$$M\left({}^{c}I_m\right)=\begin{cases}1, \text{ если } \bar{I}>\bar{I}_{\text{пор}}\\ 0, \text{ если } \bar{I}<\bar{I}_{\text{пор}}\end{cases},$$

$\bar{I}_{\text{пор}}$ — пороговое значение яркости, которое рекомендуется выбирать исходя из $\bar{I}_{\text{пор}}=\bar{I}_{\text{выкл}}+0{,}8\left(\left|\bar{I}_{\text{вкл}}-\bar{I}_{\text{выкл}}\right|\right)$, $\bar{I}_{\text{вкл}}$, $\bar{I}_{\text{выкл}}$ — средние яркости при выключенном/включенном устройстве синхронизации.

Систему с N состояниями можно построить, применяя множество импульсных устройств или имитируя их работу при использовании экрана, управляемого через цифровой интерфейс.

В условиях изменяющегося освещения в наблюдаемом с помощью видеокамер пространстве, где производится распознавание состояния устройства синхронизации только на основе перепадов усредненной яркости в выделенной зоне, использование импульсных устройств может быть затруднено. В таких случаях целесообразно применять управляемый экран, на который выводятся хорошо различимые в данных условиях изображения, каждое из которых соответствует определенному состоянию. Для их распознавания и анализа можно использовать методы, основанные на обнаружении характерных признаков, сегментации [5], вычислении корреляции и применении нейронных сетей [4].

Заключение. Предлагаемые система и алгоритмы для нее обеспечивают точное построение пространственных моделей подвижных объектов фотограмметрическими методами с использованием в качестве средств получения изображений цифровых видеокамер массового производства, работающих в вычислительной сети. На предложенное системное решение получен патент [3], удостоенный награды Международной выставки изобретений SIIF 2012, проходившей в Сеуле.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Куделькин В.** А. Патент на полезную модель RU 45079 МПК A61B5/117, 2005.
2. **Князь В.** А. Патент на полезную модель RU 100610 МПК G01B11/24, 2010.
3. **Вилкова Н. Н., Недоступов А. П., Баневич С. В**. Патент на полезную модель RU 119095 МПК G01B11/00, 2012.
4. **Шапиро Л, Стокман Д**. Компьютерное зрение // БИНОМ. Лаборатория знаний», 2006.— 752 с.
5. **Форсайт Д., Понс Ж.** Компьютерное зрение. Современный подход // Издательский дом «Вильямс», 2004.— 928 с.

Получено после доработки 22.05.13.

УДК 621.396

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ОТ КОЛИЧЕСТВА СТАЦИОНАРНЫХ УСТРОЙСТВ В СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ

С. Ю. Агафонов, аспирант СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича; agich_9@mail.ru

***Ключевые слова**: сенсорные сети, точность позиционирования, ошибка локализации.*

Введение. Позиционирование объектов в сенсорных сетях вызывает все больший интерес в связи с развитием сетей локальной и персональной радиосвязи, беспроводных сенсорных сетей. В системах связи малого радиуса действия, основанных на принципах радиолокации, точность определения расстояния обратно пропорциональна полосе частот зондирующего радиоимпульса [1]. По этой причине сверхширокополосные системы очень привлекательны для определения местоположения мобильного объекта. При прочих равных условиях они позволяют достигать более высокой точности позиционирования [2]. Для повышения точности локализации значительные усилия направлены на поиск факторов, влияющих на точность нахождения координат [3].

В статье определяется минимально необходимое количество стационарных узлов с заданным местоположением (УЗМ), необходимых для локализации мобильного объекта в пространстве, а также исследуется зависимость точности позиционирования мобильного объекта от числа используемых в процессе локализации УЗМ.

Позиционирование мобильных устройств. Можно выделить несколько основных методов вычисления расстояния между объектами по радиосигналу, применяемых в настоящее время в сенсорных сетях: на основе времени распространения сигнала (Time of Arrival — ToA) и по разности времени прихода сигнала (The Time Difference of Arrival — TDOA).

Метод ToA основан на измерении времени распространения сигналов, передающихся от мобильного объекта нескольким УЗМ (трем или более). Имея информацию о скорости распространения, зная координаты УЗМ и измеряя время прихода сигналов, можно вычислить расстояния между мобильным устройством и приемником [4].

Для точного определения расстояния между приемником и мобильным объектом требуется их синхронизация. Часто расстояние между двумя устройствами определяется не по времени распространения сигнала от передатчика к приемнику, а по сумме времени распространения сигнала от мобильного объекта к УЗМ и обратно. Поскольку временные интервалы, необходимые для обработки запроса на измерение расстояния между элементами системы определения местоположения, считаются одинаковым для всех устройств системы, то синхронизация данных устройств не требуется [5].

В таком случае инструментальная точность определения расстояния пропорциональна частоте отсчетов в часах и соотношению $\Delta\tau \sim c/f_{\text{ч}}$, где c — скорость света; $f_{\text{ч}}$ —

тактовая частота часов. При измерении местоположения методом TDOA определяется разность времени прихода сигнала в два приемника вместо абсолютного значения времени распространения между мобильным объектом и УЗМ. Данный метод требует синхронизации приемников, которая может достигаться за счет одинаковой длины кабелей, соединяющих приемники с коррелятором.

Для вычисления координат мобильного объекта на плоскости в методе TDOA (как и в ToA) необходимо иметь координаты минимум трех УЗМ. Так, зная скорость распространения сигнала и разность времени прибытия сигнала в приемники *i* и *j*, координаты местоположения мобильного устройства можно определить из трех уравнений, описывающих соотношение координат приемников и мобильного устройства на плоскости, и разность времени прибытия сигнала в приемники [6]:

$$\begin{aligned}
&\sqrt{(x_1-x_m)^2+(y_1-y_m)^2}-\sqrt{(x_2-x_m)^2+(y_2-y_m)^2}=\Delta t_{12}\text{c};\\
&\sqrt{(x_2-x_m)^2+(y_2-y_m)^2}-\sqrt{(x_3-x_m)^2+(y_3-y_m)^2}=\Delta t_{23}\text{c};\quad (1)\\
&\sqrt{(x_3-x_m)^2+(y_3-y_m)^2}-\sqrt{(x_1-x_m)^2+(y_1-y_m)^2}=\Delta t_{31}\text{c},
\end{aligned}$$

где $x_1, x_2, x_3, y_1, y_2, y_3$ — координаты приемников на плоскости; $\Delta t_{12}, \Delta t_{23}, \Delta t_{31}$ — разности времени прибытия сигнала в приемники; x_m, y_m — координаты мобильного устройства; с — скорость света.

Координаты мобильного объекта можно найти из любых двух уравнений (1), третье может быть использовано для оценки точности определения координат. Таким образом, задача нахождения координат мобильного объекта сводится к решению системы уравнений, для построения которой необходимо и достаточно получить результаты измерений от трех УЗМ.

В зависимости от имеющихся данных об ограничениях подвижности радиоузла для точной локации может потребоваться разное количество УЗМ. В упрощенном случае расстояние измеряют по меньшей мере относительно одного УЗМ. Точное местоположение в таком случае определяется с учетом данных о заданной траектории движения, от которой мобильный объект не может отклоняться. В качестве примера можно привести условия, при которых мобильный объект движется по железнодорожным путям или по заранее известному пути. Тогда его местоположение может быть однозначно определено по измеренному расстоянию относительно одного УЗМ.

В общем случае для нахождения местоположения мобильного объекта требуются три УЗМ, расположенных на расстоянии друг от друга. Это позволяет определять локацию мобильного объекта известными методами триангуляции. При этом точность локализации зависит от размеров и площади области перекрытия окружностей с центрами в УЗМ и радиусами, равными измеренным расстояниям до мобильного объекта. Следовательно, чем большее число УЗМ используют для решения задачи позиционирования, тем меньше площадь образованной фигуры и, следовательно, выше точность локализации мобильного объекта [7].

Однако для экономии радиоэфира и снижения стоимости реализации системы позиционирования следует минимизировать количество УЗМ, требуемых для достижения приемлемой точности локации. Таким образом, задача сводится к определению необходимого и достаточного количества УЗМ для обеспечения баланса между точностью локации и загрузкой радиоэфира.

Применяемая в сетях GSM технология определения местоположения E-OTD (Enhanced Observed Time Difference) основана на имеющейся у мобильной станции информации о наблюдаемой разности времени приема сигналов OTD (Observed Time Difference) от нескольких базовых станций (БС). Если мобильная и БС синхронизированы, то мобильная измеряет относительное время приема сигналов от разных БС. Если они не синхронизированы, то сигналы дополнительно принимаются стационарным измерительным модулем LMU (Line Measurement Unit) с известными координатами. Местоположение мобильной станции определяется путем вычисления геометрической составляющей задержки между временем приема сигналов мобильной станцией от нескольких БС.

Таким образом, когда необходимо определить местоположение абонента, в сервисный центр SMLC (Serving Mobile Location Center) посылается запрос с идентификацией MS (Mobile Station) и требуемым уровнем точности измерений, в зависимости от которого SMLC определяет количество измерительных модулей, задействованных в процессе нахождения местоположения. Результаты измерений ToA (Time of Arrival) и параметр точности совместно передаются в SMLC. Последний вычисляет местоположение мобильной станции на основе результатов измерений ToA с учетом известных координат измерительных модулей и задержки между временем приема сигнала и реальным временем RTD (Real Time Difference).

Для получения точной триангуляции необходимо измерить разность времени приема сигналов, а если БС не синхронизированы, то и RTD по меньшей мере трех BTS, разнесенных в пространстве. С учетом результатов измерений OTD местоположение MS вычисляется либо сетью, либо самой MS, если у нее есть необходимая для этого информация. Однако чем больше БС участвует в измерениях, тем выше точность вычисления местоположения. Для нахождения местоположения по усовершенствованной технологии E-OTD требуется один LMU на три — пять БС. Процесс определения местоположения в сетях GSM подробно расписан в [8].

Таким образом, для подавляющего большинства применяемых в настоящее время технологий определения местоположения мобильного объекта можно сделать промежуточный вывод о необходимости использования не менее трех УЗМ для достижения приемлемых значений точности позиционирования.

Определение минимально необходимого количества устройств в сети. Следующим этапом является нахождение зависимости точности позиционирования от количества дополнительно УЗМ.

Пусть N — число УЗМ. Тогда, при $N \geq 3$ координаты мобильного объекта можно вычислить, выполнив стандартную операцию триангуляции. Вследствие многолучевого распространения, а также наличия различных помех в канале, время распространения сигнала между мобильным объектом и УЗМ, а значит и вычисленное по нему расстояние до мобильного объекта, претерпевают значительные изменения.

Для сглаживания этого эффекта будем считать расстояние до мобильного объекта случайной величиной, имеющей нормальный закон распределения со средним, вычисленным по функции уменьшения мощности. Так как каждый УЗМ принимает сигнал независимо от остальных, то данные случайные величины будут также независимыми. Тогда положение мобильного объекта определяется как наиболее

вероятное и должно удовлетворять условию, при котором плотность вероятности нахождения объекта в точке с координатами (x, y) принимает максимальное значение.

Поскольку вычисление местоположения мобильного объекта происходит до нескольких УЗМ, результаты измерений которых независимы, то сумма этих измерений будет равна произведению плотности вероятности нахождения мобильного объекта в точке с координатами (x, y) от каждого УЗМ системы [9]. Таким образом, плотность вероятности нахождения мобильного объекта в точке с координатами (x, y) с учетом условия, что ее значение должно быть максимальным, имеет вид:

$$w(x,y)\big|_{x_0,y_0} = \prod_{i=1}^{N} \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma_i)} e^{\frac{\sqrt{(x_0-x_i)^2+(y_0-y_i)^2-r_i}}{2\sigma_i}} = \max. \qquad (2)$$

При этом среднеквадратичная ошибка определения координат RMSE (Root Mean Square Error), т.е. расстояние между действительным и вычисленным положениями объекта принимает вид:

$$RMSE = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2}, \qquad (3)$$

где (x_0, y_0) — истинные координаты объекта; (x_i, y_i) — измеренное значение координат.

Из (2) следует, что с увеличением количества УЗМ вероятность правильного нахождения координат мобильного объекта повышается и, следовательно, ошибка определения местоположения уменьшается. При этом с увеличением количества принимающих узлов ошибка определения координат меньше зависит от расположения УЗМ. Однако существуют оптимальные конфигурации расположения УЗМ, при которых ошибка минимальна. Поиск этой конфигурации является отдельной задачей.

Для повышения точности локализации мобильного объекта необходимо использовать дополнительные УЗМ. Так, для выбора дополнительных УЗМ могут быть применены различные критерии с учетом помеховой обстановки в районе действия системы локализации или условия расположения системы внутри здания. Как правило, вероятность того, что использование дополнительного УЗМ поможет улучшить точность локации тем выше, чем меньше расстояние между ним и мобильным объектом.

На практике измерение расстояния производится до всех или нескольких дополнительных УЗМ, в зоне покрытия которых находится мобильный объект. Дополнительные УЗМ упорядочивают по силе их влияния на точность локации, а затем их последовательно подключают в порядке уменьшения влияния на точность локализации.

Заключение. Минимально необходимое количество УЗМ неодинаково для различных систем позиционирования мобильного объекта. Однако для большинства систем с повышением количества УЗМ возрастает точность результатов измерения расстояния до объекта. Данный факт связан с увеличением количества производимых измерений и сокращения области пространства вероятного положения мобильного объекта, что приводит к уменьшению ошибки определения координат мобильного объекта.

Применяя дополнительные адаптивные алгоритмы обработки результатов измерений, точность измерений можно повысить не только путем исключения областей пространства (где нахождение объекта невозможно), но и использованием резервных узлов при необходимости получения более точных координат мобильного объекта.

Основным преимуществом сенсорной сети перед схожими технологиями определения координат (Wi-Fi, GSM) является возможность размещения такого количества узлов, которое необходимо для достижения заданной точности позиционирования. Во многих случаях сотовая сеть может выступать в роли транспортной сети для передачи данных о местоположении различных подвижных объектов, оборудованных аппаратурой взаимодействия с сотовыми сетями.

Сегодня в области комбинированных систем связи уже имеются разработки, в которых сенсорные сети используются для уточнения результатов измерений, полученных от систем глобального или сотового позиционирования [10]. Сочетая достоинства систем глобального позиционирования, такие системы позволяют компенсировать недостатки, связанные с относительно невысокой точностью позиционирования и возможностью локализации абонента внутри помещений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент US007843379B2 США. Symmetrical Multi-Path Method For Determining The Distance Between Two Transmitter-Receivers / Lars Menzer & Co.— № 896963. Заявлено 06.05.2008.— Опубл. 30.11.2010.— 3 с.
2. **Мощевикин А.П., Галов А.С., Волков А.С**. Локация в беспроводных сетях датчиков стандарта nanoLOC (IEEE 802.15.4a) // Информационные технологии.— 2011.— № 8.— С.43–47.
3. **Rainer M.** Overview of Current Indoor Positioning Systems // Geodesy and Cartography.— 2009.— 35 (1).— С. 18–22.
4. Real Time Location Systems (RTLS). Nanotron Technologies GmbH, Berlin, Germany. White paper NA-06–0248–0391–1.02.— Apr. 2007.
5. **Muller R.** Localization of Sensor Nodes in a Wireless Sensor Network Using the nanoLOC TRX Transceiver // Proc. of VTC 2009.— Apr. 2009.
6. **Генике А.А., Победявский Г.Г**. Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение.— М.: Картгеоцентр, 2004.— 255 с.
7. Патент WO 2011/108958 a1 РФ. Способ локации радиоузла, система локации радиоузла и узел обработки данных / **Галов А.С. и др**.— № 896963. Заявлено 03.03.2010.— Опубл. 09.09.2011.— 3 с.
8. **Громаков Ю.А., Северин А.В., Шевцов В.А**. Технологии определения местоположения в GSM и UMTS.— М.: Эко-Трендз, 2005.— 98 с.
9. **Шишкин И.** Теоретическая метрология.— М.: Питер, 2006.— 90 с.
10. **Wymeersch H., Lien J., Win M.Z**. Cooperative localization in wireless networks // Proceedings of the IEEE.— 2009.— Vol. 97, № 2.— P. 427—450.

Получено 29.03.13