



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **94233** (13) **C2**
(51) **МПК (2011.01)**
G01N 21/39 (2011.01)
G01N 21/35 (2011.01)
G01N 21/31

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

(54) СИСТЕМА ВИЯВЛЕННЯ І ВИЗНАЧЕННЯ ДАЛЬНОСТІ НА ОСНОВІ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОГО ПОГЛИНАННЯ СВІТЛА (DIAL) ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ БАГАТОВИМІРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МІШЕНІ І СПОСІБ РОБОТИ ВКАЗАНОЇ СИСТЕМИ

1

(21) а200714482
(22) 23.05.2006
(24) 26.04.2011
(86) PCT/US2006/019945, 23.05.2006
(31) 11/135,768
(32) 24.05.2005
(33) US
(46) 26.04.2011, Бюл.№ 8, 2011 р.
(72) КАЛАЙЄХ ХУШМАНД М., US
(73) АЙ ТІ ТІ МЕНЬЮФЕКЧУРІНГ ЕНТЕРПРАЙЗІЗ, ІНК., US
(56) US 682742 B1, 23.11.2004
US 6509566 B1, 21.01.2003
EP 0489546 A2, 10.06.1992
US 5250810, 05.10.1993
(57) 1. Система виявлення і визначення дальності на основі диференціального поглинання світла (DIAL) для ідентифікації багатовимірних характеристик щонайменше однієї мішені, яка містить сукупність лазерних джерел, кожне з яких допускає настроювання на випромінювання пучка світла, щонайменше один контролер настроювання для настроювання і прив'язки в реальному часі кожного пучка світла до попередньо визначеної довжини хвилі, що має ширину спектральної лінії, в якій кожний пучок світла допускає настроювання при роботі в режимі реального часу системи DIAL, об'єднувач для об'єднання кожного пучка світла для формування об'єднаного пучка світла, що має множинні довжини хвилі, передавач для передачі об'єднаного пучка світла на щонайменше одну мішень, приймач для прийому світла, що повертається від щонайменше однієї мішені, і перетворення поверненого світла, що має множинні довжини хвилі, на цифрові сигнали, і процесор для аналізу оцифрованих сигналів для ідентифікації щонайменше однієї мішені на основі її багатовимірних спектральних характеристик, причому об'єднувач включає в себе маску, розташовану між сукупністю лазерних джерел і оптикою для передачі відповідного пучка світла від кожного лазерного джерела, і

2

маска включає в себе сукупність апертур, причому кожна апертура здатна пропускати відповідний пучок світла на попередньо визначеній довжині хвилі.
2. Система DIAL за п. 1, в якій кожне з сукупності лазерних джерел допускає настроювання на випромінювання пучка світла в середньохвилинному спектрі.
3. Система DIAL за п. 1, в якій сукупність лазерних джерел включає в себе N лазерів, де N - ціле число, яке більше або дорівнює 4, M лазерів, кожний з яких настроєний на довжину хвилі, яка частково поглинається мішенню, де M - ціле число, яке більше або дорівнює 2, L лазерів, настроєних на довжину хвилі, що не зазнає поглинання на мішені, де L - ціле число, яке більше або дорівнює 2, і N дорівнює M+L.
4. Система DIAL за п. 3, в якій N лазерів настроєні на N різних довжин хвилі для виявлення щонайменше однієї мішені, що характеризується M різними спектральними лініями часткового поглинання і L різними спектральними лініями відсутності поглинання.
5. Система DIAL за п. 4, в якій щонайменше один лазер настроєний на середньохвилинному області спектра, і щонайменше один інший лазер настроєний на область поза середньохвилинною областю.
6. Система DIAL за п. 1, в якій сукупність лазерних джерел інтегрована в літальний апарат, і щонайменше один контролер пристосований для прив'язки в реальному часі кожного пучка світла оператором, який знаходиться на літальному апараті.
7. Система DIAL за п. 6, в якій щонайменше один контролер пристосований для перенастроювання і повторної прив'язки в реальному часі кожного пучка світла оператором, який знаходиться на літальному апараті, після першого настроювання і прив'язки в реальному часі кожного пучка світла.

(13) **C2**

(11) **94233**

(19) **UA**

8. Система DIAL за п. 1, в якій сукупність лазерних джерел інтегрована в транспортний засіб, і щонайменше один контролер пристосований для настроювання і прив'язки в реальному часі кожного пучка світла оператором, який знаходиться на транспортному засобі.

9. Система DIAL за п. 8, в якій щонайменше один контролер пристосований для перенастроювання і повторної прив'язки в реальному часі кожного пучка світла оператором, який знаходиться на транспортному засобі, після першого настроювання і прив'язки в реальному часі кожного пучка світла.

10. Система DIAL за п. 9, яка додатково містить пошукову таблицю (LUT) для вибору попередньо визначених багатовимірних спектральних характеристик різних мішеней, і для настроювання і перенастроювання кожного пучка світла на попередньо визначені довжини хвилі, відповідні вибраним багатовимірним спектральним характеристикам.

11. Система DIAL за п. 1, в якій процесор виконаний з можливістю кількісної оцінки щонайменше однієї характеристики мішені на основі багатовимірних спектральних характеристик мішені.

12. Система DIAL за п. 1, в якій кожне з сукупності лазерних джерел включає в себе твердотільний або напівпровідниковий лазер з оптичною накачкою, пристрій перемикання добротності, затравочні лазери і оптичний параметричний генератор (OPG) і оптичний параметричний підсилювач (OPA) для генерації і настроювання відповідного пучка імпульсного світла на відповідній попередньо визначеній довжині хвилі, і імпульсне світло організоване з утворенням пакета імпульсів із попередньо визначеними шириною імпульсу, інтервалом між імпульсами і інтервалом повторення імпульсу.

13. Спосіб ідентифікації багатовимірних спектральних характеристик щонайменше однієї мішені, який включає етапи, на яких генерують окремі пучки світла з сукупності лазерних джерел, інтегрованих в систему DIAL, настроюють і прив'язують, при роботі в режимі реального часу, кожний пучок світла, що випромінюється з сукупності лазерних джерел, до попередньо визначеної довжини хвилі, що має ширину спектральної лінії, об'єднують кожний згенерований лазерний пучок для формування об'єданого пучка світла, що має множинні довжини хвилі, передають об'єднаний пучок світла, що має множинні довжини хвилі, на щонайменше одну мі-

шень, приймають світло, що повертається від щонайменше однієї мішені, і перетворюють повернене світло в оцифровані сигнали для ідентифікації щонайменше однієї мішені на основі її багатовимірних спектральних характеристик,

причому етап об'єднання включає в себе пропускання кожного із згенерованих лазерних пучків через множину апертур в масці, причому кожна апертура пропускає відповідний пучок.

14. Спосіб за п. 13, в якому на етапі настроювання і прив'язки настроюють і прив'язують N лазерів, де N - ціле число, яке більше або дорівнює 4, в якому

M лазерів, кожний з яких настроєний на довжину хвилі, яка частково поглинається мішенню, де M - ціле число, яке більше або дорівнює 2,

L лазерів, настроєних на довжину хвилі, що не зазнає поглинання на мішені, де L - ціле число, яке більше або дорівнює 2, і

N дорівнює $M+L$.

15. Спосіб за п. 14, в якому

N лазерів настроюють на N різних довжин хвилі для виявлення щонайменше однієї мішені, що характеризується M різними спектральними лініями часткового поглинання і L різними спектральними лініями відсутності поглинання.

16. Спосіб за п. 13, в якому на етапі настроювання і прив'язки

настроюють і прив'язують щонайменше один лазер на середньоінфрачервону область спектра, і щонайменше один інший лазер на область поза середньоінфрачервоною областю.

17. Спосіб за п. 13, який включає етапи, на яких інтегрують сукупність лазерних джерел в літальний апарат, і

оператор, який знаходиться на літальному апараті, настроює і прив'язує кожний пучок світла, в реальному часі.

18. Спосіб за п. 17, який включає етап, на якому оператор, який знаходиться на літальному апараті, перенастроює і повторно прив'язує кожний пучок світла, в реальному часі, після першого настроювання і прив'язки кожного пучка світла.

19. Спосіб за п. 13, який включає етапи, на яких вибирають з пошукової таблиці (LUT) попередньо визначені багатовимірні спектральні характеристики різних мішеней, і

настроюють і перенастроюють кожний пучок світла на попередньо визначені довжини хвилі, відповідні вибраним багатовимірним спектральним характеристикам.

Спостереження за топографією земної поверхні загальновідоме в техніці. При наземному спостереженні, дуже бажаним є виявляти, чи не сталося руйнування матеріалу в штучному об'єкті, наприклад, дорозі, трубопроводі, електричній мережі або іншій штучній структурі, що представляє практичний інтерес. При виявленні руйнування структури, відповідні служби визначають, чи необ-

хідні ремонтні роботи. Часто наземна команда проводить візуальну інспекцію топографії земної поверхні для визначення, чи є руйнування матеріалу, при перетині області обстеження на транспорті або пішки. Часто буває так, що літак або супутник включає в себе пристрій захоплення зображення, наприклад пристрій на приладах із зарядовим зв'язком (ПЗЗ), пристрій на комплекен-

тарних МОН-транзисторах (КМОН) або детектор випромінювання, наприклад, інфрачервоний детектор. Загальновідомо, що авіаційні фотографічні системи часто використовуються для захоплення зображень сусідніх ділянок земної поверхні.

При взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною, може відбуватися ряд явищ, включаючи розсіяння, поглинання, пропускання і відбивання електромагнітного випромінювання. Спектральний або спектроскопічний аналіз включає в себе ретельне дослідження, аналіз і представлення взаємодій електромагнітного випромінювання з речовиною, впорядкованим чином, як функцію довжини хвилі, частоти або часу. У ході спектроскопічного аналізу, різні матеріали демонструють різні характеристики розсіяння, поглинання, відбивання і пропускання. Ці різні характеристики визначаються хімічною і фізичною структурою матеріалів. Коли набір цих різних характеристик визначений з даним рівнем визначеності, з використанням відомих предметів тестування, ці результати спектроскопії можна іменувати опорними спектральними сигнатурами або опорними спектрами.

Природний газ звичайно містить суміш метану, етану і інших газів в невеликій кількості. Газ, що виділяється при розкладанні органічної речовини, який далі іменується болотним газом, містить тільки метан. Дуже бажано, щоб будь-який метод виявлення природного газу дозволяв відрізнити гази, що виділяються в результаті аварії на трубопроводі або руйнування контейнера для газу від болотних газів, для запобігання помилковому спрацюванню тривожної сигналізації.

Нафтопроводи містять значні концентрації летких розчинених газоподібних сполук, включаючи метан, етан і пропан. Нафтопроводи працюють під тиском; витоки і супутнє падіння тиску приводять до викиду летких компонентів, і, таким чином, передбачають засіб виявлення витоку. Електромагнітне випромінювання можна направляти на ділянку, що містить газо- і нафтопроводи, різними засобами. Звичайно використовуються лазери, але можна використовувати і інші засоби, наприклад антени для випромінювання електромагнітної енергії в радіо- і мікрохвильовому діапазоні. Далі, при направленні електромагнітного випромінювання на тестовану ділянку, використовують термін освітлювач.

При виявленні дефектів газо- або нафтопроводів виникає певна проблема, пов'язана з тим, що газо- або нафтопровід звичайно закопаний під землею. У таких випадках важко провести пряму візуальну оцінку дефектів в трубопроводі. Коли дефекти дійсно мають місце, вони можуть виявлятися у вигляді витоку вмісту трубопроводу, причому витік матеріалу створює характерну домішку або сигнал. Звичайно, дефекти в трубопроводах в цей час виявляє персонал, який обходить трубопровід, на періодичній і основі, що дорого коштує, за допомогою якого-небудь засобу виявлення домішки, яка виходить від трубопроводу.

Гази можуть виходити з трубопроводу і розповсюджуватися через підземні шари до поверхні землі і потім в атмосферу. Тому, можна провести

моніторинг атмосфери на предмет газів, що виходять з трубопроводу. Зв'язок газів, виявлених в атмосфері, з витоком з трубопроводу може бути прямим або непрямим. Прикладом прямого зв'язку є виділення конкретних газоподібних вуглеводнів в атмосферу з підземних нафто- і газопроводів. Природний газ складається з 2 основних компонентів, метану і етану. Співвідношення метану і етану в суміші може варіюватися.

Вимірювання обох компонентів і пряме підтвердження відповідного співвідношення концентрацій дозволяє встановити наявність витоку з трубопроводу. У цьому випадку зв'язок є прямим, оскільки самі компоненти газу виділяються в атмосферу, хоч, можливо, із зміненним складом.

Метан виділяється при термічному або біологічному розкладанні вугілля. Газ (метан), що реєструється, - не те ж саме, що природний ресурс (вугілля), тому для опису цього зв'язку використовується термін "непрямий". Термін "непрямий зв'язок" не має на увазі, що цей зв'язок має незначну наукову цінність. Процес перетворення вугілля на метан детально описаний в науковій літературі.

Патент США 6,822,742, виданий 23 листопада 2004 р. Калайеху (Kalayeh) і ін., під назвою SYSTEM AND METHOD FOR REMOTE QUANTITATIVE DETECTION OF FLUID LEAKS FROM A NATURAL GAS OR OIL PIPELINE, забезпечує систему для дистанційного кількісного виявлення витоків флюїду з газо- або нафтопроводу з використанням авіаційної платформи. Зміст вищезазначеної заявки включений сюди за допомогою посилання в повному об'ємі.

Даний винахід передбачає лазерну систему з настроюванням на множинні лінії для ідентифікації багатовимірних спектральних характеристик однієї або декількох мішеней. Система включає в себе сукупність лазерних джерел, кожне з яких допускає настроювання на випромінювання пучка світла, що має різну довжину хвилі електромагнітного випромінювання, і щонайменше один контролер настроювання для настроювання і прив'язки кожного пучка світла до відповідної попередньо визначеної довжини хвилі вузької лінії. Система також включає в себе передавач для передачі кожного пучка світла на мішені, і приймач для прийому світла, що повертається від мішеней, і перетворення поверненого світла на електричні сигнали для ідентифікації мішеней. Кожне з сукупності лазерних джерел допускає настроювання на випромінювання пучка світла в різних ділянках електромагнітного спектра, наприклад, середньоінфрачервоного електромагнітного спектра. Наприклад, система може мати конфігурацію датчика типу DIAL з множинними лініями, що має N лазерів ввімкненої лінії і вимкненої лінії, в якій кожний з M лазерів ввімкненої лінії настроєний на довжину хвилі, яка частково або пропорційно поглинається мішенями, і кожний з L лазерів вимкненої лінії настроєний на довжину хвилі, яка не поглинається мішенями ($N=M+L$). Крім того, лазерний датчик з настроюванням на множинні лінії можна пристосувати для різних застосувань. Наприклад, лазери ввімкненої лінії або лазери вимкненої лінії можуть мати однакові або різні довжини хвилі, з

вузької ділянки електромагнітного спектра, або з різних ділянок електромагнітного спектра.

Лазерна система з настроюванням на множинні лінії, що відповідає даному винаходу, включає в себе N лазерів, настроєних на M різних довжин хвилі для виявлення однієї або декількох мішеней, де кожна мішень характеризується M спектральними лініями поглинання, і L (один або декілька) лазерів, настроєних на мінімальне поглинання мішенями і максимальне відбивання фonom, де кожний фон характеризується своїми L-вимірними характеристиками прийнятого відбивання/зворотного розсіяння.

Сукупність лазерних джерел включає в себе лазерні затвори для повторної генерації імпульсів енергії, в якій імпульси енергії організовані послідовно у вигляді пакета імпульсів, відмінного тим, що (a) кожний імпульс має попередньо визначену ширину імпульсу, наприклад, приблизно від 10 нс до 100 нс, (b) імпульси відділені один від одного попередньо визначеним інтервалом між імпульсами, наприклад, приблизно від 100 нс до 150 нс, і (c) кожний пакет імпульсів повторюється із попередньо визначеним інтервалом, наприклад, приблизно від 500 мкс до 1000 мкс.

Інший варіант здійснення винаходу включає в себе систему виявлення і визначення дальності на основі диференціального поглинання світла (DIAL) з множинними лініями. Система включає в себе лазерні датчики типу DIAL з множинними лініями, що генерують сукупність вихідних сигналів безперервно перестроюваного лазера, контролер для настроювання кожного лазерного датчика типу DIAL з множинними лініями на генерацію вихідного сигналу лазера із попередньо визначеною довжиною хвилі, передавач для передачі вихідних сигналів попередньо визначеної довжини хвилі на мішень, приймач для прийому світла зворотного розсіяння від мішені або від фонові мішені (наприклад, типів покриття поверхні землі) і сукупність детекторів для виявлення світла зворотного розсіяння на кожній з відповідних прийнятих довжин хвилі.

Лазерні датчики типу DIAL з множинними лініями, що відповідають даному винаходу, генерують (a) N вихідних сигналів лазерів ввімкненої лінії і вимкненої лінії, причому N вихідних сигналів лазера ввімкненої лінії вибирається для ідентифікації M характеристик ввімкненої лінії мішені, і (b) L (однієї або декількох) характеристик вимкненої лінії фонові мішені, де кожний вихідний сигнал лазера вимкненої лінії вибирається так, щоб він не зазнавав поглинання мішенню.

Контролер згідно з даним винаходом включає в себе пошукову таблицю (LUT) для вибору попередньо визначених багатовимірних спектральних характеристик різних мішеней (однієї або декількох мішеней). Вихідні сигнали лазерів ввімкненої лінії і вимкненої лінії настроюються на попередньо визначені довжини хвилі, вказані в LUT.

Кожний лазерний датчик типу DIAL з множинними лініями системи може бути імпульсним для генерації вихідного імпульсу енергії на відповідній попередньо визначеній довжині хвилі, і контролер може бути здатний послідовно об'єднувати кожний

вихідний імпульс енергії з кожного лазерного датчика типу DIAL з множинними лініями і генерувати пакет імпульсів для передачі на мішені. Пакет імпульсів може включати в себе N імпульсів для N лазерних датчиків типу DIAL з множинними лініями, в якому N - це повна кількість вихідних сигналів лазерів ввімкненої лінії і вимкненої лінії, вибрана для ідентифікації N характеристик мішеней і фону.

Інший аспект винаходу включає в себе спосіб ідентифікації і/або кількісної оцінки однієї або декількох мішеней на основі багатовимірних спектральних характеристик однієї або декількох мішеней. Спосіб включає в себе етапи, на яких: (a) випромінюють окремі пучки світла з сукупності лазерних джерел; (b) настроюють і прив'язують кожний пучок світла, що випромінюється з сукупності лазерних джерел, до попередньо визначеного електромагнітного спектра вузької лінії; (c) передають кожний пучок світла для освітлення мішеней; (d) приймають світло, що повертається від мішеней; і (e) перетворюють повернене світло на електричні сигнали для ідентифікації і/або кількісної оцінки мішеней.

Потрібно розуміти, що вищенаведений загальний опис і нижченаведений докладний опис покликані ілюструвати, але не обмежувати винахід.

Винахід простіше усього зрозуміти, звернувшись до нижченаведеного докладного опису, наведеного спільно з прикладеними кресленнями. Креслення представлені наступними фігурами:

фіг. 1 - ілюстративна схема лазерної системи виявлення витoku флюїду з трубопроводу на основі DIAL з настроюванням на множинні лінії, встановленої на авіаційній платформі, згідно з варіантом здійснення даного винаходу;

фіг. 2A і 2B - блок-схеми лазерних систем типу DIAL з настроюванням на множинні лінії, згідно з варіантом здійснення даного винаходу;

фіг. 3 - блок-схема ілюстративного варіанта здійснення лазерної системи виявлення витoku флюїду з трубопроводу на основі DIAL з настроюванням на множинні лінії, згідно з варіантом здійснення даного винаходу;

фіг. 4A-4C - часові діаграми ілюстративного триплетного набору імпульсів, що передається і приймається системою, показаною на фіг. 3, згідно з варіантом здійснення даного винаходу;

фіг. 5 - схема ілюстративного розподілу лазерного пучка від затравочного лазера на три окремих передавальних модулі, згідно з варіантом здійснення даного винаходу;

фіг. 6 - блок-схема, що демонструє використання трьох різних лазерів для формування остаточного лазерного пучка, позначуваного як джерело #1, згідно з варіантом здійснення даного винаходу;

фіг. 7 - схема об'єднувача пучків, згідно з варіантом здійснення даного винаходу;

фіг. 8A - вигляд спереду маски, використовуваної в об'єднувачі пучків, показаною на фіг. 7, для об'єднання 3 пучків, згідно з варіантом здійснення даного винаходу;

фіг. 8B - вигляд спереду іншої маски для об'єднання 4 пучків, згідно з варіантом здійснення да-

ного винаходу; і

фіг. 8С - вигляд спереду ще однієї маски для об'єднання 5 пучків, згідно з варіантом здійснення даного винаходу.

Даний винахід, описаний тут, належить до вимірювання флюїдів-мішеней, наприклад газових домішок, пов'язаних з витоками нафти і газу з трубопроводів. Цей винахід належить до системи виявлення витоку нафти і газу з трубопроводу і до способу виявлення газів в атмосфері і, зокрема, але не в порядку обмеження, виявлення витоку з трубопроводів на основі датчиків типу лідара диференціального поглинання (DIAL), діючого в середньоінфрачервоному спектральному діапазоні.

У загальному випадку, можна виявляти або розвідувати багато які флюїди, наприклад, газ, леткі масла, легку сировину нафту, важку сировину нафту, небезпечні гази, небезпечні рідини або хімічно- і біологічно-активні речовини. Концентрації газу на визначеній площі можна, наприклад, зображувати на карті, і карти можна аналізувати для виявлення аномальних концентрацій. Ці газові аномалії можна інтерпретувати для визначення витоку з підземного трубопроводу.

Використовуваний тут термін "флюїди-мішені" означає флюїди, які являють собою рідини або гази, наприклад, флюїди-мішені, прямо або непрямо пов'язані з витоками з трубопроводу. В основі даного винаходу лежить вимірювання атмосферних концентрацій цих флюїдів-мішеней. Кожний флюїд-мішень має ряд унікальних характеристик, які дозволяють пов'язувати його з витоком з трубопроводу. Наприклад, метан може виникати по-різному. Метан може виникати в атмосфері внаслідок виділення з покладу вуглеводню, виділення з покладу вугілля, виділення із заболочених місць з активними популяціями бактерій, що виробляють метан, виділення з газопроводу, що протікає, і т. д.

Джерела метану, не пов'язані з витоком з трубопроводу, будемо називати природними перешкодами. Природні перешкоди, які ускладнюють встановлення зв'язку між флюїдом-мішенню і витоком з трубопроводу, міняються по силі і типу відповідно до таких факторів, як тип ґрунту, гідрологія, геологічна будова і склад, а також атмосферні умови, погода і землекористування.

Даний винахід можна використовувати в порядку застосування лідара диференціального поглинання (DIAL), який відбирає траєкторію в атмосфері. Була розроблена множина інструментів, реєструючих велику кількість газових домішок в атмосфері. Існує багато типів джерел газу, які, внаслідок своєї просторової і часової динаміки, неможливо точно охарактеризувати цими засобами. Для моніторингу емісій від таких джерел необхідна система, здатна дистанційно вимірювати мінімальні концентрації, причому швидко і на довгих траєкторіях. Цим вимогам відповідають лідари диференціального поглинання (DIAL) з довгими траєкторіями.

Згідно з одним аспектом даного винаходу, оптична лазерна система на основі лідара диференціального поглинання (DIAL) з настроюванням на множинні лінії, встановлена на авіаційній платфо-

рмі, використовується для дистанційного кількісного виявлення витоку з газо- або нафтопроводу.

Згідно з іншим аспектом даного винаходу, одну або декілька мішеней, наприклад, газові домішки, можна використовувати для визначення витоку флюїду з трубопроводу на основі пошукової таблиці, що містить перелік різних газів і їх відповідних багатовимірних спектральних характеристик. Систему DIAL з настроюванням на множинні лінії, яка включає в себе N лазерів (NHM+L), можна настроювати на передачу енергії на попередньо визначених M довжинах хвилі ввімкненої лінії і L довжинах хвилі вимкненої лінії. N довжин хвилі можна вибирати для виявлення однієї або декількох мішеней, наприклад, одного або декількох газів, на основі багатовимірних спектральних характеристик DIAL, перерахованих в пошуковій таблиці. Таким чином, на думку автора винаходу, систему DIAL з настроюванням на множинні лінії, що відповідає винаходу, можна використовувати в різних сферах.

Наприклад, коли літак летить для виявлення одного типу газової суміші, що має відповідні багатовимірні спектральні характеристики, N лазерів системи DIAL з настроюванням на множинні лінії, можна настроювати на N різних довжин хвилі, де N виражає кількість спектральних ліній, що характеризують відповідну газову суміш (M довжин хвилі ввімкненої лінії і L довжин хвилі вимкненої лінії). Аналогічно, коли літак летить для виявлення іншого типу газової суміші, що має іншу відповідну багатовимірну спектральну характеристику, N лазерів системи можна настроювати на інший набір N довжин хвилі (M ввімкнених ліній і L вимкнених ліній), який характеризує цю конкретну газову суміш.

Очевидно, що кожний лазер ввімкненої лінії і вимкненої лінії може бути перестроюваним лазером. Для перестроювання лазера довжину хвилі ввімкненої лінії можна вибирати, настроюючи відповідний лазер на конкретну довжину хвилі. Перестроюваний лазер можна настроювати в реальному часі, за допомогою оператора, що знаходиться на наземному транспортному засобі або літаку, що летить. Залежно від задачі, оператор може настроювати кожний лазер на попередньо визначену довжину хвилі для ідентифікації і кількісної оцінки конкретної характеристики мішені. Оператор, наприклад, будучи сповіщений про те, що конкретна мішень підлягає ідентифікації і кількісній оцінці, може використовувати пошукову таблицю (LUT), яка включає в себе характеристики різних мішеней і відповідність між цими характеристиками і довжинами хвилі лазера ввімкненої лінії або вимкненої лінії. Потім оператор може настроювати кожний лазер, в реальному часі, на ці попередньо визначені довжини хвилі. Крім того, завдяки здатності системи DIAL в реальному часі настроюватися на конкретні довжини хвилі, оператор може перенастроювати і повторно прив'язувати кожний лазер до іншого набору довжин хвилі, в реальному часі. Потім роботу можна продовжувати, шляхом пошуку іншої мішені, що має інші характеристики.

Згідно з іншим аспектом даного винаходу, молекулярний перехід характеристик оптичного пог-

ливання множинних вибраних газових домішок можна оптимально вибирати з пошукової таблиці. Для спрощення розгляду, тільки дві газові домішки вибрані з пошукової таблиці для представлення лазерної системи типу DIAL з настроюванням на множинні лінії згідно з варіантом здійснення даного винаходу. У цьому прикладі, вибраний молекулярний перехід характеристик оптичного поглинання метану і етану в середньоінфрачервоній області електромагнітного спектра. Тому, лазерну систему типу DIAL з настроюванням на 3 лінії можна використовувати для аналізу і виявлення двох вибраних газових домішок. Характеристики поглинання метану і етану можна аналізувати за допомогою двох довжин хвилі ввімкненої лінії (що також іменуються ввімкненою лінією) і однієї довжини хвилі вимкненої лінії (що також іменується вимкненою лінією) для метану, етану і типу земної поверхні (фону), відповідно.

Довжину хвилі ввімкненої лінії можна вибирати поблизу піка оптичного поглинання газу-мішені з мінімальною перешкодою з боку інших газів. Довжину хвилі вимкненої лінії можна вибирати поблизу крила оптичного поглинання газу-мішені при мінімальній перешкоді з боку інших газів і високій відбивальній здатності поверхні землі. Довжини хвилі ввімкненої лінії і вимкненої лінії можна вибирати рівними 3369,8, 3389 і 3429 нанометрів для етану, метану і фону, відповідно.

Як описано вище, можна використовувати перестроювані лазери. Стійкі, безперервно перестроювані лазери можна пристосувати для охоплення всіх газових домішок і фону в пошуковій таблиці. Як описано вище, тільки дві газові домішки вибрані для представлення лазерної системи типу DIAL з настроюванням на множинні лінії згідно з даним винаходом. Автор винаходу встановив, що можна використовувати безперервно перестроювані лазери ND:YLF. Наприклад, можна реалізувати три безперервно перестроюваних лазери ND:YLF для газових домішок метану і етану, і фону, відповідно.

Даний винахід також можна використовувати для вимірювання довжин траєкторій точки максимальної концентрації газів-мішеней. Тому, лазерну систему типу DIAL з настроюванням на множинні лінії, згідно з даним винаходом, можна використовувати для вимірювання довжин траєкторій точки максимальної концентрації для вибраних газів-мішеней для кожної плями сканування. Лазерна система типу DIAL з настроюванням на 3 лінії, що використовується для представлення даного винаходу, вимірює довжини траєкторій точки максимальної концентрації для двох вибраних газів-мішеней для кожної плями сканування, показаної на фіг. 1. Даний винахід також передбачає застосування алгоритмічного і неалгоритмічного аналізу множинних довжин траєкторій точки максимальної концентрації вимірювання для двох газів-мішеней вздовж траєкторії польоту. Нарешті, даний винахід дозволяє відображувати, зберігати і передавати позицію, розмір і форму газових султанів, пов'язаних з витоками з трубопроводу.

Даний винахід, згідно з фіг. 1, включає в себе літак 110 (або наземний, повітряний або космічний

транспортний засіб, наприклад, супутник, вертоліт або автомобіль), бортову лазерну систему 120 виявлення витоку флюїду з трубопроводу на основі DIAL, з настроюванням на множинні лінії, лазерний пучок 130, що передається, газові домішки 150, підземний трубопровід 160, область витоку 170 і тип 180 поверхні землі. Також показані 3-вимірний розріз землі, що включає в себе трубопровід, область витоку і газові домішки, позначений як ціле 190, висота 140 польоту літака і наземний слід 105 траєкторії літака. На основі попередньо визначеної траєкторії польоту, літак 110 летить вздовж наземного сліду 105 траєкторії. У ході польоту, бортові GPS і блок інерціальної навігації (IMU) (не показані) направляють пілота вздовж місцеположення мішені, що випускає газові домішки 150. Коли літак досягає місцеположення мішені, лазерні пучки 130 автоматично націлюються на мішень, в той час як сканувальна система здійснює сканування зони, що оточує мішень. Повернене світло аналізується для формування газових карт або зображень султанів газової домішки в одиницях довжини траєкторії точки максимальної концентрації. У прикладі, показаному на фіг. 1, повернене світло аналізується для формування двовірний газових карт або зображень султанів метану і етану в одиницях довжини траєкторії точки максимальної концентрації.

У системі вимірювання DIAL з 2 лазерами, згідно з винаходом, передаються лазерні імпульси на двох окремих довжинах хвилі. Один лазерний імпульс конкретної довжини хвилі вибирають так, щоб він поглинався газом, що представляє інтерес. Інший лазерний імпульс, з іншою довжиною хвилі, не поглинається. Енергія, відбита зворотно до датчика на обох довжинах хвилі, вимірюється і об'єднується для генерації оцінки довжини траєкторії точки максимальної концентрації газу-мішені. Перейдемо до більш докладного опису цього процесу.

Енергія, що відбивається зворотно до датчика, описується наступним співвідношенням:

$$E(\lambda_{on}, R) = \frac{E_t(\lambda_{on}) \rho(\lambda_{on}) \exp[-2(CPL + C_{bag} \cdot R) \sigma(\lambda_{on})]}{R^2}, \quad (1)$$

$$E(\lambda_{off}, R) = \frac{E_t(\lambda_{off}) \rho(\lambda_{off}) \exp[-2(CPL + C_{bag} \cdot R) \sigma(\lambda_{off})]}{R^2}, \quad (2)$$

де $E_t(\lambda_{on})$ і $E_t(\lambda_{off})$ - передана енергія лазерного імпульсу ввімкненої лінії і вимкненої лінії, $E(\lambda_{on}, R)$ і $E(\lambda_{off}, R)$ - прийнята енергія лазерного імпульсу ввімкненої лінії і вимкненої лінії, $\rho(\lambda_{on})$ і $\rho(\lambda_{off})$ - відбивальна здатність поверхні на довжині хвилі ввімкненої лінії і вимкненої лінії, відповідно, CPL - довжина траєкторії точки максимальної концентрації султана, C_{bag} - фонові концентрації газу-мішені, R - дальність або висота, і $\sigma(\lambda_{on})$ і $\sigma(\lambda_{off})$ - ефективний переріз поглинання газу-мішені як функція довжини хвилі ввімкненої і вимкненої лінії, відповідно.

Виходячи з вищесказаного, можна передбачити, що $E_t(\lambda_{on}) = E_t(\lambda_{off})$, $\rho(\lambda_{on}) = \rho(\lambda_{off})$ і ефективні перерізи $\sigma(\lambda_{on})$ і $\sigma(\lambda_{off})$ газу-мішені на довжинах хвилі ввімкненої лінії і вимкненої лінії не зазнають

значних змін внаслідок змін тиску і температури вздовж траєкторії. В іншому випадку, може бути потрібне повторне вимірювання $\sigma(\lambda_{on})$ і $\sigma(\lambda_{off})$.

Розділивши вимірювану прийнятну енергію імпульсу лазера ввімкненої лінії на енергію імпульсу лазера вимкненої лінії, представлені в рівняннях 1 і 2, одержуємо наступне рівняння DIAL:

$$\frac{E(\lambda_{on}, R)}{E(\lambda_{off}, R)} = \frac{E_t(\lambda_{on}) \rho(\lambda_{on}) \exp[-2(CPL + C_{bag} \cdot R) \sigma(\lambda_{on})]}{E_t(\lambda_{on}) \rho(\lambda_{on}) \exp[-2(CPL + C_{bag} \cdot R) \sigma(\lambda_{off})]} \cdot \frac{R^2}{R^2} \quad (3)$$

На основі вищенаведених припущень, рівняння (3) можна спростити до вигляду

$$\frac{E(\lambda_{on}, R)}{E(\lambda_{off}, R)} = \frac{\exp[-2(CPL + C_{bag} \cdot R) \sigma(\lambda_{on})]}{\exp[-2(CPL + C_{bag} \cdot R) \sigma(\lambda_{off})]} \quad (4)$$

де $E(\lambda_{on}, R)$ означає вимірювану лазерну енергію на довжині хвилі ввімкненої лінії, і $E(\lambda_{off}, R)$ означає вимірювану лазерну енергію на довжині хвилі вимкненої лінії. Вззявши натуральний логарифм від рівняння (4), одержуємо

$$\frac{1}{2} \ln \left(\frac{E(\lambda_{on}, R)}{E(\lambda_{off}, R)} \right) = (CPL + C_{bag} R) (\sigma(\lambda_{off}) - \sigma(\lambda_{on})) \quad (4A)$$

Ефективний переріз на довжині хвилі ввімкненої лінії і вимкненої лінії можна вимірювати (використовуючи одну або декілька газових комірок), що описано нижче з посиланням на фіг. 6 і 7. В будь-якому випадку, ефективний переріз на кожній довжині хвилі стає відомим значенням. Тому, рівняння 4A можна переписати таким чином:

$$\frac{1}{2(\sigma(\lambda_{off}) - \sigma(\lambda_{on}))} \ln \left(\frac{E(\lambda_{on}, R)}{E(\lambda_{off}, R)} \right) = (CPL + C_{bag} R) \quad (5)$$

Рівняння 5 відображає процес вимірювання, використовуваний у варіанті здійснення винаходу, що передбачає дві окремі довжини хвилі лазера. Однак, можуть бути додаткові можливості обробки, оскільки R також може вимірюватися системою і C_{bag} можна оцінити або виміряти. Це дозволяє виробити оцінку CPL:

$$CPL = \frac{1}{2(\sigma(\lambda_{on}) - \sigma(\lambda_{off}))} \ln \left(\frac{E(\lambda_{off}, R)}{E(\lambda_{on}, R)} \right) - C_{bag} R \quad (6)$$

У рівнянні (6), вплив відмінностей в коефіцієнті

$$E(\lambda, R) = E_t(\lambda) T_a(\lambda, R) T_p(\lambda, R) \xi(R) \rho(\lambda) \frac{D^2}{4R^2} T_a(\lambda, R) T_p(\lambda, R) \xi(\lambda) \quad (8)$$

або

$$P(\lambda, R) = P_t(\lambda) T_a(\lambda, R) T_p(\lambda, R) \xi(R) \rho(\lambda) \frac{D^2}{4R^2} T_a(\lambda, R) T_p(\lambda, R) \xi(\lambda) \quad (9)$$

де

$E_t(\lambda)$ або $P_t(\lambda)$ - лазерна енергія, що передається, або потужність, відповідно,

$T_a(\lambda, R) = \exp\left(-\int_0^R k_a(\lambda, r) dr\right)$ означає атмосферне пропускання,

$T_p(\lambda, R) = \exp\left(-\int_0^R k_p(\lambda, r) dr\right)$ означає пропускання султана,

$k_a(\lambda, r)$ - коефіцієнт поглинання атмосфери,

поглинання

в

атмосфері

$\Delta C_a = 2 \left(\int_0^R (k_a(\lambda_{on}, r) - k_a(\lambda_{off}, r)) dr \right)$ не враховується. Однак, рівняння (7) включає в себе цей вплив, де ΔC_a можна оцінити або виміряти.

$$CPL = \frac{1}{2(\sigma(\lambda_{on}) - \sigma(\lambda_{off}))} \left[\ln \left(\frac{E(\lambda_{off}, R)}{E(\lambda_{on}, R)} \right) - \Delta C_a \right] - C_{bag} R \quad (7)$$

Однак, якщо вищенаведені припущення несправедливі, дуже імовірно, що вищенаведена оцінка CPL може неточно характеризувати султан, і може бути потрібен додатковий аналіз рівняння DIAL (3).

Система DIAL з множинними лініями базується на передачі, прийомі і вимірюванні енергій лазера на множинних довжинах хвилі вздовж, по суті, однакового оптичного шляху. Наприклад, одна довжина хвилі лазера або довжина хвилі вимкненої лінії вибирається так, щоб енергія лазера вимкненої лінії не поглиналася в присутність будь-якого компонента, що представляє інтерес. Другий лазер або довжина хвилі ввімкненої лінії вибирається так, щоб лазерна енергія поглиналася, як функція рівня компонента-мішені, що представляє інтерес, який присутній на шляху лазерного пучка. Вимірюючи рівні енергії, що приймається і передається, для лазерної системи з двома лініями, наступне рівняння лідача (рівняння 8 або 9) можна використовувати для виведення більш загального DIAL (рівняння 10) для визначення довжини траєкторії точки максимальної концентрації вимірювання будь-якого компонента-мішені, що представляє інтерес, коли параметри системи (наприклад, юстирування, перекриття пучків, перекриття пучка і поля зору приймача, геометричні формфактори ввімкненої лінії і вимкненої лінії, спектральна характеристика оптики приймача і відбивальна здатність типу покриття поверхні) неоднакові.

Рівняння лідача можна, в порядку узагальнення, виразити через енергію, що приймається і передається, або потужність лазера ввімкненої лінії і вимкненої лінії, таким чином:

$k_p(\lambda, r)$ - коефіцієнт поглинання султана,

$\xi(R)$ - геометричний формфактор,

$\rho(\lambda)$ - відбивальна здатність поверхні землі,

$\frac{D^2}{4R^2}$ - тілесний кут оптики приймача,

R - дальність/висота датчика,

D - апертура телескопа,

$\xi(\lambda)$ - спектральна характеристика приймача, і

$E(\lambda, R)$ або $P(\lambda, R)$ - прийнята розсіяна енергія або потужність лазера, відповідно.

Рівняння DIAL можна, в загальному вигляді, виразити через потужність або енергію, таким чи-

ном:

$$CPL = \frac{1}{2(\sigma(\lambda_{on}) - \sigma(\lambda_{off}))} \left(\ln \left(\frac{P(\lambda_{off}, R) P_t(\lambda_{on}) \xi(R_{on}) \xi(\lambda_{on}) \rho(\lambda_{on})}{P(\lambda_{on}, R) P_t(\lambda_{off}) \xi(R_{off}) \xi(\lambda_{off}) \rho(\lambda_{off})} \right) - 2 \left(\int_0^R (k_a(\lambda_{on}, r) - k_a(\lambda_{off}, r)) dr \right) \right) - R \cdot C_{t-bag} \quad (10)$$

або

$$CPL = \frac{1}{2(\sigma(\lambda_{on}) - \sigma(\lambda_{off}))} \left(\ln \left(\frac{E(\lambda_{off}, R) E_t(\lambda_{on}) \xi(R_{on}) \xi(\lambda_{on}) \rho(\lambda_{on})}{E(\lambda_{on}, R) E_t(\lambda_{off}) \xi(R_{off}) \xi(\lambda_{off}) \rho(\lambda_{off})} \right) - 2 \left(\int_0^R (k_a(\lambda_{on}, r) - k_a(\lambda_{off}, r)) dr \right) \right) - R \cdot C_{t-bag} \quad (11)$$

де

CPL - довжина траєкторії точки максимальної концентрації,

$\sigma(\lambda_{on})$ - ефективний переріз на довжині хвилі λ_{on} ,

$\sigma(\lambda_{off})$ - ефективний переріз на довжині хвилі λ_{off} ,

$P_t(\lambda_{on})$ - передана потужність лазерного імпульсу,

$P_t(\lambda_{off})$ - передана енергія лазерного імпульсу вимкненої лінії,

$E(\lambda_{on}, R)$ - прийнята енергія лазерного імпульсу вимкненої лінії,

$E(\lambda_{off}, R)$ - прийнята енергія лазерного імпульсу вимкненої лінії,

$\xi(R_{on})$ - геометричний формфактор для довжини хвилі ввімкненої лінії,

$\xi(R_{off})$ - геометричний формфактор для довжини хвилі вимкненої лінії,

$\xi(\lambda_{on})$ - спектральна характеристика для довжини хвилі ввімкненої лінії,

$\xi(\lambda_{off})$ - спектральна характеристика для довжини хвилі вимкненої лінії,

$\rho(\lambda_{on})$ - відбивальна здатність фонові поверхні для довжини хвилі ввімкненої лінії,

$\rho(\lambda_{off})$ - відбивальна здатність фонові поверхні для довжини хвилі вимкненої лінії,

$k_a(\lambda_{on}, r)$ - коефіцієнт ослаблення в атмосфері для довжини хвилі ввімкненої лінії,

$k_a(\lambda_{off}, r)$ - коефіцієнт ослаблення в атмосфері для довжини хвилі вимкненої лінії,

R - дальність/висота/відстань від датчика до мішені, і

C_{t-bag} - концентрація газу/флюїду-мішені в атмосфері.

У вищенаведених рівняннях, для представлення даного винаходу вибрана тільки одна газова домішка. Для двох газових домішок можна використовувати лазерну систему типу DIAL з 3 лініями виявлення витоку газу з трубопроводу. Для трьох газових домішок можна використовувати, наприклад, лазерну систему типу DIAL з 4 або більше лініями виявлення витоку газу з трубопроводу і т. д.

Метою виведення більш загального DIAL (Рівняння 11) є вказівка того, що неточний вибір довжини хвилі, роз'юстирування, відмінність в розмірах плями пучка, часткове перекриття пучків і мінливість відбивальної здатності поверхні приводить до ускладнення кількісного виявлення мішені.

Тому, точність, стійкість і повторюваність параметрів системи, наприклад, довжин хвилі, юстирування, розмірів плями пучка, перекриття пучків і точності багатовимірних характеристик однієї або декількох мішеней, передбачених даним винаходом, підвищують простоту, придатність, стійкість, чутливість і продуктивність системи.

У загальному випадку, рівняння багатовимірної характеристики DIAL можна виразити у вигляді:

Варіант 1: ефективні перерізи інших мішеней на попередньо визначених довжинах хвилі ввімкненої лінії і вимкненої лінії для вибраної мішені дорівнюють нулю:

$$x_i = \frac{1}{2} \ln \frac{P(\lambda_{on_line,i}) P_t(\lambda_{on_line,i})}{P(\lambda_{on_line,i}) P_t(\lambda_{on_line,i})} \cong (\sigma_{on,i} - \sigma_{off,i}) CPL;$$

Варіант 2: ефективні перерізи інших мішеней на попередньо визначених довжинах хвилі ввімкненої лінії і вимкненої лінії для вибраної мішені не дорівнюють нулю:

$$x_i = \frac{1}{2} \ln \frac{P(\lambda_{on_line,i}) P_t(\lambda_{on_line,i})}{P(\lambda_{on_line,i}) P_t(\lambda_{on_line,i})} \cong \sum_{l=1}^n (\sigma_{on_line,i}^l - \sigma_{of_line,i}^l) CPL_i;$$

де і означає і-ту довжину хвилі, l - l-тий матеріал, і CPL_i - довжину траєкторії точки максимальної концентрації для матеріалу l, відповідно. Тоді в M-вимірному просторі

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_M \end{bmatrix} = \sum \cdot CPL$$

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \\ \vdots \\ \bar{x}_M \end{bmatrix},$$

$$\text{Covariance}(X) = \frac{1}{Q} \sum_{j=1}^Q (x_j - \bar{X})(x_j - \bar{X})^T.$$

Спостережувані сигнали включають в себе

мультиплікативний і адитивний шум, у вигляді:

$$Y = (\text{Multiplicative_Noise}) \cdot X + \text{Additive_Noise}.$$

Оптимальна оцінка максимальної правдоподібності для CPL в багатовимірному просторі задана наступним рівнянням (12):

$$\text{CPL} = \left\{ \Sigma^T [\text{COV}(X)]^{-1} \Sigma \right\}^{-1} \Sigma^T [\text{COV}(X)]^{-1} X \quad (12)$$

На фіг. 2А показана лазерна система типу DIAL з настроюванням на множинні лінії, позначена як ціле 200. Показано, що лазерна система 200 типу DIAL з настроюванням на множинні лінії включає в себе N лазерів, з яких M є лазерами ввімкненої лінії, і L є лазерами вимкненої лінії (N=M+L).

Наприклад, лазер 220 першої лінії може являти собою лазер ввімкненої лінії, що використовується для першої газової домішки-мішені, лазер 295 другої лінії може являти собою другий лазер ввімкненої лінії, що використовується для другої газової домішки-мішені, і т. д. В одному варіанті здійснення винаходу, лазер 212 N-ної лінії може являти собою лазер вимкненої лінії, що використовується для ідентифікації фонові мішені. Для N лазерів лінії, показаних на фіг. 2, можна використовувати і інші комбінації лазерів ввімкненої лінії і лазерів вимкненої лінії. N лазерів лінії можна, відповідно, прив'язувати до N різних довжин хвилі за допомогою підсилювачів 210, 265 прив'язки до лінії і т. д. і 211.

Для видалення іншої мінливості параметрів системи можна використовувати більше одного лазера вимкненої лінії. Наприклад, мінливість відбивальної здатності типу покриття поверхні (фону) можна видалити для одержання більш простого і надійного рівняння DIAL з множинними лініями.

Згідно з об'ємом даного винаходу передбачається, що, крім лазерів, можна використовувати і інші типи оптичних джерел. Крім того, довжину хвилі ввімкненої лінії можна вибрати поблизу піка характеристики оптичного поглинання газу-мішені і довжину хвилі вимкненої лінії можна вибрати поблизу довжини хвилі крила оптичного поглинання газу-мішені.

Множинні лазерні пучки ввімкненої лінії і вимкненої лінії, відповідно, об'єднуються об'єднувачем 240 для формування об'єданого лазерного пучка 230. Об'єднаний лазерний пучок відбивається дзеркалом 250 в оптику 202 для формування вихідного лазерного пучка 204.

Для області, що представляє інтерес, газові домішки в атмосфері, поблизу землі, можна послідовно сканувати оптикою 202. Вихідний лазерний пучок 204 розсіюється, пропускається і/або відбивається для формування зворотного світла 270. Зворотне світло 270 проходить через набір подільників пучка 280, а потім надходить на набір фільтрів 290. Цей набір фільтрів настроєний, відповідно, на пропускання кожної з множинних довжин хвилі ввімкненої лінії і вимкненої лінії. Набір детекторів 205 перетворює кожний з фільтрованих світлових пучків у відповідний електричний сигнал. Електричні сигнали посилюються підсилювачем 215 і перетворюються на цифрові сигнали набором аналого-цифрових (А/Ц) перетворювачів 225. Оцифровані сигнали обробляються і аналізуються

комп'ютером 235 для ідентифікації і кількісного вимірювання однієї або декількох мішеней. Ці мішені реєструються на основі вибраних оператором спектральних характеристик поглинання і на основі вибраних оператором спектральних характеристик відсутності поглинання фонових мішеней.

На фіг. 2В показана лазерна система DIAL з настроюванням на множинні лінії, позначена в цілому 2000. Показано, що система забезпечує M виходів лазера ввімкненої лінії і L виходів лазера вимкненої лінії. M лазерів ввімкненої лінії включають в себе лазер 2002 першої ввімкненої лінії, лазер 2004 другої ввімкненої лінії, лазер 2006 третьої ввімкненої лінії, і т. д., і лазер 2008 N-ної ввімкненої лінії. M лазерів ввімкненої лінії прив'язані до M різних довжин хвилі першим блоком 2001 прив'язки лазера до ввімкненої лінії, другим блоком 2003 прив'язки лазера до ввімкненої лінії, третім блоком 2005 прив'язки лазера до ввімкненої лінії і т. д., і M-тим блоком 2007 прив'язки лазера до ввімкненої лінії, відповідно.

Система 2000 також включає в себе L лазерів вимкненої лінії. Показано, що система 2000 включає в себе лазер 2010 першої вимкненої лінії, лазер 2012 другої вимкненої лінії і т. д., і лазер 2014 L-тої вимкненої лінії. L лазерів вимкненої лінії прив'язані до L різних довжин хвилі першим блоком 2009 прив'язки лазера до вимкненої лінії, другим блоком 2011 прив'язки лазера до вимкненої лінії і т. д., і L-тим блоком 2013 прив'язки лазера до вимкненої лінії, відповідно. Як описано з посиланням на фіг. 2А, комбінація M лазерів ввімкненої лінії і L лазерів вимкненої лінії складає в цілому N лазерів лінії, включених в систему 2000.

M лазерів ввімкненої лінії і L лазерів вимкненої лінії забезпечують вихідні пучки, що об'єднуються об'єднувачем 2015 для створення об'єданого вихідного пучка. Об'єднаний вихідний пучок надходить через подільник 2017 на передавальну/приймальну оптику 2016, яка, в свою чергу, видає вихідний пучок, що передається, на мішені. Аналогічним чином, пучок, що приймається, приймається передавальною/приймальною оптикою 2016 і надходить на приймач 2017 через подільник 2017.

На фіг. 3, в порядку прикладу лазерної системи з множинними лініями, показана блок-схема лазерної системи типу DIAL виявлення витоку газу з трубопроводу з 3 лініями. Показано, що три лазерних джерела для довжини хвилі вимкненої лінії і двох довжин хвилі ввімкненої лінії, позначені 310, 320 і 330, відповідно, діляться трьома подільниками пучка 340 між вимірювачами 370 потужності, голографічною решіткою 355 і підсистемою 360 газової комірки.

Колінеарні пучки 312, сформовані голографічною решіткою 355, надходять на просторовий фільтр і розширювач 314 пучка для створення колімованого розширеного пучка як фіксованого кінцевого джерела. Будь-які дрейфи, які можуть відбуватися в юстируванні лазерів, легко виявляються у вигляді відмінностей передаваної енергії імпульсу і не впливають на вимірювання довжини траєкторії точки максимальної концентрації газу. Потім пучок джерела з множинними

довжинами хвилі перенаправляється дзеркалами 316 оптичного шляху і швидким дзеркалом 318 сканування з гальванометричним приводом. Нерештні пучок передається для освітлення землі через велику апертуру, повільне дзеркало 322 сканування, яке також використовується для компенсації смуги сканування в зв'язку з помилками тангажа і крену літака.

Оскільки швидке дзеркало 318 сканування з гальванометричним приводом відхиляється на повний кут 25 градусів, наприклад, пучок від джерела відхиляється на 50 градусів на вході телескопа 308. Телескоп 308 забезпечує повний кут відхилення пучка, що передається, в 5 градусів і трасує смугу на землі шириною 35 м, позначену позицією 326, на основі плями 332 лазерного пучка (додаткова кутова ширина включена для компенсації кута зносу літака). Розсіяне світло із зони 328 покриття приймача повертається і входить в повну апертуру телескопа через повільне дзеркало корекції сліду. Швидке дзеркало 318 сканування з гальванометричним приводом також відбиває прийняте світло у вихідну зіницю. Таким чином, швидке дзеркало 318 сканування з гальванометричним приводом зсуває поле зору (FOV) приймача (еквівалентно зсуву зони 328 покриття приймача на землі) синхронно з оптичною віссю пучка, що передається.

Прийняте світло проходить через подільник 311 пучка і через вузькосмуговий інтерференційний фільтр 306. Потім фільтроване світло 304 реєструється детектором 302 і посилюється підсилювачем 390. Посилений сигнал 380 цифрується А/Ц перетворювачем 346.

Для моніторингу стабільності трьох прив'язаних довжин хвилі, частина енергії пучка від лазерних джерел 320 і 330 ввімкненої лінії відводиться в підсистему 360 газової комірки як пучок 350. Газова комірка 365 пропускає тільки вибрані лінії лазера, і два детектори 385 перетворюють лазерне світло на аналогові сигнали, які потім надходять на інтегратори (вимірювачі енергії) 375 для порівняння енергії, що пройшла через відому газову комірку 365, з енергією, що обійшла відому газову комірку 365. Інтегровані лазерні енергії, як два аналогові сигнали, цифруються низькочастотними А/Ц перетворювачами 395 і виводяться на систему 348 комп'ютерного керування, збору і аналізу.

Завершуючи опис фіг. 3, помітимо, що контролер 344 сканера керує швидким дзеркалом 318 сканування і повільним дзеркалом 322 сканування. База даних 342 позицій трубопроводу і підсистема 352 визначення траєкторії польоту і наведення лазера видає позиційні дані трубопроводу і дані траєкторії польоту в систему 348 комп'ютерного керування, збору і аналізу. Прийнятий сигнал, після реєстрації і посилення, направляється на А/Ц перетворювач 346, через сигнальну лінію 380. Після оцифровування, прийнятий сигнал направляється в систему 348 комп'ютерного керування, збору і аналізу. Показано також, що система 348 може вибирати, налаштовувати і регулювати довжини хвилі кожного з лазерів 310, 320 і 330.

Оскільки система, що відповідає винаходу, може розташовуватися на рухомій авіаційній пла-

тформі, множинні лазерні імпульси, в ідеальному випадку, повинні передаватися одночасно, тому всі імпульси повинні попасти в одну і ту ж оптичну пляму. Однак, автор винаходу встановив, що множинні лазерні імпульси, наприклад, три лазерні імпульси, що використовуються для представлення лазерної системи з 3 лініями, показаної на фіг. 3, можуть мати ширину імпульсу близько 20 наносекунд кожний і проміжок часу між імпульсами близько 100 наносекунд. Ці три імпульси можна об'єднувати, як описано нижче, в один оптичний ланцюжок у вигляді триплетного набору імпульсів.

На фіг. 4А, 4В і 4С показана часова діаграма ілюстративної лазерної системи з 3 лініями, яка передає триплетний набір імпульсів згідно з даним винаходом. Згідно з фіг. 4А, один триплетний набір імпульсів включає в себе імпульс ввімкненої лінії метану, імпульс ввімкненої лінії етану і імпульс вимкненої лінії, які передаються до землі. Кожний імпульс має ширину близько 20 нс і проміжок часу між імпульсами близько 100 нс. Згідно з фіг. 4В, для дальності передачі і прийому близько 500 метрів, проходить близько 3,5 мікросекунд між моментом передачі триплетного набору імпульсів і моментом прийому триплетного набору імпульсів. Зменшення амплітуди прийнятих імпульсів метану і етану свідчать про поглинання енергії згідно з характеристиками поглинання двох газових домішок. Як показано на фіг. 4С, ілюстративний інтервал повторення імпульсу може становити 1,0 мс, і частота повторення імпульсу (PRF) може становити 1000 Гц.

На фіг. 5 показана схема ілюстративного розподілу лазерного пучка, сформованого затравочним лазером «метеор». Пучок 702 затравочного лазера «метеор» розщеплюється навпіл подільником 704 пучка з утворенням лазерних пучків 706 і 708. Лазерний пучок 708 розщеплюється навпіл подільником 710 пучка з утворенням лазерних пучків 712 і 714. Лазерний пучок 712 направляється на блок 716 діагностики, і лазерний пучок 714 направляється на перший з N передавальних модулів. Лазерний пучок 706 розщеплюється подільником пучка 718 з утворенням лазерного пучка 720 і лазерного пучка 722. Лазерний пучок 720 направляється на другий з N передавальних модулів. Лазерний пучок 722 направляється на третій з N передавальних модулів. Взаємодія між затравочним лазером «метеор» і двома іншими лазерами для формування єдиного джерела для передачі (наприклад, однієї передачі з N передач) описана з посиланням на фіг. 6.

На фіг. 6 показана блок-схема ілюстративного варіанта здійснення винаходу, що демонструє використання трьох лазерів для створення остаточного лазерного пучка (джерела #1) згідно з варіантом здійснення даного винаходу. На фіг. 6 показані N передавальних модулів, кожний з яких позначений 800. Для простоти пояснення, один передавальний модуль 800 показаний детально. Показано, що контролер 845 «метеора» керує затравочним лазером 805 «метеор» для введення затравочного лазерного пучка довжиною хвилі 1047 нм в лазерний резонатор. Довжина лазерного резонатора прив'язується генератором, керованим напругою

(не показаний), для підтримки регулювання затравочного лазера «метеор» на довжині хвилі 1047 нм. Цей лазер безперервної хвилі (CW) потім оптично прив'язується (оптична прив'язка #1) PZT (п'єзоелектричним перетворювачем), на якому змонтований вихідний об'єднувач. Оптична прив'язка #1 підтримується з використанням методу вібрації і прив'язки, згідно з яким надають PZT вібрацію частотою >10 кГц і використовують сигнал резонансного детектора для одержання корекційного сигналу PZT.

Контролер 890 струму діода і контролер 810 температури діода регулюють вихід лазера 850 з діодною накачкою на довжині хвилі 805 нм. Вихід лазера (850) з діодною накачкою 805 нм колімується і фокусується на стрижень Nd:YLF 860 для забезпечення лазерного посилення. Контролер 820 ЕО перемикача добротності і температурний стабілізатор 830 перемикають добротність стрижня Nd:YLF за допомогою комірки Поккельса на основі KDP (дигідрофосфату калію) для створення імпульсного лазерного виходу на довжині хвилі 1047 нм. Стрижень Nd:YLF накачується протягом приблизно 300-400 мікросекунд до вимкнення накачки 805 нм і потім підпалюється перемикачем добротності. Четвертьхвильова пластина (не показана) регулюється для забезпечення достатніх втрат для збою когерентності лазера, тобто запобігання лазерній генерації, поки перемикач добротності вмикає. Повна довжина резонатора (відстань від HR до OC) дорівнює приблизно 20-25 см.

Імпульсний пучок лазера Nd:YLF з довжиною хвилі 1047 нм зі стрижня 860 оптично передається в оптичний параметричний генератор/оптичний параметричний підсилювач (ОРО-ОРА 870). ОРО-ОРА - це 4-дзеркальний кільцевий резонатор, що містить 2 кристали PPLN (періодично поляризованого ніобату літію). Перший кристал (ОРО) вибраний для створення світла з довжинами хвилі приблизно 3400 нм і приблизно 1510 нм з накачки 1047 нм, а другий кристал (ОРА) вибраний для створення світла з довжинами хвилі приблизно 3400 нм і приблизно 2700 нм з накачкою приблизно 1510 нм. Порожнина резонує на довжині хвилі приблизно 1510 нм, і затравка вводиться на цій довжині хвилі через вихідний об'єднувач. Довжина резонатора прив'язується (оптична прив'язка #2) до затравочної частоти з використанням техніки Паунда-Ревера-Холу (PDH) з модуляцією РЧ (радіочастотою) затравочного діодного лазера з довжиною хвилі приблизно 1510 нм. Одне з чотирьох дзеркал резонатора змонтоване на PZT для забезпечення тонкого настроювання довжини резонатора. Повна довжина резонатора дорівнює приблизно 8 см.

У результаті, кожний з передавальних модулів 800 створює лазерний імпульс тривалістю 20 наносекунд на довжині хвилі приблизно 3400 нм, який фільтрується просторовим фільтром 880. Завдяки регулюванню хронування, що забезпечується комп'ютером 235 (фіг. 2А), і оптичному об'єднанню, що забезпечується об'єднувачем пучків, показаним на фіг. 7, імпульси від кожного з передавальних модулів 800 об'єднуються в N-імпульсний набір (триплетний набір на фіг. 4А).

Імпульсні набори можна генерувати з частотою (PRF) в межах від близько 1000 Гц до близько 2000 Гц.

Довжина хвилі приблизно 3400 нм трьох вихідних імпульсів системи критично важлива. Для підтримки довжини хвилі, частина лазерної енергії, що передається, відводиться з головного лазерного шляху через і в обхід еталонної газової комірки (наприклад, 835) на два детектори MWIR. Ці детектори потім використовуються згідно з методом вібрації і прив'язки (блок оптичної прив'язки #3) для прив'язки імпульсного виходу ОРО-ОРА до ознаки поглинання в газі (за допомогою модулів 875, 865 і 815 на фіг. 6).

Передавальний модуль #1 може виробляти лазерний імпульс з довжиною хвилі 3429,0 нм, передавальний модуль #2 може виробляти лазерний імпульс з довжиною хвилі 3389,0 нм і передавач #3 може виробляти лазерний імпульс з довжиною хвилі 3336,8 нм для довжин хвилі ввімкненої лінії (метан), вимкненої лінії і ввімкненої лінії (етан), відповідно.

Після вироблення трьох лазерних імпульсів згідно з ілюстративним варіантом здійснення винаходу з 3 лініями, імпульси об'єднуються об'єднувачем пучків. На фіг. 7 показана схема ілюстративного варіанта здійснення об'єднувача пучків згідно з варіантом здійснення даного винаходу. Три пучки 902, 904 і 906 (вибрані для метану, сигналу вимкненої лінії і етану) збільшуються за рахунок природного розширення пучка оптичним параметричним підсилювачем (ОРА), з коефіцієнтом посилення 3, і пропускаються через оптичні лінзи 926, 928 і 930, відповідно, і маску 908.

Автор винаходу встановив, що можна використовувати довжину шляху приблизно 250 мм від кожного ОРА до кожної відповідної лінзи. Автор винаходу також визначив, що можна використовувати діаметр приблизно 7,0 мм для кожної лінзи 926, 928 і 930. Передбачається, що можна використовувати лінзи, що мають інший діаметр і інші довжини шляху. Автор винаходу також визначив, що можна використовувати довжину приблизно 7,5 мм між центрами лінз.

Згідно з фіг. 7, метановий пучок 902 і етановий пучок 906 перенаправляються відбивачами 914 і 916, відповідно, до відбивача 918. Всі три пучки перенаправляються відбивачем 918 через лінзи 926, 928 і 930 до маски 908.

Маска 908 включає в себе три апертури 932, 934 і 936, кожна з яких має діаметр близько 5,5 мм, через які можуть проходити пучки. Автор винаходу встановив, що можна використовувати довжину приблизно 7,5 мм між центрами апертур. Апертури 932, 934 і 936 розташовані у вигляді трикутника в круглій області (908) діаметром близько 1,15 см, як показано на фіг. 8А.

Продовжуючи опис фіг. 7 помітимо, що пучки 902, 904 і 906 фокусуються лінзою 938 через фокальну апертуру 912 просторового фільтра 910. Просторовий фільтр 910, що має діаметр приблизно 325 мікрон, впливає на юстирування трьох пучків (902, 904 і 906) і генерує чітку область перекриття розширених пучків. Автор винаходу встано-

вив, що фокус фільтра в межах приблизно 0,5 мм можна використовувати для мішені на дальності близько 500 м. Загальна фокальна апертура 912 для трьох пучків (902, 904 і 906) і маска 908 точно задають перекриття пучків на дальності мішені.

Роз'юстирування між вхідними пучками 902, 904 і 906 внаслідок, наприклад, блукання лазера від імпульсу до імпульсу, термічних напружень лави або похибок початкового юстирування може виявлятися у втратах при передачі енергії для роз'юстированих пучків, а не в зміні розподілу освітлення землі. Таким чином, потенційні помилки довжини траєкторії точки максимальної концентрації ефективно перетворюються в плавні флуктуації енергії імпульсів, що передаються. Флуктуації енергії не впливають на калібрування і можуть вимірюватися моніторами енергії імпульсу.

Пучки 902, 904 і 906, що пройшли через апертуру 912, надходять на колімаційну лінзу 940, де вони вирівнюються один паралельно одному. Автор винаходу встановив, що відстань близько 125 мм між фокусуючою лінзою 938 і просторовим фільтром 912 і відстань близько 250 мм між просторовим фільтром 912 і лінзою 940 дозволяють правильно колімувати три пучки. Частина кожного пучка 902, 904 і 906 відбивається відбірником 942 пучка на газову комірку і детектор 946. Енергія кожного пучка 902, 904 і 906, що залишилася, направляється до землі за допомогою телескопа і сканувального пристрою 944. З висоти близько 500 м формується пляма на землі діаметром приблизно 0,65 м.

Як описано вище, лазерна система з 3 лініями використовується в порядку прикладу лазерної системи з множинними лініями. Відповідно, маска 908, показана на фіг. 7, включає в себе три апертури 932, 934 і 936, як показано на фіг. 8А. Залежно від потрібної кількості лазерних пучків, можна використовувати інші ілюстративні маски. На фіг. 8В і 8С показані ілюстративні варіанти здійснення масок для об'єднання чотирьох і п'яти пучків, відповідно.

Маска, показана на фіг. 8А, об'єднує 3 пучки, згідно з описаним вище. На фіг. 8А показані 3 апертури 1002 в масці 1000. На фіг. 8В показані 4 апертури 1006 в масці 1004, яку можна використовувати в лазерній системі з 4 лініями. На фіг. 8С показано 5 апертур 1010 в масці 1008, яку можна використовувати в лазерній системі з 5 лініями. Хоч маски, показані на фіг. 8А і 8В, виконані у вигляді кола, передбачається, що маски можуть мати і інші конфігурації. Крім того, передбачається, що відстань між апертурами може бути різною. Наприклад, апертури можуть розташовуватися по колу 1012 з центром поблизу осі 1014, як показано на фіг. 8А і 8В.

Хоч винахід проілюстрований і описаний тут з посиланням на конкретні варіанти здійснення, винахід не передбачає обмеження показаними деталями. Навпаки, можна передбачити різні модифікації, що стосуються деталей, в межах об'єму і кола еквівалентів формули винаходу і без відхилення від суті винаходу.

Перелік посилальних позицій

120 Лазерна система виявлення витоку флюї-

ду з трубопроводу на основі DIAL, з настроюванням на множинні лінії

202 Оптика

204 Вхідний/вихідний пучок

205 Детектор

210 Прив'язка лазера 1-ої лінії

211 Прив'язка лазера N-ої лінії

212 Лазер N-ої лінії

215 Підсилювач

220 Лазер 1-ої лінії

225 АЦП

235 Система комп'ютерного керування, збору і аналізу

265 Прив'язка лазера 2-ої лінії

290 Фільтр

295 Лазер 2-ої лінії

2001 1-й блок прив'язки лазера до ввімкненої лінії

2002 Лазер 1-шої ввімкненої лінії

2003 2-й блок прив'язки лазера до ввімкненої лінії

2004 Лазер 2-ої ввімкненої лінії

2005 3-й блок прив'язки лазера до ввімкненої лінії

2006 Лазер 3-ої ввімкненої лінії

2007 M-й блок прив'язки лазера до ввімкненої лінії

2008 Лазер M-тої ввімкненої лінії

2015 Об'єднувач

2016 Передавальна/приймальна оптика 2018 Приймач

2009 1-й блок прив'язки лазера до вимкненої лінії

2010 Лазер 1-ої вимкненої лінії

2011 2-й блок прив'язки лазера до вимкненої лінії

2012 Лазер 2-ої вимкненої лінії

2013 L-й блок прив'язки лазера до вимкненої лінії

2014 Лазер L-ої вимкненої лінії

235 Система комп'ютерного керування, збору і аналізу

302 Детектор

310 3389 нанометрів

314 Розширювач пучка

320 3336,8 нанометрів

330 3429 нанометрів

342 База даних позицій трубопроводу

344 Драйвери сканера і кодера позицій

346 Аналого-цифровий перетворювач

348 Система комп'ютерного керування, збору і аналізу

352 Підсистема визначення траєкторії польоту і наведення лазера

365 ГК

370 ВП

390 Підсилювач

395 Низькочастотний АЦП

716 Діагностика

800 Джерело 4

805 Затравочний лазер «метеор» НВ Nd:YLF

810 Контролер температури діода

815 Діодний лазер для затравки зовнішнього лазерного резонатора ОРО

820 Контролер ЕО перемикача добротності

830 Температурний стабілізатор
 835 Еталонна комірка
 840 Прив'язка довжини резонатора ОРО до
 затравочного лазера
 845 Контролер «метеора»
 850 Діодні лазери 805 нм
 855 Прив'язка довжини резонатора Nd:YLF до
 затравочного лазера

860 Лазер Nd:YLF з регулюванням добротності
 і затравкою
 865 Контролер затравочного лазера
 870 ОРО-ОРА з введенням затравки
 875 Схема прив'язки довжини хвилі затравоч-
 ного лазера
 880 Просторовий фільтр
 890 Контролер струму діода

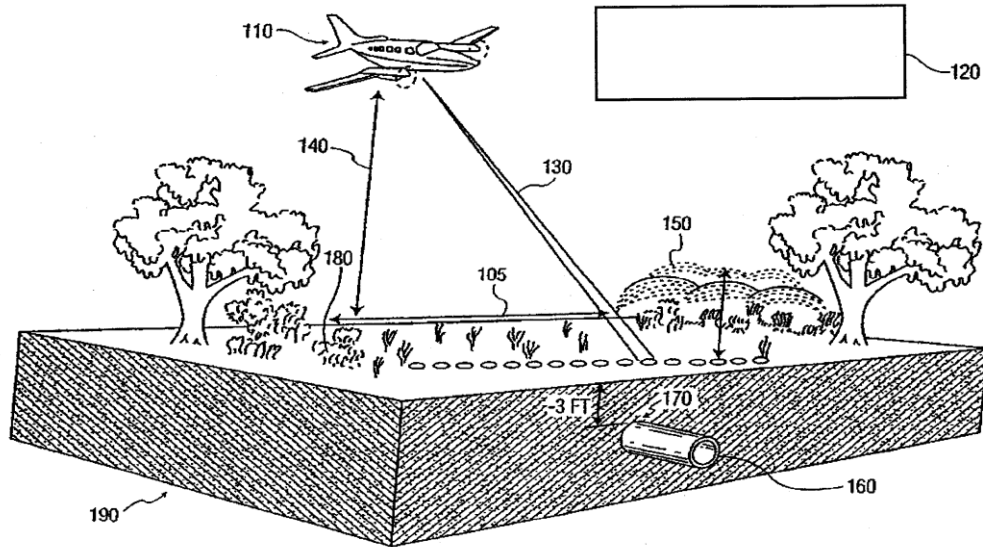


Fig. 1

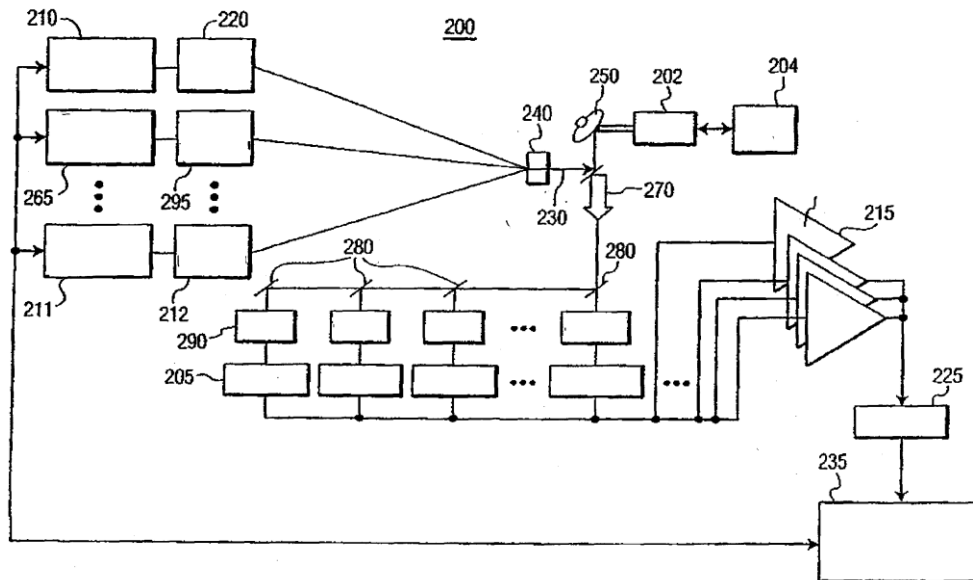


Fig. 2

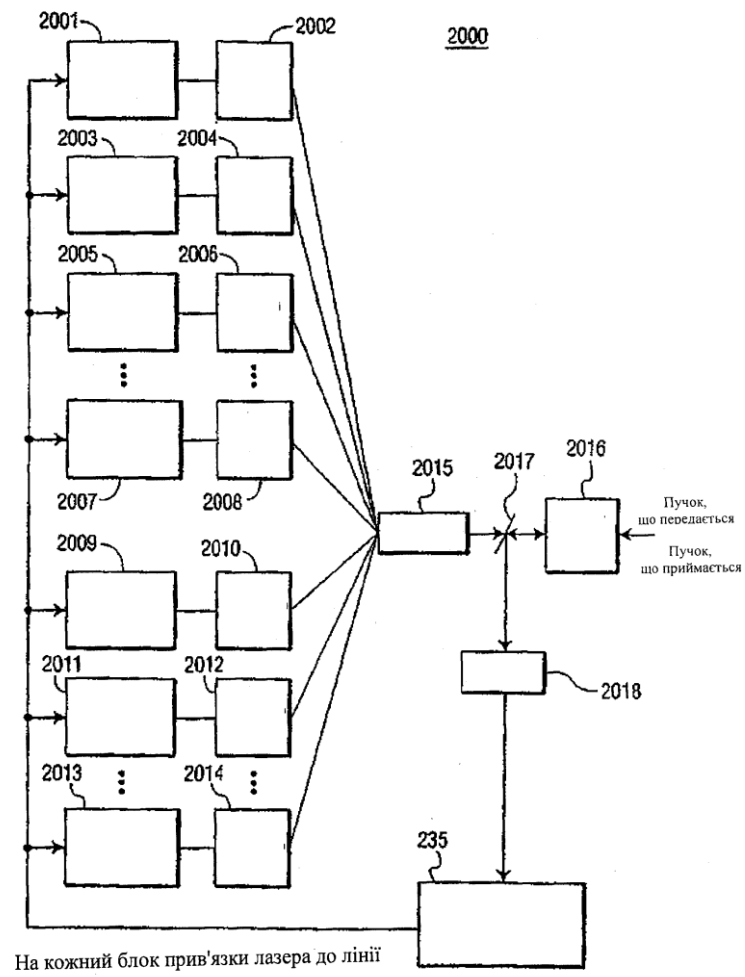
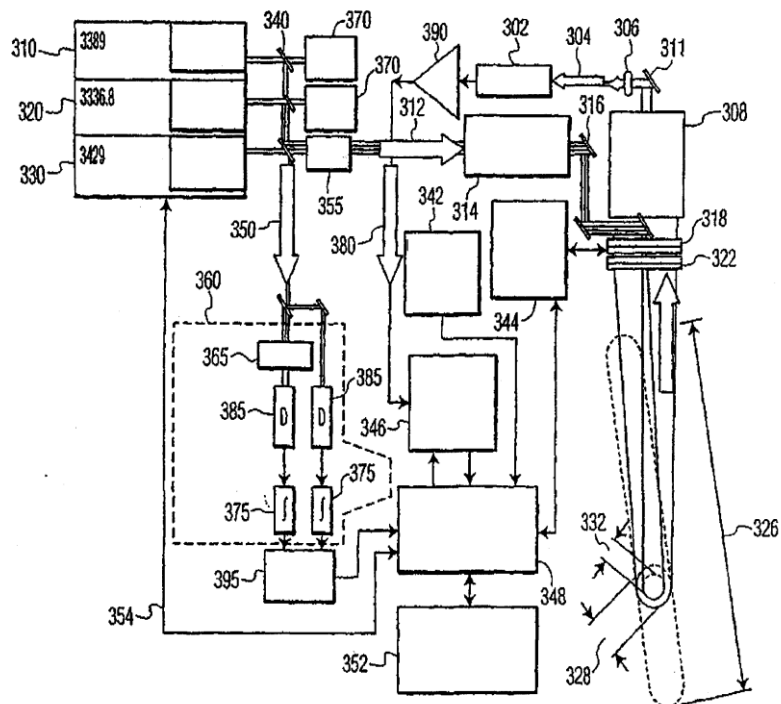
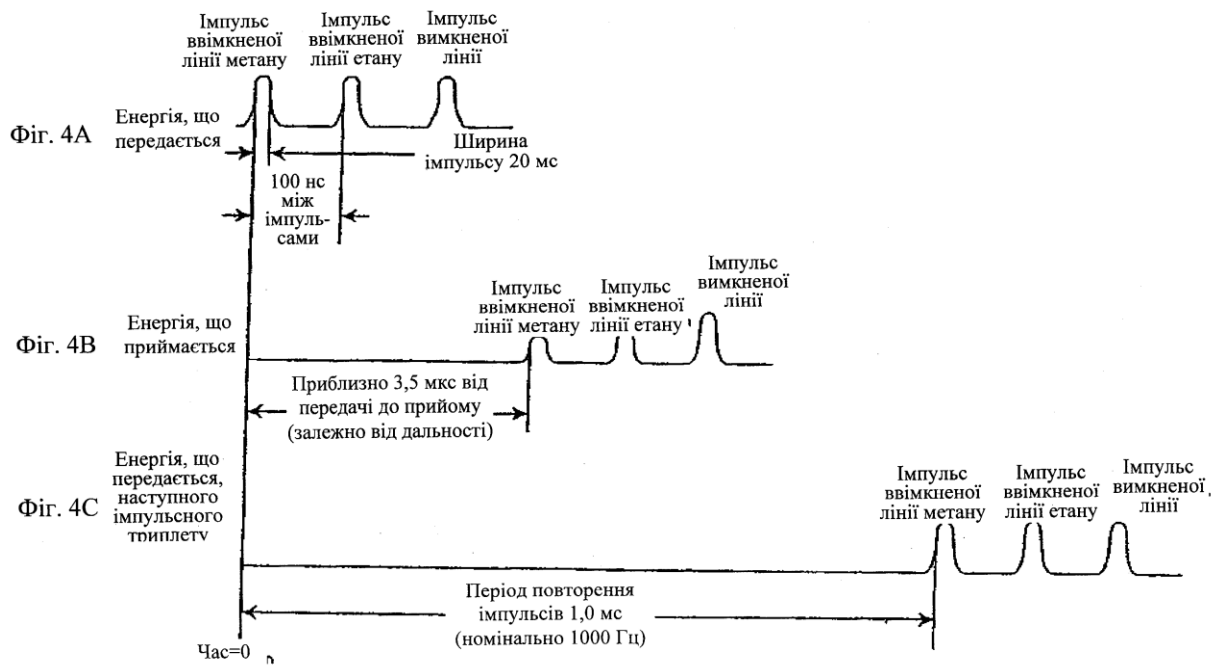
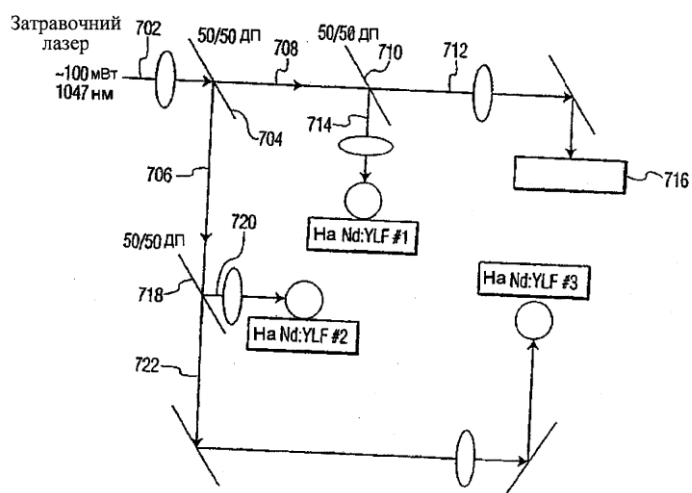


Fig. 2B

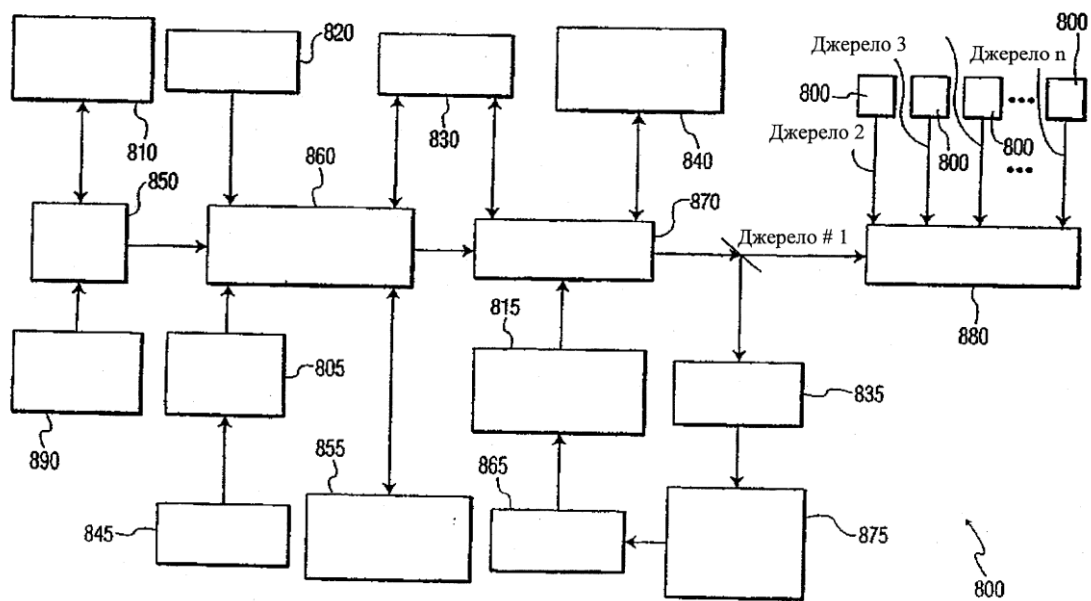


Фиг. 3

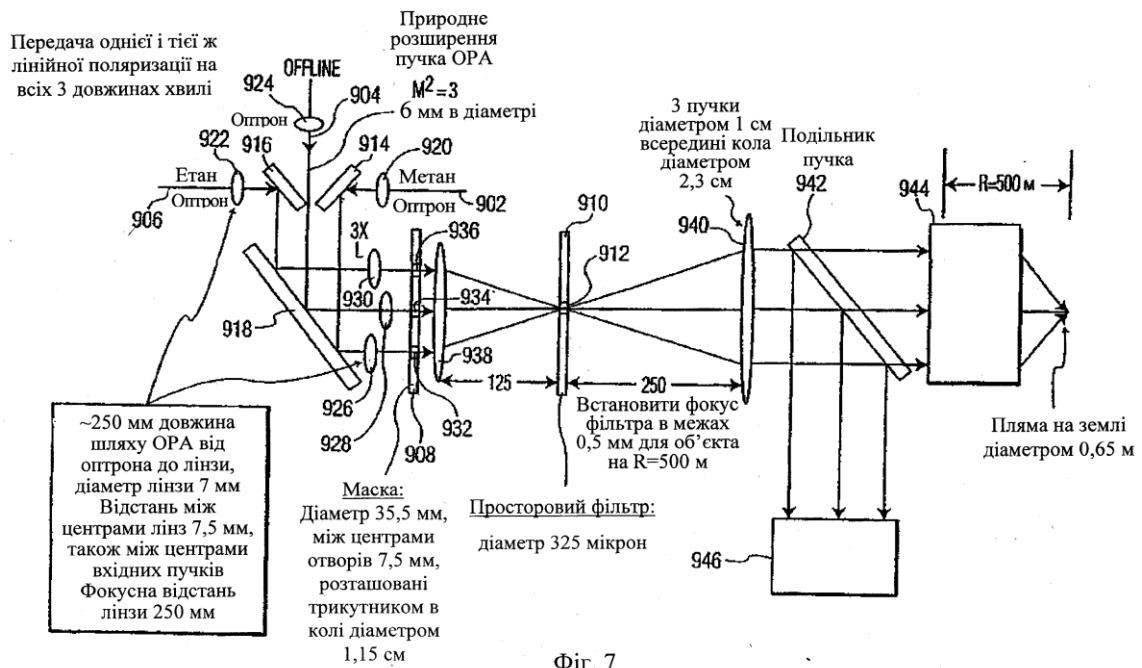




Фиг. 5



Фиг. 6



Фіг. 7

