

К. В. Ермишин, С. А. Воротников

## МУЛЬТИАГЕНТНАЯ СЕНСОРНАЯ СИСТЕМА СЕРВИСНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА

*Предлагается архитектура и принцип функционирования сенсорной системы сервисного мобильного робота, состоящей из двух подсистем – лазерной навигационной системы и системы ультразвуковой навигации. Рассматривается задача составления карты местности при наличии движущихся внешних объектов в рабочей зоне робота. Приводятся алгоритмы совместной обработки информации, поступающей от лазерного сканирующего дальномера и системы ультразвуковой локализации, которая обеспечивает перемещение робота в недетерминированной динамической среде.*

**E-mail: konstantin.ermishin@gmail.com, vorotn@bmstu.ru**

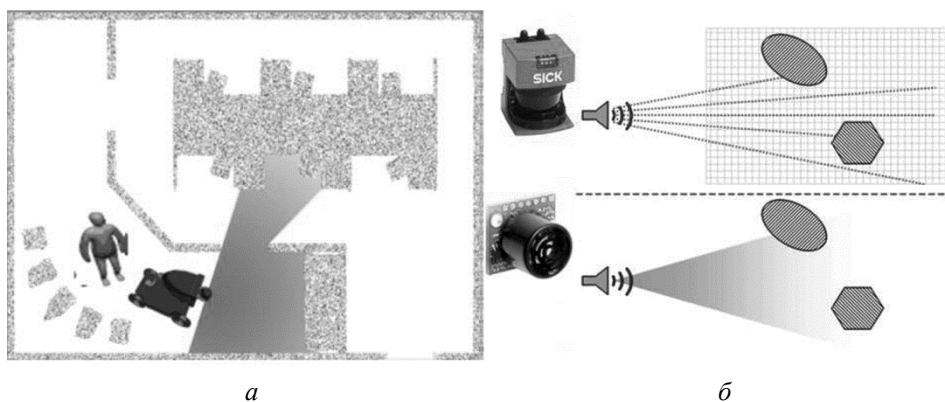
**Ключевые слова:** управление, навигация, локализация, комплексирование сенсорной информации, сенсорные сети, дальномер.

Мобильная робототехника все чаще применяется в повседневной жизни человека. Сервисные мобильные роботы (СМР) используются для патрулирования и уборки помещений, выполнения функций экскурсовода, доставки лекарств пациентам в клинике и т. п. Поскольку робот функционирует в тех же помещениях, в которых могут находиться люди и иные движущиеся объекты, большой проблемой, препятствующей более широкому применению СМР, становится обеспечение безопасности как окружающих людей и прочих объектов, так и самого СМР в процессе его движения.

Для решения этой проблемы обычно применяют навигационные системы, основанные на использовании лазерных сканирующих дальнометров. Наряду с очевидными преимуществами, подобные системы обладают некоторыми недостатками. В частности, они плохо работают в среде с отражающими поверхностями в виде стекол и зеркал, часто встречающимися в различных помещениях, в том числе в выставочных центрах. Кроме того, лазерные дальнометры обладают высоким энергопотреблением и ограниченным углом обзора в азимутальной плоскости (рис. 1, а).

Предлагается расширить возможности навигационной системы робота путем добавления массива ультразвуковых дальнометров, расположенных по периметру СМР. Характеристики ультразвуковых

дальномеров в известной степени дополняют возможности лазерных. В этом случае сенсорная система становится мультиагентной, а карта местности, построенная с помощью лазерного сканера, дополняется локальной моделью пространства, построенного с помощью ультразвуковых дальномеров.



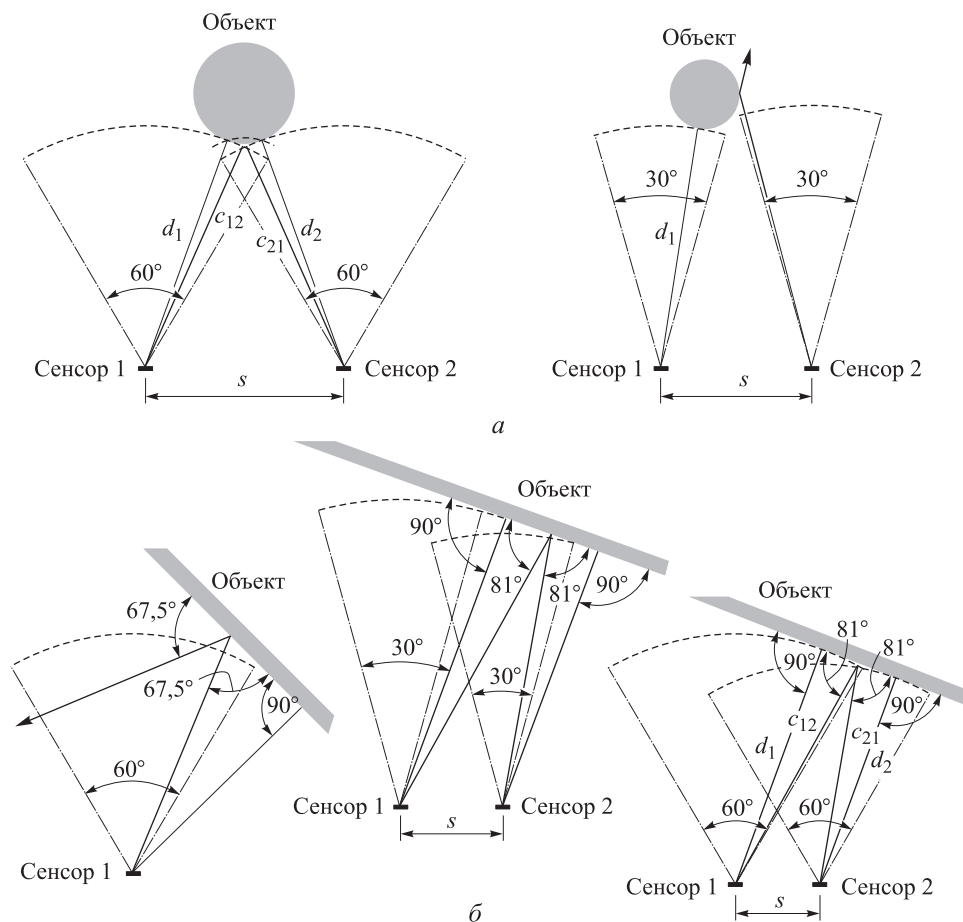
**Рис. 1. Навигационная система СМР:**

*а* – иллюстрация ограниченности угла обзора лазерного сканера; *б* – принцип детектирования объектов ультразвуковым дальномером и лазерным сканером

**Особенности исследования и моделирования окружающего пространства с помощью ультразвуковых дальномеров.** Достоинством ультразвуковых дальномеров является высокая точность измерений при широкой пространственной диаграмме направленности, что позволяет детектировать ближайшие препятствия, расположенные произвольно относительно СМР. В то же время широкая диаграмма направленности затрудняет локализацию окружающих объектов в случае неопределенности их положения (рис. 1, б). Наличие неопределенности положения обусловлено тем, что в процессе функционирования ультразвуковой дальномер не дает никакой угловой информации о положении объекта в азимутальной плоскости, что, в свою очередь, усложняет процесс построения локальной карты местности.

Рассмотрим ряд типичных проблем, возникающих в процессе измерений расстояний с помощью лазерных дальномеров и способы их устранения [1]. Как известно, ширина диаграммы направленности ультразвукового дальномера варьируется от 15...30° (узконаправленные) до 45...60° и более (широконаправленные). В зависимости от взаимного расположения на роботе, а также от ширины диаграммы направленности соседних датчиков, фиксирующих в собственной рабочей зоне неизвестный объект, возможны различные ситуации при вычислении положения объекта, показанные на рис. 2.

В первом случае (рис. 2, а) при локализации объекта цилиндрической формы возникает «потеря габаритов» детектируемого объекта вследствие мертвой зоны между двумя сенсорами.



**Рис. 2. Особенности детектирования ультразвуковыми датчиками объектов, имеющих различную форму:**

*а* – цилиндрическую; *б* – плоскую протяженную

Во втором случае (рис. 2, *б*) возникает ошибка при измерении расстояния от СМР до протяженной гладкой поверхности, например стены, расположенной сбоку [2]. Эта ошибка появляется в результате зависимости расчетного значения дальности от ширины диаграммы направленности дальномеров и от взаимной ориентации стены и робота. Действительно, в зависимости от взаимного расположения СМР и стены имеем две ситуации:

$$D = \left( \frac{d_1 + d_2}{2} \right) \left( \frac{\cos(\theta - \alpha/2)}{\cos \theta} \right) \text{ при } \theta \geq \alpha/2 \text{ (рис. 3, а),}$$

$$D = \frac{d_1 + d_2}{2 \cos \theta} \text{ при } \theta < \alpha/2 \text{ (рис. 3, б),}$$

где  $d_1$ ,  $d_2$  – расстояния, измеренные первым и вторым сенсорами;  $\theta$  – угол, характеризующий взаимное расположение СМР и поверхности;  $\alpha$  – угол диаграммы направленности сенсора.

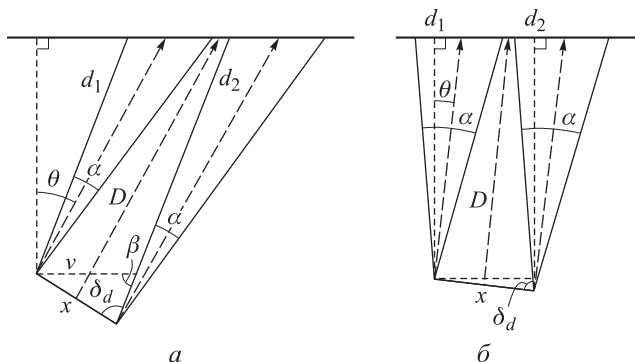


Рис. 3. Схема вычисления расстояния между СМР и стеной

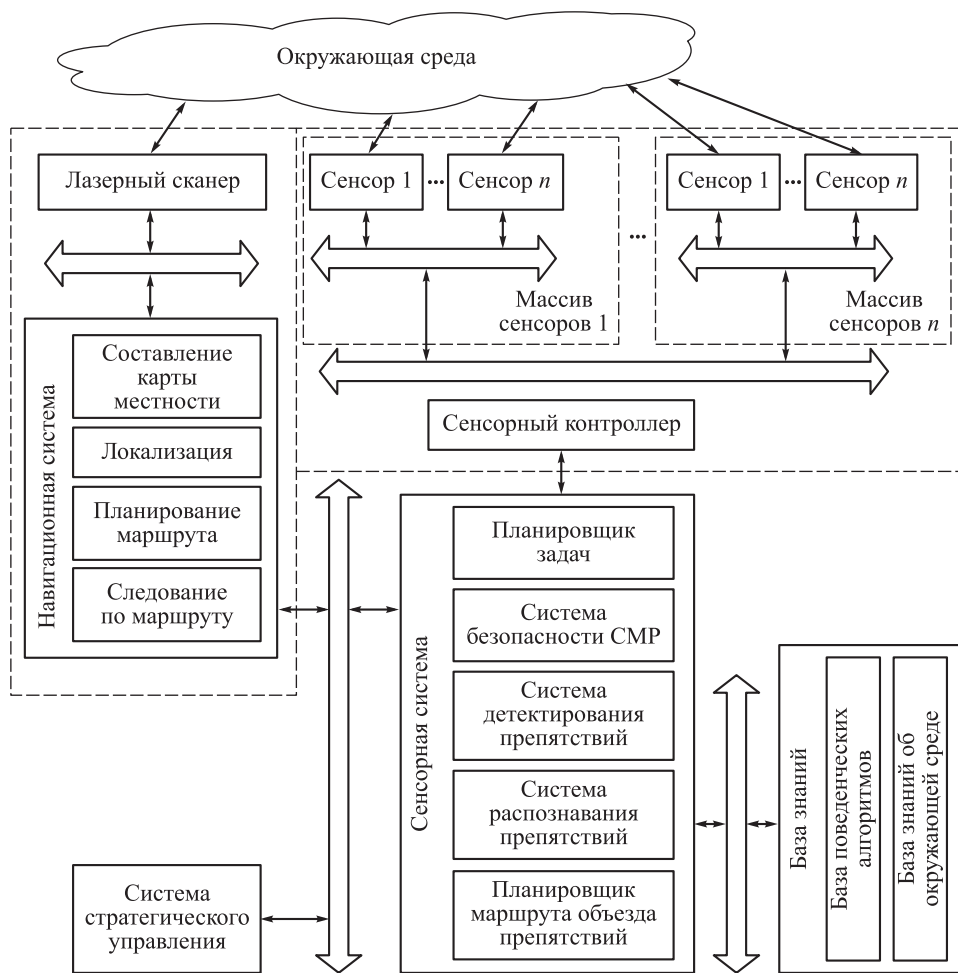
Указанные обстоятельства затрудняют применение отдельных ультразвуковых дальномеров для уточнения динамической карты местности. Поэтому для локализации объектов предлагается использовать массив ультразвуковых дальномеров, работающих согласованно друг с другом. Выделим три аспекта, которые необходимо учитывать при разработке такого массива. Во-первых, выбор характеристик сенсора, в том числе его диаграммы направленности, должен зависеть от габаритов СМР и размеров препятствий в зоне функционирования. Во-вторых, расположение сенсоров должно определяться шириной их диаграмм направленности и дальностью действия. В-третьих, необходимо также учитывать наличие кросс-эха, т. е. влияние отраженного сигнала одного из датчиков на результат измерения другого, при работе соседних сенсоров. В случае взаимного перекрытия диаграмм направленности показания сенсоров становятся неопределенными, поскольку один и тот же сенсор последовательно выдает разные показания (см. рис. 2, а).

Первые два аспекта должны учитываться на стадии проектирования СМР и решаются в зависимости от требований к его конструкции. Решение третьей проблемы возможно двумя способами: путем регистрации и учета эффекта кросс-эха [1] или поочередным включением сенсоров для устранения взаимовлияния.

В данной работе предлагается использовать массив узконаправленных ультразвуковых дальномеров с пересекающимися диаграммами направленности, а их взаимовлияние устранять алгоритмически – с помощью соответствующего протокола опроса.

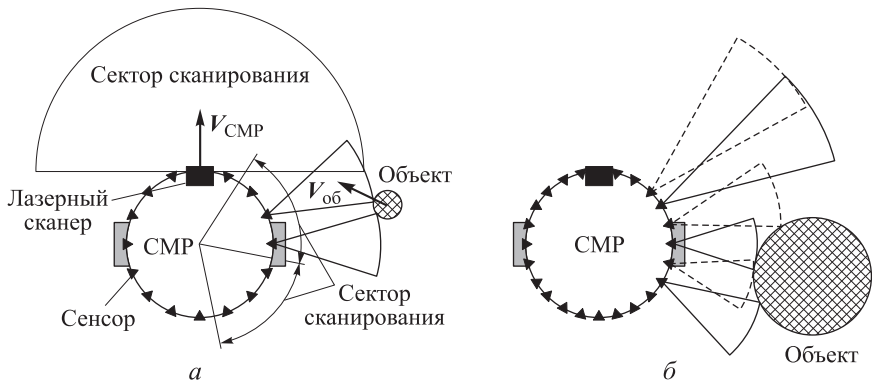
**Структура и принцип функционирования системы ультразвуковой навигации.** Сенсорную систему СМР предлагается строить по модульному принципу в виде двух подсистем: лазерной нави-

гационной системы на базе лазерного сканера Sick LMS 200 и системы ультразвуковой навигации в виде массива ультразвуковых дальномеров (рис. 4). Каждый из дальномеров массива является сенсором-агентом и состоит из датчика LV-MAXSONAR и микроконтроллера Atmega. Такая схема позволяет объединить сенсоры в сеть с помощью одного из протоколов, например CAN или LIN.



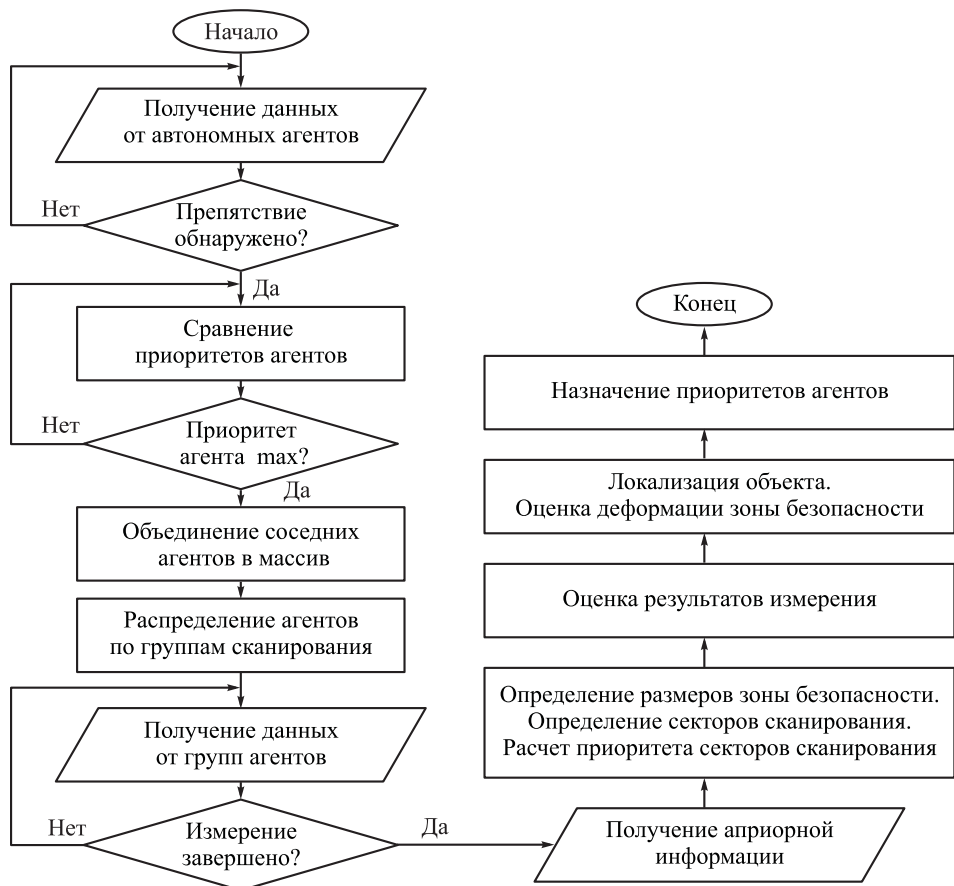
**Рис. 4. Сенсорная система СМР**

Дальномеры расположены по периметру СМР. Подобная архитектура системы ультразвуковой навигации позволяет ей функционировать в двух различных режимах. В первом режиме каждый из агентов-сенсоров, работающих автономно, сканирует окружающее пространство для нахождения в заданной зоне объекта, препятствующего движению СМР (рис. 5, а). Во втором режиме агенты, группируясь вокруг сенсора, зарегистрировавшего объект в рабочей зоне, осуществляют секторное сканирование пространства, окружающего СМР (рис. 5, б).



**Рис. 5. Принцип выделения в массиве ультразвуковых сенсоров секторов сканирования (а) и принцип сопровождения объекта в рамках выделенного сектора (б) ( $V_{СМР}$ ,  $V_{об}$  – линейные скорости СМР и объекта соответственно)**

В результате система ультразвуковой навигации работает согласно алгоритму, представленному на рис. 6.



**Рис. 6. Алгоритм функционирования системы ультразвуковой навигации**

В процессе работы системы ультразвуковой навигации последовательно проводится опрос автономно функционирующих агентов. При нахождении агентом препятствия в рабочей зоне к измерению подключаются соседние агенты, в результате чего вокруг первого формируется массив сенсоров, осуществляющих в дальнейшем секторное сканирование. Эта процедура выполняется последовательно для всех агентов.

Процесс секторного сканирования осуществляется за несколько последовательных итераций поочередно для отдельных групп сенсоров. Массив сенсоров распределяется на группы сенсоров в зависимости от расстояния до зарегистрированного объекта так, чтобы рабочие зоны сенсоров в рамках одной группы не пересекались между собой (см. рис. 5, б).

Возможность логического управления работой сенсорной сети позволяет проводить последовательные измерения группами агентов-сенсоров. Размер массива, в который объединяются агенты, зависит от габаритов локализуемого объекта и плотности их распределения по периметру СМР. При поочередном подключении различных групп агентов отсутствует взаимовлияние соседних сенсоров друг на друга.

По окончании секторного сканирования полученные результаты сопоставляются с априорной информацией об окружающем пространстве – картой местности, хранящейся в памяти СМР, и оцениваются.

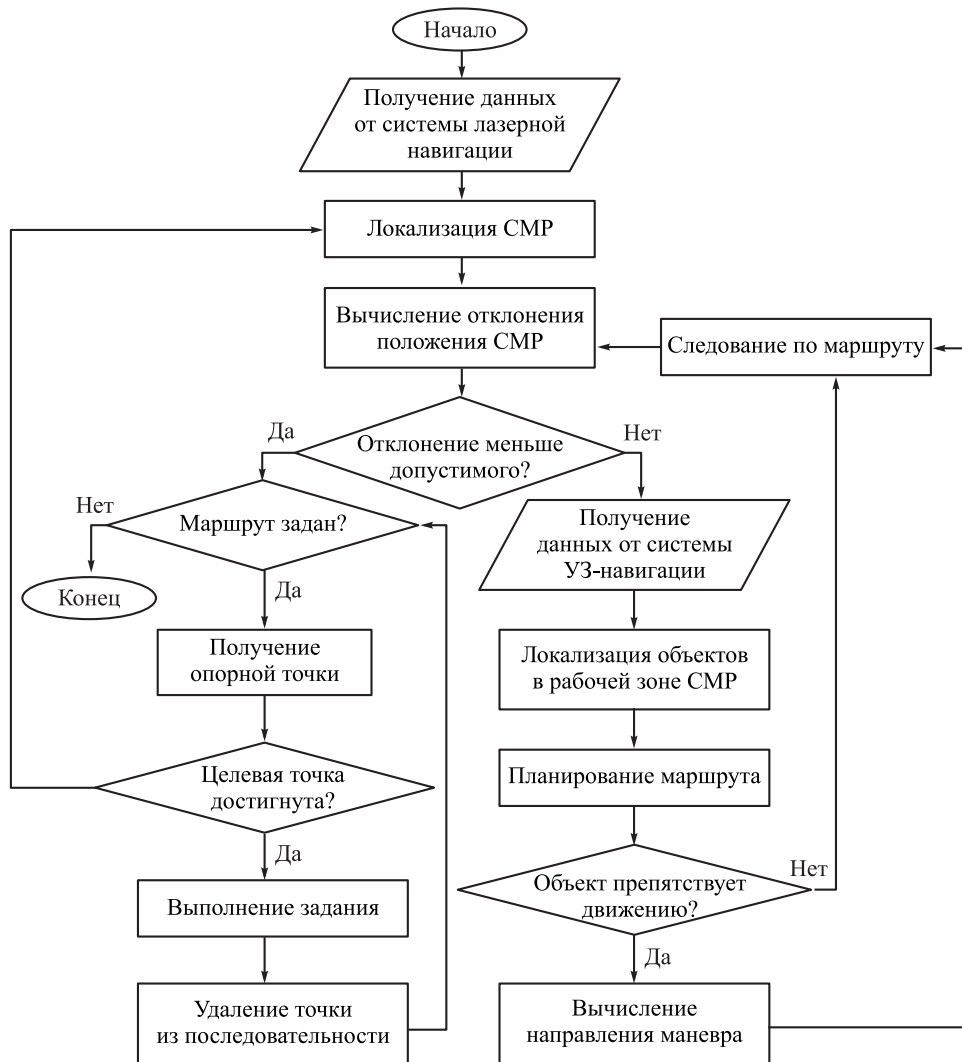
Далее подготавливаются данные для последующих измерений, которые выполняются последовательно до тех пор, пока обнаруженный объект не исчезнет из зоны безопасности СМР.

Необходимо отметить следующее. Ввиду того что локальная модель окружающей среды получена с некоторой долей абстракции, в процессе работы может возникнуть неопределенность в определении положения какого-либо из объектов. Это может быть обусловлено, например, неравномерностью расположения агентов-сенсоров по периметру СМР, в результате чего получаемая о нем информация может быть неполной. В связи с этим для уточнения положения объекта и его параметров СМР может совершать гностические движения.

**Принцип функционирования сенсорной системы СМР.** Алгоритм функционирования мультисенсорной системы СМР при движении робота в недетерминированной среде показан на рис. 7.

Одна из основных проблем, возникающих при перемещении СМР в недетерминированной динамической среде, – необходимость выполнения соответствующих маневров в целях избежания столкновений [3]. Для плавного маневрирования СМР необходимо учитывать препятствия как непосредственно на пути движения, так и в направ-

лении вероятного маневра, что требует внесения корректив в данные, полученные лазерной навигационной системой. Подобные ситуации часто возникают при движении СМР в узких коридорах, офисных помещениях и выставочных залах, т. е. везде, где перемещаются люди. Поэтому сенсорная система должна учитывать данные о положении СМР в пространстве, а также постоянно локализовать в нем объекты, препятствующие движению СМР.

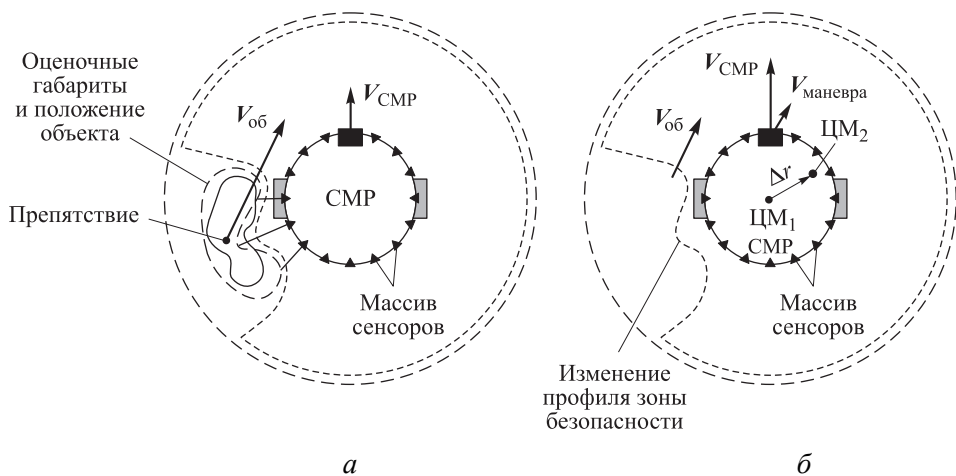


**Рис. 7. Алгоритм функционирования сенсорной системы и перемещения СМР (УЗ – ультразвуковая)**

В каждом положении СМР на карте местности для него определяется зона безопасности – часть окружающего пространства, в котором наличие каких-либо посторонних предметов может существенно помешать движению (рис. 8). Габариты данной зоны рассчитываются



непрерывно. При этом должны приниматься во внимание как расстояние до ближайшего объекта, так и скорость движения СМР.



**Рис. 8.** Процесс деформации зоны безопасности (а) и смещение ее центра масс из положения  $ЦМ_1$  в положение  $ЦМ_2$  (б)

Для вычисления направления необходимого маневра система ультразвуковой навигации последовательно регистрирует положение окружающих СМР объектов в разные моменты времени, изменяя тем самым профиль зоны безопасности, как показано на рис. 8. Для простоты представления зоны безопасности объекты рассматриваются в виде геометрических примитивов цилиндрической формы. Однако данное предположение не является существенным ограничением для нашего подхода.

Во избежание столкновения с объектом, препятствующим движению СМР, в процессе планирования маршрута движения планируется необходимый маневр. Направление маневра определяется из числа возможных в направлении градиента профиля зоны безопасности СМР. В частности, направлением маневра может быть выбрано направление, в котором смещается центр масс зоны безопасности (из начального положения  $ЦМ_1$  в положение  $ЦМ_2$ ) при движении динамического объекта. Сама задача планирования маневра с обходом формализованного препятствия может быть легко решена одним из известных методов [4].

Таким образом, комплексирование информации от различных модулей сенсорной системы позволяет оперативно реагировать на опасность, исходящую от динамических объектов вне сектора обзора лазерного сканера. Кроме того, применение системы ультразвуковой навигации, не задействованной в классическом процессе одновременного построения карты местности и локализации СМР (SLAM), позволяет повысить точность определения положения СМР. Допол-

нение информации об окружающей среде показаниями ультразвуковых агентов-сенсоров и построение локальной модели пространства, окружающего СМР, позволяет ему функционировать в таких средах, где применение лазерных сканеров оказывается бесполезным, например в помещениях с большим числом прозрачных и отражающих поверхностей, таких как окна, зеркала, витрины. Использование информации о наличии препятствий в зоне безопасности СМР дает возможность системе управления СМР своевременно выбрать направление для маневра, в ходе выполнения которого удастся избежать столкновения.

Применение мультиагентного подхода к разработке сенсорной системы СМР позволяет улучшить процесс передвижения СМР в среде с динамически перемещающимися объектами, а также расширить область применения подобных мобильных роботов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P a r t s c h H. High-Resolution Ultrasonic Sensing for Autonomous Mobile Systems // Manuskript erschienen in Fortschritt-Berichte VDI. – Dusseldorf, 2005. – Reihe 8. – No. 1086.
2. H w a n g K-S., C h e n Y-J., H o n g H-C. Autonomous Exploring System Based on Ultrasonic Sensory Information, Department of Electrical Engineering National Chung Cheng University Chai-Yi, Taiwan // Journal of Intelligent and Robotic Systems. 2004. Vol. 39. Iss. 3. Mar. P. 307–331.
3. Е р м и ш и н К.В., В о р о т н и к о в С.А. Система управления сервисным мобильным роботом-экскурсоводом. Экстремальная робототехника: труды Международной научно-технической конференции. – СПб.: Политехника-сервис, 2011. – С. 351–356.
4. З е н к е в и ч С.Л., Ю щ е н к о А.С. Основы управления манипуляционными роботами. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 480 с.

Статья поступила в редакцию 28.06.2012