

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(21) **202393149** (13) **A1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ**

(43) Дата публикации заявки
2024.01.11

(51) Int. Cl. **G01N 22/00** (2006.01)

(22) Дата подачи заявки
2022.06.09

(54) **УСТРОЙСТВО ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ И СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ**

(31) **2021-098329**

(72) Изобретатель:

(32) **2021.06.11**

**Кимура Кендзиро, Кимура Нориаки,
Кимура Фумитоси (JP)**

(33) **JP**

(86) **РСТ/JP2022/023224**

(74) Представитель:

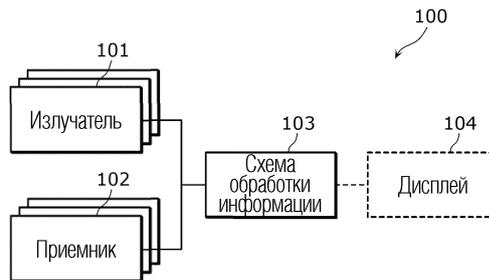
(87) **WO 2022/260112 2022.12.15**

Медведев В.Н. (RU)

(71) Заявитель:

**ИНТЕГРАЛ ДЖИОМЕТРИ САЙЕНС
ИНК. (JP)**

(57) Устройство (100) формирования изображения включает в себя множество излучателей (101), которые расположены с обеих сторон области и излучают волны в область; множество приемников (102), которые расположены с обеих сторон и принимают волны из области; и схему (103) обработки информации, которая выводит функцию формирования изображения, соответствующую функции поля рассеяния, соответствующей рассеянию волны, в соответствии с зависимостью между (i) данными измерения, полученными множеством излучателей (101) и множеством приемников (102), и (ii) композицией множества функций, соответствующих множественным рассеяниям первого порядка, формирующим многократное рассеяние, и визуализирует трехмерную структуру рассеивающего элемента, включенного в объект в области, с использованием функции формирования изображения.



A1

202393149

202393149

A1

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

2420-579808EA/55

УСТРОЙСТВО ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ И СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ

[Область техники, к которой относится изобретение]

[0001]

Настоящее изобретение относится к устройству формирования изображения и подобным устройствам, которые используют волны для визуализации трехмерной структуры одного или более рассеивающих элементов, включенных в объект в области.

[Уровень техники изобретения]

[0002]

В патентной литературе (PTL) 1, PTL 2, PTL 3, PTL 4 и PTL 5 раскрываются методы, относящиеся к устройствам формирования изображения и подобным устройствам, которые используют волны для визуализации трехмерной структуры каждого рассеивающего элемента, включенного в объект в области.

[0003]

Например, в случае метода, раскрытого в PTL 1, пучок, посылаемый микроволновым излучателем, падает на объект, подлежащий обследованию, и амплитуда и фаза рассеянных пучков измеряются микроволновым датчиком. Затем, по выходному сигналу микроволнового датчика вычисляется распределение диэлектрической постоянной, и сечение объекта отображается.

[Список литературы]

[Патентная литература]

[0004]

[PTL 1] Публикация нерассмотренной заявки на патент Японии № S62-66145

[PTL 2] Публикация Международной заявки на патент № WO2014/125815

[PTL 3] Публикация Международной заявки на патент № WO2015/136936

[PTL 4] Публикация Международной заявки на патент № WO2021/020387

[PTL 5] Публикация Международной заявки на патент № WO2021/053971

[Сущность изобретения]

[Техническая проблема]

[0005]

Однако непросто визуализировать трехмерную структуру каждого рассеивающего элемента, включенного в объект в области, с использованием волн. В частности, когда состояние в области известно, получение данных рассеянных волн, излучаемых из области, в сравнении с волнами, падающими на область, называется прямой задачей, которая является простой. С другой стороны, когда данные рассеянных волн известны, получение состояния в области называется обратной задачей, которая сложна.

[0006]

Вместе с тем, при распространении единственной волны, в области может

происходить множество рассеяний (отражений). Иначе говоря, могут происходить не только рассеяние первого порядка, соответствующее однократному рассеянию, но также рассеяние второго порядка, соответствующее двум рассеяниям, рассеяние третьего порядка, соответствующее трем рассеяниям, и тому подобное. Более чем однократное рассеяние называется также многократным рассеянием. В некоторых случаях, данные о рассеянных волнах, вызванных многократным рассеянием, можно получать измерением. Аналитический метод, который рассматривает только рассеяние первого порядка, но не учитывает многократное рассеяние, не может получить точное состояние в области.

[0007]

В связи с вышеизложенным, настоящее изобретение предлагает устройство формирования изображения и подобные устройства, которые способны визуализировать с высокой точностью трехмерную структуру одного или более рассеивающих элементов, включенных в объект в области, с использованием волн.

[Решение проблемы]

[0008]

Устройство формирования изображения в соответствии с одним аспектом настоящего изобретения включает в себя: множество излучателей, которые расположены с обеих сторон подлежащей измерению области, и каждый из которых излучает волну в область; множество приемников, которые расположены с обеих сторон, и каждый из которых принимает волну; и схему обработки информации, которая выводит функцию формирования изображения, соответствующую функции поля рассеяния, соответствующей рассеянию волны, в соответствии с зависимостью между (i) данными измерения, полученными множеством излучателей и множеством приемников, и (ii) композицией множества функций, соответствующих множественным рассеяниям первого порядка, формирующим многократное рассеяние, и визуализирует трехмерную структуру рассеивающего элемента, включенного в объект в области, с использованием функции формирования изображения.

[0009]

Раскрытые выше общие и частные аспекты могут быть реализованы с использованием системы, устройства, способа, интегральной схемы, компьютерной программы или компьютерно-читаемого долговременного носителя записи, такого как компакт-диск постоянной записи (CD-ROM), или любого сочетания систем, устройств, способов, интегральных схем, компьютерных программ или носителей записей.

[Положительные эффекты изобретения]

[0010]

В соответствии с настоящим изобретением можно визуализировать с высокой точностью трехмерную структуру одного или более рассеивающих элементов, включенных в объект в области, с использованием волн.

[Краткое описание чертежей]

[0011]

[Фиг. 1]

Фиг. 1 - концептуальная схема, поясняющая пример порядков многократного рассеяния в соответствии с вариантом осуществления.

[Фиг. 2]

Фиг. 2 - схема, поясняющая четыре типа состояний рассеяния, соответствующих четырем типам фундаментальных решений уравнения поля рассеяния.

[Фиг. 3]

Фиг. 3 - концептуальная схема, относящаяся к определению функции Грина.

[Фиг. 4]

Фиг. 4 - концептуальная схема, поясняющая пример применения фундаментальных решений для поля рассеяния.

[Фиг. 5]

Фиг. 5 - изображение путей распространения волн.

[Фиг. 6]

Фиг. 6 - концептуальная схема, поясняющая пример применения фундаментальных решений для поля рассеяния, соответствующего рассеянию второго порядка.

[Фиг. 7]

Фиг. 7 - изображение четырех типов моделей рассеяния, соответствующих рассеянию третьего порядка.

[Фиг. 8]

Фиг. 8 - пояснение описаний четырех типов данных измерения.

[Фиг. 9]

Фиг. 9 - блок-схема, изображающая базовую конфигурацию устройства формирования изображения в соответствии с вариантом осуществления.

[Фиг. 10]

Фиг. 10 - концептуальная схема, поясняющая пример взаимосвязи между множеством излучателей, множеством приемников и областью.

[Фиг. 11]

Фиг. 11 - концептуальная схема, поясняющая вариант взаимосвязи между множеством излучателей, множеством приемников и областью.

[Фиг. 12]

Фиг. 12 - блок-схема последовательности операций, поясняющая базовый порядок работы устройства формирования изображения в соответствии с вариантом осуществления.

[Фиг. 13]

Фиг. 13 - блок-схема, поясняющая конкретную конфигурацию устройства формирования изображения в соответствии с вариантом осуществления.

[Описание варианта осуществления]

[0012]

Устройство формирования изображения в соответствии с одним аспектом настоящего изобретения включает в себя: множество излучателей, которые расположены с

обеих сторон подлежащей измерению области, и каждый из которых излучает волну в область; множество приемников, которые расположены с обеих сторон, и каждый из которых принимает волну; и схему обработки информации, которая выводит функцию формирования изображения, соответствующую функции поля рассеяния, относящейся к рассеянию волны, в соответствии с зависимостью между (i) данными измерения, полученными множеством излучателей и множеством приемников, и (ii) композицией множества функций, относящихся к множественным рассеяниям первого порядка, формирующим многократное рассеяние, и визуализирует трехмерную структуру рассеивающего элемента, включенного в объект в области, с использованием функции формирования изображения.

[0013]

Это дает возможность устройству формирования изображения применять зависимость между данными измерения и композицией множества функций, соответствующих множественным рассеяниям первого порядка, чтобы выводить функцию формирования изображения для визуализации трехмерной структуры каждого рассеивающего элемента, включенного в объект в области. Предполагается, что многократное рассеяние является комбинацией множественных рассеяний первого порядка. Следовательно, устройство формирования изображения способно аналитически решать обратную задачу рассеяния, включая многократное рассеяние, в соответствии с упомянутой зависимостью. Соответственно, устройство формирования изображения способно с высокой точностью визуализировать трехмерную структуру каждого рассеивающего элемента, включенного в объект в области.

[0014]

Например, схема обработки информации выводит функцию формирования изображения, соответствующую функции поля рассеяния, посредством решения уравнения для функции поля рассеяния по данным измерения. Функция поля рассеяния записывается в следующем виде:

[0015]

[Математическое выражение 1]

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

где (x, y_1, z_1) обозначает позицию излучения волны, (x, y_2, z_2) обозначает позицию приема волны, k означает волновое число волны, D означает область, (ξ, η, ζ) соответствуют позиции отражения волны, ε соответствует неизвестному коэффициенту отражения в позиции отражения, ρ_1 означает расстояние от позиции излучения до позиции отражения, и ρ_2 означает расстояние от позиции отражения до позиции приема. Уравнение записывается в виде

[0016]

[Математическое выражение 2]

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

где Δ_5 означает оператор Лапласа относительно x, y_1, y_2, z_1 и z_2 , c означает скорость распространения волны, и t означает время распространения от излучения волны до приема волны.

[0017]

Это дает возможность устройству формирования изображения с высокой точностью визуализировать трехмерную структуру каждого рассеивающего элемента, включенного в объект в области, в соответствии с функцией поля рассеяния, связанной с явлением рассеяния, и уравнением, которому удовлетворяет функция поля рассеяния.

[0018]

Вместе с тем, например, схема обработки информации получает аналитическое решение уравнения по данным измерения и выводит функцию формирования изображения, исходя из аналитического решения, и аналитическое решение записывается в виде

[0019]

[Математическое выражение 3]

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

где k_x, k_{y_1} и k_{y_2} обозначают волновые числа, соответствующие x, y_1 и y_2 в функции поля рассеяния, $a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$ означает функцию от k_x, k_{y_1}, k_{y_2} и k , $s_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2})$ означает функцию от k_x, k_{y_1} и k_{y_2} , и $s_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2})$ означает функцию от k_x, k_{y_1} и k_{y_2} .

[0020]

Это дает возможность устройству формирования изображения с высокой точностью визуализировать трехмерную структуру каждого рассеивающего элемента, включенного в объект в области, в соответствии с аналитическим решением уравнения, которому удовлетворяет функция поля рассеяния, связанная с явлением рассеяния.

[0021]

Вместе с тем, например, функция формирования изображения записывается в виде

[0022]

[Математическое выражение 4]

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

где (x, y, z) обозначает позицию целевого объекта визуализации.

[0023]

Это дает возможность устройству формирования изображения с высокой точностью визуализировать трехмерную структуру каждого рассеивающего элемента, включенного в объект в области, в соответствии с функцией формирования изображения, подходящим

образом связанной с функцией поля рассеяния.

[0024]

Вместе с тем, например, многократное рассеяние выражается с использованием четырех функций спектрального пространства, соответствующих четырем фундаментальным решениям уравнения для функции поля рассеяния, связь между данными измерения и четырьмя функциями выражается нелинейным интегральным уравнением, и схема обработки информации: выводит четыре функции по данным измерения в соответствии с нелинейным интегральным уравнением; и выводит функцию формирования изображения, соответствующую функции поля рассеяния, с использованием четырех функций.

[0025]

Это дает возможность устройству формирования изображения с высокой точностью визуализировать трехмерную структуру каждого рассеивающего элемента, включенного в объект в области, в соответствии с выражением взаимосвязи, которое отражает многократное рассеяние.

[0026]

Вместе с тем, например, данные измерения записываются в виде

[0027]

[Математическое выражение 5]

$$\Phi_{ij}$$

$i, j=1,2$

где Φ_{11} , Φ_{12} , Φ_{21} и Φ_{22} , обозначенные как Φ_{ij} , соответствуют данным измерения, относящимся к четырем состояниям рассеяния, которые включают в себя два рассеяния в прямом направлении, соответствующие двум направлениям, и два рассеяния в обратном направлении, соответствующие двум направлениям, при этом схема обработки информации применяет

[0028]

[Математическое выражение 6]

$$\begin{aligned} \Phi_{ij} = & a_{m_1} \\ & + \frac{1}{(2\pi)^1} \int f_2 [a_{m_1} a_{m_2}] d\mathbf{k}_{f_2} \\ & + \frac{1}{(2\pi)^2} \int f_3 [a_{m_1} a_{m_2} a_{m_3}] d\mathbf{k}_{f_3} \\ & + \dots \\ & + \frac{1}{(2\pi)^{L-1}} \int f_L [a_{m_1} a_{m_2} a_{m_3} \dots a_{m_L}] d\mathbf{k}_{f_L} \end{aligned}$$

$i, j=1,2 \quad m_1, m_2, m_3, \dots, m_L=1,2,3,4$

чтобы вывести

[0029]

[Математическое выражение 7]

$$a_{m_1}$$

$m_1=1,2,3,4$

из которого был исключен эффект многократного рассеяния, где a_1, a_2, a_3 и a_4 , выраженные через $a_{m1}, a_{m2}, a_{m3}, \dots, a_{mL}$, соответствуют $a(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k)$ в аналитическом решении, соответствующем четырем состояниям рассеяния, f_2, f_3, \dots, f_L означают произведения 2, 3, ..., L переменных в квадратных скобках, соответствующих 2, 3, ..., L рассеяниям, имевшим место от излучения волны до приема волны, соответственно,

[0030]

[Математическое выражение 8]

$$k_{f_2}, k_{f_3}, \dots, k_{f_L}$$

обозначают волновые вектора, соответствующие координатным переменным, включенным в 2, 3, ..., L переменных в квадратных скобках при f_2, f_3, \dots, f_L , и схема обработки информации применяет

[0031]

[Математическое выражение 9]

$$\begin{aligned} & \phi_{m_1}(x, y_1, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} a_{m_1}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\ & \quad \cdot e^{i s_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}) z_1} e^{i s_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}) z_2} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \end{aligned}$$

$$m_1 = 1, 2, 3, 4$$

[0032]

как функцию поля рассеяния, чтобы вывести функцию формирования изображения в виде

[Математическое выражение 10]

$$\rho(x, y, z) = \lim_{t \rightarrow 0} \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \phi_{m_1}(x, y, y, z, z, k) e^{-ickt} dk \right]$$

[0033]

Это дает возможность устройству формирования изображения с высокой точностью визуализировать трехмерную структуру каждого рассеивающего элемента, включенного в объект в области, в соответствии с уравнением, базирующемся на теории многократного рассеяния.

[0034]

Вместе с тем, например, данные измерения записываются в виде

[0035]

[Математическое выражение 11]

$$\Phi_{ij}$$

$i, j=1, 2$

где Φ_{11} , Φ_{12} , Φ_{21} и Φ_{22} , обозначенные как Φ_{ij} , соответствуют данным измерения, относящимся к четырем состояниям рассеяния, которые включают в себя два рассеяния в прямом направлении, соответствующие двум направлениям, и два рассеяния в обратном направлении, соответствующие двум направлениям, при этом схема обработки информации применяет

[0036]

[Математическое выражение 12]

$$a_m = \Phi_{ij}$$

$m=1, 2, 3, 4$ $ij=1, 2$

$$- \frac{1}{(2\pi)^1} \int g_2 \left[\Phi_{m_1 n_1} \Phi_{m_2 n_2} \right] d\mathbf{k}_{g_2}$$

$m_1, n_1=1, 2$
 $m_2, n_2=1, 2$

$$- \frac{1}{(2\pi)^2} \int g_3 \left[\Phi_{m_1 n_1} \Phi_{m_2 n_2} \Phi_{m_3 n_3} \right] d\mathbf{k}_{g_3}$$

$m_1, n_1=1, 2$
 $m_2, n_2=1, 2$
 $m_3, n_3=1, 2$

- ...

$$- \frac{1}{(2\pi)^{L-1}} \int g_L \left[\Phi_{m_1 n_1} \Phi_{m_2 n_2} \Phi_{m_3 n_3} \dots \Phi_{m_L n_L} \right] d\mathbf{k}_{g_L}$$

$m_1, n_1=1, 2$
 $m_2, n_2=1, 2$
 $m_3, n_3=1, 2$
...
 $m_L, n_L=1, 2$

[0037]

чтобы вывести

[Математическое выражение 13]

$$a_m$$

$m=1, 2, 3, 4$

из которого был исключен эффект многократного рассеяния, где a_1 , a_2 , a_3 и a_4 , выраженные через a_m , соответствуют $a(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k)$ в аналитическом решении, соответствующем четырем состояниям рассеяния, Φ_{11} , Φ_{12} , Φ_{21} и Φ_{22} , выраженные через $\Phi_{m_1 n_1}$, $\Phi_{m_2 n_2}$, $\Phi_{m_3 n_3}$, ..., $\Phi_{m_L n_L}$, соответствуют данным измерения для четырех состояний рассеяния, g_2 , g_3 , ..., g_L означают произведения 2, 3, ..., L переменных в квадратных скобках, соответствующих 2, 3, ..., L рассеяниям, имевшим место от излучения волны до приема волны, соответственно,

[0038]

[Математическое выражение 14]

$$\mathbf{k}_{g_2}, \mathbf{k}_{g_3}, \dots, \mathbf{k}_{g_L}$$

обозначают волновые вектора, соответствующие координатным переменным, включенным в 2, 3, ..., L переменных в квадратных скобках при g_2 , g_3 , ..., g_L , и схема

обработки информации применяет

[0039]

[Математическое выражение 15]

$$\begin{aligned} & \phi_m(x, y_1, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y1} y_1 + k_{y2} y_2)} a_m(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k) \\ & \quad \cdot e^{i s_1(k_x, k_{y1}, k_{y2}) z_1} e^{i s_2(k_x, k_{y1}, k_{y2}) z_2} dk_x dk_{y1} dk_{y2} \end{aligned}$$

$$m = 1, 2, 3, 4$$

[0040]

как функцию поля рассеяния, чтобы вывести функцию формирования изображения в виде

[Математическое выражение 16]

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

[0041]

Это дает возможность устройству формирования изображения с высокой точностью визуализировать трехмерную структуру каждого рассеивающего элемента, включенного в объект в области, в соответствии с уравнением, в котором данные измерения надлежащим образом связаны на основе теории многократного рассеяния.

[0042]

Вместе с тем, например, данные измерения записываются в виде

[0043]

[Математическое выражение 17]

$$\Phi_{ij} \\ i, j = 1, 2$$

где Φ_{11} , Φ_{12} , Φ_{21} и Φ_{22} , обозначенные как Φ_{ij} , соответствуют данным измерения, относящимся к четырем состояниям рассеяния, которые включают в себя два рассеяния в прямом направлении, соответствующие двум направлениям, и два рассеяния в обратном направлении, соответствующие двум направлениям, при этом схема обработки информации применяет

[0044]

[Математическое выражение 18]

$$\begin{aligned}
& \Phi_{11}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
& = a_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
& + \frac{1}{(2\pi)} \iiint \alpha_1(k_{x_a}, k_{y_1}, k_{\eta}, k) \alpha_4(k_{x_b}, -k_{\eta}, k_{y_2}, k) \delta(k_{x_a} + k_{x_b} - k_x) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, k_{\eta}) - s_1(k_{x_b}, -k_{\eta}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{\eta} \\
& + \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint \alpha_1(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) \alpha_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) \alpha_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
& + \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint \alpha_3(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) \alpha_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) \alpha_4(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
& + \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint \alpha_1(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) \alpha_4(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) \alpha_4(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
& + \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint \alpha_3(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) \alpha_3(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) \alpha_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
& + O(a^4)
\end{aligned}$$

чтобы вывести a_1 , из которой был исключен эффект многократного рассеяния, где δ означает дельта-функцию, k_{x_a} , k_{x_b} и k_{x_c} являются переменными, соответствующими k_x , k_{η_1} и k_{η_2} являются переменными, соответствующими k_{y_1} , k_{η_3} является переменной, соответствующей k_{y_2} , и $O(a^4)$ является членом, соответствующим рассеянию четвертого или более высокого порядка, и схема обработки информации применяет

[0045]

[Математическое выражение 19]

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

$$\begin{aligned}
& = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} a_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot e^{i s_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}) z_1} e^{i s_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}) z_2} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2}
\end{aligned}$$

[0046]

как функцию поля рассеяния, чтобы вывести функцию формирования изображения

В ВИДЕ

[Математическое выражение 20]

$$\rho(x, y, z) = \lim_{t \rightarrow 0} \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \phi_1(x, y, y, z, z, k) e^{-ickt} dk \right]$$

[0047]

Это дает возможность устройству формирования изображения с высокой точностью визуализировать трехмерную структуру каждого рассеивающего элемента, включенного в объект в области, в соответствии с уравнением, в котором явление рассеяния точно выражается на основе теории многократного рассеяния.

[0048]

Вместе с тем, например, данные измерения записываются в виде

[0049]

[Математическое выражение 21]

$$\Phi_{ij}$$

$i, j=1, 2$

где Φ_{11} , Φ_{12} , Φ_{21} и Φ_{22} , обозначенные как Φ_{ij} , соответствуют данным измерения, относящимся к четырем состояниям рассеяния, которые включают в себя два рассеяния в прямом направлении, соответствующие двум направлениям, и два рассеяния в обратном направлении, соответствующие двум направлениям, при этом схема обработки информации применяет

[0050]

[Математическое выражение 22]

$$\begin{aligned}
& a_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
& = \Phi_{11}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
& - \frac{1}{(2\pi)} \iiint \Phi_{11}(k_{x_a}, k_{y_1}, k_{\eta_1}, k) \Phi_{21}(k_{x_b}, -k_{\eta_1}, k_{y_2}, k) \delta(k_{x_a} + k_{x_b} - k_x) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, k_{\eta_1}) - s_1(k_{x_b}, -k_{\eta_1}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{\eta_1} \\
& - \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint \Phi_{11}(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) \Phi_{22}(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) \Phi_{11}(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
& - \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint \Phi_{12}(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) \Phi_{11}(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) \Phi_{21}(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
& - \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint \Phi_{11}(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) \Phi_{21}(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) \Phi_{21}(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
& - \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint \Phi_{12}(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) \Phi_{12}(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) \Phi_{11}(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3}
\end{aligned}$$

чтобы вывести a_1 , из которой был исключен эффект многократного рассеяния, где δ означает дельта-функцию, k_{x_a} , k_{x_b} и k_{x_c} являются переменными, соответствующими k_x , k_{η_1} и k_{η_2} являются переменными, соответствующими k_{y_1} , k_{η_3} является переменной, соответствующей k_{y_2} , и схема обработки информации применяет

[0051]

[Математическое выражение 23]

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

$$= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} a_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

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

[0052]

как функцию поля рассеяния, чтобы вывести функцию формирования изображения в виде

[Математическое выражение 24]

$$\rho(x, y, z) = \lim_{t \rightarrow 0} \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \phi_1(x, y, y, z, z, k) e^{-ickt} dk \right]$$

[0053]

Это дает возможность устройству формирования изображения с высокой точностью визуализировать трехмерную структуру каждого рассеивающего элемента, включенного в объект в области, в соответствии с уравнением, в котором явление рассеяния точно выражается на основе теории многократного рассеяния, и данные измерения связаны надлежащим образом.

[0054]

Вместе с тем, например, данные измерения записываются в виде

[0055]

[Математическое выражение 25]

$$\Phi_{ij}$$

$i, j=1, 2$

где Φ_{11} , Φ_{12} , Φ_{21} и Φ_{22} , обозначенные как Φ_{ij} , соответствуют данным измерения, относящимся к четырем состояниям рассеяния, которые включают в себя два рассеяния в прямом направлении, соответствующие двум направлениям, и два рассеяния в обратном направлении, соответствующие двум направлениям, при этом схема обработки информации применяет

[0056]

[Математическое выражение 26]

$$\begin{aligned} & a_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\ &= \Phi_{11}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\ & - \frac{1}{(2\pi)} \iiint \Phi_{11}(k_{x_a}, k_{y_1}, k_{\eta}, k) \Phi_{21}(k_{x_b}, -k_{\eta}, k_{y_2}, k) \delta(k_{x_a} + k_{x_b} - k_x) \\ & \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, k_{\eta}) - s_1(k_{x_b}, -k_{\eta}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{\eta} \\ & - \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint \left\{ \Phi_{11}(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) \Phi_{22}(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) \Phi_{11}(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \right. \\ & \quad + \Phi_{12}(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) \Phi_{11}(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) \Phi_{21}(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\ & \quad + \Phi_{11}(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) \Phi_{21}(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) \Phi_{21}(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\ & \quad \left. + \Phi_{12}(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) \Phi_{12}(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) \Phi_{11}(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \right\} \\ & \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\ & \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \end{aligned}$$

чтобы вывести a_1 , из которой был исключен эффект многократного рассеяния, где δ

означает дельта-функцию, k_{xb} , k_{xb} и k_{xc} являются переменными, соответствующими k_x , k_y и k_{y2} являются переменными, соответствующими k_{y1} , k_{y3} является переменной, соответствующей k_{y2} , и схема обработки информации применяет

[0057]

[Математическое выражение 27]

$$\begin{aligned} & \phi_1(x, y_1, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y1} y_1 + k_{y2} y_2)} a_1(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k) \\ & \quad \cdot e^{i s_1(k_x, k_{y1}, k_{y2}) z_1} e^{i s_2(k_x, k_{y1}, k_{y2}) z_2} dk_x dk_{y1} dk_{y2} \end{aligned}$$

[0058]

как функцию поля рассеяния, чтобы вывести функцию формирования изображения в виде

[Математическое выражение 28]

$$\rho(x, y, z) = \lim_{t \rightarrow 0} \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \phi_1(x, y, y, z, z, k) e^{-ickt} dk \right]$$

[0059]

Это дает возможность устройству формирования изображения с высокой точностью визуализировать трехмерную структуру каждого рассеивающего элемента, включенного в объект в области, в соответствии с уравнением, преобразованным на базе теории многократного рассеяния.

[0060]

Вместе с тем, например, способ формирования изображений в соответствии с одним аспектом настоящего изобретения включает в себя: излучение, каждым из множества излучателей, расположенных с обеих сторон области, волны в подлежащую измерению область; прием, каждым из множества приемников, расположенных с обеих сторон, волны из области; и вывод функции формирования изображения, относящейся к функции поля рассеяния, соответствующей рассеянию волны в соответствии с зависимостью между (i) данными измерения, полученными множеством излучателей и множеством приемников, и композицией множества функций, относящихся к множественным рассеяниям первого порядка, формирующим многократное рассеяние, и этап визуализации трехмерной структуры рассеивающего элемента, включенного в объект в области, с использованием функции формирования изображения.

[0061]

Это позволяет применить зависимость между данными измерения и композицией множества функций, соответствующих множественным рассеяниям первого порядка, чтобы выводить функцию формирования изображения для визуализации трехмерной структуры каждого рассеивающего элемента, включенного в объект в области.

Предполагается, что многократное рассеяние является комбинацией множественных рассеяний первого порядка. Соответственно, обратную задачу рассеяния, в том числе многократного рассеяния, можно решить аналитически, в соответствии с упомянутой зависимостью. В результате, с использованием волн можно с высокой точностью визуализировать трехмерную структуру каждого рассеивающего элемента, включенного в объект в области.

[0062]

В дальнейшем в данном документе будет описан вариант осуществления со ссылкой на чертежи. Следует заметить, что нижеописанный вариант осуществления представляет общий или частный пример. Численные значения, формы, материалы, конструктивные элементы, расположение и соединение конструктивных элементов, этапы, порядок этапов и т.п., показанные в последующем варианте осуществления, являются всего лишь примерами и, следовательно, не ограничивают формулу изобретения.

[0063]

В последующем описании, в частности, методы и т.п., раскрытые в PTL 2, PTL 3, PTL 4 и PTL 5, могут упоминаться как известные методы. Вместе с тем, в последующем описании, в основном, предполагается, что волны представлены радиоволнами, например, микроволнами, но волны не ограничены радиоволнами, например, микроволнами. Кроме того, формирование изображений на основе рассеяния можно назвать томографией в рассеянном излучении. Соответственно, устройство формирования изображения и способ формирования изображений в последующем описании также можно назвать устройством томографии в рассеянном излучении и способом томографии в рассеянном излучении, соответственно.

[0064]

[Вариант осуществления]

Устройство формирования изображения в соответствии с настоящим вариантом осуществления использует волны, чтобы визуализировать трехмерную структуру одного или более рассеивающих элементов, включенных в объект в области. В дальнейшем в данном документе устройство формирования изображения в соответствии с настоящим вариантом осуществления будет подробно описано, включая исходные методы и теоретические положения.

[0065]

<I Основные принципы>

Теория поля рассеяния построена, чтобы формировать изображение внутренности объекта с использованием волн, например, микроволн. Теория поля рассеяния не только имеет теоретическую новизну, но также полезна на практике. Поскольку по измеренным данным (измерения) можно сразу вычислить точное трехмерное реконструированное изображение, теория потенциально применима в области диагностической визуализации и подобных областях. В настоящем изобретении развита теория поля рассеяния для решения сложной обратной задачи рассеяния для многократного рассеяния (множественных

отражений) и предложены устройство формирования изображения и способ формирования изображений с использованием развитой теории поля рассеяния.

[0066]

Например, в теории обратной задачи реконструкции рассеяния, когда поверхность измерения, на которой размещаются позиция излучения и позиция приема, является криволинейной поверхностью, определяется функция ϕ , как показано ниже в (1-1).

[0067]

[Математическое выражение 29]

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

. . . (1 - 1)

[0068]

Здесь (x, y_1, z_1) обозначают координаты позиции испускания волны, и (x, y_2, z_2) обозначают координаты позиции приема волны. Испускание можно также назвать излучением. Кроме того, k означает волновое число волны, и D означает подлежащую измерению область. Функция $\varepsilon(\xi, \eta, \zeta)$ означает функцию диэлектрической постоянной в позиции (ξ, η, ζ) и соответствует коэффициенту отражения волны в позиции (ξ, η, ζ) . Позиция (ξ, η, ζ) соответствует отражению волны. Величина ρ_1 означает расстояние от позиции излучения до позиции отражения, и ρ_2 означает расстояние от позиции отражения до позиции приема. Следует отметить, что $\varepsilon(\xi, \eta, \zeta)$ является неизвестной.

[0069]

Явление, при котором волны рассеиваются в точке, в которой функция $\varepsilon(\xi, \eta, \zeta)$ диэлектрической постоянной имеет большое значение, считается функцией относительно позиции испускания волны и позиции приема волны. При определении позиции испускания и позиции приема по всей области, вышеприведенная функция ϕ служит функцией поля рассеяния, которая показывает поле рассеяния. Функция поля рассеяния удовлетворяет дифференциальному уравнению в частных производных, показанному ниже в (1-2).

[0070]

[Математическое выражение 30]

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

. . . (1 - 2)

[0071]

Здесь Δ_5 означает пятимерный оператор Лапласа относительно x, y_1, y_2, z_1 и z_2 , ∂ означает частный дифференциал переменной, указанной правым нижним индексом, c означает скорость распространения волны, и t означает время. Общее решение дифференциального уравнения (1-2) записывается, как показано в (1-3) ниже.

[0072]

[Математическое выражение 31]

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

[0073]

Здесь k_x , k_{y_1} и k_{y_2} означают волновые числа, соответствующие x , y_1 и y_2 в функции поля рассеяния. Поскольку решение одного дифференциального уравнения четвертого порядка в частных производных полностью определяется измеренным значением (данными отражения радиолокационных волн) на границе области, $a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$, которая является функцией ядра общего решения, также находится преобразованием Фурье. Затем, посредством применения предельных значений $y_2 \rightarrow y_1$ и $t \rightarrow 0$ к ϕ получается функция ρ формирования изображения. Например, функция ρ формирования изображения выражается, как показано ниже в (1-4).

[0074]

[Математическое выражение 32]

$$\begin{aligned} \rho(x, y, z) &= \lim_{t \rightarrow 0} \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \phi(x, y, y, z, z, k) e^{-i c k t} dk \right] \\ & \dots (1-4) \end{aligned}$$

[0075]

В вышеописанном процессе, функция $\phi(x, y_1, y_2, z_1, z_2, k)$ поля рассеяния непосредственно связывается с измеренным значением (данными отражения радиолокационных волн) на границе области, в предположении, что многократное рассеяние отсутствует. Например, форма граничной поверхности определяется кривой $z=f(y)$ на плоскости z - y . Данные, получаемые путем преобразования Фурье данных отражения радиолокационных волн, измеренных на граничной поверхности, по (x, t) , выражаются в виде $\Phi(k_x, y_1, y_2, k)$. В предположении, что многократное рассеяние отсутствует, нижеследующее выражение (1-5) считается верным.

[0076]

[Математическое выражение 33]

$$\begin{aligned} & \Phi(k_x, y_1, y_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} a_{I,J}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\ & \quad \cdot e^{i s_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}) z_1} e^{i s_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}) z_2} dk_{y_1} dk_{y_2} \\ & \dots (1-5) \end{aligned}$$

[0077]

Однако, когда многократным рассеянием пренебрегать нельзя, рассеяние второго порядка, третьего порядка и четвертого порядка могут присутствовать, как показано на фиг. 1.

[0078]

На фиг. 1 приведена концептуальная схема, поясняющая пример рассеяния нескольких порядков (множественных отражений) в соответствии с вариантом осуществления. На фиг. 1, P_1 означает позицию излучения, и P_2 означает позицию приема. Сигнал передается из P_1 и принимается в P_2 за счет нескольких отражений, соответствующих порядку в области. Множество отражений называются множественными отражениями или многократным рассеянием.

[0079]

Настоящее изобретение раскрывает способ решения для решения обратной задачи рассеяния, включая вышеописанное многократное рассеяние, и устройство формирования изображения и способ формирования изображений с использованием способа решения.

[0080]

Для выполнения анализа обратной задачи многократного рассеяния используют данные отражения радиолокационных волн на границах области. Многократное рассеяние второго или более высокого порядка выражается комбинацией (композицией) фундаментальных решений четырех типов, E_1 , E_2 , E_3 и E_4 , дифференциального уравнения поля рассеяния в частных производных.

[0081]

Фиг. 2 поясняет четыре типа состояния рассеяния, соответствующих четырем типам фундаментальных решений уравнения поля рассеяния. Состояние рассеяния можно также назвать моделью рассеяния. Многократное рассеяние выражается композицией данных четырех фундаментальных решений (E_1 , E_2 , E_3 , E_4). Вводятся функции спектрального пространства, которыми являются a_1 , a_2 , a_3 и a_4 , соответствующие E_1 , E_2 , E_3 и E_4 . Для определения этих функций по данным измерения, измеряют два рассеяния в обратном направлении и одно рассеяние в прямом направлении.

[0082]

Анализ обратной задачи рассеяния для многократного рассеяния в трехмерной области является сложной задачей. Однако настоящее изобретение предлагает решение обратной задачи рассеяния с использованием теории поля рассеяния.

[0083]

<II Теория поля рассеяния>

<II-1 Простая функция распространения>

Уравнение Гельмгольца для распространения волны записывается в нижеприведенном виде (2-1).

[0084]

[Математическое выражение 34]

$$(\Delta_3 + k^2)\phi(x - \xi, y - \eta, z - \zeta, k) = 0$$

$$\cdot \cdot \cdot (2 - 1)$$

[0085]

Здесь ϕ является неизвестной функцией, которая означает смещение колебания в позиции (x, y, z) , Δ_3 означает трехмерный оператор Лапласа, k означает волновое число, и

(ξ, η, ζ) обозначает позицию источника волны.

[0086]

Уравнение, получаемое преобразованием Фурье от ϕ по (x, y, t) , записывается в нижеприведенном виде (2-2).

[0087]

[Математическое выражение 35]

$$\tilde{\phi}(k_x, k_y, z - \zeta, k) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i c k t} dt \int_{-\infty}^{\infty} e^{i k_y (y - \eta)} dy \int_{-\infty}^{\infty} e^{i k_x (x - \xi)} \phi(x - \xi, y - \eta, z - \zeta, t) dx$$

. . . (2 - 2)

[0088]

Здесь k_x означает волновое число, соответствующее x , и k_y означает волновое число, соответствующее y . Уравнение (2-1) преобразуется, например, в показанные ниже (2-3) и (2-4).

[0089]

[Математическое выражение 36]

$$\{\partial_z^2 + (k^2 - k_x^2 - k_y^2)\} \tilde{\phi}(k_x, k_y, z, k) = 0$$

. . . (2 - 3)

[0090]

[Математическое выражение 37]

$$\phi(x - \xi, y - \eta, z - \zeta, k) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint e^{-i k_y (y - \eta)} e^{-i k_x (x - \xi)} a(k_x, k_y, k) e^{\pm i (z - \zeta) \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}} dk_x dk_y$$

. . . (2 - 4)

[0091]

Здесь, ∂_z^2 означает частный дифференциал второго порядка относительно z , и $a(k_x, k_y, k)$ является функцией от (k_x, k_y, k) .

[0092]

<П-2 Фундаментальное решение для поля рассеяния>

На фиг. 3 приведена концептуальная схема, относящаяся к определению функции Грина. В дальнейшем в данном документе, если не указано иное, позиция излучения и позиция приема имеют одну и ту же x -координату. Когда позиция излучения и позиция приема определяются как $\mathbf{r}_1 = (x, y_1, z_1)$ и $\mathbf{r}_2 = (x, y_2, z_2)$, соответственно, то функция Грина определяется, как показано ниже в (2-5).

[0093]

[Математическое выражение 38]

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

. . . (2 - 5)

[0094]

Приведенная функция ядра интегрального уравнения означает интенсивность сигнала волны, которая исходит из Γ_1 , отражается в точке ξ и возвращается в точку Γ_2 . ω является угловой частотой. Данная функция Грина реализуется с использованием нового обозначения функции, как показано ниже в (2-6). Здесь ϵ является функцией диэлектрической постоянной.

[0095]

[Математическое выражение 39]

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

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

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

• • • (2-6)

[0096]

Вышеприведенная функция $\phi(x, y_1, y_2, z_1, z_2)$ является решением дифференциального уравнения поля рассеяния в частных производных, как показано ниже в (2-7).

[0097]

[Математическое выражение 40]

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

• • • (2-7)

[0098]

Далее рассматривается решение уравнения (2-7). Сначала, путем выполнения нескольких преобразований Фурье на ϕ по t , x , y_1 и y_2 и выполнения преобразования уравнения (2-7) получают (2-8). Здесь D_{z_1} и D_{z_2} обозначают частные производные по z_1 и z_2 , соответственно.

[0099]

[Математическое выражение 41]

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

• • • (2-8)

[0100]

Уравнение (2-8) имеет четыре решения, которые записываются, как показано ниже в (2-9).

[0101]

[Математическое выражение 42]

$$\begin{aligned}
E_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, z_1, z_2) &= \exp\{i(s_1 + s_2)z\} \\
E_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, z_1, z_2) &= \exp\{-i(s_1 + s_2)z\} \\
E_3(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, z_1, z_2) &= \exp\{i(s_1 - s_2)z\} \\
E_4(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, z_1, z_2) &= \exp\{i(-s_1 + s_2)z\} \\
&\dots (2-9)
\end{aligned}$$

[0102]

Здесь, s_1 и s_2 записываются, как показано ниже в (2-10).

[0103]

[Математическое выражение 43]

$$\begin{aligned}
s_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}) &= \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} \sqrt{\left(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}\right)^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
s_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}) &= \frac{\sqrt{k^2 - k_{y_2}^2} \sqrt{\left(\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}\right)^2 - k_x^2}}{\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_2}^2}} \\
&\dots (2-10)
\end{aligned}$$

[0104]

Рассеяние, соответствующее каждому из четырех фундаментальных решений уравнения (2-9), изображено на фиг. 2. Из данных четырех фундаментальных решений, E_3 и E_4 имеют обратное соотношение во времени друг с другом и не являются независимыми друг от друга. Соответственно, E_1 , E_2 и E_3 являются независимыми фундаментальными решениями. Четыре общих решения уравнения (2-7), соответствующих четырем фундаментальным решениям, записываются, как показано ниже в (2-11).

[0105]

[Математическое выражение 44]

$$\begin{aligned}
& \phi_1(x, y_1, y_2, z_1, z_2, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x - k_{y1} y_1 + k_{y2} y_2)} a_1(k_x, k_{y1}, k_{y2}) \\
&\quad \cdot e^{i s_1(k_x, k_{y1}, k_{y2}) z_1} e^{i s_2(k_x, k_{y1}, k_{y2}) z_2} dk_x dk_{y1} dk_{y2} \\
& \phi_2(x, y_1, y_2, z_1, z_2, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x - k_{y1} y_1 + k_{y2} y_2)} a_2(k_x, k_{y1}, k_{y2}) \\
&\quad \cdot e^{-i s_1(k_x, k_{y1}, k_{y2}) z_1} e^{-i s_2(k_x, k_{y1}, k_{y2}) z_2} dk_x dk_{y1} dk_{y2} \\
& \phi_3(x, y_1, y_2, z_1, z_2, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x - k_{y1} y_1 + k_{y2} y_2)} a_3(k_x, k_{y1}, k_{y2}) \\
&\quad \cdot e^{i s_1(k_x, k_{y1}, k_{y2}) z_1} e^{-i s_2(k_x, k_{y1}, k_{y2}) z_2} dk_x dk_{y1} dk_{y2} \\
& \phi_4(x, y_1, y_2, z_1, z_2, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x - k_{y1} y_1 + k_{y2} y_2)} a_4(k_x, k_{y1}, k_{y2}) \\
&\quad \cdot e^{-i s_1(k_x, k_{y1}, k_{y2}) z_1} e^{i s_2(k_x, k_{y1}, k_{y2}) z_2} dk_x dk_{y1} dk_{y2} \\
& \dots (2 - 1 1)
\end{aligned}$$

[0106]

Четыре общих решения показанного выше уравнения (2-11) можно рассматривать как четыре функции поля рассеяния, соответствующие четырем моделям рассеяния первого порядка, изображенным на фиг. 2. Функция поля рассеяния, соответствующая многократному рассеянию, выводится на основании композиции четырех функций поля рассеяния.

[0107]

<III Многократное рассеяние>

<III-1 Порядки многократного рассеяния>

Порядки многократного рассеяния изображены на фиг. 1. Многократное рассеяние каждого порядка, показанного на фиг. 1, включает в себя также разные геометрические изменения в позициях, в которых происходит рассеяние. Характеристики различаются в зависимости от положительного и отрицательного знаков составляющей по z-координате каждого вектора направления падения и рассеяния в позиции, в которой происходит рассеяние. То, что характеристики различаются в зависимости от положительного и отрицательного знаков составляющей по z-координате каждого вектора направления падения и рассеяния, было описано в фундаментальном решении поля рассеяния в главе II.

[0108]

<III-2 Основные принципы подхода, использующего теорию поля рассеяния для многократного рассеяния>

На фиг. 4 приведена концептуальная схема, поясняющая пример применения

фундаментальных решений поля рассеяния. В частности, фиг. 4 поясняет модель рассеяния третьего порядка, к которой применяется множество фундаментальных решений. Например, в модели рассеяния третьего порядка, изображенной на фиг. 4, фундаментальные решения E_1 и E_2 для поля рассеяния применяются в областях внутри пунктирных линий. Следующее выражение (3-1) показывает взаимосвязь между путями и фундаментальными решениями.

[0109]

[Математическое выражение 45]

$$\begin{aligned} P_1 \rightarrow S_1 \rightarrow S_{2-} & : E_1 \\ S_{2-} \rightarrow S_2 \rightarrow S_{3-} & : E_2 \\ S_{3-} \rightarrow S_3 \rightarrow P_2 & : E_1 \\ \dots & (3-1) \end{aligned}$$

[0110]

Рассеянные точки S_1, S_2, S_3 являются произвольными точками в областях, но на рассеянные точки S_1, S_2, S_3 и т.п. налагается условие, что соблюдаются геометрические правила. В частности, сохраняется знак составляющей по z-координате вектора направления, обозначенного стрелкой, представляющей распространение волны на фиг. 4. Кроме того, P_1, P_2, S_2 и S_3 перемещаются в плоскости измерения, при условии, что их x-координаты идентичны друг другу. Кроме того, z-координаты P_1 и P_2 идентичны друг другу. Однако предполагается, что никаких ограничений на x-координату S_1 не налагается.

[0111]

На фиг. 5 показаны пути распространения волн. В частности, на фиг. 5 показано множество путей распространения для общей позиции P_1 излучения и общей точки P_2 приема, когда используются фундаментальные решения E_1 и E_2 . Данные пути распространения подчиняются вышеупомянутым геометрическим правилам.

[0112]

Амплитуда рассеяния в обратном направлении, измеренная на y-оси, записывается, как показано ниже в (3-2).

[0113]

[Математическое выражение 46]

$$\begin{aligned} \Phi_1(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, k) &= G_1(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, k) \\ &+ \iiint G_1(\mathbf{P}_1, \mathbf{S}_{2-}, k) \cdot G_2(\mathbf{S}_{2-}, \mathbf{S}_{3-}, k) \cdot G_1(\mathbf{S}_{3-}, \mathbf{P}_2, k) d\mathbf{S}_2 d\mathbf{S}_3 \\ &+ \dots \\ \dots & (3-2) \end{aligned}$$

[0114]

Здесь G (в частности, G_1 и G_2) является функцией Грина и определяется, как показано ниже в (3-3).

[0115]

[Математическое выражение 47]

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

• • • (3-3)

[0116]

Здесь

[0117]

[Математическое выражение 48]

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

означает интенсивность сигнала волны, которая исходит из r_1 , отражается в точке ξ и возвращается в точку r_2 . Правые нижние индексы 1 и 2 в функции Грина соответствуют фундаментальным решениям E_1 и E_2 . В теории, которая не учитывает многократного рассеяния, можно получить уравнение (3-4), приведенное ниже, пренебрегая вторым и последующими членами с правой стороны уравнения (3-2).

[0118]

[Математическое выражение 49]

$$G_1(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, k) = \Phi_1(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, k)$$

• • • (3-4)

[0119]

Функция $a_1(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k)$ в уравнении (2-11) получается из уравнения (3-4) путем преобразования Фурье. Подстановкой приближенной функции, полученной таким образом, в знак интеграла с правой стороны уравнения (3-3) получают $G_1(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, k)$, которая учитывает многократное рассеяние, и уточняют $a_1(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k)$.

[0120]

Правая сторона уравнения (3-2) включает в себя новую функцию $G_2(S_2, S_3, k)$. Чтобы получить последнюю путем измерения, используют результат измерения на поверхности со значением z , отличающимся от того, которое описано выше. Когда $\Phi_2(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, k)$ означает результат измерения на поверхности с отличающимся значением z , следующее уравнение (3-5) является верным.

[0121]

[Математическое выражение 50]

$$G_2(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, k) = \Phi_2(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, k)$$

• • • (3-5)

[0122]

При этом, из уравнения (3-2) получают более точно $a_1(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k)$.

[0123]

<III-3 Формулировка обратной задачи рассеяния при многократном рассеянии>

(1) Рассеяние второго порядка

На фиг. 6 приведена концептуальная схема, поясняющая пример применения

фундаментальных решений поля рассеяния, соответствующего рассеянию второго порядка. Рассеяние второго порядка соответствует, как показано на фиг. 6, форме, в которой фундаментальные решения E_1 и E_4 уравнения поля рассеяния связаны посредством S_{2-} . Предполагается, что S_{2-} находится как можно ближе к S_2 . Фундаментальные решения E_3 и E_4 удовлетворяют условию, что не включается прямая волна, распространяющаяся непосредственно из S_{2-} в P_2 .

[0124]

Пути рассеяния второго порядка ограничены путем, показанным на фиг. 6, и путем, где P_1 и P_2 на фиг. 6 переставлены (симметрично измененным путем). Фундаментальные решения E_1 и E_4 применяются как на фиг. 6, и обозначения функций приведены как в (3-6) ниже.

[0125]

[Математическое выражение 51]

$$P_1 \rightarrow S_1 \rightarrow S_{2-} : \phi_{P_1 S_1 S_{2-}}(x, y_1, \eta_{2-}, z, \zeta_{2-}, k)$$

$$S_{2-} \rightarrow S_2 \rightarrow P_2 : \phi_{S_{2-} S_2 P_2}(x, \eta_{2-}, y_2, \zeta_{2-}, z, k)$$

• • • (3 - 6)

[0126]

Здесь (x, y_1, z) соответствует позиции P_1 , (x, y_2, z) соответствует позиции P_2 , и $(x, \eta_{2-}, \zeta_{2-})$ соответствует позиции S_{2-} . Частное уравнение (3-6) записывается, как показано ниже в (3-7) в соответствии с уравнением (2-11).

[0127]

[Математическое выражение 52]

$$\phi_{P_1 S_1 S_{2-}}(x, y_1, \eta_{2-}, z, \zeta_{2-}, k)$$

$$= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{\eta_{2-}} \eta_{2-})} \alpha_1(k_x, k_{y_1}, k_{\eta_{2-}}, k) \cdot e^{i s_1(k_x, k_{y_1}, k_{\eta_{2-}})z} e^{i s_2(k_x, k_{y_1}, k_{\eta_{2-}}) \zeta_{2-}} dk_x dk_{y_1} dk_{\eta_{2-}}$$

$$\phi_{S_{2-} S_2 P_2}(x, \eta_{2-}, y_2, \zeta_{2-}, z, k)$$

$$= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{\eta_{2-}} \eta_{2-} + k_{y_2} y_2)} \alpha_4(k_x, k_{\eta_{2-}}, k_{y_2}, k) \cdot e^{-i s_1(k_x, k_{\eta_{2-}}, k_{y_2}) \zeta_{2-}} e^{i s_2(k_x, k_{\eta_{2-}}, k_{y_2})z} dk_x dk_{\eta_{2-}} dk_{y_2}$$

• • • (3 - 7)

[0128]

Композиция вышеприведенных функций, соответствующих пути $P_1 \rightarrow S_1 \rightarrow S_{2-} \rightarrow S_2 \rightarrow P_2$ многократного рассеяния второго порядка, записывается, как показано ниже в (3-8).

[0129]

[Математическое выражение 53]

$$\Phi_2(x, y_1, y_2, z, k) = \phi_{P_1 S_1 S_2} (x, y_1, \eta_{2-}, z, \zeta_{2-}, k) \phi_{S_2 S_1 P_2} (x, \eta_{2-}, y_2, \zeta_{2-}, z, k) \\ \cdot \cdot \cdot (3-8)$$

[0130]

Посредством применения $\eta_{2-} \rightarrow \eta$ и $\zeta_{2-} \rightarrow \zeta$ к уравнению (3-8) и выполнения интегрирования по координатам (η, ζ) точки S_2 получают (3-9).

[0131]

[Математическое выражение 54]

$$\Psi_2(x, y_1, y_2, z, k) = \iint \phi_{P_1 S_1 S_2} (x, y_1, \eta, z, \zeta, k) \phi_{S_2 S_1 P_2} (x, \eta, y_2, \zeta, z, k) d\eta d\zeta \\ \cdot \cdot \cdot (3-9)$$

[0132]

При подстановке уравнения (3-7) в уравнение (3-9) получают (3-10). Во избежание путаницы, переменным в (3-10) ниже присваиваются соответственно такие нижние индексы, как a, b, + и -.

[0133]

[Математическое выражение 55]

$$\Psi_2(x, y_1, y_2, z, k) \\ = \frac{1}{(2\pi)^6} \iiint \iiint \iint e^{-i(k_{xa}x + k_{y1}y_1 + k_{\eta-}\eta)} a_1(k_{xa}, k_{y1}, k_{\eta-}, k) \\ \cdot e^{is_1(k_{xa}, k_{y1}, k_{\eta-})z} e^{is_2(k_{xa}, k_{y1}, k_{\eta-})\zeta} dk_{xa} dk_{y1} dk_{\eta-} \\ \cdot e^{-i(k_{xb}x + k_{\eta+}\eta + k_{y2}y_2)} a_4(k_{xb}, k_{\eta+}, k_{y2}, k) \\ \cdot e^{-is_1(k_{xb}, k_{\eta+}, k_{y2})\zeta} e^{is_2(k_{xb}, k_{\eta+}, k_{y2})z} dk_{xb} dk_{\eta+} dk_{y2} d\eta d\zeta \\ = \frac{1}{(2\pi)^4} \iiint \iiint e^{-i(k_{xa}x + k_{y1}y_1)} e^{-i(k_{xb}x + k_{y2}y_2)} \\ \cdot \delta(k_{\eta-} + k_{\eta+}) \delta(s_2(k_{xa}, k_{y1}, k_{\eta-}) - s_1(k_{xb}, k_{\eta+}, k_{y2})) \\ \cdot a_1(k_{xa}, k_{y1}, k_{\eta-}, k) a_4(k_{xb}, k_{\eta+}, k_{y2}, k) \\ \cdot e^{is_1(k_{xa}, k_{y1}, k_{\eta-})z} e^{is_2(k_{xb}, k_{\eta+}, k_{y2})z} dk_{xa} dk_{xb} dk_{y1} dk_{y2} dk_{\eta-} dk_{\eta+} \\ \cdot \cdot \cdot (3-10)$$

[0134]

Здесь δ означает дельта-функцию. $\delta(k_{\eta-} + k_{\eta+})$ и $\delta(s_2(k_{xa}, k_{y1}, k_{\eta-}) - s_1(k_{xb}, k_{\eta+}, k_{y2}))$ в уравнении (3-10) имеют одинаковые входное и выходное значения в точке S_2 соединения. (3-11) ниже получают преобразованием Фурье уравнения (3-10) по (x, y_1, y_2) , при $z=0$.

[0135]

[Математическое выражение 56]

$$\begin{aligned}
& \tilde{\Psi}_2(k_x, k'_y, k'_z, 0, k) \\
&= \iiint \Psi_2(x, y_1, y_2, z=0, k) e^{ik_x x} e^{ik'_y y_1} e^{ik'_z y_2} dx dy_1 dy_2 \\
&= \frac{1}{(2\pi)} \iiint a_1(k_{x_a}, k'_y, k_\eta, k) a_4(k_{x_b}, -k_\eta, k'_z, k) \\
&\quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} - k_x) \delta(s_2(k_{x_a}, k'_y, k_\eta) - s_1(k_{x_b}, -k_\eta, k'_z)) \\
&\quad \cdot dk_{x_a} dk_{x_b} dk_\eta \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (3-11)
\end{aligned}$$

[0136]

(2) Рассеяние третьего порядка

На фиг. 4 изображен пример применения фундаментальных решений для поля рассеяния, соответствующего рассеянию третьего порядка. Опираясь на фиг. 4, определяются функции поля рассеяния, как показано ниже в (3-12). Нижние индексы 2- и 3-, присвоенные η и ζ , соответствуют точке непосредственно перед S_2 и точке непосредственно перед S_3 , соответственно.

[0137]

[Математическое выражение 57]

$$\begin{aligned}
P_1 \rightarrow S_1 \rightarrow S_{2-} &: \phi_{P_1 S_1 S_{2-}}(x, y_1, \eta_{2-}, z, \zeta_{2-}, k) \\
S_{2-} \rightarrow S_2 \rightarrow S_{3-} &: \phi_{S_{2-} S_2 S_{3-}}(x, \eta_{2-}, \eta_{3-}, \zeta_{2-}, \zeta_{3-}, k) \\
S_{3-} \rightarrow S_3 \rightarrow P_2 &: \phi_{S_{3-} S_3 P_2}(x, \eta_{3-}, y_2, \zeta_{3-}, z, k) \\
&\cdot \cdot \cdot (3-12)
\end{aligned}$$

[0138]

Функции с правой стороны в (3-12) соответствуют общим решениям поля рассеяния для рассеяния первого порядка и являются функциями, показанными ниже в (3-13).

[0139]

[Математическое выражение 58]

$$\begin{aligned}
& \phi_{P_1 S_1 S_2}(x, y_1, \eta_{2-}, z, \zeta_{2-}, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{\eta_{2-}} \eta_{2-})} a_1(k_x, k_{y_1}, k_{\eta_{2-}}, k) \\
&\quad \cdot e^{i s_1(k_x, k_{y_1}, k_{\eta_{2-}}) z} e^{i s_2(k_x, k_{y_1}, k_{\eta_{2-}}) \zeta_{2-}} dk_x dk_{y_1} dk_{\eta_{2-}} \\
& \phi_{S_2 S_2 S_3}(x, \eta_{2-}, \eta_{3-}, \zeta_{2-}, \zeta_{3-}, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{\eta_{2-}} \eta_{2-} + k_{\eta_{3-}} \eta_{3-})} a_2(k_x, k_{\eta_{2-}}, k_{\eta_{3-}}, k) \\
&\quad \cdot e^{-i s_1(k_x, k_{\eta_{2-}}, k_{\eta_{3-}}) \zeta_{2-}} e^{-i s_2(k_x, k_{\eta_{2-}}, k_{\eta_{3-}}) \zeta_{3-}} dk_x dk_{\eta_{2-}} dk_{\eta_{3-}} \\
& \phi_{S_3 S_3 P_2}(x, \eta_{3-}, y_2, \zeta_{3-}, z, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{\eta_{3-}} \eta_{3-} + k_{y_2} y_2)} a_1(k_x, k_{\eta_{3-}}, k_{y_2}, k) \\
&\quad \cdot e^{i s_1(k_x, k_{\eta_{3-}}, k_{y_2}) \zeta_{3-}} e^{i s_2(k_x, k_{\eta_{3-}}, k_{y_2}) z} dk_x dk_{\eta_{3-}} dk_{y_2} \\
& \dots (3 - 1 3)
\end{aligned}$$

[0140]

Композиция вышеприведенных уравнений соответствует пути $P_1 \rightarrow S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_3 \rightarrow P_2$ многократного рассеяния третьего порядка и записывается, как показано ниже в (3-14).

[0141]

[Математическое выражение 59]

$$\begin{aligned}
& \Phi_3(x, y_1, y_2, z, k) \\
&= \phi_{P_1 S_1 S_2}(x, y_1, \eta_{2-}, z, \zeta_{2-}, k) \phi_{S_2 S_2 S_3}(x, \eta_{2-}, \eta_{3-}, \zeta_{2-}, \zeta_{3-}, k) \\
&\quad \cdot \phi_{S_3 S_3 P_2}(x, \eta_{3-}, y_2, \zeta_{3-}, z, k) \\
& \dots (3 - 1 4)
\end{aligned}$$

[0142]

Посредством применения $\eta_{2-} \rightarrow \eta_2$, $\eta_{3-} \rightarrow \eta_3$, $\zeta_{2-} \rightarrow \zeta_2$ и $\zeta_{3-} \rightarrow \zeta_3$ к уравнению (3-14) и выполнения интегрирования по координатам (η_2, ζ_2) и (η_3, ζ_3) в точках S_2 и S_3 получают (3-15).

[0143]

[Математическое выражение 60]

$$\begin{aligned}
& \Psi_3(x, y_1, y_2, z, k) \\
&= \iiint \phi_{P_1 S_1 S_2}(x, y_1, \eta_2, z, \zeta_2, k) \phi_{S_2 S_2 S_3}(x, \eta_2, \eta_3, \zeta_2, \zeta_3, k) \\
&\quad \cdot \phi_{S_3 S_3 P_2}(x, \eta_3, y_2, \zeta_3, z, k) d\eta_2 d\zeta_2 d\eta_3 d\zeta_3 \\
& \dots (3 - 1 5)
\end{aligned}$$

[0144]

Функция, полученная вышеописанным способом, означает амплитуду при рассеянии третьего порядка, наблюдаемую из P_1 и P_2 . Подстановкой (3-13) в (3-15)

получают (3-16). В нижеследующем (3-16), нижнему индексу волнового числа k соответственно присвоены знаки + и -, во избежание путаницы в знаке интеграла.

[0145]

[Математическое выражение 61]

$$\begin{aligned} & \Psi_3(x, y_1, y_2, z, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^9} \iiint \iiint \iiint \iiint \iiint \iiint e^{-i(k_{xa}x + k_{y1}y_1 + k_{\eta_2-}\eta_2)} a_1(k_{xa}, k_{y1}, k_{\eta_2-}, k) \\ & \quad \cdot e^{is_1(k_{xa}, k_{y1}, k_{\eta_2-})z} e^{is_2(k_{xa}, k_{y1}, k_{\eta_2-})\zeta_2} dk_{xa} dk_{y1} dk_{\eta_2-} \\ & \quad \cdot e^{-i(k_{xb}x + k_{\eta_2+}\eta_2 + k_{\eta_3-}\eta_3)} a_2(k_{xb}, k_{\eta_2+}, k_{\eta_3-}, k) \\ & \quad \cdot e^{-is_1(k_{xb}, k_{\eta_2+}, k_{\eta_3-})\zeta_2} e^{-is_2(k_{xb}, k_{\eta_2+}, k_{\eta_3-})\zeta_3} dk_{xb} dk_{\eta_2+} dk_{\eta_3-} \\ & \quad \cdot e^{-i(k_{xc}x + k_{\eta_3+}\eta_3 + k_{y2}y_2)} a_1(k_{xc}, k_{\eta_3+}, k_{y2}, k) \\ & \quad \cdot e^{is_1(k_{xc}, k_{\eta_3+}, k_{y2})\zeta_3} e^{is_2(k_{xc}, k_{\eta_3+}, k_{y2})z} dk_{xc} dk_{\eta_3+} dk_{y2} d\eta_2 d\zeta_2 d\eta_3 d\zeta_3 \\ & \quad \cdot \cdot \cdot (3-16) \end{aligned}$$

[0146]

В теории поля рассеяния существует выражение взаимосвязи, показанное ниже в (3-17).

[0147]

[Математическое выражение 62]

$$\begin{aligned} & s_1(k_{xb}, k_{\eta_{1b}}, k_{\eta_{2b}}) + s_2(k_{xb}, k_{\eta_{1b}}, k_{\eta_{2b}}) = \sqrt{(\sqrt{k^2 - k_{\eta_{1b}}^2} + \sqrt{k^2 - k_{\eta_{2b}}^2})^2 - k_{xb}^2} \\ & \quad \cdot \cdot \cdot (3-17) \end{aligned}$$

[0148]

Посредством выполнения интегрирования по η и ζ в (3-16) получают (3-18).

[0149]

[Математическое выражение 63]

$$\begin{aligned}
& \Psi_3(x, y_1, y_2, z, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^9} \iiint \iiint \iiint \iiint \iiint \iiint e^{-i(k_{xa}x+k_{y1}y_1+k_{\eta_2}z)} a_1(k_{xa}, k_{y1}, k_{\eta_2}, k) \\
&\quad \cdot e^{is_1(k_{xa}, k_{y1}, k_{\eta_2})z} e^{is_2(k_{xa}, k_{y1}, k_{\eta_2})z} dk_{xa} dk_{y1} dk_{\eta_2} \\
&\quad \cdot e^{-i(k_{xb}x+k_{\eta_2}y_2+k_{\eta_3}z)} a_2(k_{xb}, k_{\eta_2}, k_{\eta_3}, k) \\
&\quad \cdot e^{-is_1(k_{xb}, k_{\eta_2}, k_{\eta_3})z} e^{-is_2(k_{xb}, k_{\eta_2}, k_{\eta_3})z} dk_{xb} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
&\quad \cdot e^{-i(k_{xc}x+k_{\eta_3}y_3+k_{y2}y_2)} a_1(k_{xc}, k_{\eta_3}, k_{y2}, k) \\
&\quad \cdot e^{is_1(k_{xc}, k_{\eta_3}, k_{y2})z} e^{is_2(k_{xc}, k_{\eta_3}, k_{y2})z} dk_{xc} dk_{\eta_3} dk_{y2} d\eta_2 d\zeta_2 d\eta_3 d\zeta_3 \\
&= \frac{1}{(2\pi)^5} \iiint \iiint \iiint \iiint e^{-i(k_{xa}x+k_{y1}y_1)} e^{-i(k_{xb}x)} e^{-i(k_{xc}x+k_{y2}y_2)} \\
&\quad \cdot a_1(k_{xa}, k_{y1}, k_{\eta_2}, k) a_2(k_{xb}, k_{\eta_2}, k_{\eta_3}, k) a_1(k_{xc}, k_{\eta_3}, k_{y2}, k) \\
&\quad \cdot \delta(k_{\eta_2} + k_{\eta_3}) \delta(k_{\eta_3} + k_{\eta_3}) \\
&\quad \cdot \delta(s_1(k_{xb}, k_{\eta_2}, k_{\eta_3}) - s_2(k_{xa}, k_{y1}, k_{\eta_2})) \\
&\quad \cdot \delta(s_2(k_{xb}, k_{\eta_2}, k_{\eta_3}) - s_1(k_{xc}, k_{\eta_3}, k_{y2})) \\
&\quad \cdot e^{is_1(k_{xa}, k_{y1}, k_{\eta_2})z} e^{is_2(k_{xc}, k_{\eta_3}, k_{y2})z} dk_{xa} dk_{xb} dk_{xc} dk_{y1} dk_{y2} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} dk_{\eta_3} dk_{\eta_3} \\
&= \frac{1}{(2\pi)^5} \iiint \iiint \iiint \iiint e^{-i(k_{xa}x+k_{y1}y_1)} e^{-i(k_{xb}x)} e^{-i(k_{xc}x+k_{y2}y_2)} \\
&\quad \cdot a_1(k_{xa}, k_{y1}, -k_{\eta_2}, k) a_2(k_{xb}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) a_1(k_{xc}, k_{\eta_3}, k_{y2}, k) \\
&\quad \cdot \delta(s_1(k_{xb}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{xa}, k_{y1}, -k_{\eta_2})) \\
&\quad \cdot \delta(s_2(k_{xb}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{xc}, k_{\eta_3}, k_{y2})) \\
&\quad \cdot e^{is_1(k_{xa}, k_{y1}, -k_{\eta_2})z} e^{is_2(k_{xc}, k_{\eta_3}, k_{y2})z} dk_{xa} dk_{xb} dk_{xc} dk_{y1} dk_{y2} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (3-18)
\end{aligned}$$

[0150]

Здесь δ означает дельта-функцию, которая соответствует тому, что входное и выходное значения согласуются в точке соединения. Нижеприведенное (3-19) получают преобразованием Фурье уравнения (3-18) по (x, y_1, y_2) , при $z=0$.

[0151]

[Математическое выражение 64]

$$\begin{aligned}
& \tilde{\Psi}_3(k_x, k'_{y1}, k'_{y2}, 0, k) \\
&= \iiint \Psi_3(x, y_1, y_2, z=0, k) e^{ik_x x} e^{ik'_{y1} y_1} e^{ik'_{y2} y_2} dx dy_1 dy_2 \\
&= \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint a_1(k_{xa}, k'_{y1}, -k_{\eta_2}, k) a_2(k_{xb}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) a_1(k_{xc}, k_{\eta_3}, k'_{y2}, k) \\
&\quad \cdot \delta(k_{xa} + k_{xb} + k_{xc} - k_x) \delta(s_1(k_{xb}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{xa}, k'_{y1}, -k_{\eta_2})) \\
&\quad \cdot \delta(s_2(k_{xb}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{xc}, k_{\eta_3}, k'_{y2})) dk_{xa} dk_{xb} dk_{xc} dk_{y1} dk_{y2} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (3-19)
\end{aligned}$$

[0152]

Функция поля рассеяния, $\Psi(x, y_1, y_2, z, k)$, записывается, как показано ниже в (3-20), когда учитывается многократное рассеяние.

[0153]

[Математическое выражение 65]

$$\begin{aligned} \Psi(x, y_1, y_2, z, k) &= \Psi_1(x, y_1, y_2, z, k) \\ &+ \Psi_2(x, y_1, y_2, z, k) \\ &+ \Psi_3(x, y_1, y_2, z, k) \\ &+ \dots \\ &\dots (3-20) \end{aligned}$$

[0154]

Здесь Ψ_1 является функцией поля рассеяния, соответствующей рассеянию первого порядка, Ψ_2 является функцией поля рассеяния, соответствующей рассеянию второго порядка, и Ψ_3 является функцией поля рассеяния, соответствующей рассеянию третьего порядка. На основании уравнения (2-11) и подобных уравнений, следующее уравнение (3-21) является верным.

[0155]

[Математическое выражение 66]

$$\begin{aligned} &\Psi_1(x, y_1, y_2, 0, k) \\ &= \phi_1(x, y_1, y_2, 0, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} \alpha_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\ &\dots (3-21) \end{aligned}$$

[0156]

Например, если можно пренебречь вторым членом и четвертым и последующими членами с правой стороны в уравнении (3-20), то приведенное ниже (3-22) можно получить преобразованием Фурье всего уравнения (3-20).

[0157]

[Математическое выражение 67]

$$\begin{aligned} \tilde{\Psi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, 0, k) &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} \\ &\cdot \{ \Psi_1(x, y_1, y_2, 0, k) + \Psi_3(x, y_1, y_2, 0, k) \} dx dy_1 dy_2 \\ &= \alpha_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\ &+ \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint \alpha_1(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) \alpha_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) \\ &\cdot \alpha_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \\ &\cdot \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\ &\cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) \\ &\cdot dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\ &\dots (3-22) \end{aligned}$$

[0158]

С использованием данных измерения, $\Phi_1(k)$, при $z=0$, левую сторону уравнения (3-22) можно записать, как показано ниже в (3-23).

[0159]

[Математическое выражение 68]

$$\tilde{\Psi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, 0, k) = \Phi_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\ \cdot \cdot \cdot (3 - 23)$$

[0160]

Правая сторона уравнения (3-23) представляет собой данные измерения на граничной поверхности. Соответственно, определяется левая сторона уравнения (3-22). Следовательно, уравнение (3-22) является обычным нелинейным интегральным уравнением относительно $a_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$ и $a_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$.

[0161]

Аналогичное уравнение может быть получено на другой граничной поверхности, заданной как $z=h$. Хотя данное интегральное уравнение является нелинейным, решение интегрального уравнения можно очень легко найти с использованием разложения в ряд Неймана. Обратную задачу рассеяния можно решать, как если бы она была задачей рассеяния в прямом направлении.

[0162]

<III-4 Базовое уравнение обратной задачи рассеяния с использованием всех рассмотренных моделей>

На фиг. 7 показаны четыре типа моделей рассеяния, относящихся к рассеянию третьего порядка. В частности, D_1 , D_2 , D_3 и D_4 на фиг. 7 соответствуют четырем типам моделей рассеяния, относящихся к рассеянию третьего порядка. Модель рассеяния можно также назвать диаграммой рассеяния. На фиг. 7, области, к которым применяются фундаментальные решения E_1 - E_4 , указаны пунктирными линиями. Нижеследующие (3-24), (3-25), (3-26), (3-27) и (3-28) означают функции полей рассеяния D_1 - D_4 .

[0163]

[Математическое выражение 69]

$$P_1 \rightarrow S_1 \rightarrow S_{2-} : \phi_{P_1 S_1 S_{2-}}(x, y_1, \eta_{2-}, z, \zeta_{2-}, k) \\ S_{2-} \rightarrow S_2 \rightarrow S_{3-} : \phi_{S_{2-} S_2 S_{3-}}(x, \eta_{2-}, \eta_{3-}, \zeta_{2-}, \zeta_{3-}, k) \\ S_{3-} \rightarrow S_3 \rightarrow P_2 : \phi_{S_{3-} S_3 P_2}(x, \eta_{3-}, y_2, \zeta_{3-}, z, k) \\ \cdot \cdot \cdot (3 - 24)$$

[0164]

[Математическое выражение 70]

[D1]

$$\begin{aligned}
& \phi_{\eta_1, \delta_1, \delta_2}(x, y_1, \eta_{2-}, z, \zeta_{2-}, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{\eta_{2-}} \eta_{2-})} a_1(k_x, k_{y_1}, k_{\eta_{2-}}, k) \\
&\quad \cdot e^{i s_1(k_x, k_{y_1}, k_{\eta_{2-}})z} e^{i s_2(k_x, k_{y_1}, k_{\eta_{2-}}) \zeta_{2-}} dk_x dk_{y_1} dk_{\eta_{2-}} \\
& \phi_{\delta_2, \delta_2, \delta_3}(x, \eta_{2-}, \eta_{3-}, \zeta_{2-}, \zeta_{3-}, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{\eta_{2-}} \eta_{2-} + k_{\eta_{3-}} \eta_{3-})} a_2(k_x, k_{\eta_{2-}}, k_{\eta_{3-}}, k) \\
&\quad \cdot e^{-i s_1(k_x, k_{\eta_{2-}}, k_{\eta_{3-}}) \zeta_{2-}} e^{-i s_2(k_x, k_{\eta_{2-}}, k_{\eta_{3-}}) \zeta_{3-}} dk_x dk_{\eta_{2-}} dk_{\eta_{3-}} \\
& \phi_{\delta_1, \delta_3, \delta_2}(x, \eta_{3-}, y_2, \zeta_{3-}, z, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{\eta_{3-}} \eta_{3-} + k_{y_2} y_2)} a_1(k_x, k_{\eta_{3-}}, k_{y_2}, k) \\
&\quad \cdot e^{i s_1(k_x, k_{\eta_{3-}}, k_{y_2}) \zeta_{3-}} e^{i s_2(k_x, k_{\eta_{3-}}, k_{y_2}) z} dk_x dk_{\eta_{3-}} dk_{y_2} \\
& \dots (3-25)
\end{aligned}$$

[0165]

[Математическое выражение 71]

[D2]

$$\begin{aligned}
& \phi_{\eta_1, \delta_1, \delta_2}(x, y_1, \eta_{2-}, z, \zeta_{2-}, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{\eta_{2-}} \eta_{2-})} a_3(k_x, k_{y_1}, k_{\eta_{2-}}, k) \\
&\quad \cdot e^{i s_1(k_x, k_{y_1}, k_{\eta_{2-}})z} e^{-i s_2(k_x, k_{y_1}, k_{\eta_{2-}}) \zeta_{2-}} dk_x dk_{y_1} dk_{\eta_{2-}} \\
& \phi_{\delta_2, \delta_2, \delta_3}(x, \eta_{2-}, \eta_{3-}, \zeta_{2-}, \zeta_{3-}, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{\eta_{2-}} \eta_{2-} + k_{\eta_{3-}} \eta_{3-})} a_1(k_x, k_{\eta_{2-}}, k_{\eta_{3-}}, k) \\
&\quad \cdot e^{i s_1(k_x, k_{\eta_{2-}}, k_{\eta_{3-}}) \zeta_{2-}} e^{i s_2(k_x, k_{\eta_{2-}}, k_{\eta_{3-}}) \zeta_{3-}} dk_x dk_{\eta_{2-}} dk_{\eta_{3-}} \\
& \phi_{\delta_1, \delta_3, \delta_2}(x, \eta_{3-}, y_2, \zeta_{3-}, z, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{\eta_{3-}} \eta_{3-} + k_{y_2} y_2)} a_4(k_x, k_{\eta_{3-}}, k_{y_2}, k) \\
&\quad \cdot e^{-i s_1(k_x, k_{\eta_{3-}}, k_{y_2}) \zeta_{3-}} e^{i s_2(k_x, k_{\eta_{3-}}, k_{y_2}) z} dk_x dk_{\eta_{3-}} dk_{y_2} \\
& \dots (3-26)
\end{aligned}$$

[0166]

[Математическое выражение 72]

[D3]

$$\begin{aligned}
& \phi_{P_1 S_1 S_2}(x, y_1, \eta_{2-}, z, \zeta_{2-}, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{\eta_{2-}} \eta_{2-})} a_1(k_x, k_{y_1}, k_{\eta_{2-}}, k) \\
&\quad \cdot e^{i s_1(k_x, k_{y_1}, k_{\eta_{2-}})z} e^{i s_2(k_x, k_{y_1}, k_{\eta_{2-}})\zeta_{2-}} dk_x dk_{y_1} dk_{\eta_{2-}} \\
& \phi_{S_2 S_2 S_3}(x, \eta_{2-}, \eta_{3-}, \zeta_{2-}, \zeta_{3-}, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{\eta_{2-}} \eta_{2-} + k_{\eta_{3-}} \eta_{3-})} a_4(k_x, k_{\eta_{2-}}, k_{\eta_{3-}}, k) \\
&\quad \cdot e^{i s_1(k_x, k_{\eta_{2-}}, k_{\eta_{3-}})\zeta_{2-}} e^{i s_2(k_x, k_{\eta_{2-}}, k_{\eta_{3-}})\zeta_{3-}} dk_x dk_{\eta_{2-}} dk_{\eta_{3-}} \\
& \phi_{S_2 S_3 P_2}(x, \eta_{3-}, y_2, \zeta_{3-}, z, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{\eta_{3-}} \eta_{3-} + k_{y_2} y_2)} a_4(k_x, k_{\eta_{3-}}, k_{y_2}, k) \\
&\quad \cdot e^{-i s_1(k_x, k_{\eta_{3-}}, k_{y_2})\zeta_{3-}} e^{i s_2(k_x, k_{\eta_{3-}}, k_{y_2})z} dk_x dk_{\eta_{3-}} dk_{y_2} \\
& \dots (3 - 27)
\end{aligned}$$

[0167]

[Математическое выражение 73]

[D4]

$$\begin{aligned}
& \phi_{P_1 S_1 S_2}(x, y_1, \eta_{2-}, z, \zeta_{2-}, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{\eta_{2-}} \eta_{2-})} a_3(k_x, k_{y_1}, k_{\eta_{2-}}, k) \\
&\quad \cdot e^{i s_1(k_x, k_{y_1}, k_{\eta_{2-}})z} e^{-i s_2(k_x, k_{y_1}, k_{\eta_{2-}})\zeta_{2-}} dk_x dk_{y_1} dk_{\eta_{2-}} \\
& \phi_{S_2 S_2 S_3}(x, \eta_{2-}, \eta_{3-}, \zeta_{2-}, \zeta_{3-}, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{\eta_{2-}} \eta_{2-} + k_{\eta_{3-}} \eta_{3-})} a_3(k_x, k_{\eta_{2-}}, k_{\eta_{3-}}, k) \\
&\quad \cdot e^{i s_1(k_x, k_{\eta_{2-}}, k_{\eta_{3-}})\zeta_{2-}} e^{-i s_2(k_x, k_{\eta_{2-}}, k_{\eta_{3-}})\zeta_{3-}} dk_x dk_{\eta_{2-}} dk_{\eta_{3-}} \\
& \phi_{S_2 S_3 P_2}(x, \eta_{3-}, y_2, \zeta_{3-}, z, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{\eta_{3-}} \eta_{3-} + k_{y_2} y_2)} a_1(k_x, k_{\eta_{3-}}, k_{y_2}, k) \\
&\quad \cdot e^{i s_1(k_x, k_{\eta_{3-}}, k_{y_2})\zeta_{3-}} e^{i s_2(k_x, k_{\eta_{3-}}, k_{y_2})z} dk_x dk_{\eta_{3-}} dk_{y_2} \\
& \dots (3 - 28)
\end{aligned}$$

[0168]

В вышеприведенных уравнениях, (η_{2-}, ζ_{2-}) и (η_{3-}, ζ_{3-}) означают координаты точки непосредственно перед точкой S_2 и точки непосредственно перед точкой S_3 , соответственно.

[0169]

Композиция вышеприведенных функций соответствует пути $P_1 \rightarrow S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_3 \rightarrow P_2$ многократного рассеяния третьего порядка и записывается, как показано ниже в (3-29).

[0170]

[Математическое выражение 74]

$$\begin{aligned} & \Phi_3(x, y_1, y_2, z, k) \\ &= \phi_{\eta_1 S_1 S_2}(x, y_1, \eta_{2-}, z, \zeta_{2-}, k) \phi_{S_2 S_3 S_4}(x, \eta_{2-}, \eta_{3-}, \zeta_{2-}, \zeta_{3-}, k) \\ & \quad \cdot \phi_{S_3 S_3 P_2}(x, \eta_{3-}, y_2, \zeta_{3-}, z, k) \\ & \quad \cdot \cdot \cdot (3-29) \end{aligned}$$

[0171]

Посредством применения $\eta_{2-} \rightarrow \eta_2$, $\eta_{3-} \rightarrow \eta_3$, $\zeta_{2-} \rightarrow \zeta_2$ и $\zeta_{3-} \rightarrow \zeta_3$ к уравнению (3-29) и выполнения интегрирования по координатам (η_2, ζ_2) и (η_3, ζ_3) в точках S_2 и S_3 получают (3-30).

[0172]

[Математическое выражение 75]

$$\begin{aligned} & \Psi_3(x, y_1, y_2, z, k) \\ &= \iiint \phi_{\eta_1 S_1 S_2}(x, y_1, \eta_2, z, \zeta_2, k) \phi_{S_2 S_2 S_3}(x, \eta_2, \eta_3, \zeta_2, \zeta_3, k) \\ & \quad \cdot \phi_{S_3 S_3 P_2}(x, \eta_3, y_2, \zeta_3, z, k) d\eta_2 d\zeta_2 d\eta_3 d\zeta_3 \\ & \quad \cdot \cdot \cdot (3-30) \end{aligned}$$

[0173]

Посредством выполнения интегрирования по (η_2, ζ_2) и (η_3, ζ_3) в (3-30) и преобразования Фурье результатов по (x, y_1, y_2) , при $z=0$, получают нижеследующие (3-31), (3-32), (3-33) и (3-34).

[0174]

[Математическое выражение 76]

[D1]

$$\begin{aligned} & \tilde{\Psi}_3(k_x, k'_{y_1}, k'_{y_2}, 0, k) \\ &= \iiint \Psi_3(x, y_1, y_2, z=0, k) e^{ik_x x} e^{ik'_{y_1} y_1} e^{ik'_{y_2} y_2} dx dy_1 dy_2 \\ &= \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint a_1(k_{xa}, k'_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) a_2(k_{xb}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) a_1(k_{xc}, k_{\eta_3}, k'_{y_2}, k) \\ & \quad \cdot \delta(k_{xa} + k_{xb} + k_{xc} - k_x) \delta(s_1(k_{xb}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{xa}, k'_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\ & \quad \cdot \delta(s_2(k_{xb}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{xc}, k_{\eta_3}, k'_{y_2})) dk_{xa} dk_{xb} dk_{xc} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\ & \quad \cdot \cdot \cdot (3-31) \end{aligned}$$

[0175]

[Математическое выражение 77]

[D2]

$$\begin{aligned}
& \tilde{\Psi}_3(k_x, k'_{y_1}, k'_{y_2}, 0, k) \\
&= \iiint \Psi_3(x, y_1, y_2, z=0, k) e^{ik_x x} e^{ik'_{y_1} y_1} e^{ik'_{y_2} y_2} dx dy_1 dy_2 \\
&= \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint a_3(k_{xa}, k'_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) a_1(k_{xb}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) a_4(k_{xc}, k_{\eta_3}, k'_{y_2}, k) \\
&\quad \cdot \delta(k_{xa} + k_{xb} + k_{xc} - k_x) \delta(s_1(k_{xb}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{xa}, k'_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
&\quad \cdot \delta(s_2(k_{xb}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{xc}, k_{\eta_3}, k'_{y_2})) dk_{xa} dk_{xb} dk_{xc} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (3-32)
\end{aligned}$$

[0176]

[Математическое выражение 78]

[D3]

$$\begin{aligned}
& \tilde{\Psi}_3(k_x, k'_{y_1}, k'_{y_2}, 0, k) \\
&= \iiint \Psi_3(x, y_1, y_2, z=0, k) e^{ik_x x} e^{ik'_{y_1} y_1} e^{ik'_{y_2} y_2} dx dy_1 dy_2 \\
&= \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint a_1(k_{xa}, k'_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) a_4(k_{xb}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) a_4(k_{xc}, k_{\eta_3}, k'_{y_2}, k) \\
&\quad \cdot \delta(k_{xa} + k_{xb} + k_{xc} - k_x) \delta(s_1(k_{xb}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{xa}, k'_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
&\quad \cdot \delta(s_2(k_{xb}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{xc}, k_{\eta_3}, k'_{y_2})) dk_{xa} dk_{xb} dk_{xc} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (3-33)
\end{aligned}$$

[0177]

[Математическое выражение 79]

[D4]

$$\begin{aligned}
& \tilde{\Psi}_3(k_x, k'_{y_1}, k'_{y_2}, 0, k) \\
&= \iiint \Psi_3(x, y_1, y_2, z=0, k) e^{ik_x x} e^{ik'_{y_1} y_1} e^{ik'_{y_2} y_2} dx dy_1 dy_2 \\
&= \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint a_3(k_{xa}, k'_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) a_3(k_{xb}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) a_1(k_{xc}, k_{\eta_3}, k'_{y_2}, k) \\
&\quad \cdot \delta(k_{xa} + k_{xb} + k_{xc} - k_x) \delta(s_1(k_{xb}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{xa}, k'_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
&\quad \cdot \delta(s_2(k_{xb}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{xc}, k_{\eta_3}, k'_{y_2})) dk_{xa} dk_{xb} dk_{xc} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (3-34)
\end{aligned}$$

[0178]

<III-5 Интегральное уравнение обратной задачи рассеяния при многократном рассеянии>

Функция поля рассеяния, $\Psi(x, y_1, y_2, z, k)$, записывается, как показано ниже в (3-35), когда учитывается многократное рассеяние.

[0179]

[Математическое выражение 80]

$$\begin{aligned} & \Psi(x, y_1, y_2, z, k) \\ &= \Psi_1(x, y_1, y_2, z, k) + \Psi_2(x, y_1, y_2, z, k) + \Psi_3(x, y_1, y_2, z, k) + \dots \\ & \dots (3-35) \end{aligned}$$

[0180]

Посредством преобразования Фурье всего уравнения (3-35), при $z=0$, получают нижеследующие (3-36) и (3-37).

[0181]

[Математическое выражение 81]

$$\begin{aligned} & \tilde{\Psi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, 0, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} \\ & \quad \cdot \{ \Psi_1(x, y_1, y_2, 0, k) + \Psi_2(x, y_1, y_2, 0, k) + \Psi_3(x, y_1, y_2, 0, k) + \dots \} \\ & \quad \cdot dx dy_1 dy_2 \\ & \dots (3-36) \end{aligned}$$

[0182]

[Математическое выражение 82]

$$\begin{aligned}
& \tilde{\Psi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, 0, k) \\
& = a_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
& + \frac{1}{(2\pi)} \iiint a_1(k_{x_a}, k'_{y_1}, k_\eta, k) a_4(k_{x_b}, -k_\eta, k_{y_2}, k) \delta(k_{x_a} + k_{x_b} - k_x) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, k_\eta) - s_1(k_{x_b}, -k_\eta, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_\eta \\
& + \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint a_1(k_{x_a}, k'_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) a_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) a_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
& + \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint a_3(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) a_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) a_4(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
& + \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint a_1(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) a_4(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) a_4(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
& + \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint a_3(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) a_3(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) a_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
& + O(a^4) \\
& \dots (3-37)
\end{aligned}$$

[0183]

Здесь

[0184]

[Математическое выражение 83]

$$\tilde{\Psi}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, 0, k)$$

является значением, измеренным мультистатическим радаром, при $z=0$. Соответственно, (3-37) является интегральным уравнением относительно $a_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$, $a_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$, $a_3(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$, и $a_4(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$.

[0185]

Для решения интегрального уравнения, включающего в себя члены многократного рассеяния, применяются измеренные значения в двух плоскостях $z=\text{const}$. Данное интегральное уравнение очень легко решать на основе измеренных значений. Результат получают в форме ряда Неймана. Следует отметить, что член $O(a^4)$ в уравнении (3-37) является членом, соответствующим рассеянию четвертого порядка или более высокого

порядка, и может быть отброшен.

[0186]

<III-6 Решение интегрального уравнения обратной задачи рассеяния при многократном рассеянии>

На фиг. 8 показаны описания четырех типов данных измерения. Иначе говоря, четыре типа данных измерения методом мультистатической томографии в рассеянном излучении определяются, как показано на фиг. 8. На основании (3-31), (3-32), (3-33), (3-34) и подобных уравнений, следующие уравнения (3-38) являются верными.

[0187]

[Математическое выражение 84]

$$\begin{aligned}\Phi_{11}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) &= \tilde{\Psi}_{11}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, 0, k) \\ \Phi_{22}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) &= \tilde{\Psi}_{22}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, h, k) \\ \Phi_{12}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) &= \tilde{\Psi}_{12}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, h, k) \\ \Phi_{21}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) &= \tilde{\Psi}_{21}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, 0, k) \\ &\dots (3-38)\end{aligned}$$

[0188]

Правые стороны четырех уравнений в (3-38) выражают четыре типа функций, полученных преобразованием Фурье четырех типов функции поля рассеяния для многократного рассеяния, соответствующего четырем типам способов измерения.

[0189]

Уравнение (3-37) приводит к $a_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$, когда многократное рассеяние не учитывается. В дальнейшем, каждому решению, в котором многократное рассеяние не учитывается, присваивается нижний индекс «0». Такие результаты, как (3-39), получают в соответствии с четырьмя типами данных измерения на фиг. 8.

[0190]

[Математическое выражение 85]

$$\begin{aligned}a_{1,0}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) &= \Phi_{11}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\ a_{2,0}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) &= \Phi_{22}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\ a_{3,0}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) &= \Phi_{12}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\ a_{4,0}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) &= \Phi_{21}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\ &\dots (3-39)\end{aligned}$$

[0191]

Посредством разложения a_1 , a_2 , a_3 и a_4 в ряд, соответствующий порядкам рассеяния, получают нижеследующие уравнения (3-40). Следует отметить, что каждой из a_1 , a_2 , a_3 и a_4 присвоен нижний индекс, относящийся к порядку рассеяния.

[0192]

[Математическое выражение 86]

$$\begin{aligned}
& a_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
&= \Phi_{11}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) + a_{1,1}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) + a_{1,2}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) + \dots \\
& a_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
&= \Phi_{22}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) + a_{2,1}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) + a_{2,2}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) + \dots \\
& a_3(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
&= \Phi_{12}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) + a_{3,1}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) + a_{3,2}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) + \dots \\
& a_4(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
&= \Phi_{21}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) + a_{4,1}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) + a_{4,2}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) + \dots \\
& \dots (3-40)
\end{aligned}$$

[0193]

Путем подстановки данных измерения, выраженных посредством (3-38), в (3-37) можно получить нижеследующее уравнение (3-41).

[0194]

[Математическое выражение 87]

$$\begin{aligned}
& \Phi_{11}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
& = a_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
& + \frac{1}{(2\pi)} \iiint a_1(k_{x_a}, k_{y_1}, k_{\eta}, k) a_4(k_{x_b}, -k_{\eta}, k_{y_2}, k) \delta(k_{x_a} + k_{x_b} - k_x) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, k_{\eta}) - s_1(k_{x_b}, -k_{\eta}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{\eta} \\
& + \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint a_1(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) a_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) a_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
& + \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint a_3(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) a_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) a_4(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
& + \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint a_1(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) a_4(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) a_4(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
& + \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint a_3(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) a_3(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) a_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
& + O(a^4) \\
& \cdot \cdot \cdot (3 - 4 1)
\end{aligned}$$

[0195]

Исходя из данного уравнения (3-41), можно выразить $a_{1,1}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$, соответствующую рассеянию второго порядка, с использованием данных измерения. Аналогичные уравнения получают также для других $a_{2,1}$, $a_{3,1}$, $a_{4,1}$.

[0196]

Путем подстановки (3-40) в (3-41) и оставления только члена 0-го порядка в знаке интеграла получают (3-42).

[0197]

[Математическое выражение 88]

$$\begin{aligned}
& a_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
& = \Phi_{11}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
& - \frac{1}{(2\pi)} \iiint \Phi_{11}(k_{x_a}, k_{y_1}, k_{\eta}, k) \Phi_{21}(k_{x_b}, -k_{\eta}, k_{y_2}, k) \delta(k_{x_a} + k_{x_b} - k_x) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, k_{\eta}) - s_1(k_{x_b}, -k_{\eta}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{\eta} \\
& - \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint \Phi_{11}(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) \Phi_{22}(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) \Phi_{11}(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
& - \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint \Phi_{12}(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) \Phi_{11}(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) \Phi_{21}(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
& - \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint \Phi_{11}(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) \Phi_{21}(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) \Phi_{21}(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
& - \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint \Phi_{12}(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) \Phi_{12}(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) \Phi_{11}(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
& + \dots \\
& \cdot \cdot \cdot (3 - 4 2)
\end{aligned}$$

[0198]

Запись «+...» в (3-42) соответствует рассеянию четвертого или более высокого порядков, которые можно отбросить. Путем преобразования (3-42) получают нижеприведенное (3-43).

[0199]

[Математическое выражение 89]

$$\begin{aligned}
& \alpha_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
& = \Phi_{11}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
& - \frac{1}{(2\pi)} \iiint \Phi_{11}(k_{x_a}, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \Phi_{21}(k_{x_b}, -k_{y_1}, k_{y_2}, k) \delta(k_{x_a} + k_{x_b} - k_x) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, k_{y_2}) - s_1(k_{x_b}, -k_{y_1}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{y_1} \\
& - \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint \left\{ \Phi_{11}(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{y_2}, k) \Phi_{22}(k_{x_b}, k_{y_2}, -k_{y_3}, k) \Phi_{11}(k_{x_c}, k_{y_3}, k_{y_2}, k) \right. \\
& \quad + \Phi_{12}(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{y_2}, k) \Phi_{11}(k_{x_b}, k_{y_2}, -k_{y_3}, k) \Phi_{21}(k_{x_c}, k_{y_3}, k_{y_2}, k) \\
& \quad + \Phi_{11}(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{y_2}, k) \Phi_{21}(k_{x_b}, k_{y_2}, -k_{y_3}, k) \Phi_{21}(k_{x_c}, k_{y_3}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \left. + \Phi_{12}(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{y_2}, k) \Phi_{12}(k_{x_b}, k_{y_2}, -k_{y_3}, k) \Phi_{11}(k_{x_c}, k_{y_3}, k_{y_2}, k) \right\} \\
& \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{y_2}, -k_{y_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{y_2})) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{y_2}, -k_{y_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{y_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{y_2} dk_{y_3} \\
& \quad \cdot \cdot \cdot (3 - 4 3)
\end{aligned}$$

[0200]

В уравнении (3-43), a_1 соответствует рассеянию первого порядка, рассеянию второго порядка и рассеянию третьего порядка. В частности, a_1 получают исключением эффектов рассеяния второго порядка и рассеяния третьего порядка из данных измерения. Такую же процедуру можно применить, чтобы вывести a_1 , соответствующую рассеянию более высоких порядков. Вместе с тем, с помощью такой же процедуры можно также вывести a_2 , a_3 и a_4 . Общее решение уравнения поля рассеяния записывается, как показано ниже в (3-44), с использованием a_1 .

[0201]

[Математическое выражение 90]

$$\begin{aligned}
& \phi_1(x, y_1, y_2, z_1, z_2, k) \\
& = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} a_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot e^{i s_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}) z_1} e^{i s_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}) z_2} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \\
& \quad \cdot \cdot \cdot (3 - 4 4)
\end{aligned}$$

[0202]

Функция формирования изображения $\rho(x, y, z)$ записывается, как показано ниже в (3-45), с использованием Φ_1 в вышеприведенном (3-44).

[0203]

[Математическое выражение 91]

$$\begin{aligned}
& \rho(x, y, z) = \lim_{t \rightarrow 0} \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \phi_1(x, y, y, z, k) e^{-ickt} dk \right] \\
& \quad \cdot \cdot \cdot (3 - 4 5)
\end{aligned}$$

[0204]

Функция формирования изображения является функцией, из которой исключены эффекты многократного рассеяния, и которая дает в явном виде решение обратной задачи рассеяния в нелинейном случае.

[0205]

Уравнение (3-41) можно обобщить, как показано ниже в (3-46). Затем уравнение (3-46) можно применять как уравнение (3-41).

[0206]

[Математическое выражение 92]

$$\begin{aligned} \Phi_{ij} = & a_{m_1} \\ & + \frac{1}{(2\pi)^1} \int f_2 [a_{m_1} a_{m_2}] d\mathbf{k}_{f_2} \\ & + \frac{1}{(2\pi)^2} \int f_3 [a_{m_1} a_{m_2} a_{m_3}] d\mathbf{k}_{f_3} \\ & + \dots \\ & + \frac{1}{(2\pi)^{L-1}} \int f_L [a_{m_1} a_{m_2} a_{m_3} \dots a_{m_L}] d\mathbf{k}_{f_L} \\ & \dots (3-46) \end{aligned}$$

[0207]

Здесь a_1, a_2, a_3 и a_4 , выраженные через $a_{m_1}, a_{m_2}, a_{m_3}, \dots, a_{m_L}$, соответствуют $a(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k)$ в аналитическом решении, соответствующем четырем состояниям рассеяния. Кроме того, f_2, f_3, \dots, f_L являются произведениями 2, 3, ..., L переменных в квадратных скобках, соответствующих 2, 3, ..., L рассеяниям, соответственно.

[0208]

Кроме того,

[0209]

[Математическое выражение 93]

$$\mathbf{k}_{f_2}, \mathbf{k}_{f_3}, \dots, \mathbf{k}_{f_L}$$

обозначают волновые вектора, соответствующие координатным переменным, включенным в 2, 3, ..., L переменных в квадратных скобках при f_2, f_3, \dots, f_L .

[0210]

Вместе с тем, уравнение (3-42) можно обобщить, как показано ниже в (3-47), и (3-47) можно применять как (3-42).

[0211]

[Математическое выражение 94]

$$\begin{aligned}
a_m &= \Phi_{ij} \\
m=1,2,3,4 \quad ij=1,2 \\
& - \frac{1}{(2\pi)^1} \int g_2 \left[\Phi_{m_1 n_1} \Phi_{m_2 n_2} \right] d\mathbf{k}_{g_2} \\
& \quad \quad \quad \begin{matrix} m_1, n_1=1,2 \\ m_2, n_2=1,2 \end{matrix} \\
& - \frac{1}{(2\pi)^2} \int g_3 \left[\Phi_{m_1 n_1} \Phi_{m_2 n_2} \Phi_{m_3 n_3} \right] d\mathbf{k}_{g_3} \\
& \quad \quad \quad \begin{matrix} m_1, n_1=1,2 \\ m_2, n_2=1,2 \\ m_3, n_3=1,2 \end{matrix} \\
& \dots \\
& - \frac{1}{(2\pi)^{L-1}} \int g_L \left[\Phi_{m_1 n_1} \Phi_{m_2 n_2} \Phi_{m_3 n_3} \dots \Phi_{m_L n_L} \right] d\mathbf{k}_{g_L} \\
& \quad \quad \quad \begin{matrix} m_1, n_1=1,2 \\ m_2, n_2=1,2 \\ m_3, n_3=1,2 \\ \dots \\ m_L, n_L=1,2 \end{matrix} \\
& \dots (3-47)
\end{aligned}$$

[0212]

Здесь a_1, a_2, a_3 и a_4 , выраженные через a_m , соответствуют $a(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k)$ в аналитическом решении, соответствующем четырем состояниям рассеяния. Кроме того, $\Phi_{11}, \Phi_{12}, \Phi_{21}$ и Φ_{22} , выраженные через $\Phi_{m_1 n_1}, \Phi_{m_2 n_2}, \Phi_{m_3 n_3}, \dots, \Phi_{m_L n_L}$, соответствуют данным измерения для четырех состояний рассеяния. Кроме того, g_2, g_3, \dots, g_L являются произведениями 2, 3, ..., L переменных в квадратных скобках, соответствующих 2, 3, ..., L рассеяниям, имевшим место от излучения волны до приема волны, соответственно.

[0213]

Кроме того,

[0214]

[Математическое выражение 95]

$$\mathbf{k}_{g_2}, \mathbf{k}_{g_3}, \dots, \mathbf{k}_{g_L}$$

обозначают волновые вектора, соответствующие координатным переменным, включенным в 2, 3, ..., L переменных в квадратных скобках при g_2, g_3, \dots, g_L .

[0215]

Функцию поля рассеяния можно обобщить, как показано ниже в (3-48).

[0216]

[Математическое выражение 96]

$$\begin{aligned}
& \phi_m(x, y_1, y_2, z_1, z_2, k) \\
& = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y1} y_1 + k_{y2} y_2)} a_m(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k) \\
& \quad \quad \quad \cdot e^{i s_1(k_x, k_{y1}, k_{y2}) z_1} e^{i s_2(k_x, k_{y1}, k_{y2}) z_2} dk_x dk_{y1} dk_{y2}
\end{aligned}$$

 $m = 1, 2, 3, 4$ $\dots (3-48)$

[0217]

Функцию формирования изображения можно обобщить, как показано ниже в (3-49).

[0218]

[Математическое выражение 97]

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

• • • (3 - 49)

[0219]

<IV Конфигурация и работа устройства формирования изображения>

На основании вышеприведенного описания, далее будут описаны конфигурация и работа устройства формирования изображения, которое использует волны, чтобы визуализировать трехмерную структуру каждого рассеивающего элемента, включенного в объект в области.

[0220]

Здесь волны являются, например, радиоволнами, и могут быть микроволнами, миллиметровыми волнами, терагерцовыми волнами и т.п. Вместе с тем, можно применять световые, звуковые или подобные волны. Объект в области может быть живым организмом, изделием или природным материалом. В частности, устройство формирования изображения можно применять для маммографии, и объектом может быть молочная железа.

[0221]

Кроме того, каждый рассеивающий элемент, включенный в объект в области, соответствует участку, который имеет физические свойства, отличающиеся от физических свойств окружающей среды. В частности, данное физическое свойство соответствует коэффициенту отражения волны. Когда в качестве волн применяются радиоволны, физическим свойством может быть диэлектрическая постоянная. Рассеивающий элемент, включенный в объект, может быть арматурным стержнем в армированном бетоне или опухолью в молочной железе. Подлежащая измерению область может быть эквивалентна области объекта.

[0222]

На фиг. 9 представлена базовая конфигурация устройства формирования изображения в соответствии с настоящим вариантом осуществления. Устройство 100 формирования изображения, показанное на фиг. 9, включает в себя множество излучателей 101, множество приемников 102 и схему 103 обработки информации. Устройство 100 формирования изображения может также включать в себя дисплей 104.

[0223]

Каждый из излучателей 101 является схемой, которая излучает волну. В частности, излучатели 101 последовательно излучают волны. Излучатели 101 располагаются с обеих сторон подлежащей измерению области.

[0224]

Каждый из приемников 102 является схемой, которая принимает волну. Приемники 102 могут принимать волны одновременно и параллельно. Подобно излучателям 101, приемники 102 располагаются с обеих сторон подлежащей измерению области. Приемники 102 могут быть расположены по существу в том же положении, что и излучатели 101, или в положениях, отличающихся от излучателей 101.

[0225]

Излучатели 101 и приемники 102 могут формировать мультистатическую антенну или моностатическую антенну.

[0226]

Схема 103 обработки информации является схемой, которая обрабатывает информацию. В частности, схема 103 обработки информации визуализирует трехмерную структуру каждого рассеивающего элемента, включенного в объект в области по данным измерения, полученным излучателями 101 и приемниками 102. Например, схема 103 обработки информации выполняет арифметическую обработку, представленную в вышеописанных теоретических положениях, при визуализации трехмерной структуры рассеивающего элемента по данным измерения.

[0227]

Схема 103 обработки информации может быть компьютером или компьютерным процессором. Схема 103 обработки информации может выполнять обработку информации посредством считывания программы из памяти и выполнения программы. Схема 103 обработки информации может быть также специализированной схемой, которая визуализирует трехмерную структуру рассеивающего элемента по данным измерения.

[0228]

Вместе с тем, схема 103 обработки информации может формировать изображение, показывающее трехмерную структуру рассеивающего элемента, чтобы визуализировать трехмерную структуру рассеивающего элемента.

[0229]

Схема 103 обработки информации может визуализировать трехмерную структуру рассеивающего элемента путем вывода изображения, показывающего трехмерную структуру рассеивающего элемента, на дисплей 104 или подобное устройство. В качестве альтернативы, схема 103 обработки информации может визуализировать трехмерную структуру рассеивающего элемента путем вывода изображения, показывающего трехмерную структуру рассеивающего элемента, на принтер (не показанный). В качестве альтернативы, схема 103 обработки информации может визуализировать трехмерную структуру рассеивающего элемента посредством передачи изображения в форме электронных данных в другое устройство (не показанное) средствами проводной или беспроводной связи.

[0230]

Дисплей 104 является устройством отображения, например, жидкокристаллическим

дисплеем. Следует отметить, что дисплей 104 является дополнительным конструктивным элементом, а не существенным конструктивным элементом. Дисплей 104 может быть также внешним устройством, которое не формирует устройство 100 формирования изображения.

[0231]

На фиг. 10 приведена концептуальная схема, поясняющая пример взаимосвязи между излучателями 101, приемниками 102 и областью. Как показано на фиг. 10, излучатели 101 располагаются с обеих сторон подлежащей измерению области. Аналогично, приемники 102 располагаются с обеих сторон подлежащей измерению области. Излучатели 101 и приемники 102 могут располагаться в двух измерениях на каждой из двух поверхностей измерения. В качестве альтернативы, при приведении в движение излучателя 101 и приемника 102, расположенных на двух поверхностях измерения, можно выполнять излучение во множестве позиций излучения и прием во множестве позиций приема.

[0232]

На фиг. 11 приведена концептуальная схема, поясняющая вариант взаимосвязи между излучателями 101, приемниками 102 и областью. Как показано на фиг. 11, излучатели 101 и приемники 102 могут располагаться на криволинейных поверхностях с обеих сторон области.

[0233]

Фиг. 12 является блок-схемой последовательности операций, поясняющей базовый порядок работы устройства 100 формирования изображения, показанного на фиг. 9. В частности, излучатели 101, приемники 102 и схема 103 обработки информации в устройстве 100 формирования изображения, показанном на фиг. 9, выполняют операции, показанные на фиг. 12.

[0234]

Сначала, множество излучателей 101 излучает волны в подлежащую измерению область (S101). Например, излучатели 101 последовательно излучают волны. Множество приемников 102 принимают волны из подлежащей измерению области (S102). Например, приемники 102 принимают волны параллельно. Принятые волны можно также называть рассеянными волнами. Затем схема 103 обработки информации визуализирует трехмерную структуру каждого из рассеивающих элементов, включенных в объект в области, по данным измерения, полученным излучателями 101 и приемниками 102 (S103).

[0235]

В частности, схема 103 обработки информации выводит функцию формирования изображения, соответствующую функции поля рассеяния, зависящую от рассеяния волн в соответствии с зависимостью между данными измерения и композицией множества функций, соответствующих множественным рассеяниям первого порядка, которые формируют многократное рассеяние. Затем схема 103 обработки информации визуализирует трехмерную структуру рассеивающего элемента, включенного в объект в области, с использованием функции формирования изображения.

[0236]

Это дает возможность устройству 100 формирования изображения применять зависимость между данными измерения и композицией множества функций, соответствующих множественным рассеяниям первого порядка, чтобы выводить функцию формирования изображения для визуализации трехмерной структуры каждого рассеивающего элемента, включенного в объект в области. Предполагается, что многократное рассеяние является комбинацией множественных рассеяний первого порядка. Соответственно, устройство 100 формирования изображения способно аналитически решать обратную задачу рассеяния, включая многократное рассеяние, в соответствии с упомянутой зависимостью. Следовательно, устройство 100 формирования изображения способно с высокой точностью визуализировать трехмерную структуру каждого рассеивающего элемента, включенного в объект в области.

[0237]

Например, схема 103 обработки информации может выводить функцию формирования изображения, соответствующую функции поля рассеяния, путем решения уравнения для функции поля рассеяния по данным измерения. Вместе с тем, функцию поля рассеяния можно записать в виде

[0238]

[Математическое выражение 98]

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

[0239]

Здесь (x, y_1, z_1) обозначает позицию излучения волны, (x, y_2, z_2) обозначает позицию приема волны, k означает волновое число волны, D означает область, (ξ, η, ζ) соответствует позиции отражения волны, и ε соответствует неизвестному коэффициенту отражения в позиции отражения. Кроме того, ρ_1 означает расстояние от позиции излучения до позиции отражения, и ρ_2 означает расстояние от позиции отражения до позиции приема.

[0240]

Вместе с тем, уравнение для функции поля рассеяния можно записать в виде

[0241]

[Математическое выражение 99]

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

Здесь Δ_5 означает оператор Лапласа относительно x, y_1, y_2, z_1 и z_2 , c означает скорость распространения волны, и t означает время распространения от излучения волны до приема волны.

[0242]

Это дает возможность устройству 100 формирования изображения с высокой точностью визуализировать трехмерную структуру каждого рассеивающего элемента,

включенного в объект в области, в соответствии с функцией поля рассеяния, связанной с явлением рассеяния, и уравнением, которому удовлетворяет функция поля рассеяния.

[0243]

Например, схема 103 обработки информации может получать аналитическое решение уравнения по данным измерения. Затем схема 103 обработки информации может вывести функцию формирования изображения, исходя из аналитического решения. Аналитическое решение может быть записано в виде

[0244]

[Математическое выражение 100]

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

[0245]

Здесь k_x , k_{y_1} и k_{y_2} обозначают волновые числа, соответствующие x , y_1 и y_2 в функции поля рассеяния. Кроме того, $a(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$ означает функцию от k_x , k_{y_1} , k_{y_2} и k , $s_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2})$ означает функцию от k_x , k_{y_1} и k_{y_2} , и $s_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2})$ означает функцию от k_x , k_{y_1} и k_{y_2} .

[0246]

Это дает возможность устройству 100 формирования изображения с высокой точностью визуализировать трехмерную структуру каждого рассеивающего элемента, включенного в объект в области, в соответствии с аналитическим решением уравнения, которому удовлетворяет функция поля рассеяния, связанная с явлением рассеяния.

[0247]

Например, функция формирования изображения может быть записана в виде

[0248]

[Математическое выражение 101]

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

Здесь (x, y, z) обозначает позицию целевого объекта визуализации.

[0249]

Это дает возможность устройству 100 формирования изображения с высокой точностью визуализировать трехмерную структуру каждого рассеивающего элемента, включенного в объект в области, в соответствии с функцией формирования изображения, подходящим образом связанной с функцией поля рассеяния.

[0250]

Вместе с тем, например, многократное рассеяние можно выразить с использованием четырех функций спектрального пространства, соответствующих четырем

фундаментальным решениям уравнения для функции поля рассеяния. Кроме того, связь между данными измерения и четырьмя функциями может выражаться нелинейным интегральным уравнением. Тогда схема 103 обработки информации может вывести четыре функции по измеренным данным в соответствии с нелинейным интегральным уравнением. Затем схема 103 обработки информации может использовать четыре функции, чтобы вывести функцию формирования изображения, соответствующую функции поля рассеяния.

[0251]

Это дает возможность устройству 100 формирования изображения с высокой точностью визуализировать трехмерную структуру каждого рассеивающего элемента, включенного в объект в области, в соответствии с выражением взаимосвязи, которое отражает многократное рассеяние.

[0252]

Например, данные измерения могут быть записаны в виде

[0253]

[Математическое выражение 102]

$$\Phi_{ij}$$

$i, j=1,2$

Здесь, Φ_{11} , Φ_{12} , Φ_{21} и Φ_{22} , обозначенные как Φ_{ij} , соответствуют данным измерения, относящимся к четырем состояниям рассеяния, которые включают в себя два рассеяния в прямом направлении, соответствующие двум направлениям, и два рассеяния в обратном направлении, соответствующие двум направлениям.

[0254]

Затем схема 103 обработки информации применяет

[0255]

[Математическое выражение 103]

$$\begin{aligned} \Phi_{ij} = & a_{m_1} \\ & + \frac{1}{(2\pi)^1} \int f_2 [a_{m_1} a_{m_2}] d\mathbf{k}_{f_2} \\ & + \frac{1}{(2\pi)^2} \int f_3 [a_{m_1} a_{m_2} a_{m_3}] d\mathbf{k}_{f_3} \\ & + \dots \\ & + \frac{1}{(2\pi)^{L-1}} \int f_L [a_{m_1} a_{m_2} a_{m_3} \dots a_{m_L}] d\mathbf{k}_{f_L} \end{aligned}$$

$i, j=1,2 \quad m_1, m_2, m_3, \dots, m_L=1,2,3,4$

чтобы вывести

[0256]

[Математическое выражение 104]

$$a_{m_1} \\ m_1=1,2,3,4$$

из которого исключены эффекты многократного рассеяния.

[0257]

Здесь a_1, a_2, a_3 и a_4 , выраженные через $a_{m1}, a_{m2}, a_{m3}, \dots, a_{mL}$, соответствуют $a(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k)$ в аналитическом решении, соответствующем четырем состояниям рассеяния. Кроме того, f_2, f_3, \dots, f_L означают произведения 2, 3, ..., L переменных в квадратных скобках, соответствующих 2, 3, ..., L рассеяниям, имевшим место от излучения волны до приема волны, соответственно.

[0258]

[Математическое выражение 105]

$$k_{f_2}, k_{f_3}, \dots, k_{f_L}$$

обозначают волновые вектора, соответствующие координатным переменным, включенным в 2, 3, ..., L переменных в квадратных скобках при f_2, f_3, \dots, f_L .

[0259]

Затем схема 103 обработки информации может применить

[0260]

[Математическое выражение 106]

$$\begin{aligned} & \phi_{m_1}(x, y_1, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y1} y_1 + k_{y2} y_2)} a_{m_1}(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k) \\ & \quad \cdot e^{i s_1(k_x, k_{y1}, k_{y2}) z_1} e^{i s_2(k_x, k_{y1}, k_{y2}) z_2} dk_x dk_{y1} dk_{y2} \end{aligned}$$

$$m_1 = 1, 2, 3, 4$$

[0261]

как функцию поля рассеяния, чтобы вывести функцию формирования изображения в виде

[Математическое выражение 107]

$$\rho(x, y, z) = \lim_{t \rightarrow 0} \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \phi_{m_1}(x, y, y, z, z, k) e^{-ickt} dk \right]$$

[0262]

Это дает возможность устройству 100 формирования изображения с высокой точностью визуализировать трехмерную структуру каждого рассеивающего элемента, включенного в объект в области, в соответствии с уравнением, базирующемся на теории многократного рассеяния.

[0263]

Например, данные измерения записываются в виде

[0264]

[Математическое выражение 108]

$$\Phi_{ij}$$

$i, j=1,2$

Здесь Φ_{11} , Φ_{12} , Φ_{21} и Φ_{22} , обозначенные как Φ_{ij} , соответствуют данным измерения, относящимся к четырем состояниям рассеяния, которые включают в себя два рассеяния в прямом направлении, соответствующие двум направлениям, и два рассеяния в обратном направлении, соответствующие двум направлениям.

[0265]

Затем схема 103 обработки информации может использовать

[0266]

[Математическое выражение 109]

$$a_m = \Phi_{ij}$$

$m=1,2,3,4$ $ij=1,2$

$$- \frac{1}{(2\pi)^1} \int g_2 \left[\Phi_{m_1 n_1} \Phi_{m_2 n_2} \right] d\mathbf{k}_{g_2}$$

$m_1, n_1=1,2$
 $m_2, n_2=1,2$

$$- \frac{1}{(2\pi)^2} \int g_3 \left[\Phi_{m_1 n_1} \Phi_{m_2 n_2} \Phi_{m_3 n_3} \right] d\mathbf{k}_{g_3}$$

$m_1, n_1=1,2$
 $m_2, n_2=1,2$
 $m_3, n_3=1,2$

— ...

$$- \frac{1}{(2\pi)^{L-1}} \int g_L \left[\Phi_{m_1 n_1} \Phi_{m_2 n_2} \Phi_{m_3 n_3} \dots \Phi_{m_L n_L} \right] d\mathbf{k}_{g_L}$$

$m_1, n_1=1,2$
 $m_2, n_2=1,2$
 $m_3, n_3=1,2$
...
 $m_L, n_L=1,2$

чтобы вывести

[0267]

[Математическое выражение 110]

$$a_m$$

$m=1,2,3,4$

из которого исключены эффекты многократного рассеяния.

[0268]

Здесь a_1 , a_2 , a_3 и a_4 , выраженные через a_m , соответствуют $a(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k)$ в аналитическом решении, соответствующем четырем состояниям рассеяния. Кроме того, Φ_{11} , Φ_{12} , Φ_{21} и Φ_{22} , выраженные через $\Phi_{m_1 n_1}$, $\Phi_{m_2 n_2}$, $\Phi_{m_3 n_3}$, ..., $\Phi_{m_L n_L}$, соответствуют данным измерения для четырех состояний рассеяния. Кроме того, g_2 , g_3 , ..., g_L означают произведения 2, 3, ..., L переменных в квадратных скобках, соответствующих 2, 3, ..., L рассеяниям, имевшим место от излучения волны до приема волны, соответственно.

[0269]

Кроме того,

[0270]

[Математическое выражение 111]

$$k_{g_2}, k_{g_3}, \dots, k_{g_L}$$

обозначают волновые вектора, соответствующие координатным переменным, включенным в 2, 3, ..., L переменных в квадратных скобках при g_2, g_3, \dots, g_L .

[0271]

Затем схема 103 обработки информации может применить

[0272]

[Математическое выражение 112]

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

$$m = 1, 2, 3, 4$$

[0273]

как функцию поля рассеяния, чтобы вывести функцию формирования изображения в виде

[Математическое выражение 113]

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

[0274]

Это дает возможность устройству 100 формирования изображения с высокой точностью визуализировать трехмерную структуру каждого рассеивающего элемента, включенного в объект в области, в соответствии с уравнением, в котором данные измерения надлежащим образом связаны на основе теории многократного рассеяния.

[0275]

Например, данные измерения записываются в виде

[0276]

[Математическое выражение 114]

$$\Phi_{ij} \\ i, j = 1, 2$$

Здесь Φ_{11} , Φ_{12} , Φ_{21} и Φ_{22} , обозначенные как Φ_{ij} , соответствуют данным измерения, относящимся к четырем состояниям рассеяния, которые включают в себя два рассеяния в прямом направлении, соответствующие двум направлениям, и два рассеяния в обратном направлении, соответствующие двум направлениям.

[0277]

Затем схема 103 обработки информации может вывести a_1 , из которой исключены эффекты многократного рассеяния, с использованием

[0278]

[Математическое выражение 115]

$$\begin{aligned}
& \Phi_{11}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
& = a_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
& + \frac{1}{(2\pi)} \iiint a_1(k_{x_a}, k_{y_1}, k_{\eta_1}, k) a_4(k_{x_b}, -k_{\eta_1}, k_{y_2}, k) \delta(k_{x_a} + k_{x_b} - k_x) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, k_{\eta_1}) - s_1(k_{x_b}, -k_{\eta_1}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{\eta_1} \\
& + \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint a_1(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) a_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) a_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
& + \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint a_3(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) a_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) a_4(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
& + \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint a_1(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) a_4(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) a_4(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
& + \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint a_3(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) a_3(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) a_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
& + O(a^4)
\end{aligned}$$

[0279]

Здесь δ означает дельта-функцию, k_{x_a} , k_{x_b} и k_{x_c} являются переменными, соответствующими k_x , k_{η_1} и k_{η_2} являются переменными, соответствующими k_{y_1} , k_{η_3} является переменной, соответствующей k_{y_2} , и $O(a^4)$ является членом, соответствующим рассеянию четвертого или более высокого порядка.

[0280]

Затем схема 103 обработки информации может применить

[0281]

[Математическое выражение 116]

$$\begin{aligned} & \phi_1(x, y_1, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_y y_1 + k_y y_2)} a_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\ & \quad \cdot e^{i s_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}) z_1} e^{i s_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}) z_2} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \end{aligned}$$

[0282]

как функцию поля рассеяния, чтобы вывести функцию формирования изображения в виде

[Математическое выражение 117]

$$\rho(x, y, z) = \lim_{t \rightarrow 0} \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \phi_1(x, y, y, z, z, k) e^{-i c k t} dk \right]$$

[0283]

Это дает возможность устройству 100 формирования изображения с высокой точностью визуализировать трехмерную структуру каждого рассеивающего элемента, включенного в объект в области, в соответствии с уравнением, в котором явление рассеяния точно выражается на основе теории многократного рассеяния.

[0284]

Например, данные измерения записываются в виде

[0285]

[Математическое выражение 118]

$$\Phi_{ij} \\ i, j = 1, 2$$

Здесь Φ_{11} , Φ_{12} , Φ_{21} и Φ_{22} , обозначенные как Φ_{ij} , соответствуют данным измерения, относящимся к четырем состояниям рассеяния, которые включают в себя два рассеяния в прямом направлении, соответствующие двум направлениям, и два рассеяния в обратном направлении, соответствующие двум направлениям.

[0286]

Схема 103 обработки информации может выводить a_1 , из которой исключены эффекты многократного рассеяния, с использованием

[0287]

[Математическое выражение 119]

$$\begin{aligned}
& \alpha_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
& = \Phi_{11}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
& - \frac{1}{(2\pi)} \iiint \Phi_{11}(k_{x_a}, k_{y_1}, k_{\eta_1}, k) \Phi_{21}(k_{x_b}, -k_{\eta_1}, k_{y_2}, k) \delta(k_{x_a} + k_{x_b} - k_x) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, k_{\eta_1}) - s_1(k_{x_b}, -k_{\eta_1}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{\eta_1} \\
& - \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint \Phi_{11}(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) \Phi_{22}(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) \Phi_{11}(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
& - \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint \Phi_{12}(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) \Phi_{11}(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) \Phi_{21}(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
& - \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint \Phi_{11}(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) \Phi_{21}(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) \Phi_{21}(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
& - \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint \Phi_{12}(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) \Phi_{12}(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) \Phi_{11}(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3}
\end{aligned}$$

[0288]

Здесь δ означает дельта-функцию, k_{x_a} , k_{x_b} и k_{x_c} являются переменными, соответствующими k_x , k_{η_1} и k_{η_2} являются переменными, соответствующими k_{y_1} , и k_{η_3} является переменной, соответствующей k_{y_2} .

[0289]

Затем схема 103 обработки информации может применить

[0290]

[Математическое выражение 120]

$$\phi_1(x, y_1, y_2, z_1, z_2, k)$$

$$= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} a_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k)$$

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

[0291]

как функцию поля рассеяния, чтобы вывести функцию формирования изображения в виде

[Математическое выражение 121]

$$\rho(x, y, z) = \lim_{t \rightarrow 0} \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \phi_1(x, y, y, z, z, k) e^{-ickt} dk \right]$$

[0292]

Это дает возможность устройству 100 формирования изображения с высокой точностью визуализировать трехмерную структуру каждого рассеивающего элемента, включенного в объект в области, в соответствии с уравнением, в котором явление рассеяния точно выражается на основе теории многократного рассеяния и данные измерения связаны надлежащим образом.

[0293]

Например, данные измерения записываются в виде

[0294]

[Математическое выражение 122]

$$\Phi_{ij} \\ i, j = 1, 2$$

Здесь Φ_{11} , Φ_{12} , Φ_{21} и Φ_{22} , обозначенные как Φ_{ij} , соответствуют данным измерения, относящимся к четырем состояниям рассеяния, которые включают в себя два рассеяния в прямом направлении, соответствующие двум направлениям, и два рассеяния в обратном направлении, соответствующие двум направлениям.

[0295]

Затем схема 103 обработки информации может выводить a_1 , из которой исключены эффекты многократного рассеяния, с использованием

[0296]

[Математическое выражение 123]

$$\begin{aligned}
& \alpha_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
& = \Phi_{11}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
& - \frac{1}{(2\pi)} \iiint \Phi_{11}(k_{x_a}, k_{y_1}, k_{\eta_1}, k) \Phi_{21}(k_{x_b}, -k_{\eta_1}, k_{y_2}, k) \delta(k_{x_a} + k_{x_b} - k_x) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, k_{\eta_1}) - s_1(k_{x_b}, -k_{\eta_1}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{\eta_1} \\
& - \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint \left\{ \Phi_{11}(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) \Phi_{22}(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) \Phi_{11}(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \right. \\
& \quad + \Phi_{12}(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) \Phi_{11}(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) \Phi_{21}(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\
& \quad + \Phi_{11}(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) \Phi_{21}(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) \Phi_{21}(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \left. + \Phi_{12}(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) \Phi_{12}(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) \Phi_{11}(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \right\} \\
& \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
& \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3}
\end{aligned}$$

Здесь δ означает дельта-функцию, k_{x_a} , k_{x_b} и k_{x_c} являются переменными, соответствующими k_x , k_{η_1} и k_{η_2} являются переменными, соответствующими k_{y_1} , и k_{η_3} является переменной, соответствующей k_{y_2} .

[0297]

Затем схема 103 обработки информации может применить

[0298]

[Математическое выражение 124]

$$\begin{aligned}
& \phi_1(x, y_1, y_2, z_1, z_2, k) \\
& = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} a_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
& \quad \cdot e^{i s_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}) z_1} e^{i s_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}) z_2} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2}
\end{aligned}$$

[0299]

как функцию поля рассеяния, чтобы вывести функцию формирования изображения в виде

[Математическое выражение 125]

$$\rho(x, y, z) = \lim_{t \rightarrow 0} \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \phi_1(x, y, y, z, z, k) e^{-ickt} dk \right]$$

[0300]

Это дает возможность устройству 100 формирования изображения с высокой точностью визуализировать трехмерную структуру рассеивающего элемента, включенного в объект в области в соответствии с уравнениями, преобразованными на базе теории многократного рассеяния.

[0301]

Например, функцию поля рассеяния можно задать как функцию, в которой позиция излучения волны и позиция приема волны являются входным значением, и значение, показывающее волну в позиции приема, является выходным значением. Функция формирования изображения может быть задана на основе значения, получаемого на выходе функции поля рассеяния, при вводе позиции целевого объекта визуализации в виде позиции излучения и позиции приема в функцию поля рассеяния. Схема 103 обработки информации может использовать данные измерения в качестве граничного условия, чтобы вывести функцию поля рассеяния, и может применять функцию поля рассеяния, чтобы выводить функцию формирования изображения.

[0302]

Например, в отношении излучателей 101, приемников 102, схемы 103 обработки информации, функций поля рассеяния, функций формирования изображения и тому подобного, описанного выше применительно к базовой конфигурации и базовому порядку работы, можно применить другие конструктивные элементы, уравнения, выражения, переменные и тому подобное, описанные в настоящем варианте осуществления.

[0303]

Функции поля рассеяния, функции формирования изображения и тому подобное, показанные в настоящем варианте осуществления можно применять с подходящими изменениями. Например, можно использовать другие формулы, которые имеют, по существу, такой же смысл, как вышеописанные формулы, и можно использовать другие формулы, которые получены на базе вышеописанных теоретических принципов.

[0304]

В вышеприведенном описании выражение для фундаментального решения и выражение для аналитического решения можно понимать как синонимы.

[0305]

На фиг. 13 представлена блок-схема, поясняющая конкретную конфигурацию устройства 100 формирования изображения, показанного на фиг. 9.

[0306]

Излучатели 101 и приемники 102 в устройстве 100 формирования изображения, показанном на фиг. 9, могут входить в состав мультистатической антенной решетки 1008. Схема 103 обработки информации в устройстве 100 формирования изображения, показанном на фиг. 9, может соответствовать одному или более из конструктивных элементов, показанных на фиг. 13. В частности, например, схема 103 обработки информации может соответствовать вычислителю 1005 для обработки сигналов. Дисплей 104, показанный на фиг. 9, может соответствовать устройству 1005 контроля сигналов.

[0307]

Микроволновой сигнал, применяемый в устройстве 100 формирования изображения, является сигналом с псевдослучайной временной последовательностью (псевдошумовым кодом (PN-кодом)), с частотной составляющей от 0-20 ГГц. Данный сигнал получается на выходе платы 1002 программируемой логической матрицы FPGA для

генерации PN-кода. В частности, сигнал подразделяется на два типа. Сигнал одного типа (гетеродинный сигнал (ЛО-сигнал)) передается в схему радиочастотного детектора (плату 1007 РЧ-детектора) через цепь задержки (плату 1003 цифрового управления).

[0308]

Сигнал другого типа (радиочастотный (РЧ) сигнал) передается в и излучается излучающую/щей микроволновую(вой) сверхширокополосную/ной антенну/ой мультистатической антенной решетки 1008. Рассеянный микроволновый сигнал принимается сверхширокополосной приемной антенной мультистатической антенной решетки 1008 и передается в схему радиочастотного детектора (плату 1007 РЧ детектора). В данном случае, излучаемый и принимаемый сигналы проходят через переключатель назначения антенных элементов (РЧ переключатель 1004 сверхширокополосной антенны).

[0309]

Сигнал, подлежащий задержке, (ЛО-сигнал) задерживается на время, составляющее $1/2n$ (где n является целым числом больше 2) от времени, необходимого для изменения значения PN-кода. Детектированный сигнал подвергается аналого-цифровому (АЦ) преобразованию, выполняемому вычислителем 1005 для обработки сигналов, и сохраняется как сигнал промежуточной частоты (ПЧ сигнал). Кроме того, информация, отражающая детектированный сигнал, может представляться на устройстве 1006 контроля сигналов.

[0310]

Управление координацией по времени приведенной последовательности операций осуществляется микроконтроллером на плате 1003 цифрового управления синхронно с сигналом (сигналом расстояния или свободно распространяющимся сигналом) из измерителя 1001 расстояния. Например, микропроцессор на плате 1003 цифрового управления передает сигнал переключения, импульс запуска PN-кода и тому подобное.

[0311]

Кроме того, вычислитель 1005 для обработки сигналов выполняет трехмерную реконструкцию с использованием сигналов, сохраненных после АЦ преобразования, и представляет трехмерное изображение. Вычислитель 1005 для обработки сигналов может также выполнять калибровку сигнала. Вычислитель 1005 для обработки сигналов может также выполнять отображение необработанной волны. Например, вычислитель 1005 для обработки сигналов может сохранять трехмерное изображение и тому подобное в памяти 1009.

[0312]

Конфигурация на фиг. 13 является примером, и конфигурация устройства 100 формирования изображения не ограничивается конфигурацией, показанной на фиг. 13. В конфигурации, показанной на фиг. 13, могут быть сделаны частичные исключения или изменения.

[0313]

(Дополнительная информация)

Хотя аспекты устройства формирования изображения описаны выше на основе варианта осуществления, аспекты устройства формирования изображения не ограничиваются таким вариантом осуществления. В данный вариант осуществления могут быть внесены различные модификации, понятные специалистам в данной области техники, и множество конструктивных элементов в варианте осуществления можно сочетать произвольным образом. Например, процесс, выполняемый конкретным конструктивным элементом в варианте осуществления, может выполняться другим конструктивным элементом вместо прежнего. Кроме того, порядок обработки процессов можно изменять, и процессы могут выполняться параллельно.

[0314]

Способ формирования изображений, включающий в себя этапы, выполняемые конструктивными элементами, включенными в состав устройства формирования изображения, может выполняться произвольным/ной устройством или системой. Например, способ формирования изображений может частично или целиком выполняться компьютером, включающим в себя, например, процессор, память и входную и выходную схему. В таких случаях, способ формирования изображений может выполняться программой, предписывающей компьютеру выполнять способ формирования изображений, выполняемый компьютером.

[0315]

Программа может быть записана на невременном компьютерно-читаемом носителе информации.

[0316]

Каждый из конструктивных элементов устройства формирования изображения может быть сконфигурирован в форме специализированного аппаратного средства, в форме универсального аппаратного средства, которое выполняет вышеупомянутую программу или что-то подобное, или любой комбинации упомянутых средств. Кроме того, универсальное аппаратное средство может быть выполнено в форме памяти, на которой записана программа, и универсального процессора, который считывает программу из памяти и выполняет программу. В данном случае, память может быть полупроводниковой памятью или жестким диском, и универсальный процессор может быть центральным процессором (ЦП) или чем-то подобным.

[0317]

Специализированное аппаратное средство может быть выполнено в форме памяти и специализированного процессора или чего-то подобного. Например, специализированный процессор может обращаться к памяти для записи данных измерения и выполнять вышеописанный способ формирования изображений.

[0318]

Каждый из конструктивных элементов устройства формирования изображения может быть электрической схемой. Электрические схемы могут совместно формировать одну электрическую схему и, в качестве альтернативы, могут формировать отдельные

электрические схемы. Эти электрические схемы могут соответствовать специализированному аппаратному средству или универсальному аппаратному средству, которое выполняет, например, вышеупомянутую программу.

[Промышленная применимость]

[0319]

Один аспект настоящего изобретения пригоден для устройства формирования изображения, которое использует волны, чтобы визуализировать трехмерную структуру каждого рассеивающего элемента в объекте в области, и допускает применение, например, в геофизических исследованиях или медицинской диагностике.

[Список позиционных обозначений]

[0320]

100 устройство формирования изображения

101 излучатель

102 приемник

103 схема обработки информации

104 дисплей

1001 измеритель расстояния

1002 Плата программируемой логической матрицы (FPGA) для генерации PN-кода

1003 плата цифрового управления

1004 радиочастотный (РЧ) переключатель сверхширокополосной антенны

1005 вычислитель для обработки сигналов

1006 устройство контроля сигналов

1007 плата радиочастотного (РЧ) детектора

1008 мультистатическая антенная решетка

1009 память

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Устройство формирования изображения, содержащее:

множество излучателей, которые расположены с обеих сторон подлежащей измерению области, и каждый из которых излучает волну в область;

множество приемников, которые расположены с обеих сторон, и каждый из которых принимает волну; и

схему обработки информации, которая выводит функцию формирования изображения, соответствующую функции поля рассеяния, относящейся к рассеянию волны, в соответствии с зависимостью между (i) данными измерения, полученными множеством излучателей и множеством приемников, и (ii) композицией множества функций, относящихся к множественным рассеяниям первого порядка, формирующим многократное рассеяние, и визуализирует трехмерную структуру рассеивающего элемента, включенного в объект в области, с использованием функции формирования изображения.

2. Устройство формирования изображения по п. 1,

в котором схема обработки информации выводит функцию формирования изображения, соответствующую функции поля рассеяния, посредством решения уравнения для функции поля рассеяния по данным измерения, причем

функция поля рассеяния записывается в виде

[Математическое выражение 1]

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

где (x, y_1, z_1) обозначает позицию излучения волны, (x, y_2, z_2) обозначает позицию приема волны, k означает волновое число волны, D означает область, (ξ, η, ζ) соответствуют позиции отражения волны, ε соответствует неизвестному коэффициенту отражения в позиции отражения, ρ_1 означает расстояние от позиции излучения до позиции отражения, и ρ_2 означает расстояние от позиции отражения до позиции приема, и

уравнение записывается в виде

[Математическое выражение 2]

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

где Δ_s означает оператор Лапласа относительно x, y_1, y_2, z_1 и z_2 , c означает скорость распространения волны, и t означает время распространения от излучения волны до приема волны.

3. Устройство формирования изображения по п. 2,

в котором схема обработки информации получает аналитическое решение уравнения по данным измерения и выводит функцию формирования изображения, исходя из аналитического решения, и

аналитическое решение записывается в виде

[Математическое выражение 3]

$$\begin{aligned} & \phi(x, y_1, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y1} y_1 + k_{y2} y_2)} a(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k) e^{is_1(k_x, k_{y1}, k_{y2})z_1} e^{is_2(k_x, k_{y1}, k_{y2})z_2} dk_x dk_{y1} dk_{y2} \end{aligned}$$

где k_x , k_{y1} и k_{y2} обозначают волновые числа, соответствующие x , y_1 и y_2 в функции поля рассеяния, $a(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k)$ означает функцию от k_x , k_{y1} , k_{y2} и k , $s_1(k_x, k_{y1}, k_{y2})$ означает функцию от k_x , k_{y1} и k_{y2} , и $s_2(k_x, k_{y1}, k_{y2})$ означает функцию от k_x , k_{y1} и k_{y2} .

4. Устройство формирования изображения по п. 3,

в котором схема обработки информации выводит функцию формирования изображения, исходя из аналитического решения, и

функция формирования изображения записывается в виде

[Математическое выражение 4]

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

где (x, y, z) означают позицию целевого объекта визуализации.

5. Устройство формирования изображения по п. 1,

в котором многократное рассеяние выражается с использованием четырех функций спектрального пространства, соответствующих четырем фундаментальным решениям уравнения для функции поля рассеяния,

связь между данными измерения и четырьмя функциями выражается нелинейным интегральным уравнением, и

схема обработки информации:

выводит эти четыре функции по данным измерения в соответствии с нелинейным интегральным уравнением; и

выводит функцию формирования изображения, соответствующую функции поля рассеяния, с использованием этих четырех функций.

6. Устройство формирования изображения по п. 4,

в котором данные измерения записываются в виде

[Математическое выражение 5]

$$\Phi_{ij} \quad i, j=1, 2$$

где Φ_{11} , Φ_{12} , Φ_{21} и Φ_{22} , обозначенные как Φ_{ij} , соответствуют данным измерения, относящимся к четырем состояниям рассеяния, которые включают в себя два рассеяния в прямом направлении, соответствующие двум направлениям, и два рассеяния в обратном направлении, соответствующие двум направлениям,

при этом схема обработки информации применяет

[Математическое выражение 6]

$$\begin{aligned}
\Phi_{ij} = a_{m_1} & \\
i, j=1,2 & \quad m_1=1,2,3,4 \\
& + \frac{1}{(2\pi)^1} \int f_2 \left[a_{m_1} a_{m_2} \right] d\mathbb{k}_{f_2} \\
& \quad m_1, m_2=1,2,3,4 \\
& + \frac{1}{(2\pi)^2} \int f_3 \left[a_{m_1} a_{m_2} a_{m_3} \right] d\mathbb{k}_{f_3} \\
& \quad m_1, m_2, m_3=1,2,3,4 \\
& + \dots \\
& + \frac{1}{(2\pi)^{L-1}} \int f_L \left[a_{m_1} a_{m_2} a_{m_3} \dots a_{m_L} \right] d\mathbb{k}_{f_L} \\
& \quad m_1, m_2, m_3, \dots, m_L=1,2,3,4
\end{aligned}$$

чтобы вывести

[Математическое выражение 7]

$$a_{m_1}$$

$m_1=1,2,3,4$

из которого был исключен эффект многократного рассеяния,

где a_1, a_2, a_3 и a_4 , выраженные через $a_{m1}, a_{m2}, a_{m3}, \dots, a_{mL}$, соответствуют $a(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k)$ в аналитическом решении, соответствующем четырем состояниям рассеяния, f_2, f_3, \dots, f_L означают произведения 2, 3, ..., L переменных в квадратных скобках, соответствующих 2, 3, ..., L рассеяниям, имевшим место от излучения волны до приема волны, соответственно,

[Математическое выражение 8]

$$\mathbb{k}_{f_2}, \mathbb{k}_{f_3}, \dots, \mathbb{k}_{f_L}$$

обозначают волновые вектора, соответствующие координатным переменным, включенным в 2, 3, ..., L переменных в квадратных скобках при f_2, f_3, \dots, f_L , и схема обработки информации применяет

[Математическое выражение 9]

$$\begin{aligned}
& \phi_{m_1}(x, y_1, y_2, z_1, z_2, k) \\
& = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y1} y_1 + k_{y2} y_2)} a_{m_1}(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k) \\
& \quad \cdot e^{i s_1(k_x, k_{y1}, k_{y2}) z_1} e^{i s_2(k_x, k_{y1}, k_{y2}) z_2} dk_x dk_{y1} dk_{y2}
\end{aligned}$$

$$m_1 = 1, 2, 3, 4$$

как функцию поля рассеяния, чтобы вывести функцию формирования изображения в виде

[Математическое выражение 10]

$$\rho(x, y, z) = \lim_{t \rightarrow 0} \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \phi_{m_1}(x, y, y, z, z, k) e^{-ickt} dk \right]$$

7. Устройство формирования изображения по п. 4,

в котором данные измерения записываются в виде

[Математическое выражение 11]

$$\Phi_{ij}$$

$i, j=1,2$

где Φ_{11} , Φ_{12} , Φ_{21} и Φ_{22} , обозначенные как Φ_{ij} , соответствуют данным измерения, относящимся к четырем состояниям рассеяния, которые включают в себя два рассеяния в прямом направлении, соответствующие двум направлениям, и два рассеяния в обратном направлении, соответствующие двум направлениям,

схема обработки информации применяет

[Математическое выражение 12]

$$a_m = \Phi_{ij}$$

$m=1,2,3,4$ $ij=1,2$

$$- \frac{1}{(2\pi)^1} \int g_2 \left[\Phi_{m_1 n_1} \Phi_{m_2 n_2} \right] d\mathbf{k}_{g_2}$$

$m_1, n_1=1,2$
 $m_2, n_2=1,2$

$$- \frac{1}{(2\pi)^2} \int g_3 \left[\Phi_{m_1 n_1} \Phi_{m_2 n_2} \Phi_{m_3 n_3} \right] d\mathbf{k}_{g_3}$$

$m_1, n_1=1,2$
 $m_2, n_2=1,2$
 $m_3, n_3=1,2$

— ...

$$- \frac{1}{(2\pi)^{L-1}} \int g_L \left[\Phi_{m_1 n_1} \Phi_{m_2 n_2} \Phi_{m_3 n_3} \dots \Phi_{m_L n_L} \right] d\mathbf{k}_{g_L}$$

$m_1, n_1=1,2$
 $m_2, n_2=1,2$
 $m_3, n_3=1,2$
...
 $m_L, n_L=1,2$

чтобы вывести

[Математическое выражение 13]

$$a_m$$

$m=1,2,3,4$

из которого был исключен эффект многократного рассеяния,

где a_1 , a_2 , a_3 и a_4 , выраженные через a_m , соответствуют $a(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k)$ в аналитическом решении, соответствующем четырем состояниям рассеяния, Φ_{11} , Φ_{12} , Φ_{21} и Φ_{22} , выраженные через $\Phi_{m_1 n_1}$, $\Phi_{m_2 n_2}$, $\Phi_{m_3 n_3}$, ..., $\Phi_{m_L n_L}$, соответствуют данным измерения для четырех состояний рассеяния, g_2 , g_3 , ..., g_L означают произведения 2, 3, ..., L переменных в квадратных скобках, соответствующих 2, 3, ..., L рассеяниям, имевшим место от излучения волны до приема волны, соответственно,

[Математическое выражение 14]

$$\mathbf{k}_{g_2}, \mathbf{k}_{g_3}, \dots, \mathbf{k}_{g_L}$$

обозначают волновые вектора, соответствующие координатным переменным, включенным в 2, 3, ..., L переменных в квадратных скобках при g_2 , g_3 , ..., g_L , и

схема обработки информации применяет

[Математическое выражение 15]

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

$$m = 1, 2, 3, 4$$

как функцию поля рассеяния, чтобы вывести функцию формирования изображения в виде

[Математическое выражение 16]

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

8. Устройство формирования изображения по п. 4, в котором данные измерения записываются в виде

[Математическое выражение 17]

$$\Phi_{ij} \\ i, j = 1, 2$$

где Φ_{11} , Φ_{12} , Φ_{21} и Φ_{22} , обозначенные как Φ_{ij} , соответствуют данным измерения, относящимся к четырем состояниям рассеяния, которые включают в себя два рассеяния в прямом направлении, соответствующие двум направлениям, и два рассеяния в обратном направлении, соответствующие двум направлениям,

при этом схема обработки информации применяет

[Математическое выражение 18]

$$\begin{aligned}
& \Phi_{11}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
&= a_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
&+ \frac{1}{(2\pi)} \iiint a_1(k_{x_a}, k_{y_1}, k_{\eta_1}, k) a_4(k_{x_b}, -k_{\eta_1}, k_{y_2}, k) \delta(k_{x_a} + k_{x_b} - k_x) \\
&\quad \cdot \delta(s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, k_{\eta_1}) - s_1(k_{x_b}, -k_{\eta_1}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{\eta_1} \\
&+ \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint a_1(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) a_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) a_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\
&\quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
&\quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
&+ \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint a_3(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) a_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) a_4(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\
&\quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
&\quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
&+ \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint a_1(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) a_4(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) a_4(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\
&\quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
&\quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
&+ \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint a_3(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) a_3(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) a_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\
&\quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\
&\quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\
&+ O(a^4)
\end{aligned}$$

чтобы вывести a_1 , из которой был исключен эффект многократного рассеяния, где δ означает дельта-функцию, k_{x_a} , k_{x_b} и k_{x_c} являются переменными, соответствующими k_x , k_{η_1} и k_{η_2} являются переменными, соответствующими k_{y_1} , k_{η_3} является переменной, соответствующей k_{y_2} , и $O(a^4)$ является членом, соответствующим рассеянию четвертого или более высокого порядка, и

схема обработки информации применяет

[Математическое выражение 19]

$$\begin{aligned}
& \phi_1(x, y_1, y_2, z_1, z_2, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} a_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\
&\quad \cdot e^{i s_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}) z_1} e^{i s_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}) z_2} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2}
\end{aligned}$$

как функцию поля рассеяния, чтобы вывести функцию формирования изображения

в виде

[Математическое выражение 20]

$$\rho(x, y, z) = \lim_{t \rightarrow 0} \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \phi_1(x, y, y, z, z, k) e^{-ickt} dk \right]$$

9. Устройство формирования изображения по п. 4, в котором данные измерения записываются в виде

[Математическое выражение 21]

$$\Phi_{ij}$$

$i, j=1,2$

где Φ_{11} , Φ_{12} , Φ_{21} и Φ_{22} , обозначенные как Φ_{ij} , соответствуют данным измерения, относящимся к четырем состояниям рассеяния, которые включают в себя два рассеяния в прямом направлении, соответствующие двум направлениям, и два рассеяния в обратном направлении, соответствующие двум направлениям,

при этом схема обработки информации применяет

[Математическое выражение 22]

$$\begin{aligned} & a_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\ &= \Phi_{11}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\ & - \frac{1}{(2\pi)} \iiint \Phi_{11}(k_{x_a}, k_{y_1}, k_{\eta}, k) \Phi_{21}(k_{x_b}, -k_{\eta}, k_{y_2}, k) \delta(k_{x_a} + k_{x_b} - k_x) \\ & \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, k_{\eta}) - s_1(k_{x_b}, -k_{\eta}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{\eta} \\ & - \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \Phi_{11}(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) \Phi_{22}(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) \Phi_{11}(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\ & \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\ & \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\ & - \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \Phi_{12}(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) \Phi_{11}(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) \Phi_{21}(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\ & \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\ & \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\ & - \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \Phi_{11}(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) \Phi_{21}(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) \Phi_{21}(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\ & \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\ & \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \\ & - \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \Phi_{12}(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) \Phi_{12}(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) \Phi_{11}(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\ & \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\ & \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \end{aligned}$$

чтобы вывести a_1 , из которой был исключен эффект многократного рассеяния,

где δ означает дельта-функцию, k_{x_a} , k_{x_b} и k_{x_c} являются переменными,

соответствующими k_x , k_{η} и $k_{\eta 2}$ являются переменными, соответствующими k_{y_1} , $k_{\eta 3}$ является переменной, соответствующей k_{y_2} , и

схема обработки информации применяет

[Математическое выражение 23]

$$\begin{aligned} & \phi_1(x, y_1, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y_1} y_1 + k_{y_2} y_2)} a_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\ & \quad \cdot e^{i s_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}) z_1} e^{i s_2(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}) z_2} dk_x dk_{y_1} dk_{y_2} \end{aligned}$$

как функцию поля рассеяния, чтобы вывести функцию формирования изображения в виде

[Математическое выражение 24]

$$\rho(x, y, z) = \lim_{t \rightarrow 0} \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \phi_1(x, y, y, z, z, k) e^{-ickt} dk \right]$$

10. Устройство формирования изображения по п. 4,

в котором данные измерения записываются в виде

[Математическое выражение 25]

$$\Phi_{ij} \\ i, j = 1, 2$$

где Φ_{11} , Φ_{12} , Φ_{21} и Φ_{22} , обозначенные как Φ_{ij} , соответствуют данным измерения, относящимся к четырем состояниям рассеяния, которые включают в себя два рассеяния в прямом направлении, соответствующие двум направлениям, и два рассеяния в обратном направлении, соответствующие двум направлениям,

схема обработки информации применяет

[Математическое выражение 26]

$$\begin{aligned} & a_1(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\ &= \Phi_{11}(k_x, k_{y_1}, k_{y_2}, k) \\ & - \frac{1}{(2\pi)} \iiint \Phi_{11}(k_{x_a}, k_{y_1}, k_{\eta}, k) \Phi_{21}(k_{x_b}, -k_{\eta}, k_{y_2}, k) \delta(k_{x_a} + k_{x_b} - k_x) \\ & \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, k_{\eta}) - s_1(k_{x_b}, -k_{\eta}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{\eta} \\ & - \frac{1}{(2\pi)^2} \iiint \iiint \left\{ \Phi_{11}(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) \Phi_{22}(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) \Phi_{11}(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \right. \\ & \quad + \Phi_{12}(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) \Phi_{11}(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) \Phi_{21}(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\ & \quad + \Phi_{11}(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) \Phi_{21}(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) \Phi_{21}(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \\ & \quad \left. + \Phi_{12}(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2}, k) \Phi_{12}(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}, k) \Phi_{11}(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2}, k) \right\} \\ & \quad \cdot \delta(k_{x_a} + k_{x_b} + k_{x_c} - k_x) \delta(s_1(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_2(k_{x_a}, k_{y_1}, -k_{\eta_2})) \\ & \quad \cdot \delta(s_2(k_{x_b}, k_{\eta_2}, -k_{\eta_3}) - s_1(k_{x_c}, k_{\eta_3}, k_{y_2})) dk_{x_a} dk_{x_b} dk_{x_c} dk_{\eta_2} dk_{\eta_3} \end{aligned}$$

чтобы вывести a_1 , из которой был исключен эффект многократного рассеяния,

где δ означает дельта-функцию, k_{x_a} , k_{x_b} и k_{x_c} являются переменными,

соответствующими k_x , k_y и k_z являются переменными, соответствующими k_{y1} , k_{y3} является переменной, соответствующей k_{y2} , и

схема обработки информации применяет

[Математическое выражение 27]

$$\begin{aligned} & \phi_1(x, y_1, y_2, z_1, z_2, k) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_{y1} y_1 + k_{y2} y_2)} a_1(k_x, k_{y1}, k_{y2}, k) \\ & \quad \cdot e^{i s_1(k_x, k_{y1}, k_{y2}) z_1} e^{i s_2(k_x, k_{y1}, k_{y2}) z_2} dk_x dk_{y1} dk_{y2} \end{aligned}$$

как функцию поля рассеяния, чтобы вывести функцию формирования изображения в виде

[Математическое выражение 28]

$$\rho(x, y, z) = \lim_{t \rightarrow 0} \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \phi_1(x, y, y, z, z, k) e^{-ickt} dk \right]$$

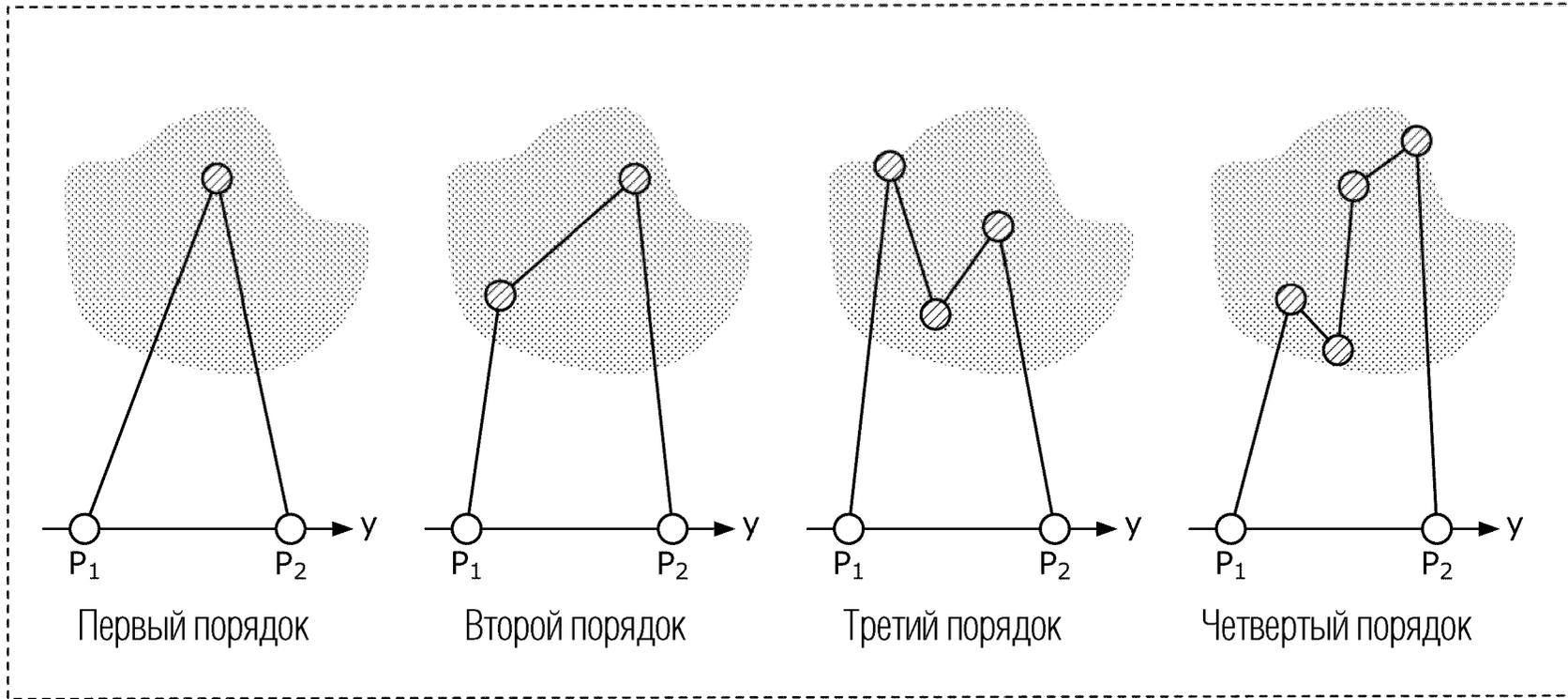
11. Способ формирования изображений, содержащий следующие этапы:

излучение, каждым из множества излучателей, расположенных с обеих сторон области, волны в подлежащую измерению область;

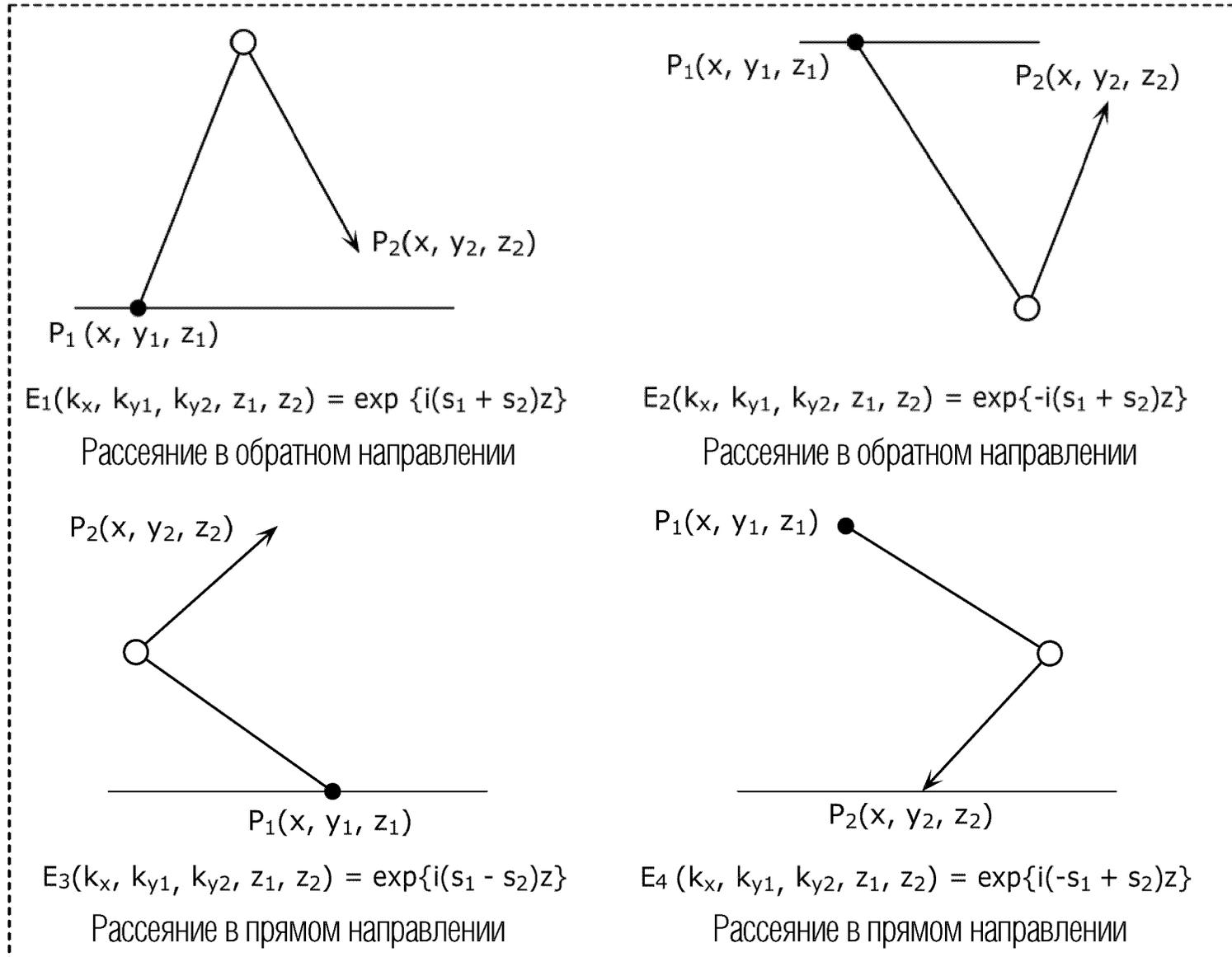
прием, каждым из множества приемников, расположенных с обеих сторон, волны из области; и

вывод функции формирования изображения, соответствующей функции поля рассеяния, относящейся к рассеянию волны в соответствии с зависимостью между (i) данными измерения, полученными множеством излучателей и множеством приемников, и композицией множества функций, относящихся к множественным рассеяниям первого порядка, формирующим многократное рассеяние, и визуализация трехмерной структуры рассеивающего элемента, включенного в объект в области, с использованием функции формирования изображения.

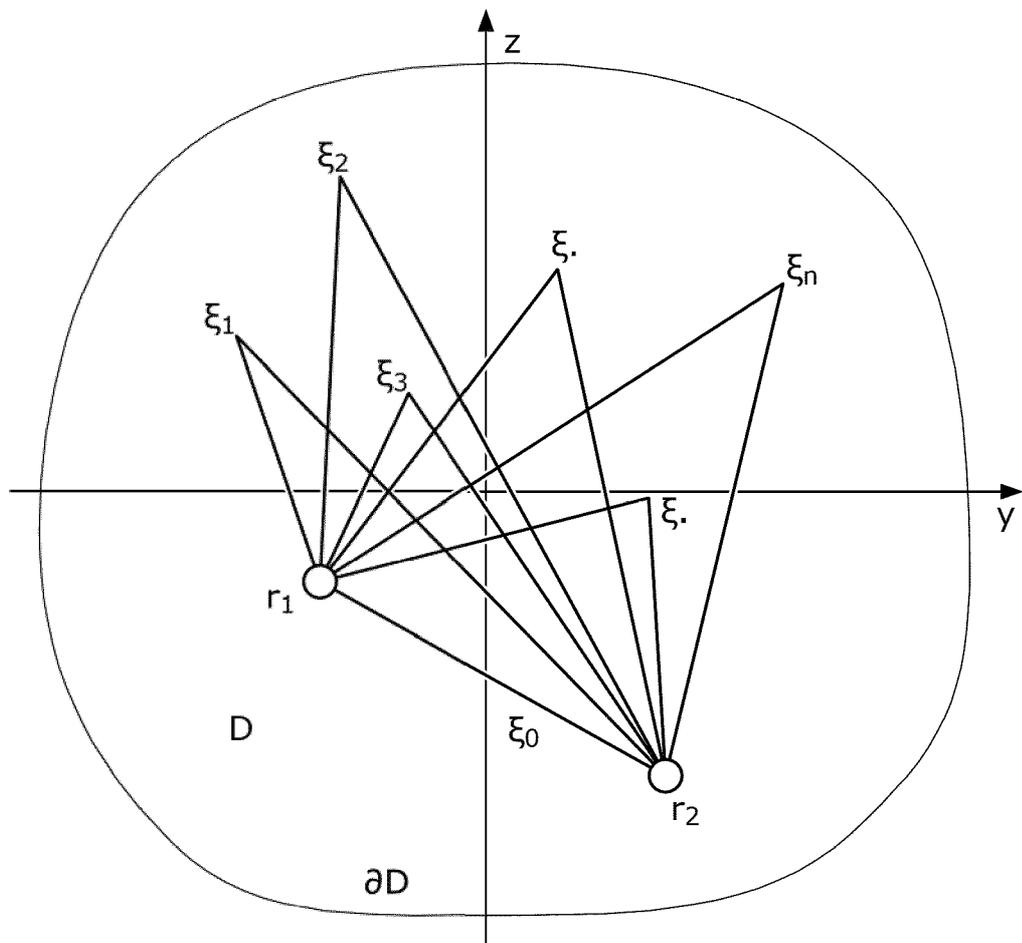
ФИГ. 1



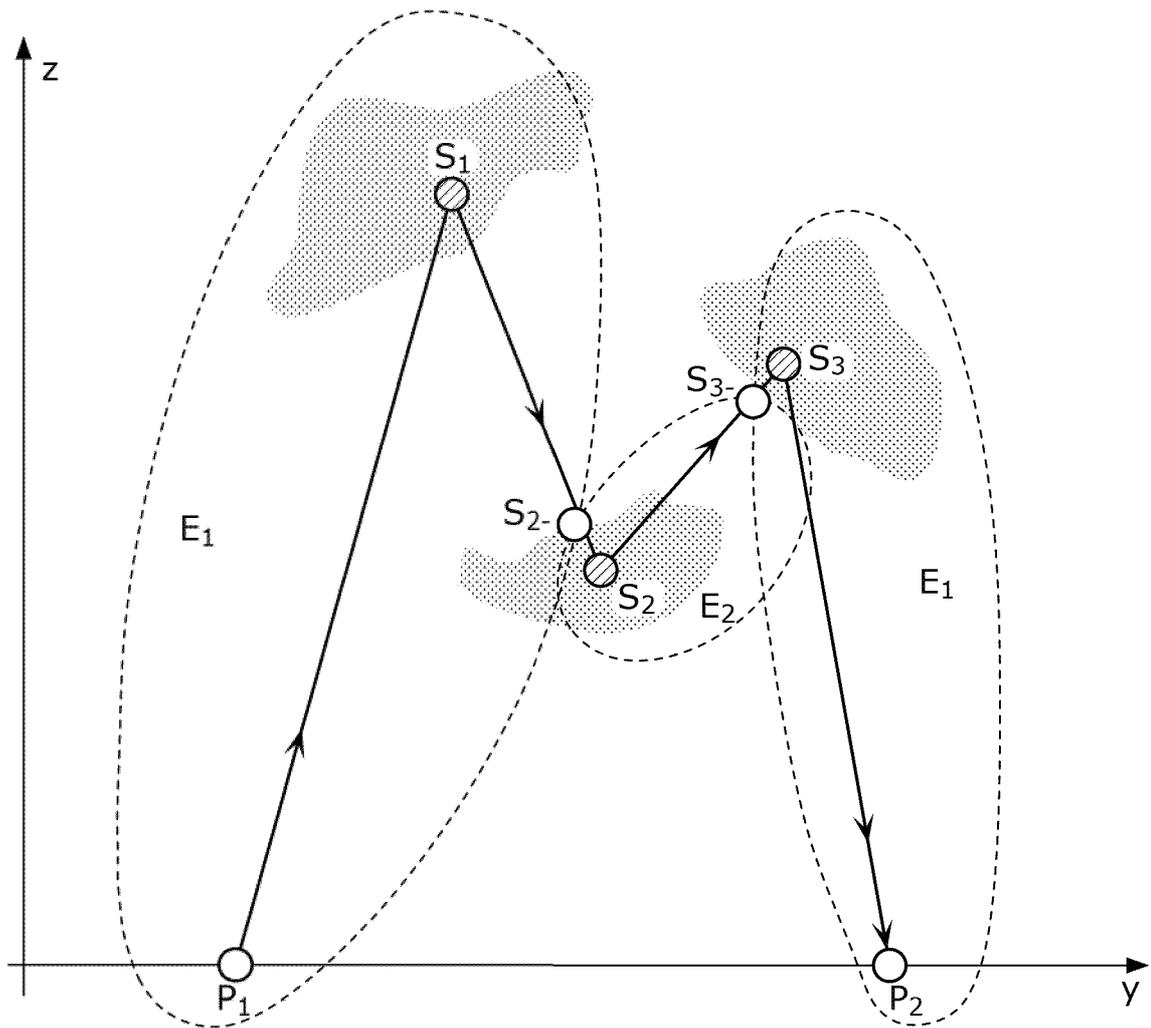
ФИГ. 2



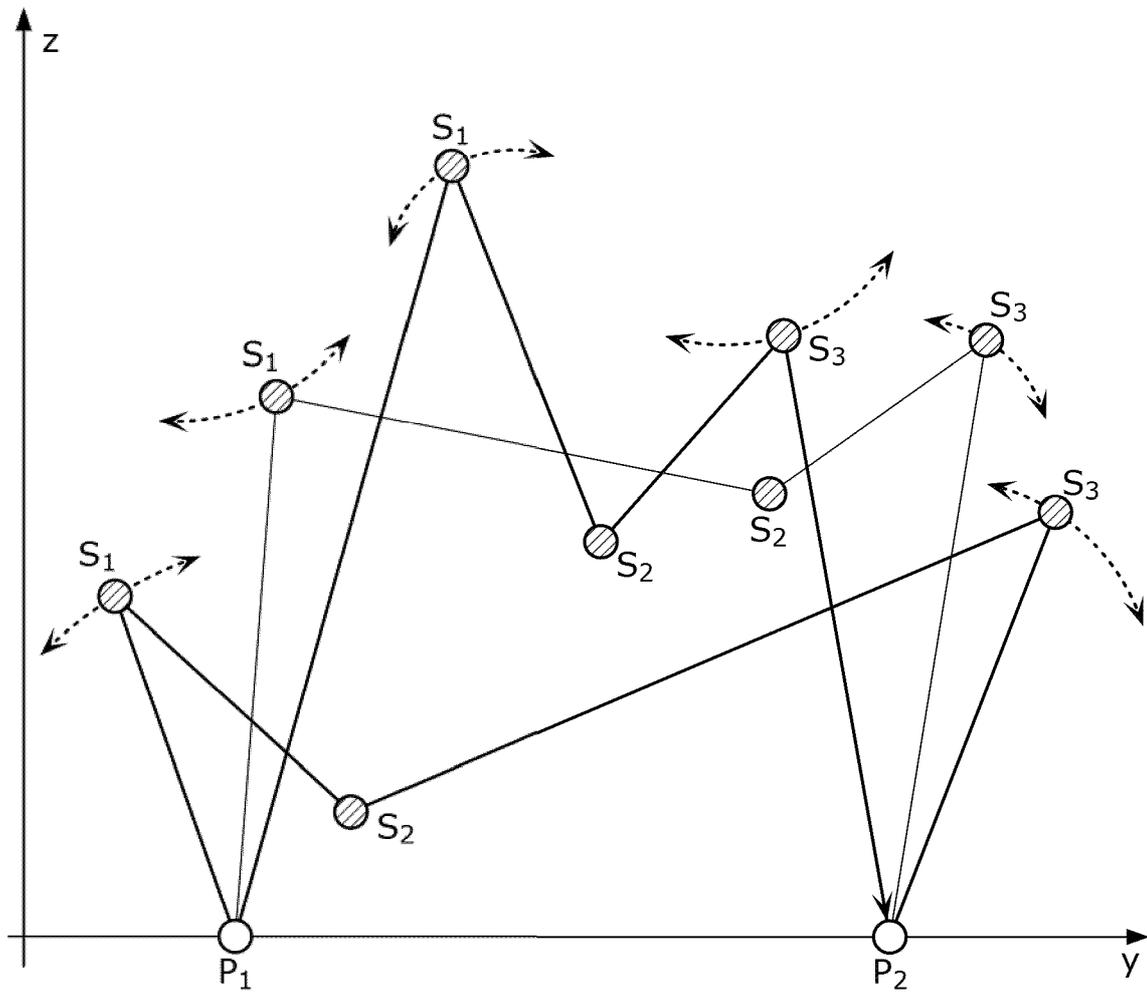
ФИГ. 3



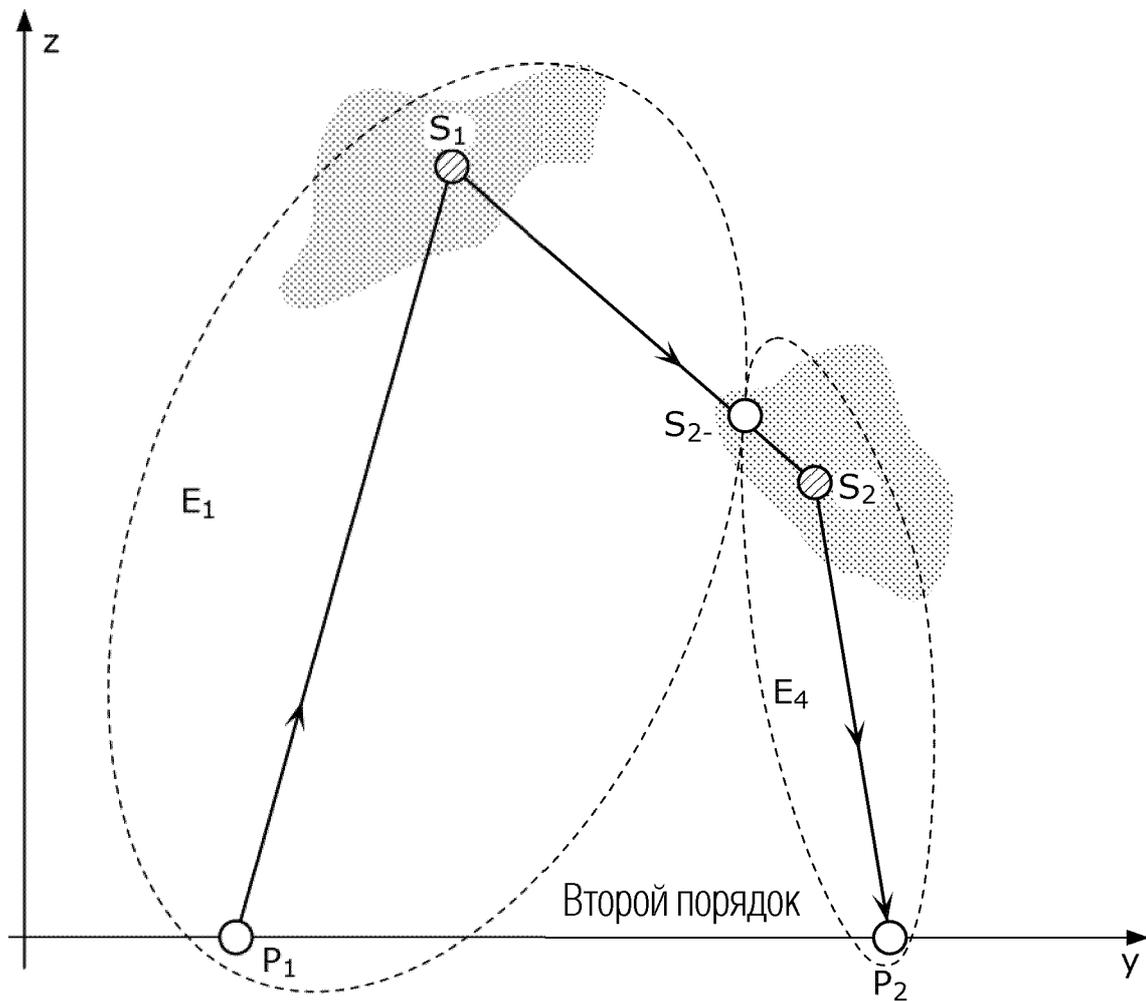
ФИГ. 4



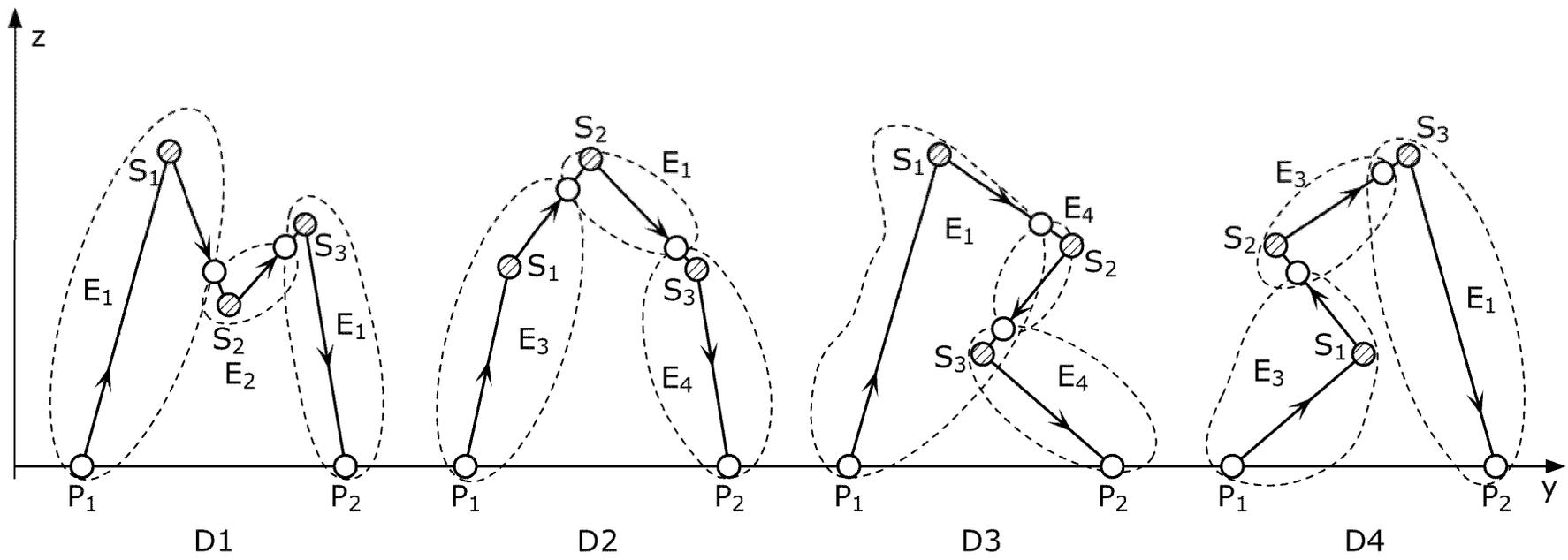
ФИГ. 5



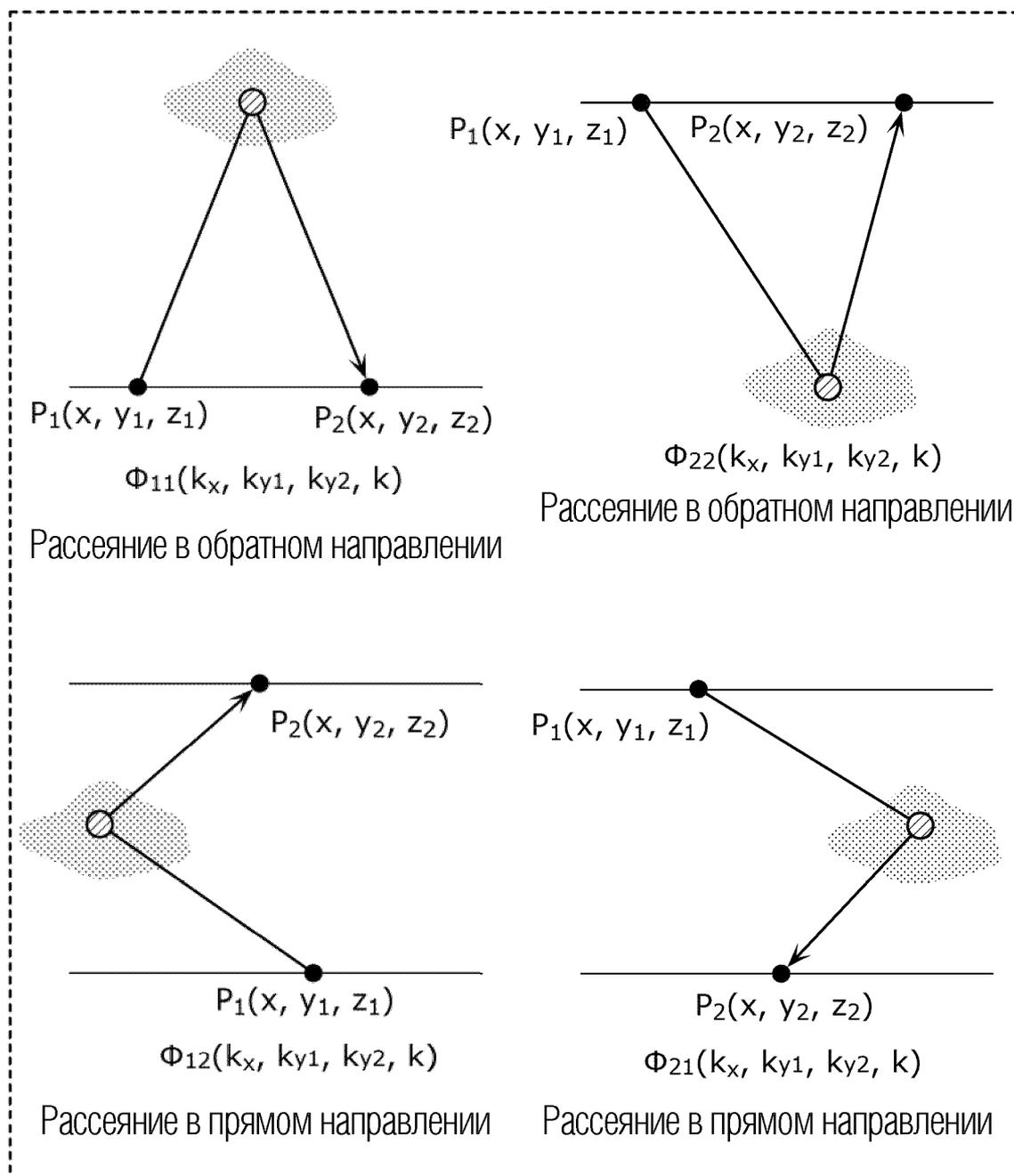
ФИГ. 6



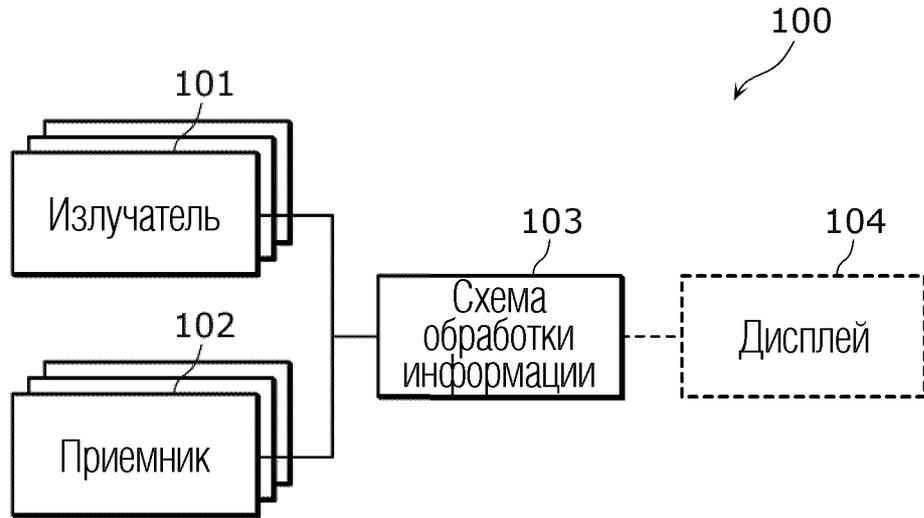
ФИГ. 7



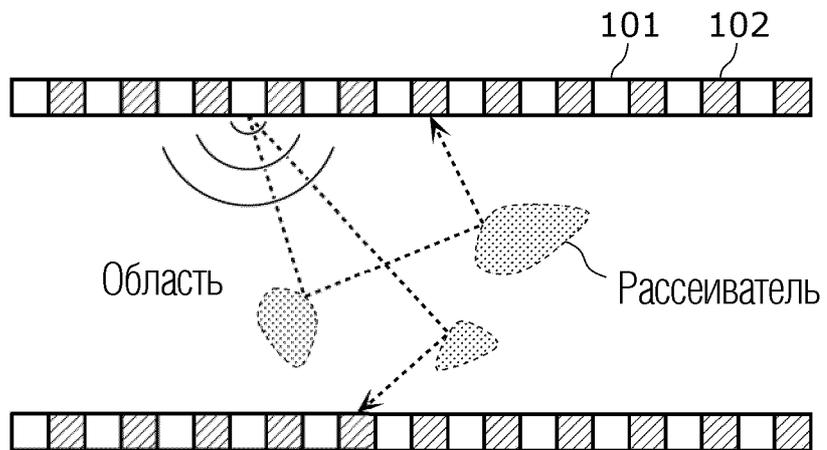
ФИГ. 8



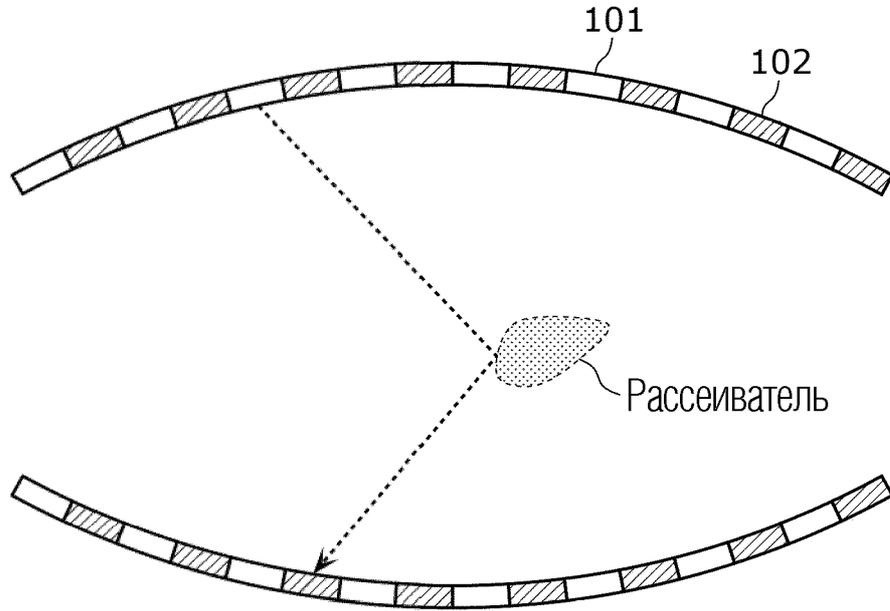
ФИГ. 9



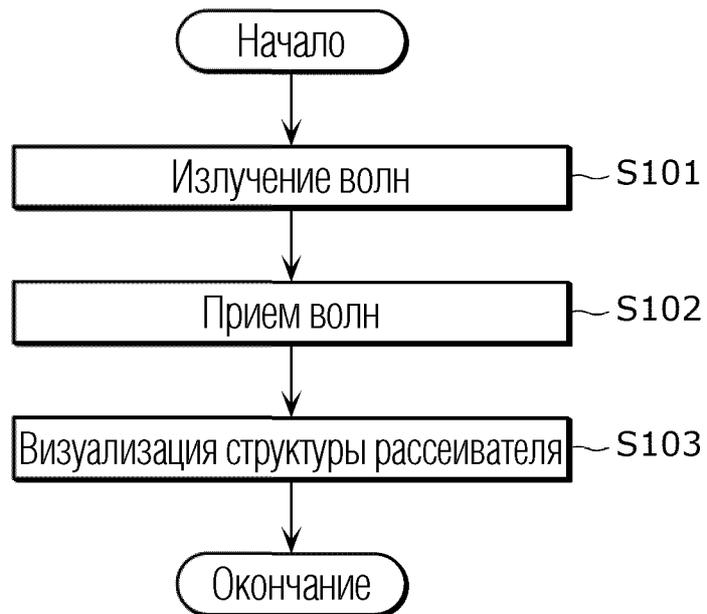
ФИГ. 10



ФИГ. 11



ФИГ. 12



ФИГ. 13

