。

[0043] 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。

[0044] 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。

[0045] (実施の形態)

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

[0046] <1 概要>

本開示では、指向性アンテナを用いる散乱場理論が示される。例えば、無指向性アンテナを用いる散乱場理論は、誘電体の内部の映像化に用いられる。例えば、誘電体の内部の映像化において、誘電体の表面が走査され、誘電体の内部の3次元画像が再構成される。指向性アンテナを用いる散乱場理論は、空中の物体の映像化に用いられる。

[0047] 例えば、空中の領域は広大であるため、アンテナの移動を伴う走査は行われない。その代わりに指向性の高いアンテナを用いて物体が映像化される。

物体の映像化に指向性アンテナが用いられる例として、レーザレーダ及びミリ波レーダがある。これらの装置の実現は容易である。一方、これらの装置では、波長が短いため、波動の性質よりもビームの性質が強く、電磁波の周波数の観点から、空気中の水分の影響で信号の減衰が大きい。そのため、これらの装置は、近距離以外において用いられない。

[0048] 本開示では、ビームの性質（つまり指向性）と波動の性質との両方を有するマイクロ波を用いる映像化技術を示す。特に、第3章で指向性アンテナを用いる散乱場理論が示される。また、送信アンテナ及び受信アンテナが固定されている場合において、計測データから計測領域における物体を示す映像を生成するための具体的な数式が示される。

[0049] <2 無指向性アンテナの場合>

まず、本章において、無指向性アンテナを用いる散乱場理論を説明する。

[0050] <2-1 1次元配列及び平面境界の場合>

1つの列に送受のアンテナ素子を配置する方法では、空間分解能に限界がある。

[0051] 図1は、1次元マルチスタティックアレイアンテナを示す概念図である。図1のように、 n 個の素子の中から任意の2つが送信素子及び受信素子として選択されると、上記の2倍の分解能を得ることができる。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。

[0052] 図1のように、点 $P_1(x, y_1, z)$ から放射された電波が点 $P(\xi, \eta, \zeta)$ で反射し、点 $P_2(x, y_2, z)$ で受信される状況がここでは検討される。点 P が領域 D 全体を動くとき、 P_2 で受信される信号は、次式(2-1-1)のように表される。

[0053]

[数19]

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

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

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

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

[0054] ここで、 $\varepsilon(\xi, \eta, \zeta)$ 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、 $\varepsilon(\xi, \eta, \zeta)$ は、未知である。また、時間の因子が $e \times p(-i\omega t)$ に比例すると仮定されている。上式の被積分項にあるカーネル関数は、次式 (2-1-2) の ϕ で表現される。

[0055] [数20]

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

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

[0056] 次に、この式 (2-1-2) が漸近的な解となる偏微分方程式が検討される。そのため、微分結果に生ずる $1/\rho$ に関して高次の項を無視して計算が行われる。ここでは、微分の略記法が式 (2-1-3) のように定義される。

[0057] [数21]

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

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

[0058] また、ここでは、式 (2-1-2) が短波長（高周波、或は k が大きい）で漸近的な解となるような偏微分方程式が検討される。このような偏微分方程式の解は、マイクロ波を用いる映像化ではほとんど厳密解であるとみなされ得る。まず、 ϕ の各次数の微分結果が、以下の式 (2-1-4) のように表現される。

[0059]

[数22]

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

[0060] 以下では、複雑な $\circ$ （*）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（2-1-5）が得られる。

[0061] [数23]

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

[0062] したがって、式（2-1-5）から次式（2-1-6）が得られる。

[0063] [数24]

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

[0064] 式（2-1-6）の演算を2回作用させることにより、次式（2-1-7）が得られる。

[0065]

[数25]

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

[0066] 式(2-1-7)を整理して次式(2-1-8)が得られる。

[0067] [数26]

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

[0068] この式(2-1-8)は定常状態を仮定して導かれたが、この式(2-1-8)を非定常状態へ拡張することは容易である。そのため、時間tに関する偏微分を示す ∂_t 、及び、電波の伝搬速度を示すcを用いて、次式(2-1-9)のような変数の置換えが行われる。

[0069] [数27]

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

[0070] 上記のプロセスによって、最終的に次式(2-1-10)のような方程式が得られる。

[0071] [数28]

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

[0072] 上記の式(2-1-10)は、式(2-1-2)の ϕ が解となる偏微分方程式である。式(2-1-1)の積分核へ微分を適用することにより、式(2-1-1)の

[数29]

$$\varphi$$

もまた上記偏微分方程式を満たす。この方程式は5個の変数(t、x、 y_1 、

y_2 、 z) で構成される 4 次元の擬似波動方程式である。

[0073] 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30]

$$\varphi$$

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

[0074] [数31]

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

・・・ (2-1-11)

[0075] z に関する微分が D_z と表現される場合、式 (2-1-10) 及び式 (2-1-11) から以下の式 (2-1-12) が得られる。

[0076] [数32]

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

・・・ (2-1-12)

[0077] ここでは、 $\omega = c k$ の関係が用いられている。この方程式の 4 つの基本解は次式 (2-1-13) のように表現される。

[0078] [数33]

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

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

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

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

・・・ (2-1-13)

[0079] 時間の因子が $e^{-i\omega t}$ であること、放射電波のパスで位相が加算されること、及び、物体で反射した電波が計測面 (測定面) へ向かって跳ね返ってくることを考慮すると、 E_1 が唯一の意味のある解である。したがって、次式 (2-1-14) が得られる。

[0080]

[数34]

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

$$\cdots (2-1-14)$$

[0081] この式 (2-1-14) に $z=0$ を代入することにより、 $a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$ が次式 (2-1-15) のように求まる。

[0082] [数35]

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

$$\cdots (2-1-15)$$

[0083] 最終的に

[数36]

$$\varphi$$

が次式 (2-1-16) のように求まる。

[0084] [数37]

$$\varphi(x, y_1, y_2, z, k)$$

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

$$\cdot e^{i\{\sqrt{(k^2 - k_{y_1}^2)} \sqrt{(k^2 - k_{y_2}^2)}^2 - k_x^2\}z} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2}$$

$$\cdots (2-1-16)$$

[0085] k 及び z が固定である条件下で式 (2-1-16) に極限操作 ($y_2 \rightarrow y_1 = y$) を適用し、その結果を k に関して積分することにより、映像化関数が次式 (2-1-17) のように求まる。

[0086] [数38]

$$\phi(x, y, y, z, k) = \lim_{y_2 \rightarrow y_1 = y} [\phi(x, y, y_2, z, k)]$$

$$= \lim_{y_2 \rightarrow y_1 = y} \left[\frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x - k_{y_1} y + k_{y_2} y_2)} a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \right.$$

$$\cdot e^{i\{\sqrt{(k^2 - k_{y_1}^2)} \sqrt{(k^2 - k_{y_2}^2)}^2 - k_x^2\}z} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \left. \right]$$

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

$$\cdots (2-1-17)$$

[0087] 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。

[0088] <2-2 1次元配列及び曲面境界の場合>

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。

[0089] 図2は、送信点及び受信点の関係を示す概念図である。図2は、点 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。

[0090] 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。

[0091] 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。

[0092] [数39]

$$G(r_1, r_2, \omega) = \iiint_D \varphi(r_1 \rightarrow \xi \rightarrow r_2, \omega) d\xi \dots (2-2-1)$$

[0093] ここで、

[数40]

$$\varphi(r_1 \rightarrow \xi \rightarrow r_2, \omega)$$

は、点 r_1 から出て点 ξ で反射して点 r_2 へ戻る波動の信号強度を示す。

[0094] また、波動の送信点 r_1 と受信点 r_2 とに課せられた拘束条件は、 r_1 と r_2 との x 座標が常に等しいということである。

[0095] 以下に、この関数 $G(r_1, r_2, \omega)$ 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 $G(r_1, r_2, \omega)$ 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。

[0096] [数41]

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

... (2-2-2)

[0097] ここで、

[数42]

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

は、関数 $G(r_1, r_2, \omega)$ を ω に関してフーリエ変換することで得られる関数である。境界 ∂D での $G(r_1, r_2, \omega)$ 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 $\rho(r)$ が次式 (2-2-3) のように定義される。

[0098] [数43]

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

... (2-2-3)

[0099] 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 $L(\partial/\partial t, \partial/\partial \mathbf{r}_1, \partial/\partial \mathbf{r}_2)$ を求めることが難しい。

[0100] 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。

[0101] [数44]

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

... (2-2-4)

[0102] 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。

[0103] 図3は、送信点及び受信点の座標を示す概念図である。図3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。

[0104] 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。

[0105] 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。

[0106] [数45]

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

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

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

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

[0107] 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46]

$$\varphi$$

である。つまり、次式(2-2-6)が成立する。

[0108]

[数47]

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

[0109] 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。

[0110] [数48]

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

[0111] 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。

[0112] [数49]

$$\left[\frac{1}{4} \Delta_5^2 - (ik)^2 \partial_x^2 - (\partial_{y_1}^2 + \partial_{z_1}^2)(\partial_{y_2}^2 + \partial_{z_2}^2) \right] \phi = 0 \quad \dots (2-2-8)$$

[0113] 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。

[0114] [数50]

$$-ik \rightarrow \frac{1}{c} \partial_t \quad \dots (2-2-9)$$

[0115] 最終的に次式（2-2-10）が得られる。

[0116] [数51]

$$\left[\frac{1}{4} \Delta_5^2 - \frac{1}{c^2} \partial_t^2 \partial_x^2 - (\partial_{y_1}^2 + \partial_{z_1}^2)(\partial_{y_2}^2 + \partial_{z_2}^2) \right] \phi = 0 \quad \dots (2-2-10)$$

[0117] 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。

[0118] [数52]

$$\begin{aligned} & \tilde{\phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, z_1, z_2, \omega) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} dt \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_{y_1} y_1} dy_1 \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_{y_2} y_2} dy_2 \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_x x} \phi(x, y_1, y_2, z_1, z_2, t) dx \\ & \dots (2-2-11) \end{aligned}$$

[0119] 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。

[0120] [数53]

$$\begin{aligned} & \{(D_{z_1}^2 + D_{z_2}^2 - k_x^2 - k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2 - 4k^2 k_x^2 - 4(D_{z_1}^2 - k_{y_1}^2)(D_{z_2}^2 - k_{y_2}^2)\} \tilde{\phi} = 0 \\ & \dots (2-2-12) \end{aligned}$$

[0121] 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。

[0122] 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。

[0123] [数54]

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

[0124] $z_1 = z_2 = z$ の場合、次式（2-2-14）が得られる。

[0125] [数55]

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

[0126] また、式（2-2-13）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。

[0127] [数56]

$$(s_1^2 + s_2^2 + k_x^2 + k_{y1}^2 + k_{y2}^2)^2 - 4k^2 k_x^2 - 4(s_1^2 + k_{y1}^2)(s_2^2 + k_{y2}^2) = 0$$

・・・(2-2-15)

[0128] 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。

[0129] [数57]

$$s_1 + s_2 = \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y2}^2})^2 - k_x^2}$$

・・・(2-2-16)

[0130] 式（2-2-15）及び式（2-2-16）から、 $s_1(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k)$ 及び $s_2(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k)$ が次式（2-2-17）のように決定される。

[0131] [数58]

$$s_1(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k) = \frac{\sqrt{k^2 - k_{y1}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y2}^2}}$$

$$s_2(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k) = \frac{\sqrt{k^2 - k_{y2}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y2}^2}}$$

・・・(2-2-17)

[0132] 上記の $s_1(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k)$ 及び $s_2(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k)$ 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。

[0133] [数59]

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

$$= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y1} y_1 + k_{y2} y_2)} a(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k)$$

$$\cdot e^{i s_1(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k) z_1} e^{i s_2(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k) z_2} dk_x dk_{y1} dk_{y2}$$

・・・(2-2-18)

[0134] <2-3 2次元配列及び平面境界>

本節では、2次元配列及び平面境界の場合の理論を説明する。

[0135] 図4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4に示すように点 P_1 から放射されたマイクロ波が標的上の点 P で反射し、点 P_2 で受信される。点 P_1 と点 P_2 は平面内の格子点上（2次元アレイアンテナ）の任意の点へ動く。このような仮定のもとでは標的上の点 P を通るマイクロ波のパスは n^4 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。

[0136] 例えば、図4のように、点 $P_1(x_1, y_1, z)$ から放射された電波が点 $P(\xi, \eta, \zeta)$ で反射し、点 $P_2(x_2, y_2, z)$ で受信される。点 P が領域 D 全体を動くとき P_2 で受信される信号は次式のように表される。

[0137] [数60]

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

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

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

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

[0138] ここで、時間の因子は、 $\exp(-i\omega t)$ 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(2-3-2)で表現される。

[0139] [数61]

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

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

[0140] 次に、この式(2-3-2)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(2-3-3)のように定義される。

[0141]

[数62]

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

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

[0142] 式(2-3-3)を用いて、カーネル関数の各次数の微分は、以下の式(2-3-4)のように表現される。

[0143] [数63]

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

[0144] 以下では、複雑な $o(*)$ 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(2-3-5)が得られる。

[0145] [数64]

$$\begin{aligned} \Delta_s \varphi &= (\partial_{x_1}^2 + \partial_{y_1}^2 + \partial_{x_2}^2 + \partial_{y_2}^2 + \partial_z^2) \varphi \\ &= (ik)^2 \left\{ 2 + 2 \frac{(z - \zeta)^2}{\rho_1 \rho_2} \right\} \varphi \\ &\dots (2-3-5) \end{aligned}$$

[0146] したがって、式(2-3-5)から次式(2-3-6)が得られる。

[0147]

[数65]

$$\begin{aligned}
\{\Delta_5 - 2(ik)^2\}\varphi &= 2(ik)^2 \frac{(z - \xi)^2}{\rho_1 \rho_2} \varphi \\
&= 2(ik)^2 \frac{\rho_1^2 - (x_1 - \xi)^2 - (y_1 - \eta)^2}{\rho_1 \rho_2} \varphi \\
&= 2(ik)^2 \frac{\rho_2^2 - (x_2 - \xi)^2 - (y_2 - \eta)^2}{\rho_1 \rho_2} \varphi \\
&\dots (2-3-6)
\end{aligned}$$

[0148] 式(2-3-6)の演算を2回作用させることにより、次式(2-3-7)が得られる。

[0149] [数66]

$$\begin{aligned}
&\{\Delta_5 - 2(ik)^2\}^2 \varphi \\
&= 4(ik)^4 \frac{\{\rho_1^2 - (x_1 - \xi)^2 - (y_1 - \eta)^2\} \{\rho_2^2 - (x_2 - \xi)^2 - (y_2 - \eta)^2\}}{\rho_1^2 \rho_2^2} \varphi \\
&= 4(ik)^4 \{1 - (ik)^{-2} \partial_{x_1}^2 - (ik)^{-2} \partial_{y_1}^2\} \{1 - (ik)^{-2} \partial_{x_2}^2 - (ik)^{-2} \partial_{y_2}^2\} \varphi \\
&\dots (2-3-7)
\end{aligned}$$

[0150] 式(2-3-7)を整理して次式(2-3-8)が得られる。

[0151] [数67]

$$\begin{aligned}
&\left[\frac{1}{4} \{\Delta_5 - 2(ik)^2\}^2 - (\partial_{x_1}^2 + \partial_{y_1}^2)(\partial_{x_2}^2 + \partial_{y_2}^2) \right. \\
&\quad \left. + (ik)^2 (\partial_{x_1}^2 + \partial_{y_1}^2 + \partial_{x_2}^2 + \partial_{y_2}^2) - (ik)^4 \right] \varphi = 0 \\
&\dots (2-3-8)
\end{aligned}$$

[0152] この式(2-3-8)は定常状態を仮定して導かれたが、この式(2-3-8)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(2-3-9)のような変数の置換えが行われる。

[0153] [数68]

$$\begin{aligned}
&-ik \rightarrow \frac{1}{c} \partial_t \\
&\dots (2-3-9)
\end{aligned}$$

[0154] この置換えにより、式(2-3-8)は時間を含んだ以下のような式(2-3-10)に変換される。

[0155]

[数69]

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

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

$$\cdots (2-3-10)$$

[0156] 上記の式(2-3-10)は、式(2-3-2)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(2-3-1)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。

[0157] 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(2-3-11)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。

[0158] [数70]

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

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

$$\cdots (2-3-11)$$

[0159] z に関する微分が D_z と表現される場合、式(2-3-10)及び式(2-3-11)から以下の式(2-3-12)が得られる。

[0160] [数71]

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

$$\cdots (2-3-12)$$

[0161] 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(2-3-13)のように表現される。

[0162]

[数72]

$$\begin{aligned}
 E_1 &= e^{i\{\sqrt{k^2-k_{x1}^2-k_{y1}^2}+\sqrt{k^2-k_{x2}^2-k_{y2}^2}\}z} \\
 E_2 &= e^{-i\{\sqrt{k^2-k_{x1}^2-k_{y1}^2}+\sqrt{k^2-k_{x2}^2-k_{y2}^2}\}z} \\
 E_3 &= e^{i\{\sqrt{k^2-k_{x1}^2-k_{y1}^2}-\sqrt{k^2-k_{x2}^2-k_{y2}^2}\}z} \\
 E_4 &= e^{-i\{\sqrt{k^2-k_{x1}^2-k_{y1}^2}-\sqrt{k^2-k_{x2}^2-k_{y2}^2}\}z} \\
 &\cdots (2-3-13)
 \end{aligned}$$

[0163] 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 (2-3-14) が得られる。

[0164] [数73]

$$\begin{aligned}
 \tilde{\phi}(k_{x1}, k_{y1}, k_{x2}, k_{y2}, z, k) &= a(k_{x1}, k_{y1}, k_{x2}, k_{y2}, k) e^{i\{\sqrt{k^2-k_{x1}^2-k_{y1}^2}+\sqrt{k^2-k_{x2}^2-k_{y2}^2}\}z} \\
 &\cdots (2-3-14)
 \end{aligned}$$

[0165] この式 (2-3-14) 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 (2-3-15) のように求まる。

[0166] [数74]

$$\begin{aligned}
 a(k_{x1}, k_{y1}, k_{x2}, k_{y2}, k) &= \tilde{\phi}(k_{x1}, k_{y1}, k_{x2}, k_{y2}, 0, k) \\
 &\cdots (2-3-15)
 \end{aligned}$$

[0167] 以上から ϕ が次式 (2-3-16) のように求まる。

[0168] [数75]

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

[0169] 次に、 k 及び z が固定である条件下で式 (2-3-16) 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 (2-3-17) が得られる。

[0170]

[数76]

$$\begin{aligned}
\Phi(x, y, z, k) &= \phi(x, y, x, y, z, k) \\
&= \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} [\phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k)] \\
&= \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \left[\frac{1}{(2\pi)^4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1} x_1 + k_{y_1} y_1)} e^{-i(k_{x_2} x_2 + k_{y_2} y_2)} e^{iz(\sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_2}^2})} \right. \\
&\quad \cdot a(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, k) dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{x_2} dk_{y_2}] \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (2-3-17)
\end{aligned}$$

[0171] 次に、式（2-3-17）をkに関して積分することにより、次式（2-3-18）が映像化関数として得られる。

[0172] [数77]

$$\begin{aligned}
\rho(x, y, z) &= \int_0^{\infty} \Phi(x, y, z, k) dk = \int_0^{\infty} \phi(x, y, x, y, z, k) dk \\
&= \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \left[\int_0^{\infty} \phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) dk \right] \\
&= \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \left[\frac{1}{(2\pi)^4} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1} x_1 + k_{y_1} y_1)} e^{-i(k_{x_2} x_2 + k_{y_2} y_2)} e^{iz(\sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_2}^2})} \right. \\
&\quad \cdot a(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, k) dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{x_2} dk_{y_2} dk] \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (2-3-18)
\end{aligned}$$

[0173] 式（2-3-18）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、 $\exp(i z \cdot \cdot \cdot)$ 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（2-3-18）が変形されてもよい。

[0174] 例えば、式（2-3-17）の $\exp(i z \cdot \cdot \cdot)$ の $i z$ の係数が、新しい変数 u を用いて以下の式（2-3-19）のように表現される。

[0175] [数78]

$$\begin{aligned}
u &= \sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_2}^2} \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (2-3-19)
\end{aligned}$$

[0176] 式（2-3-19）の右辺を有理化することにより、次式（2-3-20）

）が得られる。

[0177] [数79]

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

・・・(2-3-20)

[0178] 式(2-3-19)及び式(2-3-20)の2つの式から各平方根について解くことで、次式(2-3-21)が得られる。

[0179] [数80]

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

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

・・・(2-3-21)

[0180] したがって、kは、次式(2-3-22)のように表現される。

[0181] [数81]

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

・・・(2-3-22)

[0182] また、次に、式(2-3-19)の両辺のk及びuに関する微分によって、次式(2-3-23)が得られる。

[0183] [数82]

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

・・・(2-3-23)

[0184] 式(2-3-23)からdkについて解くことにより、次式(2-3-24)が得られる。

[0185] [数83]

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

・・・(2-3-24)

[0186] 最後にまとめると式(2-3-18)は次式(2-3-25)のように変

換される。

[0187] [数84]

$$\begin{aligned}
 \rho(x, y, z) &= \int_0^{\infty} \Phi(x, y, z, k) dk = \int_0^{\infty} \phi(x, y, x, y, z, k) dk \\
 &= \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \left[\int_0^{\infty} \phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) dk \right] \\
 &= \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \left[\frac{1}{(2\pi)^4} \int_0^{\infty} \int_{-\alpha}^{\infty} \int_{-\alpha}^{\infty} \int_{-\alpha}^{\infty} \int_{-\alpha}^{\infty} e^{-i(k_{x_1} x_1 - k_{y_1} y_1)} e^{-i(k_{x_2} x_2 + k_{y_2} y_2)} e^{i z u} \right. \\
 &\quad \cdot \alpha(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, k) dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{x_2} dk_{y_2} dk \Big] \\
 &\quad \cdot \cdot \cdot (2 - 3 - 2 \ 5)
 \end{aligned}$$

[0188] この結果が、後述の準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。

[0189] <2-4 2次元配列及び曲面境界の場合>

図5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(2-4-1)のように表現される。

[0190] [数85]

$$\begin{aligned}
 \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, \omega) &= \iint_D \frac{e^{ik\rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{ik\rho_2}}{\rho_2} \varepsilon(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta \\
 \rho_1 &= \sqrt{(x_1 - \xi)^2 + (y_1 - \eta)^2 + (z_1 - \zeta)^2} \\
 \rho_2 &= \sqrt{(x_2 - \xi)^2 + (y_2 - \eta)^2 + (z_2 - \zeta)^2} \\
 &\quad \cdot \cdot \cdot (2 - 4 - 1)
 \end{aligned}$$

[0191] 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5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(2-4-2)で表現される。

[0192] [数86]

$$\begin{aligned}
 \varphi &= \frac{e^{ik\rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{ik\rho_2}}{\rho_2} \varepsilon(\xi, \eta, \zeta) \\
 &\quad \cdot \cdot \cdot (2 - 4 - 2)
 \end{aligned}$$

[0193] 次に、この式（2-4-2）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（2-4-3）のように定義される。

[0194] [数87]

$$\frac{\partial}{\partial t} \rightarrow \partial_t, \frac{\partial}{\partial x_1} \rightarrow \partial_{x_1}, \frac{\partial}{\partial x_2} \rightarrow \partial_{x_2}, \frac{\partial}{\partial y_1} \rightarrow \partial_{y_1}, \frac{\partial}{\partial y_2} \rightarrow \partial_{y_2}, \frac{\partial}{\partial z_1} \rightarrow \partial_{z_1}, \frac{\partial}{\partial z_2} \rightarrow \partial_{z_2} \\ \dots (2-4-3)$$

[0195] この場合、前節と同様の計算により、カーネル関数が次式（2-4-4）の方程式を満たすことが導き出される。

[0196] [数88]

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

[0197] 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（2-4-4）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。

[0198] [数89]

$$\tilde{\phi}(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, z_1, z_2, \omega) \\ = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} dt \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_{y_1}y_1} dy_1 \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_{y_2}y_2} dy_2 \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_{x_1}x_1} dx_1 \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_{x_2}x_2} \phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, t) dx_2 \\ \dots (2-4-5)$$

[0199] 前節の式（2-3-12）と同様に式（2-4-4）から次式（2-4-6）が得られる。

[0200] [数90]

$$\{(D_{z_1}^2 + D_{z_2}^2 - k_{x_1}^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2) + 2k^2\} \tilde{\phi} = 0 \\ \dots (2-4-6)$$

[0201] 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（2-4-6）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。

[0202] 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(2-4-6)の解が次式(2-4-7)のように仮定される。

[0203] [数91]

$$E(k_{x_1}, k_{x_2}, k_{y_1}, k_{y_2}, z_1, z_2) = \exp(is_1 z_1) \exp(is_2 z_2) \dots (2-4-7)$$

[0204] 式(2-4-6)、式(2-4-7)及び上述した整合性に従って、以下の式(2-4-8)及び式(2-4-9)が得られる。

[0205] [数92]

$$s_1^2 + s_2^2 + k_{x_1}^2 + k_{x_2}^2 + k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2 - 2k^2 = 0 \dots (2-4-8)$$

[0206] [数93]

$$s_1 + s_2 = \sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_2}^2} \dots (2-4-9)$$

[0207] これらから、 s_1 及び s_2 が次式(2-4-10)のように得られる。

[0208] [数94]

$$s_1 = \sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2} \\ s_2 = \sqrt{k^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_2}^2} \dots (2-4-10)$$

[0209] 上記のような s_1 及び s_2 を用いて、方程式の解が次式(2-4-11)のように表現される。

[0210]

[数95]

$$\begin{aligned} & \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{x_2}x_2 + k_{y_2}y_2)} a(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}) \\ & \quad \cdot e^{is_1(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2})z_1} e^{is_2(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2})z_2} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{x_2} dk_{y_2} \\ & \quad \cdot \cdot \cdot (2-4-11) \end{aligned}$$

[0211] また、曲面Sの方程式が、例えば次式（2-4-12）のように仮定される。

[0212] [数96]

$$\begin{aligned} & z = f(x, y) \\ & \cdot \cdot \cdot (2-4-12) \end{aligned}$$

[0213] 曲面S上で与えられる境界条件は、次式（2-4-13）のように表現される。

[0214] [数97]

$$\begin{aligned} & \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, f(x_1, y_1), f(x_2, y_2), k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{x_2}x_2 + k_{y_2}y_2)} a(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}) \\ & \quad \cdot e^{i\{s_1(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2})f(x_1, y_1) - s_2(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2})f(x_2, y_2)\}} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{x_2} dk_{y_2} \\ & \quad \cdot \cdot \cdot (2-4-13) \end{aligned}$$

[0215] 式（2-4-13）の方程式は、 $a(k_{x_1}, k_{x_2}, k_{y_1}, k_{y_2})$ を決定するために用いられる。以下では、次式（2-4-14）のような簡略記法が用いられる。

[0216] [数98]

$$\begin{aligned} & a(\mathbf{k}) = a(k_{x_1}, k_{x_2}, k_{y_1}, k_{y_2}) \\ & s_1(\mathbf{k}) = s_1(k_{x_1}, k_{x_2}, k_{y_1}, k_{y_2}) \\ & s_2(\mathbf{k}) = s_2(k_{x_1}, k_{x_2}, k_{y_1}, k_{y_2}) \\ & \cdot \cdot \cdot (2-4-14) \end{aligned}$$

[0217] 式（2-4-14）の簡略記法を用いて、次式（2-4-15）のような $a(\mathbf{k})$ に関する積分方程式が導き出される。

[0218]

[数99]

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

[0219] 上記の式 (2-4-15) から $a(\mathbf{k})$ が求めれば、散乱場関数は、次式 (2-4-16) のように表現され得る。

[0220] [数100]

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

[0221] 上記の式 (2-4-16) 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 (2-4-17) のように求まる。

[0222] [数101]

$$\begin{aligned} & \rho(\mathbf{r}) = \lim_{t \rightarrow 0} \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x, y, x, y, z, z, k) e^{-ickt} dk \right] \\ & \cdots (2-4-17) \end{aligned}$$

[0223] 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。

[0224] <2-5 準2次元配列及び平面境界の場合>

図6は、準2次元アレイアンテナに関する各座標の例を示す概念図である。この例において、準2次元アレイアンテナは、1列の送信アレイアンテナ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。このような準2次元アレイアンテナは、S-Array (super-array)、又は、S-Arrayマルチスタティックアンテナとも表現される。

[0225] 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 T A と受信アレイアンテナ R A との間の x 軸方向における距離は d で表現される。この構成では走査方向の各点 x で n 個の送信アンテナ素子と n 個の受信アンテナ素子との任意の組み合わせの n² 個の時系列データが得られる。

[0226] 本節では、図 6 に示されるような準 2 次元アレイアンテナによって得られるデータから物体を映像化するための理論を説明する。まず、2 次元配列に関する式 (2-3-10) が検討の出発点として用いられる。以下の式 (2-5-1) は、式 (2-3-10) と同じ式である。

[0227] [数102]

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

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

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

[0228] また、

[数103]

$$\varphi$$

の t、x₁、y₁、y₂ に関するフーリエ変換は次式 (2-5-2) のように表現される。

[0229] [数104]

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

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

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

[0230] 以下では、変数 x₂ を u と表現する。式 (2-5-1) の両辺を t、x₁、y₁、y₂ に関してフーリエ変換することにより、次式 (2-5-3) が得られる。

[0231] [数105]

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

$$\cdots (2-5-3)$$

[0232] u 、 z に関する2次元偏微分方程式である上記の式(2-5-3)の解は、次式(2-5-4)のように仮定される。

[0233] [数106]

$$\tilde{\varphi} \propto e^{s_3 u} e^{s_4 z} \cdots (2-5-4)$$

[0234] ここで、 s_3 及び s_4 は、次式(2-5-5)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。

[0235] [数107]

$$\begin{aligned} s_3 &= s_3(k_{x1}, k_{y1}, k_{y2}, k) \\ s_4 &= s_4(k_{x1}, k_{y1}, k_{y2}, k) \\ &\cdots (2-5-5) \end{aligned}$$

[0236] 式(2-5-4)を式(2-5-3)へ代入することにより、次式(2-5-6)が得られる。

[0237] [数108]

$$\begin{aligned} & (s_3^2 + s_4^2 - k_{x1}^2 - k_{y1}^2 - k_{y2}^2)^2 + 4k^2 s_4^2 + 4(k_{x1}^2 + k_{y1}^2)(s_3^2 - k_{y2}^2) = 0 \\ & \cdots (2-5-6) \end{aligned}$$

[0238] この代数方程式だけでは s_3 及び s_4 が決定されない。次に、式(2-5-4)が次式(2-5-7)のように変更される。

[0239] [数109]

$$\tilde{\varphi}(k_{x1}, k_{y1}, u, k_{y2}, z, k) = b(k_{x1}, k_{y1}, k_{y2}, k) e^{s_3 u} e^{s_4 z} \cdots (2-5-7)$$

[0240] 式(2-5-7)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(2-5-8)が得られる。

[0241] [数110]

$$\begin{aligned} & \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x1}x_1 + k_{y1}y_1 + k_{y2}y_2)} b(k_{x1}, k_{y1}, k_{y2}, k) e^{s_3 x_2} e^{s_4 z} dk_{x1} dk_{y1} dk_{y2} \\ & \cdots (2-5-8) \end{aligned}$$

[0242] 式(2-5-8)に $x_2 = x_1 = x$ を適用することにより、次式(2-5-

9) が得られる。

[0243] [数111]

$$\begin{aligned}
 & \varphi(x, y_1, x, y_2, z, k) \\
 &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(k_{x_1}x + k_{y_1}y_1 - k_{y_2}y_2)} b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_3x} e^{s_4z} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
 &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\{(k_{x_1} + is_3)x + k_{y_1}y_1 - k_{y_2}y_2\}} b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_4z} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
 &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x + k_{y_1}y_1 - k_{y_2}y_2)} b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_4z} \left(\frac{dk_{x_1}}{dk_x} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
 &\quad \cdot \cdot \cdot (2-5-9)
 \end{aligned}$$

[0244] ここで、 k_x は次式 (2-5-10) で表現される。

[0245] [数112]

$$\begin{aligned}
 & k_x = k_{x_1} + is_3 \\
 & \cdot \cdot \cdot (2-5-10)
 \end{aligned}$$

[0246] 上記の式 (2-5-9) は、1次元配列の散乱場方程式の解と一致するため、式 (2-1-16) と一致するはずである。以下の式 (2-5-11) は、式 (2-1-16) と同じ式である。

[0247] [数113]

$$\begin{aligned}
 & \varphi(x, y_1, y_2, z, k) \\
 &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
 &\quad \cdot e^{i\{\sqrt{(k^2 - k_{y_1}^2) + \sqrt{(k^2 - k_{y_2}^2)^2 - k_x^2}}\}z} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
 &\quad \cdot \cdot \cdot (2-5-11)
 \end{aligned}$$

[0248] 式 (2-5-9) と式 (2-5-11) とを比較することにより、次式 (2-5-12) が得られる。

[0249] [数114]

$$\begin{aligned}
 & b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \left(\frac{dk_{x_1}}{d(k_{x_1} + is_3)} \right) = a(k_{x_1} + is_3, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
 & s_4 = i\sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + is_3)^2} \\
 & \cdot \cdot \cdot (2-5-12)
 \end{aligned}$$

[0250] 式 (2-5-12) の第2式を2乗することにより、次式 (2-5-13

）が得られる。

[0251] [数115]

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

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

[0252] 式(2-5-13)を式(2-5-6)へ代入することにより、次式(2-5-14)が得られる。

[0253] [数116]

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

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

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

$$\dots (2-5-14)$$

[0254] 式(2-5-14)を整理することにより、次式(2-5-15)が得られる。

[0255] [数117]

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

$$\dots (2-5-15)$$

[0256] この方程式の解は、重根であるので、次式(2-5-16)で表現される解が一意的に得られる。

[0257] [数118]

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

$$\dots (2-5-16)$$

[0258] 上記のプロセスで得られる式(2-5-12)及び式(2-5-16)に従って、 s_3 及び s_4 が、解析的に求まる。そして、式(2-5-8)から散乱場関数が次式(2-5-17)のように得られる。

[0259]

[数119]

$$\begin{aligned}
& \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 - k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2)} b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_3 x_2} e^{s_4 z} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 - k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2)} a(k_{x_1} + is_3, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
&\quad \cdot \left(\frac{d(k_{x_1} + is_3)}{dk_{x_1}} \right) e^{s_3 x_2} e^{s_4 z} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
& s_3 = \frac{-ik_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} \\
& s_4 = i \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + is_3)^2} \\
& \dots (2-5-17)
\end{aligned}$$

[0260] 次に、計測データ $\Phi(x_1, y_1, y_2, k)$ と、 $a(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$ とを結びつけることが検討される。そのため、 $k_x = k_{x_1} + is_3$ と定め、 $z = 0$ 及び $x_2 = x_1 + d$ を式 (2-5-17) へ代入することにより、次式 (2-5-18) 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。

[0261] [数120]

$$\begin{aligned}
& \Phi(x_1, y_1, y_2, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2)} a(k_{x_1} + is_3, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
&\quad \cdot \left(\frac{d(k_{x_1} + is_3)}{dk_{x_1}} \right) e^{s_3(x_1 + d)} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\{(k_{x_1} + is_3)x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2\}} a(k_{x_1} + is_3, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
&\quad \cdot \left(\frac{d(k_{x_1} + is_3)}{dk_{x_1}} \right) e^{s_3 d} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x_1 + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_3 d} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
& \dots (2-5-18)
\end{aligned}$$

[0262] 以後、次式 (2-5-19) で定義される k_x 及び s_3 が用いられる。

[0263] [数121]

$$\begin{aligned}
 k_x &= k_{y_1} + i s_3 \\
 s_3 &= \frac{-i k_{y_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-i k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
 &\dots (2-5-19)
 \end{aligned}$$

[0264] 式(2-5-18)の両辺を x_1 、 y_1 、 y_2 に関してフーリエ変換することにより次式(2-5-20)が得られる。

[0265] [数122]

$$\begin{aligned}
 &\tilde{\Phi}(k'_x, k'_{y_1}, k'_{y_2}, k) \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(k'_x x_1 + k'_{y_1} y_1 + k'_{y_2} y_2)} \Phi(x_1, y_1, y_2, k) dx_1 dy_1 dy_2 \\
 &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(k'_x x_1 + k'_{y_1} y_1 + k'_{y_2} y_2)} \\
 &\quad \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\{(k_x x_1 + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)\}} a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_3 d} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dx_1 dy_1 dy_2 \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(k'_x - k_x) \delta(k'_{y_1} - k_{y_1}) \delta(k'_{y_2} - k_{y_2}) a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_3 d} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
 &= a(k'_x, k'_{y_1}, k'_{y_2}, k) e^{s_3 d} \\
 &\dots (2-5-20)
 \end{aligned}$$

[0266] 式(2-5-20)から関数 $a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$ が次式(2-5-21)のように求まる。

[0267] [数123]

$$\begin{aligned}
 a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) &= e^{-s_3 d} \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
 &= e^{\frac{i k_x d \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}} \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
 &\dots (2-5-21)
 \end{aligned}$$

[0268] したがって、散乱場関数である式(2-5-17)が次式(2-5-22)のように完全な形式で求まる。

[0269]

[数124]

$$\begin{aligned}
& \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1} x_1 + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} a(k_{x_1} + is_3, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
&\quad \cdot \left(\frac{d(k_{x_1} + is_3)}{dk_{x_1}} \right) e^{s_3 x_2} e^{s_4 z} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1} x_1 + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} e^{s_3 x_2} e^{s_4 z} e^{\frac{id(k_{x_1} + is_3)\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}} \\
&\quad \cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \left(\frac{d(k_{x_1} + is_3)}{dk_{x_1}} \right) dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
& s_3 = \frac{-ik_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-ik_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
& s_4 = ik_z = i\sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + is_3)^2} \\
& \dots (2 - 5 - 23)
\end{aligned}$$

[0270] そして、映像化関数が次式（2-5-23）のように求まる。

[0271] [数125]

$$\begin{aligned}
& \rho(x, y, z) \\
&= \int_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}}^{\infty} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) dk \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^{\infty} dk \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{s_4 z} e^{\frac{idk_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}} \\
&\quad \cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{ik_z z} e^{\frac{idk_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}} \\
&\quad \cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \left(\frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk_z \\
& k_z = \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2} \\
& k = \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}} \\
& \frac{dk}{dk_z} = \frac{k_z \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{k(k_x^2 + k_z^2)} \\
& \dots (2 - 5 - 23)
\end{aligned}$$

[0272] 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。

[0273] <2-6 準2次元配列及び曲面境界の場合>

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、曲面である場合の理論を説明する。

[0274] 図7は、曲面上の準2次元アレイアンテナを示す概念図である。ここでは、曲面の形状は、 $z = f(x)$ で表現されるシンプルな形状である。複数の送信アンテナが、 $x = x_1$ かつ $z = z_1$ の直線上に配置されている。また、複数の受信アンテナは、 $x = x_2$ かつ $z = z_2$ の直線、及び、 $x = x_3$ かつ $z = z_3$ の直線等で定められる複数列上に配置されている。複数列の受信アレイアンテナのうち1列の受信アレイアンテナが用いられてもよい。また、準2次元アレイアンテナが曲面に沿ってx軸方向に移動することで走査が行われてもよい。

[0275] 第4節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(2-6-1)のような関数である。

[0276] [数126]

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

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

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

$$\dots (2-6-1)$$

[0277] 式(2-6-1)の散乱場関数が満たす方程式は、式(2-4-4)であって、次式(2-6-2)のように表現される。

[0278]

[数127]

$$\begin{aligned}
& \left\{ \Delta_6 - 2(ik)^2 \right\} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\
& = \left\{ (\partial_{x_1}^2 + \partial_{x_2}^2 + \partial_{y_1}^2 + \partial_{y_2}^2 + \partial_{z_1}^2 + \partial_{z_2}^2) - 2(ik)^2 \right\} \\
& \quad \cdot \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\
& = 0 \\
& \dots (2-6-2)
\end{aligned}$$

[0279] また、ここでは、次式（2-6-3）のようなフーリエ変換が用いられる。

[0280] [数128]

$$\begin{aligned}
& \tilde{\varphi}(k_{x_1}, k_{y_1}, x_2, k_{y_2}, z_1, z_2, k) \\
& = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2)} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) dx_1 dy_1 dy_2 \\
& \dots (2-6-3)
\end{aligned}$$

[0281] 式（2-6-2）及び式（2-6-3）から次式（2-6-4）が得られる。

[0282] [数129]

$$\begin{aligned}
& \left\{ \partial_{x_2}^2 + \partial_{x_1}^2 + \partial_{z_2}^2 + 2k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2 \right\} \tilde{\varphi}(k_{x_1}, k_{y_1}, x_2, k_{y_2}, z_1, z_2, k) = 0 \\
& \dots (2-6-4)
\end{aligned}$$

[0283] 式（2-6-4）の方程式の解として次式（2-6-5）が仮定される。

[0284] [数130]

$$\begin{aligned}
& \tilde{\varphi}(k_{x_1}, k_{y_1}, x_2, k_{y_2}, z_1, z_2, k) = b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_3 x_2} e^{s_4 z_1} e^{s_5 z_2} \\
& s_3 = s_3(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
& s_4 = s_4(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
& s_5 = s_5(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
& \dots (2-6-5)
\end{aligned}$$

[0285] 式（2-6-5）を式（2-6-4）へ代入することにより、次式（2-6-6）が得られる。

[0286] [数131]

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

[0287] 次に、

[数132]

φ

が、次式（2-6-7）のように表現される。

[0288] [数133]

$$\begin{aligned} & \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1} x_1 + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_3 x_2} e^{s_4 z_1} e^{s_5 z_2} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\ & \quad \cdot \cdot \cdot (2-6-7) \end{aligned}$$

[0289] $x_2 \rightarrow x_1$ において、式（2-6-7）が、式（2-2-18）と一致する

。 $x_2 \rightarrow x_1$ において、式（2-6-7）は、次式（2-6-8）のように表現される。

[0290] [数134]

$$\begin{aligned} & \varphi(x_1, y_1, x_1, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\{(k_{x_1} + i s_3) x_1 + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2\}} b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_4 z_1} e^{s_5 z_2} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\ & \quad \cdot \cdot \cdot (2-6-8) \end{aligned}$$

[0291] また、式（2-2-18）と同じ式が、次式（2-6-9）のように表現される。

[0292] [数135]

$$\begin{aligned} & \phi(x, y_1, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\ & \quad \cdot e^{i s_1 (k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) z_1} e^{i s_2 (k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) z_2} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\ & s_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) = \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{\left(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}\right)^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ & s_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) = \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{\left(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}\right)^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ & \quad \cdot \cdot \cdot (2-6-9) \end{aligned}$$

[0293] 式（2-6-8）と式（2-6-9）とが一致するため、次式（2-6-

10) が得られる。

[0294] [数136]

$$\begin{aligned} k_x &= k_{x_1} + is_3(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\ b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \left(\frac{dk_{x_1}}{dk_x} \right) &= a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\ s_4(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) &= is_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\ s_5(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) &= is_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\ &\dots (2-6-10) \end{aligned}$$

[0295] 次に、式(2-6-6)、式(2-6-9)、及び、式(2-6-10)から、 s_3 に関する代数方程式が次式(2-6-11)のように得られる。

[0296] [数137]

$$\begin{aligned} s_3^2 - \left\{ \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + is_3)^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \right\}^2 \\ - \left\{ \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + is_3)^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \right\}^2 \\ + 2k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2 = 0 \\ \dots (2-6-11) \end{aligned}$$

[0297] 式(2-6-11)について、2乗項を展開し、簡素化することにより、次式(2-6-12)が得られる。

[0298] [数138]

$$\begin{aligned} s_3^2 + \frac{(2k^2 - k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)(k_{x_1} + is_3)^2}{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2} - k_{x_1}^2 = 0 \\ \dots (2-6-12) \end{aligned}$$

[0299] さらに、式(2-6-12)を整理することにより、次式(2-6-13)が得られる。

[0300] [数139]

$$\begin{aligned} (s_3 \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + ik_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})(s_3 \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} + ik_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}) = 0 \\ \dots (2-6-13) \end{aligned}$$

[0301] 式(2-6-13)には、2つの解が存在する。しかし、式(2-6-13)の解は、前節の平面境界の場合と一致すべきである。そのため、式(2-5-16)に従って、次式(2-6-14)が解として選ばれるべきである。

[0302] [数140]

$$s_3 = \frac{-ik_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} \cdots (2-6-14)$$

[0303] 以上をまとめると、散乱場関数が次式(2-6-15)のように得られる。

[0304] [数141]

$$\begin{aligned} & \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2)} b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_3 x_2} e^{s_4 z_1} e^{s_5 z_2} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2)} a(k_{x_1} + is_3, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\ & \quad \cdot e^{s_3 x_2} e^{s_4 z_1} e^{s_5 z_2} \frac{d(k_{x_1} + is_3)}{dk_{x_1}} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\ & s_3 = \frac{-ik_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} \\ & s_4 = \frac{i\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{\left(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}\right)^2 - (k_{x_1} + is_3)^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ & s_5 = \frac{i\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{\left(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}\right)^2 - (k_{x_1} + is_3)^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ & \cdots (2-6-15) \end{aligned}$$

[0305] また、式(2-6-15)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(2-6-16)が得られる。

[0306]

[数142]

$$\begin{aligned}
 S_3 &= \frac{-ik_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
 S_4 &= \frac{i \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{\left(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}\right)^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
 S_5 &= \frac{i \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{\left(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}\right)^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
 &\dots (2-6-16)
 \end{aligned}$$

[0307] 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 (2-6-17) のように表現される。

[0308] [数143]

$$\begin{aligned}
 \Phi(x_I, y_I, y_J, k) &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ickt} \varphi(x_I, y_I, x_I + d, y_J, t) dt \\
 &\dots (2-6-17)
 \end{aligned}$$

[0309] 計測面である境界曲面の形は、次式 (2-6-18) のように表現される。

[0310] [数144]

$$\begin{aligned}
 z &= f(x, y) \\
 &\dots (2-6-18)
 \end{aligned}$$

[0311] 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 (2-6-19) のように表現される。

[0312] [数145]

$$\begin{aligned}
 z_I &= f(x_I, y_I) \\
 z_J &= f(x_J, y_J) \\
 &\dots (2-6-19)
 \end{aligned}$$

[0313] $x_2 = x_1 + d$ を式 (2-6-15) へ代入することにより、次式 (2-6-20) のような方程式が成立する。

[0314] [数146]

$$\begin{aligned}
& \varphi(x_1, y_1, x_1 + d, y_2, z_1, z_2, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1} x_1 + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} a(k_{x_1} + is_3, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
&\quad \cdot e^{s_3(x_1 + d)} e^{s_4 z_1} e^{s_5 z_2} \frac{d(k_{x_1} + is_3)}{dk_{x_1}} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (2 - 6 - 20)
\end{aligned}$$

[0315] 上記の式（2-6-20）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（2-6-21）のように表現される。

[0316] [数147]

$$\begin{aligned}
& \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \delta(x_1 - x_I) \delta(y_1 - y_I) \delta(y_2 - y_J) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1} x_1 + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} a_{I,J}(k_{x_1} + is_3, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
&\quad \cdot e^{s_3(x_1 + d)} e^{s_4 z_I} e^{s_5 z_J} \frac{d(k_{x_1} + is_3)}{dk_{x_1}} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (2 - 6 - 21)
\end{aligned}$$

[0317] Φ(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（2-6-21）の両辺のフーリエ変換によって、次式（2-6-22）が得られる。

[0318] [数148]

$$\begin{aligned}
& \iiint e^{i(k_{x_1}' x_1 + k_{y_1}' y_1 + k_{y_2}' y_2)} \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\
&\quad \cdot \delta(x_1 - x_I) \delta(y_1 - y_I) \delta(y_2 - y_J) dx_1 dy_1 dy_2 \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \iiint e^{i(k_{x_1}' x_1 + k_{y_1}' y_1 + k_{y_2}' y_2)} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1} x_1 + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} a_{I,J}(k_{x_1} + is_3, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
&\quad \cdot e^{s_3(x_1 + d)} e^{s_4 z_I} e^{s_5 z_J} \frac{d(k_{x_1} + is_3)}{dk_{x_1}} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} dx_1 dy_1 dy_2 \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (2 - 6 - 22)
\end{aligned}$$

[0319] そして、式（2-6-22）におけるx₁、y₁、y₂に関する積分の結果として次式（2-6-23）が得られる。

[0320]

[数149]

$$\begin{aligned}
& \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) e^{i(k_{x_1}' x_I + k_{y_1}' y_I + k_{y_2}' y_J)} \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(k_{x_1} + i s_3 - k_{x_1}') \delta(k_{y_1} - k_{y_1}') \delta(k_{y_2} - k_{y_2}') \\
&\quad \cdot a_{I,J}(k_{x_1} + i s_3, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_3 d} e^{s_4 z_I} e^{s_5 z_J} \frac{d(k_{x_1} + i s_3)}{d k_{x_1}} d k_{x_1} d k_{y_1} d k_{y_2} \\
&= a_{I,J}(k_{x_1}', k_{y_1}', k_{y_2}', k) e^{s_3' d} e^{s_4' z_I} e^{s_5' z_J} \\
&\quad s_3' = \frac{-i k_{x_1}' \sqrt{k^2 - k_{y_2}'^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}'^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}'^2}} \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (2 - 6 - 2 \ 3)
\end{aligned}$$

[0321] 式(2-6-2 3)の結果を整理することにより、次式(2-6-2 4)が得られる。

[0322] [数150]

$$\begin{aligned}
& a_{I,J}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) = \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) e^{i(k_x x_I + k_{y_1} y_I + k_{y_2} y_J)} e^{-s_3 d} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \\
&\quad s_3 = \frac{-i k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (2 - 6 - 2 \ 4)
\end{aligned}$$

[0323] 式(2-6-2 4)に関する全てのI、Jの組に対する和によって、次式(2-6-2 5)が得られる。

[0324] [数151]

$$\begin{aligned}
& a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
&= \sum_{I,J} a_{I,J}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
&= \sum_{I,J} \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) e^{i(k_x x_I + k_{y_1} y_I + k_{y_2} y_J)} e^{-s_3 d} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (2 - 6 - 2 \ 5)
\end{aligned}$$

[0325] 式(2-6-1 5)及び式(2-6-2 5)より、散乱場関数が、次式(2-6-2 6)のように求まる。

[0326]

[数152]

$$\begin{aligned}
& \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x_1 + k_y y_1 + k_z z_1)} e^{-ik_x x_2} \sum_{I,J} \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\
&\quad \cdot e^{i(k_x x_I + k_y y_I + k_z z_I)} e^{-s_3 d} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} e^{s_4 z_I} e^{s_5 z_J} \frac{d(k_x + is_3)}{dk_{x_1}} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
& k_{x_2} = \frac{k_x \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
& s_3 = -i k_{x_2} \\
& \dots (2-6-26)
\end{aligned}$$

[0327] 式(2-6-26)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_{y_1} 、 k_{y_2} 、 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。

[0328] まず、式(2-6-26)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(2-6-27)が得られる。

[0329] [数153]

$$\begin{aligned}
& \varphi(x, y, x, y, z, z, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_y y + k_z z)} e^{-s_3 d} e^{s_4 z} e^{s_5 z} \sum_{I,J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\
&\quad \cdot e^{i(k_x x_I + k_y y_I + k_z z_I)} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
& s_3 = \frac{-ik_x \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
& \dots (2-6-27)
\end{aligned}$$

[0330] 映像化関数 ρ は、 k に関して積分することにより、次式(2-6-28)のように得られる。

[0331]

[数154]

$$\begin{aligned}
\rho(x, y, z) &= \int_0^\infty \varphi(x, y, x, y, z, z, k) dk \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty dk \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{-s_3 d} e^{ik_z z} \sum_{I, J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\
&\quad \cdot e^{i(k_x x_I + k_{y_1} y_I + k_{y_2} y_J)} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{-s_3 d} e^{ik_z z} \sum_{I, J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\
&\quad \cdot e^{i(k_x x_I + k_{y_1} y_I + k_{y_2} y_J)} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} \left(\frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk_z \\
s_3 &= \frac{-ik_x \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (2 - 6 - 28)
\end{aligned}$$

[0332] この演算には、次式（2-6-29）が用いられる。

[0333] [数155]

$$\begin{aligned}
k &= \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}} \\
\frac{dk}{dk_z} &= \frac{k_z \left\{ 1 - \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{(k_x^2 + k_z^2)^2} \right\}}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}}} \\
s_3 &= \frac{-ik_x \left(\sqrt{k_x^2 + k_z^2} - \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \\
s_4 &= \frac{ik_z \left(\sqrt{k_x^2 + k_z^2} + \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \\
s_5 &= \frac{ik_z \left(\sqrt{k_x^2 + k_z^2} - \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (2 - 6 - 29)
\end{aligned}$$

[0334] 複数列の受信アレイアンテナが用いられる場合、複数列の受信アレイアンテナに対応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(2-6-26)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。

[0335] <3 指向性アンテナの場合>

本章では、指向性アンテナを用いる散乱場理論を説明する。

[0336] <3-1 アレイアンテナが平面上に配置された場合>

第2章では、式(2-1-1)に見られるように放射でも受信でも無指向性アンテナが用いられている。一方、空中の物体に対するレーダなどにおいて、指向性アンテナが用いられてもよい。例えば、1つの指向性アンテナは、複数のアンテナ素子から構成されており、複数のアンテナ素子が本質的に同位相で動作する。フェーズドアレイでも本質的には位相が揃えられている。これにより、指向性アンテナは、開口面を大きくし、指向性をよくするように設計されている。

[0337] このような指向性アンテナを散乱場理論に導入することで、遠方の散乱の状態を高精度に識別することが可能になる。以下において、第2章第5節の例を基礎として用いて、指向性アンテナを散乱場理論に導入することが検討される。

[0338] 図8は、平面上に配置された複数の指向性アンテナで構成される準2次元アレイアンテナを示す概念図である。この例において、準2次元アレイアンテナは、1列の送信アレイアンテナ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。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軸方向における距離はdで表現される。

[0339] 送信アレイアンテナTAは、n個の送信アンテナ T_1 、 $\dots$ 、 T_n を含む

。受信アレイアンテナ R A は、n 個の受信アンテナ R₁、・・・、R_nを含む。
n 個の送信アンテナ T₁、・・・、T_nのそれぞれは、複数の送信アンテナ素子を含んでいてもよい。また、n 個の受信アンテナ R₁、・・・、R_nのそれぞれは、複数の受信アンテナ素子を含んでいてもよい。n 個の送信アンテナ T₁、・・・、T_nのそれぞれは、送信器とも表現され得る。n 個の受信アンテナ R₁、・・・、R_nのそれぞれは、受信器とも表現され得る。

[0340] 第2章第5節において、散乱場関数は、式(2-5-17)に従って、次式(3-1-1)のように表現される。

[0341] [数156]

$$\begin{aligned} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2)} e^{-ik_{x_2}x_2} b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_4 z} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\ k_{x_2} &= \frac{k_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} \\ s_3 &= -ik_{x_2} \\ s_4 &= i \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + is_3)^2} \\ &\cdots (3-1-1) \end{aligned}$$

[0342] ここで、核関数 b(k_{x1}、k_{y1}、k_{y2}、k)は、計測結果から決定されると仮定される。このまま上式が用いられる場合、無指向性アンテナが仮定された第2章第5節と同様の散乱場関数及び映像化関数が得られる。しかしながら、指向性アンテナが用いられる場合の計測結果は、無指向性アンテナが用いられる場合の計測結果とは異なる。無指向性アンテナが仮定された第2章第5節と同様の散乱場関数及び映像化関数では、指向性アンテナでの計測結果から、正確な情報が得られない。

[0343] 指向性アンテナのサイズは、通常使用される電磁波の波長に比べて十分大きい。したがって、指向性アンテナは、無限小の点とはみなされず、有限のサイズを有する。簡単化のため、アンテナの形状として、(2a×2b)の長方形が用いられる。なお、ここでは、アンテナのサイズ及び形状は、アンテナの送信領域又は受信領域のサイズ及び形状に対応する。ここでは、有限

のサイズを有するアンテナで計測された散乱データが検討される。なお、第2章の散乱場理論では、アンテナが無指向性の点状アンテナであると仮定されている。

[0344] 図9は、有限サイズを有する送信アンテナ及び受信アンテナを示す概念図である。図9のように、送信アンテナ及び受信アンテナは、有限のサイズを有し、長方形の形状を有する。送信アンテナは、 z 軸方向へ電波を送信し、受信アンテナは、 z 軸方向から電波を受信する。図9において、 (ξ, η) は、送信位置 (x_1, y_1) の変位ベクトルに対応する。同様に、 (u, v) は、受信位置 (x_2, y_2) の変位ベクトルに対応する。

[0345] 式(3-1-1)において送信位置及び受信位置に関する変数が、次式(3-1-2)のように置換えられる。

[0346] [数157]

$$\begin{aligned} x_1 &\rightarrow x_1 + \xi & y_1 &\rightarrow y_1 + \eta \\ x_2 &\rightarrow x_2 + u & y_2 &\rightarrow y_2 + v \\ &\dots (3-1-2) \end{aligned}$$

[0347] 散乱場関数は、変数の置き換えに従って、式(3-1-1)から次式(3-1-3)のように置き換えられる。

[0348] [数158]

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

[0349] 式(3-1-3)の両辺を送受アンテナ内部にわたって積分することで式(3-1-4)が得られる。

[0350]

[数159]

$$\begin{aligned}
& \Phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) \\
&= \iiint_T \varphi(x_1 + \xi, y_1 + \eta, x_2 + u, y_2 + v, z, k) d\xi d\eta du dv \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\iiint_T e^{-i\{k_{x_1}(x_1+\xi)+k_{y_1}(y_1+\eta)+k_{y_2}(y_2+v)\}} e^{-ik_{x_2}(x_2+u)} d\xi d\eta du dv \right] \\
&\quad \cdot b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_4 z} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&\quad \dots (3-1-4)
\end{aligned}$$

[0351] 積分範囲 T は、 $-a \leq \xi \leq a$ 及び $-b \leq \eta \leq b$ であり、積分範囲 R は、 $-a \leq u \leq a$ 及び $-b \leq v \leq b$ である。積分結果は、次式 (3-1-5) のように得られる。

[0352] [数160]

$$\begin{aligned}
& \Phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) \\
&= \iiint_T \varphi(x_1 + \xi, y_1 + \eta, x_2 + u, y_2 + v, z, k) d\xi d\eta du dv \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\iiint_T e^{-i\{k_{x_1}(x_1+\xi)+k_{y_1}(y_1+\eta)+k_{y_2}(y_2+v)\}} e^{-ik_{x_2}(x_2+u)} d\xi d\eta du dv \right] \\
&\quad \cdot b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_4 z} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1+k_{y_1}y_1+k_{y_2}y_2)} e^{-ik_{x_2}x_2} \\
&\quad \cdot \left\{ \frac{2 \sin(k_{x_1} a)}{k_{x_1}} \frac{2 \sin(k_{y_1} b)}{k_{y_1}} \frac{2 \sin(k_{x_2} a)}{k_{x_2}} \frac{2 \sin(k_{y_2} b)}{k_{y_2}} \right\} \\
&\quad \cdot b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_4 z} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&\quad \dots (3-1-5)
\end{aligned}$$

[0353] ここで、被積分関数は、次式 (3-1-6) で示されるようなアンテナの指向性を表す関数 f を含む。

[0354] [数161]

$$\begin{aligned}
& f(k_{x_1}, k_{y_1}) f(k_{x_2}, k_{y_2}) = \frac{2 \sin(k_{x_1} a)}{k_{x_1}} \frac{2 \sin(k_{y_1} b)}{k_{y_1}} \cdot \frac{2 \sin(k_{x_2} a)}{k_{x_2}} \frac{2 \sin(k_{y_2} b)}{k_{y_2}} \\
&\quad \dots (3-1-6)
\end{aligned}$$

[0355] 上記の関数 f は、アンテナのサイズを示す定数 a、b の影響を受ける。例えば、 k_{x_1} 、 k_{y_1} 、 k_{x_2} 及び k_{y_2} に関する関数 f の積分結果は、アンテナの

サイズを示す定数 a 、 b が大きいほど、 k_{x1} 、 k_{y1} 、 k_{x1} 及び k_{y1} の積分範囲が小さくても 0 に収束しやすい。つまり、アンテナのサイズを示す定数 a 、 b が大きいほど、指向性が大きい。

[0356] 次に、核関数 $b(k_{x1}, k_{y1}, k_{y2}, k)$ を求めることが検討される。この核関数は、無指向性アンテナに関する関数であって、有限サイズを有する指向性アンテナで計測された結果から厳密には求められない。ここでは、有限サイズを有する指向性アンテナで計測された結果が、無指向性アンテナで得られる結果の近似値として用いられる。具体的には、有限サイズを有する指向性アンテナで計測された結果は、 ξ 、 η 、 u 及び v が 0 である場合において得られる結果の近似値として用いられる。

[0357] この場合において、アレイアンテナは、送信位置が $x_1 = 0$ で受信位置が $x_2 = x_1 + d$ で固定されていると仮定される。計測データ $\Phi(y_1, y_2, k)$ は、 $x_1 = 0$ かつ $z = 0$ で得られ、次式 (3-1-7) の方程式を満たす。

[0358] [数162]

$$\begin{aligned} & \delta(x_1)\Phi(y_1, y_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x1}x_1 + k_{y1}y_1 + k_{y2}y_2)} e^{-ik_{x2}(x_1+d)} b(k_{x1}, k_{y1}, k_{y2}, k) dk_{x1} dk_{y1} dk_{y2} \\ & \dots (3-1-7) \end{aligned}$$

[0359] k_{x1} から k_x に変数を変換することにより、次式 (3-1-8) が得られる。

[0360] [数163]

$$\begin{aligned} & \delta(x_1)\Phi(y_1, y_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x1}x_1 + k_{y1}y_1 + k_{y2}y_2)} e^{-ik_{x2}d} b(k_{x1}, k_{y1}, k_{y2}, k) \left(\frac{dk_{x1}}{dk_x} \right) dk_x dk_{y1} dk_{y2} \\ & \dots (3-1-8) \end{aligned}$$

[0361] 式 (3-1-8) の両辺をフーリエ逆変換することにより、次式 (3-1-9) が得られる。

[0362]

[数164]

$$\begin{aligned}
& \iiint e^{i(k_x' x_1 + k_{y_1}' y_1 + k_{y_2}' y_2)} \delta(x_1) \Phi(y_1, y_2, k) dx_1 dy_1 dy_2 \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \iiint e^{i(k_x' x_1 + k_{y_1}' y_1 + k_{y_2}' y_2)} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x_1 + k_{y_1} y_1 - k_{y_2} y_2)} \\
&\quad \cdot e^{-ik_{x_2} d} b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \left(\frac{dk_{x_1}}{dk_x} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dx_1 dy_1 dy_2 \\
&\tilde{\Phi}(k_{y_1}', k_{y_2}', k) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(k_x - k_x') \delta(k_{y_1} - k_{y_1}') \delta(k_{y_2} - k_{y_2}') \\
&\quad \cdot e^{-ik_{x_2} d} b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \left(\frac{dk_{x_1}}{dk_x} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&\tilde{\Phi}(k_{y_1}', k_{y_2}', k) = e^{-ik_{x_2} d} b(k_{x_1}', k_{y_1}', k_{y_2}', k) \left(\frac{dk_{x_1}}{dk_x} \right)' \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (3-1-9)
\end{aligned}$$

[0363] 式(3-1-9)から記号(′)を外すことにより、次式(3-1-10)が得られる。

[0364] [数165]

$$\begin{aligned}
b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) &= e^{ik_{x_2} d} \tilde{\Phi}(k_{y_1}, k_{y_2}, k) \left(\frac{dk_{x_1}}{dk_{x_1}} \right) \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (3-1-10)
\end{aligned}$$

[0365] 指向性が考慮された散乱場関数は、次式(3-1-11)のように導出される。

[0366]

[数166]

$$\begin{aligned}
& \Phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) \\
&= \iiint_T \iiint_R \varphi(x_1 + \xi, y_1 + \eta, x_2 + u, y_2 + v, z, k) d\xi d\eta du dv \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1} x_1 + k_{y_1} y_1 + k_{x_2} x_2 + k_{y_2} y_2)} e^{-ik_{x_2} x_2} e^{s_4 z} \\
&\quad \cdot \left\{ \frac{2 \sin(k_{x_1} a)}{k_{x_1}} \frac{2 \sin(k_{y_1} b)}{k_{y_1}} \frac{2 \sin(k_{x_2} a)}{k_{x_2}} \frac{2 \sin(k_{y_2} b)}{k_{y_2}} \right\} \\
&\quad \cdot e^{ik_{x_2} d} \tilde{\Phi}(k_{y_1}, k_{y_2}, k) dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
& k_{x_2} = is_3 = \frac{k_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
& k_x = k_{x_1} + is_3 \\
& k_z = -is_4 = \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + is_3)^2} \\
& \dots (3-1-1-1)
\end{aligned}$$

[0367] 式(3-1-1-1)に対して、 $x_2 \rightarrow x_1 = x$ 、及び、 $y_2 \rightarrow y_1 = y$ が適用され、 k について積分が行われることにより、映像化関数が次式(3-1-1-2)のように得られる。

[0368] [数167]

$$\begin{aligned}
& \rho(x, y, z) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{ik_z z} \\
&\quad \cdot \left\{ \frac{2 \sin(k_{x_1} a)}{k_{x_1}} \frac{2 \sin(k_{y_1} b)}{k_{y_1}} \frac{2 \sin(k_{x_2} a)}{k_{x_2}} \frac{2 \sin(k_{y_2} b)}{k_{y_2}} \right\} \\
&\quad \cdot e^{ik_{x_2} d} \tilde{\Phi}(k_{y_1}, k_{y_2}, k) dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} dk \\
& k_{x_1} = \frac{k_x \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
& k_{x_2} = \frac{k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
& \dots (3-1-1-2)
\end{aligned}$$

[0369] 指向性アンテナが用いられる場合、遠方の物体へ波動を送信することが可能になり、遠方の物体から散乱波を受信することが可能になる。そして、上

記のような散乱場関数及び映像化関数に従って、遠方の物体を高い精度で映像化することが可能になる。

[0370] 例えば、複数の指向性アンテナは、地上に固定的に準2次元配列で配置されてもよい。そして、複数の指向性アンテナの上方の飛行物体が映像化されてもよい。例えば、この場合、複数の指向性アンテナの真上方向に沿う広範囲の空間断面が高精度に映像化され得る。そして、これにより、このような空間断面を通過する遠方の飛行物体が映像化され得る。

[0371] <3-2 アレイアンテナが斜面上に配置された場合>

次に、アレイアンテナが斜面に配置され、アレイアンテナを構成する各アンテナが z 軸方向に向いていると仮定される。これに関して、無指向性アンテナが用いられる例は、第2章第6節に示されている。

[0372] 図10は、斜面上に配置された複数の指向性アンテナで構成される準2次元アレイアンテナを示す概念図である。この例において、準2次元アレイアンテナは、1列の送信アレイアンテナ 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。

[0373] 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 軸方向における距離は d で表現される。送信アレイアンテナ TA の z 座標は z_1 で表現され、受信アレイアンテナ RA の z 座標は z_2 で表現される。また、図10の例では、各座標が、 $x_1=0$ 、 $x_2=d$ 、 $z_1=h_1$ 及び $z_2=h_2$ として定められている。

[0374] 送信アレイアンテナ TA は、 n 個の送信アンテナ T_1 、 $\dots$ 、 T_n を含む。受信アレイアンテナ RA は、 n 個の受信アンテナ R_1 、 $\dots$ 、 R_n を含む。 n 個の送信アンテナ T_1 、 $\dots$ 、 T_n のそれぞれは、複数の送信アンテナ素子を含んでいてもよい。また、 n 個の受信アンテナ R_1 、 $\dots$ 、 R_n のそれぞれは、複数の受信アンテナ素子を含んでいてもよい。 n 個の送信アンテナ T_1 、 $\dots$ 、 T_n のそれぞれは、送信器とも表現され得る。 n 個の受信アンテナ R_1 、 $\dots$ 、 R_n のそれぞれは、受信器とも表現され得る。

[0375] 第2章第6節において、散乱場関数は、式（2-6-15）に従って、次式（3-2-1）のように表現される。

[0376] [数168]

$$\begin{aligned}
 & \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\
 &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2)} b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_3 x_2} e^{s_4 z_1} e^{s_5 z_2} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
 & s_3 = \frac{-ik_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-ik_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
 & s_4 = ik_{z_1} = \frac{i \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + is_3)^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
 & s_5 = ik_{z_2} = \frac{i \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + is_3)^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
 & \dots (3-2-1)
 \end{aligned}$$

[0377] ここで、核関数 $b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$ は、計測結果から決定されると仮定される。このまま上式が用いられる場合、無指向性アンテナが仮定された第2章第6節と同様の散乱場関数及び映像化関数が得られる。しかしながら、指向性アンテナが用いられる場合の計測結果は、無指向性アンテナが用いられる場合の計測結果とは異なる。無指向性アンテナが仮定された第2章第6節と同様の散乱場関数及び映像化関数では、指向性アンテナでの計測結果から、正確な情報が得られない。

[0378] 指向性アンテナのサイズは、通常使用される電磁波の波長に比べて十分大きい。したがって、指向性アンテナは、無限小の点とはみなされず、有限のサイズを有する。簡単化のため、アンテナの形状として、 $(2a \times 2b)$ の長方形が用いられる。なお、ここでは、アンテナのサイズ及び形状は、アンテナの送信領域又は受信領域のサイズ及び形状に対応する。ここでは、有限のサイズを有するアンテナで計測された散乱データが検討される。なお、第2章の散乱場理論では、アンテナが無指向性の点状アンテナであると仮定されている。

[0379] 前節において図9を用いて説明された例と同様に、送信アンテナ及び受信アンテナは、有限のサイズを有し、長方形の形状を有する。送信アンテナは、 z 軸方向へ電波を送信し、受信アンテナは、 z 軸方向から電波を受信する。

[0380] 式(3-2-1)において送信位置及び受信位置に関する変数が、次式(3-2-2)のように置換えられる。

[0381] [数169]

$$\begin{aligned} x_1 &\rightarrow x_1 + \xi & y_1 &\rightarrow y_1 + \eta \\ x_2 &\rightarrow x_2 + u & y_2 &\rightarrow y_2 + v \\ &\dots & & \dots \end{aligned} \quad (3-2-2)$$

[0382] 散乱場関数は、変数の置き換えに従って、式(3-2-1)から次式(3-2-3)のように置き換えられる。

[0383] [数170]

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

[0384] 式(3-2-3)の両辺を送受アンテナ内部にわたって積分することで式(3-2-4)が得られる。

[0385] [数171]

$$\begin{aligned} &\Phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\iint_T \iint_R e^{-i\{k_{x_1}(x_1 + \xi) + k_{y_1}(y_1 + \eta) + k_{y_2}(y_2 + v)\}} e^{s_3(x_2 + u)} d\xi d\eta du dv \right] \\ &\quad \cdot b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_4 z_1} e^{s_5 z_2} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\ &\quad \dots (3-2-4) \end{aligned}$$

[0386] 積分範囲Tは、 $-a \leq \xi \leq a$ 及び $-b \leq \eta \leq b$ であり、積分範囲Rは、 $-a \leq u \leq a$ 及び $-b \leq v \leq b$ である。積分結果は、次式(3-2-5)のように得られる。

[0387]

[数172]

$$\begin{aligned}
& \Phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2)} e^{s_3x_2} \\
&\quad \cdot \left\{ \frac{2\sin(k_{x_1}a)}{k_{x_1}} \frac{2\sin(k_{y_1}b)}{k_{y_1}} \frac{2\sin(k_{x_2}a)}{k_{x_2}} \frac{2\sin(k_{y_2}b)}{k_{y_2}} \right\} \\
&\quad \cdot b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_4z_1} e^{s_5z_2} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (3-2-5)
\end{aligned}$$

[0388] ここで、被積分関数は、次式（3-2-6）で示されるようなアンテナの指向性を表す関数 f を含む。

[0389] [数173]

$$\begin{aligned}
& f(k_{x_1}, k_{y_1}) f(k_{x_2}, k_{y_2}) = \left\{ \frac{2\sin(k_{x_1}a)}{k_{x_1}} \frac{2\sin(k_{y_1}b)}{k_{y_1}} \frac{2\sin(k_{x_2}a)}{k_{x_2}} \frac{2\sin(k_{y_2}b)}{k_{y_2}} \right\} \\
& \cdot \cdot \cdot (3-2-6)
\end{aligned}$$

[0390] 次に、核関数 $b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$ を求めることが検討される。この核関数は、無指向性アンテナに関する関数であって、有限サイズを有する指向性アンテナで計測された結果から厳密には求められない。ここでは、有限サイズを有する指向性アンテナで計測された結果が、無指向性アンテナで得られる結果の近似値として用いられる。具体的には、有限サイズを有する指向性アンテナで計測された結果は、 ξ 、 η 、 u 及び v が 0 である場合において得られる結果の近似値として用いられる。

[0391] この場合において、アレイアンテナは、送信位置が $x_1 = 0$ で受信位置が $x_2 = x_1 + d$ で固定されていると仮定される。計測データ $\Phi(y_1, y_2, k)$ は、 $x_1 = 0$ で得られ、次式（3-2-7）の方程式を満たす。

[0392] [数174]

$$\begin{aligned}
& \delta(x_1) \Phi(y_1, y_2, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2)} \\
&\quad \cdot e^{-ik_{x_2}(x_1+d)} b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_4h_1} e^{s_5h_2} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (3-2-7)
\end{aligned}$$

[0393] k_{x_1} から k_x に変数を変換することにより、次式（3-2-8）が得られる

。

[0394] [数175]

$$\begin{aligned} & \delta(x_1)\Phi(y_1, y_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x_1 + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} \\ & \quad \cdot e^{-ik_{x_2} d} b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_4 h_1} e^{s_5 h_2} \left(\frac{dk_{x_1}}{dk_x} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\ & \quad \cdot \cdot \cdot (3-2-8) \end{aligned}$$

[0395] 式（3-2-8）の両辺をフーリエ逆変換することにより、次式（3-2-9）が得られる。

[0396] [数176]

$$\begin{aligned} & \iiint e^{i(k'_x x_1 + k'_{y_1} y_1 + k'_{y_2} y_2)} \delta(x_1)\Phi(y_1, y_2, k) dx_1 dy_1 dy_2 \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \iiint e^{i(k'_x x_1 + k'_{y_1} y_1 + k'_{y_2} y_2)} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x_1 + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} \\ & \quad \cdot e^{-ik_{x_2} d} b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_4 h_1} e^{s_5 h_2} \left(\frac{dk_{x_1}}{dk_x} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dx_1 dy_1 dy_2 \\ & \quad \tilde{\Phi}(k'_{y_1}, k'_{y_2}, k) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(k_x - k'_x) \delta(k_{y_1} - k'_{y_1}) \delta(k_{y_2} - k'_{y_2}) \\ & \quad \cdot e^{-ik_{x_2} d} b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_4 h_1} e^{s_5 h_2} \left(\frac{dk_{x_1}}{dk_x} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\ & \quad \tilde{\Phi}(k'_{y_1}, k'_{y_2}, k) = e^{-ik_{x_2} d} b(k'_{x_1}, k'_{y_1}, k'_{y_2}, k) e^{s_4 h_1} e^{s_5 h_2} \left(\frac{dk_{x_1}}{dk_x} \right)' \\ & \quad \cdot \cdot \cdot (3-2-9) \end{aligned}$$

[0397] 式（3-2-9）から記号（'）を外すことにより、次式（3-2-10）が得られる。

[0398] [数177]

$$\begin{aligned} & b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) = e^{ik_{x_2} d} e^{-s_4 h_1} e^{-s_5 h_2} \tilde{\Phi}(k_{y_1}, k_{y_2}, k) \left(\frac{dk_{x_1}}{dk_{x_1}} \right) \\ & \quad \cdot \cdot \cdot (3-2-10) \end{aligned}$$

[0399] 指向性が考慮された散乱場関数は、次式 (3-2-11) のように導出される。

[0400] [数178]

$$\begin{aligned} & \Phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2)} e^{-ik_{x_2}x_2} e^{s_4z_1} e^{s_5z_2} \\ & \quad \cdot \left\{ \frac{2\sin(k_{x_1}a)}{k_{x_1}} \frac{2\sin(k_{y_1}b)}{k_{y_1}} \frac{2\sin(k_{x_2}a)}{k_{x_2}} \frac{2\sin(k_{y_2}b)}{k_{y_2}} \right\} \\ & \quad \cdot e^{ik_{x_2}d} e^{-s_4h_1} e^{-s_5h_2} \tilde{\Phi}(k_{y_1}, k_{y_2}, k) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\ & k_{x_2} = is_3 = \frac{k_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_3}^2}} \\ & k_x = k_{x_1} + is_3 \\ & k_{z_1} = -is_4 = \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_3}^2})^2 - (k_{x_1} + is_3)^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ & k_{z_2} = -is_5 = \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_3}^2})^2 - (k_{x_1} + is_3)^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ & \dots (3-2-11) \end{aligned}$$

[0401] 式 (3-2-11) に対して、 $x_2 \rightarrow x_1 = x$ 、 $y_2 \rightarrow y_1 = y$ 、及び、 $z_1 \rightarrow z_2 = z$ が適用され、 k について積分が行われることにより、映像化関数が次式 (3-2-12) のように得られる。

[0402] [数179]

$$\begin{aligned} & \rho(x, y, z) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{s_4 z} e^{s_5 z} \\ & \quad \cdot \left\{ \frac{2\sin(k_{x_1}a)}{k_{x_1}} \frac{2\sin(k_{y_1}b)}{k_{y_1}} \frac{2\sin(k_{x_2}a)}{k_{x_2}} \frac{2\sin(k_{y_2}b)}{k_{y_2}} \right\} \\ & \quad \cdot e^{ik_{x_2}d} e^{-ik_{x_1}h_1} e^{-ik_{x_2}h_2} \tilde{\Phi}(k_{y_1}, k_{y_2}, k) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk \\ & \dots (3-2-12) \end{aligned}$$

[0403] これにより、平面上に複数の指向性アンテナを配置することが困難である場合であっても、曲面上に配置された複数の指向性アンテナを用いて、物体

を高い精度で映像化することが可能になる。

[0404] <3-3 指向性アンテナが回転する場合>

本節では、さらに、前節において示された指向性アンテナが機械的又は電氣的に回転し、送信及び受信に関する指向性の方向が変更される場合の散乱場理論を説明する。

[0405] 例えば、指向性アンテナが機械的に回転することは、指向性アンテナが物理的に固体の物体として回転することに対応する。また、例えば、指向性アンテナが電氣的に回転することは、指向性アンテナがフェーズドアレイアンテナとして動作して送信又は受信のタイミングを制御することで指向性アンテナが回転しているかのように指向性の方向を変更することに対応する。

[0406] 図11は、アンテナの回転を示す概念図である。具体的には、図11には、アンテナのx軸周りの機械的又は電氣的な回転が示されている。アンテナが機械的又は電氣的に回転することで、送信位置及び受信位置が変化する。

[0407] 図12は、x軸周りの機械的又は電氣的な回転の行列表示を示す概念図である。アンテナがx軸周りに角度 α で機械的又は電氣的に回転した場合、アンテナ表面の点 $(\xi, \eta, 0)$ は、次式(3-3-1)のように変換される。

[0408] [数180]

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \cos \alpha \\ \eta \sin \alpha \end{pmatrix} \quad \dots (3-3-1)$$

[0409] したがって、この場合、散乱場関数の被積分項が、次式(3-3-2)のように変化する。

[0410]

[数181]

$$\begin{aligned}
& e^{-i(k_{x_1}x_1+k_{y_1}y_1+k_{z_1}z_1)} e^{s_3x_2} e^{s_4z_1} e^{s_5z_2} \Rightarrow \\
& e^{-i\{k_{x_1}(x_1+\xi)+k_{y_1}(y_1+\eta\cos\alpha)+k_{z_1}(z_1+v\cos\alpha)\}} e^{-ik_{x_2}(x_2+u)} e^{ik_{z_1}(z_1+\eta\sin\alpha)} e^{ik_{z_2}(z_2+v\sin\alpha)} \\
& = e^{-i\{k_{x_1}x_1+k_{y_1}y_1+k_{z_1}z_1\}} e^{-ik_{x_2}x_2} e^{ik_{z_1}z_1} e^{ik_{z_2}z_2} \\
& \quad \cdot e^{-ik_{x_1}\xi} e^{-ik_{y_1}\eta\cos\alpha+ik_{z_1}\eta\sin\alpha} e^{-ik_{x_2}u} e^{-ik_{z_2}v\cos\alpha+ik_{z_2}v\sin\alpha} \\
& \quad \cdot \dots (3-3-2)
\end{aligned}$$

[0411] 式(3-3-2)から、指向性を表す関数が次式(3-3-3)のように得られる。

[0412] [数182]

$$\begin{aligned}
f_1(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{z_1}) &= \frac{2\sin(a(k_{x_1}))}{k_{x_1}} \frac{2\sin(b(-k_{y_1}\cos\alpha+k_{z_1}\sin\alpha))}{-k_{y_1}\cos\alpha+k_{z_1}\sin\alpha} \\
f_2(k_{x_2}, k_{y_2}, k_{z_2}) &= \frac{2\sin(a(k_{x_2}))}{k_{x_2}} \frac{2\sin(b(-k_{y_2}\cos\alpha+k_{z_2}\sin\alpha))}{-k_{y_2}\cos\alpha+k_{z_2}\sin\alpha} \\
& \quad \cdot \dots (3-3-3)
\end{aligned}$$

[0413] 図13は、y軸周りの機械的又は電気的な回転の行列表示を示す概念図である。アンテナがy軸周りに角度 β で機械的又は電気的に回転した場合、アンテナ表面の点(ξ 、 η 、0)は、次式(3-3-4)のように変換される。

[0414] [数183]

$$\begin{aligned}
& \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \xi\cos\beta \\ \eta \\ -\xi\sin\beta \end{pmatrix} \\
& \quad \cdot \dots (3-3-4)
\end{aligned}$$

[0415] したがって、この場合、散乱場関数の被積分項が、次式(3-3-5)のように変化する。

[0416] [数184]

$$\begin{aligned}
& e^{-i(k_{x_1}x_1+k_{y_1}y_1+k_{z_1}z_1)} e^{s_3x_2} e^{s_4z_1} e^{s_5z_2} \Rightarrow \\
& e^{-i\{k_{x_1}(x_1+\xi\cos\beta)+k_{y_1}(y_1+\eta)+k_{z_1}(z_2+v)\}} e^{s_3(x_2+u\cos\beta)} e^{s_4z_1} e^{s_5z_2} \\
& = e^{-i\{k_{x_1}x_1+k_{y_1}y_1+k_{z_1}z_1\}} e^{s_3x_2} e^{s_4z_1} e^{s_5z_2} e^{-ik_{x_1}\xi\cos\beta-ik_{y_1}\eta} e^{-ik_{x_2}u\cos\beta-ik_{z_2}v} \\
& \quad \cdot \dots (3-3-5)
\end{aligned}$$

[0417] 式(3-3-5)から、指向性を表す関数が次式(3-3-6)のように得られる。

[0418] [数185]

$$f_1(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{z_1}) = \frac{2 \sin(\alpha(-k_{x_1} \cos \beta))}{-k_{x_1} \cos \beta} \frac{2 \sin(bk_{y_1})}{k_{y_1}}$$

$$f_2(k_{x_2}, k_{y_2}, k_{z_2}) = \frac{2 \sin(\alpha(-k_{x_2} \cos \beta))}{-k_{x_2} \cos \beta} \frac{2 \sin(bk_{y_2})}{k_{y_2}}$$

$$\dots (3-3-6)$$

[0419] x 軸周りの角度 α の機械的又は電氣的な回転と y 軸周りの角度 β の機械的又は電氣的な回転との合成は、次式(3-3-7)のように表現される。

[0420] [数186]

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ \sin \alpha \sin \beta & \cos \alpha & -\sin \alpha \cos \beta \\ -\cos \alpha \sin \beta & \sin \alpha & \cos \alpha \cos \beta \end{pmatrix}$$

$$\dots (3-3-7)$$

[0421] この合成により、アンテナ面内の点 $(\xi, \eta, 0)$ は、次式(3-3-8)のように変換される。

[0422] [数187]

$$\begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ \sin \alpha \sin \beta & \cos \alpha & -\sin \alpha \cos \beta \\ -\cos \alpha \sin \beta & \sin \alpha & \cos \alpha \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \xi \cos \beta \\ \xi \sin \alpha \sin \beta + \eta \cos \alpha \\ -\xi \cos \alpha \sin \beta + \eta \sin \alpha \end{pmatrix}$$

$$\dots (3-3-8)$$

[0423] したがって、散乱場関数の被積分項が、次式(3-3-9)のように変化する。

[0424]

[数188]

$$\begin{aligned}
& e^{-i(k_{x_1}x_1+k_{y_1}y_1+k_{z_2}z_2)}e^{s_3x_2}e^{s_4z_1}e^{s_5z_2} \Rightarrow \\
& e^{-i\{k_{x_1}(x_1+\xi\cos\beta)+k_{y_1}(y_1+\xi\sin\alpha\sin\beta+\eta\cos\alpha)+k_{z_2}(z_2+u\sin\alpha\sin\beta+v\cos\alpha)\}} \\
& \cdot e^{ik_{x_2}(x_2+u\cos\beta)}e^{ik_{z_1}(z_1-\xi\cos\alpha\sin\beta+\eta\sin\alpha)}e^{ik_{z_2}(z_2-u\cos\alpha\sin\beta+v\sin\alpha)} \\
& = e^{-i\{k_{x_1}x_1+k_{y_1}y_1+k_{z_2}z_2\}}e^{s_3x_2}e^{s_4z_1}e^{s_5z_2} \\
& \cdot e^{-ik_{x_1}\xi\cos\beta-ik_{z_1}\xi\cos\alpha\sin\beta-ik_{y_1}\eta\cos\alpha+ik_{z_1}\eta\sin\alpha} \\
& \cdot e^{-ik_{x_2}u\cos\beta-ik_{z_2}u\cos\alpha\sin\beta-ik_{z_2}v\cos\alpha+ik_{z_2}v\sin\alpha} \\
& \cdot \dots (3-3-9)
\end{aligned}$$

[0425] 式(3-3-9)から、指向性を表す関数が次式(3-3-10)のように得られる。

[0426] [数189]

$$\begin{aligned}
& f_1(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{z_1}) \\
& = \frac{2\sin(a(-k_{x_1}\cos\beta-k_{z_1}\cos\alpha\sin\beta))}{-k_{x_1}\cos\beta-k_{z_1}\cos\alpha\sin\beta} \frac{2\sin(b(-k_{y_1}\cos\alpha+k_{z_1}\sin\alpha))}{-k_{y_1}\cos\alpha+k_{z_1}\sin\alpha} \\
& f_2(k_{x_2}, k_{y_2}, k_{z_2}) \\
& = \frac{2\sin(a(-k_{x_2}\cos\beta-k_{z_2}\cos\alpha\sin\beta))}{-k_{x_2}\cos\beta-k_{z_2}\cos\alpha\sin\beta} \frac{2\sin(b(-k_{y_2}\cos\alpha+k_{z_2}\sin\alpha))}{-k_{y_2}\cos\alpha+k_{z_2}\sin\alpha} \\
& \cdot \dots (3-3-10)
\end{aligned}$$

[0427] 前節のようなアレイアンテナの配置において、アンテナの機械的又は電氣的な回転が上記のいずれであっても、散乱場関数は、次式(3-3-11)のように表現される。

[0428] [数190]

$$\begin{aligned}
& \Phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\
& = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1+k_{y_1}y_1+k_{z_2}z_2)}e^{-ik_{x_2}x_2}e^{s_4z_1}e^{s_5z_2} \\
& \cdot \{f_1(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{z_1})f_2(k_{x_2}, k_{y_2}, k_{z_2})\} \\
& \cdot e^{ik_{x_2}d}e^{-s_4h_1}e^{-s_5h_2}\tilde{\Phi}(k_{y_1}, k_{y_2}, k)dk_xdk_{y_1}dk_{y_2} \\
& \cdot \dots (3-3-11)
\end{aligned}$$

[0429] そして、映像化関数は、次式(3-3-12)のように表現される。

[0430]

[数191]

$$\begin{aligned}
\rho(x, y, z) &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_{y1} y + k_{y2} y)} e^{s_4 z} e^{s_5 z} \\
&\quad \cdot \{f_1(k_{x1}, k_{y1}, k_{z1}) f_2(k_{x2}, k_{y2}, k_{z2})\} \\
&\quad \cdot e^{ik_{z2} d} e^{-ik_{z1} h_1} e^{-ik_{z2} h_2} \tilde{\Phi}(k_{y1}, k_{y2}, k) dk_x dk_{y1} dk_{y2} dk \\
&\quad \cdot \dots (3-3-12)
\end{aligned}$$

[0431] 指向性アンテナの機械的又は電氣的な回転によって、適応的に定められる方向に関して、遠方の物体へ波動を送信することが可能になり、遠方の物体から散乱波を受信することが可能になる。よって、適応的に定められる方向に関して、遠方の物体を高い精度で映像化することが可能になる。

[0432] <3-4 機械的又は電氣的な回転走査が行われる場合>

図14は、機械的又は電氣的な回転走査を示す概念図である。例えば、指向性アレイアンテナは、各アンテナを機械的又は電氣的に回転することにより、空間を走査する。

[0433] アンテナの回転角が (α, β) である場合において、散乱データは、 $\Phi(k_{y1}, k_{y2}, k, \alpha, \beta)$ と表現される。また、その k_{y1}, k_{y2} に関するフーリエ変換は、

[数192]

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

と表現される。そして、そのアンテナ角度での指向性関数は、 $f_1(k_{x1}, k_{y1}, k_{z1}, \alpha, \beta)$ 及び $f_2(k_{x2}, k_{y2}, k_{z2}, \alpha, \beta)$ と表現される。これらの記号が用いられる場合、散乱場関数は、次式(3-4-1)のように表現される。

[0434]

[数193]

$$\begin{aligned}
& \Phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{z_1}z_1)} e^{-i(k_{x_2}x_2 + k_{y_2}y_2 + k_{z_2}z_2)} e^{s_4 z_1} e^{s_5 z_2} \\
&\quad \cdot \left\{ \sum_{\alpha} \sum_{\beta} f_1(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{z_1}, \alpha, \beta) \cdot f_2(k_{x_2}, k_{y_2}, k_{z_2}, \alpha, \beta) \cdot \tilde{\Phi}(k_{y_1}, k_{y_2}, k, \alpha, \beta) \right\} \\
&\quad \cdot e^{i k_{x_2} d} e^{-s_4 h_1} e^{-s_5 h_2} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (3-4-1)
\end{aligned}$$

[0435] そして、映像関数は、次式（3-4-2）のように表現される。

[0436] [数194]

$$\begin{aligned}
& \rho(x, y, z) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{s_4 z} e^{s_5 z} \\
&\quad \cdot \left\{ \sum_{\alpha} \sum_{\beta} f_1(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{z_1}, \alpha, \beta) \cdot f_2(k_{x_2}, k_{y_2}, k_{z_2}, \alpha, \beta) \cdot \tilde{\Phi}(k_{y_1}, k_{y_2}, k, \alpha, \beta) \right\} \\
&\quad \cdot e^{i k_{x_2} d} e^{-i k_{z_1} h_1} e^{-i k_{z_2} h_2} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (3-4-2)
\end{aligned}$$

[0437] 機械的又は電氣的な回転走査によって、様々な方向に関して、遠方の物体へ波動を送信することが可能になり、遠方の物体から散乱波を受信することが可能になる。よって、様々な方向に関して、遠方の物体を高い精度で映像化することが可能になる。

[0438] <3-5 変形例>

本章において、複数の送信アンテナ及び複数の受信アンテナは、同じサイズを有している。しかしながら、複数の送信アンテナ及び複数の受信アンテナは、互いに異なるサイズを有していてもよい。

[0439] また、本章において、複数の送信アンテナ及び複数の受信アンテナは、矩形の形状を有している。しかしながら、複数の送信アンテナ及び複数の受信アンテナは、矩形の形状とは異なる形状を有していてもよい。また、複数の送信アンテナ及び複数の受信アンテナは、互いに異なる形状を有していてもよい。

- [0440] また、本章において、複数の送信アンテナ及び複数の受信アンテナの位置は、固定されているが、移動してもよい。これにより、様々な位置に対応するデータが取得され得る。
- [0441] また、本章において、複数の送信アンテナ及び複数の受信アンテナは、準2次元配列で配置されている。しかしながら、複数の送信アンテナ及び複数の受信アンテナは、準2次元配列とは異なる配列で配置されてもよい。
- [0442] また、本章において、複数の送信アンテナが1列で配置され、複数の受信アンテナが1列で配置されている。しかしながら、複数の送信アンテナが複数の列で配置されてもよいし、複数の受信アンテナが複数の列で配置されてもよい。例えば、1つの送信アンテナ列に対して、複数の受信アンテナ列が配置されてもよいし、1つの受信アンテナ列に対して、複数の受信アンテナ列が配置されてもよい。
- [0443] 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、本章において示されたいずれかの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。
- [0444] あるいは、複数の送信アンテナ列及び複数の受信アンテナ列が交互に配置されてもよい。そして、列に垂直な方向（ x 軸方向）に関して、アンテナを移動させることなく、様々な位置に対応するデータが取得されてもよい。
- [0445] また、本章において、1つの送信アンテナ列に含まれる送信アンテナの数は、1つの受信アンテナ列に含まれる受信アンテナの数と同じである。しかしながら、1つの送信アンテナ列に含まれる送信アンテナの数は、1つの受信アンテナ列に含まれる受信アンテナの数とは異なってもよい。
- [0446] また、本章の第3節及び第4節において、複数の送信アンテナ及び複数の受信アンテナは、同じ回転角で機械的又は電氣的に回転する。しかしながら、複数の送信アンテナ及び複数の受信アンテナは、互いに異なる回転角で機

械的又は電氣的に回転してもよい。

[0447] 上記のような変形例においても、上述された理論と同種の理論に基づいて、散乱場関数及び映像化関数が導出され得る。

[0448] <4 映像化装置の構成及び動作>

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

[0449] ここで、散乱波の計測に用いられる波動は、例えば、電波であり、マイクロ波、ミリ波又はテラヘルツ波等であってもよい。また、波動として光又は音等が用いられてもよい。また、計測領域は、空中の領域であってもよく、物体は、飛行物体であってもよい。計測領域における物体は、周辺の媒質の物理特性とは異なる物理特性を有する。具体的には、この物理特性は、波動の反射率に対応する物理特性である。波動として電波が用いられる場合、物理特性は誘電率であってもよい。

[0450] 図15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15に示された映像化装置100は、複数の送信器101、複数の受信器102及び情報処理回路103を備える。また、映像化装置100は、ディスプレイ104を備えていてもよい。

[0451] 各送信器101は、波動を送信する回路である。具体的には、各送信器101は、送信領域を有し、送信領域から計測領域へ波動を送信する。また、各送信器101は、送信アンテナであってもよいし、複数の送信アンテナ素子等のような複数の送信素子で構成されていてもよい。

[0452] 各受信器102は、波動の散乱波を受信する回路である。具体的には、各受信器102は、受信領域を有し、受信領域において計測領域から波動の散乱波を受信する。また、各受信器102は、受信アンテナであってもよいし、複数の受信アンテナ素子等のような複数の受信素子で構成されていてもよい。

[0453] 送信領域及び受信領域のそれぞれは、有限のサイズを有する。有限のサイズは、複数の送信器101及び複数の受信器102において同じであっても

よい。送信領域及び受信領域のそれぞれは、矩形の形状であってもよい。複数の送信器 101 及び複数の受信器 102 は、準 2 次元配列で配置されていてもよい。

[0454] 情報処理回路 103 は、情報処理を行う回路である。具体的には、情報処理回路 103 は、散乱波の計測データを取得し、散乱波の計測データを用いて、計測領域における物体を映像化する。例えば、情報処理回路 103 は、計測データを用いて物体を映像化する際に、上述された理論に示される演算処理を行う。

[0455] また、情報処理回路 103 は、コンピュータ、又は、コンピュータのプロセッサであってもよい。情報処理回路 103 は、メモリからプログラムを読み出し、プログラムを実行することにより情報処理を行ってもよい。また、情報処理回路 103 は、計測データに基づいて、計測領域における物体を映像化する専用回路であってもよい。

[0456] また、情報処理回路 103 は、複数の送信器 101 及び複数の受信器 102 と通信可能であってもよい。そして、情報処理回路 103 は、複数の送信器 101 及び複数の受信器 102 の動作を制御してもよい。また、情報処理回路 103 は、複数の送信器 101 及び複数の受信器 102 から位置情報及び計測データを取得してもよい。

[0457] また、情報処理回路 103 は、物体の映像化において、物体を示す画像を生成してもよい。そして、情報処理回路 103 は、物体を示す画像をディスプレイ 104 等に出力してもよい。あるいは、情報処理回路 103 は、物体を示す画像をプリンタ（図示せず）に出力してもよい。あるいは、情報処理回路 103 は、有線又は無線の通信によって画像を電子データとして他の装置（図示せず）に送信してもよい。

[0458] 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。

- [0459] 図16は、図15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15に示された映像化装置100の複数の送信器101、複数の受信器102及び情報処理回路103等が、図16に示された動作を行う。
- [0460] まず、各送信器101は、送信領域から計測領域へ波動を送信する（S101）。そして、各受信器102は、受信領域において計測領域から波動の散乱波を受信する（S102）。
- [0461] 次に、情報処理回路103は、計測データを用いて、散乱場関数を導出する（S103）。ここで、散乱場関数は、波動の送信位置及び散乱波の受信位置が入力されて受信位置における散乱波の量が出力される関数であり、送信領域及び受信領域のそれぞれの有限サイズが反映された関数である。
- [0462] そして、情報処理回路103は、散乱場関数を用いて映像化関数を導出する（S104）。映像化関数は、映像化対象位置が入力されて映像化対象位置の画像強度が出力される関数であって、送信位置及び受信位置として映像化対象位置を散乱場関数に入力することで散乱場関数から出力される量に基づいて定められる関数である。
- [0463] 最後に、情報処理回路103は、映像化関数を用いて、計測領域における物体を映像化する（S105）。
- [0464] これにより、映像化装置100は、計測データを用いて計測領域の散乱の状態を導出することができる。したがって、映像化装置100は、計測領域における物体を高い精度で映像化することができる。また、映像化装置100は、有限サイズを有する送信領域及び受信領域の指向性に従って、遠方の物体へ波動を送信することができ、遠方の物体から散乱波を受信することができる。よって、映像化装置100は、広範囲の計測領域における遠方の物体を高い精度で映像化することができる。
- [0465] 例えば、上記の有限サイズは、複数の送信器101及び複数の受信器102において同じであってもよい。これにより、映像化装置100は、複数の送信器101及び複数の受信器102において同じ演算処理を適用すること

ができる。したがって、映像化装置 100 は、演算処理の複雑化を抑制することができる。

[0466] また、例えば、送信領域及び受信領域のそれぞれは、矩形の領域であってもよい。これにより、映像化装置 100 は、単純な形状に対応する演算処理を行うことができる。したがって、映像化装置 100 は、演算処理の複雑化を抑制することができる。

[0467] また、例えば、複数の送信器 101 は、直線上に配列されてもよい。また、複数の受信器 102 は、複数の送信器 101 が配列される直線に平行な別の直線上に配列されてもよい。そして、複数の送信器 101 が配列される直線と、複数の受信器 102 が配列される直線との距離が散乱場関数に反映されてもよい。

[0468] これにより、映像化装置 100 は、準 2 次元に配列された複数の送信器 101 と複数の受信器 102 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、複数の送信器 101 と複数の受信器 102 との間に間隔が設けられているため、映像化装置 100 は、計測領域へ波動を効率的に送信することができ、計測領域から散乱波を効率的に受信することができる。

[0469] そして、映像化装置 100 は、散乱波の計測データ、及び、複数の送信器 101 と複数の受信器 102 との間の距離に従って導出される散乱場関数を用いて、物体を高い精度で映像化することができる。

[0470] また、例えば、散乱場関数は、

[数195]

$$\begin{aligned} & \Phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1} x_1 + k_{y_1} y_1 + k_{x_2} x_2 + k_{y_2} y_2)} e^{-ik_z z} e^{ik_z z} \\ & \quad \cdot \left\{ \frac{2 \sin(k_{x_1} a)}{k_{x_1}} \frac{2 \sin(k_{y_1} b)}{k_{y_1}} \frac{2 \sin(k_{x_2} a)}{k_{x_2}} \frac{2 \sin(k_{y_2} b)}{k_{y_2}} \right\} \\ & \quad \cdot e^{ik_z d} \tilde{\Phi}(k_{y_1}, k_{y_2}, k) dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \end{aligned}$$

で表現されてもよい。

[0471] ここで、 x_1 及び y_1 は、送信位置の x 座標及び y 座標を示す。また、 x_2 及び y_2 は、受信位置の x 座標及び y 座標を示す。また、 z は、送信位置及び受信位置の z 座標を示す。また、 k は、波動の波数を示す。また、 k_x 、 k_{y1} 及び k_{y2} は、積分変数を示す。また、 d は、上記の距離を示す。

[0472] また、

[数196]

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

は、 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。

[0473] また、 k_{x1} 、 k_{x2} 及び k_z は、

[数197]

$$\begin{aligned} k_{x_1} &= \frac{k_x \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ k_{x_2} &= \frac{k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ k_z &= \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2} \end{aligned}$$

で定められる。

[0474] また、 a は、 x 軸方向における上記の有限サイズの $1/2$ を示す。また、 b は、 y 軸方向における上記の有限サイズの $1/2$ を示す。

[0475] 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 座標を有する場合の散乱場関数を用いて、物体を高い精度で映像化することができる。

[0476] また、例えば、映像化関数は、

[数198]

$$\begin{aligned} \rho(x, y, z) &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_{y1} y + k_{y2} y)} e^{ik_z z} \\ &\quad \cdot \left\{ \frac{2 \sin(k_{x1} a)}{k_{x1}} \frac{2 \sin(k_{y1} b)}{k_{y1}} \frac{2 \sin(k_{x2} a)}{k_{x2}} \frac{2 \sin(k_{y2} b)}{k_{y2}} \right\} \\ &\quad \cdot e^{ik_{x2} d} \tilde{\Phi}(k_{y1}, k_{y2}, k) dk_x dk_{y1} dk_{y2} \end{aligned}$$

で表現されてもよい。

[0477] ここで、映像化関数に入力される x 、 y 及び z は、映像化対象位置の x 座標、 y 座標及び z 座標を示す。

[0478] 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 座標を有する場合の映像化関数を用いて、物体を高い精度で映像化することができる。

[0479] また、例えば、散乱場関数は、

[数199]

$$\begin{aligned} \Phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_{x1} x_1 + k_{y1} y_1 + k_{y2} y_2)} e^{-ik_{x2} x_2} e^{ik_{x1} z_1} e^{ik_{x2} z_2} \\ &\quad \cdot \left\{ \frac{2 \sin(k_{x1} a)}{k_{x1}} \frac{2 \sin(k_{y1} b)}{k_{y1}} \frac{2 \sin(k_{x2} a)}{k_{x2}} \frac{2 \sin(k_{y2} b)}{k_{y2}} \right\} \\ &\quad \cdot e^{ik_{x2} d} e^{-ik_{x1} h_1} e^{-ik_{x2} h_2} \tilde{\Phi}(k_{y1}, k_{y2}, k) dk_x dk_{y1} dk_{y2} \end{aligned}$$

で表現されてもよい。

[0480] ここで、 x_1 、 y_1 及び z_1 は、送信位置の x 座標、 y 座標及び z 座標を示す。また、 x_2 、 y_2 及び z_2 は、受信位置の x 座標、 y 座標及び z 座標を示す。また、 k は、波動の波数を示す。また、 k_x 、 k_{y1} 及び k_{y2} は、積分変数を示す。また、 d は、 x 軸方向における上記の距離を示す。また、 h_1 は、計測データに対応する送信位置の z 座標を示す。また、 h_2 は、計測データに対応する受信位置の z 座標を示す。

[0481] また、

[数200]

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

は、 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。

[0482] また、 k_{x1} 、 k_{x2} 、 k_{z1} 及び k_{z2} は、

[数201]

$$\begin{aligned} k_{x1} &= \frac{k_x \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ k_{x2} &= \frac{k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ k_{z1} &= \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ k_{z2} &= \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \end{aligned}$$

で定められる。

[0483] また、 a は、 x 軸方向における上記の有限サイズの $1/2$ を示す。また、

b は、 y 軸方向における上記の有限サイズの $1/2$ を示す。

[0484] 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 座標を有し得る場合の散乱場関数を用いて、物体を高い精度で映像化することができる。

[0485] また、例えば、映像化関数は、

[数202]

$$\begin{aligned} \rho(x, y, z) &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{ik_{z1} z} e^{ik_{z2} z} \\ &\quad \cdot \left\{ \frac{2 \sin(k_{x1} a)}{k_{x1}} \frac{2 \sin(k_{y1} b)}{k_{y1}} \frac{2 \sin(k_{x2} a)}{k_{x2}} \frac{2 \sin(k_{y2} b)}{k_{y2}} \right\} \\ &\quad \cdot e^{ik_{x2} d} e^{-ik_{z1} h_1} e^{-ik_{z2} h_2} \tilde{\Phi}(k_{y_1}, k_{y_2}, k) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk \end{aligned}$$

で表現されてもよい。

[0486] ここで、映像化関数に入力される x 、 y 及び z は、映像化対象位置の x 座標、 y 座標及び z 座標を示す。

[0487] 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 座標を有し得る場合の映像化関数を用いて、物体を高い精度で映像化することができる。

[0488] また、例えば、各送信器 101 は、送信領域を機械的又は電氣的に回転させることにより、送信領域の面の法線方向を変化させてもよい。また、各受信器 102 は、受信領域を機械的又は電氣的に回転させることにより、受信領域の面の法線方向を変化させてもよい。そして、情報処理回路 103 は、送信領域及び受信領域の回転後の計測データを用いて、計測領域における物体を映像化してもよい。

[0489] これにより、映像化装置 100 は、送信領域及び受信領域のそれぞれの面の法線方向を変化させることができる。したがって、映像化装置 100 は、送信領域及び受信領域のそれぞれの指向性の方向を変化させることができる。よって、映像化装置 100 は、指向性の方向を変化させ、その方向において遠方の物体を映像化することができる。

[0490] また、例えば、散乱場関数は、

[数203]

$$\begin{aligned} & \Phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x1}x_1 + k_{y1}y_1 + k_{z1}z_1)} e^{-ik_{x2}x_2} e^{ik_{y2}y_2} e^{ik_{z2}z_2} \\ & \quad \cdot \left\{ f_1(k_{x1}, k_{y1}, k_{z1}) f_2(k_{x2}, k_{y2}, k_{z2}) \right\} \\ & \quad \cdot e^{ik_{x2}d} e^{-ik_{x1}h_1} e^{-ik_{z2}h_2} \tilde{\Phi}(k_{y1}, k_{y2}, k) dk_x dk_{y1} dk_{y2} \end{aligned}$$

で表現されてもよい。

[0491] ここで、 x_1 、 y_1 及び z_1 は、送信位置の x 座標、 y 座標及び z 座標を示す。また、 x_2 、 y_2 及び z_2 は、受信位置の x 座標、 y 座標及び z 座標を示す。また、 k は、波動の波数を示す。また、 k_x 、 k_{y1} 及び k_{y2} は、積分変数を示す。

す。また、 d は、 x 軸方向における上記の距離を示す。また、 h_1 は、計測データに対応する送信位置の z 座標を示す。また、 h_2 は、計測データに対応する受信位置の z 座標を示す。

[0492] また、

[数204]

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

は、 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。

[0493] また、 k_{x1} 、 k_{x2} 、 k_{z1} 及び k_{z2} は、

[数205]

$$\begin{aligned} k_{x_1} &= \frac{k_x \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ k_{x_2} &= \frac{k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ k_{z_1} &= \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ k_{z_2} &= \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \end{aligned}$$

で定められる。

[0494] また、 f_1 及び f_2 は、

[数206]

$$\begin{aligned} f_1(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{z_1}) &= \frac{2 \sin(a(-k_{x_1} \cos \beta - k_{z_1} \cos \alpha \sin \beta))}{-k_{x_1} \cos \beta - k_{z_1} \cos \alpha \sin \beta} \frac{2 \sin(b(-k_{y_1} \cos \alpha + k_{z_1} \sin \alpha))}{-k_{y_1} \cos \alpha + k_{z_1} \sin \alpha} \\ f_2(k_{x_2}, k_{y_2}, k_{z_2}) &= \frac{2 \sin(a(-k_{x_2} \cos \beta - k_{z_2} \cos \alpha \sin \beta))}{-k_{x_2} \cos \beta - k_{z_2} \cos \alpha \sin \beta} \frac{2 \sin(b(-k_{y_2} \cos \alpha + k_{z_2} \sin \alpha))}{-k_{y_2} \cos \alpha + k_{z_2} \sin \alpha} \end{aligned}$$

で定められる。

[0495] また、 a は、 x 軸方向における上記の有限サイズの $1/2$ を示す。また、 b は、 y 軸方向における上記の有限サイズの $1/2$ を示す。また、 α は、送信領域及び受信領域の x 軸周りの機械的又は電氣的な回転角を示す。また、 β は、送信領域及び受信領域の y 軸周りの機械的又は電氣的な回転角を示す。

[0496] これにより、映像化装置 100 は、指向性の方向を変化させることができる場合の散乱場関数を用いて、物体を高い精度で映像化することができる。

[0497] また、例えば、映像化関数は、

[数207]

$$\begin{aligned} \rho(x, y, z) &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_y y + k_z z)} e^{ik_x z} e^{ik_y z} \\ &\quad \cdot \{f_1(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{z_1}) f_2(k_{x_2}, k_{y_2}, k_{z_2})\} \\ &\quad \cdot e^{ik_{x_2} d} e^{-ik_{x_1} h_1} e^{-ik_{z_2} h_2} \tilde{\Phi}(k_{y_1}, k_{y_2}, k) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk \end{aligned}$$

で表現されてもよい。

[0498] ここで、映像化関数に入力される x 、 y 及び z は、映像化対象位置の x 座標、 y 座標及び z 座標を示す。

[0499] これにより、映像化装置 100 は、指向性の方向を変化させることができる場合の映像化関数を用いて、物体を高い精度で映像化することができる。

[0500] また、例えば、各送信器 101 は、送信領域を複数の回転角で機械的又は電氣的に回転させることにより、送信領域の面の法線方向を複数の方向に変化させてもよい。また、各受信器 102 は、受信領域を複数の回転角で機械的又は電氣的に回転させることにより、受信領域の面の法線方向を複数の方向に変化させてもよい。そして、情報処理回路 103 は、機械的又は電氣的な複数の回転角に対する計測データを用いて、計測領域における物体を映像化してもよい。

[0501] これにより、映像化装置 100 は、送信領域及び受信領域のそれぞれの面の法線方向を複数の方向に変化させることができる。したがって、映像化装

置 100 は、送信領域及び受信領域のそれぞれの指向性の方向を複数の方向に変化させることができる。よって、映像化装置 100 は、指向性の方向を複数の方向に変化させ、複数の方向において遠方の物体を映像化することができる。

[0502] また、例えば、散乱場関数は、

[数208]

$$\begin{aligned} & \Phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{z_1}z_1)} e^{-ik_{x_2}x_2} e^{ik_{z_1}z_1} e^{ik_{z_2}z_2} \\ & \quad \cdot \left\{ \sum_{\alpha} \sum_{\beta} f_1(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{z_1}, \alpha, \beta) \cdot f_2(k_{x_2}, k_{y_2}, k_{z_2}, \alpha, \beta) \cdot \tilde{\Phi}(k_{y_1}, k_{y_2}, k, \alpha, \beta) \right\} \\ & \quad \cdot e^{ik_{x_2}d} e^{-ik_{z_1}h_1} e^{-ik_{z_2}h_2} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \end{aligned}$$

で表現されてもよい。

[0503] ここで、 x_1 、 y_1 及び z_1 は、送信位置の x 座標、 y 座標及び z 座標を示す。また、 x_2 、 y_2 及び z_2 は、受信位置の x 座標、 y 座標及び z 座標を示す。また、 k は、波動の波数を示す。また、 k_x 、 k_{y_1} 及び k_{y_2} は、積分変数を示す。また、 d は、 x 軸方向における上記の距離を示す。また、 h_1 は、計測データに対応する送信位置の z 座標を示す。また、 h_2 は、計測データに対応する受信位置の z 座標を示す。

[0504] また、

[数209]

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

は、 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。

[0505] また、 k_{x_1} 、 k_{x_2} 、 k_{z_1} 及び k_{z_2} は、

[数210]

$$\begin{aligned}
 k_{x_1} &= \frac{k_x \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
 k_{x_2} &= \frac{k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
 k_{z_1} &= \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{\left(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}\right)^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
 k_{z_2} &= \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{\left(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}\right)^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}
 \end{aligned}$$

で定められる。

[0506] また、 f_1 及び f_2 は、

[数211]

$$\begin{aligned}
 &f_1(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{z_1}, \alpha, \beta) \\
 &= \frac{2\sin(a(-k_{x_1} \cos \beta - k_{z_1} \cos \alpha \sin \beta))}{-k_{x_1} \cos \beta - k_{z_1} \cos \alpha \sin \beta} \frac{2\sin(b(-k_{y_1} \cos \alpha + k_{z_1} \sin \alpha))}{-k_{y_1} \cos \alpha + k_{z_1} \sin \alpha} \\
 &f_2(k_{x_2}, k_{y_2}, k_{z_2}, \alpha, \beta) \\
 &= \frac{2\sin(a(-k_{x_2} \cos \beta - k_{z_2} \cos \alpha \sin \beta))}{-k_{x_2} \cos \beta - k_{z_2} \cos \alpha \sin \beta} \frac{2\sin(b(-k_{y_2} \cos \alpha + k_{z_2} \sin \alpha))}{-k_{y_2} \cos \alpha + k_{z_2} \sin \alpha}
 \end{aligned}$$

で定められる。

[0507] また、 a は、 x 軸方向における上記の有限サイズの $1/2$ を示す。また、 b は、 y 軸方向における上記の有限サイズの $1/2$ を示す。また、 α は、送信領域及び受信領域の x 軸周りの機械的又は電氣的な回転角を示す。また、 β は、送信領域及び受信領域の y 軸周りの機械的又は電氣的な回転角を示す。

[0508] これにより、映像化装置 100 は、指向性の方向を複数の方向に変化させることができる場合の散乱場関数を用いて、物体を高い精度で映像化することができる。

[0509] また、例えば、映像化関数は、

[数212]

$$\begin{aligned}
& \rho(x, y, z) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_{y1} y + k_{y2} y)} e^{ik_{z1} z} e^{ik_{z2} z} \\
&\quad \cdot \left\{ \sum_\alpha \sum_\beta f_1(k_{x1}, k_{y1}, k_{z1}, \alpha, \beta) \cdot f_2(k_{x2}, k_{y2}, k_{z2}, \alpha, \beta) \cdot \tilde{\Phi}(k_{y1}, k_{y2}, k, \alpha, \beta) \right\} \\
&\quad \cdot e^{ik_{x2} d} e^{-ik_{z1} h_1} e^{-ik_{z2} h_2} dk_x dk_{y1} dk_{y2} dk
\end{aligned}$$

で表現されてもよい。

[0510] ここで、映像化関数に入力される x 、 y 及び z は、映像化対象位置の x 座標、 y 座標及び z 座標を示す。

[0511] これにより、映像化装置 100 は、指向性の方向を複数の方向に変化させることができる場合の映像化関数を用いて、物体を高い精度で映像化することができる。

[0512] また、例えば、波動は、マイクロ波であってもよい。これにより、映像化装置 100 は、計測領域における水分で波動が減衰することを抑制することができる。

[0513] また、例えば、上記の基本構成及び基本動作において示された複数の送信器 101、複数の受信器 102、情報処理回路 103、散乱場関数及び映像化関数等には、本実施の形態において示された他の構成要素、式及び変数等が適宜適用され得る。また、本実施の形態において示された散乱場関数及び映像化関数等は、適宜変形して適用されてもよい。例えば、上述された数式と実質的に同じ内容を他の表現で示す数式が用いられてもよいし、上述された理論に基づいて導出される他の数式が用いられてもよい。

[0514] (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。

[0515] また、映像化装置の各構成要素で行われるステップを含む映像化方法が、任意の装置又はシステムによって実行されてもよい。例えば、映像化方法の一部又は全部が、プロセッサ、メモリ及び入出力回路等を備えるコンピュータによって実行されてもよい。その際、コンピュータに映像化方法を実行させるためのプログラムがコンピュータによって実行されることにより、映像化方法が実行されてもよい。

[0516] 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。

[0517] 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。

[0518] また、専用のハードウェアが、メモリ及び専用のプロセッサ等で構成されてもよい。例えば、専用のプロセッサが、計測データを記録するためのメモリを参照して、上記の映像化方法を実行してもよい。

[0519] 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。

[0520] また、映像化装置は、物理的に一体の装置であることに限られず、分散して配置された複数のサブ装置を備えていてもよい。また、映像化装置は、映像化システムと表現されてもよい。

産業上の利用可能性

[0521] 本開示の一態様は、散乱波の計測データを用いて、計測領域における物体を映像化する映像化装置に有用であり、広範囲の計測領域における遠方の物体を探索する探索システム等に適用可能である。

符号の説明

[0522] 1 0 0 映像化装置
 1 0 1 送信器
 1 0 2 受信器
 1 0 3 情報処理回路
 1 0 4 ディスプレイ

請求の範囲

- [請求項1] それぞれが送信領域を有する複数の送信器であって、それぞれが前記送信領域から計測領域へ波動を送信する複数の送信器と、
- それぞれが受信領域を有する複数の受信器であって、それぞれが前記受信領域において前記計測領域から前記波動の散乱波を受信する複数の受信器と、
- 前記散乱波の計測データを用いて、前記計測領域における物体を映像化する情報処理回路とを備え、
- 前記送信領域及び前記受信領域のそれぞれは、有限サイズを有し、前記情報処理回路は、
- 前記波動の送信位置及び前記散乱波の受信位置が入力されて前記受信位置における前記散乱波の量が出力される散乱場関数であって、前記有限サイズが反映された散乱場関数を、前記計測データを用いて導出し、
- 映像化対象位置が入力されて前記映像化対象位置の画像強度が出力される映像化関数であって、前記送信位置及び前記受信位置として前記映像化対象位置を前記散乱場関数に入力することで前記散乱場関数から出力される量に基づいて定められる映像化関数を導出し、
- 前記映像化関数を用いて、前記計測領域における前記物体を映像化する
- 映像化装置。
- [請求項2] 前記有限サイズは、前記複数の送信器及び前記複数の受信器において同じである
- 請求項1に記載の映像化装置。
- [請求項3] 前記送信領域及び前記受信領域のそれぞれは、矩形の領域である
- 請求項1又は2に記載の映像化装置。
- [請求項4] 前記複数の送信器は、直線上に配列され、
- 前記複数の受信器は、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距離が前記散乱場関数に反映される

請求項 1 又は 2 に記載の映像化装置。

[請求項5]

前記散乱場関数は、

[数1]

$$\begin{aligned} & \Phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{x_2}x_2 + k_{y_2}y_2)} e^{-ik_z z} \\ & \quad \cdot \left\{ \frac{2 \sin(k_{x_1} a)}{k_{x_1}} \frac{2 \sin(k_{y_1} b)}{k_{y_1}} \frac{2 \sin(k_{x_2} a)}{k_{x_2}} \frac{2 \sin(k_{y_2} b)}{k_{y_2}} \right\} \\ & \quad \cdot e^{ik_z d} \tilde{\Phi}(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, k) dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{x_2} dk_{y_2} \end{aligned}$$

で表現され、

x_1 及び y_1 は、前記送信位置の x 座標及び y 座標を示し、 x_2 及び y_2 は、前記受信位置の x 座標及び y 座標を示し、 z は、前記送信位置及び前記受信位置の z 座標を示し、 k は、前記波動の波数を示し、 k_{x_1} 、 k_{y_1} 及び k_{y_2} は、積分変数を示し、 d は、前記距離を示し、

[数2]

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

は、 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し、

、

k_{x_1} 、 k_{x_2} 及び k_z は、

[数3]

$$\begin{aligned} k_{x_1} &= \frac{k_x \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ k_{x_2} &= \frac{k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ k_z &= \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2} \end{aligned}$$

で定められ、

a は、x 軸方向における前記有限サイズの 1 / 2 を示し、b は、y 軸方向における前記有限サイズの 1 / 2 を示す

請求項 4 に記載の映像化装置。

[請求項 6]

前記映像化関数は、

[数 4]

$$\begin{aligned} \rho(x, y, z) &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_{y1} y + k_{y2} y)} e^{ik_z z} \\ &\quad \cdot \left\{ \frac{2 \sin(k_{x1} a)}{k_{x1}} \frac{2 \sin(k_{y1} b)}{k_{y1}} \frac{2 \sin(k_{x2} a)}{k_{x2}} \frac{2 \sin(k_{y2} b)}{k_{y2}} \right\} \\ &\quad \cdot e^{ik_{x2} d} \tilde{\Phi}(k_{y1}, k_{y2}, k) dk_x dk_{y1} dk_{y2} dk \end{aligned}$$

で表現され、

前記映像化関数に入力される x、y 及び z は、前記映像化対象位置の x 座標、y 座標及び z 座標を示す

請求項 5 に記載の映像化装置。

[請求項 7]

前記散乱場関数は、

[数 5]

$$\begin{aligned} \Phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_{x1} x_1 + k_{y1} y_1 + k_{y2} y_2)} e^{-ik_{x2} x_2} e^{ik_{z1} z_1} e^{ik_{z2} z_2} \\ &\quad \cdot \left\{ \frac{2 \sin(k_{x1} a)}{k_{x1}} \frac{2 \sin(k_{y1} b)}{k_{y1}} \frac{2 \sin(k_{x2} a)}{k_{x2}} \frac{2 \sin(k_{y2} b)}{k_{y2}} \right\} \\ &\quad \cdot e^{ik_{x2} d} e^{-ik_{x1} h_1} e^{-ik_{z2} h_2} \tilde{\Phi}(k_{y1}, k_{y2}, k) dk_x dk_{y1} dk_{y2} \end{aligned}$$

で表現され、

x₁、y₁ 及び z₁ は、前記送信位置の x 座標、y 座標及び z 座標を示し、x₂、y₂ 及び z₂ は、前記受信位置の x 座標、y 座標及び z 座標を示し、k は、前記波動の波数を示し、k_x、k_{y1} 及び k_{y2} は、積分変数を示し、d は、x 軸方向における前記距離を示し、h₁ は、前

計測データに対応する前記送信位置の z 座標を示し、 h_2 は、前記計測データに対応する前記受信位置の z 座標を示し、

[数6]

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

は、 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し、

、

k_{x1} 、 k_{x2} 、 k_{z1} 及び k_{z2} は、

[数7]

$$\begin{aligned} k_{x1} &= \frac{k_x \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ k_{x2} &= \frac{k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ k_{z1} &= \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\ k_{z2} &= \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \end{aligned}$$

で定められ、

a は、 x 軸方向における前記有限サイズの $1/2$ を示し、 b は、 y 軸方向における前記有限サイズの $1/2$ を示す

請求項4に記載の映像化装置。

[請求項8]

前記映像化関数は、

[数8]

$$\begin{aligned} \rho(x, y, z) &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} e^{ik_{z_1} z} e^{ik_{z_2} z} \\ &\quad \cdot \left\{ \frac{2 \sin(k_{x_1} a)}{k_{x_1}} \frac{2 \sin(k_{y_1} b)}{k_{y_1}} \frac{2 \sin(k_{x_2} a)}{k_{x_2}} \frac{2 \sin(k_{y_2} b)}{k_{y_2}} \right\} \\ &\quad \cdot e^{ik_{x_2} d} e^{-ik_{x_1} h_1} e^{-ik_{x_2} h_2} \tilde{\Phi}(k_{y_1}, k_{y_2}, k) dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{x_2} dk_{y_2} \end{aligned}$$

で表現され、

前記映像化関数に入力される x 、 y 及び z は、前記映像化対象位置の x 座標、 y 座標及び z 座標を示す

請求項 7 に記載の映像化装置。

[請求項 9]

前記複数の送信器のそれぞれは、前記送信領域を機械的又は電氣的に回転させることにより、前記送信領域の面の法線方向を変化させ、

前記複数の受信器のそれぞれは、前記受信領域を機械的又は電氣的に回転させることにより、前記受信領域の面の法線方向を変化させ、

前記情報処理回路は、前記送信領域及び前記受信領域の回転後の前記計測データを用いて、前記計測領域における前記物体を映像化する

請求項 4 に記載の映像化装置。

[請求項 10]

前記散乱場関数は、

[数 9]

$$\begin{aligned} & \Phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x1}x_1 + k_{y1}y_1 + k_{z1}z_1)} e^{-i(k_{x2}x_2 + k_{y2}y_2 + k_{z2}z_2)} \\ & \quad \cdot \left\{ f_1(k_{x1}, k_{y1}, k_{z1}) f_2(k_{x2}, k_{y2}, k_{z2}) \right\} \\ & \quad \cdot e^{ik_{x2}d} e^{-ik_{z1}h_1} e^{-ik_{z2}h_2} \tilde{\Phi}(k_{y1}, k_{y2}, k) dk_x dk_{y1} dk_{y2} \end{aligned}$$

で表現され、

x_1 、 y_1 及び z_1 は、前記送信位置の x 座標、 y 座標及び z 座標を示し、 x_2 、 y_2 及び z_2 は、前記受信位置の x 座標、 y 座標及び z 座標を示し、 k は、前記波動の波数を示し、 k_x 、 k_{y1} 及び k_{y2} は、積分変数を示し、 d は、 x 軸方向における前記距離を示し、 h_1 は、前記計測データに対応する前記送信位置の z 座標を示し、 h_2 は、前記計測データに対応する前記受信位置の z 座標を示し、

[数 10]

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

は、 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し、

k_{x1} 、 k_{x2} 、 k_{z1} 及び k_{z2} は、

[数11]

$$\begin{aligned} k_{x1} &= \frac{k_x \sqrt{k^2 - k_{y1}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y2}^2}} \\ k_{x2} &= \frac{k_x \sqrt{k^2 - k_{y2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y2}^2}} \\ k_{z1} &= \frac{\sqrt{k^2 - k_{y1}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y2}^2}} \\ k_{z2} &= \frac{\sqrt{k^2 - k_{y2}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y2}^2}} \end{aligned}$$

で定められ、

f_1 及び f_2 は、

[数12]

$$\begin{aligned} f_1(k_{x1}, k_{y1}, k_{z1}) &= \frac{2\sin(a(-k_{x1} \cos \beta - k_{z1} \cos \alpha \sin \beta))}{-k_{x1} \cos \beta - k_{z1} \cos \alpha \sin \beta} \frac{2\sin(b(-k_{y1} \cos \alpha + k_{z1} \sin \alpha))}{-k_{y1} \cos \alpha + k_{z1} \sin \alpha} \\ f_2(k_{x2}, k_{y2}, k_{z2}) &= \frac{2\sin(a(-k_{x2} \cos \beta - k_{z2} \cos \alpha \sin \beta))}{-k_{x2} \cos \beta - k_{z2} \cos \alpha \sin \beta} \frac{2\sin(b(-k_{y2} \cos \alpha + k_{z2} \sin \alpha))}{-k_{y2} \cos \alpha + k_{z2} \sin \alpha} \end{aligned}$$

で定められ、

a は、 x 軸方向における前記有限サイズの $1/2$ を示し、 b は、 y 軸方向における前記有限サイズの $1/2$ を示し、 α は、前記送信領域及び前記受信領域の x 軸周りの機械的又は電氣的な回転角を示し、 β は、前記送信領域及び前記受信領域の y 軸周りの機械的又は電氣的な回転角を示す

請求項9に記載の映像化装置。

[請求項11]

前記映像化関数は、

[数13]

$$\begin{aligned} \rho(x, y, z) &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_x x + k_{y1} y - k_{y2} y)} e^{ik_{z1} z} e^{ik_{z2} z} \\ &\quad \cdot \{f_1(k_{x1}, k_{y1}, k_{z1}) f_2(k_{x2}, k_{y2}, k_{z2})\} \\ &\quad \cdot e^{ik_{z1} d} e^{-ik_{z1} h_1} e^{-ik_{z2} h_2} \tilde{\Phi}(k_{y1}, k_{y2}, k) dk_x dk_{y1} dk_{y2} dk \end{aligned}$$

で表現され、

前記映像化関数に入力される x 、 y 及び z は、前記映像化対象位置の x 座標、 y 座標及び z 座標を示す

請求項 10 に記載の映像化装置。

[請求項12]

前記複数の送信器のそれぞれは、前記送信領域を複数の回転角で機械的又は電氣的に回転させることにより、前記送信領域の面の法線方向を複数の方向に変化させ、

前記複数の受信器のそれぞれは、前記受信領域を前記複数の回転角で機械的又は電氣的に回転させることにより、前記受信領域の面の法線方向を前記複数の方向に変化させ、

前記情報処理回路は、機械的又は電氣的な前記複数の回転角に対する前記計測データを用いて、前記計測領域における前記物体を映像化する

請求項 4 に記載の映像化装置。

[請求項13]

前記散乱場関数は、

[数14]

$$\begin{aligned} \Phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_{x1} x_1 + k_{y1} y_1 + k_{y2} y_2)} e^{-ik_{x2} x_2} e^{ik_{z1} z_1} e^{ik_{z2} z_2} \\ &\quad \cdot \left\{ \sum_{\alpha} \sum_{\beta} f_1(k_{x1}, k_{y1}, k_{z1}, \alpha, \beta) \cdot f_2(k_{x2}, k_{y2}, k_{z2}, \alpha, \beta) \cdot \tilde{\Phi}(k_{y1}, k_{y2}, k, \alpha, \beta) \right\} \\ &\quad \cdot e^{ik_{z1} d} e^{-ik_{z1} h_1} e^{-ik_{z2} h_2} dk_x dk_{y1} dk_{y2} \end{aligned}$$

で表現され、

x_1 、 y_1 及び z_1 は、前記送信位置の x 座標、 y 座標及び z 座標を

示し、 x_2 、 y_2 及び z_2 は、前記受信位置の x 座標、 y 座標及び z 座標を示し、 k は、前記波動の波数を示し、 k_x 、 k_{y1} 及び k_{y2} は、積分変数を示し、 d は、 x 軸方向における前記距離を示し、 h_1 は、前記計測データに対応する前記送信位置の z 座標を示し、 h_2 は、前記計測データに対応する前記受信位置の z 座標を示し、

[数15]

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

は、 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し、

、

k_{x1} 、 k_{x2} 、 k_{z1} 及び k_{z2} は、

[数16]

$$\begin{aligned} k_{x1} &= \frac{k_x \sqrt{k^2 - k_{y1}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y2}^2}} \\ k_{x2} &= \frac{k_x \sqrt{k^2 - k_{y2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y2}^2}} \\ k_{z1} &= \frac{\sqrt{k^2 - k_{y1}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y2}^2}} \\ k_{z2} &= \frac{\sqrt{k^2 - k_{y2}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y2}^2}} \end{aligned}$$

で定められ、

f_1 及び f_2 は、

[数17]

$$\begin{aligned} f_1(k_{x1}, k_{y1}, k_{z1}, \alpha, \beta) &= \frac{2 \sin(a(-k_{x1} \cos \beta - k_{z1} \cos \alpha \sin \beta))}{-k_{x1} \cos \beta - k_{z1} \cos \alpha \sin \beta} \frac{2 \sin(b(-k_{y1} \cos \alpha + k_{z1} \sin \alpha))}{-k_{y1} \cos \alpha + k_{z1} \sin \alpha} \\ f_2(k_{x2}, k_{y2}, k_{z2}, \alpha, \beta) &= \frac{2 \sin(a(-k_{x2} \cos \beta - k_{z2} \cos \alpha \sin \beta))}{-k_{x2} \cos \beta - k_{z2} \cos \alpha \sin \beta} \frac{2 \sin(b(-k_{y2} \cos \alpha + k_{z2} \sin \alpha))}{-k_{y2} \cos \alpha + k_{z2} \sin \alpha} \end{aligned}$$

で定められ、

a は、x 軸方向における前記有限サイズの $1/2$ を示し、b は、y 軸方向における前記有限サイズの $1/2$ を示し、 α は、前記送信領域及び前記受信領域の x 軸周りの機械的又は電氣的な回転角を示し、 β は、前記送信領域及び前記受信領域の y 軸周りの機械的又は電氣的な回転角を示す

請求項 12 に記載の映像化装置。

[請求項14] 前記映像化関数は、

[数18]

$$\begin{aligned} \rho(x, y, z) &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^{\infty} \int_{-\alpha_1}^{\alpha_1} \int_{-\alpha_2}^{\alpha_2} \int_{-\alpha_3}^{\alpha_3} e^{-i(k_x x + k_y y + k_z z)} e^{ik_{x1} x} e^{ik_{x2} z} \\ &\quad \cdot \left\{ \sum_{\alpha} \sum_{\beta} f_1(k_{x1}, k_{y1}, k_{z1}, \alpha, \beta) \cdot f_2(k_{x2}, k_{y2}, k_{z2}, \alpha, \beta) \cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_y, k, \alpha, \beta) \right\} \\ &\quad \cdot e^{ik_{x2} d} e^{-ik_{x1} h_1} e^{-ik_{x2} h_2} dk_x dk_{y1} dk_{y2} dk \end{aligned}$$

で表現され、

前記映像化関数に入力される x、y 及び z は、前記映像化対象位置の x 座標、y 座標及び z 座標を示す

請求項 13 に記載の映像化装置。

[請求項15] それぞれが送信領域を有する複数の送信器のそれぞれによって、前記送信領域から計測領域へ波動を送信するステップと、

それぞれが受信領域を有する複数の受信器のそれぞれによって、前記受信領域において前記計測領域から前記波動の散乱波を受信するステップと、

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

前記送信領域及び前記受信領域のそれぞれは、有限サイズを有し、

前記計測領域における前記物体を映像化するステップでは、

前記波動の送信位置及び前記散乱波の受信位置が入力されて前記受信位置における前記散乱波の量が出力される散乱場関数であって、前

記有限サイズが反映された散乱場関数を、前記計測データを用いて導出し、

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

前記映像化関数を用いて、前記計測領域における前記物体を映像化する

映像化方法。