

УДК 004:796.012

**БИОМЕХАНИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
СПОРТИВНЫХ ДВИЖЕНИЙ  
СРЕДСТВАМИ ЛОКАЛЬНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ  
В ЗАКРЫТЫХ СПОРТИВНЫХ СООРУЖЕНИЯХ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ  
НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**Павельев И.Г., Остриков А.П., Костенко Е.Г., Алдарова Л.М.**

*ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет физической культуры, спорта и туризма»,  
Краснодар, e-mail: ipavelyev@gmail.com*

В настоящее время в системах локального позиционирования (LPS) используется несколько различных способов определения координат объекта. Основное различие известных методов основано на особенностях использования разных параметров, выделенных из принятого радиосигнала. Наиболее широко применяется метод АОА (Angle of Arrival), требующий наличия базовых источников излучения с направленными антеннами, известными параметрами сигнала и координатами расположения. В условиях сложной радиочастотной обстановки, вызванной отражениями сигналов внутри сооружения и возможным затенением опорных источников радиоизлучения, данный метод дает недостаточную точность измерения. Целью исследования было предложить методику автоматизации процесса расчета пространственных координат в биомеханических исследованиях спортивных локомоций в закрытых спортивных сооружениях. Методы и организация исследования: для создания автоматизированной системы локального позиционирования объекта исследования с последующим просчетом биомеханических характеристик использовалась общепринятая инфраструктура WLAN сети стандарта IEEE 802.11, устойчиво принимаемая в помещении закрытого легкоатлетического манежа; на момент обследования общее количество устойчивых источников сигнала было от 7 до 12 с RSS -35...-70 dB в диапазоне 2,4 GHz. В ходе исследований было установлено, что предложенная система получения научных данных о позиционировании по данным LPS позволит повысить точность измерений кинематических характеристик движущихся объектов в отрасли научных исследований спортивных движений. Данная технология дает возможность в реальном времени оперативно накапливать и обрабатывать результаты измерений, открывая широкие перспективы повышения точности измерений биомеханических показателей спортивных локомоций.

**Ключевые слова:** биомеханические исследования, автоматизированные системы, локальное позиционирование, спортивные движения, пространственные координаты, спортивные сооружения

**BIOMECHANICAL STUDY OF SPORTS MOVEMENTS  
BY MEANS OF LOCAL POSITIONING IN CLOSED SPORTS  
FACILITIES USING AUTOMATED SCIENTIFIC RESEARCH SYSTEMS**

**Pavelev I.G., Ostrikov A.P., Kostenko E.G., Aldarova L.M.**

*Kuban State University of Physical Culture, Sport and Tourism, Krasnodar, e-mail: ipavelyev@gmail.com*

Currently, local positioning systems (LPS) use several different ways to determine the coordinates of an object. The main difference between the known methods is based on the features of using different parameters isolated from the received radio signal. The most widely used method is AOA (Angle of Arrival), which requires the presence of basic radiation sources with directional antennas, known signal parameters and location coordinates. In the conditions of a complex radio frequency environment caused by reflections of signals inside the structure and possible shading of the reference sources of radio emission, this method gives insufficient measurement accuracy. The aim of the study was to propose a methodology for automating the process of calculating spatial coordinates in biomechanical studies of sports locomotives in indoor sports facilities. Methods and organization of the study: to create an automated system for local positioning of the object of study with subsequent calculation of biomechanical characteristics, the generally accepted infrastructure of the IEEE 802.11 WLAN network was used, stably received in the indoor athletics arena; at the time of the survey, the total number of stable signal sources was from 7 to 12 with RSS -35...-70 dB in the 2.4 GHz range. In the course of the research, it was found that the proposed system for obtaining scientific data on positioning according to LPS data will improve the accuracy of measurements of kinematic characteristics of moving objects in the field of scientific research of sports movements. This technology makes it possible to quickly accumulate and process measurement results in real time, opening up broad prospects for improving the accuracy of measurements of biomechanical indicators of sportive locomotives.

**Keywords:** biomechanical research, automated systems, local positioning, sports movements, spatial coordinates, sports facilities

В настоящее время в спорт высших достижений все больше внедряются современные технологии контроля и оценки биомеханических параметров спортсменов. Однако контроль перемещения и отслеживания кинематических характеристик за-

частую основан на давно применяющихся и в некоторых случаях устаревших методах. К ним можно отнести:

1. Оптические и лазерные датчики, фиксирующие пересечение объектом определенной линии в пространстве.

2. Средства видеоанализа, позволяющие захватить в кадр определенный участок или все спортивное поле целиком.

Вместе с тем одним из перспективных и непрерывно развивающихся методов локального позиционирования объектов в закрытых спортивных сооружениях является определение координат средствами общепринятой и широко используемой инфраструктуры WLAN. Преимуществами такого подхода можно считать достаточную точность для игровых видов спорта, относительную дешевизну используемого оборудования и отсутствие значимых препятствий для сигнала (например, со стороны других спортсменов).

Тем не менее определение точного положения и параметров движения спортсмена в крытых спортивных сооружениях в условиях отсутствия сигналов спутникового позиционирования (GNSS) является сложной научной проблемой. Сложность в первую очередь определяется собственными особенностями локомоций спортсменов разных видов спорта, минимальной задержкой определения позиции и параметров движения, а также сложностью подготовки исходных данных для позиционирования высокой точности.

Основанные на измерении времени прохождения сигнала и расчете по нему позиции объекта методы TOA (Time of Arrival) и TDOA (Time Difference of Arrival) сложны в реализации из-за необходимости обеспечить синхронизацию работы приемника и передатчика.

Наиболее простым и приемлемым по точности является метод позиционирования по шаблону (Fingerprinting), когда для каждой точки поверхности измерений создается RSS (Received Signal Strength) карта, учитывающая мощность сигнала от видимых радиостанций в каждой точке измеряемой поверхности [1, с. 7; 2, с. 256]. Во многих работах предлагается исполь-

зовать готовые базы данных источников радиоизлучения, соответствующие каждому объекту [3, с. 83; 4, с. 207; 5, с. 20]. Однако такой подход требует поддержания этих баз в актуальном состоянии, что приводит к значительному повышению временных и финансовых затрат на подготовку измерений прежде всего за счет невозможности оперативного автоматизированного управления системой сбора и обработки научных данных. Кроме того, данный метод не всегда справляется с ситуациями, когда происходит внезапное отключение одного или нескольких источников излучения или их перемещение относительно исследуемого объекта [6, с. 2; 7; 8, с. 44].

Целью исследования было обосновать новую методику автоматизации технологии определения и расчета пространственных координат движущихся объектов при выполнении двигательной деятельности в закрытых сооружениях в процессе научных исследований спортивных движений.

#### Материалы и методы исследования

Для создания автоматизированной системы локального позиционирования объекта, в данном случае спортсмена, и биомеханических исследований спортивных движений использовалась существующая инфраструктура WLAN сети стандарта IEEE 802.11n, принимаемая в помещении крытого легкоатлетического манежа. Общее количество устойчивых источников сигнала на момент исследований от 7 до 12 с RSS  $-35...-70$  dB в диапазоне 2,4 GHz. В качестве приемника использовался прибор собственной разработки на основе микропроцессора Tensilica Xtensa LX6 с дополнительным каналом передачи сигналов по протоколу LoRa-LAN (рис. 1), при этом встроенный в прибор тракт IEEE 802.11 использовался только на прием, а LoRa – для передачи данных на терминал исследователя [9].



Рис. 1. Фотография приемника сигнала собственной разработки

### Результаты исследования и их обсуждение

В спортивной практике, в частности при биомеханических исследованиях, зачастую требуется с достаточной точностью определять положение того или иного объекта в некоем ограниченном пространстве. Например, в игровых видах спорта тренерскому составу часто приходится анализировать игру команды, опираясь только лишь на результаты видеосъемки. При этом далеко не всегда удается с приемлемой точностью определить положение на поле интересующего игрока. Причинами тому могут служить непопадание в кадр, заслон другими объектами, расфокусировка камеры и др. Предлагаемая методика автоматизации процесса определения локального положения биомеханических объектов позволяет повысить точность расчета пространственных координат. Также на основе первичных полученных данных могут быть произведены косвенные расчеты других биомеханических характеристик, таких как скорость или ускорение в определенный момент времени.

Для регистрации биомеханических составляющих локомоций объекта использовались два интегральных гироскопа-акселерометра MPU-9150, установленные перпендикулярно друг к другу. Перед началом работы проводилось сканирование диапазона 2,4 GHz, ранжирование видимых источников радиоизлучения по мощности принимаемого сигнала и их запоминание с идентификацией по SSID. Циклы контрольного сканирования источников проводятся три раза с интервалом 10 с, после чего для данного объекта текущее положение определяется как «0» виртуальной системы координат на плоскости для данного объекта  $(x'_n, y'_n)$ , где  $n$  – номер маркера объекта в системе.

Дальнейшие локомоции спортсмена отслеживаются с дискретностью 0,1–1 с, в зависимости от требуемой точности и передаются на терминал исследователя по сети LoRa LAN. Передаваемая информация содержит текущее положение объекта на плоскости в виртуальной системе координат и информацию о биомеханических характеристиках локомоций спортсмена. При анализе локомоций спортсмена априори принято ограничение нахождения объекта внутри некоего контура измерений, определяемого размерами спортивной площадки (дорожки, сектора и т.д.), имеющего координаты  $(X_s, Y_s)$ . При выполнении условия  $x'_n > X_s$  и  $y'_n > Y_s$  измерение считается недостоверным и исключается.

В исследовании использовалась площадка размером 20x20 м на базе легкоатлетического манежа Кубанского государственного университета физической культуры, спорта и туризма, 5 базовых источников излучения стандарта IEEE 802.11, идентифицированных по SSID и ранжированных по RSS. Доступ экспериментатора к управлению источниками сигнала отсутствовал.

Базовые измерения проводились по следующим аналитическим выражениям в соответствии с движением объекта по площадке (рис. 2).

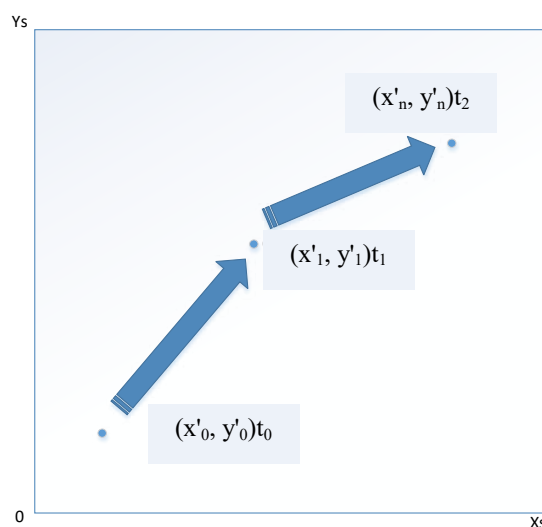


Рис. 2. Перемещение объекта по площадке

$$r(t) = [x(t), y(t)]; \quad (1)$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 \rightarrow 0,$$

где  $r$  – положение объекта в момент измерения.

Отсюда скорость объекта определяется как

$$V(t) = \frac{r(t + \Delta t) - r(t)}{\Delta t} = \frac{dr}{dt}. \quad (2)$$

Дополняем рассчитанную скорость инерциальной составляющей

$$V_i(T) = V(t) \times I_d, \quad (3)$$

где  $I_d$  – инерциальный признак:

$I_d = 0$  – объект не движется;

$I_d = 1$  – объект движется.

Ускорение определяется как

$$a(t) = \frac{V_i(t + \Delta t) - V_i(t)}{\Delta t} = \frac{dV_i}{dt}. \quad (4)$$

При этом с помощью акселерометра также определялся факт собственного движения объекта на плоскости. В данном случае факт физического движения объекта (спортсмена), а не возможное смещение источника излучения.

```

def get_rssi(d):
#RSSI (dBm) = -10n log10(d) + A
return -10 * n * math.log10(d) + A
def get_distance_from_rssi(rssi):
#d = 10^((A-RSSI)/(10n))
return pow(10, ((A-rssi)/(10*n)))
def find_rss_location(location_wifi, player, time_var):
out = []
for row in location_wifi:
distance = math.sqrt(pow(player[0]-row[0], 2) + pow(player[1]-row[1], 2))
rssi = get_rssi(distance)
out.append
{
"time": time_var,
"distance": distance,
"rssi": rssi
}

```

Рис. 3. Фрагмент алгоритма программы подсчета координат

При отсутствии факта собственного движения изменение координат объекта игнорируется. В процессе измерений проводилась фиксация положения объекта, мощность источников и соответствие рассчитанных координат источника координатам площадки.

Имели место частичные «выпадения» сигнала одного или нескольких базовых источников в процессе проведения измерения, при этом причины этого явления не выяснялись, а выпавшие измерения автоматически дополнялись программно с использованием алгоритма Метрополиса – Гастингса [1, с. 5–7], в котором посредством ранжирования по мощности сигнала рассчитываются недостающие положения в области отслеживания. Фрагмент программы с алгоритмом ранжирования представлен на рис. 3 [9].

При длительном (более 10 с) отсутствии сигнала от двух базовых источников из списка проводился сокращенный цикл сканирования и ранжирования работающих источников, обновлялся список, при этом последнее измерение с предыдущим набором источников становилось точкой нового отсчета положения объекта.

Недостающие требуемые биомеханические параметры локомоций объекта выводились и рассчитывались из основных формул кинематики:

$$x(t) = x_0 + v_{x0}t + \frac{a_x t^2}{2}, \quad (5)$$

$$s_x = \frac{v_x^2 - v_{x0}^2}{2a_x}. \quad (6)$$

Также при необходимости для автоматизации расчетов применялись компьютерные средства обсчета данных в Microsoft Excell.

В процессе обследования и тестирования группы футболистов и легкоатлетов на базе легкоатлетического манежа Кубанского государственного университета физической культуры, спорта и туризма получена следующая точность измерений локальных координат:

– при использовании пяти базовых сигналов погрешность по обеим координатам составила 0,3 м, по скорости 0,71 м/с; при использовании меньшего количества базовых сигналов погрешность составляет 0,7 м и 0,95 м/с соответственно и более;

– при использовании семи базовых источников погрешность по обеим координатам составила 0,22 м и 0,6 м/с соответственно.

### Заключение

Таким образом, применение перспективной и непрерывно развивающейся методики автоматизации процесса определения и расчета пространственных координат движущихся объектов позволит исследователям и тренерам получать более полную информацию о выполняемой спортсменами двигательной деятельности в закрытых спортивных сооружениях, а также автоматизировать технологию получения научных данных о биомеханических показателях. Об этом говорит распространенность используемой инфраструктуры, а следовательно, и доступность. Также значимым считается тот факт, что при работе не происходит перекрытие обследуемого спортсмена другими объектами.

Как показали исследования, применение технологий сетей стандарта IEEE 802.11 для решения класса задач определения локального позиционирования (LPS) в биомеханических исследованиях с использованием аналитической коррекции результатов по данным инерциальных измерений RSS позволяет получить приемлемую

точность результатов для спортивных игр и легкой атлетики.

Возможность получения и обработки результатов измерений в реальном масштабе времени непосредственно на объекте измерений открывает широкие возможности для повышения точности измерения биомеханических показателей спортивных локомоций и в некоторых других областях, например в навигации робототехнического оборудования и транспорте.

#### Список литературы

1. Nurminen H., Talvitie J., Ali-Löytty S., Müller P., Lohan E.S., Piché, Renfors M. Statistical pass loss parameter estimation and positioning using RSS measurements in indoor wireless networks. International Congress of Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). Sidney AUS. 2012. P. 1–9.
2. Аверин И.М., Ермолаев В.Т., Флакман А.Г., Семенов В.Ю. Определение местоположения пользователя в Wi-Fi сети // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Теория и техника телекоммуникаций. 2011. № 5 (3). С. 256–262.
3. Миниахметов Р.М., Рогов А.А., Цимблер М.Л. Обзор алгоритмов локального позиционирования для локальных устройств // Вестник ЮугГУ. 2013. Т. 2. № 2. С. 83–96.
4. Щекотов М.С. Анализ подходов к позиционированию внутри помещений с использованием трилатерации сигналов Wi-Fi // Труды СПИИРАН. 2014. Вып. 5 (36). С. 206–214.
5. Kaplan E.D., Hegarty C.J. Understanding GPS: principles and applications. London, Artech House. 2006. 344 p.
6. Henniges R. Current approaches of Wi-Fi Positioning. Berlin. 2012. P. 1–8.
7. Казаков Е.Н. Разработка и программная реализация алгоритма оценки уровня сигнала Wi-Fi // Моделирование, оптимизации и информационные технологии. 2016. № 1 (12). С. 13–19. URL: <http://moit.vivt.ru> (дата обращения: 20.09.2021).
8. Остриков А.П. Приборный комплекс контроля равновесия и биомеханических показателей точности движения спортсмена // Актуальные вопросы физической культуры и спорта. 2015. Т. 17. С. 44–47.
9. Остриков А.П., Минаев Г.Ю., Павельев И.Г. Программа контроля параметров движения спортсмена // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021619641, 15.06.2021. Заявка № 2021618383 от 25.05.2021.