

ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ СТРУЙНО-КАПЕЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ТРЕХКООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НАПРЯЖЕННОСТЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО, МАГНИТНОГО И ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЕЙ МЕТОДОМ ВИСЯЩЕЙ КАПЛИ. ЧАСТЬ 1

В статье рассматриваются принцип действия и основные компоненты струйно-капельных оптических измерительных систем, работающих на основе метода висящей капли для контроля напряженностей электрического поля, магнитного поля и гравитационного поля.

Для осуществления чувствительности висящей капли к электрическому или магнитному полям предложено ее электростатически заряжать или создавать ее из магнитной жидкости, а ее масса позволяет чувствовать изменения гравитационного поля. Использование магнитных жидкостей в качестве основы висящей капли наиболее многофункционально для измерений напряженностей электрического поля, магнитного поля и гравитационного поля.

Рассматривается реализация нулевого метода измерений с использованием висящей капли в качестве устройства сравнения, нуль-органа, воспринимающей разность воздействий измеряемого и опорного(ых) поля(ей) на уровне квазинулевых трехкоординатных смещений. Они измеряются высокоточными оптическими способами измерений. Анализируются различные варианты современных оптических систем измерений.

Ключевые слова: висящая капля, напряженность электрического поля, напряженность магнитного поля, напряженность гравитационного поля, магнитная жидкость, магнитометр, гравиметр, матричный видеорегистратор.

Введение. В исследованиях космического пространства и небесных тел возникает потребность измерений напряженности электрического поля (НЭП), напряженности магнитного поля (НМП) и напряженности гравитационного поля (НГП). Контроль НЭП и НМП также используется при проверках элетромагнитной совместимости узлов на разных стадиях создания космических аппаратов (КА).

Контроль геомагнитных параметров Земли является важной задачей с возможностью использования их для навигации и локации КА. Поэтому прогресс в создании универсальных методов и средств измерения НЭП, НМП и НГП является актуальной задачей.

Измерениям этих параметров посвящено много научных публикаций [1–6], и активность таких исследований обусловлена бурным развитием микро-, оптоэлектроники и других направлений технической физики.

В авторских работах [7–9] обсуждались вопросы построения струйно-капельных оптических измерительных систем (СКОИС) для измерения НЭП. В основе их работы лежат две идеи:

1) создание направленного потока заряженных капель, траектория движения которых чувствительная к воздействию НЭП, как в кинескопе телевизора;

2) использование капель в качестве криволинейных отражателей для стробоскопического триангуляционного оптического измерителя этих смещений.

Однако такие СКОИС сложны в реализации, имеют ограничения функциональных возможностей за счет контроля только лишь НЭП и ограничения чувствительности по следующим причинам:

— из-за предельного значения заряда капель, определяемого условием Рэллея, связанного с возможным вынужденным их дроблением;

— импульсного режима работы измерительной системы;

— осуществления триангуляционных измерений с необходимостью измерений поперечных смещений лазерного луча относительно его оси, обладающего существенно меньшей разрешающей способностью по сравнению с т.н. «продольными» измерениями смещений.

Совершенствование СКОИС за счет устранения или минимизации этих недостатков обуславливает поиск новых технических решений. И одно из направлений может быть связано с использованием неподвижных капель: висящей (висячей) на капилляре или лежащей на поверхности, например, магнитной жидкости (МЖ), чувствительной к НЭП, НМП и НГП с высокоточным определением ее положения.

Применение метода висящей капли наиболее распространено в тензиометрии для измерения поверхностного или межфазного натяжения жидкостей и в смежных областях [10–12]. И поэтому разработка и исследование многофункциональных СКОИС для измерений НЭП, НМП и НГП на основе метода висящей капли является актуальной задачей. Рассмотрение таких СКОИС в открытой печати ранее не было представлено. Данная работа направлена на устранение этого недостатка.

Данная статья является началом серии статей, рассматривающих принцип действия и основные компоненты СКОИС на основе висящей капли.

1. Основы принципа действия и устройство СКОИС на основе висящей капли для контроля НЭП, НМП и НГП. В разделе обсуждаются принцип действия СКОИС с висящей каплей для контроля НЭП, НМП и НГП и одно из устройств, реализующих ее.

1.1. Основы принципа действия СКОИС контроля НЭП, НМП и НГП.

В основе данного способа измерений лежит возможность использования в качестве чувствительного элемента к постоянным или медленно меняющимся НЭП, НМП и НГП висящей капли с одновременным высокоточным оптическим контролем ее смещений. Для измерений используются следующие способности:

- висящая капля с электростатическим зарядом $q_{\text{кап}}$ чувствительна к электрическому полю E ;
- висящая капля из МЖ чувствительна к магнитному полю H ;
- висящая капля обладает массой $m_{\text{кап}}$ и поэтому чувствительна к гравитационному полю G .

В процессе измерений на висящую каплю помимо входных измерительных параметров $E_{\text{изм}}$, $H_{\text{изм}}$ и $G_{\text{изм}}$ оказывают влияние компенсирующие воздействия опорными (мерами) параметрами: электрическим полем $E_{\text{он}}$, если висящая капля заряжена, и/или магнитным полем $H_{\text{он}}$, если висящая капля создана на основе МЖ. Так, итоговое смещение пытаются свести к квазиуловому минимальному разрешимому смещению на уровне порога чувствительности. Этим реализуют нулевой метод измерений, в котором висящая капля, выполняет функцию трехкоординатного устройства сравнения (нульоргана, компаратора) разности между входными и опорными параметрами. Принимается квазистатический режим работы СКОИС с низкой, стремящейся к нулю $v_{\text{кап}} \rightarrow 0$ скоростью движения висящей капли.

Выражение для векторного результата такого сравнения с использованием квазиулового вектора $\Delta l_{p\Sigma}$ можно записать в общем виде:

$$\overline{\Delta l(E_{\text{изм}}, H_{\text{изм}}, G_{\text{изм}})} - \overline{\Delta l(E_{\text{он}}, H_{\text{он}})} = \overline{\Delta l_{p\Sigma}} \approx 0, \quad (1)$$

где $\overline{\Delta l(E_{\text{изм}}, H_{\text{изм}}, G_{\text{изм}})}$ — смещение висящей капли при воздействии измеряемых параметров НЭП; НМП и НГП, $\overline{\Delta l(E_{\text{он}}, H_{\text{он}})}$ — смещение висящей капли при общем воздействии опорных НЭП и НМП; $\overline{\Delta l_{p\Sigma}}$ — квазиуловый вектор, определяемый разрешающей способностью измерений трехкоординатных смещений висящей капли.

На данном этапе исследований СКОИС на основе висящей капли из-за сложности учета всех физических параметров и составляющих погрешности примем, что порог чувствительности измерений $\Delta l_{\text{пор}\Sigma}$ равен разрешающей способности $\Delta l_{p\Sigma}$ средств

измерений трехкоординатных смещений висящей капли: $\Delta l_{\text{пор}\Sigma} = \Delta l_{p\Sigma}$, используя в дальнейшем второй параметр.

Соответственно, при независимых воздействиях измеряемых параметров выражение (1) можно разложить на три формулы:

при измерениях НЭП:

$$\overline{\Delta l(E_{\text{изм}})} - \overline{\Delta l(E_{\text{он}})} - \overline{\Delta l(H_{\text{он}})} = \overline{\Delta l_{p\Sigma}}; \quad (2)$$

при измерениях НМП (в режиме работы магнитометра):

$$\overline{\Delta l(H_{\text{изм}})} - \overline{\Delta l(E_{\text{он}})} - \overline{\Delta l(H_{\text{он}})} = \overline{\Delta l_{p\Sigma}}; \quad (3)$$

при измерениях НГП (в режиме работы гравиметра):

$$\overline{\Delta l(G_{\text{изм}})} - \overline{\Delta l(E_{\text{он}})} - \overline{\Delta l(H_{\text{он}})} = \overline{\Delta l_{p\Sigma}}; \quad (4)$$

где $\overline{\Delta l(E_{\text{изм}})}$ и $\overline{\Delta l(E_{\text{он}})}$ — смещения висящей капли с электростатическим зарядом $q_{\text{кап}}$ при воздействии на нее измеряемого $E_{\text{изм}}$ и опорного $E_{\text{он}}$ электрических полей, $\overline{\Delta l(H_{\text{изм}})}$ и $\overline{\Delta l(H_{\text{он}})}$ — смещения висящей капли МЖ при воздействии на нее измеряемого $H_{\text{изм}}$ и опорного $H_{\text{он}}$ магнитных полей, $\overline{\Delta l(G_{\text{изм}})}$ — смещения висящей капли от воздействия измеряемого гравитационного поля $G_{\text{изм}}$.

Длина вектора $\Delta l_{p\Sigma}$ определяется геометрической суммой трехкоординатных составляющих $\Delta l_{p x'}$, $\Delta l_{p y}$ и $\Delta l_{p z'}$, принимая условие нормального распределения каждой из них:

$$\Delta l_{p\Sigma} = \sqrt{\Delta l_{p x}^2 + \Delta l_{p y}^2 + \Delta l_{p z}^2}, \quad (5)$$

где $\Delta l_{p x'}$, $\Delta l_{p y}$ и $\Delta l_{p z}$ — разрешающие способности при измерении смещений висящей капли по трем осям ОХ, ОУ и ОZ.

Висящая капля является объемным телом, поэтому для исключения влияния ее размера на результат нужно осуществлять измерения смещений в двух противоположных точках или с учетом дополнительной опорной координаты. Тогда вместо одного измерения для каждой из трех осей ОХ, ОУ и ОZ будет два, позволяя записать (на примере измерений для оси ОХ):

$$\Delta l_{p x} = \sqrt{\Delta l_{p x1}^2 + \Delta l_{p x2}^2}. \quad (6)$$

С учетом этого уравнение (5) для трех координат можно переписать к виду

$$\Delta l_{p\Sigma} = \sqrt{\Delta l_{p x1}^2 + \Delta l_{p x2}^2 + \Delta l_{p y1}^2 + \Delta l_{p y2}^2 + \Delta l_{p z1}^2 + \Delta l_{p z2}^2}, \quad (7)$$

которое при использовании одинаковых измерительных средств и равенства $\Delta l_{p x1} = \Delta l_{p x2} = \Delta l_{p y1} = \Delta l_{p y2} = \Delta l_{p z1} = \Delta l_{p z2}$ можно преобразовать к новому выражению (на примере оси ОХ):

$$\Delta l_{p\Sigma} = \Delta l_{p x} \sqrt{6} \approx 2,45 \cdot \Delta l_{p x}. \quad (8)$$

Рассмотрение различных вариантов современных высокоточных оптических измерительных систем контроля смещений висящей капли с учетом полученных выражений будут рассмотрены далее.

1.2. Устройство СКОИС на основе висящей капли для контроля НЭП, НМП и НГП.

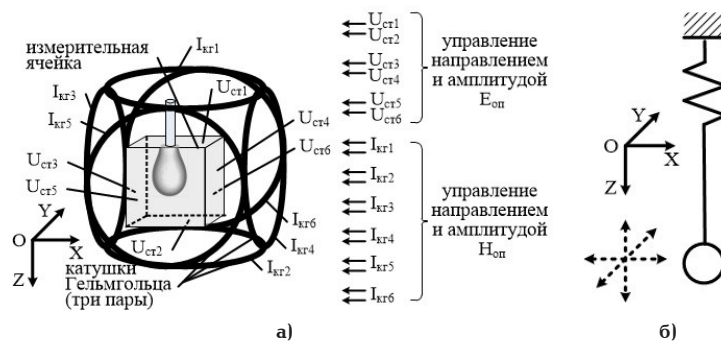


Рис. 1. Измерительная ячейка СКОИС с висящей каплей внутри пустотелого куба и трех пар катушек Гельмгольца (трехкоординатный измеритель смещений капли не показан)

В статье рассматривается вариант СКОИС, в котором измерительная ячейка (рис. 1а) представляет собой пустотелый куб с полупрозрачными металлизированными покрытиями, нанесенными на три его пары противоположных сторон (стенки) размером $I_{ия}$, формирующих три пары обкладок, сориентированных по осям OX , OY и OZ . Сверху к измерительной ячейке подходит тонкий капилляр, формирующий внутри нее с помощью управляемого дозатора (на рис. 1а не показан) из небольшого объема вытекшей жидкости, преимущественно МЖ, висящую каплю, подобно маятнику с возможностью углового отклонения.

Одно из направлений развития подобных исследований может быть связано с использованием в качестве чувствительного элемента маятника на подпружиненном подвесе (рис. 1б) с тремя степенями свободы за счет возможности квазинулевых смещений вдоль осей: OX , OY и OZ . На основе этого возможна группа технических решений, особенности которой будут рассмотрены в следующих авторских публикациях.

Подведение трех сигналов $\Delta U_{on x'}$, $\Delta U_{on y'}$ и $\Delta U_{on z'}$ к трем парам противоположных металлизированных покрытий измерительной ячейки формирует внутри нее пропорциональное опорное электрическое поле E_{on} , состоящее из трех компонент $E_{on x}$, $E_{on y}$, $E_{on z}$. Выражение для E_{on} с учетом зависимости от ΔU_{on} и длины стороны кубической измерительной ячейки $I_{ия}$, можно записать в следующем виде:

$$E_{on} = \frac{U_{on}}{I_{ия}} = \frac{1}{I_{ия}} \sqrt{\Delta U_{on x}^2 + \Delta U_{on y}^2 + \Delta U_{on z}^2} \quad (9)$$

Придание висящей капле электростатического заряда $q_{кан}$ делает ее чувствительной к НЭП, а воздействие на нее трехкомпонентного опорного электрического поля E_{on} определяется силой Кулона $F_{кул}$:

$$F_{кул} = q_{кан} \cdot E_{on} = \frac{q_{кан}}{I_{ия}} \sqrt{\Delta U_{on x}^2 + \Delta U_{on y}^2 + \Delta U_{on z}^2} \quad (10)$$

Естественным ограничением для $\Delta U_{on x'}$, $\Delta U_{on y'}$ и $\Delta U_{on z'}$ является напряжение пробоя, составляющее для воздуха $U_{пр} \approx 20$ кВ/см.

Вокруг измерительной ячейки также расположены три пары соосных катушек Гельмгольца, сориентированных друг против друга, с осями каждой пары вдоль OX , OY и OZ .

Параметры таких катушек Гельмгольца могут быть следующими. В одной из экспериментальных установок [13] однородное магнитное поле вдоль одного из направлений создавалось в зазоре 60 мм между двумя параллельно расположенными катушками Гельмгольца, каждая из которых, имея сопротивление ≈ 8 Ом и индуктивность $\approx 17,5$ мГн, создана намоткой 250 витков в форме кольца диаметром 120 мм проводом диаметром 0,9 мм. Катушки градуировались с использованием тесламетра РНУВЕ, формируя при проходящем в катушках токе 1 А НМП ≈ 3 кА/м (38 Э). Пропускаемый ток в экспериментах мог достигать 3 А.

В исследованиях [14] катушки Гельмгольца имели примерно близкие к вышеуказанным значения параметров. Так, каждая катушка имела внешний диаметр 122,5 мм, состоя из 390 витков провода диаметром 1 мм. И при пропускании тока 4 А НМП достигала 4 кА/м. Протекание токов $I_{x1'}$, $I_{x2'}$, $I_{y1'}$, $I_{y2'}$, I_{z1} и I_{z2} через вышеупомянутые катушки Гельмгольца приводит к формированию однородного магнитного поля H_{on} в пространстве измерительной ячейки 1, амплитуда и пространственное направление вектора которого определяется суперпозицией трех составляющих $H_{on x}$, $H_{on y}$, $H_{on z}$.

Взаимодействие МЖ с внешним магнитным полем можно описать следующим образом. МЖ является суперпарамагнетиком и проявляет свои магнитные свойства только при воздействии внешнего магнитного поля, не сохраняя остаточной намагниченности при его исчезновении. Взаимодействие с внешним магнитным полем проявляется не только в ориентации магнитных моментов частиц, но и во влечении, тяге частиц в область сильного поля.

Суммарный вектор притяжения частиц МЖ, притягивающий ее каплю и смещающий ее на вектор $\Delta(H_{on})$, обусловлен магнитной объемной силой F_{mar} :

$$F_{mar} = \mu_0 \cdot M(H) \cdot H_{on} \quad (11)$$

где μ_0 — магнитная проницаемость, $M(H)$ — намагниченность МЖ, зависящая от внешнего магнитного поля и являющаяся функцией НМП.

Функция $M(H)$ является нелинейной (рис. 2) и может быть аппроксимирована для двух диапазонов значений НМП. При малых значениях H , не превышающих 5...7 кА/м, которые наиболее интересны для целей данных исследований, проявляется линейная связь между M и H :

$$M(H) = \chi H, \quad (12)$$

где χ — начальная магнитная восприимчивость МЖ.

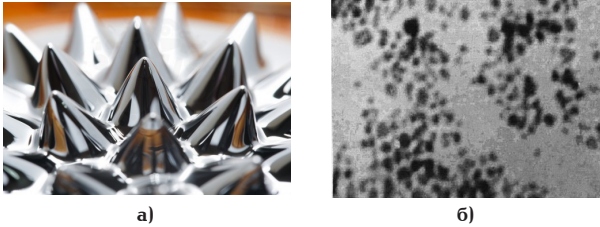


Рис. 2. Магнитная жидкость: пики на поверхности при воздействии внешнего магнитного поля [18], электронная фотография частиц [17]

При возрастании значений НМП, превышающих вышеуказанные значения, для известных экспериментально определенных кривых намагничивания МЖ, часть которых упомянута в [15], активно используется немного упрощенное, но достаточно точное выражение, связывающее M и H [15, 16]:

$$M(H) = \frac{M_s \cdot H}{H_m + H}, \quad (13)$$

где H_m — напряженность полунасыщения, т.е. значение НМП, при котором намагниченность МЖ равна половине намагниченности ее насыщения $M = M_s/2$.

В связи с тем, что НМП H_{on} зависит от трех пар протекающих токов $I_{к11}-I_{к12}$, $I_{к33}-I_{к14}$ и $I_{к55}-I_{к16}$ (рис. 1а), в каждой из трех пар катушек Гельмгольца, расположенных в соответствии с осями ОХ, ОУ и ОZ:

$$H_{on} = k_{mag} \cdot I_{on} = k_{mag} \sqrt{\Delta I_{onx}^2 + \Delta I_{ony}^2 + \Delta I_{onz}^2}, \quad (14)$$

где k_{mag} — коэффициент пропорциональности НМП. Это позволяет записать следующее уравнение:

$$F_{mag} = \mu_0 M(H) H_{on} = \mu_0 M(H) k_{mag} \sqrt{\Delta I_{onx}^2 + \Delta I_{ony}^2 + \Delta I_{onz}^2}. \quad (15)$$

Выражение для силы тяжести, действующей на висющую каплю, с учетом системы координат СКОИС можно записать в следующем виде:

$$F_{тяж} = m_{кан} g = m_{кан} \sqrt{g_x^2 + g_y^2 + g_z^2}, \quad (16)$$

где g_x , g_y и g_z — три ортогональные компоненты силы тяжести относительно системы координат СКОИС.

2. Жидкости для использования в СКОИС на основе висящей капли для контроля НЭП, НМП и НГП. В соответствии с уравнениями (2)–(4) и принципом действия к жидкости, используемой для формирования висящей капли, предъявляются требования чувствительности к электрическому и/или магнитному полю, а также высокой отражающей способности.

Для измерения НЭП и НГП также могут использоваться обычные технические жидкости без магнитоуправляемых свойств, являясь фактически специальными чернилами. Так они представляют собой водный раствор с непрозрачным красителем (с высоким поглощением излучения) и пигментом типа «металлик» на основе нанопорошков металлов (алюминий, бронза, медь в т.ч. с добавками «под золото») с размерами частиц $\leq 50-100$ нм с высоким

коэффициентом отражения. Особенности использования различных жидкостей в СКОИС ранее уже были рассмотрены в [7–9].

Магнитные жидкости (МЖ) в природе не существуют, были созданы искусственно в середине 1960-х годов и обладают магнитоуправляемыми свойствами (рис. 2а). Основная особенность МЖ заключается в том, что она является суперпарамагнетиком из-за того, что, обладая высокой магнитной восприимчивостью, проявляет свои магнитные свойства только в присутствии внешнего магнитного поля и не сохраняет остаточной намагниченности при его исчезновении. В нулевом магнитном поле совокупность магнитных моментов отдельных наночастиц, составляющих МЖ, направлена произвольно, что в суперпозиции равно нулю.

Структура МЖ представляет взвесь в жидкой немагнитной среде (керосин, вода, толуол, минеральные и кремнийорганические масла и т.п.) микрочастиц размером около 10–15 нм ферро- и ферромагнетиков, например, из высокодисперсного железа, ферромагнитных окислов Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , ферритов никеля, кобальта (рис. 2б) [17].

Высококачественные МЖ могут сохранять однородность в течение многих лет. Наиболее распространены в России и странах СНГ являются следующие МЖ [15]: на основе керосина МК-21, МК-43, МК-52, МК-66, МК-72; на основе трансформаторного масла ММТр-10, ММТр-23, ММТр-44 и на основе воды МВ-4. У таких МЖ имеются следующие основные физические характеристики: плотность ρ (в kg/m^3) меняется в диапазоне от 1037 (МВ-4) до 1650 (МК-72), изменения начальной магнитной восприимчивости χ составляют от 0,1 (ММТр-10) до 4,6 (МК-72). В некоторых исследованиях используют МЖ на основе керосина с магнитной восприимчивостью χ , достигающей 7,0 [14].

Намагниченность МЖ имеет явно выраженную нелинейную зависимость от внешнего магнитного поля $M(H)$ (рис. 3). Также у МЖ из вышеупомянутого ряда (рис. 3) намагниченность насыщения M_s (в kA/m) находится в диапазоне от 3,9 (МВ-4) до 72,5 (МК-72), а напряженность полунасыщения H_m (в kA/m) изменяется от 15,4 (МК-66) до 61,0 (ММТр-10).

3. Анализ возможностей высокоточных измерений отклонений висящей капли. Современные высокоточные оптические способы определения смещений висящей капли или изменения ее формы можно условно разделить на три следующие группы, которые подробно рассмотрены далее.

3.1. Измерение смещений висящей капли лазерными 2D или 3D сканерами. Для данной группы принимается допущение о том, что коэффициент отражения МЖ и уровень оптического сигнала, отраженного от нее, достаточен для устойчивой работы сканеров. Их преимущество заключается в автоматическом сканировании, «ощупывании» объекта оптическим потоком и использовании симметричности висящей капли.

3.1.1. 2D сканирование поверхности висящей капли триангуляционным методом. В процессе измерений осуществляется линейное сканирование дискретными точками лазерного луча и определение двух координат каждой точки (рис. 4а). Дискретность сканирования для модели LLT 29xx-10/VL (с лазером голубого излучения) по оси ОХ достигает 1280 точек на профиль (10 мм), составляя $\approx 7,8$ мкм (поперечная разрешающая способность), а оси ОZ разрешение не превышает 1,0 мкм (про-

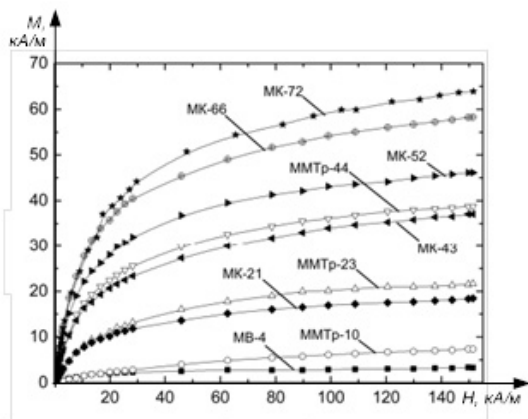


Рис. 3 Кривые намагничивания различных МЖ [15]

дольная разрешающая способность) [19]. Предполагается, что для контроля трехкоординатных смещений висящей капли потребуется два таких датчика: сканирующих ее вдоль осей OX и OZ с учетом ее калиброванной функции формы [10]. Тогда разрешающая способность при измерении трехкоординатных смещений висящей капли упрощенно определится по формуле (5):

$$\Delta l_{p\Sigma} = \sqrt{1,0^2 + 1,0^2 + 7,8^2} \approx 7,9 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

3.1.2. 3D сканирование поверхности висящей капли триангуляционным методом. Так, 3D сканирующая система модели LLT30x0-25 (рис. 4б) [19] имеет следующие разрешающие способности: $\Delta l_{px} = \Delta l_{py} = 7,8$ мкм вдоль осей OX , OY и $\Delta l_{pz} = 1,5$ мкм вдоль оси OZ . С учетом выражением (5) получаем

$$\Delta l_{p\Sigma} = \sqrt{7,8^2 + 7,8^2 + 1,5^2} \approx 11,13 \text{ мкм.}$$

Предполагается, что потребуется один такой датчик, сканирующий висящую каплю вдоль осей OX и OZ с учетом ее калиброванной функции формы [10].

3.2. Фронтальное многоточечное измерение смещений висящей капли при помощи однокоординатного измерения продольных смещений.



а)



б)

Рис. 4. Сканирование поверхности контролируемого объекта [19]: 2D сканирование (а), 3D сканирование (б)

Особенность данного подхода заключается в использовании поверхности висящей капли в качестве отражателей для оптического потока.

С учетом этого для расчетов разрешающей способности смещений висящей капли используется выражение (8).

Средства измерений данной группы рассмотрены далее, их общее количество составит 6 шт. На рис. 5 показана схема измерений смещений висящей капли на примере использования измерителей смещений I_{x1} , I_{x2} и I_{z1} , I_{z2} для двух осей OX и OZ соответственно. Процесс измерения включает процедуру поиска, определения максимального утолщения, «экватора» висящей капли.

3.2.1. Триангуляционный датчик смещений optoNCDT 2300-2DR [19] с синим лазером имеет разрешающую способность 30 нм в пределах диапазона измерений 2 мм. Для таких исходных данных значение $\Delta l_{p\Sigma}$ составляет:

$$\Delta l_{p\Sigma} = 2,45 \cdot 30 \cdot 10^{-9} = 73,5 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

3.2.2. Конфокальный датчик confocalDT IFS2407 [19] имеет разрешение 3 нм в пределах диапазона измерений 0,1 мм. И, так же как и ранее, используя формулу (16), получаем значение $\Delta l_{p\Sigma}$

$$\Delta l_{p\Sigma} = 2,45 \cdot 3 \cdot 10^{-9} = 7,35 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

3.2.3. Лазерный интерферометр белого света interferoMETER 5600-DS имеет разрешающую способность 30 пм (согласно IMS5600) в пределах диапазона измерений 2,1 мм [19]. Тогда, с учетом формулы (16), можно рассчитать $\Delta l_{p\Sigma}$:

$$\Delta l_{p\Sigma} = 2,45 \cdot 30 \cdot 10^{-12} = 73,5 \cdot 10^{-12} \text{ м.}$$

3.2.4. Конфокальный датчик confocalDT IFS2407 имеет разрешение 3 нм в пределах диапазона измерений 0,1 мм [19]. И, так же как и ранее, используя формулу (16), получаем значение $\Delta l_{пор\Sigma}$

$$\Delta l_{p\Sigma} = 2,45 \cdot 3 \cdot 10^{-9} = 7,35 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

3.2.5. Лазерный интерферометр белого света interferoMETER 5600-DS имеет разрешающую способность 30 пм (согласно IMS5600) в пределах диа-

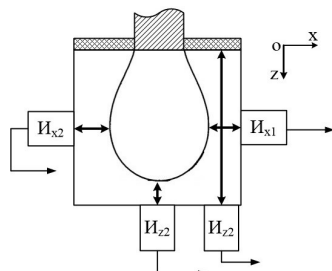


Рис. 5. Многоточечная схема измерений смещений капли

пазона измерений 2,1 мм [19]. Тогда с учетом формулы (16) можно рассчитать $\Delta l_{p\Sigma}$:

$$\Delta l_{p\Sigma} = 2,45 \cdot 30 \cdot 10^{-12} = 73,5 \cdot 10^{-12} \text{ м.}$$

3.2.6. У современных лазерных интерферометров разрешающая способность для контроля продольных смещений объекта записывается следующим выражением:

$$\Delta l_{\text{прог}} = \frac{\lambda \cdot \Delta\varphi_{\Sigma}}{4\pi} = \frac{\lambda}{2n}, \quad (17)$$

где λ — длина волны, $\Delta\varphi_{\Sigma}$ — суммарная фазовая погрешность, основными составляющими которой в основном, согласно [20], являются шумы измерительной системы лазерного интерферометра, n — коэффициент интерполяции, определяемый фазовой погрешностью $\Delta\varphi_{\Sigma}$.

К настоящему времени разрешающая способность современных лазерных интерферометров для продольных перемещений уже достигла субмикрометрических значений [21, 22]. И для дальнейших расчетов можно достаточно уверенно принять $\Delta l_{\text{прог}} = 1 \text{ пм} = 10^{-12} \text{ м}$, получая $\Delta l_{p\Sigma} = 2,45 \cdot 10^{-12} \text{ м}$ и, в соответствии с формулой (17), имеем $n = 316 \cdot 10^3$.

3.3. Измерение смещений границы висящей капли в проходящем свете (на просвет). В данной группе представлено два устройства, осуществляющих измерение смещений висящей капли по положению ее боковых границ в трех основных ортогональных плоскостях: XOZ, YOZ и XOY.

3.3.1. Матричный видеорегистратор. В основе подобных высокоточных оптико-электронных пре-

образований контура [10–12] лежит возможность оцифровки входного изображения и для данного случая границы висящей капли путем дискретизации по пространственным координатам и квантования по уровню яркости (рис.7а, выполнен на основе рисунка из [10]). С учетом того, что размер пикселя для современных матричных видеорегистраторов достигает значений 1 мкм [23], то разрешающая способность при таком определении смещений контура висящей капли может также находиться на уровне 1 мкм. Для трехкоординатных измерений смещений висящей капли потребуется два таких матричных видеорегистратора, расположенных в плоскостях YOZ и XOZ.

3.3.2. Лазерный интерферометр для контроля поперечных смещений границы объекта. Принцип действия такого устройства основан на смещении поля интерференции двух дифракционных порядков лазерного луча, образованных в результате акустооптического (АО) взаимодействия, от границы объекта с последующим измерением фазового набега [24, 25]. При этом, отличаясь лишь только в оптическом тракте измерительной системы, полностью сохраняется общая структура электронного тракта. Поэтому анализ и расчеты уровня шумов для определения суммарной фазовой погрешности $\Delta\varphi_{\Sigma}$ и, соответственно, коэффициента интерполяции n , проведенные ранее для лазерных интерферометров измерения продольных смещений и приведенные в п. 3.2.6, можно использовать и для расчета разрешающей способности лазерных интерферометров данного типа. Отличием будет только то, что вместо полупериода $\lambda/2$ (за счет двойного хода лазерного луча) длины волны лазерного излучения в формуле (17) надо использовать длину интерференционной картины $\Lambda_{\text{ИК}}$ или, при некотором упрощении, длину ультразвуковой волны $\Lambda_{\text{УЗВ}}$ АО модулятора: $\Lambda_{\text{ИК}} \approx \Lambda_{\text{УЗВ}}$. С учетом вышесказанного, разрешающую способность для данного прибора можно определить по формуле:

$$\Delta l_{\text{прог}} = \frac{\Lambda_{\text{УЗВ}}}{n} = \frac{v_{\text{УЗВ}}}{f_{\text{аом}} \cdot n}. \quad (18)$$

Наиболее исследован вариант акустооптического способа определения поперечных смещений на основе АО модулятора со светозвукопроводом из дистиллированной воды (скорость звука

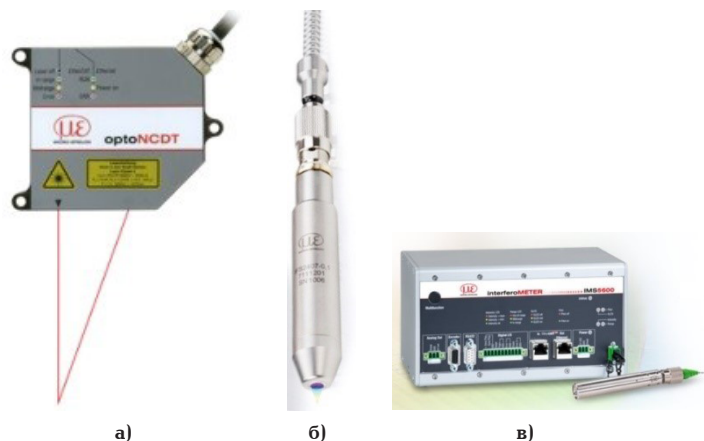


Рис. 6. Устройства для реализации многоточечной схемы измерений смещений капли [19]: триангуляционный датчик смещения optoNCDT 2300-2DR (а), конфокальный датчик confocalDT IFS2407 (б) и лазерный интерферометр белого света interferoMETER 5600-DS (в)

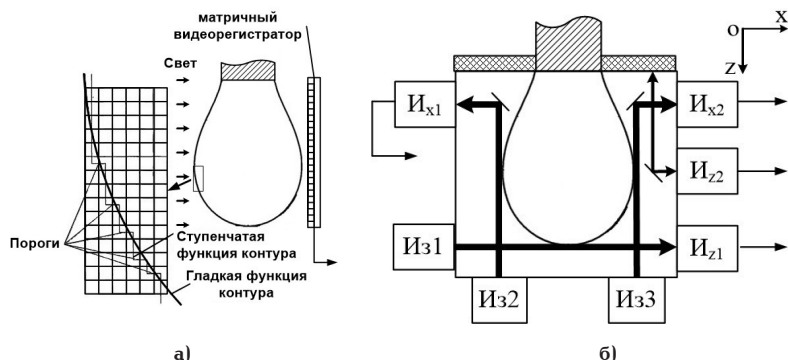


Рис. 7. Устройства измерения смещений границы висящей капли в проходящем свете (на просвет): матричный видеорегистратор (а), лазерный интерферометр для контроля поперечных смещений границы объекта (б)

Таблица 1

Достижимые точностные параметры и количество требуемых средств измерений трехкоординатных смещений висящей капли

№	Способ измерения	Разрешающая способность одной координаты $\Delta l_{пор}$, м	Общее количество средств измерений, необходимое для контроля смещений висящей капли, шт	Разрешающая способность измерений трехкоординатных смещений висящей капли $\Delta l_{\rho\Sigma}$, м
1	2D сканирующая система модели SC3500-80	$\Delta l_{\rho} x=\Delta l_{\rho} y=7,8 \cdot 10^{-6}$, $\Delta l_{\rho} z_1=10^{-6}$	2	$7,9 \cdot 10^{-6}$
2	3D сканирующая система модели LLT30x0-25	$\Delta l_{\rho} x=\Delta l_{\rho} y=7,8 \cdot 10^{-6}$, $\Delta l_{\rho} z_1=1,5 \cdot 10^{-6}$	1	$11,13 \cdot 10^{-6}$
3	Триангуляционный датчик смещения optoNCDT 2300-2DR	$\Delta l_{\rho} x=\Delta l_{\rho} y=\Delta l_{\rho} z=30 \cdot 10^{-9}$	6	$7,35 \cdot 10^{-9}$
4	Конфокальный датчик confocalDT IFS2407	$\Delta l_{\rho} x=\Delta l_{\rho} y=\Delta l_{\rho} z=3 \cdot 10^{-9}$	6	$7,35 \cdot 10^{-9}$
5	Лазерный интерферометр белого света interferoMETER 5600-DS	$\Delta l_{\rho} x=\Delta l_{\rho} y=\Delta l_{\rho} z=30 \cdot 10^{-12}$	6	$73,5 \cdot 10^{-12}$
6	Лазерный интерферометр продольных смещений	$\Delta l_{\rho} x=\Delta l_{\rho} y=\Delta l_{\rho} z=10^{-12}$	6	$\approx 2,45 \cdot 10^{-12}$
7	Лазерный интерферометр для контроля поперечных смещений границы объекта	$\Delta l_{\rho} x=\Delta l_{\rho} y=0,57 \cdot 10^{-9}$, $\Delta l_{\rho} z_1=0,57 \cdot 10^{-9}$, $\Delta l_{\rho} z_2=10^{-12}$	6	$\approx 1,27 \cdot 10^{-9}$
8	Матричный видеорегистратор	$\Delta l_{\rho} x=\Delta l_{\rho} y=\Delta l_{\rho} z=10^{-6}$	2	$\approx 2,45 \cdot 10^{-6}$

$v_{зв} \approx 1450$ м/с), работающего на частоте $f_{аом} = 8$ МГц. Для этих исходных данных получаем разрешающую способность при определении границы капли

$$\Delta l_{non} = \frac{1450}{8 \cdot 10^6 \cdot 316 \cdot 10^3} \approx 0,57 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

Как следует из схемы измерений, представленной на рис. 7б, для контроля смещений висящей капли вдоль осей X и Y нужно по два таких устройства, а вдоль оси Z — такое устройство в паре с интерферометром продольных смещений, описанных в п. 3.2.4. На рис. 7б обозначены: Из1–Из3 — излучатели, Их1, Их2, Из1 — измерители поперечных смещений, Из2 — измеритель продольных смещений. С учетом этого разрешающую способность для трехкоординатных измерений смещений висящей капли можно определить на основе формулы (15) (в нанометрах):

$$\Delta l_{\rho\Sigma} = \sqrt{0,57^2 + 0,57^2 + 0,57^2 + 0,57^2 + 0,57^2 + 0,001^2} \approx 0,57\sqrt{5} = 1,27 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

Вышеприведенные данные по разрешающим способностям при измерении трехкоординатных смещений висящей капли и общее количество средств измерений, необходимое для таких измерений, сведено в табл. 1.

Заключение

1. Построение СКОИС с осуществлением нулевого способа измерений на основе висящей капли позволяет использовать в непрерывном режиме оптические способы измерений, добиваясь максимально возможной разрешающей способности.
2. Использование магнитной жидкости в качестве основы для создания висящей капли наиболее универсально, позволяя осуществить измере-

ния НЭП, НМП и НГП с компенсацией смещений висящей капли электрическим и/или магнитным полями.

3. Современные высокоточные оптические способы измерений смещений капли могут быть реализованы на основе 2D-, 3D-сканирования, фронтальных многоточечных измерений смещений, в проходящем свете (на просвет границы капли).

4. Смещение висящей капли для воздействия опорных полей наиболее удобно осуществить электрическим полем E_{on} , приданием ей электростатического заряда $q_{кан}$ и воздействием на нее магнитным полем H_{on} при использовании магнитной жидкости в качестве основы капли.

5. Максимальная разрешающая способность при измерении трехкоординатных смещений капли достигается при осуществлении многоточечной схемы измерений с использованием лазерных интерферометров продольных измерений смещений.

Библиографический список

- Zhang B., He J. Space electric field measurement system. CN patent 110488103; filed August 28th, 2019; published January 15th, 2021.
- Yue G., Du Z. High-frequency high-precision space electric field measurement system and method. CN patent 112198374; filed September 30th, 2020; published October 22th, 2021.
- Глуховера Е. Г., Бирюков С. В. Датчики напряженности электрического поля на новых физических эффектах и явлениях // Актуальные проблемы современной науки: материалы IX Регионал. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Омск, 2020. С. 47–50.
- Ахмеджанов Р. А., Чередов А. И., Щелканов А. В. Градиентометр напряженности магнитного поля // Омский научный вестник. 2021. № 4 (178). С. 75–79. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-178-75-79.
- Иванов В. В. Автономный орбитальный геомагнитный навигатор // Решетневские чтения. 2011. Т. 2. С. 571–572.
- Конешов В. Н., Михайлов П. С., Соловьев В. Н., Железняк Л. К. Оценка перспективности и разрешающей способности ультравысокотемпературных моделей гравитационного поля земли // Геофизические исследования. 2021. Т. 22, № 1. С. 40–53.
- Леун Е. В. Основы построения струйно-капельных оптических систем измерений напряженности электрического поля. Часть 1 // Омский научный вестник. 2021. № 4 (178). С. 83–90. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-178-83-90.
- Леун Е. В. Основы построения струйно-капельных оптических систем измерений напряженности электрического поля. Часть 2 // Омский научный вестник. 2022. № 1 (181). С. 78–88. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-181-78-88.
- Leun E. V. The best sensitive single-coordinate interference jet-drop measurement of electric field strength // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2182. 012095. DOI: 10.1088/1742-6596/2182/1/012095.
- Козлов П. С. Метод, алгоритмы и специализированное оптико-электронное устройство для вычисления флотационной активности реагентов : дисс. ... канд. техн. наук : 05.13.05.- Курск, 2013.- 117 с.
- Емельяненко А. М. Разработка новых физических и математических методов исследования равновесия в зоне трехфазного контакта: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва, 2004. 237 с.
- Gupta A., Pandey A., Kesarwani H. [et al.]. Automated determination of interfacial tension and contact angle using computer vision for oil field applications // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2021. DOI: 10.1007/s13202-021-01398-6.
- Белых С. С. Оптические исследования процессов ориентационного и структурного упорядочения в магнитных эмульсиях: дис. ... канд. тех. наук. Ставрополь, 2022. 159 с.
- Бушуева К. А., Костарев К. Г., Шмырова А. И. Деформация капли феррожидкости, лежащей на жидкой подложке, в однородном вертикальном магнитном поле // Конвективные течения. 2015. № 7. С. 143–157.
- Моцар А. А. Упруго-диссипативные процессы в ограниченных объемах магнитной жидкости при воздействии магнитных полей применительно к магнитожидкостным виброзащитным устройствам: дис. ... канд. тех. наук. Минск, 2017. 175 с.
- Малсугенов О. В. Каплетруйное движение магнитной жидкости в электрическом и магнитном полях: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Ставрополь, 2003. 158 с.
- Копылова О. С. Особенности движения капли магнитной жидкости в магнитном и электрическом полях: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Ставрополь, 2006 137 с.
- Магнитная жидкость. Фотография поверхности. URL: <https://moscow.mrplomb.ru/magnitnaya-jidkost-ferrofluid-na-osnove-silikona-30-ml> (дата обращения: 30.01.2023).
- Каталог измерительных датчиков компании Майкро-эпсилон. URL: <https://www.micro-epsilon.com> (дата обращения: 30.01.2023).
- Леун Е. В. К вопросу достижения субмикрометрической разрешающей способности акустооптическим двухканальным лазерным интерферометром перемещений с двумя разночастотными фотоприемниками // Омский научный вестник. 2022. № 2 (182). С. 110–118. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-182-110-118.
- Isleif K.-S., Heinzl G., Mehmet M., Gerberding O. Compact multifringe interferometry with subpicometer precision // Physical Review Applied. 2019. Vol. 12 (3). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.12.034025.
- Pisani M. A homodyne Michelson interferometer with subpicometer resolution // Measurement Science and Technology. 2009. Vol. 20. 084008. DOI: 10.1088/0957-0233/20/8/084008.
- Занин К. А., Москатынцев И. В. Перспективы развития космических систем оптико-электронного наблюдения с учётом совершенствования полупроводниковых приёмников изображения // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2022. № 3 (57). С. 3–10.
- Заявка 98103176/28 Российская Федерация, МПК G 01 B 9/02, 11/02. Интерференционное устройство для определения положения границы объекта // Телешевский В. И., Абдикаримов Н. Н., Леун Е. В.; заявл. 17.02.98; опубл.10.12.99.
- Заявка 98108359/28 Российская Федерация, МПК G01 B 11/02. Устройство для измерения отклонений размеров деталей // Телешевский В. И., Леун Е. В., Абдикаримов Н. Н.; заявл. 17.02.98.

ЛЕУН Евгений Владимирович, кандидат технических наук, ведущий инженер АО «НПО Лавочкина», г. Москва.

SPIN-код: 6060-8056

AuthorID (РИНЦ): 367560

AuthorID (SCOPUS): 57200722184

Адрес для переписки: stankin1999@mail.ru

Для цитирования

Леун Е. В. Основы построения струйно-капельных оптических систем трехкоординатных измерений напряженностей электрического, магнитного и гравитационного полей методом висящей капли. Часть 1 // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 114–121. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-114-121.

Статья поступила в редакцию 10.01.2023 г.

© Е. В. Леун