

# Метод цифрового определения координат измерительного комплекса при выполнении измерений в замкнутом помещении

М.Г. Жабицкий, К.В. Черненко

**Аннотация**—В статье детально описан эффективный низко затратный метод определения трехмерных координат объекта внутри помещения, применимый для изолированных помещений и не требующий предварительных замеров или разметки. Детально проанализированы существующие подходы к решению задачи в необходимых масштабах. Показан дефицит инструментов для автоматизированного определения координат точки измерения внутри помещения, обоснованно актуальность рассматриваемой задачи. Сформулирован математический способ решения путем трехмерной триангуляции по известным расстояниям от реперных точек измерительного базиса и его физическая реализация на основе автоматизированного измерения задержек прохождения электромагнитного и акустического сигнала. Предложен оригинальный способ расчета расстояния по временной задержке на основе быстрой калибровки, исключающий необходимость дополнительных датчиков контроля параметров воздушной среды. Описан пошаговый алгоритм реализации метода на базе технологии промышленного интернета вещей.

**Ключевые слова**— Акустический сигнал, промышленный интернет вещей, точка проведения измерения, трехмерные координаты, триангуляция, электромагнитный сигнал.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Для широкого класса приложений важным является контроль пространственного распределения полей физических параметров в замкнутом объеме, например в производственных помещениях. В частности, при проведении контроля факторов, влияющих на безопасность и условия работы персонала, таких как радиационных полей, электромагнитных полей, освещенности, температуры и ряда других необходимо проводить замеры в различных точках рабочего пространства. В ходе комплексных инженерно-радиационных обследований (КИРО) при реконструкции, модернизации, продление срока эксплуатации и выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии систематически

проводятся измерения радиационной нагрузки внутри объекта [1-2]. Аналогичные ситуации, связанные с другими факторами риска, например с поверхностными или объемными химическими загрязнениями выполняются для других объектов повышенной опасности. Во всех этих случаях, желательно знать не только величину контролируемого параметра, но и координаты точки измерений. Достаточно часто для этого используется специализированный персонал (например, дозиметристы), которые осуществляют позиционирование средства измерения вручную в соответствии с полученным заданием. Фиксация значений измеряемого параметра и точки измерения ведется во многих случаях вручную человеком. Такая традиционная технология ограничивает производительность труда, объем контроля, а иногда - и достоверность результатов. Желательно использовать технологию с автоматизированной фиксацией, как измеряемой величины, так и координат точки измерения (положения прибора) в трехмерном пространстве внутри помещения. Задача беспроводной передачи показаний прибора на современном уровне развития цифровых технологий и телекоммуникаций можно считать принципиально решенной. Однако, автоматизированный контроль положения измерительного модуля в общем случае не реализован. Существуют методы, основанные на предварительной разметке помещений для оптического позиционирования и ряд других подходов. Но для редкого выполнения серии детальных измерений в помещении, или измерений в большом наборе помещений подход с предварительной разметкой не является рациональным.

Также на современном уровне технологического развития часто встречаются задачи лазерного сканирования помещений изнутри с получением облака точек для последующего реверсивного проектирования объекта [3-4]. Для адекватного сканирования сложных наполненных оборудованием помещений процедура должна выполняться со многих точек с последующим объединением набора облаков точек в единый массив. Для этого также необходимо корректно решить задачу определения позиции сканирующего устройства (лидера) внутри помещения.

Настоящая работа посвящена эффективному решению описанной задачи определения координат объекта (приборного контейнера) в замкнутом помещении. Помещение может быть радиоизолированным, при этом

Статья получена 11 мая 2023.

Работа представляет собой результат магистерской диссертации (дипломной работы).

М. Г. Жабицкий – зам. Директора Высшей инженеринговой школы НИЯУ МИФИ, Россия.

К.В. Черненко – магистрант Высшей инженеринговой школы НИЯУ МИФИ, Россия.

какой-либо предразметки помещений не предусматривается. Характерный размер - от нескольких метров (офисное или жилое помещение) до 300 метров (цех промышленного объекта, стадион).

## II. ОБЗОР АЛЬТЕРНАТИВ РЕШЕНИЙ

Сама задача измерения положения в трехмерном пространстве широко востребована и решается в воздушном движении, в ходе геодезических измерений, при геопозиционировании дронов или автомобилей и для многих других приложений. Однако для реализованных задач пространственный масштаб иной, как правило, существенно больше – от нескольких сот метров до многих километров, а в космическом пространстве – еще много больше.

Древнейшим техническим способом определения координат является навигация на поверхности Земли по положению небесных тел (звезд на небесной сфере), устойчиво реализованная с 17-го века путем визуально-приборных измерений. Потребителями технологии выступали, прежде всего, мореплаватели, а задача решалась в двумерном варианте на поверхности сферы. Обобщенными координатами выступали долгота и широта, легко пересчитываемые в линейные перемещения.

Задача трехмерного позиционирования к настоящему моменту решена многократно для задач контроля положения летающих объектов самого разного класса – от космической техники до малых дронов [5]. Естественно, фокус внимания сосредоточен на авиационной и ракетной технике, включая гражданские (навигация, диспетчеризация, летная безопасность, научная и коммерческая космонавтика) и широкий спектр потенциально военных приложений. Также задача решалась для геодезических приложений [6], строительного проектирования и строительства всех классов объектов, для решения различных задач наземной навигации и других приложений. В этой ситуации особенно удивителен дефицит рассмотренных реализованных решений для целого класса типовых ситуаций – определения трехмерных координат объектов в замкнутых помещениях в локальных координатах. Этому есть ряд объяснений. Во-первых – принципиально иной по сравнению с упомянутыми выше задачами геометрический масштаб. В случае закрытых помещений это интервал от единиц метров до трехсот метров. Для авиации дальность составляет как минимум километры. Во-вторых, наличие замкнутых помещений, в том числе интенсивно заполненных оборудованием, сильно усложняет применение методов эхолокации всех типов за счет множественных непредсказуемых отражений и крайне высоких требований к вычислительным мощностям, как из-за сложных помех, так и малых времен. Наконец, системы полноценного сканирования объема (как в спектре радиоволн, так и в оптическом диапазоне) достаточно дороги, что допустимо для большой авиации, но неприемлемо для описанных приложений.

Современные инструменты и подходы к определению координат для описанных приложений достаточно

разнообразны. Известен большой набор методов и технологий радиолокации (например [7-8]), оптической триангуляция [9] и бифокального оптического зрения, спутниковые системы геопозиционирования, системы привязки к ориентирам на местности или к специально нанесенным меткам на базе технического зрения и ряд других. Однако для интересующей нас задачи низкобюджетного автоматического трехмерного пространственного определения координат объектов внутри зданий и сооружений, для масштаба от одного до примерно трехсот метров и для замкнутых (а иногда и радиоизолированных) помещений эти методы по разным причинам подходят плохо.

Для закрытых помещений интересного нам масштаба отлично работают как классические оптические геодезические приборы, так и современные лазерные дальнометры [10]. Однако они являются приборами узконаправленного действия, то есть отслеживание перемещения объекта в пространстве потребует сложной механической поворотной системы в полном телесном угле с предсказанием траектории движения, что практически неисполнимо в автоматическом режиме/ Ручные же замеры низкопроизводительны и не подходят для массовых обследований. При этом использование полноценных систем лазерного сканирования (лидаров) имеет недостаточное быстродействие для использования при реальном движении и избыточную цену.

Технологически надежно и вполне бюджетно рассматриваемая задача решается на базе различных типов подготовки помещения. Принципиально, этот подход можно разделить на две группы Первая – размещения маячков в известных точках, например Bluetooth устройств, RFID-меток и иных, например [11]. В этом случае, за счет применения массово производимых устройств цена решения может быть невелика. Однако требуется предустановка этих маячков в известных точках, что само по себе представляет определенную проблему.

Вторая группа методов подготовки основана на нанесение различной визуальной разметки – линий, геометрических фигур, штрихов, QR-кодов в заранее картографированных и размеченных помещениях, например, [12]. В этом случае определение положения происходит за счет применения систем технического зрения с обработкой алгоритмическими методами, а в некоторых случаях – с применением нейросетей. Такие решения отлично работают для многократно используемых помещений – роботизированных складов, систем автоматической парковки, посадочных полос дронов. Однако, корректная предварительная разметка имеет большую трудоемкость, что нерационально для разовых или редких задач.

Отметим также простейший из современных цифровых подходов к позиционированию в пространстве на базе датчиков ориентации и акселерометров [13]. В принципе, инерциальная система контроля перемещений математически хорошо понятна и сводится к двойному интегрированию уравнений

движения по данным измерения ускорения. Необходимые датчики встроены в каждый мобильный телефон. Однако на практике, реализация данного подхода весьма капризна к качеству датчиков, особенно при неравномерных ускорениях. Массово используемые недорогие датчики крайне неустойчивы к корректному учету ускорений при вибрациях. При этом потеря точности критически нарастает при двойном интегрировании вдоль негладких траекторий с вибрациями в трехмерном пространстве. Огромное количество попыток бюджетного решения задачи подтверждает этот вывод. При этом для более крупных, дорогих и сложных устройств, таких как полноразмерная авиационная, ракетная и космическая техника решения задачи определения координат на основании более сложных инерционных устройств (акселерометров и гироскопов) вполне успешно.

Для интересующих нас масштабов в принципе работают методы акустической эхолокации [14]. В живой природе звуколокация широко применяется в разных средах (киты, дельфины, летучие мыши). Но в замкнутых помещениях для любого вида сигналов (электромагнитных или акустических) от изотропных или широкоугольных излучателей возникают неравномерные отражения (эхо) от стен и предметов, что кардинально усложняет решение и так непростой обратной задачу и математически, и алгоритмически. При этом надо понимать, что отраженный акустический сигнал резко теряет в интенсивности и искажается спектр – и к вычислительным сложностям добавляются жесткие требования к приемникам акустических колебаний.

При использовании акустических излучателей с узкой диаграммой направленности на объект измерения необходимо непрерывно держать отслеживаемый предмет на оси луча, что требует и сложной механики, и также непрерывного расчетного предсказания траекторий движения – однако они достаточно сложны, требуют больших вычислительных мощностей и точной механики.

### III. РАСЧЕТНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Рассмотрим принципиально иной подход к решению задачи, реализуемый на базе минимальных вычислительных мощностей, не требующий учета ориентации датчиков по направлению, наличия выделенных ориентиров или специальной разметки пространств, в которых перемещается контролируемый объект. Метод применим для замкнутых помещений, насыщенных предметами, поскольку основан на регистрации излученного сигнала, а не отраженного сложного эха. Интенсивность принимаемого сигнала может быть достаточно высока, поэтому разумно невысоки требования к чувствительности улавливающих микрофонов и задача отделения сигнала от фона решается естественным образом, за счет амплитуды (громкости), не требуя сложных фильтров.

Авторами был выполнен литературный и патентный поиск. Решения, имеющие определенное сходство с предлагаемым методом по постановке задачи, области

применения, физическим принципам, примененным математическим методам и программным алгоритмам существенно отличаются от предлагаемого нами способа. Ближайшим аналогом являются «Способ определения пеленга и дальности до источника сигналов» [15] и «Способ определения местоположения источника сигналов» [16], которые расчетным методом решают задачу поиска двумерных координат точки на плоскости, если известны ее расстояния от двух реперных точек. Математически эта задача эквивалентна построению треугольника по трем сторонам и может быть графически реализована элементарным построением при помощи циркуля. Измерение расстояний между источником и приемником в этом случае выполняется по разнице времен прохождения «быстрого» и «медленного» сигнала. В качестве «быстрого» сигнала может применяться световой сигнал или радиосигнал – в обоих случаях скорость распространения в воздухе составляет примерно  $3 \cdot 10^8$  м/сек. «Медленный» сигнал – акустические колебания в воздухе. Скорость звука при 0°C примерно 331 м/сек. Описываемый метод устойчиво работает в интервале расстояний от примерно 1 метра до нескольких сотен (200–300) метров. То есть при синхронизированном по времени испускании «быстрого» и «медленного» сигналов, задержка между временами их прихода к приемнику находится в интервале от примерно трех миллисекунд до одной секунды. Расстояние между источником и приемником рассчитывается исходя из зарегистрированной задержки и скорости распространения «медленного» (акустического) сигнала.

Метод, рассмотренный в работах [15-16] предусматривает возможность позиционирования только на плоскости, в двумерных координатах. Для широкого круга задач есть потребность трехмерного позиционирования, в принципе не рассмотренная в этой работе. Кроме того, предполагается известная постоянная скорость звука, что для обычных условий очевидно неверно. Для разумных интервалов применения метода от -300°C до +500°C скорость звука отличается более, чем на 15%. Также скорость звука зависит от примесей в воздухе (прежде всего от абсолютной влажности – примеси водяного пара). Также есть эффект частотной дисперсии скорости звука. Все эти эффекты существенно снижают точность расчетного определения координат без учета дополнительных параметров. А для обеспечения точности расчета требуется корректный контроль за этими параметрами. Необходимо, во-первых, использовать достаточно сложную расчетную модель, а во-вторых – оборудовать измерительный комплекс набором дополнительных датчиков (температуры, влажности, частотного спектра испускаемого сигнала). Вследствие этого, реальное применения описанного алгоритма с требуемой на практике точностью существенно усложняется даже для двумерных задач.

В настоящей работе предлагается метод определения координат в трехмерном пространстве путем решения

пространственной, а не плоской геометрической задачи. Для этого в качестве измерительной базы используются три не расположенных на одной прямой реперные точки, в которых размещены модули измерительной системы. Положение этих точек в выбранной системе координат точно известно. Удобно располагать их на координатных осях. Определяется расстояние от каждой из реперных точек до контролируемого тела. Тем самым, геометрически допустимое положение контролируемой точки (тела, приборного контейнера) принадлежит трем сферам известных (измеренных) радиусов с центрами в трех реперных точках измерительной базы. Для реального положения четырех точек задача имеет либо одно решение (если контролируемая точка лежит в одной плоскости с точками измерительной базы), либо два решения, симметричных относительно плоскости, определяемой точками измерительной базы. Геометрически задача сводится к определению точек пересечения трех сфер при известных центрах и радиусах (см. рис. 1).

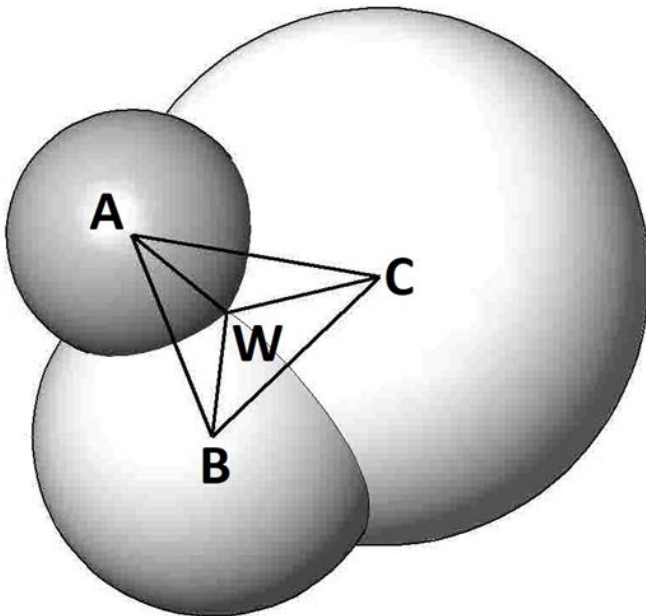


Рис.1 Геометрическая схема измерения.

Геометрическая задача может быть разрешена алгебраически в декартовых координатах. Пусть А,В,С - реперные точки измерительной базы с координатами  $A(x_1, y_1, z_1)$ ,  $B(x_2, y_2, z_2)$ ,  $C(x_3, y_3, z_3)$ . Положение контролируемого тела – точка  $W(x, y, z)$ . При известных (измеренных) расстояниях от каждой из реперных точек до контролируемого тела:

$$\begin{aligned} |AW| &= L_1 \\ |BW| &= L_2 \\ |CW| &= L_3 \end{aligned} \quad (1)$$

может быть записана система уравнений аналитической геометрии в декартовых трехмерных координатах:

$$\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} = L_1 \quad (2)$$

$$\sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2} = L_2$$

$$\sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2} = L_3$$

При измеренных величинах  $L_1, L_2, L_3$  и известных параметрах измерительной системы – координатах реперных точек  $A(x_1, y_1, z_1)$ ,  $B(x_2, y_2, z_2)$ ,  $C(x_3, y_3, z_3)$  имеется три уравнения с тремя неизвестными – координатами контролируемой точки  $W(x, y, z)$ . Эта система уравнений может быть разрешена алгебраически. В общем случае система может иметь два, одно или не одного решения. Варианты с одним решением соответствуют расположению контролируемой точки в одной плоскости с реперными, а с двумя решениям – ее положениям вне этой плоскости. Варианты с отсутствием решений системы уравнений для геометрически существующих точек не реализуются. Описанное решение рассчитывается программно на контроллере измерительной системы и далее может быть обработано - передано как данные или отображено визуально для дальнейшего использования.

Измерение расстояния между двумя точками расположения компонент измерительной системы может быть выполнено по задержке прихода «медленного» (звукового) сигнала относительно «быстрого» (электромагнитного) [17]. Достижение полной синхронности испускания сигналов в общем виде не требуется, однако необходимо постоянство разности времен испускания этих сигналов  $\Delta t = \text{const}$  (в частном случае, при полной синхронности  $\Delta t = 0$ ). Важным фактором новизны рассматриваемого метода измерения расстояния между источником и приемником является подтвержденная экспериментально [2] с точностью в пределах 1% для рассматриваемых дистанций гипотеза линейной связи расстояния между источником и приемником от времени задержки между регистрацией «быстрого» и «медленного» сигналов  $\Delta t$  в требуемом интервале расстояний (1–300 метров):

$$L = a \Delta t + b \quad (3)$$

В рамках этой гипотезы для определения коэффициентов аппроксимации  $a$  и  $b$  возможно заменить сложный и неточный расчет по контролируемому большому количеству дополнительных датчиков физических параметров (температуры, влажности, частотного спектра звуковой волны) всего двумя калибровочными замерами временной задержки при двух фиксированных относительно малых расстояниях 1 - 2 метра для каждой пары приемник - источник. Такие калибровочные замеры могут выполняться периодически непосредственно перед измерением и после него. Тогда, зная из калибровочного эксперимента две пары значений временной задержки и расстояния ( $\Delta t_*, L_*$ ) и ( $\Delta t_{**}, L_{**}$ ), мы имеем систему из двух линейных уравнений относительно коэффициентов  $a$  и  $b$ :

$$\begin{cases} a \Delta t_* + b = L_* \\ a \Delta t_{**} + b = L_{**} \end{cases} \quad (4)$$

Эта система легко разрешима относительно искомым

коэффициентов  $a$  и  $b$ . Далее, по известным из калибровочного расчета коэффициентам  $a$  и  $b$ , и измеренной для пары точек (реперная и контролируемая точка) времени задержки  $\Delta t$  между регистрацией «быстрого» и «медленного» сигналов рассчитываем искомое расстояние  $L = a \Delta t + b$  между точками нахождения источников и приемников сигналов. Критерием корректности измерения служит малый разброс коэффициентов аппроксимации  $a$  и  $b$ , рассчитанных по данным калибровочных измерений до и после основного измерения.

#### IV. АРХИТЕКТУРА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

Таким образом, для практической реализации метода высокоточного определения трехмерных координат контролируемой точки (приборного контейнера или иного тела) в замкнутых радиоизолированных помещениях без предварительной разметки путем триангуляции по данным измерений расстояний от трех реперных точек измерительной базы до контрольной точки по данным задержки во времени регистрации для «быстрого» и «медленного» сигналов выполняется автоматизировано измерительной системой, варианты принципиальной схемы которой представлены на рис 2а и 2б.

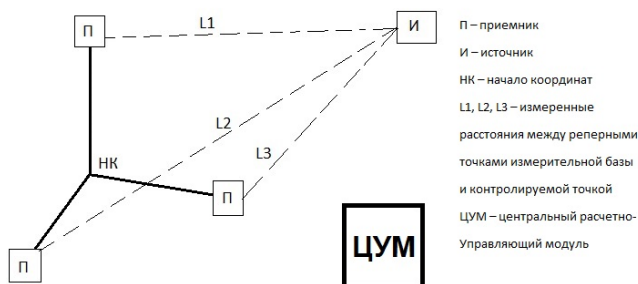


Рис. 2а Принципиальная архитектура измерительной системы. Схема 1.

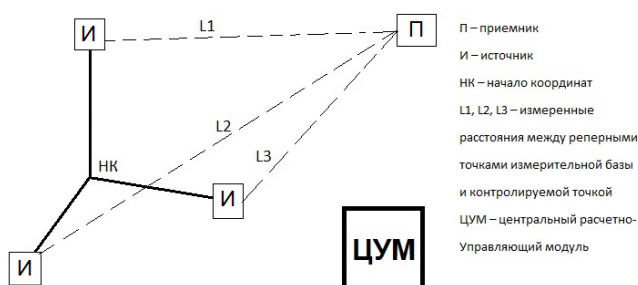


Рис. 2б Принципиальная архитектура измерительной системы. Схема 2.

Измерительная система включает в себя в минимальной конфигурации пять аппаратно-программных блоков, четыре из которых представляют блоки излучателей и приемников электромагнитного и звукового сигнала, а центральный управляющий модуль

(ЦУМ) осуществляет сбор, обработку и хранение данных, а при необходимости – передачу их во внешние информационные системы. Также посредством ЦУМ осуществляется ручное или автоматизированное управление процессом измерений. Блоки-излучатели включают в себя контроллер, источники электромагнитного и акустического сигналов, систему передачи данных и блок автономного питания. Блоки приемника включают в себя контроллер, приемники электромагнитного и акустического сигналов, систему передачи данных и блок автономного питания. Центральный управляющий модуль включает устройство цифровой обработки данных, локальное энергонезависимое хранилище данных, систему передачи данных, блок автономного питания, а также устройство, обеспечивающее передачу данных внешним пользователям. Центральный управляющий модуль (ЦУМ) может быть реализован в формате готового стандартного изделия (ноутбука, планшета, мобильного телефона и т.д.) со специальным программным обеспечением, либо быть собран на базе цифрового контроллера с подключением необходимых электронных компонент и прошивкой специального программного обеспечения. Также ЦУМ может быть интегрирован с одним или несколькими элементами измерительной базы, расположенных в реперных точках. Передача данных между ЦУМ и элементами измерительной базы, расположенных в реперных точках может осуществляться как проводным, так и беспроводным способом. Передача данных между модулем измерительной системы, расположенным в контрольной точке и другими модулями осуществляется по беспроводным каналам. Частотные характеристики акустического излучения могут варьироваться от звуковых частот до ультразвука. Альтернативные схемы измерительных систем, представленные на рисунках 2а и 2б, функционально эквивалентны и не отличаются по существенным характеристикам – дальности измерения, точности, устойчивости работы. При их реализации требуется несущественная переработка программного обеспечения с использованием одних и тех же базовых модулей обработки данных.

#### V. АЛГОРИТМ ПРИМЕНЕНИЯ АПК ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ

Метод высокоточного определения трехмерных координат приборного контейнера в замкнутых радиоизолированных помещениях без предварительной разметки с использованием описанного измерительного комплекса может быть реализован в следующей последовательности действий:

1. Установка в выбранном месте помещения измерительной базы, включающей в себя установленные стационарно в реперных точках модули и ЦУМ.

2. Интеграцию перемещаемого модуля измерительной системы с контролируемым контейнером, который может передвигаться в помещении различными способами (вручную, летающим дроном, передвигающимся по поверхности пола носителем или

любым другим образом).

3. Калибровку измерительной системы описанным выше способом.

4. Перемещение контролируемого контейнера по помещению в трех координатах произвольным образом.

5. Выполнение фиксации удаленности контрольной точки от всех реперных в выбранные моменты. Управление режимом замеров может осуществляться оператором вручную через ЦУМ или задаваться программно. Эта операция может быть скоординирована с другими событиями (например, замерами различных физических параметров) для определения положения контролируемого контейнера в момент измерения.

6. Расчет трехмерных координат контрольной точки для каждого измерения с накоплением массива трехмерных декартовых координат для дальнейшего использования.

7. Сохранение или передача накопленного массива данных о положениях контролируемой точки (приборного контейнера) для использования различными приложениями.

#### VI. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАЗРАБОТКИ

Описанный метод обладает набором отличительных признаков, определяющим его новизну в отличие от других известных технических решений и позволяющих применять его для широкого спектра практически важных задач, плохо или сложно решаемых ранее описанными и применяемыми методами и устройствами:

- полностью разрешается физическая и механическая задача синхронизированного определения всех трех координат тела в пространстве в реальном времени;

- расчет координат отслеживаемого тела производится на основании прямого измерения дальности (в большинстве других методов применяется измерение углов);

- задача эффективно решается описываемым методом на всем практически важном интервале дистанций внутри зданий и сооружений;

- позиционирование контролируемого тела эффективно выполняется внутри замкнутых помещений, сильно заполненных предметами интерьера, оборудованием и строительными конструкциями, в том числе внутри радио изолированных помещений при условии прямой видимости источников и приемников;

- расстояние измеряется посредством фиксации прямых испущенных источниками электромагнитного и звукового сигналов, не требуется фиксация и обработка сложных и слабых отраженных сигналов;

- использование фиксации прямого сигнала от источников обеспечивает заметное превышение сигнала над фоном на всем диапазоне требуемых дальностей;

- метод использует простейшие изотропные или широкоугольные излучатели и приемники сигналов, что исключает необходимость динамической переориентации излучателей и приемников с применением поворотных устройств и систем отслеживания направления на контролируемый объект;

- метод не требует контроля параметров воздушной среды с определением мгновенной скорости распространения акустических колебаний для высокоточного определения расстояния и координат контролируемого объекта, точность обеспечивается путем автоматической низкозатратной самокалибровки измерительно-расчетного комплекса в реальных условиях непосредственно перед измерениями в конкретном помещении;

- метод не требует предварительного знания геометрии помещения, в рамках которого происходит определение координат контролируемого объекта, а также не требует никакой предварительной разметки этих помещений;

- определение координат контролируемого тела выполняется полностью автоматически аппаратно-программным комплексом, реализующим описанные методы измерений и алгоритмы расчетов.

#### VII. ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Описанный метод применим для интервала дальностей 1–300 метров. На больших удалениях метод неустойчив из-за сложности фиксации слабых акустических колебаний, поток энергии которых спадает пропорционально квадрату расстояния от источника. Дальность измерения в дальнейшем может быть повышена за счет применения направленных излучателей акустических колебаний или специальной модуляции сигнала. Точность представленного метода составляет порядка 1%. Точность метода может быть увеличена путем повышения количества реперных точек.

Локальный программно-аппаратный комплекс может быть интегрирован в локальную или облачную систему хранения и обработки результатов измерений, в которой получают с локальных ЦУМ данные о координатах контролируемых объектов, измеренные в соответствии с выполненной в ручном режиме или по заранее заданному сценарию программой измерений. Также в хранимые на локальном ЦУМ и передаваемые с него в облачное хранилище данные могут содержать трехмерные координаты положения контролируемого объекта (например, приборного контейнера) также время, в которые были выполнены замеры координат и показания приборов, интегрированных в контейнер. Таким образом будет зафиксировано время и место выполнения измерений различных физических и иных параметров внутри помещения. Серия измерений может сопровождаться дополнительной атрибутивной информацией, вводимой вручную либо автоматически. Передача информации в локальное или облачное хранилище может осуществляться как в процессе измерений (при наличии непрерывного подключения локальной измерительной системы к хранилищу, например через каналы беспроводной связи), а также выполняться позже, при установлении проводного или беспроводного подключения к хранилищу (в случае, когда передача данных непосредственно из зоны измерений невозможна или нецелесообразна).

## БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Комплексные инженерно-радиационные обследования (КИРО) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.atomic-energy.ru/KIRO> свободный. Заглавие с экрана.
- [2] Рекомендации по проведению комплексного инженерного и радиационного обследования объекта использования атомной энергии (РБ-159-19). – Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, Москва, 2019
- [3] Облако точек [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://a-expert.ru/services/obsledovaniya-stati/oblako-tochek/> свободный. Заг
- [4] Мочкин К.А., Жабицкий М.Г., Черненко К.В., Лагутина Е.С., Свердлик Г.В. Концепция системы цифрового сканирования насыщенных оборудованием помещений в целях реверсивного проектирования для образовательных проектов и стартапов // International Journal of Open Information Technologies. 2022. №8.
- [5] Спутниковые системы позиционирования. Конспект лекций / Р.В. Загреддинов, Каз. федер. ун-т. – Казань, 2014. – 148 с.
- [6] Дальномер. Виды и работа. Применение и как выбрать. Особенности [Электронный ресурс] –Режим доступа: <https://tehpribory.ru/glavnaia/pribory/dalnomer.html> свободный. Загл. с экрана.
- [7] Пат. RU 2 442 997 C2 – Способ измерения дальности и оптико-электронная система (оэс) поиска и сопровождения (варианты) – Яндекс патенты. – URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2442997C2\\_20120220](https://yandex.ru/patents/doc/RU2442997C2_20120220)
- [8] Пат. RU 2 380 723 C1 – Способ определения параметров движения источника радиоизлучения. – Яндекс Патенты. – URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2380723C1\\_20100127](https://yandex.ru/patents/doc/RU2380723C1_20100127)
- [9] Медведев А.В., Гринкевич А.В., Князева С.Н. Современные подходы к созданию пассивных дальномеров // Фотоника. – 2017. – Т. 68. – Вып. 8. – С. 30-37.
- [10] Пат. RU 112756 U1 – Устройство для лазерной триангуляции – Яндекс Патенты – URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU112756U1\\_20120120](https://yandex.ru/patents/doc/RU112756U1_20120120)
- [11] Raab F.H., Blood E.B., Stainer T.O. et al. Magnetic position and orientation tracking system. – IEEE Trans. Aerospace Electronic Systems, September 1979, Vol. AES-15, No. 5.
- [12] Семенов А.Е. Разработка математического и программного обеспечения сервиса позиционирования в линейных сетях на примере метрополитена. Выпускная квалификационная работа бакалавра – Санкт-Петербург 2016. – 62 с.
- [13] Миков А.Г. Алгоритмы навигации автотранспорта с использованием мэмс-датчиков грубого класса точности дис. ... к.т.н. – Петрозаводск 2021 – 190 с.
- [14] В.А. Жмудь [и др.] Ультразвуковой датчик измерения расстояния НС-SR04 // Автоматика и программная инженерия. – №4(22). – 2017. – С. 18-26
- [15] Пат. RU 2 625 094 C1 – Способ определения пеленга и дальности до источника сигналов – Яндекс Патенты – URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2625094C1\\_20170711](https://yandex.ru/patents/doc/RU2625094C1_20170711)
- [16] Пат. RU 2 624 984 C1 – Способ определения местоположения источника сигналов – Яндекс Патенты – URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2624984C1\\_20170711](https://yandex.ru/patents/doc/RU2624984C1_20170711)
- [17] К.В. Черненко, М.Г.Жабицкий Способы измерения расстояний с помощью звуковой волны для системы позиционирования приборного контейнера в закрытых помещениях на базе технологии интернета вещей: Доклад на конференции «X Международная молодежная научная Школа-Конференция» / Москва. – 2023.

# Method for digital determination of the coordinates of the measuring complex when performing measurements in a closed room

M.G. Zhabitsky, K.V. Chernenko

**Abstract**— The article describes in detail an effective low-cost method for determining the three-dimensional coordinates of an object indoors, applicable for isolated rooms and does not require preliminary measurements or marking. The existing approaches to solving the problem on the required scale are analyzed in detail. The lack of tools for automated determination of the coordinates of the measurement point inside the room is shown, the relevance of the problem under consideration is justified. A mathematical method of solving by three-dimensional triangulation by known distances from the reference points of the measuring basis and its physical implementation based on automated measurement of delays in the passage of an electromagnetic and acoustic signal is formulated. An original method of calculating the distance by time delay based on rapid calibration is proposed, eliminating the need for additional sensors to monitor the parameters of the air environment. A step-by-step algorithm for implementing the method based on industrial Internet of Things technology is described.

**Keywords**—Acoustic signal, electromagnetic signal, industrial internet of things, measurement point, three-dimensional coordinates, triangulation.

## REFERENCES

- [1] Complex engineering and radiation surveys (KIRO) [Electronic resource] - Access mode: <https://www.atomic-energy.ru/KIRO> free. Title from screen.
- [2] Recommendations for conducting a comprehensive engineering and radiation survey of an object using atomic energy (RB-159-19). - Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision, Moscow, 2019
- [3] Cloud of points [Electronic resource] - Access mode: <https://a-expert.ru/services/obsledovaniya-stati/oblako-tochek/> free. Title from screen.
- [4] Mochkin K.A., Zhabitsky M.G., Chernenko K.V., Lagutina E.S., Sverdlik G.V. Concept of a digital scanning system for equipment-saturated rooms for educational projects and startups // International Journal of Open Information Technologies. 2022. No. 8.
- [5] Satellite positioning systems. Lecture notes / R.V. Zagretdinov, Kazan Federal University. - Kazan, 2014. - 148 p.
- [6] Rangefinder. Types and work. Application and how to choose. Features [Electronic resource] -Access mode: <https://tehpribory.ru/glavnaiya/pribory/dalnomer.html> free. Title from screen
- [7] Pat. RU 2 442 997 C2 - Method for measuring distance and optoelectronic search and tracking system (options) - Yandex Patents. - URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2442997C2\\_20120220](https://yandex.ru/patents/doc/RU2442997C2_20120220)
- [8] Pat. RU 2 380 723 C1 - Method for determining the parameters of the movement of a radio emission source. - Yandex Patents. - URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2380723C1\\_20130210](https://yandex.ru/patents/doc/RU2380723C1_20130210)
- [9] Medvedev A.V., Grinkevich A.V., Knyazeva S.N. Modern approaches in creating passive rangefinders // Photonics. – 2017. – Vol. 68. – Iss. 8. – P. 30-37
- [10] Pat. RU 112756 U1 – Device for laser triangulation – Yandex Patents – URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU112756U1\\_20120120](https://yandex.ru/patents/doc/RU112756U1_20120120)
- [11] Raab F.H., Blood E.B., Stainer T.O. et al. Magnetic position and orientation tracking system. – IEEE Trans. Aerospace Electronic Systems, September 1979, Vol. AES-15, No. 5.
- [12] Semenov A.E. Development of mathematical and software support for positioning service in linear networks using the example of the metro. Bachelor's thesis – Saint Petersburg 2016. – 62 p.
- [13] Mikov A.G. Navigation algorithms for vehicles using low-precision MEMS sensors, PhD thesis – Petrozavodsk 2021 – 190 p.
- [14] V.A. Zhmud [and others] Ultrasonic measurement sensor distances HC-SR04 // Automation and software engineering. - No. 4 (22). - 2017. - S. 18-26
- [15] Pat. RU 2 625 094 C1 - Method for determining the bearing and range to the signal source - Yandex Patents - URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2625094C1\\_20170711](https://yandex.ru/patents/doc/RU2625094C1_20170711)
- [16] Pat. RU 2 624 984 C1 - Method for determining the location of the signal source - Yandex Patents - URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2624984C1\\_20170711](https://yandex.ru/patents/doc/RU2624984C1_20170711)
- [17] K.V. Chernenko, M.G.Zhabitsky Methods for measuring distances using a sound wave for the positioning system of an instrument container in enclosed spaces based on the technology of the Internet of things: Report at the conference "X International Youth Scientific School-Conference" / Moscow. – 2023.