



# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 117501112 A

(43) 申请公布日 2024. 02. 02

(21) 申请号 202280038496.4

(22) 申请日 2022.06.14

(30) 优先权数据

2021-100909 2021.06.17 JP

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2023.11.28

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/JP2022/023828 2022.06.14

(87) PCT国际申请的公布数据

W02022/265017 JA 2022.12.22

(71) 申请人 木村建次郎

地址 日本兵库县

(72) 发明人 木村建次郎 木村宪明 木村文俊

(74) 专利代理机构 永新专利商标代理有限公司  
72002

专利代理师 蒋巍

(51) Int.Cl.

G01N 22/02 (2006.01)

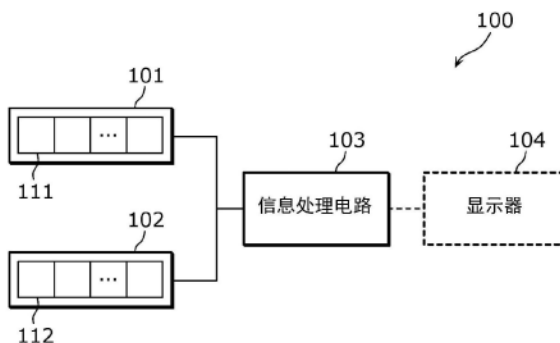
权利要求书13页 说明书72页 附图12页

(54) 发明名称

影像化装置及影像化方法

(57) 摘要

一种影像化装置(100),具备:发送器列(101),包括排列在直线上,且向区域发送波动的多个发送器(111);接收器列(102),包括排列在与排列多个发送器(111)的直线平行的另一条直线上,且从区域接收波动的多个接收器(112),且与发送器列(101)间隔开设置;以及信息处理电路(103),根据通过多个发送器(111)和多个接收器(112)的全部或一部分的组合而得到的测量数据、以及排列多个发送器(111)的直线与排列多个接收器(112)的直线之间的距离,导出与关于波动的散射的散射场函数对应的影像化函数,并且使用影像化函数,将区域内的物体所含的散射体的构造可视化。



1. 一种影像化装置,其中,具备:

发送器列,包括排列在直线上,且向测量对象的区域发送波动的多个发送器;

与所述发送器列间隔开设置的接收器列,包括排列在与排列所述多个发送器的直线平行的另一条直线上,且从所述区域接收所述波动的多个接收器;以及

信息处理电路,根据测量数据以及距离,导出与关于所述波动的散射的散射场函数对应的影像化函数,并使用所述影像化函数,将所述区域内的物体所含的散射体的构造可视化,所述测量数据是由所述多个发送器和所述多个接收器的全部或一部分的组合而得到的,所述距离是排列所述多个发送器的直线与排列所述多个接收器的直线之间的距离。

2. 根据权利要求1所述的影像化装置,其中,

所述信息处理电路根据所述测量数据及所述距离导出所述散射场函数,根据所述散射场函数导出所述影像化函数,

所述散射场函数是由【数式1】来表现的函数,

【数式1】

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

$\rho_1$ 及 $\rho_2$ 由【数式2】来确定,

【数式2】

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

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

$(x_1, y_1, z)$ 表示所述波动的发送位置,  $(x_2, y_2, z)$ 表示所述波动的接收位置,  $k$ 表示所述波动的波数,  $D$ 表示所述区域,  $(\xi, \eta, \zeta)$ 对应于所述波动的反射位置,  $\varepsilon$ 对应于在所述反射位置处的未知的反射率。

3. 根据权利要求2所述的影像化装置,其中,

所述信息处理电路通过求解所述散射场函数满足的方程式来导出所述散射场函数,

所述方程式由【数式3】来表现,

【数式3】

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

$\Delta_5$ 由【数式4】来确定,

【数式4】

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

$c$ 表示所述波动的传播速度,  $t$ 表示所述波动的从发送到接收的时间。

4. 根据权利要求2或3所述的影像化装置,其中,

所述影像化函数由【数式5】来表现,

【数式5】

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

$(x, y, z)$  表示影像化对象位置。

5. 根据权利要求2或3所述的影像化装置, 其中, 所述信息处理电路导出【数式6】作为所述散射场函数, 【数式6】

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

$k_x$ 、 $s_3$ 以及 $s_4$ 由【数式7】来确定,

【数式7】

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

$k_{x_1}$ 、 $k_{y_1}$ 以及 $k_{y_2}$ 表示关于所述散射场函数的 $x_1$ 、 $y_1$ 以及 $y_2$ 的波数,  $d$ 表示所述距离,

【数式8】

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

【数式8】表示关于 $x_1$ 、 $y_1$ 以及 $y_2$ 进行了傅立叶变换后的所述测量数据。

6. 根据权利要求2或3所述的影像化装置, 其中, 所述信息处理电路导出【数式9】作为所述影像化函数, 【数式9】

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

$k_x$ 、 $k_z$ 、 $k$ 、 $dk/dk_z$ 以及 $s_4$ 由【数式10】来确定，

【数式10】

$$k_x = k_{x_1} + i s_3$$

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

$$k = \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}}$$

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

$$s_4 = i k_z = i \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + i s_3)^2}$$

$s_3$ 由【数式11】来确定，

【数式11】

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

$(x, y, z)$ 表示影像化对象位置， $k_{x_1}$ 、 $k_{y_1}$ 以及 $k_{y_2}$ 表示关于所述散射场函数的 $x_1$ 、 $y_1$ 以及 $y_2$ 的波数， $d$ 表示所述距离，

【数式12】

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

【数式12】表示关于x1、y1以及y2进行了傅立叶变换后的所述测量数据。

7. 根据权利要求1所述的影像化装置, 其中,

所述影像化装置具备作为所述发送器列的多个发送器列、作为所述接收器列的多个接收器列、或作为所述发送器列及所述接收器列的多个发送器列及多个接收器列。

8. 根据权利要求2或3所述的影像化装置, 其中,

所述影像化装置具备作为所述发送器列的多个发送器列、作为所述接收器列的多个接收器列、或作为所述发送器列及所述接收器列的多个发送器列及多个接收器列。

9. 根据权利要求8所述的影像化装置, 其中,

所述信息处理电路导出【数式13】作为所述散射场函数,

【数式13】

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

$k_x$ 、 $s_3$ 以及 $s_4$ 由【数式14】来确定,

【数式14】

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

$k_{x_1}$ 、 $k_{y_1}$ 以及 $k_{y_2}$ 表示关于所述散射场函数的x1、y1以及y2的波数,d表示所述距离,

【数式15】

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

【数式15】表示关于x1、y1以及y2进行了傅立叶变换后的所述测量数据。

10. 根据权利要求8所述的影像化装置, 其中,

所述信息处理电路针对所述影像化装置具备的作为所述发送器列及所述接收器列的1列发送器列及n列接收器列, 导出【数式16】作为所述影像化函数,

【数式16】

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

$k_x$ 、 $k_z$ 、 $k$ 、 $dk/dk_z$ 以及 $s_4$ 由【数式17】来确定，

【数式17】

$$k_x = k_{x_1} + i s_3$$

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

$$k = \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}}$$

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

$$s_4 = i k_z = i \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + i s_3)^2}$$

$s_3$ 由【数式18】来确定，

【数式18】

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

$(x, y, z)$ 表示影像化对象位置， $k_{x_1}$ 、 $k_{y_1}$ 以及 $k_{y_2}$ 表示关于所述散射场函数的 $x_1$ 、 $y_1$ 以及 $y_2$ 的波数， $d_j$ 表示所述距离，

【数式19】

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

【数式19】表示关于x1、y1以及y2进行了傅立叶变换后的所述测量数据。

11. 根据权利要求2或3所述的影像化装置, 其中,

在与所述反射率对应的介电常数在所述区域中具有频率依赖性的情况下, 所述信息处理电路导出【数式20】作为所述影像化函数,

【数式20】

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

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

$$= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^{\infty} d\omega \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{s_4 z} e^{\frac{i d k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}} \cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2}$$

$$= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{i k_z z} e^{\frac{i d k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}} \cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \left( \frac{d\omega}{dk} \right) \left( \frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk_z$$

$k_x$ 、 $k_z$ 、 $k$ 、 $dk/dk_z$ 、 $d\omega/dk$ 和 $s_4$ 由【数式21】来确定,

【数式21】

$$k_x = k_{x_1} + i s_3$$

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

$$k = \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}}$$

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

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

$$s_4 = i k_z = i \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + i s_3)^2}$$

$s_3$ 由【数式22】来确定,

【数式22】

$$S_3 = \frac{-i k_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-i k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

$(x, y, z)$  表示影像化对象位置,  $k_{x_1}$ 、 $k_{y_1}$  以及  $k_{y_2}$  表示关于所述散射场函数的  $x_1$ 、 $y_1$  以及  $y_2$  的波数,  $d$  表示所述距离,  $\omega$  表示所述波动的角频率,  $c_0$  表示所述波动在真空中的传播速度,  $a$ 、 $b$  以及  $\alpha$  表示关于德拜弛豫的参数,

【数式23】

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

【数式23】表示关于  $x_1$ 、 $y_1$  以及  $y_2$  进行了傅立叶变换后的所述测量数据。

12. 根据权利要求1所述的影像化装置, 其中,

所述信息处理电路根据所述测量数据及所述距离导出所述散射场函数, 根据所述散射场函数导出所述影像化函数,

所述散射场函数是由【数式24】来表现的函数,

【数式24】

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

$\rho_1$  及  $\rho_2$  由【数式25】来确定,

【数式25】

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

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

$(x_1, y_1, z_1)$  表示所述波动的发送位置,  $(x_2, y_2, z_2)$  表示所述波动的接收位置,  $k$  表示所述波动的波数,  $D$  表示所述区域,  $(\xi, \eta, \zeta)$  对应于所述波动的反射位置,  $\varepsilon$  对应于在所述反射位置处的未知的反射率。

13. 根据权利要求12所述的影像化装置, 其中,

所述信息处理电路通过求解所述散射场函数满足的方程式来导出所述散射场函数, 所述方程式由【数式26】来表现,

【数式26】

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

【数式27】

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

$\Delta_6$  由【数式27】来确定。

14. 根据权利要求12或13所述的影像化装置, 其中,

所述影像化函数由【数式28】来表现,

【数式28】

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

$(x, y, z)$  表示影像化对象位置。

15. 根据权利要求12或13所述的影像化装置, 其中, 所述信息处理电路导出【数式29】作为所述散射场函数,

【数式29】

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

$k_x, s_3, s_4$  以及  $s_5$  由【数式30】来确定,

【数式30】

$$k_x = k_{x_1} + i s_3$$

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

$$s_4 = \frac{i \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{\left(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}\right)^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

$$s_5 = \frac{i \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{\left(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}\right)^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

$k_{x_1}, k_{y_1}$  以及  $k_{y_2}$  表示关于所述散射场函数的  $x_1, y_1$  以及  $y_2$  的波数,  $d$  表示所述距离,  $\Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k)$  表示在所述发送位置为  $(x_I, y_I, z_I)$ 、所述接收位置为  $(x_I + d, y_J, z_J)$  的情况下的所述测量数据。

16. 根据权利要求12或13所述的影像化装置, 其中, 所述信息处理电路导出【数式31】作为所述影像化函数,

【数式31】

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

$k_x$ 、 $k_z$ 、 $k$ 、 $dk/dk_z$ 、 $s_3$ 、 $s_4$ 以及 $s_5$ 由【数式32】来确定,【数式32】

$$k_x = k_{x_1} + i s_3$$

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

$$k = \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}}$$

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

$$s_4 = \frac{i k_z \left( \sqrt{k_x^2 + k_z^2} + \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2}}$$

$$s_5 = \frac{i k_z \left( \sqrt{k_x^2 + k_z^2} - \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2}}$$

$(x, y, z)$  表示影像化对象位置,  $k_{x_1}$ 、 $k_{y_1}$ 以及 $k_{y_2}$ 表示关于所述散射场函数的 $x_1$ 、 $y_1$ 以及 $y_2$

的波数,  $d$ 表示所述距离,  $\Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k)$ 表示在所述发送位置为  $(x_I, y_I, z_I)$ 、所述接收位置为  $(x_I+d, y_J, z_J)$  的情况下的所述测量数据。

17. 根据权利要求12或13所述的影像化装置, 其中,

所述影像化装置具备作为所述发送器列的多个发送器列、作为所述接收器列的多个接收器列、或作为所述发送器列及所述接收器列的多个发送器列及多个接收器列。

18. 根据权利要求17所述的影像化装置, 其中,

所述信息处理电路导出【数式33】作为所述散射场函数,

【数式33】

$$\begin{aligned} & \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1+k_{y_1}y_1+k_{y_2}y_2)} \sum_{I,J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\ & \quad \cdot e^{i(k_{x_1}x_1+k_{y_1}y_1+k_{y_2}y_2)} e^{-s_3d} e^{-s_4z_I} e^{-s_5z_J} \} e^{s_3x_2} e^{s_4z_1} e^{s_5z_2} \frac{d(k_x + is_3)}{dk_{x_1}} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \end{aligned}$$

$k_x$ 、 $s_3$ 、 $s_4$ 以及 $s_5$ 由【数式34】来确定,

【数式34】

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

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

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

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

$k_{x_1}$ 、 $k_{y_1}$ 以及 $k_{y_2}$ 表示关于所述散射场函数的 $x_1$ 、 $y_1$ 以及 $y_2$ 的波数,  $d$ 表示所述距离,  $\Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k)$ 表示在所述发送位置为  $(x_I, y_I, z_I)$ 、所述接收位置为  $(x_I+d, y_J, z_J)$  的情况下的所述测量数据。

19. 根据权利要求17所述的影像化装置, 其中,

所述信息处理电路使用多个散射场函数的合成来导出所述影像化函数, 所述多个散射场函数的合成针对与所述发送器列和所述接收器列相关的多个组合,

所述多个散射场函数分别对应于所述散射场函数, 由【数式35】来表现,

【数式35】

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

$k_x$ 、 $s_3$ 、 $s_4$ 以及 $s_5$ 由【数式36】来确定，

【数式36】

$$k_x = k_{x_1} + i s_3$$

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

$$s_4 = \frac{i \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{\left(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}\right)^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

$$s_5 = \frac{i \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{\left(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}\right)^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

$k_{x_1}$ 、 $k_{y_1}$ 以及 $k_{y_2}$ 表示关于所述散射场函数的 $x_1$ 、 $y_1$ 以及 $y_2$ 的波数， $d$ 表示所述距离， $\Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k)$ 表示在所述发送位置为 $(x_I, y_I, z_I)$ 、所述接收位置为 $(x_I+d, y_J, z_J)$ 的情况下的所述测量数据。

20. 根据权利要求12或13所述的影像化装置，其中，

在与所述反射率对应的介电常数在所述区域中具有频率依赖性的情况下，所述信息处理电路导出【数式37】作为所述影像化函数，

【数式37】

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

$k_x$ 、 $k_z$ 、 $k$ 、 $dk/dk_z$ 、 $d\omega/dk$ 、 $s_3$ 、 $s_4$ 以及 $s_5$ 由【数式38】来确定，

【数式38】

$$k_x = k_{y_1} + i s_3$$

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

$$k = \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}}$$

$$\frac{dk}{dk_z} = \frac{k_z \left\{ 1 - \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{(k_x^2 + k_z^2)^2} \right\}}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}}}$$

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

$$s_3 = \frac{-i k_{y_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-i k_x \left( \sqrt{k_x^2 + k_z^2} - \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2}}$$

$$s_4 = \frac{i k_z \left( \sqrt{k_x^2 + k_z^2} + \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2}}$$

$$s_5 = \frac{ik_z \left( \sqrt{k_x^2 + k_z^2} - \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2\sqrt{k_x^2 + k_z^2}}$$

$(x, y, z)$  表示影像化对象位置,  $k_{x_1}$ 、 $k_{y_1}$  以及  $k_{y_2}$  表示关于所述散射场函数的  $x_1$ 、 $y_1$  以及  $y_2$  的波数,  $d$  表示所述距离,  $\omega$  表示所述波动的角频率,  $c_0$  表示所述波动在真空中的传播速度,  $a$ 、 $b$  以及  $\alpha$  表示关于德拜弛豫的参数,

**【数式39】**

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

**【数式39】**表示关于  $x_1$ 、 $y_1$  以及  $y_2$  进行了傅立叶变换后的所述测量数据。

21. 一种影像化方法, 其中, 包括:

通过发送器列的多个发送器向测量对象的区域发送波动的步骤, 所述发送器列包括排列在直线上的所述多个发送器;

通过与所述发送器列间隔开设置的接收器列的多个接收器, 从所述区域接收所述波动的步骤, 所述接收器列包括排列在与排列所述多个发送器的直线平行的另一条直线上的所述多个接收器; 以及

根据测量数据以及距离, 导出与关于所述波动的散射的散射场函数对应的影像化函数, 并使用所述影像化函数, 将所述区域内的物体所含的散射体的构造可视化的步骤, 所述测量数据是由所述多个发送器和所述多个接收器的全部或一部分的组合而得到的, 所述距离是排列所述多个发送器的直线与排列所述多个接收器的直线之间的距离。

## 影像化装置及影像化方法

### 技术领域

[0001] 本公开涉及利用波动将区域内的物体所含的散射体的构造可视化的影像化装置等。

### 背景技术

[0002] 作为与利用波动将区域内的物体所含的散射体的构造可视化的影像化装置等相关的技术,有专利文献1、专利文献2、专利文献3、专利文献4以及专利文献5中记载的技术。

[0003] 例如,在专利文献1记载的技术中,从微波发送器发送的波束入射到检查对象,通过微波检测器检测散射后的波束的振幅及相位。然后,根据微波检测器的输出信号计算介电常数的分布,进行检查对象中的断层的像显示。

[0004] 在先技术文献

[0005] 专利文献

[0006] 专利文献1:日本特开昭62-66145号公报

[0007] 专利文献2:国际公开第2014/125815号

[0008] 专利文献3:国际公开第2015/136936号

[0009] 专利文献4:国际公开第2021/020387号

[0010] 专利文献5:国际公开第2021/053971号

### 发明内容

[0011] 发明要解决的课题

[0012] 然而,利用波动将区域内的物体所含的散射体的构造可视化并不容易。具体而言,在区域内的状态已知的情况下,针对入射到区域的波动求出从区域放射的散射波的数据被称为正向问题,是容易的。另一方面,在散射波的数据已知的情况下,求出区域内的状态被称为反向问题,并不容易。

[0013] 另外,例如,由于发送元件及接收元件的各种配置,得到多种多样的测量数据。由此,设想能够提高散射体的构造的可视化中的空间分辨率。另一方面,由于发送元件及接收元件的各种配置,运算处理复杂化,处理延迟增大。因此,难以提高散射体的构造的可视化中的空间分辨率。

[0014] 因此,本公开提供一种能够利用波动将区域内的物体所含的散射体的构造可视化,能够抑制运算处理的复杂化,并且提高散射体的构造的可视化中的空间分辨率的影像化装置等。

[0015] 解决课题的手段

[0016] 本公开的一个方式的影像化装置,具备:发送器列,包括排列在直线上,且向测量对象的区域发送波动的多个发送器;与所述发送器列间隔开设置的接收器列,包括排列在与排列所述多个发送器的直线平行的另一条直线上,且从所述区域接收所述波动的多个接收器;以及信息处理电路,根据测量数据以及距离,导出与关于所述波动的散射的散射场函

数对应的影像化函数,并使用所述影像化函数,将所述区域内的物体所含的散射体的构造可视化,所述测量数据是由所述多个发送器和所述多个接收器的全部或一部分的组合而得到的,所述距离是排列所述多个发送器的直线与排列所述多个接收器的直线之间的距离。

[0017] 此外,这些总括性或具体的方式既可以通过系统、装置、方法、集成电路、计算机程序、或者计算机可读的CD-ROM等非暂时性记录介质来实现,也可以通过系统、装置、方法、集成电路、计算机程序、以及记录介质的任意组合来实现。

[0018] 发明的效果

[0019] 根据本公开的一个方式,能够利用波动将区域内的物体所含的散射体的构造可视化,能够抑制运算处理的复杂化,并且提高散射体的构造的可视化中的空间分辨率。

## 附图说明

[0020] 图1是表示参考例中的多基地天线(multistatic antenna)的图。

[0021] 图2是表示实施方式中的S-Array多基地天线的例子图。

[0022] 图3是表示实施方式中的与S-Array相关的各坐标的例子图。

[0023] 图4是实施方式中的S-Array的外观图。

[0024] 图5是表示一维多基地阵列天线(multistatic array antenna)的概念图。

[0025] 图6是表示发送点及接收点的关系的概念图。

[0026] 图7是表示发送点及接收点的坐标的概念图。

[0027] 图8是表示前方散射中的发送点及接收点的关系的概念图。

[0028] 图9是表示平面中的发送点及接收点的关系的概念图。

[0029] 图10是表示曲面中的发送点及接收点的关系的概念图。

[0030] 图11是表示多列线性阵列天线的图。

[0031] 图12是表示多基地阵列天线的发送位置及接收位置的组合的概念图。

[0032] 图13是表示曲面上的准二维阵列天线的图。

[0033] 图14是表示实施方式中的影像化装置的基本结构的框图。

[0034] 图15是表示实施方式中的影像化装置的基本动作的流程图。

[0035] 图16是表示实施方式中的影像化装置的具体结构的框图。

## 具体实施方式

[0036] 本公开的一个方式的影像化装置,具备:发送器列,包括排列在直线上,且向测量对象的区域发送波动的多个发送器;与所述发送器列间隔开设置的接收器列,包括排列在与排列所述多个发送器的直线平行的另一条直线上,且从所述区域接收所述波动的多个接收器;以及信息处理电路,根据通过所述多个发送器和所述多个接收器的全部或一部分的组合而得到的测量数据、以及排列所述多个发送器的直线与排列所述多个接收器的直线之间的距离,导出与关于所述波动的散射的散射场函数对应的影像化函数,并且使用所述影像化函数,将所述区域内的物体所含的散射体的构造可视化。

[0037] 由此,影像化装置根据发送器列的多个发送器与接收器列的多个接收器的各种组合,能够取得足够的信息作为测量数据。此外,由于在发送器列与接收器列之间设置了间隔,影像化装置能够向区域适当地发送波动,并能够从区域适当地接收波动。然后,影像化

装置使用根据波动的测量数据以及发送器列与接收器列之间的距离导出的影像化函数,适当地将散射体的构造可视化。

[0038] 此外,由于发送器及接收器的配置被约束在两条直线上,与任意配置发送器及接收器的情况相比,影像化装置能够简化运算处理。因此,影像化装置能够抑制运算处理的复杂化。即,影像化装置能够利用波动将区域内的物体所含的散射体的构造可视化,能够抑制运算处理的复杂化,并且提高散射体的构造的可视化中的空间分辨率。

[0039] 例如,所述信息处理电路根据所述测量数据及所述距离导出所述散射场函数,根据所述散射场函数导出所述影像化函数,

[0040] 所述散射场函数是由【数式1】来表现的函数,

[0041] 【数式1】

$$[0042] \quad \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z) = \iiint_D \frac{e^{ik\rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{ik\rho_2}}{\rho_2} \varepsilon(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta$$

[0043]  $\rho_1$ 及 $\rho_2$ 由【数式2】来确定,

[0044] 【数式2】

$$[0045] \quad \rho_1 = \sqrt{(x_1 - \xi)^2 + (y_1 - \eta)^2 + (z - \zeta)^2}$$

$$[0046] \quad \rho_2 = \sqrt{(x_2 - \xi)^2 + (y_2 - \eta)^2 + (z - \zeta)^2}$$

[0047]  $(x_1, y_1, z)$ 表示所述波动的发送位置,  $(x_2, y_2, z)$ 表示所述波动的接收位置,  $k$ 表示所述波动的波数,  $D$ 表示所述区域,  $(\xi, \eta, \zeta)$ 对应于所述波动的反射位置,  $\varepsilon$ 对应于在所述反射位置处的未知的反射率。

[0048] 由此,影像化装置能够导出以发送位置及接收位置具有相同的 $z$ 坐标为前提而确定的散射场函数,能够根据该散射场函数导出影像化函数。因此,影像化装置能够沿着区域的平面边界,根据使用发送器列的多个发送器和接收器列的多个接收器而得到的测定数据来适当地导出散射场函数及影像化函数。

[0049] 例如,所述信息处理电路通过求解所述散射场函数满足的方程式来导出所述散射场函数,

[0050] 所述方程式由【数式3】来表现,

[0051] 【数式3】

$$[0052] \quad \left\{ \Delta_5^2 - \frac{4}{c^2} \partial_t^2 \partial_z^2 - 4(\partial_{x_1}^2 + \partial_{y_1}^2)(\partial_{x_2}^2 + \partial_{y_2}^2) \right\} \varphi = 0$$

[0053]  $\Delta_5$ 由【数式4】来确定,

[0054] 【数式4】

$$[0055] \quad \Delta_5 = \partial_{x_1}^2 + \partial_{y_1}^2 + \partial_{x_2}^2 + \partial_{y_2}^2 + \partial_z^2$$

[0056]  $c$ 表示所述波动的传播速度,  $t$ 表示所述波动的从发送到接收的时间。

[0057] 由此,影像化装置能够分析性地导出散射场函数满足的方程式的解作为散射场函数。因此,影像化装置能够高效地导出适当的散射场函数。

[0058] 另外,例如,所述影像化函数由【数式5】来表现,

[0059] 【数式5】

$$[0060] \quad \rho(x, y, z) = \int_0^{\infty} \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) dk$$

[0061]  $(x, y, z)$  表示影像化对象位置。

[0062] 由此,影像化装置能够根据散射场函数的极限操作来导出影像化函数。然后,由此,影像化装置能够将区域内的散射的状态可视化,能够将区域内的物体所含的散射体的构造适当地可视化。

[0063] 另外,例如,所述信息处理电路导出【数式6】作为所述散射场函数,

[0064] 【数式6】

$$[0065] \quad \begin{aligned} & \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2)} e^{s_3x_2} e^{s_4z} e^{\frac{id(k_{x_1} + is_3)\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}} \\ & \quad \cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \left( \frac{d(k_{x_1} + is_3)}{dk_{x_1}} \right) dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \end{aligned}$$

[0066]  $k_x$ 、 $s_3$ 以及 $s_4$ 由【数式7】来确定,

[0067] 【数式7】

$$[0068] \quad k_x = k_{x_1} + is_3$$

$$[0069] \quad s_3 = \frac{-ik_{x_1}\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-ik_x\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

$$[0070] \quad s_4 = i\sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + is_3)^2}$$

[0071]  $k_{x_1}$ 、 $k_{y_1}$ 以及 $k_{y_2}$ 表示关于所述散射场函数的 $x_1$ 、 $y_1$ 以及 $y_2$ 的波数, $d$ 表示所述距离,

[0072] 【数式8】

$$[0073] \quad \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

[0074] 【数式8】表示关于 $x_1$ 、 $y_1$ 以及 $y_2$ 进行了傅立叶变换后的所述测量数据。

[0075] 由此,影像化装置能够在散射场函数中适当地反映波动的测量数据以及发送器列与接收器列之间的距离。因此,影像化装置能够导出适当地表示散射的状态的散射场函数。

[0076] 另外,例如,所述信息处理电路导出【数式9】作为所述影像化函数,

[0077] 【数式9】

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

[0079]  $k_x$ 、 $k_z$ 、 $k$ 、 $dk/dk_z$ 以及 $s_4$ 由【数式10】来确定，

[0080] 【数式10】

$$[0081] \quad k_x = k_{x_1} + i s_3$$

$$[0082] \quad k_z = \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}$$

$$[0083] \quad k = \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}}$$

$$[0084] \quad \frac{dk}{dk_z} = \frac{k_z \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{k(k_x^2 + k_z^2)}$$

$$[0085] \quad s_4 = i k_z = i \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + i s_3)^2}$$

[0086]  $s_3$ 由【数式11】来确定，

[0087] 【数式11】

$$[0088] \quad s_3 = \frac{-i k_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-i k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

[0089]  $(x, y, z)$ 表示影像化对象位置， $k_{x_1}$ 、 $k_{y_1}$ 以及 $k_{y_2}$ 表示关于所述散射场函数的 $x_1$ 、 $y_1$ 以及 $y_2$ 的波数， $d$ 表示所述距离，

[0090] 【数式12】

$$[0091] \quad \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

[0092] 【数式12】表示关于 $x_1$ 、 $y_1$ 以及 $y_2$ 进行了傅立叶变换后的所述测量数据。

[0093] 由此，影像化装置能够在影像化函数中适当地反映波动的测量数据以及发送器列与接收器列之间的距离。影像化装置能够导出适当地表示散射的状态的影像化函数。

[0094] 另外，例如，所述影像化装置具备作为所述发送器列的多个发送器列、作为所述接收器列的多个接收器列、或作为所述发送器列及所述接收器列的多个发送器列及多个接收

器列。

[0095] 由此,根据关于发送器列及接收器列的多个组合,影像化装置能够取得足够的信息作为测量数据。另外,影像化装置能够针对发送器列和接收器列,关于平行方向和正交方向这两个方向构建多基地的关系。因此,影像化装置能够将区域内的物体所含的散射体的构造适当地可视化。

[0096] 另外,例如,所述信息处理电路对所述影像化装置作为所述发送器列及所述接收器列而具备的1列发送器列及n列接收器列,

[0097] 所述信息处理电路导出【数式13】作为所述散射场函数,

[0098] 【数式13】

$$\begin{aligned}
 & \rho(x, y, z) \\
 &= \int_0^{\infty} \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) dk \\
 &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{s_4 z} \\
 [0099] & \cdot \sum_{j=1, n} \left\{ \exp \left( \frac{i d_j k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \right) \tilde{\Phi}_j(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \right\} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk \\
 &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{i k_z z} \\
 & \cdot \sum_{j=1, n} \left\{ \exp \left( \frac{i d_j k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \right) \tilde{\Phi}_j(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \right\} \left( \frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk_z
 \end{aligned}$$

[0100]  $k_x$ 、 $k_z$ 、 $k$ 、 $dk/dk_z$ 以及 $s_4$ 由【数式14】来确定,

[0101] 【数式14】

$$[0102] \quad k_x = k_{x_1} + i s_3$$

$$[0103] \quad k_z = \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}$$

$$[0104] \quad k = \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2)} + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}$$

$$[0105] \quad \frac{dk}{dk_z} = \frac{k_z \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{k(k_x^2 + k_z^2)}$$

$$[0106] \quad s_4 = i k_z = i \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + i s_3)^2}$$

[0107]  $s_3$ 由【数式15】来确定,

[0108] 【数式15】

$$[0109] \quad s_3 = \frac{-ik_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-ik_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

[0110]  $(x, y, z)$  表示影像化对象位置,  $k_{x_1}$ 、 $k_{y_1}$  以及  $k_{y_2}$  表示关于所述散射场函数的  $x_1$ 、 $y_1$  以及  $y_2$  的波数,  $d_j$  表示所述距离,

[0111] 【数式16】表示关于  $x_1$ 、 $y_1$  以及  $y_2$  进行了傅立叶变换后的所述测量数据。

[0112] 【数式16】

$$[0113] \quad \tilde{\Phi}_j(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

[0114] 由此, 影像化装置能够在影像化函数中适当地反映波动的测量数据以及发送器列与接收器列之间的距离。具体而言, 影像化装置能够对根据关于发送器列及接收器列的多个组合而得到的测量数据进行对应于发送器列与接收器列之间的距离的线性相加, 从而导出适当地表示散射的状态的影像化函数。

[0115] 另外, 例如, 在与所述反射率对应的介电常数在所述区域中具有频率依赖性的情况下, 所述信息处理电路导出【数式17】作为所述影像化函数,

[0116] 【数式17】

$$\begin{aligned}
 & \rho(x, y, z) \\
 &= \int_0^{\infty} \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) d\omega \\
 &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^{\infty} d\omega \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{s_4 z} e^{\frac{idk_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}} \\
 [0117] & \quad \cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
 &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{ik_z z} e^{\frac{idk_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}} \\
 & \quad \cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \left( \frac{d\omega}{dk} \right) \left( \frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk_z
 \end{aligned}$$

[0118]  $k_x$ 、 $k_z$ 、 $k$ 、 $dk/dk_z$ 、 $d\omega/dk$  和  $s_4$  由【数式18】来确定,

[0119] 【数式18】

$$[0120] \quad k_x = k_{x_1} + is_3$$

$$[0121] \quad k_z = \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}$$

$$[0122] \quad k = \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}}$$

$$[0123] \quad \frac{dk}{dk_z} = \frac{k_z \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}}{k(k_x^2 + k_z^2)}$$

$$[0124] \quad \frac{d\omega}{dk} = \frac{c_0^2 k + \alpha c_0^2 \omega^2 k}{(a+b)\omega + 2\alpha\omega^2 - \alpha c_0^2 \omega k^2}$$

$$[0125] \quad s_4 = i k_z = i \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + i s_3)^2}$$

[0126]  $s_3$ 由【数式19】来确定,

[0127] 【数式19】

$$[0128] \quad s_3 = \frac{-i k_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-i k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

[0129]  $(x, y, z)$ 表示影像化对象位置, $k_{x_1}$ 、 $k_{y_1}$ 以及 $k_{y_2}$ 表示关于所述散射场函数的 $x_1$ 、 $y_1$ 以及 $y_2$ 的波数, $d$ 表示所述距离, $\omega$ 表示所述波动的角频率, $c_0$ 表示所述波动在真空中的传播速度, $a$ 、 $b$ 以及 $\alpha$ 表示关于德拜弛豫的参数,

[0130] 【数式20】

$$[0131] \quad \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

[0132] 【数式20】表示关于 $x_1$ 、 $y_1$ 以及 $y_2$ 进行了傅立叶变换后的所述测量数据。

[0133] 由此,影像化装置能够导出反映了关于德拜弛豫的参数的影像化函数。因此,影像化装置能够抑制依赖于波动的频率而产生的精度劣化。

[0134] 另外,例如,所述信息处理电路根据所述测量数据及所述距离来导出所述散射场函数,根据所述散射场函数来导出所述影像化函数,

[0135] 所述散射场函数由【数式21】来表现,

[0136] 【数式21】

$$[0137] \quad \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) = \iint_D \frac{e^{ik\rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{ik\rho_2}}{\rho_2} \varepsilon(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta$$

[0138]  $\rho_1$ 及 $\rho_2$ 由【数式22】来确定,

[0139] 【数式22】

$$[0140] \quad \rho_1 = \sqrt{(x_1 - \xi)^2 + (y_1 - \eta)^2 + (z_1 - \zeta)^2}$$

$$[0141] \quad \rho_2 = \sqrt{(x_2 - \xi)^2 + (y_2 - \eta)^2 + (z_2 - \zeta)^2}$$

[0142]  $(x_1, y_1, z_1)$ 表示所述波动的发送位置, $(x_2, y_2, z_2)$ 表示所述波动的接收位置, $k$ 表示所述波动的波数, $D$ 表示所述区域, $(\xi, \eta, \zeta)$ 对应于所述波动的反射位置, $\varepsilon$ 对应于在所述反射位置处的未知的反射率。

[0143] 由此,影像化装置能够导出以发送位置及接收位置有可能有不同的 $z$ 坐标为前提而确定的散射场函数,能够根据该散射场函数导出影像化函数。因此,影像化装置能够沿着具有曲面边界的区域的切平面,根据使用发送器列的多个发送器和接收器列的多个接收器

而得到的测定数据来适当地导出散射场函数及影像化函数。

[0144] 例如,所述信息处理电路通过求解所述散射场函数满足的方程式来导出所述散射场函数,所述方程式由【数式23】来表现,

[0145] 【数式23】

$$[0146] \quad \{\Delta_6 - 2(ik)^2\} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) = 0$$

[0147]  $\Delta_6$ 由【数式24】来确定。

[0148] 【数式24】

$$[0149] \quad \Delta_6 = \partial_{x_1}^2 + \partial_{x_2}^2 + \partial_{y_1}^2 + \partial_{y_2}^2 + \partial_{z_1}^2 + \partial_{z_2}^2$$

[0150] 由此,影像化装置能够分析性地导出散射场函数满足的方程式的解作为散射场函数。因此,影像化装置能够高效地导出适当的散射场函数。

[0151] 另外,例如,所述影像化函数由【数式25】来表现,

[0152] 【数式25】

$$[0153] \quad \rho(x, y, z) = \int_0^{\infty} \varphi(x, y, x, y, z, z, k) dk$$

[0154]  $(x, y, z)$ 表示影像化对象位置。

[0155] 由此,影像化装置能够使用输入了影像化对象位置的散射场函数来导出影像化函数。然后,由此,影像化装置能够将区域内的散射的状态可视化,能够将区域内的物体所含的散射体的构造适当地可视化。

[0156] 另外,例如,所述信息处理电路导出【数式26】作为所述散射场函数,

[0157] 【数式26】

$$[0158] \quad \begin{aligned} & \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2)} \sum_{I,J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\ & \quad \cdot e^{i(k_x x_I + k_{y_1} y_I + k_{y_2} y_J)} e^{-s_3 z_I} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} e^{s_3 x_2} e^{s_4 z_1} e^{s_5 z_2} \frac{d(k_x + is_3)}{dk_{x_1}} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \end{aligned}$$

[0159]  $k_x$ 、 $s_3$ 、 $s_4$ 以及 $s_5$ 由【数式27】来确定,

[0160] 【数式27】

$$[0161] \quad k_x = k_{x_1} + is_3$$

$$[0162] \quad s_3 = \frac{-ik_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-ik_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

$$[0163] \quad s_4 = \frac{i\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

$$[0164] \quad s_5 = \frac{i\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

[0165]  $k_{x1}$ 、 $k_{y1}$ 以及 $k_{y2}$ 表示关于所述散射场函数的 $x_1$ 、 $y_1$ 以及 $y_2$ 的波数, $d$ 表示所述距离, $\Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k)$ 表示在所述发送位置为 $(x_I, y_I, z_I)$ 、所述接收位置为 $(x_I+d, y_J, z_J)$ 的情况下的所述测量数据。

[0166] 由此,影像化装置能够在散射场函数中适当地反映波动的测量数据以及发送器列与接收器列之间的距离。因此,影像化装置能够导出适当地表示散射的状态的散射场函数。

[0167] 另外,例如,所述信息处理电路导出【数式28】作为所述影像化函数,

[0168] 【数式28】

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

[0170]  $k_x$ 、 $k_z$ 、 $k$ 、 $dk/dk_z$ 、 $s_3$ 、 $s_4$ 以及 $s_5$ 由【数式29】来确定,

[0171] 【数式29】

$$[0172] \quad k_x = k_{x1} + i s_3$$

$$[0173] \quad k_z = \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y2}^2})^2 - k_x^2}$$

$$[0174] \quad k = \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y1}^2 + k_{y2}^2) + \frac{(k_{y1}^2 - k_{y2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}}$$

$$[0175] \quad \frac{dk}{dk_z} = \frac{k_z \left\{ 1 - \frac{(k_{y1}^2 - k_{y2}^2)^2}{(k_x^2 + k_z^2)^2} \right\}}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y1}^2 + k_{y2}^2) + \frac{(k_{y1}^2 - k_{y2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}}}$$

$$[0176] \quad s_3 = \frac{-i k_{x1} \sqrt{k^2 - k_{y2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y1}^2}} = \frac{-i k_x \left( \sqrt{k_x^2 + k_z^2} - \frac{k_{y2}^2 - k_{y1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2}}$$

$$[0177] \quad s_4 = \frac{i k_z \left( \sqrt{k_x^2 + k_z^2} + \frac{k_{y2}^2 - k_{y1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2}}$$

$$[0178] \quad s_5 = \frac{ik_z \left( \sqrt{k_x^2 + k_z^2} - \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2\sqrt{k_x^2 + k_z^2}}$$

[0179] (x, y, z) 表示影像化对象位置,  $k_{x_1}$ 、 $k_{y_1}$  以及  $k_{y_2}$  表示关于所述散射场函数的  $x_1$ 、 $y_1$  以及  $y_2$  的波数,  $d$  表示所述距离,  $\Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k)$  表示在所述发送位置为  $(x_I, y_I, z_I)$ 、所述接收位置为  $(x_I + d, y_J, z_J)$  的情况下的所述测量数据。

[0180] 由此, 影像化装置能够在影像化函数中适当地反映波动的测量数据以及发送器列与接收器列之间的距离。影像化装置能够导出适当地表示散射的状态的影像化函数。

[0181] 另外, 例如, 所述信息处理电路使用多个散射场函数的合成来导出所述影像化函数, 所述多个散射场函数的合成针对与所述发送器列和所述接收器列相关的多个组合, 所述多个散射场函数分别对应于所述散射场函数,

[0182] 由【数式30】来表现,

$$[0183] \quad \begin{aligned} & \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2)} \sum_{I, J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\ & \quad \cdot e^{i(k_x x_2 + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} e^{-s_3 d} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} e^{s_3 x_2} e^{s_4 z_1} e^{s_5 z_2} \frac{d(k_x + is_3)}{dk_{x_1}} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \end{aligned}$$

[0184]  $k_x$ 、 $s_3$ 、 $s_4$  以及  $s_5$  由【数式31】来确定,

[0185] 【数式31】

$$[0186] \quad k_x = k_{x_1} + is_3$$

$$[0187] \quad s_3 = \frac{-ik_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-ik_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

$$[0188] \quad s_4 = \frac{i\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

$$[0189] \quad s_5 = \frac{i\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

[0190]  $k_{x_1}$ 、 $k_{y_1}$  以及  $k_{y_2}$  表示关于所述散射场函数的  $x_1$ 、 $y_1$  以及  $y_2$  的波数,  $d$  表示所述距离,  $\Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k)$  表示在所述发送位置为  $(x_I, y_I, z_I)$ 、所述接收位置为  $(x_I + d, y_J, z_J)$  的情况下的所述测量数据。

[0191] 由此, 影像化装置能够通过将反映了波动的测量数据以及发送器列与接收器列之间的距离的多个散射场函数的合成, 导出适当地表示散射的状态的影像化函数。

[0192] 另外, 例如, 在与所述反射率对应的的介电常数在所述区域中具有频率依赖性的情况下, 所述信息处理电路导出【数式32】作为所述影像化函数,

[0193] 【数式32】

$$\begin{aligned}
& \rho(x, y, z) \\
&= \int_0^{\infty} \varphi(x, y, x, y, z, z, k) d\omega \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^{\infty} d\omega \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} e^{-s_3 d} e^{ik_z z} \sum_{I, J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\
[0194] & \quad \cdot e^{i(k_x x_I + k_{y_1} y_{I1} + k_{y_2} y_{J2})} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} e^{-s_3 d} e^{ik_z z} \sum_{I, J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\
& \quad \cdot e^{i(k_x x_I + k_{y_1} y_{I1} + k_{y_2} y_{J2})} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} \left( \frac{d\omega}{dk} \right) \left( \frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk_z
\end{aligned}$$

[0195]  $k_x, k_z, k, dk/dk_z, d\omega/dk, s_3, s_4$  以及  $s_5$  由【数式33】来确定,

[0196] 【数式33】

$$[0197] \quad k_x = k_{x_1} + is_3$$

$$[0198] \quad k_z = \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}$$

$$[0199] \quad k = \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}}$$

$$[0200] \quad \frac{dk}{dk_z} = \frac{k_z \left\{ 1 - \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{(k_x^2 + k_z^2)^2} \right\}}{2\sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}}}$$

$$[0201] \quad \frac{d\omega}{dk} = \frac{c_0^2 k + \alpha c_0^2 \omega^2 k}{(a+b)\omega + 2\alpha\omega^2 - \alpha c_0^2 \omega k^2}$$

$$[0202] \quad s_3 = \frac{-ik_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-ik_x \left( \sqrt{k_x^2 + k_z^2} - \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2\sqrt{k_x^2 + k_z^2}}$$

$$[0203] \quad s_4 = \frac{ik_z \left( \sqrt{k_x^2 + k_z^2} + \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2\sqrt{k_x^2 + k_z^2}}$$

$$[0204] \quad s_5 = \frac{ik_z \left( \sqrt{k_x^2 + k_z^2} - \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2\sqrt{k_x^2 + k_z^2}}$$

[0205]  $(x, y, z)$  表示影像化对象位置,  $k_{x_1}, k_{y_1}$  以及  $k_{y_2}$  表示关于所述散射场函数的  $x_1, y_1$  以

及 $y_2$ 的波数, $d$ 表示所述距离, $\omega$ 表示所述波动的角频率, $c_0$ 表示所述波动在真空中的传播速度, $a$ 、 $b$ 以及 $\alpha$ 表示关于德拜弛豫的参数,

[0206] 【数式34】

$$[0207] \quad \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

[0208] 【数式34】表示关于 $x_1$ 、 $y_1$ 以及 $y_2$ 进行了傅立叶变换后的所述测量数据。

[0209] 由此,影像化装置能够导出反映了关于德拜弛豫的参数的影像化函数。因此,影像化装置能够抑制依赖于波动的频率而产生的精度劣化。

[0210] 另外,本公开的一个方式的影像化方法,包括:通过发送器列的多个发送器向测量对象的区域发送波动的步骤,所述发送器列包括排列在直线上的所述多个发送器;通过与所述发送器列间隔开设置的接收器列的多个接收器,从所述区域接收所述波动的步骤,所述接收器列包括排列在与排列所述多个发送器的直线平行的另一条直线上的所述多个接收器;以及根据测量数据以及距离,导出与关于所述波动的散射的散射场函数对应的影像化函数,并使用所述影像化函数,将所述区域内的物体所含的散射体的构造可视化的步骤,所述测量数据是由所述多个发送器和所述多个接收器的全部或一部分的组合而得到的,所述距离是排列所述多个发送器的直线与排列所述多个接收器的直线之间的距离。

[0211] 由此,能够根据发送器列的多个发送器和接收器列的多个接收器的各种组合来取得足够的信息作为测量数据。此外,由于在发送器列与接收器列之间设置有间隔,所以能够向区域适当地发送波动,并且能够适当地从区域接收波动。然后,使用根据波动的测量数据和发送器列与接收器列之间的距离导出的影像化函数,能够适当地将散射体的构造可视化。

[0212] 此外,由于发送器及接收器的配置被约束在两条直线上,所以与发送器及接收器被任意配置的情况相比,能够简化运算处理。因此,能够抑制运算处理的复杂化。即,能够利用波动将区域内的物体所含的散射体的构造可视化,能够抑制运算处理的复杂化,并且提高散射体的构造的可视化中的空间分辨率。

[0213] 以下,使用附图对实施方式进行了说明。另外,以下说明的实施方式均表示总括性或具体性的例子。以下的实施方式所示的数值、形状、材料、构成要素、构成要素的配置位置以及连接方式、步骤、步骤的顺序等是一例,并不意图限定请求保护的技术方案的范围。

[0214] 另外,在以下的说明中,特别是上述专利文献2、专利文献3、专利文献4以及专利文献5所记载的技术等可以作为已有的技术而参照。另外,在以下的说明中,主要将微波等电波设想为波动,但波动不限于微波等电波。另外,基于散射的影像化也可以表现为散射断层扫描(tomography)。因此,以下说明中的影像化装置及影像化方法可以分别表现为散射断层扫描装置和散射断层扫描方法。

[0215] (实施方式)

[0216] 本实施方式中的影像化装置利用波动将区域内的物体所含的散射体的构造可视化。以下,对本实施方式中的影像化装置,包括作为其基础的技术和理论等进行详细说明。

[0217] <I概要>

[0218] 本公开描述了根据S-Array(super-array)散射场理论的微波图像化技术。

[0219] 图1是表示参考例中的多基地(MS)天线的图。在多基地天线中,多个发送天线元件T和多个接收天线元件R交替配置成一列。发送天线元件T和接收天线元件R也可以简单地表

现为发送元件和接收元件。

[0220] 各天线元件的尺寸为半波长( $\lambda/2$ )。因此,y轴方向的分辨率为半波长( $\lambda/2$ )。这不满足奈奎斯特采样条件,因此会产生混叠(aliasing)现象。因此,考虑使天线阵列向y方向偏移 $\lambda/4$ 并向x方向扫描。或者,也可以使用将最初就独立的两个阵列天线系统捆绑而一起扫描的方法。

[0221] 但是,在这种类型的阵列天线中,与y方向的长度相比,所得到的数据数非常少。

[0222] 例如,在图1的多基地天线中得到的数据在多基地天线的位置I、II处分别为9对,总共18对。此外,在相邻的收发元件间的电磁感应耦合被排除的情况下在I、II处得到的数据分别是4对,总共只有8对。无论考虑怎样的天线元件的配置,都难以实现满足奈奎斯特采样定理的单一的阵列天线系统。

[0223] 图2是表示本实施方式中的S-Array多基地天线的例子的图。S-Array多基地天线有时仅表现为S-Array。在该例中,S-Array多基地阵列天线包括发送阵列天线TA和接收阵列天线RA这两列阵列天线。在S-Array多基地阵列天线中,在收发中得到36对数据。

[0224] 但是,迄今为止,事实上还没有从这样的数据中得到对象物的正确影像的逆散射分析技术。构建一种正确编入基于收发阵列天线间的距离的理论,是极其困难的课题。

[0225] 本公开中的S-Array散射场理论解决了该课题,实现了满足奈奎斯特采样条件的图2的下侧那样的虚拟高密度S-Array。即,在S-Array散射场理论中,在理论上将两列的阵列天线(即发送阵列天线TA和接收阵列天线RA)转换成一系列的收发阵列天线。因此,在y方向上得到 $\lambda/4$ 的分辨率。另外,通过向x方向的扫描,在x方向上可得到任意的分辨率。

[0226] 本公开中的S-Array散射场理论与关于二维阵列天线的已有的散射场理论在以下方面决定性地不同。

[0227] 在已有的方法中,为了满足采样条件,向x方向扫描二维阵列天线。由此,散射的逆分析算法中的多重积分比S-Array大一维。因此,分析所需的时间为n倍以上。这里,n是x方向上的样本数,例如n是128~256。因此,在现有计算机能力下,难以将已有的散射场分析方法实际应用于二维阵列天线。

[0228] 例如,在已有的关于二维的方法中,从平面网格状的二维阵列天线中的任意元件发送信号,并且由该二维阵列天线中的其他任意元件接收信号。由此,得到 $n^4$ 组(n为正方网格的一边的元件数)的数据。而且,各组的数据是频带为10GHz以上的时序数据。对于这样的根据二维多基地数据重构对象物的影像的算法,已经推导出了重构理论。

[0229] 但是,如上所述,由于装置复杂性和获得有效分辨率的难度,使用该二维阵列天线的影像化不一定是现实的。另外,只要不在x方向上进行扫描,在分辨率方面就存在课题。与此相对,S-Array散射场理论如下所述,非常精练,并且,散射的逆分析的算法也是根据已有的一维算法通过少许变更而得到的,因此实现性非常高。

[0230] 图3是表示本实施方式中的与S-Array相关的各坐标的例子的图。S-Array是由图3所示的1列发送阵列天线TA和1列接收阵列天线RA这两列线性阵列天线构成的准二维阵列天线。

[0231] 具体而言,发送阵列天线TA包括n个发送天线元件T。接收阵列天线RA包括n个接收天线元件R。发送阵列天线TA的x坐标由 $x_1$ 来表现,接收阵列天线RA的x坐标由 $x_2$ 来表现,发送阵列天线TA与接收阵列天线RA之间在x方向上的距离由d来表现。在该结构中,在扫描方向

的各点x处得到n个发送元件和n个接收元件的任意组合的 $n^2$ 个时序数据。

[0232] 图4是本实施方式中的S-Array的外观图。包括多个发送天线元件T的发送阵列天线TA和包括多个接收天线元件R的接收阵列天线RA分开构成。即,准二维地排列多个发送天线元件T和多个接收天线元件R。

[0233] 在这样的准二维阵列天线配置的情况下,当应用已有的针对二维阵列天线的重构理论时,由于提高一个维度而花费大量计算时间。因此,实际应用化仍很困难。希望有一种利用了将多个发送天线元件T和多个接收天线元件R配置在1列上的线性阵列天线的情况下的解析解进行的重构那样的、效率优异的计算方法。效率优异的计算方法在准二维阵列天线的实际应用化中是有用的。

[0234] 令人惊讶地,最近,本发明人等得到了该准二维排列的情况下的重构的解析解。即,发现了桥接一维排列的理论和二维排列的理论的方法,解析得到准二维排列的情况下的重构式。根据该理论(S-Array散射场理论),在发送阵列天线TA和接收阵列天线RA是空间上分离的线性天线的情况下,能够构建有实用性的逆散射理论。在下文中,对该理论的内容及其应用进行详细描述。

[0235] <II根据已有的理论的制备>

[0236] <II-1平面边界的一维排列MS逆散射理论>

[0237] 在使用了一维阵列天线的影像化装置中用于对象物影像化的方法极其简单,仅解下式(2-1-1)的波动方程式。

[0238] 【数式35】

$$[0239] \quad (\Delta + k^2)\varphi = 0$$

$$[0240] \quad \Delta = \partial_x^2 + \partial_y^2 + \partial_z^2$$

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

[0241] 在此,

[0242] 【数式36】

[0243]  $\varphi$

[0244] 表示未知函数。k表示波数。 $\Delta$ 表示拉普拉斯算子。 $\partial$ 表示用下标表示的变量的偏微分。

[0245] 该方法被称为单基地(monostatic)。在该方法中,发送元件和接收元件一体化后的成对元件沿y轴配置。如果有n个收发的成对元件,则得到n组数据。但是,用该方法得到的精度基本上是发送和接收的各天线元件尺寸的2倍。因此,难以得到高分辨率的图像。

[0246] 图5是表示一维多基地阵列天线的概念图。如图5所示,在从n个元件中选择任意两个作为发送元件及接收元件的情况下,空间分辨率成为2倍。进而能够从近距离到远距离以高S/N比接收信号。因此,最终得到的图像的质量得到大幅改善。当然数据量增加n倍,但根据下述理论,重构所需的时间也飞跃性地缩短。

[0247] 如图5所示,这里讨论从点 $P_1(x, y_1, z)$ 放射的电波在点 $P(\xi, \eta, \zeta)$ 处反射,并在点 $P_2(x, y_2, z)$ 处接收的情况。在点P在整个区域D中移动时,在点 $P_2$ 处接收的信号如下式(2-1-2)所示。

[0248] 【数式37】

$$[0249] \quad \varphi(x, y_1, y_2, z) = \iiint_D \frac{e^{ik\rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{ik\rho_2}}{\rho_2} \varepsilon(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta$$

$$[0250] \quad \rho_1 = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y_1-\eta)^2 + (z-\zeta)^2}$$

$$[0251] \quad \rho_2 = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y_2-\eta)^2 + (z-\zeta)^2}$$

· · · (2-1-2)

[0252] 在此,  $\varepsilon(\xi, \eta, \zeta)$  表示点P( $\xi, \eta, \zeta$ )的介电常数的函数, 对应于点P( $\xi, \eta, \zeta$ )处的反射率。另外, 点P( $\xi, \eta, \zeta$ )对应于反射点。另外,  $\varepsilon(\xi, \eta, \zeta)$  是未知的。另外, 假定为时间因子与  $\exp(-i\omega t)$  成比例。上式的被积分项的核函数由下式(2-1-3)的  $\varphi$  来表现。

[0253] 【数式38】

$$[0254] \quad \phi = \frac{e^{ik\rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{ik\rho_2}}{\rho_2}$$

· · · (2-1-3)

[0255] 接着, 研究该式(2-1-3)成为渐近解的偏微分方程式。因此, 对于微分结果中产生的  $1/\rho$ , 忽略高次项而进行计算。在此, 微分的简略记法如式(2-1-4)那样定义。

[0256] 【数式39】

$$[0257] \quad \frac{\partial}{\partial t} \rightarrow \partial_t, \frac{\partial}{\partial x} \rightarrow \partial_x, \frac{\partial}{\partial y_1} \rightarrow \partial_{y_1}, \frac{\partial}{\partial y_2} \rightarrow \partial_{y_2}, \frac{\partial}{\partial z} \rightarrow \partial_z$$

· · · (2-1-4)

[0258] 另外, 在此, 研究了式(2-1-3)在短波长(高频或k大)的情况下成为渐近解的偏微分方程式。这样的偏微分方程式的解在使用微波的影像化中可以大致看作是精确解。首先,  $\varphi$  的各次数的微分结果如以下的式(2-1-5)那样表现。

[0259] 【数式40】

$$[0260] \quad \partial_x \phi = ik(x-\xi) \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right) \phi + o(\rho^{-3}) \quad \partial_{y_1} \phi = ik \frac{y_1-\eta}{\rho_1} \phi + o(\rho^{-3})$$

$$[0261] \quad \partial_{y_2} \phi = ik \frac{y_2-\eta}{\rho_2} \phi + o(\rho^{-3}) \quad \partial_z \phi = ik(z-\zeta) \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right) \phi + o(\rho^{-3})$$

$$[0262] \quad \partial_x \partial_x \phi = (ik)^2 (x-\xi)^2 \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right)^2 \phi + o(\rho^{-3})$$

$$[0263] \quad \partial_z \partial_z \phi = (ik)^2 (z-\zeta)^2 \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right)^2 \phi + o(\rho^{-3})$$

$$[0264] \quad \partial_{y_1} \partial_{y_1} \phi = (ik)^2 \left( \frac{y_1-\eta}{\rho_1} \right)^2 \phi + o(\rho^{-3})$$

$$[0265] \quad \partial_{y_2} \partial_{y_2} \phi = (ik)^2 \left( \frac{y_2-\eta}{\rho_2} \right)^2 \phi + o(\rho^{-3})$$

· · · (2-1-5)

[0266] 在下文中,省略繁杂的 $o(*)$ 项。根据与二阶微分相关的4个式子的和,得到下式(2-1-6)。

[0267] 【数式41】

$$\Delta_4 \phi = (\partial_x^2 + \partial_{y_1}^2 + \partial_{y_2}^2 + \partial_z^2) \phi$$

$$[0268] = (ik)^2 \left\{ 2 + 2 \frac{(x-\xi)^2 + (z-\zeta)^2}{\rho_1 \rho_2} \right\} \phi$$

• • • (2-1-6)

[0269] 因此,根据式(2-1-6)得到下式(2-1-7)。

[0270] 【数式42】

$$\{\Delta_4 - 2(ik)^2\} \phi = 2(ik)^2 \frac{\rho_1^2 - (y_1 - \eta)^2}{\rho_1 \rho_2} \phi$$

$$[0271] = 2(ik)^2 \frac{\rho_2^2 - (y_2 - \eta)^2}{\rho_1 \rho_2} \phi$$

• • • (2-1-7)

[0272] 通过使式(2-1-7)右边的运算符(日文:演算子)作用2次,得到下式(2-1-8)。

[0273] 【数式43】

$$\{\Delta_4 - 2(ik)^2\}^2 \phi = 4(ik)^4 \frac{\{\rho_1^2 - (y_1 - \eta)^2\} \{\rho_2^2 - (y_2 - \eta)^2\}}{\rho_1^2 \rho_2^2} \phi$$

$$[0274] = 4(ik)^4 \{1 - (ik)^{-2} \partial_{y_1}^2\} \{1 - (ik)^{-2} \partial_{y_2}^2\} \phi$$

• • • (2-1-8)

[0275] 整理式(2-1-8)得到下式(2-1-9)。

[0276] 【数式44】

$$[0277] \left[ \frac{1}{4} \{\Delta_4 - 2(ik)^2\}^2 - \partial_{y_1}^2 \partial_{y_2}^2 + (ik)^2 (\partial_{y_1}^2 + \partial_{y_2}^2) - (ik)^4 \right] \phi = 0$$

• • • (2-1-9)

[0278] 该式(2-1-9)是假定稳定状态而导出的,但容易将该式(2-1-9)扩展到非稳定状态。因此,使用表示关于时间 $t$ 的偏微分的 $\partial_t$ 以及表示电波的传播速度的 $c$ ,进行如下式(2-1-10)那样的变量的置换。

[0279] 【数式45】

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

[0280]

• • • (2-1-10)

[0281] 通过上述过程,最终得到如下式(2-1-11)那样的方程式。

[0282] 【数式46】

$$[0283] \quad \left\{ \Delta_4^2 - \frac{4}{c^2} (\partial_t^2 \partial_x^2 + \partial_t^2 \partial_z^2) - 4 \partial_{y_1}^2 \partial_{y_2}^2 \right\} \phi = 0$$

$$[0284] \quad \Delta_4 = \partial_x^2 + \partial_{y_1}^2 + \partial_{y_2}^2 + \partial_z^2$$

. . . (2-1-11)

[0285] 上述的式(2-1-11)是式(2-1-3)的 $\phi$ 为解的偏微分方程式。通过对式(2-1-2)的积分核应用微分,式(2-1-2)的【数式47】

$$[0286] \quad \phi$$

[0287] 也满足所述偏微分方程式。该方程式是由5个变量(t、x、 $y_1$ 、 $y_2$ 、z)构成的四维的模拟波动方程式。

[0288] 接着,使用傅里叶变换求解该方程式。首先,

$$[0289] \quad \text{【数式48】}$$

$$[0290] \quad \phi$$

[0291] 如下式(2-1-12)所示,对t、x、 $y_1$ 、 $y_2$ 进行多重傅立叶变换。

$$[0292] \quad \text{【数式49】}$$

$$[0293] \quad \tilde{\phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, z, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} dt \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} \phi(x, y_1, y_2, z, t) dx dy_1 dy_2$$

. . . (2-1-12)

[0294] 在将关于z的微分表现为 $D_z$ 的情况下,根据式(2-1-11)及式(2-1-12)而得到以下的式(2-1-13)。

$$[0295] \quad \text{【数式50】}$$

$$[0296] \quad \left\{ (D_z^2 - k_x^2 - k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2 + 4k^2 (D_z^2 - k_x^2) - 4k_{y_1}^2 k_{y_2}^2 \right\} \tilde{\phi} = 0$$

. . . (2-1-13)

[0297] 这里,使用 $\omega = ck$ 的关系。该方程式的4个基本解如下式(2-1-14)那样表现。

$$[0298] \quad \text{【数式51】}$$

$$[0299] \quad E_1 = e^{i \left\{ \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2} \right\} z}$$

$$[0300] \quad E_2 = e^{-i \left\{ \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2} \right\} z}$$

$$[0301] \quad E_3 = e^{i \left\{ \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} - \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2} \right\} z}$$

$$[0302] \quad E_4 = e^{-i \left\{ \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} - \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2} \right\} z}$$

. . . (2-1-14)

[0303] 当考虑时间因子是 $e^{-i\omega t}$ 、在放射电波的路径上增加相位、以及在物体处反射的电波朝向测量面(测定面)反弹时, $E_1$ 是唯一有意义的解。因此,得到下式(2-1-15)。

$$[0304] \quad \text{【数式52】}$$

[0305] 
$$\tilde{\varphi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, z, k) = a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{i\{\sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}\}z}$$
  
 . . . (2-1-15)

[0306] 通过将z=0代入该式(2-1-15),如下式(2-1-16)那样求出a(k<sub>x</sub>,k<sub>y1</sub>,k<sub>y2</sub>,k)。

[0307] 【数式53】

[0308] 
$$a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) = \tilde{\varphi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, 0, k)$$
  
 . . . (2-1-16)

[0309] 最终,

[0310] 【数式54】

[0311]  $\varphi$

[0312] 如下式(2-1-17)那样求出。

[0313] 【数式55】

[0314] 
$$\varphi(x, y_1, y_2, z, k) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \cdot e^{i\{\sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}\}z} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2}$$
  
 . . . (2-1-17)

[0315] 在k和z固定的条件下,将极限操作(y<sub>2</sub>→y<sub>1</sub>=y)应用于式(2-1-17),通过将结果关于k积分,如下式(2-1-18)那样求出影像化函数。

[0316] 【数式56】

[0317] 
$$\phi(x, y, y, z, k) = \lim_{y_2 \rightarrow y_1 = y} [\phi(x, y, y_2, z, k)]$$
  

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

[0318] 
$$\rho(x, y, z) = \int_0^{\infty} \phi(x, y, y, z, k) dk$$
  
 . . . (2-1-18)

[0319] 如上所述,能够解析性地求解一维排列中的多基地逆散射问题。但是,在一维排列中配置发送元件和接收元件这样的大制约是存在的。而且,存在硬件上的课题,如为了避免发送元件和接收元件的感应耦合而必须设置间隙、以及在采用了有源巴伦(active balun)的情况下不能切换收发的作用等。而且,由于难以并行测量,所以还存在数据的取得时间变长的课题。

[0320] <II-2后方散射和曲面边界的一维排列MS逆散射理论>

[0321] 描述区域的边界面为曲面的情况下的逆散射理论。

[0322] 图6是表示发送点及接收点的关系的概念图。图6示出了从r<sub>1</sub>发出的波动在点ξ(ξ<sub>1</sub>、

$\xi_2, \dots$ ) 处反射而返回点  $r_2$  的状况。

[0323] 例如, 在角频率  $\omega (= 2\pi f)$  为恒定的条件下, 波动的发送点  $r_1$  和接收点  $r_2$  在满足某个约束条件的同时, 在  $x$  截面  $D$  的内部独立地自由移动。在此时得到的数据由函数  $G(r_1, r_2, \omega)$  来表现的情况下, 该函数  $G(r_1, r_2, \omega)$  应当与反射点在区域内的分布有关系。

[0324] 这里,  $G(r_1, r_2, \omega)$  是来自所有点  $\xi$  的反射信号之和。此外, 由于在区域内有大量反射点, 所以  $G(r_1, r_2, \omega)$  可以如下式 (2-2-1) 那样表现。

[0325] 【数式57】

$$[0326] \quad G(r_1, r_2, \omega) = \iiint_D \varphi(r_1 \rightarrow \xi \rightarrow r_2, \omega) d\xi$$

. . . (2-2-1)

[0327] 在此,

[0328] 【数式58】

$$[0329] \quad \varphi(r_1 \rightarrow \xi \rightarrow r_2, \omega)$$

[0330] 表示从  $r_1$  出来、在点  $\xi$  处反射并向点  $r_2$  返回的波动的信号强度。

[0331] 另外, 对波动的发送点  $r_1$  和接收点  $r_2$  施加的约束条件是  $r_1$  和  $r_2$  的  $x$  坐标始终相等。

[0332] 以下, 使用该函数  $G(r_1, r_2, \omega)$  说明散射的逆问题的理论构造。在此, 三维空间部分的区域用  $D$  来表现, 其边界用  $\partial D$  来表现。在此情况下, 函数  $G(r_1, r_2, \omega)$  在区域  $D$  的内部成为如下式 (2-2-2) 那样的微分方程式的解。

[0333] 【数式59】

$$[0334] \quad L\left(\frac{\partial}{\partial t}, \frac{\partial}{\partial r_1}, \frac{\partial}{\partial r_2}\right) \bar{G}(r_1, r_2, t) = 0$$

. . . (2-2-2)

[0335] 在此,

[0336] 【数式60】

$$[0337] \quad \bar{G}(r_1, r_2, t)$$

[0338] 是将函数  $G(r_1, r_2, \omega)$  关于  $\omega$  进行傅立叶变换而得到的函数。在边界  $\partial D$  处的  $G(r_1, r_2, \omega)$  的值是接收元件的测量值。在该边界条件下求解上述方程式。根据其结果,  $\rho(r)$  如下式 (2-2-3) 那样定义。

[0339] 【数式61】

$$[0340] \quad \rho(r) = \lim_{t \rightarrow 0} \left[ \text{Tr} \left[ \bar{G}(r_1, r_2, t) \right] \right] = \bar{G}(r, r, 0)$$

. . . (2-2-3)

[0341] 在此,  $\text{Tr}$  表示追踪运算。该  $\rho(r)$  是与要求出的区域  $D$  内的介电常数的梯度有关系的函数。实际上, 难以求出在这里出现的微分算子  $L(\partial/\partial t, \partial/\partial r_1, \partial/\partial r_2)$ 。

[0342] 在下文中, 描述求出该微分算子的方法。在任意曲线上,  $r_1$  和  $r_2$  的  $y$  坐标和  $z$  坐标不一定相等。具体而言,  $r_1$  和  $r_2$  可以表现为  $r_1 = (x, y_1, z_1)$  和  $r_2 = (x, y_2, z_2)$ 。进而, 函数  $G$  如下定义。

[0343] 【数式62】

$$[0344] \quad G(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) = \iiint_D \varphi(\mathbf{r}_1 \rightarrow \xi \rightarrow \mathbf{r}_2, \omega) d\xi$$

· · · (2-2-4)

[0345] 接下来,研究满足函数 $G(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega)$ 的方程式。这里, $\omega = ck$ 。 $c$ 是传播速度, $k$ 是波数。在波长为 $\lambda$ 的情况下, $k = 2\pi/\lambda$ 的关系成立。

[0346] 图7是表示发送点及接收点的坐标的概念图。在图7中,发送点位于 $P_1(x, y_1, z_1)$ ,接收点位于 $P_2(x, y_2, z_2)$ 。从发送点 $P_1$ 放射的波动在点 $P(\xi, \eta, \zeta)$ 处反射,到达接收点 $P_2$ 。

[0347] 例如, $z_1$ 和 $z_2$ 是任意的。对应于发送点 $P_1$ 及接收点 $P_2$ 的测量点在截面曲线 $S$ 上移动。截面曲线 $S$ 可以表现为 $z = f(y)$ 。因此, $z_1 = f(y_1)$ 和 $z_2 = f(y_2)$ 成立。另外, $P_1$ 与 $P$ 之间的距离由 $\rho_1$ 来表现, $P_2$ 与 $P$ 之间的距离由 $\rho_2$ 来表现。

[0348] 在上述情况下,作为散射场函数,导入如下式(2-2-5)那样的函数 $\varphi$ 。

[0349] 【数式63】

$$[0350] \quad \varphi(x, y_1, y_2, z_1, z_2, \omega) = \iiint_D \frac{e^{ik\rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{ik\rho_2}}{\rho_2} \varepsilon(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta$$

$$[0351] \quad \rho_1 = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y_1-\eta)^2 + (z_1-\zeta)^2}$$

$$[0352] \quad \rho_2 = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y_2-\eta)^2 + (z_2-\zeta)^2}$$

· · · (2-2-5)

[0353] 在此, $\varepsilon(\xi, \eta, \zeta)$ 表示点 $(\xi, \eta, \zeta)$ 的介电常数的函数,对应于点 $(\xi, \eta, \zeta)$ 处的反射率。另外,点 $(\xi, \eta, \zeta)$ 对应于反射点。另外, $\varepsilon(\xi, \eta, \zeta)$ 是未知的。另外, $k$ 表示波数。另外,假定为时间因子与 $\exp(-i\omega t)$ 成比例。由于上述的式(2-2-5)的被积分项的函数是式(2-2-1)的【数式64】。

[0354] 【数式64】

[0355]  $\varphi$

[0356] 即,下式(2-2-6)成立。

[0357] 【数式65】

$$[0358] \quad \varphi = \frac{e^{ik\rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{ik\rho_2}}{\rho_2} \varepsilon(\xi, \eta, \zeta)$$

· · · (2-2-6)

[0359] 接着,研究式(2-2-6)成为高频下的渐近解的偏微分方程式。因此,对于微分结果中产生的 $1/\rho$ ,忽略高次项而进行计算。在此,微分的简略记法如以下的式(2-2-7)那样定义。

[0360] 【数式66】

$$[0361] \quad \frac{\partial}{\partial t} \rightarrow \partial_t, \frac{\partial}{\partial x} \rightarrow \partial_x, \frac{\partial}{\partial y_1} \rightarrow \partial_{y_1}, \frac{\partial}{\partial y_2} \rightarrow \partial_{y_2}, \frac{\partial}{\partial z_1} \rightarrow \partial_{z_1}, \frac{\partial}{\partial z_2} \rightarrow \partial_{z_2}$$

· · · (2-2-7)

[0362] 计算结果是导出了 $\varphi$ 满足下式(2-2-8)的方程式。

[0363] 【数式67】

$$[0364] \left[ \frac{1}{4} \Delta_s^2 - (ik)^2 \partial_x^2 - (\partial_{y_1}^2 + \partial_{z_1}^2)(\partial_{y_2}^2 + \partial_{z_2}^2) \right] \phi = 0$$

· · · (2-2-8)

[0365] 该式(2-2-8)是假定稳定状态而导出的,但容易将该式(2-2-8)扩展到非稳定状态。为此,进行如下式(2-2-9)那样的变量的置换。

[0366] 【数式68】

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

[0367]

· · · (2-2-9)

[0368] 最终得到下式(2-2-10)。

[0369] 【数式69】

$$[0370] \left[ \frac{1}{4} \Delta_s^2 - \frac{1}{c^2} \partial_t^2 \partial_x^2 - (\partial_{y_1}^2 + \partial_{z_1}^2)(\partial_{y_2}^2 + \partial_{z_2}^2) \right] \phi = 0$$

· · · (2-2-10)

[0371] 接着,假定为 $\phi$ 的时间因子与 $\exp(-i\omega t)$ 成比例,研究式(2-2-10)的解。首先,通过将 $\phi$ 对 $t, x, y_1, y_2$ 进行多重傅立叶变换,得到下式(2-2-11)。

[0372] 【数式70】

$$\tilde{\phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, z_1, z_2, \omega)$$

$$[0373] = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} dt \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_{y_1} y_1} dy_1 \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_{y_2} y_2} dy_2 \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_x x} \phi(x, y_1, y_2, z_1, z_2, t) dx$$

· · · (2-2-11)

[0374] 通过将关于 $z_1, z_2$ 的偏微分分别表现为 $D_{z_1}, D_{z_2}$ ,得到以下的式(2-2-12)。

[0375] 【数式71】

$$[0376] \{(D_{z_1}^2 + D_{z_2}^2 - k_x^2 - k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2 - 4k^2 k_x^2 - 4(D_{z_1}^2 - k_{y_1}^2)(D_{z_2}^2 - k_{y_2}^2)\} \tilde{\phi} = 0$$

· · · (2-2-12)

[0377] 接下来,研究求解式(2-2-12)的方程式。但是,存在 $z_1$ 和 $z_2$ 两个变量。因此,关于固定的 $(x, y_1, y_2)$ 或 $(k_x, k_{y_1}, k_{y_2})$ ,如果不对 $(z_1, z_2)$ 空间中的具有一维自由度的区域给出边界条件,则难以求解式(2-2-12)的方程式。然而,通过雷达的测量得到的边界条件仅在 $(z_1, z_2)$ 空间中的一个点 $(f(y_1), f(y_2))$ 给出。

[0378] 为了解决该问题,利用 $z_1 = z$ 且 $z_2 = z$ 的情况下的理论与本节中的理论的整合性。即,根据 $z_1$ 和 $z_2$ 独立的本节理论导出的解包含 $z_1 = z$ 且 $z_2 = z$ 的特别情况下的解。因此,首先,假定式(2-2-12)的解如下式(2-2-13)所示。

[0379] 【数式72】

[0380]  $E(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, z_1, z_2) = \exp(is_1 z_1) \exp(is_2 z_2)$   
 $\dots (2-2-13)$

[0381] 在  $z_1 = z_2 = z$  的情况下, 得到下式 (2-2-14)。

[0382] 【数式73】

[0383]  $E(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, z_1, z_2) = \exp\{i(s_1 + s_2)z\}$   
 $\dots (2-2-14)$

[0384] 另外, 通过将式 (2-2-14) 代入式 (2-2-12), 得到下式 (2-2-15)。

[0385] 【数式74】

[0386]  $(s_1^2 + s_2^2 + k_x^2 + k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2)^2 - 4k_x^2 k_{y_1}^2 - 4(s_1^2 + k_{y_1}^2)(s_2^2 + k_{y_2}^2) = 0$   
 $\dots (2-2-15)$

[0387] 此外, 使用另一方程式。具体而言, 根据前节的式 (2-1-15), 根据上述的整合性, 得到下式 (2-2-16)。

[0388] 【数式75】

[0389]  $s_1 + s_2 = \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}$   
 $\dots (2-2-16)$

[0390] 根据式 (2-2-15) 及式 (2-2-16), 如下式 (2-2-17) 那样决定  $s_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2})$  及  $s_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2})$ 。

[0391] 【数式76】

[0392]  $s_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) = \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$

[0393]  $s_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) = \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$   
 $\dots (2-2-17)$

[0394] 使用上述  $s_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$  和  $s_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$ , 如下式 (2-2-18) 那样导出式 (2-2-10) 的方程式的解。

[0395] 【数式77】

[0396]  $\phi(x, y_1, y_2, z_1, z_2, k)$   
 $= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$   
 $\cdot e^{is_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)z_1} e^{is_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)z_2} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2}$

$\dots (2-2-18)$

[0397] <II-3前方散射和平面边界的一维排列MS逆散射理论>

[0398] 图8是表示前方散射中的发送点及接收点的关系的概念图。前方散射与后方散射

(II-2)的不同点在于,所有散射点的z坐标都位于发送点 $r_1$ 的z坐标和接收点 $r_2$ 的z坐标之间。 $r_1$ 和 $r_2$ 在分别在 $\partial D_1$ 上和 $\partial D_2$ 上位于相同x坐标的约束下自由移动,测量散射数据。该系统中的散射场函数如下式(2-3-1)那样定义。

[0399] 【数式78】

$$[0400] \quad \phi(x, y_1, y_2, z_1, z_2, \omega) = \iint_D \frac{e^{ik\rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{-ik\rho_2}}{\rho_2} \varepsilon(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta$$

$$[0401] \quad \rho_1 = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y_1-\eta)^2 + (z_1-\zeta)^2}$$

$$[0402] \quad \rho_2 = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y_2-\eta)^2 + (z_2-\zeta)^2}$$

• • • (2-3-1)

[0403] 与关于后方散射的例子中的式(2-2-5)的不同点在于,积分符号中的 $\exp(-ik\rho_2)/\rho_2$ 的相位因子为负。但是,散射场函数满足与后方散射的例子中的式(2-2-10)相同的下式(2-3-2)的偏微分方程式。

[0404] 【数式79】

$$[0405] \quad \left[ \frac{1}{4} \Delta_5^2 - \frac{1}{c^2} \partial_t^2 \partial_x^2 - (\partial_{y_1}^2 + \partial_{z_1}^2)(\partial_{y_2}^2 + \partial_{z_2}^2) \right] \phi = 0$$

• • • (2-3-2)

[0406] 接着,假定为 $\phi$ 的时间因子与 $\exp(-i\omega t)$ 成比例,研究式(2-3-2)的解。首先,将 $\phi$ 关于 $t, x, y_1, y_2$ 进行多重傅立叶变换,得到下式。

[0407] 【数式80】

$$[0408] \quad \tilde{\phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, z_1, z_2, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} dt \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_{y_1} y_1} dy_1 \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_{y_2} y_2} dy_2 \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_x x} \phi(x, y_1, y_2, z_1, z_2, t) dx$$

• • • (2-3-3)

[0409] 通过将关于 $z_1, z_2$ 的偏微分分别表现为 $D_{z_1}, D_{z_2}$ ,得到以下的式(2-3-4)。

[0410] 【数式81】

$$[0411] \quad \{(D_{z_1}^2 + D_{z_2}^2 - k_x^2 - k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2 - 4k_x^2 k_x^2 - 4(D_{z_1}^2 - k_{y_1}^2)(D_{z_2}^2 - k_{y_2}^2)\} \tilde{\phi} = 0$$

• • • (2-3-4)

[0412] 接下来,研究求解式(2-3-4)的方程式。但是,存在 $z_1, z_2$ 两个变量。为了解决该问题,利用 $z_1 = z$ 且 $z_2 = z$ 的情况下的理论与本节中的理论的整合性。即,根据 $z_1$ 和 $z_2$ 独立的本节理论导出的解包含 $z_1 = z$ 且 $z_2 = z$ 的特别情况下的解。因此,首先,假定式(2-3-4)的解如下式(2-3-5)所示。

[0413] 【数式82】

$$[0414] \quad E(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, z_1, z_2) = \exp(is_1 z_1) \exp(-is_2 z_2)$$

• • • (2-3-5)

[0415] 另外,根据式(2-3-4)得到下式(2-3-6)。

[0416] 【数式83】

$$[0417] \quad (s_1^2 + s_2^2 + k_x^2 + k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2)^2 - 4k^2 k_x^2 - 4(s_1^2 + k_{y_1}^2)(s_2^2 + k_{y_2}^2) = 0$$

... (2-3-6)

[0418] 式(2-3-5)在 $z_1 = z_2 = z$ 的情况下,如下式(2-3-7)那样表现。

[0419] 【数式84】

$$[0420] \quad E(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, z_1, z_2) = \exp\{i(s_1 - s_2)z\}$$

... (2-3-7)

[0421] 然后,与式(2-2-16)相同地得到下式(2-3-8)。

[0422] 【数式85】

$$[0423] \quad s_1 - s_2 = \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}$$

... (2-3-8)

[0424] 根据式(2-3-6)及式(2-3-8),如下式(2-3-9)那样决定 $s_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2})$ 及 $s_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2})$ 。

[0425] 【数式86】

$$[0426] \quad s_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) = \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

$$[0427] \quad s_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) = \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

... (2-3-9)

[0428] 因此,散射场函数可以如下式(2-3-10)那样得到。

[0429] 【数式87】

$$[0430] \quad \begin{aligned} & \phi(x, y_1, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\ & \quad \cdot e^{is_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)z_1} e^{-is_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)z_2} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \end{aligned}$$

... (2-3-10)

[0431] 接着,将 $\partial D_1$ 的 $z$ 坐标确定为 $z=0$ ,将 $\partial D_2$ 的 $z$ 坐标确定为 $z=h$ 。在边界面处测量的散射数据由 $\Phi(x, y_1, y_2, k)$ 来表现的情况下,下式(2-3-11)成立。

[0432] 【数式88】

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

[0434] 然后,通过关于  $(x, y_1, y_2)$  进行式 (2-3-11) 的两边的傅立叶变换,得到下式 (2-3-12)。

[0435] 【数式89】

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

[0437] 根据上述的式 (2-3-12) 如下式 (2-3-13) 那样求出函数a。

[0438] 【数式90】

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

[0440] 通过将上述的式 (2-3-13) 代入式 (2-3-10), 如下式 (2-3-14) 那样求出散射场函数。

[0441] 【数式91】

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

[0443] <II-4平面边界的二维排列MS逆散射理论>

[0444] 首先,说明已有的二维排列的情况下的理论。

[0445] 图9是表示平面中的发送点及接收点的关系的概念图。如图9所示,从点P<sub>1</sub>放射的

微波在目标上的点P处反射,在点P<sub>2</sub>处接收。点P<sub>1</sub>和点P<sub>2</sub>移动到平面内的网格点上(二维天线阵列)的任意点。在这种假定下,有n<sup>4</sup>个微波路径通过目标上的点P。该众多的路径对提高最终图像的质量做出很大贡献。以下描述处理这种复杂的数据并得到图像的方法。

[0446] 例如,如图9所示,从点P<sub>1</sub>(x<sub>1</sub>, y<sub>1</sub>, z)放射的电波在点P(ξ, η, ζ)处反射,并在点P<sub>2</sub>(x<sub>2</sub>, y<sub>2</sub>, z)处被接收。在点P在整个区域D中移动时,在点P<sub>2</sub>处接收的信号如下式那样表示。

[0447] 【数式92】

$$[0448] \quad \phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z) = \iiint_D \frac{e^{ik\rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{ik\rho_2}}{\rho_2} \varepsilon(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta$$

$$[0449] \quad \rho_1 = \sqrt{(x_1 - \xi)^2 + (y_1 - \eta)^2 + (z - \zeta)^2}$$

$$[0450] \quad \rho_2 = \sqrt{(x_2 - \xi)^2 + (y_2 - \eta)^2 + (z - \zeta)^2}$$

··· (2-4-1)

[0451] 这里,假定为时间因子与exp(-iωt)成比例。上式的被积分项的核函数由下式(2-4-2)来表现。

[0452] 【数式93】

$$[0453] \quad \varphi = \frac{e^{ik\rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{ik\rho_2}}{\rho_2}$$

··· (2-4-2)

[0454] 接着,研究该式(2-4-2)在短波长下成为渐近解的偏微分方程式。因此,关于微分结果中产生的1/ρ,忽略高次项而进行计算。在此,微分的简略记法如式(2-4-3)那样定义。

[0455] 【数式94】

$$[0456] \quad \frac{\partial}{\partial t} \rightarrow \partial_t, \frac{\partial}{\partial x_1} \rightarrow \partial_{x_1}, \frac{\partial}{\partial x_2} \rightarrow \partial_{x_2}, \frac{\partial}{\partial y_1} \rightarrow \partial_{y_1}, \frac{\partial}{\partial y_2} \rightarrow \partial_{y_2}, \frac{\partial}{\partial z} \rightarrow \partial_z$$

··· (2-4-3)

[0457] 使用式(2-4-3),核函数的各次数的微分如以下的式(2-4-4)那样表现。

[0458] 【数式95】

$$[0459] \quad \partial_{x_1} \varphi = ik \frac{x_1 - \xi}{\rho_1} \varphi + o(\rho^{-3}) \quad \partial_{x_2} \varphi = ik \frac{x_2 - \xi}{\rho_2} \varphi + o(\rho^{-3})$$

$$[0460] \quad \partial_{y_1} \varphi = ik \frac{y_1 - \eta}{\rho_1} \varphi + o(\rho^{-3}) \quad \partial_{y_2} \varphi = ik \frac{y_2 - \eta}{\rho_2} \varphi + o(\rho^{-3})$$

$$[0461] \quad \partial_z \varphi = ik(z - \zeta) \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right) \varphi + o(\rho^{-3})$$

$$[0462] \quad \partial_{x_1} \partial_{x_1} \varphi = (ik)^2 \left( \frac{x_1 - \xi}{\rho_1} \right)^2 \varphi + o(\rho^{-3})$$

$$[0463] \quad \partial_{y_1} \partial_{y_1} \varphi = (ik)^2 \left( \frac{y_1 - \eta}{\rho_1} \right)^2 \varphi + o(\rho^{-3})$$

$$[0464] \quad \partial_{x_2} \partial_{x_2} \varphi = (ik)^2 \left( \frac{x_2 - \xi}{\rho_2} \right)^2 \varphi + o(\rho^{-3})$$

$$[0465] \quad \partial_{y_2} \partial_{y_2} \varphi = (ik)^2 \left( \frac{y_2 - \eta}{\rho_2} \right)^2 \varphi + o(\rho^{-3})$$

$$[0466] \quad \partial_z \partial_z \varphi = (ik)^2 (z - \zeta)^2 \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right)^2 \varphi + o(\rho^{-3})$$

• • • (2-4-4)

[0467] 在下文中,省略繁杂的 $o(*)$ 项。根据关于二阶微分的5个式之和,得到下式(2-4-5)。

[0468] **【数式96】**

$$\begin{aligned} \Delta_5 \varphi &= (\partial_{x_1}^2 + \partial_{y_1}^2 + \partial_{x_2}^2 + \partial_{y_2}^2 + \partial_z^2) \varphi \\ [0469] \quad &= (ik)^2 \left\{ 2 + 2 \frac{(z - \zeta)^2}{\rho_1 \rho_2} \right\} \varphi \end{aligned}$$

• • • (2-4-5)

[0470] 因此,根据式(2-4-5)得到下式(2-4-6)。

[0471] **【数式97】**

$$\begin{aligned} \{\Delta_5 - 2(ik)^2\} \varphi &= 2(ik)^2 \frac{(z - \zeta)^2}{\rho_1 \rho_2} \varphi \\ [0472] \quad &= 2(ik)^2 \frac{\rho_1^2 - (x_1 - \xi)^2 - (y_1 - \eta)^2}{\rho_1 \rho_2} \varphi \\ &= 2(ik)^2 \frac{\rho_2^2 - (x_2 - \xi)^2 - (y_2 - \eta)^2}{\rho_1 \rho_2} \varphi \end{aligned}$$

• • • (2-4-6)

[0473] 通过使上述右边的运算符作用2次,得到下式(2-4-7)。

[0474] **【数式98】**

$$\begin{aligned} \{\Delta_5 - 2(ik)^2\}^2 \varphi &= 4(ik)^4 \frac{\{\rho_1^2 - (x_1 - \xi)^2 - (y_1 - \eta)^2\} \{\rho_2^2 - (x_2 - \xi)^2 - (y_2 - \eta)^2\}}{\rho_1^2 \rho_2^2} \varphi \\ [0475] \quad &= 4(ik)^4 \{1 - (ik)^{-2} \partial_{x_1}^2 - (ik)^{-2} \partial_{y_1}^2\} \{1 - (ik)^{-2} \partial_{x_2}^2 - (ik)^{-2} \partial_{y_2}^2\} \varphi \end{aligned}$$

• • • (2-4-7)

[0476] 整理式(2-4-7)得到下式(2-4-8)。

[0477] **【数式99】**

$$\begin{aligned}
 & \left[ \frac{1}{4} \{ \Delta_5 - 2(ik)^2 \}^2 - (\partial_{x_1}^2 + \partial_{y_1}^2)(\partial_{x_2}^2 + \partial_{y_2}^2) \right. \\
 [0478] \quad & \left. + (ik)^2(\partial_{x_1}^2 + \partial_{y_1}^2 + \partial_{x_2}^2 + \partial_{y_2}^2) - (ik)^4 \right] \varphi = 0 \\
 & \dots (2-4-8)
 \end{aligned}$$

[0479] 该式(2-4-8)是假定稳定状态而导出的,但容易将该式(2-4-8)扩展到非稳定状态。为此,进行如下式(2-4-9)那样的变量的置换。

[0480] 【数式100】

$$\begin{aligned}
 & -ik \rightarrow \frac{1}{c} \partial_t \\
 [0481] \quad & \dots (2-4-9)
 \end{aligned}$$

[0482] 通过该置换,式(2-4-8)变换为包含时间的如以下那样的式(2-4-10)。

[0483] 【数式101】

$$[0484] \quad \left\{ \Delta_5^2 - \frac{4}{c^2} \partial_t^2 \partial_z^2 - 4(\partial_{x_1}^2 + \partial_{y_1}^2)(\partial_{x_2}^2 + \partial_{y_2}^2) \right\} \varphi = 0$$

$$\begin{aligned}
 [0485] \quad & \Delta_5 = \partial_{x_1}^2 + \partial_{y_1}^2 + \partial_{x_2}^2 + \partial_{y_2}^2 + \partial_z^2 \\
 & \dots (2-4-10)
 \end{aligned}$$

[0486] 上述的式(2-4-10)是式(2-4-2)所示的核函数为解的偏微分方程式,通过对式(2-4-2)的积分核应用微分, $\varphi$ 也满足上述偏微分方程式。该方程式是由6个变量( $t, x_1, y_1, x_2, y_2, z$ )构成的5维的模拟波动方程式。

[0487] 接着,使用傅里叶变换求解该方程式。首先, $\varphi$ 如下式(2-4-11)所示,关于 $t, x_1, y_1, x_2, y_2$ 进行多重傅立叶变换。

[0488] 【数式102】

$$\begin{aligned}
 & \tilde{\phi}(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, z, \omega) \\
 [0489] \quad & = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} dt \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1)} e^{i(k_{x_2}x_2 + k_{y_2}y_2)} \phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, t) dx_1 dy_1 dx_2 dy_2 \\
 & \dots (2-4-11)
 \end{aligned}$$

[0490] 在将关于 $z$ 的微分表现为 $D_z$ 的情况下,根据式(2-4-10)及(2-4-11)而得到以下的式(2-4-12)。

[0491] 【数式103】

$$\begin{aligned}
 [0492] \quad & \left\{ (D_z^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_2}^2)^2 + 4k^2 D_z^2 - 4(k_{x_1}^2 + k_{y_1}^2)(k_{x_2}^2 + k_{y_2}^2) \right\} \tilde{\phi} = 0 \\
 & \dots (2-4-12)
 \end{aligned}$$

[0493] 这里,使用 $\omega = ck$ 的关系。该方程式的4个基本解如下式(2-4-13)那样表现。

[0494] 【数式104】

$$[0495] \quad E_1 = e^{i \left\{ \sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_2}^2} \right\} z}$$

$$[0496] \quad E_2 = e^{-i\left\{\sqrt{k^2-k_{x_1}^2-k_{y_1}^2}+\sqrt{k^2-k_{x_2}^2-k_{y_2}^2}\right\}z}$$

$$[0497] \quad E_3 = e^{i\left\{\sqrt{k^2-k_{x_1}^2-k_{y_1}^2}-\sqrt{k^2-k_{x_2}^2-k_{y_2}^2}\right\}z}$$

$$[0498] \quad E_4 = e^{-i\left\{\sqrt{k^2-k_{x_1}^2-k_{y_1}^2}-\sqrt{k^2-k_{x_2}^2-k_{y_2}^2}\right\}z}$$

• • • (2-4-13)

[0499] 当考虑时间因子是 $e^{-i\omega t}$ 、在放射电波的路径上增加相位、以及在物体处反射的电波朝向测量面反弹时, $E_1$ 是唯一有意义的解。因此,得到下式(2-4-14)。

[0500] 【数式105】

$$[0501] \quad \tilde{\phi}(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, z, k) = a(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, k) e^{i\left\{\sqrt{k^2-k_{x_1}^2-k_{y_1}^2}+\sqrt{k^2-k_{x_2}^2-k_{y_2}^2}\right\}z}$$

• • • (2-4-14)

[0502] 通过将 $z=0$ 代入该式(2-4-14),如下式(2-4-15)那样求出 $a(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, k)$ 。

[0503] 【数式106】

$$[0504] \quad a(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, k) = \tilde{\phi}(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, 0, k)$$

• • • (2-4-15)

[0505] 根据以上, $\phi$ 如下式(2-4-16)那样求出。

[0506] 【数式107】

$$[0507] \quad \begin{aligned} & \phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1+k_{y_1}y_1)} e^{-i(k_{x_2}x_2+k_{y_2}y_2)} e^{i\left\{\sqrt{k^2-k_{x_1}^2-k_{y_1}^2}+\sqrt{k^2-k_{x_2}^2-k_{y_2}^2}\right\}z} \\ & \quad \cdot a(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, k) dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{x_2} dk_{y_2} \end{aligned}$$

• • • (2-4-16)

[0508] 接着,通过在 $k$ 及 $z$ 为固定的条件下对式(2-4-16)应用极限操作( $y_1 \rightarrow y$ 且 $y_2 \rightarrow y$ ),得到下式(2-4-17)。

[0509] 【数式108】

$$\begin{aligned}
& \Phi(x, y, z, k) = \phi(x, y, x, y, z, k) \\
& = \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} [\phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k)] \\
[0510] \quad & = \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \left[ \frac{1}{(2\pi)^4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1)} e^{-i(k_{x_2}x_2 + k_{y_2}y_2)} e^{iz(\sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_2}^2})} \right. \\
& \quad \left. \cdot a(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, k) dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{x_2} dk_{y_2} \right] \\
& \quad \dots (2-4-17)
\end{aligned}$$

[0511] 接着,通过对式(2-4-17)关于k进行积分,得到下式(2-4-18)作为影像化函数。

[0512] 【数式109】

$$\begin{aligned}
\rho(x, y, z) &= \int_0^{\infty} \Phi(x, y, z, k) dk = \int_0^{\infty} \phi(x, y, x, y, z, k) dk \\
&= \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \left[ \int_0^{\infty} \phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) dk \right] \\
[0513] \quad &= \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \left[ \frac{1}{(2\pi)^4} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1)} e^{-i(k_{x_2}x_2 + k_{y_2}y_2)} e^{iz(\sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_2}^2})} \right. \\
& \quad \left. \cdot a(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, k) dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{x_2} dk_{y_2} dk \right] \\
& \quad \dots (2-4-18)
\end{aligned}$$

[0514] 在式(2-4-18)中,与 $k_{x_1}$ 、 $k_{y_1}$ 、 $k_{x_2}$ 、 $k_{y_2}$ 相关的积分为傅立叶变换的形式,适于计算机的处理。另一方面,在被积分函数中,exp(iz $\cdots$ )项不是傅立叶变换的形式。因此,例如,在指定z的值的的同时关于k执行通常的积分。或者,为了削减计算时间,可以变形式(2-4-18),使得式(2-4-18)整体仅由傅立叶变换表示。

[0515] 例如,式(2-4-17)的exp(iz $\cdots$ )的iz的系数使用新变量u如以下的式(2-4-19)那样表现。

[0516] 【数式110】

$$\begin{aligned}
[0517] \quad u &= \sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_2}^2} \\
& \quad \dots (2-4-19)
\end{aligned}$$

[0518] 通过使式(2-4-19)的右边有理化,得到下式(2-4-20)。

[0519] 【数式111】

$$\begin{aligned}
[0520] \quad \frac{k_{x_2}^2 + k_{y_2}^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2}{u} &= \sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2} - \sqrt{k^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_2}^2} \\
& \quad \dots (2-4-20)
\end{aligned}$$

[0521] 通过根据式(2-4-19)及式(2-4-20)这两个式子对各平方根求解,得到下式(2-4-21)。

[0522] 【数式112】

$$[0523] \quad 2\sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2} = u + \frac{k_{x_2}^2 + k_{y_2}^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2}{u}$$

$$[0524] \quad 2\sqrt{k^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_2}^2} = u - \frac{k_{x_2}^2 + k_{y_2}^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2}{u}$$

• • • (2-4-21)

[0525] 因此,k如下式(2-4-22)那样表现。

[0526] 【数式113】

$$[0527] \quad k = \frac{1}{2} \sqrt{u^2 + \frac{(k_{x_2}^2 + k_{y_2}^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2)^2}{u^2} + 2(k_{x_2}^2 + k_{y_2}^2 + k_{x_1}^2 + k_{y_1}^2)}$$

• • • (2-4-22)

[0528] 另外,接着,通过关于式(2-4-19)的两边的k及u的微分,得到下式(2-4-23)。

[0529] 【数式114】

$$[0530] \quad du = kdk \left( \frac{1}{\sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2}} + \frac{1}{\sqrt{k^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_2}^2}} \right)$$

• • • (2-4-23)

[0531] 通过根据式(2-4-23)对dk求解,得到下式(2-4-24)。

[0532] 【数式115】

$$[0533] \quad dk = \frac{1}{ku} \sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{k^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_2}^2} du$$

• • • (2-4-24)

[0534] 最后总结为,式(2-4-18)变换为下式(2-4-25)。

[0535] 【数式116】

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

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

[0536]

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

• • • (2-4-25)

[0537] 在将该结果应用于在概要中所述的准二维阵列天线排列的情况下,积分的维度将增大与 $dk_x$ 相关的量。因此,在现有计算机的运算能力下,实时将需要相当长的计算时间。

[0538] <II-5曲面边界的二维排列MS逆散射理论>

[0539] 图10是表示曲面上的发送点及接收点的关系的概念图。由于使用曲面的边界条件,因此假定为发送点及接收点的z坐标不同。因此,散射场函数如以下式(2-5-1)那样表现。

[0540] 【数式117】

$$[0541] \quad \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, \omega) = \iint_D \frac{e^{ik\rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{ik\rho_2}}{\rho_2} \varepsilon(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta$$

$$[0542] \quad \rho_1 = \sqrt{(x_1 - \xi)^2 + (y_1 - \eta)^2 + (z_1 - \zeta)^2}$$

$$[0543] \quad \rho_2 = \sqrt{(x_2 - \xi)^2 + (y_2 - \eta)^2 + (z_2 - \zeta)^2}$$

· · · (2-5-1)

[0544] 这里,k表示波数。另外,假定为时间因子与 $\exp(-i\omega t)$ 成比例。另外,D表示区域,与图10中的 $D_3$ 对应。上式的被积分项的核函数由下式(2-5-2)来表现。

[0545] 【数式118】

$$[0546] \quad \varphi = \frac{e^{ik\rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{ik\rho_2}}{\rho_2} \varepsilon(\xi, \eta, \zeta)$$

· · · (2-5-2)

[0547] 接着,研究除了非常靠近收发点的区域以外该式(2-5-2)成为解的偏微分方程式。因此,对于微分结果中产生的 $1/\rho$ ,忽略高次项而进行计算。在此,微分的简略记法如以下的式(2-5-3)那样定义。

[0548] 【数式119】

$$[0549] \quad \frac{\partial}{\partial t} \rightarrow \partial_t, \frac{\partial}{\partial x_1} \rightarrow \partial_{x_1}, \frac{\partial}{\partial x_2} \rightarrow \partial_{x_2}, \frac{\partial}{\partial y_1} \rightarrow \partial_{y_1}, \frac{\partial}{\partial y_2} \rightarrow \partial_{y_2}, \frac{\partial}{\partial z_1} \rightarrow \partial_{z_1}, \frac{\partial}{\partial z_2} \rightarrow \partial_{z_2}$$

· · · (2-5-3)

[0550] 在此情况下,通过与前节同样的计算,导出核函数满足下式(2-5-4)的方程式。

[0551] 【数式120】

$$[0552] \quad \{\Delta_6 - 2(ik)^2\} \varphi = \{(\partial_{x_1}^2 + \partial_{x_2}^2 + \partial_{y_1}^2 + \partial_{y_2}^2 + \partial_{z_1}^2 + \partial_{z_2}^2) - 2(ik)^2\} \varphi = 0$$

· · · (2-5-4)

[0553] 假定为时间因子与 $\exp(-i\omega t)$ 成比例,研究上述的式(2-5-4)的解。首先,通过对核函数进行关于t、 $x_1$ 、 $x_2$ 、 $y_1$ 、 $y_2$ 的多重傅立叶变换,得到下式。

[0554] 【数式121】

$$[0555] \quad \tilde{\varphi}(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, z_1, z_2, \omega)$$

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

· · · (2-5-5)

[0556] 与前节的式(2-4-12)同样地根据式(2-5-4)得到下式(2-5-6)。

[0557] 【数式122】

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

[0558]  $\dots (2-5-6)$

[0559] 接下来,研究求解该方程式。但是,存在 $z_1$ 和 $z_2$ 两个变量。因此,关于固定的 $(x_1, x_2, y_1, y_2)$ 或 $(k_{x_1}, k_{x_2}, k_{y_1}, k_{y_2})$ ,如果不在 $(z_1, z_2)$ 空间中的具有一维自由度的区域中给出边界条件,则难以求解式(2-5-6)的方程式。然而,通过雷达的测量得到的边界条件仅在 $(z_1, z_2)$ 空间中的一点 $\{f(x_1, y_1), f(x_2, y_2)\}$ 给出。

[0560] 为了解决该问题,利用 $z_1 = z$ 且 $z_2 = z$ 的情况下的理论与本节中的理论的整合性。即,根据 $z_1$ 和 $z_2$ 独立的本节理论导出的解包含 $z_1 = z$ 且 $z_2 = z$ 的特别情况下的解。因此,首先,假定式(2-5-6)的解如下式(2-5-7)所示。

[0561] 【数式123】

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

[0562]  $\dots (2-5-7)$

[0563] 根据式(2-5-6)、式(2-5-7)以及上述的整合性,得到以下的式(2-5-8)及式(2-5-9)。

[0564] 【数式124】

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

[0565]  $\dots (2-5-8)$

[0566] 【数式125】

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

[0567]  $\dots (2-5-9)$

[0568] 由此,如下式(2-5-10)那样得到 $s_1$ 和 $s_2$ 。

[0569] 【数式126】

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

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

[0571]  $\dots (2-5-10)$

[0572] 使用如上所述的 $s_1(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2})$ 和 $s_2(k_{x_2}, k_{y_1}, k_{y_2})$ ,方程式的解如下式(2-5-11)那样表现。

[0573] 【数式127】

$$\begin{aligned}
 & \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\
 &= \frac{1}{(2\pi)^4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1+k_{y_1}y_1+k_{x_2}x_2+k_{y_2}y_2)} a(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}) \\
 & \quad \cdot e^{is_1(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2})z_1} e^{is_2(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2})z_2} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{x_2} dk_{y_2} \\
 & \quad \dots (2-5-11)
 \end{aligned}$$

[0575] 此外, 曲面S的方程式例如假定为下式(2-5-12)。

[0576] 【数式128】

[0577]  $z=f(x, y)$

[0578]  $\dots (2-5-12)$

[0579] 在曲面S上给出的边界条件如下式(2-5-13)那样表现。

[0580] 【数式129】

$$\begin{aligned}
 & \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, f(x_1, y_1), f(x_2, y_2), k) \\
 &= \frac{1}{(2\pi)^4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1+k_{y_1}y_1+k_{x_2}x_2+k_{y_2}y_2)} a(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}) \\
 & \quad \cdot e^{i\{s_1(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2})f(x_1, y_1)+s_2(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2})f(x_2, y_2)\}} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{x_2} dk_{y_2} \\
 & \quad \dots (2-5-13)
 \end{aligned}$$

[0582] 式(2-5-13)的方程式用于决定 $a(k_{x_1}, k_{x_2}, k_{y_1}, k_{y_2})$ 。在下文中, 使用下式(2-5-14)那样的简略记法。

[0583] 【数式130】

$$[0584] \quad a(\mathbf{k}) = a(k_{x_1}, k_{x_2}, k_{y_1}, k_{y_2})$$

$$[0585] \quad s_1(\mathbf{k}) = s_1(k_{x_1}, k_{x_2}, k_{y_1}, k_{y_2})$$

$$[0586] \quad s_2(\mathbf{k}) = s_2(k_{x_1}, k_{x_2}, k_{y_1}, k_{y_2})$$

$\dots (2-5-14)$

[0587] 使用对式(2-5-14)的简略记法, 导出如下式(2-5-15)那样的与 $a(\mathbf{k})$ 相关的积分方程式。

[0588] 【数式131】

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

[0589]

• • • (2-5-15)

[0590] 如果根据上述的式(2-5-15)求出a(k),则散射场函数可以如下式(2-5-16)那样表现。

[0591] 【数式132】

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

[0592]

• • • (2-5-16)

[0593] 在上述的式(2-5-16)中,应用 $z_1=z_2=z$ ,接着关于k进行傅立叶变换,由此如下式(2-5-17)那样求出影像化函数。

[0594] 【数式133】

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

[0595]

• • • (2-5-17)

[0596] 通过上述的过程,求出最终的影像化函数 $\rho(\mathbf{r})$ 。

[0597] <III S-Array散射场理论>

[0598] <III-1平面边界及准二维排列的S-Array散射场理论>

[0599] 这里,使用图3所示的结构。另外,将与二维排列相关的式(2-4-10)用作研究的出发点。以下的式(3-1-1)是与式(2-4-10)相同的式。

[0600] 【数式134】

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

[0601]

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

[0602]

• • • (3-1-1)

[0603] 另外,

[0604] 对【数式135】

[0605]  $\varphi$

[0606] 进行关于t、 $x_1$ 、 $y_1$ 、 $y_2$ 的傅里叶变换如下式(3-1-2)那样表现。

[0607] 【数式136】

$$\begin{aligned}
 & \tilde{\varphi}(k_{x_1}, k_{y_1}, x_2, k_{y_2}, z, k) \\
 [0608] \quad & = \int_{-\infty}^{\infty} e^{ickt} dt \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2)} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, t) dx_1 dy_1 dy_2 \\
 & \dots (3-1-2)
 \end{aligned}$$

[0609] 在下文中,有时将变量 $x_2$ 表现为 $u$ 。通过将式(3-1-1)的两边关于 $t, x_1, y_1, y_2$ 进行傅里叶变换,得到下式(3-1-3)。

[0610] 【数式137】

$$\begin{aligned}
 [0611] \quad & \left\{ (\partial_u^2 + \partial_z^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2 + 4k^2 \partial_z^2 + 4(k_{x_1}^2 + k_{y_1}^2)(\partial_u^2 - k_{y_2}^2) \right\} \tilde{\varphi} = 0 \\
 & \dots (3-1-3)
 \end{aligned}$$

[0612] 作为关于 $u, z$ 的二维偏微分方程式的上述的式(3-1-3)的解被假定为下式(3-1-4)。

[0613] 【数式138】

$$\begin{aligned}
 [0614] \quad & \tilde{\varphi} \propto e^{s_3 u} e^{s_4 z} \\
 & \dots (3-1-4)
 \end{aligned}$$

[0615] 在此, $s_3$ 及 $s_4$ 是如下式(3-1-5)那样的关于 $k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}$ 以及 $k$ 的函数。换言之, $s_3$ 及 $s_4$ 是通过 $k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}$ 以及 $k$ 确定的常数。

[0616] 【数式139】

$$\begin{aligned}
 [0617] \quad & s_3 = s_3(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
 & s_4 = s_4(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
 [0618] \quad & \dots (3-1-5)
 \end{aligned}$$

[0619] 通过将式(3-1-4)代入式(3-1-3),得到下式(3-1-6)。

[0620] 【数式140】

$$\begin{aligned}
 [0621] \quad & (s_3^2 + s_4^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2 + 4k^2 s_4^2 + 4(k_{x_1}^2 + k_{y_1}^2)(s_3^2 - k_{y_2}^2) = 0 \\
 & \dots (3-1-6)
 \end{aligned}$$

[0622] 仅通过该代数方程式不能决定 $s_3$ 和 $s_4$ 。接着,将式(3-1-4)变更为下式(3-1-7)。

[0623] 【数式141】

$$\begin{aligned}
 [0624] \quad & \tilde{\varphi}(k_{x_1}, k_{y_1}, u, k_{y_2}, z, k) = b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_3 u} e^{s_4 z} \\
 & \dots (3-1-7)
 \end{aligned}$$

[0625] 通过将式(3-1-7)对 $k_{x_1}, k_{y_1}$ 以及 $k_{y_2}$ 进行逆傅立叶变换,并对其结果应用 $u \rightarrow x_2$ ,得到下式(3-1-8)。

[0626] 【数式142】

$$\begin{aligned}
 & \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) \\
 [0627] \quad & = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1+k_{y_1}y_1+k_{y_2}y_2)} b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_3x_2} e^{s_4z} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
 & \dots (3-1-8)
 \end{aligned}$$

[0628] 通过对式(3-1-8)应用 $x_2=x_1=x$ ,得到下式(3-1-9)。

[0629] 【数式143】

$$\begin{aligned}
 & \varphi(x, y_1, x, y_2, z, k) \\
 & = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x+k_{y_1}y_1+k_{y_2}y_2)} b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_3x} e^{s_4z} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
 [0630] \quad & = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\{(k_{x_1}+s_3)x+k_{y_1}y_1+k_{y_2}y_2\}} b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_4z} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
 & = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x+k_{y_1}y_1+k_{y_2}y_2)} b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_4z} \left( \frac{dk_{x_1}}{dk_x} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
 & \dots (3-1-9)
 \end{aligned}$$

[0631] 这里, $k_x$ 由下式(3-1-10)来表现。

[0632] 【数式144】

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

[0633]

$$\dots (3-1-10)$$

[0634] 上述的式(3-1-9)与一维排列的散射场方程式的解一致,因此应该与式(2-1-17)一致。以下的式(3-1-11)是与式(2-1-17)相同的式。

[0635] 【数式145】

$$\begin{aligned}
 & \varphi(x, y_1, y_2, z, k) \\
 [0636] \quad & = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x+k_{y_1}y_1+k_{y_2}y_2)} a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
 & \quad \cdot e^{i\{\sqrt{(k^2-k_{y_1}^2}+\sqrt{k^2-k_{y_2}^2})^2-k_x^2\}z} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
 & \dots (3-1-11)
 \end{aligned}$$

[0637] 通过将式(3-1-9)与式(3-1-11)进行比较,可得到下式(3-1-12)。

[0638] 【数式146】

$$[0639] \quad b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \left( \frac{dk_{x_1}}{d(k_{x_1} + is_3)} \right) = a(k_{x_1} + is_3, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

$$[0640] \quad s_4 = i\sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + is_3)^2}$$

• • • (3-1-12)

[0641] 通过将式(3-1-12)的第2式平方,得到下式(3-1-3)。

[0642] **【数式147】**

$$[0643] \quad s_4^2 + s_3^2 = 2ik_{x_1}s_3 + k_{x_1}^2 - (\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2$$

• • • (3-1-13)

[0644] 通过将式(3-1-13)代入式(3-1-6),得到下式(3-1-14)。

[0645] **【数式148】**

$$[0646] \quad \left\{ 2ik_{x_1}s_3 - k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2 - (\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 \right\}^2$$

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

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

• • • (3-1-14)

[0647] 通过整理式(3-1-14),得到下式(3-1-15)。

[0648] **【数式149】**

$$[0649] \quad (k^2 - k_{y_1}^2)s_3^2 + 2\left(ik_{x_1}\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}\right)s_3 - k_{x_1}^2(k^2 - k_{y_2}^2) = 0$$

• • • (3-1-15)

[0650] 由于该方程的解是重根,因此唯一地得到由下式(3-1-16)表现的解。

[0651] **【数式150】**

$$[0652] \quad s_3 = \frac{-ik_{x_1}\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}}$$

• • • (3-1-16)

[0653] 根据上述的过程中得到的式(3-1-12)及式(3-1-16),解析性地求出 $s_3$ 和 $s_4$ 。然后,根据式(3-1-8)如下式(3-1-17)那样得到散射场函数。

[0654] **【数式151】**

$$\begin{aligned}
& \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1+k_{y_1}y_1+k_{y_2}y_2)} b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_3x_2} e^{s_4z} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
[0655] \quad &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1+k_{y_1}y_1+k_{y_2}y_2)} a(k_{x_1} + is_3, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot \left( \frac{d(k_{x_1} + is_3)}{dk_{x_1}} \right) e^{s_3x_2} e^{s_4z} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2}
\end{aligned}$$

$$[0656] \quad s_3 = \frac{-ik_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}}$$

$$[0657] \quad s_4 = i \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + is_3)^2}$$

. . . (3-1-17)

[0658] 接下来,研究将测量数据  $\Phi(x_1, y_1, y_2, k)$  与  $a(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$  连结。因此,通过确定为  $k_x = k_{x_1} + is_3$ , 将  $z=0$  及  $x_2 = x_1 + d$  代入式 (3-1-17), 如下式 (3-1-18) 那样的方程式成立。这里,  $\Phi(x_1, y_1, y_2, k)$  是发送点  $(x_1, y_1, 0)$ 、接收点  $(x_1 + d, y_2, 0)$  以及波数  $k$  的测量数据。

[0659] 【数式152】

$$\begin{aligned}
& \Phi(x_1, y_1, y_2, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1+k_{y_1}y_1+k_{y_2}y_2)} a(k_{x_1} + is_3, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot \left( \frac{d(k_{x_1} + is_3)}{dk_{x_1}} \right) e^{s_3(x_1+d)} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
[0660] \quad &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\{(k_{x_1} + is_3)x_1+k_{y_1}y_1+k_{y_2}y_2\}} a(k_{x_1} + is_3, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot \left( \frac{d(k_{x_1} + is_3)}{dk_{x_1}} \right) e^{s_3d} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x_1+k_{y_1}y_1+k_{y_2}y_2)} a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_3d} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
& \quad \cdot \cdot \cdot (3-1-18)
\end{aligned}$$

[0661] 以下,使用由下式 (3-1-19) 定义的  $k_x$  和  $s_3$ 。

[0662] 【数式153】

$$[0663] \quad k_x = k_{x_1} + is_3$$

$$[0664] \quad s_3 = \frac{-ik_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-ik_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

• • • (3-1-19)

[0665] 通过将式(3-1-18)的两边关于 $x_1, y_1, y_2$ 进行傅立叶变换,得到下式(3-1-20)。

[0666] 【数式154】

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

• • • (3-1-20)

[0668] 根据式(3-1-20),如下式(3-1-21)那样求出函数 $a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$ 。

[0669] 【数式155】

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

• • • (3-1-21)

[0671] 因此,作为散射场函数的式(3-1-17)如下式(3-1-22)那样以完整的形式求出。

[0672] 【数式156】

$$\begin{aligned}
 & \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) \\
 &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1+k_{y_1}y_1+k_{y_2}y_2)} a(k_{x_1} + is_3, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
 & \quad \cdot \left( \frac{d(k_{x_1} + is_3)}{dk_{x_1}} \right) e^{s_3x_2} e^{s_4z} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
 [0673] \quad &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1+k_{y_1}y_1+k_{y_2}y_2)} e^{s_3x_2} e^{s_4z} e^{\frac{id(k_{x_1}+is_3)\sqrt{k^2-k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2-k_{y_1}^2}+\sqrt{k^2-k_{y_2}^2}}} \\
 & \quad \cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \left( \frac{d(k_{x_1} + is_3)}{dk_{x_1}} \right) dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2}
 \end{aligned}$$

$$[0674] \quad s_3 = \frac{-ik_{x_1}\sqrt{k^2-k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2-k_{y_1}^2}} = \frac{-ik_x\sqrt{k^2-k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2-k_{y_1}^2}+\sqrt{k^2-k_{y_2}^2}}$$

$$[0675] \quad s_4 = ik_z = i\sqrt{(\sqrt{k^2-k_{y_1}^2}+\sqrt{k^2-k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + is_3)^2} \dots (3-1-22)$$

[0676] 然后,如下式(3-1-23)那样求出影像化函数。

[0677] 【数式157】

$$\begin{aligned}
 & \rho(x, y, z) \\
 &= \int_0^{\infty} \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1=x \\ y_2 \rightarrow y_1=y}} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) dk \\
 [0678] \quad &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x+k_{y_1} y+k_{y_2} y)} e^{s_4z} e^{\frac{idk_x\sqrt{k^2-k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2-k_{y_1}^2}+\sqrt{k^2-k_{y_2}^2}}} \\
 & \quad \cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
 &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x+k_{y_1} y+k_{y_2} y)} e^{ik_z z} e^{\frac{idk_x\sqrt{k^2-k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2-k_{y_1}^2}+\sqrt{k^2-k_{y_2}^2}}} \\
 & \quad \cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \left( \frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk_z
 \end{aligned}$$

$$[0679] \quad k_z = \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}$$

$$[0680] \quad k = \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}}$$

$$[0681] \quad \frac{dk}{dk_z} = \frac{k_z \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{k(k_x^2 + k_z^2)}$$

• • • (3-1-23)

[0682] 在准二维排列中,能够取得发送位置的x坐标与接收位置的x坐标之间所包含的物质的信息。特别是,即使在近前存在具有高介电常数的障碍物,也能够x方向上迂回,发送电波并接收波动。因此,能够取得在y方向的一维排列中难以取得的信息。因此,能够重构更适当的图像。

[0683] 此外,与一维排列相比,在准二维排列中,可以配置大量的发送元件和大量的接收元件。因此,可以更高效地取得信息。

[0684] <III-2平面边界及二维排列的S-Array散射场理论>

[0685] 图11是表示多列线性阵列天线的图。图11所示的多列线性阵列天线包括1列发送阵列天线TA和n列接收阵列天线RA<sub>1</sub>、RA<sub>2</sub>、RA<sub>3</sub>、⋯、RA<sub>n</sub>。各天线元件的偏振方向除了x方向之外,还可以是y方向。此外,TA和RA也可以交换。在这样的排列的情况下,应用III-1节准二维排列MS逆散射。

[0686] 虽然存在多个接收阵列天线RA<sub>1</sub>、RA<sub>2</sub>、RA<sub>3</sub>、⋯、RA<sub>n</sub>,但(TA, RA<sub>1</sub>)、(TA, RA<sub>2</sub>)、(TA, RA<sub>3</sub>)、⋯、(TA, RA<sub>n</sub>)的多个组合相互独立地测量。散射场函数是从这些数据通过线性相加得到的。因此,也可以通过线性相加得到影像化函数。在发送元件列TA与第j个接收元件列RA<sub>j</sub>的距离为d<sub>j</sub>,且各测量数据为φ<sub>j</sub>(x<sub>1</sub>, y<sub>1</sub>, y<sub>2</sub>, k)的情况下,根据式(3-1-23)得到下式(3-2-1)。

[0687] 【数式158】

$$\begin{aligned}
& \rho(x, y, z) \\
&= \int \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) dk \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{s_4 z} \\
[0688] & \cdot \sum_{j=1, n} \left\{ \exp \left( \frac{i d_j k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \right) \tilde{\Phi}_j(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \right\} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{i k_z z} \\
& \cdot \sum_{j=1, n} \left\{ \exp \left( \frac{i d_j k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \right) \tilde{\Phi}_j(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \right\} \left( \frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk_z \\
[0689] & k_z = \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2} \\
[0690] & k = \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}} \\
[0691] & \frac{dk}{dk_z} = \frac{k_z \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{k(k_x^2 + k_z^2)} \\
& \dots (3 - 2 - 1)
\end{aligned}$$

[0692] 接着,描述使用应用了本公开的准二维排列的S-Array二维排列的情况与使用已有的二维排列的情况的差异。

[0693] 在S-Array二维排列中,存在TA和RA分别是一维排列的制约。使用该排列的扫描型探针可能能够取得高画质的图像,并且可能能够在保持画质的同时缩短扫描时间。或者,也可以省略扫描。

[0694] 另一方面,在使用已有的二维排列的情况下,发送元件及接收元件的配置没有制约。但是,例如在 $n \times n$ 的排列的情况下,存在 $n^4$ 的排列(order)的收发的组合,并且维度增大。因此,在 $n$ 为实用性的值(100等)的情况下,系统规模变大,测量时间及计算时间变得巨大。因此,在医疗诊断和基础设施诊断中无法实际应用已有的二维排列。

[0695] 图12是表示多基地阵列天线的发送位置及接收位置的组合的概念图。图12中,作为多基地阵列天线,示出了S-Array二维排列。在S-Array二维排列中,即使不进行扫描,也无论在 $x$ 方向还是在 $y$ 方向上都在多个接收位置取得测量数据。即,S-Array二维排列无论在 $x$ 方向还是在 $y$ 方向都具有多基地的特性。因此,能够取得足够的信息,能够省略或削减扫描。

[0696] 另外,如上所述,也可以交换发送和接收。在该情况下,多个发送阵列天线依次发送电波。更具体而言,多个发送元件依次发送电波。设想为即使交换发送位置及接收位置,

所接收的散射的量也相同。因此,即使发送和接收交换,也能够得到实质上相同的结果。而且,在使用多个发送阵列天线的情况下,可以以与使用多个接收阵列天线的情况相同的方式进行线性相加。

[0697] 另外,也可以使用多个发送阵列天线和多个接收阵列天线。并且,多个发送阵列天线和多个接收阵列天线也可以交替配置。

[0698] 另外,也可以通过S-Array二维排列进行扫描。由此,能够得到更宽的范围的信息。

[0699] 如上所述,可以使用与发送阵列天线及接收阵列天线相关的多个组合的多个散射场函数的合成来导出影像化函数。例如,将多个散射场函数合成为一个散射场函数,通过对散射场函数的极限操作来导出影像化函数。多个散射场函数分别可以由式(3-1-23)表现的散射场函数,也可以通过线性相加来合成。

[0700] <III-3曲面边界的S-Array散射场理论>

[0701] 在下文中,说明区域的边界即测量散射数据的边界是曲率不大的曲面的情况下的S-Array散射场理论。

[0702] 图13是表示曲面上的准二维阵列天线的图。图13中示出了向 $z=0$ 的平面 $x-y$ 投影的准二维阵列天线。在曲面的曲率大的情况下,不允许忽略阵列天线的倾斜,不允许忽略天线元件间的 $x-y$ 面中的距离是根据场所而变化的。但是,在曲率不大的曲面中,元件间的 $x-y$ 平面中的距离可以近似地被视为是恒定的。

[0703] 在此,使用II-5的理论作为基础,构建准二维排列的情况下的逆散射理论。散射场函数是如下式(3-3-1)那样的函数。

[0704] 【数式159】

$$[0705] \quad \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) = \iint_D \frac{e^{ik\rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{ik\rho_2}}{\rho_2} \varepsilon(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta$$

$$[0706] \quad \rho_1 = \sqrt{(x_1 - \xi)^2 + (y_1 - \eta)^2 + (z_1 - \zeta)^2}$$

$$[0707] \quad \rho_2 = \sqrt{(x_2 - \xi)^2 + (y_2 - \eta)^2 + (z_2 - \zeta)^2}$$

· · · (3-3-1)

[0708] 式(3-3-1)的散射场函数满足的方程式是数式(2-5-4),并且如下式(3-3-2)那样表现。

[0709] 【数式160】

$$[0710] \quad \left\{ \Delta_6 - 2(ik)^2 \right\} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k)$$

$$= \left\{ (\partial_{x_1}^2 + \partial_{x_2}^2 + \partial_{y_1}^2 + \partial_{y_2}^2 + \partial_{z_1}^2 + \partial_{z_2}^2) - 2(ik)^2 \right\}$$

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

$$= 0$$

· · · (3-3-2)

[0711] 另外,在此,使用下式(3-3-3)那样的傅立叶变换。

[0712] 【数式161】

$$\begin{aligned}
 & \tilde{\varphi}(k_{x_1}, k_{y_1}, x_2, k_{y_2}, z_1, z_2, k) \\
 [0713] \quad & = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2)} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) dx_1 dy_1 dy_2 \\
 & \quad \cdot \cdot \cdot (3-3-3)
 \end{aligned}$$

[0714] 根据式(3-3-2)和式(3-3-3)得到下式(3-3-4)。

[0715] 【数式162】

$$\begin{aligned}
 [0716] \quad & \left\{ \partial_{x_2}^2 + \partial_{z_1}^2 + \partial_{z_2}^2 + 2k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2 \right\} \tilde{\varphi}(k_{x_1}, k_{y_1}, x_2, k_{y_2}, z_1, z_2, k) = 0 \\
 & \quad \cdot \cdot \cdot (3-3-4)
 \end{aligned}$$

[0717] 作为式(3-3-4)的方程式的解,假定下式(3-3-5)。

[0718] 【数式163】

$$[0719] \quad \tilde{\varphi}(k_{x_1}, k_{y_1}, x_2, k_{y_2}, z_1, z_2, k) = b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_3 x_2} e^{s_4 z_1} e^{s_5 z_2}$$

$$[0720] \quad s_3 = s_3(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

$$[0721] \quad s_4 = s_4(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

$$[0722] \quad s_5 = s_5(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

$$\cdot \cdot \cdot (3-3-5)$$

[0723] 通过将式(3-3-5)代入式(3-3-4),得到下式(3-3-6)。

[0724] 【数式164】

$$[0725] \quad s_3^2 + s_4^2 + s_5^2 + 2k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2 = 0$$

$$\cdot \cdot \cdot (3-3-6)$$

[0726] 接着,

[0727] 【数式165】

[0728]  $\varphi$

[0729] 如下式(3-3-7)那样表现。

[0730] 【数式166】

$$\begin{aligned}
 & \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\
 [0731] \quad & = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2)} b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_3 x_2} e^{s_4 z_1} e^{s_5 z_2} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
 & \quad \cdot \cdot \cdot (3-3-7)
 \end{aligned}$$

[0732] 在 $x_2 \rightarrow x_1$ 中,式(3-3-7)与式(2-2-18)一致。在 $x_2 \rightarrow x_1$ 中,式(3-3-7)如下式(3-3-8)那样表现。

[0733] 【数式167】

$$\begin{aligned}
 & \varphi(x_1, y_1, x_1, y_2, z_1, z_2, k) \\
 [0734] \quad & = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\{(k_{x_1} + is_3)x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2\}} b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_4 z_1} e^{s_5 z_2} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
 & \quad \cdot \cdot \cdot (3-3-8)
 \end{aligned}$$

[0735] 另外,与式(2-2-18)相同的式子如下式(3-3-9)那样表现。

[0736] 【数式168】

$$\begin{aligned}
 & \phi(x, y_1, y_2, z_1, z_2, k) \\
 [0737] \quad & = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
 & \quad \cdot e^{is_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)z_1} e^{is_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)z_2} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2}
 \end{aligned}$$

$$[0738] \quad s_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) = \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

$$[0739] \quad s_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) = \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

• • • (3-3-9)

[0740] 由于式(3-3-8)与式(3-3-9)一致,所以得到下式(3-3-10)。

[0741] 【数式169】

$$[0742] \quad k_x = k_{x_1} + is_3(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

$$[0743] \quad b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \left( \frac{dk_{x_1}}{dk_x} \right) = a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

$$[0744] \quad s_4(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) = is_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

$$[0745] \quad s_5(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) = is_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

• • • (3-3-10)

[0746] 接着,根据式(3-3-6)、式(3-3-9)以及式(3-3-10),如下式(3-3-11)那样得到关于 $s_3$ 的代数方程式。

[0747] 【数式170】

$$\begin{aligned}
 [0748] \quad & s_3^2 - \left\{ \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + is_3)^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \right\}^2 \\
 & - \left\{ \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + is_3)^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \right\}^2 \\
 & + 2k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2 = 0
 \end{aligned}$$

• • • (3-3-11)

[0749] 关于式(3-3-11),通过展开2次项并简化,得到下式(3-3-12)。

[0750] 【数式171】

$$[0751] \quad s_3^2 + \frac{(2k^2 - k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)(k_{x_1} + is_3)^2}{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2} - k_{x_1}^2 = 0$$

• • • (3-3-12)

[0752] 进而,通过整理式(3-3-12),得到下式(3-3-13)。

[0753] 【数式172】

$$[0754] \quad (s_3 \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + ik_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})(s_3 \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} + ik_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}) = 0$$

• • • (3-3-13)

[0755] 式(3-3-13)中存在两个解。但是,式(3-3-13)的解应该与III-1节的平面边界的情况一致。因此,根据式(3-1-16),下式(3-3-14)应该被选择为解。

[0756] 【数式173】

$$[0757] \quad s_3 = \frac{-ik_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}}$$

• • • (3-3-14)

[0758] 总结以上内容,如下式(3-3-15)那样得到散射场函数。

[0759] 【数式174】

$$\begin{aligned}
 & \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\
 &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1+k_{y_1}y_1+k_{y_2}y_2)} b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_3x_2} e^{s_4z_1} e^{s_5z_2} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \\
 [0760] \quad &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1+k_{y_1}y_1+k_{y_2}y_2)} a(k_{x_1} + is_3, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
 & \quad \cdot e^{s_3x_2} e^{s_4z_1} e^{s_5z_2} \frac{d(k_{x_1} + is_3)}{dk_{x_1}} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2}
 \end{aligned}$$

$$[0761] \quad s_3 = \frac{-ik_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}}$$

$$[0762] \quad s_4 = \frac{i\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + is_3)^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

$$[0763] \quad s_5 = \frac{i\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + is_3)^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

• • • (3 - 3 - 1 5)

[0764] 另外,在式(3-3-15)中,通过将变量从 $k_{x_1}$ 变换为 $k_x$ ,得到下式(3-3-16)。

[0765] 【数式175】

$$[0766] \quad s_3 = \frac{-ik_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

$$[0767] \quad s_4 = \frac{i\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

$$[0768] \quad s_5 = \frac{i\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

• • • (3 - 3 - 1 6)

[0769] 接下来,研究将测量数据 $\Phi(x_1, y_1, y_2, k)$ 与 $b(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$ 连结。通过对在曲面上的点 $P_I$ 和 $P_J$ 处测量的数据 $\Phi(x_I, y_I, x_I+d, y_J, t)$ 进行傅立叶变换而得到的函数由如下式(3-3-17)那样表现。

[0770] 【数式176】

[0771] 
$$\Phi(x_I, y_I, y_J, k) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ickt} \varphi(x_I, y_I, x_I + d, y_J, t) dt$$

• • • (3-3-17)

[0772] 作为测量面的边界曲面的形状如下式 (3-3-18) 那样表现。

[0773] 【数式177】

[0774]  $z = f(x, y)$

[0775] ... (3-3-18)

[0776] 这里,  $(x, y)$  是  $z=0$  时的平面上的坐标。 $P_I, P_J$  处的  $z$  坐标如下式 (3-3-19) 那样表现。

[0777] 【数式178】

[0778]  $z_I = f(x_I, y_I)$

[0779]  $z_J = f(x_J, y_J)$

[0780] ... (3-3-19)

[0781] 通过将  $x_2 = x_1 + d$  代入式 (3-3-15), 如下式 (3-3-20) 那样的方程式成立。

[0782] 【数式179】

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

[0784] 上述的式 (3-3-20) 使用通过边界上的测量而得到的数据  $\Phi$ , 如下式 (3-3-21) 那样表现。

[0785] 【数式180】

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

[0787]  $\Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k)$  是发送点  $(x_I, y_I, z_I)$ 、接收点  $(x_I + d, y_J, z_J)$  以及波数  $k$  的测量数据。通过式 (3-3-21) 的两边的傅立叶变换, 得到下式 (3-3-22)。

[0788] 【数式181】

$$\begin{aligned}
& \iiint e^{i(k_{x_1}'x_1+k_{y_1}'y_1+k_{y_2}'y_2)} \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\
& \quad \cdot \delta(x_1 - x_I) \delta(y_1 - y_I) \delta(y_2 - y_J) dx_1 dy_1 dy_2 \\
[0789] \quad & = \frac{1}{(2\pi)^3} \iiint e^{i(k_{x_1}'x_1+k_{y_1}'y_1+k_{y_2}'y_2)} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1+k_{y_1}y_1+k_{y_2}y_2)} a_{I,J}(k_{x_1} + is_3, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot e^{s_3(x_1+d)} e^{s_4z_I} e^{s_5z_J} \frac{d(k_{x_1} + is_3)}{dk_{x_1}} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} dx_1 dy_1 dy_2 \\
& \quad \cdot \cdot \cdot (3-3-22)
\end{aligned}$$

[0790] 并且,作为式(3-3-22)中的与 $x_1$ 、 $y_1$ 、 $y_2$ 相关的积分的结果,得到下式(3-3-23)。

[0791] 【数式182】

$$\begin{aligned}
& \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) e^{i(k_{x_1}'x_1+k_{y_1}'y_1+k_{y_2}'y_2)} \\
& = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(k_{x_1} + is_3 - k_{x_1}') \delta(k_{y_1} - k_{y_1}') \delta(k_{y_2} - k_{y_2}') \\
[0792] \quad & \cdot a_{I,J}(k_{x_1} + is_3, k_{y_1}, k_{y_2}, k) e^{s_3d} e^{s_4z_I} e^{s_5z_J} \frac{d(k_{x_1} + is_3)}{dk_{x_1}} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2}
\end{aligned}$$

$$= a_{I,J}(k_{x_1}', k_{y_1}', k_{y_2}', k) e^{s_3'd} e^{s_4'z_I} e^{s_5'z_J}$$

$$[0793] \quad s_3' = \frac{-ik_{x_1}' \sqrt{k^2 - k_{y_2}'^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}'^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}'^2}}$$

$$\cdot \cdot \cdot (3-3-23)$$

[0794] 通过整理式(3-3-23)的结果,得到下式(3-3-24)。

[0795] 【数式183】

$$[0796] \quad a_{I,J}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) = \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) e^{i(k_x x_I + k_{y_1} y_I + k_{y_2} y_J)} e^{-s_3 d} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J}$$

$$[0797] \quad s_3 = \frac{-ik_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

$$\cdot \cdot \cdot (3-3-24)$$

[0798] 通过针对与式(3-3-24)相关的所有I、J的组的总和,得到下式(3-3-25)。

[0799] 【数式184】

$$\begin{aligned}
 & a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
 & = \sum_{I,J} a_{I,J}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
 [0800] \quad & = \sum_{I,J} \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) e^{i(k_x x_I + k_{y_1} y_I + k_{y_2} y_J)} e^{-s_3 d} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \\
 & \dots (3-3-25)
 \end{aligned}$$

[0801] 根据式(3-3-15)和式(3-3-25),如下式(3-3-26)那样求出散射场函数。

[0802] 【数式185】

$$\begin{aligned}
 & \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\
 [0803] \quad & = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x_1 + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} \sum_{I,J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\
 & \cdot e^{i(k_x x_I + k_{y_1} y_I + k_{y_2} y_J)} e^{-s_3 d} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} e^{s_3 x_2} e^{s_4 z_1} e^{s_5 z_2} \frac{d(k_x + i s_3)}{d k_{x_1}} d k_{x_1} d k_{y_1} d k_{y_2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [0804] \quad & s_3 = \frac{-i k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{x_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
 & \dots (3-3-26)
 \end{aligned}$$

[0805] 对式(3-3-26)应用 $x_2 = x_1 = x$ 、 $y_1 = y_2 = y$ 以及 $z_1 = z_2 = z$ ,通过对k进行积分,得到影像化函数。接着,为了通过能够高速运算的傅立叶变换来得到结果,研究改良影像化函数的式子。基本变量是 $k_x$ 、 $k_{y_1}$ 、 $k_{y_2}$ 、 $k_z$ ,其他变量使用它们来明确地表示。通过以下步骤得到影像化函数。

[0806] 首先,通过对式(3-3-26)应用 $x_2 = x_1 = x$ 、 $y_1 = y_2 = y$ 以及 $z_1 = z_2 = z$ ,得到下式(3-3-27)。

[0807] 【数式186】

$$\begin{aligned}
 & \varphi(x, y, x, y, z, z, k) \\
 [0808] \quad & = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} e^{-s_3 d} e^{s_4 z} e^{s_5 z} \sum_{I,J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\
 & \cdot e^{i(k_x x_I + k_{y_1} y_I + k_{y_2} y_J)} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} d k_x d k_{y_1} d k_{y_2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [0809] \quad & s_3 = \frac{-i k_x \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{x_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} \\
 & \dots (3-3-27)
 \end{aligned}$$

[0810] 通过关于k进行积分,如下式(3-3-28)那样得到影像化函数 $\rho$ 。

[0811] 【数式187】

$$\begin{aligned}
& \rho(x, y, z) \\
&= \int_0^{\infty} \varphi(x, y, x, y, z, z, k) dk \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^{\infty} dk \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} e^{-s_3 d} e^{i k_z z} \sum_{I, J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\
[0812] & \quad \cdot e^{i(k_x x_I + k_{y_1} y_{1I} + k_{y_2} y_{2I})} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} e^{-s_3 d} e^{i k_z z} \sum_{I, J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\
& \quad \cdot e^{i(k_x x_I + k_{y_1} y_{1I} + k_{y_2} y_{2I})} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} \left( \frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk_z
\end{aligned}$$

$$[0813] \quad s_3 = \frac{-ik_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

• • • (3-3-28)

[0814] 在该运算中使用下式(3-3-29)。

[0815] **【数式188】**

$$[0816] \quad k = \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}}$$

$$[0817] \quad \frac{dk}{dk_z} = \frac{k_z \left\{ 1 - \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{(k_x^2 + k_z^2)^2} \right\}}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}}}$$

$$[0818] \quad s_3 = \frac{-ik_x \left( \sqrt{k_x^2 + k_z^2} - \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2}}$$

$$[0819] \quad s_4 = \frac{ik_z \left( \sqrt{k_x^2 + k_z^2} + \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2}}$$

$$[0820] \quad s_5 = \frac{ik_z \left( \sqrt{k_x^2 + k_z^2} - \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2\sqrt{k_x^2 + k_z^2}}$$

• • • (3-3-29)

[0821] 在上述说明中使用准二维排列,但也可以使用图11那样的二维排列。在该情况下,可以使用与发送阵列天线及接收阵列天线相关的多个组合的多个散射场函数的合成来导出影像化函数。例如,将多个散射场函数合成为一个散射场函数,通过对散射场函数的极限操作来导出影像化函数。这里,多个散射场函数分别可以由式(3-3-26)表现的散射场函数,也可以通过线性相加来合成。

[0822] 另外,在图13中,作为区域的曲面边界示出了柱面,但区域的曲面边界也可以不是柱面。不限于柱面的切平面,也可以对其他曲面边界的切平面应用上述的过程。

[0823] <IV介电常数的频率依赖性>

[0824] <IV-1基础理论>

[0825] 在使用III章中求出的重构式时,也可以考虑有无介电常数的分散性。在没有介电常数的分散性的情况下,频率 $f$ 与波数 $k$ 具有如下式(4-1-1)那样的简单的关系。这里, $\epsilon_r$ 是相对介电常数, $c_0$ 是真空中电磁波的速度。

[0826] 【数式189】

$$[0827] \quad f = \frac{c_0 k}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}}$$

• • • (4-1-1)

[0828] 在没有介电常数的分散性的情况下,从 $f$ 到 $k$ 的变量变换是容易的。但是,在应用于生物体等时,应考虑到介电常数依赖于频率而变化。在下文中,考虑介电常数有频率依赖性。

[0829] 与1~5GHz的区域相比,在14~20GHz的区域,介电常数约为60%。德拜(Debye)的介电常数的频率依赖性的式子由以下的式(4-1-2)及式(4-1-3)表示。

[0830] 【数式190】

$$[0831] \quad \epsilon(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + i\omega\tau}$$

$$[0832] \quad \epsilon(0) = \epsilon_s$$

$$[0833] \quad \epsilon(\infty) = \epsilon_\infty$$

[0834] • • • (4-1-2)

[0835] 【数式191】

$$[0836] \quad \epsilon(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty)}{1 + \omega^2\tau^2} - i \frac{\omega\tau(\epsilon_s - \epsilon_\infty)}{1 + \omega^2\tau^2}$$

$$[0837] \quad \varepsilon_r(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)}{1 + \omega^2 \tau^2} = a + \frac{b}{1 + \alpha \omega^2}$$

• • • (4-1-3)

[0838] 在此,  $\omega$  表示角频率。 $\varepsilon(\omega)$  表示  $\omega$  处的复介电常数。 $i$  表示虚数单位。 $\tau$  表示弛豫时间。 $\varepsilon_r(\omega)$  表示  $\omega$  处的复介电常数的实部。 $a$ 、 $b$  以及  $\alpha$  表示常数。具体而言,  $a$ 、 $b$  以及  $\alpha$  是表示根据德拜弛豫的频率变化与介电常数变化的对应关系的参数。

[0839] 另外, 电波的速度、频率、以及波数的关系如以下的式 (4-1-4) 及式 (4-1-5) 那样表现。

[0840] 【数式192】

$$[0841] \quad c(\omega) = \frac{c_0}{\sqrt{\varepsilon_r(\omega)}}$$

$$[0842] \quad \omega = c(\omega) k$$

[0843] • • • (4-1-4)

[0844] 【数式193】

$$[0845] \quad \omega = \frac{c_0 k}{\sqrt{a + \frac{b}{1 + \alpha \omega^2}}}$$

• • • (4-1-5)

[0846] 这里,  $c(\omega)$  表示  $\omega$  处的传播速度。 $\omega$  和  $f$  具有  $\omega = 2\pi f$  的关系。另外, 根据式 (4-1-5) 得到下式 (4-1-6)。

[0847] 【数式194】

$$[0848] \quad \omega = \sqrt{\frac{-(a+b-c_0^2 \alpha k^2) + \sqrt{(a+b-c_0^2 \alpha k^2)^2 + 4a\alpha c_0^2 k^2}}{2a\alpha}}$$

• • • (4-1-6)

[0849] 进而, 根据式 (4-1-6) 还得到下式 (4-1-7)。

[0850] 【数式195】

$$[0851] \quad \frac{d\omega}{dk} = \frac{c_0^2 k + \alpha c_0^2 \omega^2 k}{(a+b)\omega + 2a\alpha \omega^2 - \alpha c_0^2 \omega k^2}$$

• • • (4-1-7)

[0852] <IV-2平面边界和分散性介质的S-Array散射场理论>

[0853] 在此, 研究用于在平面边界处通过S-Array测量数据来生成在介电分散性介质的内部的影像的影像化函数。在考虑由于时间因子为  $e^{-i\omega t}$  因此对于介电常数有频率依赖性的情况下, 在式 (3-2-1) 中用频率  $\omega$  来代替  $k$  进行积分。由此, 如以下的式 (4-2-1) 及式 (4-2-2) 那样得到影像化函数。

[0854] 【数式196】

$$\begin{aligned}
& \rho(x, y, z) \\
&= \int_0^{\infty} \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) d\omega \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^{\infty} d\omega \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{s_4 z} e^{\frac{i d k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}} \\
[0855] & \quad \cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{i k_z z} e^{\frac{i d k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}} \\
& \quad \cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \left( \frac{d\omega}{dk} \right) \left( \frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk_z \\
& \quad \cdot \cdot \cdot (4 - 2 - 1)
\end{aligned}$$

[0856] 【数式197】

$$[0857] \quad k_z = \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}$$

$$[0858] \quad k = \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}}$$

$$[0859] \quad \frac{dk}{dk_z} = \frac{k_z \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{k(k_x^2 + k_z^2)}$$

$$[0860] \quad \frac{d\omega}{dk} = \frac{c_0^2 k + \alpha c_0^2 \omega^2 k}{(a+b)\omega + 2a\alpha\omega^2 - \alpha c_0^2 \omega k^2}$$

• • • (4 - 2 - 2)

[0861] <IV-3曲面边界和分散性介质的S-Array散射场理论>

[0862] 在此,研究用于在曲面边界处通过S-Array测量数据,并生成介电分散性介质的内部的影像的影像化函数。在考虑由于时间因子为 $e^{-i\omega t}$ 因此对于介电常数有频率依赖性的情况下,在式(3-3-28)用频率 $\omega$ 来代替 $k$ 进行积分。由此,如以下的式(4-3-1)及式(4-3-2)那样得到影像化函数。

[0863] 【数式198】

$$\begin{aligned}
& \rho(x, y, z) \\
&= \int_0^{\infty} \varphi(x, y, x, y, z, z, k) d\omega \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^{\infty} d\omega \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} e^{-s_3 d} e^{i k_z z} \sum_{I, J} \left\{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \right. \\
[0864] & \quad \left. \cdot e^{i(k_x x_I + k_{y_1} y_{1I} + k_{y_2} y_{2I})} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \right\} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} e^{-s_3 d} e^{i k_z z} \sum_{I, J} \left\{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \right. \\
& \quad \left. \cdot e^{i(k_x x_I + k_{y_1} y_{1I} + k_{y_2} y_{2I})} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \right\} \left( \frac{d\omega}{dk} \right) \left( \frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk_z \\
& \quad \dots (4 - 3 - 1)
\end{aligned}$$

[0865] 【数式199】

$$[0866] \quad k = \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}}$$

$$[0867] \quad \frac{dk}{dk_z} = \frac{k_z \left\{ 1 - \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{(k_x^2 + k_z^2)^2} \right\}}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}}}$$

$$[0868] \quad \frac{d\omega}{dk} = \frac{c_0^2 k + \alpha c_0^2 \omega^2 k}{(a+b)\omega + 2a\alpha\omega^2 - \alpha c_0^2 \omega k^2}$$

$$[0869] \quad s_3 = \frac{-ik_x \left( \sqrt{k_x^2 + k_z^2} - \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2\sqrt{k_x^2 + k_z^2}}$$

$$[0870] \quad s_4 = \frac{ik_z \left( \sqrt{k_x^2 + k_z^2} + \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2\sqrt{k_x^2 + k_z^2}}$$

$$[0871] \quad s_5 = \frac{ik_z \left( \sqrt{k_x^2 + k_z^2} - \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2\sqrt{k_x^2 + k_z^2}}$$

· · · (4 - 3 - 2)

[0872] <V影像化装置的结构及动作>

[0873] 基于上述内容,以下表示利用波动将区域内的物体所含的散射体的构造可视化的影像化装置的结构及动作。

[0874] 在此,波动例如是电波,也可以是微波、毫米波动或太赫兹波等。另外,也可以使用光或声音等作为波动。区域内的物体可以是生物体、制品、自然材料等。特别地,影像化装置能够用于乳房X线摄影,物体可以是乳房。

[0875] 另外,区域内的物体所包含的散射体对应于具有与周边的介质的物理特性不同的物理特性的部分。具体而言,该物理特性是与波动的反射率对应的物理特性。在使用电波作为波动的情况下,物理特性可以是介电常数。而且,物体所包含的散射体可以是钢筋混凝土所包含的钢筋、或者乳房所包含的肿瘤等。另外,测量对象的区域可以与物体的区域相同。

[0876] 图14是本实施方式中的影像化装置的基本结构图。图14所示的影像化装置100具备发送器列101、接收器列102以及信息处理电路103。另外,影像化装置100也可以具备显示器104。

[0877] 发送器列101是发送波动的电路。具体而言,发送器列101包括排列在直线上的多个发送器111。然后,各发送器111发送波动。影像化装置100也可以具备相互平行的多个发送器列101。

[0878] 接收器列102是接收波动的电路。具体而言,接收器列102包括排列在与排列了多个发送器111的直线平行的另一条直线上的多个接收器112。然后,各接收器112接收波动。另外,接收器列102与发送器列101设置间隔地配置。即,接收器列102与发送器列101分离。影像化装置100也可以具备相互平行的多个接收器列102。

[0879] 信息处理电路103是进行信息处理的电路。具体而言,信息处理电路103基于由发送器列101和接收器列102得到的测量数据,将区域内的物体所含的散射体的构造可视化。例如,在基于测量数据将散射体的构造可视化时,信息处理电路103进行上述理论所示的运算处理。

[0880] 另外,信息处理电路103也可以是计算机或计算机的处理器。信息处理电路103可以通过从存储器读取程序并执行该程序来进行信息处理。另外,信息处理电路103可以是基于测量数据使散射体的构造可视化的专用电路。

[0881] 另外,为了使散射体的构造可视化,信息处理电路103可以生成表示散射体的构造的图像。

[0882] 而且,信息处理电路103可以通过将表示散射体的构造的图像输出到显示器104等来使散射体的构造可视化。或者,信息处理电路103可以通过将表示散射体的构造的图像输出到打印机(未图示)来使散射体的构造可视化。或者,信息处理电路103可以通过有线或无线通信将图像作为电子数据发送给其他装置(未图示),使散射体的构造可视化。

[0883] 显示器104是液晶显示器等显示器装置。另外,显示器104是任意的构成要素,不是必需的构成要素。另外,显示器104也可以是不构成影像化装置100的外部装置。

[0884] 图15是表示图14所示的影像化装置100的基本动作的流程图。具体而言,图14所示的影像化装置100的发送器列101、接收器列102、信息处理电路103等进行图15所示的动作。

[0885] 首先,发送器列101的多个发送器111向测量对象的区域发送波动(S101)。例如,多个发送器111依次发送波动。接收器列102的多个接收器112从区域接收波动(S102)。例如,多个接收器112并行地接收波动。所接收的波动也可以表现为散射波。然后,信息处理电路103使用由多个发送器列101及多个接收器列102得到的测量数据,将区域内的物体所含的散射体的构造可视化(S103)。

[0886] 在使散射体的构造可视化时,信息处理电路103首先根据测量数据及距离,导出与关于波动的散射的散射场函数对应的影像化函数。这里,测量数据是通过多个发送器111和多个接收器112的全部或一部分的组合而得到的测量数据。此外,距离是排列多个发送器111的直线与排列多个接收器112的直线之间的距离。然后,信息处理电路103使用影像化函数,将区域内的物体所含的散射体的构造可视化。

[0887] 由此,根据发送器列101的多个发送器111和接收器列102的多个接收器112的各种组合,影像化装置100能够取得足够的信息作为测量数据。此外,由于在发送器列101与接收器列102之间设置有间隔,因此影像化装置100能够向区域适当地发送波动,并且能够从区域适当地接收波动。

[0888] 然后,影像化装置100能够使用根据波动的测量数据、以及发送器列101与接收器列102之间的距离导出的影像化函数,适当地将散射体的构造可视化。

[0889] 此外,由于发送器111及接收器112的配置被约束在两条直线上,与任意配置发送器111及接收器112的情况相比,影像化装置100能够简化运算处理。因此,影像化装置100能够抑制运算处理的复杂化。即,影像化装置100能够利用波动将区域内的物体所含的散射体的构造可视化,能够抑制运算处理的复杂化,并且提高散射体的构造的可视化中的空间分辨率。

[0890] 例如,信息处理电路103可以根据测量数据及距离来导出散射场函数。然后,信息处理电路103可以根据散射场函数导出影像化函数。

[0891] 在此,散射场函数,是由【数式200】表现的函数。

[0892] 【数式200】

$$[0893] \quad \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z) = \iiint_D \frac{e^{ik\rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{ik\rho_2}}{\rho_2} \varepsilon(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta$$

[0894] 另外, $\rho_1$ 及 $\rho_2$ 由【数式201】来确定。

[0895] 【数式201】

$$[0896] \quad \rho_1 = \sqrt{(x_1 - \xi)^2 + (y_1 - \eta)^2 + (z - \zeta)^2}$$

$$[0897] \quad \rho_2 = \sqrt{(x_2 - \xi)^2 + (y_2 - \eta)^2 + (z - \zeta)^2}$$

[0898] 此外, $(x_1, y_1, z)$ 表示波动的发送位置。 $(x_2, y_2, z)$ 表示波动的接收位置。 $k$ 表示波动的波数。 $D$ 表示区域。 $(\xi, \eta, \zeta)$ 对应于波动的反射位置。 $\varepsilon$ 对应于反射位置处的未知的反射率。

[0899] 由此,影像化装置100能够导出以发送位置及接收位置具有相同的z坐标为前提而确定的散射场函数,能够根据该散射场函数导出影像化函数。因此,影像化装置100能够沿着区域的平面边界,根据使用发送器列101的多个发送器111及接收器列102的多个接收器112而得到的测定数据来适当地导出散射场函数及影像化函数。

[0900] 例如,信息处理电路103可以通过求解散射场函数满足的方程式来导出散射场函数。

[0901] 这里,散射场函数满足的方程式由【数式202】来表现。

[0902] 【数式202】

$$[0903] \quad \{\Delta_5^2 - \frac{4}{c^2} \partial_t^2 \partial_z^2 - 4(\partial_{x_1}^2 + \partial_{y_1}^2)(\partial_{x_2}^2 + \partial_{y_2}^2)\} \varphi = 0$$

[0904] 另外,  $\Delta_5$  由【数式203】来确定。

[0905] 【数式203】

$$[0906] \quad \Delta_5 = \partial_{x_1}^2 + \partial_{y_1}^2 + \partial_{x_2}^2 + \partial_{y_2}^2 + \partial_z^2$$

[0907] 另外,  $c$  表示波动的传播速度。 $t$  表示波动的从发送到接收的时间。

[0908] 由此,影像化装置100能够分析性地导出散射场函数满足的方程式的解作为散射场函数。因此,影像化装置100能够高效地导出适当的散射场函数。

[0909] 另外,例如,影像化函数可以由【数式204】来表现。

[0910] 【数式204】

$$[0911] \quad \rho(x, y, z) = \int_0^\infty \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) dk$$

[0912] 在此,  $(x, y, z)$  表示影像化对象位置。

[0913] 因此,影像化装置100能够根据散射场函数的极限操作来导出影像化函数。然后,由此,影像化装置100能够将区域内的散射的状态可视化,能够将区域内的物体所含的散射体的构造适当地可视化。

[0914] 另外,例如,信息处理电路103可以将【数式205】作为散射场函数导出。

[0915] 【数式205】

$$[0916] \quad \begin{aligned} & \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1} x_1 + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} e^{s_3 x_2} e^{s_4 z} e^{\frac{id(k_{x_1} + is_3) \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}} \\ & \quad \cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \left( \frac{d(k_{x_1} + is_3)}{dk_{x_1}} \right) dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \end{aligned}$$

[0917] 这里,  $k_x$ 、 $s_3$  和  $s_4$  由【数式206】来确定。

[0918] 【数式206】

$$[0919] \quad k_x = k_{x_1} + is_3$$

$$[0920] \quad s_3 = \frac{-ik_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-ik_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

$$[0921] \quad s_4 = i \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + is_3)^2}$$

[0922] 另外,  $k_{x_1}$ 、 $k_{y_1}$  以及  $k_{y_2}$  表示关于散射场函数的  $x_1$ 、 $y_1$  以及  $y_2$  的波数。 $d$  表示距离。

[0923] 另外,【数式207】表示对  $x_1$ 、 $y_1$  以及  $y_2$  进行了傅里叶变换的测量数据。

[0924] 【数式207】

$$[0925] \quad \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

[0926] 由此, 影像化装置100能够在散射场函数中适当地反映波动的测量数据以及发送器列101与接收器列102之间的距离。因此, 影像化装置100能够导出适当地表示散射的状态的散射场函数。

[0927] 另外, 例如, 信息处理电路103可以导出【数式208】作为影像化函数。

[0928] 【数式208】

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

[0930] 这里,  $k_x$ 、 $k_z$ 、 $k$ 、 $dk/dk_z$  以及  $s_4$  由【数式209】来确定。

[0931] 【数式209】

$$[0932] \quad k_x = k_{x_1} + is_3$$

$$[0933] \quad k_z = \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}$$

$$[0934] \quad k = \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2)} + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}$$

$$[0935] \quad \frac{dk}{dk_z} = \frac{k_z \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}}{k(k_x^2 + k_z^2)}$$

$$[0936] \quad s_4 = i k_z = i \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + i s_3)^2}$$

[0937] 另外,  $s_3$  由【数式210】来确定。

[0938] 【数式210】

$$[0939] \quad s_3 = \frac{-i k_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-i k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

[0940] 另外,  $(x, y, z)$  表示影像化对象位置。 $k_{x_1}$ 、 $k_{y_1}$  以及  $k_{y_2}$  表示关于散射场函数的  $x_1$ 、 $y_1$  以及  $y_2$  的波数。 $d$  表示距离。

[0941] 另外, 【数式211】表示关于  $x_1$ 、 $y_1$  以及  $y_2$  进行了傅里叶变换的测量数据。

[0942] 【数式211】

$$[0943] \quad \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

[0944] 由此, 影像化装置100能够在影像化函数中适当地反映波动的测量数据以及发送器列101与接收器列102之间的距离。影像化装置100能够导出适当地表示散射的状态的影像化函数。

[0945] 另外, 例如, 影像化装置100可以具备多个发送器列101作为发送器列101, 多个接收器列102作为接收器列102, 或者多个发送器列101及多个接收器列102作为发送器列101及接收器列102。

[0946] 由此, 根据与发送器列101及接收器列102相关的多个组合, 影像化装置100能够取得足够的信息作为测量数据。另外, 影像化装置100能够针对发送器列101和接收器列102, 在平行方向和正交方向这两个方向上构建多基地的关系。因此, 影像化装置100能够将区域内的物体所含的散射体的构造适当地可视化。

[0947] 另外, 例如, 信息处理电路103可以对影像化装置100所具备的1列发送器列101及n列接收器列102, 导出【数式212】作为影像化函数。

[0948] 【数式212】

$$\begin{aligned}
& \rho(x, y, z) \\
&= \int_0^{\infty} \lim_{\substack{x_2 \rightarrow x_1 = x \\ y_2 \rightarrow y_1 = y}} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) dk \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{s_4 z} \\
[0949] & \cdot \sum_{j=1, n} \left\{ \exp \left( \frac{i d_j k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \right) \tilde{\Phi}_j(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \right\} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{i k_z z} \\
& \cdot \sum_{j=1, n} \left\{ \exp \left( \frac{i d_j k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \right) \tilde{\Phi}_j(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \right\} \left( \frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk_z
\end{aligned}$$

[0950] 另外,  $k_x, k_z, k, dk/dk_z$  以及  $s_4$  由【数式213】来确定。

[0951] 【数式213】

$$[0952] \quad k_x = k_{x_1} + i s_3$$

$$[0953] \quad k_z = \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}$$

$$[0954] \quad k = \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}}$$

$$[0955] \quad \frac{dk}{dk_z} = \frac{k_z \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{k(k_x^2 + k_z^2)}$$

$$[0956] \quad s_4 = i k_z = i \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + i s_3)^2}$$

[0957] 另外,  $s_3$  由【数式214】来确定。

[0958] 【数式214】

$$[0959] \quad s_3 = \frac{-i k_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-i k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

[0960] 另外,  $(x, y, z)$  表示影像化对象位置。 $k_{x_1}, k_{y_1}$  以及  $k_{y_2}$  表示关于散射场函数的  $x_1, y_1$  以及  $y_2$  的波数。 $d_j$  表示距离。

[0961] 另外, 【数式215】表示关于  $x_1, y_1$  以及  $y_2$  进行了傅里叶变换的测量数据。

[0962] 【数式215】

$$[0963] \quad \tilde{\Phi}_j(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

[0964] 由此,影像化装置100能够在影像化函数中适当地反映波动的测量数据以及发送器列101与接收器列102之间的距离。具体而言,影像化装置100能够对根据与发送器列101及接收器列102相关的多个组合而得到的测量数据进行对应于发送器列101与接收器列102之间的距离的线性相加,从而导出适当地表示散射的状态的影像化函数。

[0965] 另外,例如,信息处理电路103可以在与反射率对应的介电常数在区域中具有频率依赖性的情况下,导出【数式216】作为影像化函数。

[0966] 【数式216】

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

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

$$= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^{\infty} d\omega \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y + k_{y_2} y)} e^{s_4 z} e^{\frac{i d k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}}$$

[0967]

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

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

$$\cdot \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \left( \frac{d\omega}{dk} \right) \left( \frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk_z$$

[0968] 另外,  $k_x$ 、 $k_z$ 、 $k$ 、 $dk/dk_z$ 、 $d\omega/dk$  以及  $s_4$  由【数式217】来确定。

[0969] 【数式217】

$$[0970] \quad k_x = k_{x_1} + i s_3$$

$$[0971] \quad k_z = \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}$$

$$[0972] \quad k = \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}}$$

$$[0973] \quad \frac{dk}{dk_z} = \frac{k_z \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{k(k_x^2 + k_z^2)}$$

$$[0974] \quad \frac{d\omega}{dk} = \frac{c_0^2 k + \alpha c_0^2 \omega^2 k}{(a+b)\omega + 2\alpha\omega^2 - \alpha c_0^2 \omega k^2}$$

$$[0975] \quad s_4 = i k_z = i \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - (k_{x_1} + i s_3)^2}$$

[0976] 另外,  $s_3$  由【数式218】来确定。

[0977] 【数式218】

$$[0978] \quad s_3 = \frac{-i k_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-i k_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

[0979] 另外,  $(x, y, z)$  表示影像化对象位置。 $k_{x_1}$ 、 $k_{y_1}$  以及  $k_{y_2}$  表示关于散射场函数的  $x_1$ 、 $y_1$  以及  $y_2$  的波数。 $d$  表示距离。 $\omega$  表示波动的角频率。 $c_0$  表示真空中的波动的传播速度。 $a$ 、 $b$  以及  $\alpha$  表示关于德拜弛豫的参数。

[0980] 另外, 【数式219】表示对  $x_1$ 、 $y_1$  以及  $y_2$  进行了傅里叶变换的测量数据。

[0981] 【数式219】

$$[0982] \quad \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

[0983] 由此, 影像化装置100能够导出反映了关于德拜弛豫的参数的影像化函数。因此, 影像化装置100能够抑制依赖于波动的频率而产生的精度劣化。

[0984] 例如, 信息处理电路103可以根据测量数据及距离来导出散射场函数。然后, 信息处理电路103可以根据散射场函数导出影像化函数。

[0985] 在此, 散射场函数是由【数式220】表现的函数。

[0986] 【数式220】

$$[0987] \quad \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) = \iint_D \frac{e^{i k \rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{i k \rho_2}}{\rho_2} \varepsilon(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta$$

[0988] 另外,  $\rho_1$  及  $\rho_2$  由【数式221】来确定。

[0989] 【数式221】

$$[0990] \quad \rho_1 = \sqrt{(x_1 - \xi)^2 + (y_1 - \eta)^2 + (z_1 - \zeta)^2}$$

$$[0991] \quad \rho_2 = \sqrt{(x_2 - \xi)^2 + (y_2 - \eta)^2 + (z_2 - \zeta)^2}$$

[0992] 此外,  $(x_1, y_1, z_1)$  表示波动的发送位置。 $(x_2, y_2, z_2)$  表示波动的接收位置。 $k$  表示波动的波数。 $D$  表示区域,  $(\xi, \eta, \zeta)$  对应于波动的反射位置。 $\varepsilon$  对应于反射位置处的未知的反射率。

[0993] 由此, 影像化装置100能够导出以发送位置及接收位置可能有不同的  $z$  坐标为前提而确定的散射场函数, 能够根据该散射场函数导出影像化函数。因此, 影像化装置100能够沿着具有曲面边界的区域的切平面, 根据使用发送器列101的多个发送器111和接收器列102的多个接收器112而得到的测定数据来适当地导出散射场函数及影像化函数。

[0994] 例如, 信息处理电路103可以通过求解散射场函数满足的方程式来导出散射场函数。

[0995] 这里, 关于散射场函数满足的方程式由【数式222】来表现。

[0996] 【数式222】

$$[0997] \quad \{\Delta_6 - 2(ik)^2\} \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) = 0$$

[0998] 另外,  $\Delta_6$ 由【数式223】来确定。

[0999] 【数式223】

$$[1000] \quad \Delta_6 = \partial_{x_1}^2 + \partial_{x_2}^2 + \partial_{y_1}^2 + \partial_{y_2}^2 + \partial_{z_1}^2 + \partial_{z_2}^2$$

[1001] 由此,影像化装置100能够分析性地导出散射场函数满足的方程式的解作为散射场函数。因此,影像化装置100能够高效地导出适当的散射场函数。

[1002] 另外,例如,影像化函数可以由【数式224】来表现。

[1003] 【数式224】

$$[1004] \quad \rho(x, y, z) = \int_0^{\infty} \varphi(x, y, x, y, z, z, k) dk$$

[1005] 在此,  $(x, y, z)$  表示影像化对象位置。

[1006] 由此,影像化装置100能够使用输入了影像化对象位置的散射场函数来导出影像化函数。然后,由此,影像化装置100能够将区域内的散射的状态可视化,能够将区域内的物体所含的散射体的构造适当地可视化。

[1007] 另外,例如,信息处理电路103可以导出【数式225】作为散射场函数。

[1008] 【数式225】

$$[1009] \quad \begin{aligned} & \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1 + k_{y_2}y_2)} \sum_{I,J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\ & \quad \cdot e^{i(k_x x_I + k_{y_1} y_I + k_{y_2} y_J)} e^{-s_3 z_I} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} e^{s_3 x_2} e^{s_4 z_1} e^{s_5 z_2} \frac{d(k_x + is_3)}{dk_{x_1}} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \end{aligned}$$

[1010] 这里,  $k_x$ 、 $s_3$ 、 $s_4$ 以及 $s_5$ 由【数式226】来确定。

[1011] 【数式226】

$$[1012] \quad k_x = k_{x_1} + is_3$$

$$[1013] \quad s_3 = \frac{-ik_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-ik_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

$$[1014] \quad s_4 = \frac{i \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{\left(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}\right)^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

$$[1015] \quad s_5 = \frac{i\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{\left(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}\right)^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

[1016] 另外,  $k_{x_1}$ 、 $k_{y_1}$  以及  $k_{y_2}$  表示关于散射场函数的  $x_1$ 、 $y_1$  以及  $y_2$  的波数。 $d$  表示距离。 $\Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k)$  表示在发送位置为  $(x_I, y_I, z_I)$  且接收位置为  $(x_I+d, y_J, z_J)$  的情况下的测量数据。

[1017] 由此, 影像化装置 100 能够在散射场函数中适当地反映波动的测量数据以及发送器列 101 与接收器列 102 之间的距离。因此, 影像化装置 100 能够导出适当地表示散射的状态的散射场函数。

[1018] 另外, 例如, 信息处理电路 103 可以导出【数式 227】作为影像化函数。

[1019] 【数式 227】

$$\begin{aligned} & \rho(x, y, z) \\ &= \int_0^{\infty} \varphi(x, y, x, y, z, z, k) dk \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^{\infty} dk \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} e^{-s_3 d} e^{ik_z z} \sum_{I, J} \left\{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \right. \\ [1020] & \quad \left. \cdot e^{i(k_x x_I + k_{y_1} y_I + k_{y_2} y_J)} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \right\} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} e^{-s_3 d} e^{ik_z z} \sum_{I, J} \left\{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \right. \\ & \quad \left. \cdot e^{i(k_x x_I + k_{y_1} y_I + k_{y_2} y_J)} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \right\} \left( \frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk_z \end{aligned}$$

[1021] 这里,  $k_x$ 、 $k_z$ 、 $k$ 、 $dk/dk_z$ 、 $s_3$ 、 $s_4$  以及  $s_5$  由【数式 228】来确定。

[1022] 【数式 228】

$$[1023] \quad k_x = k_{x_1} + is_3$$

$$[1024] \quad k_z = \sqrt{\left(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}\right)^2 - k_x^2}$$

$$[1025] \quad k = \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2)} + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}$$

$$[1026] \quad \frac{dk}{dk_z} = \frac{k_z \left\{ 1 - \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{(k_x^2 + k_z^2)^2} \right\}}{2\sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2)} + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}}$$

$$[1027] \quad s_3 = \frac{-ik_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-ik_x \left( \sqrt{k_x^2 + k_z^2} - \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2\sqrt{k_x^2 + k_z^2}}$$

$$[1028] \quad s_4 = \frac{ik_z \left( \sqrt{k_x^2 + k_z^2} + \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2\sqrt{k_x^2 + k_z^2}}$$

$$[1029] \quad s_5 = \frac{ik_z \left( \sqrt{k_x^2 + k_z^2} - \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2\sqrt{k_x^2 + k_z^2}}$$

[1030] 另外,  $(x, y, z)$  表示影像化对象位置。 $k_{x_1}$ 、 $k_{y_1}$  以及  $k_{y_2}$  表示关于散射场函数的  $x_1$ 、 $y_1$  以及  $y_2$  的波数。 $d$  表示距离。此外,  $\Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k)$  表示发送位置为  $(x_I, y_I, z_I)$  且接收位置为  $(x_I + d, y_J, z_J)$  的情况下的测量数据。

[1031] 由此, 影像化装置 100 能够在影像化函数中适当地反映波动的测量数据以及发送器列 101 与接收器列 102 之间的距离。影像化装置 100 能够导出适当地表示散射的状态的影像化函数。

[1032] 此外, 例如, 信息处理电路 103 可以使用针对与发送器列 101 及接收器列 102 相关的多个组合的多个散射场函数的合成, 来导出影像化函数。

[1033] 这里, 多个散射场函数分别由【数式 229】来表现。

[1034] 【数式 229】

$$[1035] \quad \begin{aligned} & \varphi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1} x_1 + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} \sum_{I, J} \{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \\ & \quad \cdot e^{i(k_{x_1} x_I + k_{y_1} y_I + k_{y_2} y_J)} e^{-s_3 d} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \} e^{s_3 x_2} e^{s_4 z_1} e^{s_5 z_2} \frac{d(k_x + is_3)}{dk_{x_1}} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{y_2} \end{aligned}$$

[1036] 此外,  $k_x$ 、 $s_3$ 、 $s_4$  以及  $s_5$  由【数式 230】来确定。

[1037] 【数式 230】

$$[1038] \quad k_x = k_{x_1} + is_3$$

$$[1039] \quad s_3 = \frac{-ik_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-ik_x \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

$$[1040] \quad s_4 = \frac{i \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{\left(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}\right)^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

$$[1041] \quad s_5 = \frac{i \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{\left(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}\right)^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}$$

[1042] 另外,  $k_{x_1}$ 、 $k_{y_1}$  以及  $k_{y_2}$  表示关于散射场函数的  $x_1$ 、 $y_1$  以及  $y_2$  的波数。 $d$  表示距离。此外,  $\Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k)$  表示发送位置为  $(x_I, y_I, z_I)$  且接收位置为  $(x_I+d, y_J, z_J)$  的情况下的测量数据。

[1043] 因此, 影像化装置 100 能够通过将反映了波动的测量数据以及发送器列 101 与接收器列 102 之间的距离的多个散射场函数的合成, 导出适当地表示散射的状态的影像化函数。

[1044] 此外, 例如, 信息处理电路 103 可以在与反射率对应的介电常数在区域中具有频率依赖性的情况下, 导出【数式 231】作为影像化函数。

[1045] 【数式 231】

$$\begin{aligned} & \rho(x, y, z) \\ &= \int_0^{\infty} \varphi(x, y, x, y, z, z, k) d\omega \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^{\infty} d\omega \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} e^{-s_3 d} e^{ik_z z} \sum_{I, J} \left\{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \right. \\ [1046] & \quad \left. \cdot e^{i(k_x x_I + k_{y_1} y_I + k_{y_2} y_J)} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \right\} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} e^{-s_3 d} e^{ik_z z} \sum_{I, J} \left\{ \Phi(x_I, y_I, y_J, z_I, z_J, k) \right. \\ & \quad \left. \cdot e^{i(k_x x_I + k_{y_1} y_I + k_{y_2} y_J)} e^{-s_4 z_I} e^{-s_5 z_J} \right\} \left( \frac{d\omega}{dk} \right) \left( \frac{dk}{dk_z} \right) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} dk_z \end{aligned}$$

[1047] 这里,  $k_x$ 、 $k_z$ 、 $k$ 、 $dk/dk_z$ 、 $d\omega/dk$ 、 $s_3$ 、 $s_4$  以及  $s_5$  由【数式 232】来确定。

[1048] 【数式 232】

$$[1049] \quad k_x = k_{x_1} + is_3$$

$$[1050] \quad k_z = \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2})^2 - k_x^2}$$

$$[1051] \quad k = \frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}}$$

$$[1052] \quad \frac{dk}{dk_z} = \frac{k_z \left\{ 1 - \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{(k_x^2 + k_z^2)^2} \right\}}{2 \sqrt{k_x^2 + k_z^2 + 2(k_{y_1}^2 + k_{y_2}^2) + \frac{(k_{y_1}^2 - k_{y_2}^2)^2}{k_x^2 + k_z^2}}}$$

$$[1053] \quad \frac{d\omega}{dk} = \frac{c_0^2 k + \alpha c_0^2 \omega^2 k}{(a+b)\omega + 2\alpha\omega^2 - \alpha c_0^2 \omega k^2}$$

$$[1054] \quad s_3 = \frac{-ik_{x_1} \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2}} = \frac{-ik_x \left( \sqrt{k_x^2 + k_z^2} - \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2\sqrt{k_x^2 + k_z^2}}$$

$$[1055] \quad s_4 = \frac{ik_z \left( \sqrt{k_x^2 + k_z^2} + \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2\sqrt{k_x^2 + k_z^2}}$$

$$[1056] \quad s_5 = \frac{ik_z \left( \sqrt{k_x^2 + k_z^2} - \frac{k_{y_2}^2 - k_{y_1}^2}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right)}{2\sqrt{k_x^2 + k_z^2}}$$

[1057] 另外, (x, y, z) 表示影像化对象位置。k<sub>x1</sub>、k<sub>y1</sub> 以及 k<sub>y2</sub> 表示关于散射场函数的 x1、y1 以及 y2 的波数。d 表示距离。ω 表示波动的角频率。c<sub>0</sub> 表示真空中的波动的传播速度。a、b 以及 α 表示关于德拜弛豫的参数。

[1058] 另外,【数式233】表示对 x<sub>1</sub>、y<sub>1</sub> 以及 y<sub>2</sub> 进行了傅里叶变换的测量数据。

[1059] 【数式233】

$$[1060] \quad \tilde{\Phi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

[1061] 由此, 影像化装置100能够导出反映了关于德拜弛豫的参数的影像化函数。因此, 影像化装置100能够抑制依赖于波动的频率而产生的精度劣化。

[1062] 此外, 例如, 散射场函数可以确定为如下函数: 在该函数中, 输入波动的发送位置

及波动的接收位置,并且输出表示在接收位置处的波动的值。此外,影像化函数可以基于通过将影像化对象位置作为发送位置及所述接收位置输入到散射场函数而从散射场函数输出的值来确定。

[1063] 而且,信息处理电路103可以使用测量数据作为边界条件来导出散射场函数,并使用散射场函数来导出影像化函数。这里,散射场函数及影像化函数可以反映排列有多个发送器111的直线与排列有多个接收器112的直线之间的距离。

[1064] 另外,例如,在上述的基本结构及基本动作中所示的发送器列101、接收器列102、信息处理电路103、散射场函数以及影像化函数等中,可以适当地应用本实施方式中所示的其他构成要素、式子以及变量等。

[1065] 另外,本实施方式中所示的散射场函数及影像化函数等也可以适当变形来应用。例如,可以使用以其他表现表示与上述的数式实质上相同的内容的数式,也可以使用基于上述的理论导出的其他数式。

[1066] 图16是表示图14所示的影像化装置100的具体结构的框图。

[1067] 图14所示的影像化装置100的发送器列101及接收器列102可以包含在多基地阵列天线1008中。图14所示的影像化装置100的信息处理电路103也可以与图16所示的多个构成要素中的一个以上对应。具体而言,例如,信息处理电路103可以对应于信号处理计算机1005。另外,图14所示的显示器104可以对应于信号监视器装置1006。

[1068] 在影像化装置100中使用的微波的信号是具有DC~20GHz的频率分量的伪随机时序信号(PN码:Pseudo Noise Code)。该信号从PN码生成用的FPGA板1002输出。更具体而言,该信号有两种。一种信号(L0信号:Local oscillator signal)通过延迟电路(数字控制板1003)被送到RF检波电路(RF检波板1007)。

[1069] 另一种信号(RF信号:Radio Frequency Signal)被送到多基地阵列天线1008的发送用微波UWB天线并被放射。微波的散射信号被多基地阵列天线1008的接收用UWB天线接收,并被送到RF检波电路(RF检波板1007)。这里,收发信号通过天线元件选择开关(UWB天线RF开关1004)。

[1070] 另外,被延迟的信号(L0信号)每次延迟PN码的值变化的时间的 $1/2^n$ 倍( $n$ 是大于2的整数)的时间。检波后的信号作为IF信号(Intermediate Frequency Signal),由信号处理计算机1005进行A/D转换并存储。另外,表示检波后的信号的信息也可以显示在信号监视器装置1006上。

[1071] 这一系列动作的定时由数字控制板1003内的微处理器控制,以与来自测距仪1001的信号(距离信号或自由运行信号)同步。例如,数字控制板1003内的微处理器发送Switch切换信号以及PN码扫频触发器等。

[1072] 此外,信号处理计算机1005使用A/D转换后并被存储的信号进行三维重构,进行三维图像显示。此外,信号处理计算机1005可以进行信号校正。此外,信号处理计算机1005可以进行原始波形显示。此外,例如,信号处理计算机1005可以将三维图像等保存在存储器1009中。

[1073] 图16所示的结构是例子,影像化装置100的结构不限于图16所示的结构。图16所示的结构的一部分可以被省略,也可以被变更。

[1074] (补充)

[1075] 以上,基于实施方式对影像化装置的形态进行了说明,但影像化装置的形态不限于实施方式。可以对实施方式实施本领域技术人员想到的变形,也可以任意地组合实施方式中的多个构成要素。例如,在实施方式中,也可以代替特定的构成要素而由另外的构成要素执行由特定的构成要素执行的处理。另外,可以变更多个处理的顺序,也可以并行执行多个处理。

[1076] 另外,包括由影像化装置的各构成要素进行的步骤的影像化方法可以由任意装置或系统来执行。例如,可以通过具备处理器、存储器、以及输入输出电路等的计算机来执行影像化方法的一部分或全部。此时,也可以通过由计算机执行用于使计算机执行影像化方法的程序,来执行影像化方法。

[1077] 此外,上述程序可以记录在非暂时性计算机可读记录介质中。

[1078] 另外,影像化装置各构成要素可以由专用的硬件构成,也可以由执行上述程序等的通用的硬件构成,还可以由它们的组合构成。此外,通用的硬件可以由记录程序的存储器、从存储器读出程序并执行的通用处理器等构成。这里,存储器可以是半导体存储器或硬盘等,通用的处理器可以是CPU等。

[1079] 此外,专用的硬件可以由存储器以及专用的处理器等构成。例如,专用的处理器可以参照用于记录测量数据的存储器来执行上述的影像化方法。

[1080] 另外,影像化装置各构成要素也可以是电路。这些电路可以作为整体构成一个电路,也可以分别是不同的电路。另外,这些电路可以对应于专用的硬件,也可以对应于执行上述的程序等的通用的硬件。

[1081] 产业上的可利用性

[1082] 本公开的一个方式在利用波动将区域内的物体所含的散射体的构造可视化的影像化装置中是有用的,能够应用于物理探查或医疗诊断等。

[1083] 附图标记说明

[1084] 100 影像化装置

[1085] 101 发送器列

[1086] 102 接收器列

[1087] 103 信息处理电路

[1088] 104 显示器

[1089] 111 发送器

[1090] 112 接收器

[1091] 1001 测距仪

[1092] 1002 PN码生成FPGA板

[1093] 1003 数字控制板

[1094] 1004 UWB天线RF开关

[1095] 1005 信号处理计算机

[1096] 1006 信号监视装置

[1097] 1007 RF检波板

[1098] 1008 多基地阵列天线

[1099] 1009 存储器

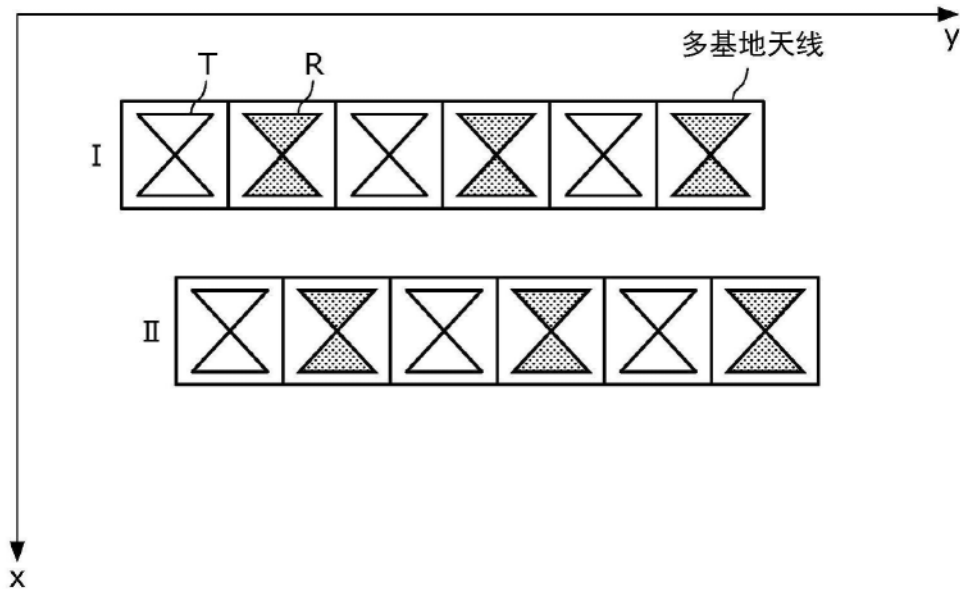


图1

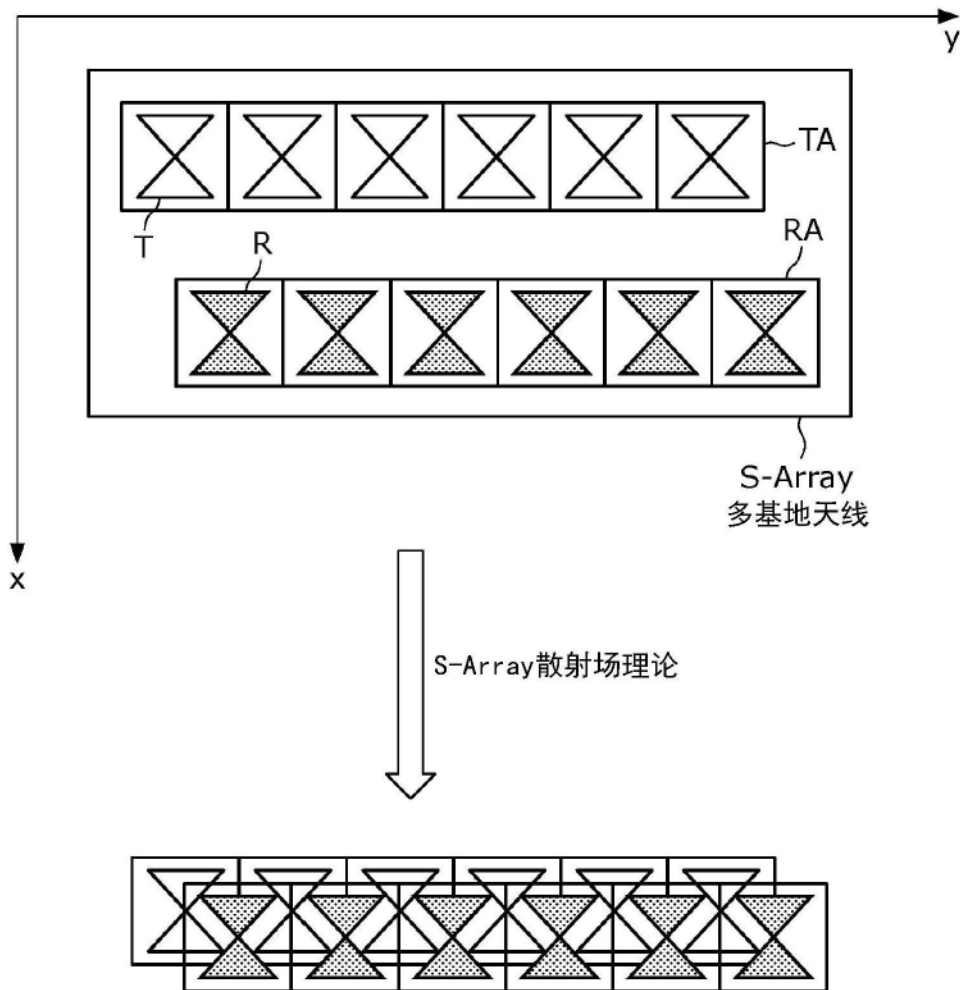


图2

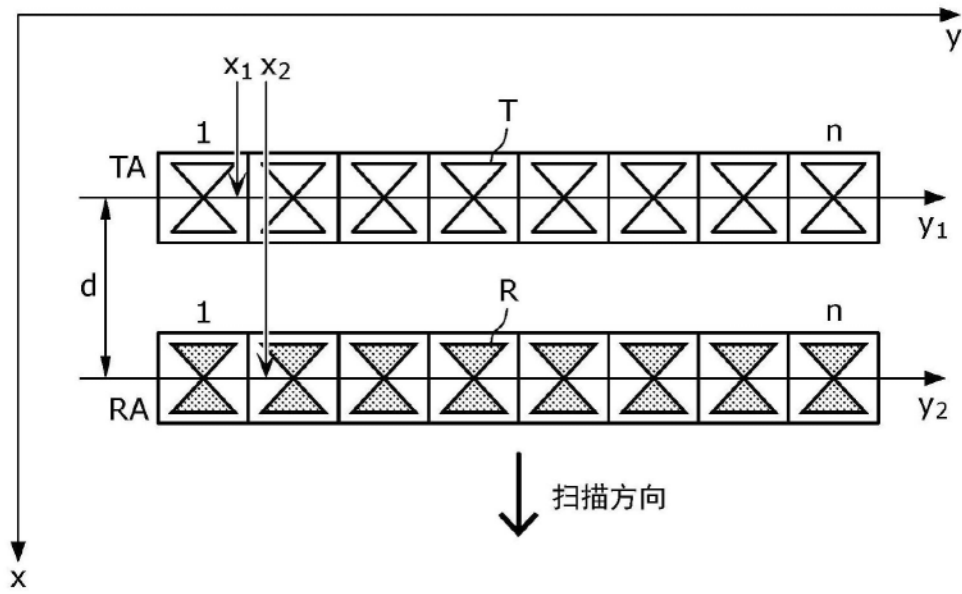


图3



图4

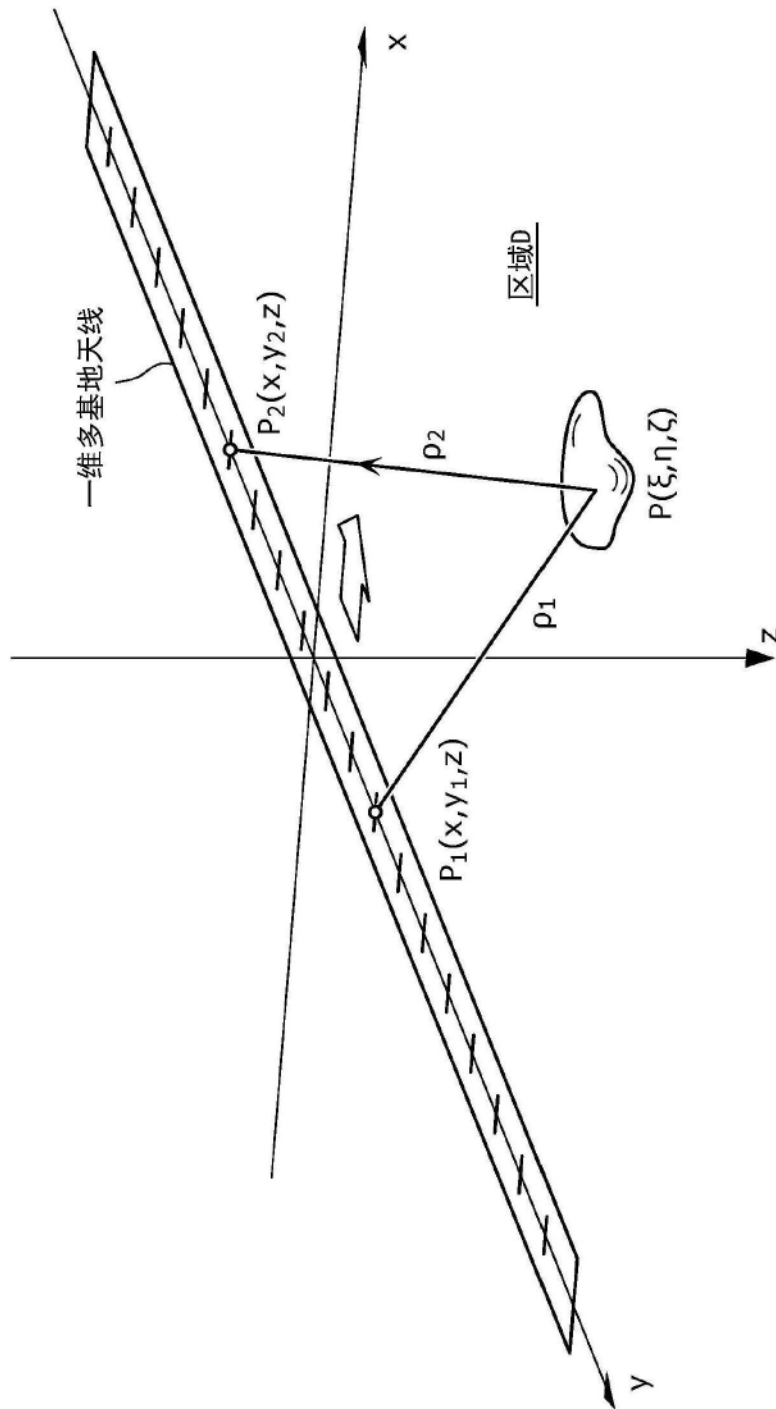


图5

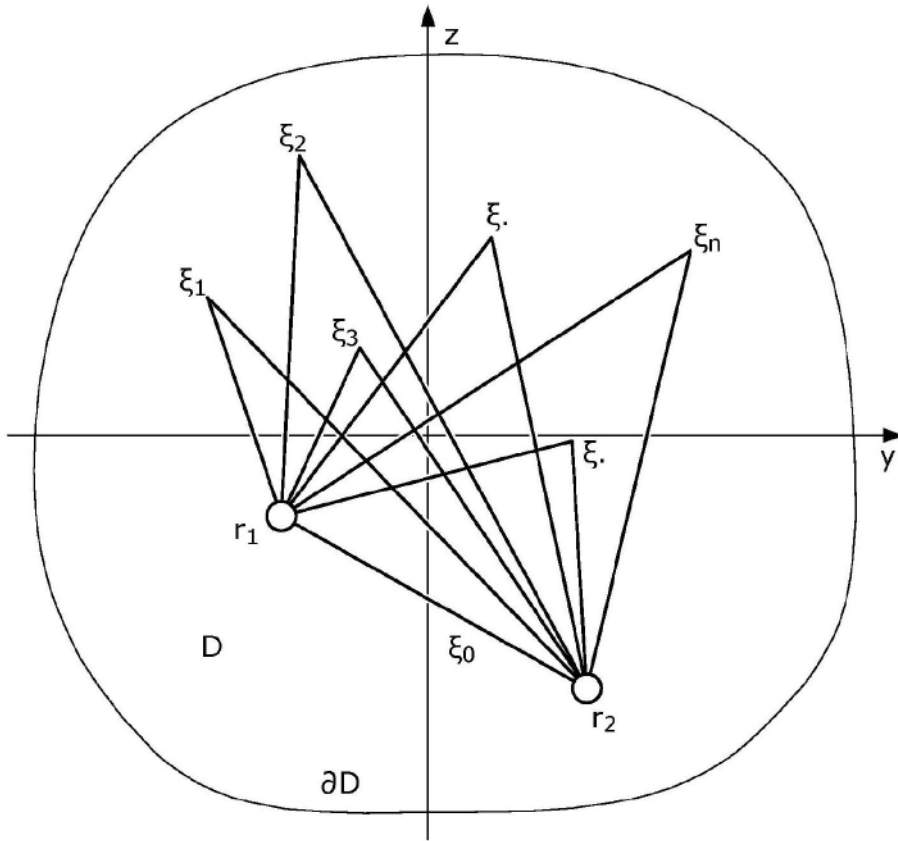


图6

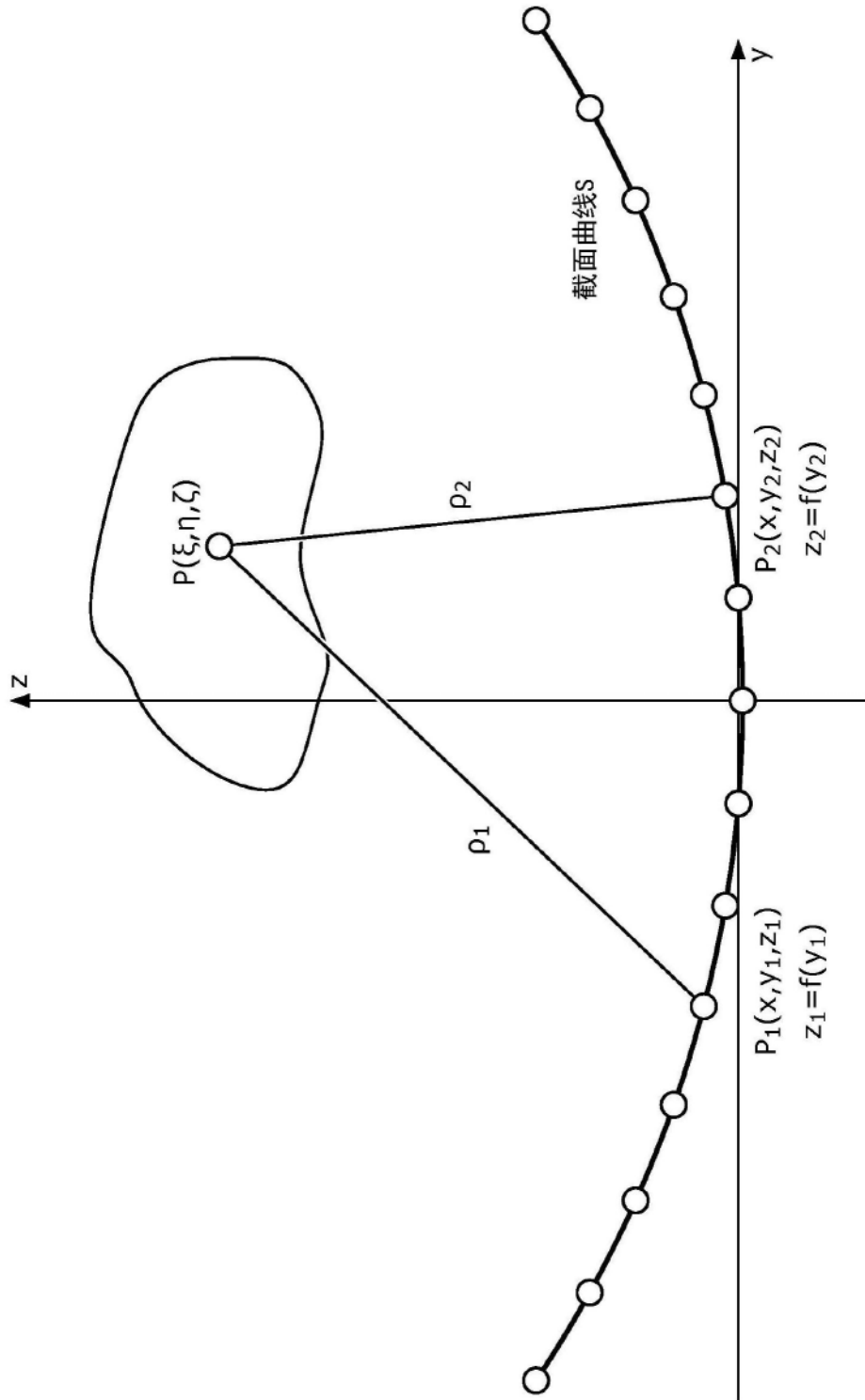


图7

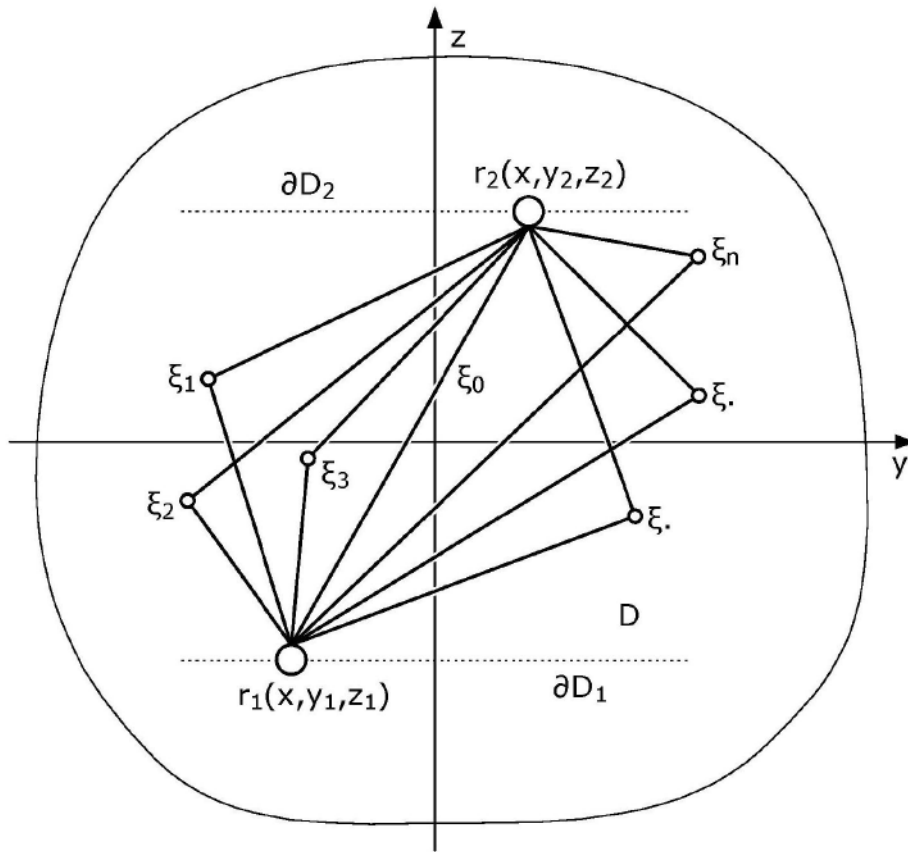


图8

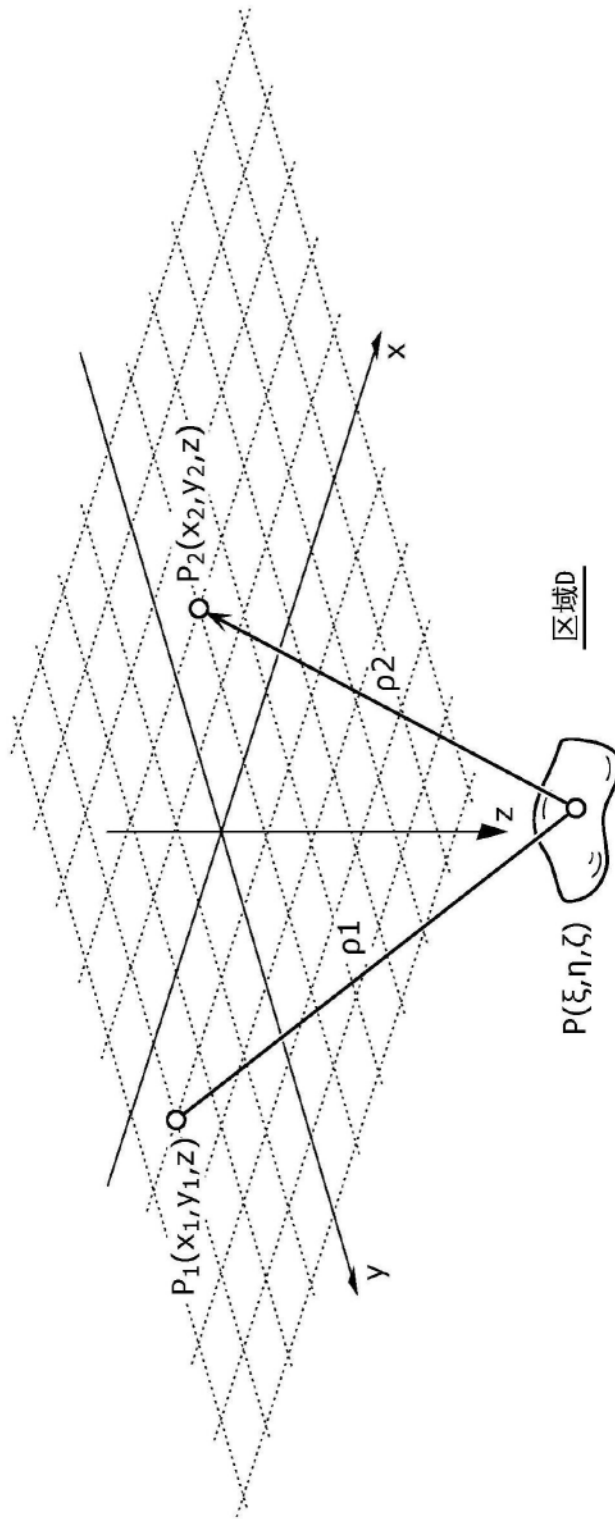


图9

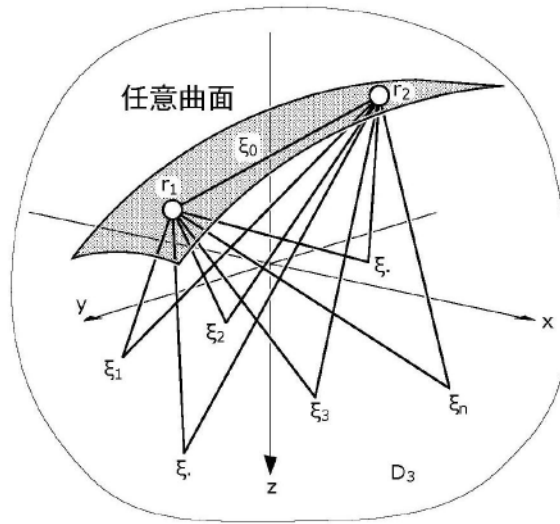


图10

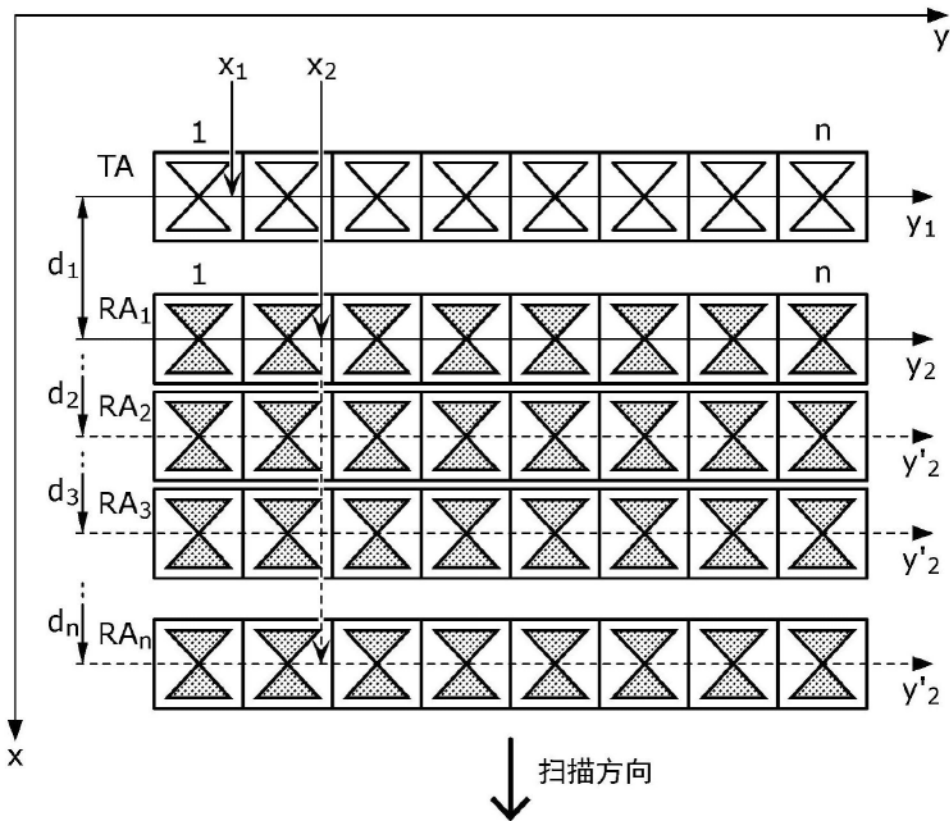


图11

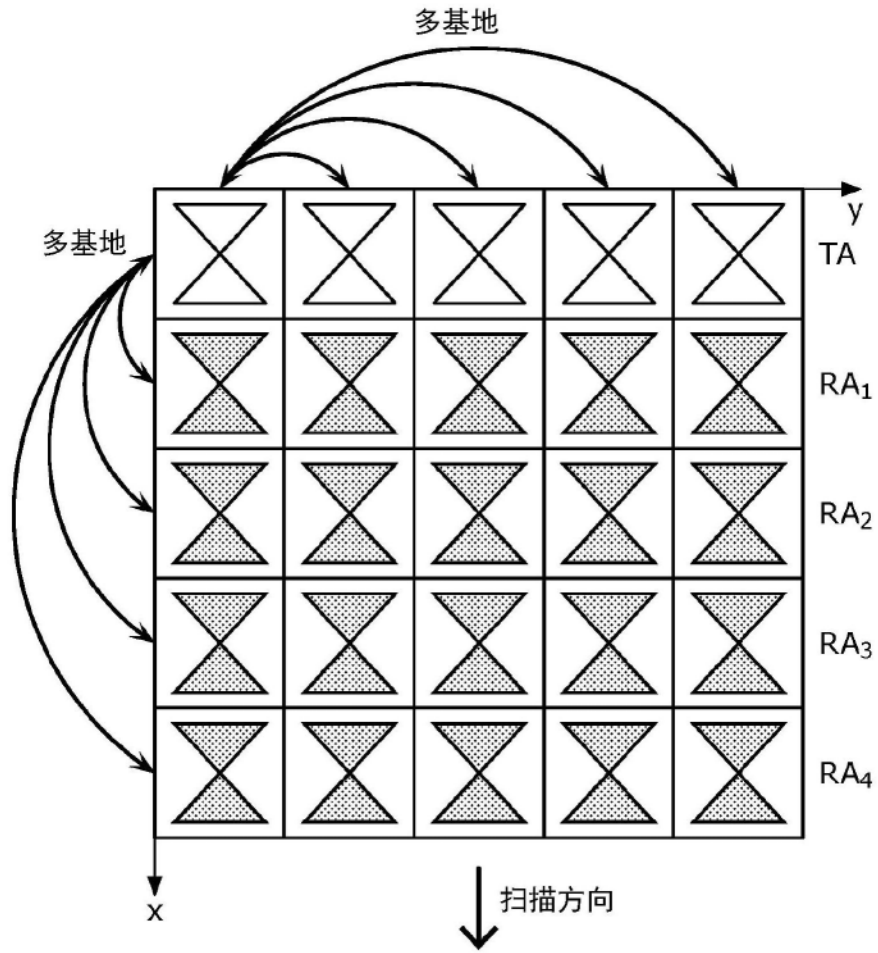


图12

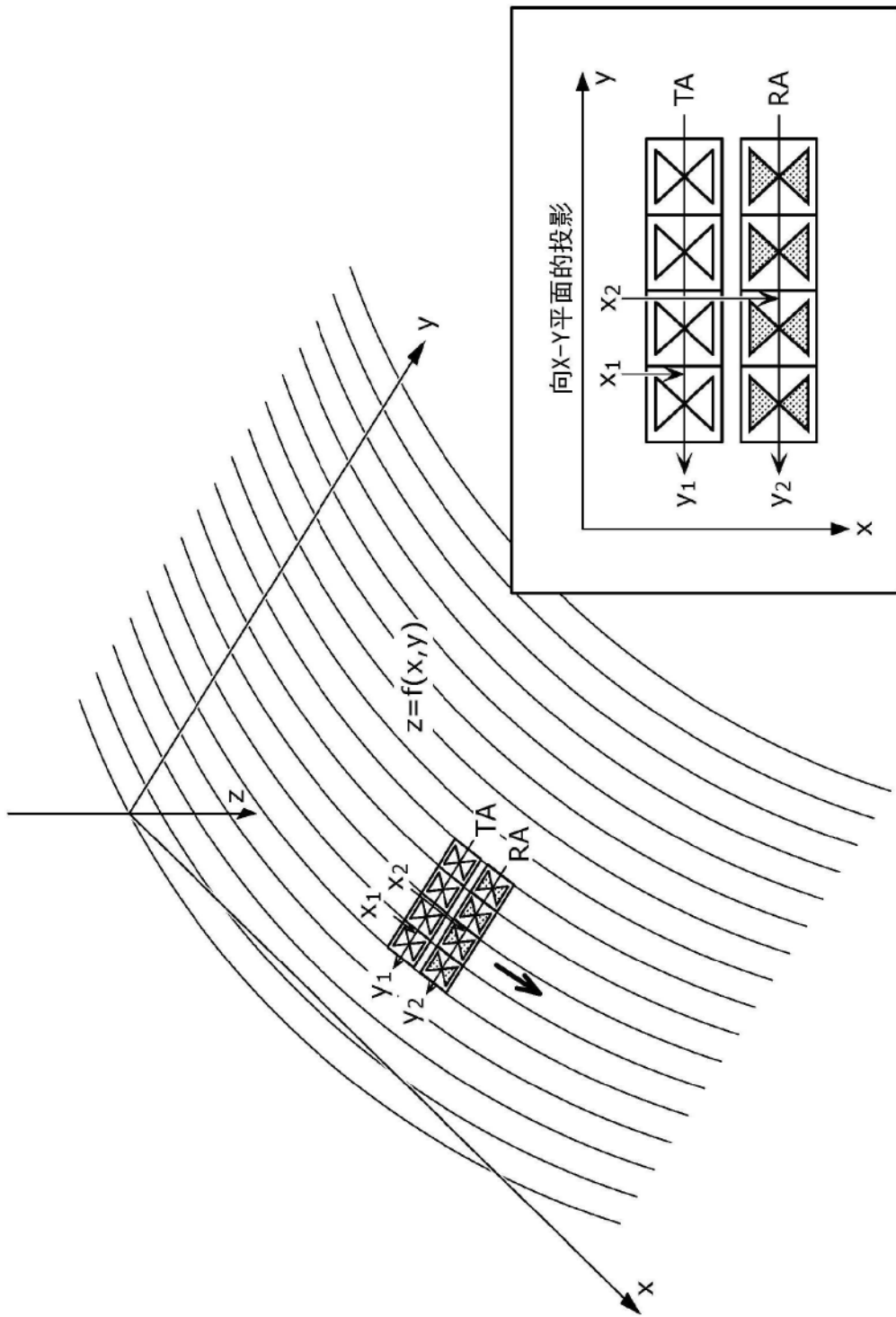


图13

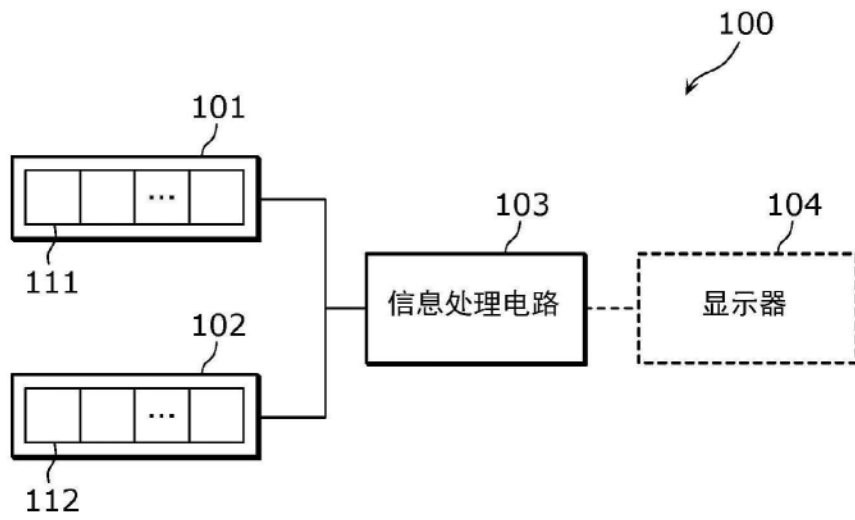


图14

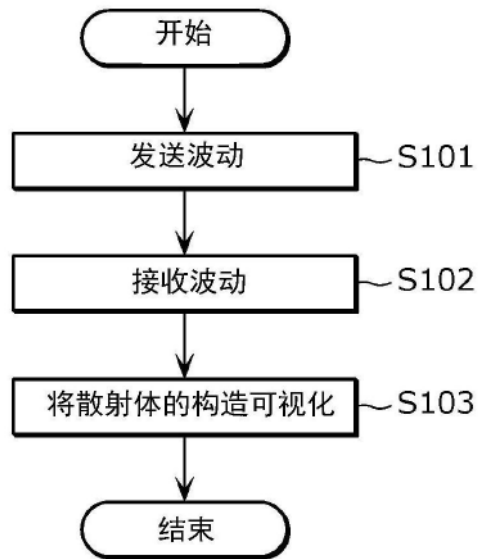


图15

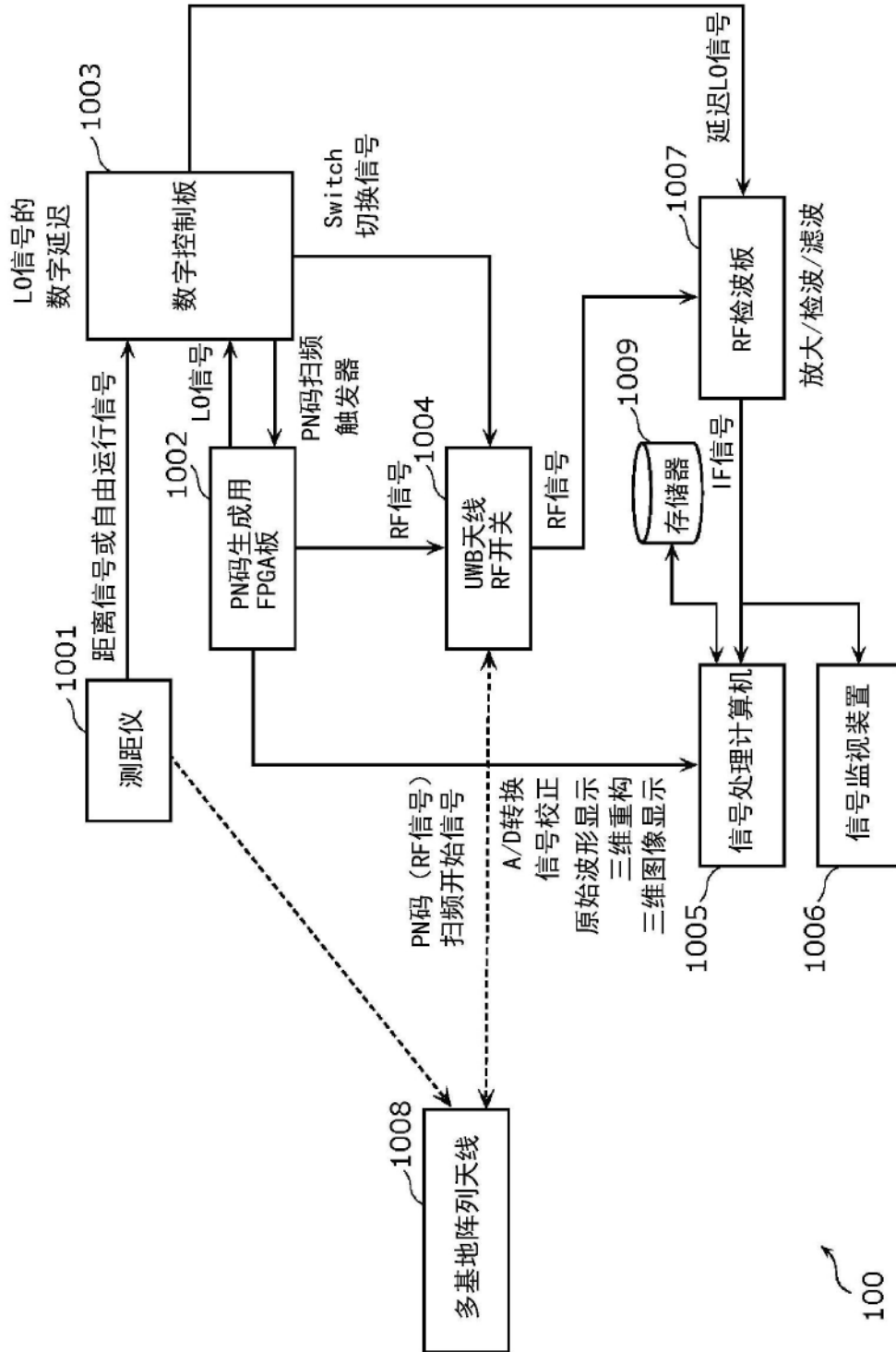


图16