

# Разработка критерия эффективности для оценки погрешности датирования в персонифицированной распределенной информационно-измерительной системе

Н. В. Романцова<sup>1</sup>, А. В. Царёва<sup>2</sup>, Я. А. Тяркин<sup>3</sup>

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

<sup>1</sup> nvromantsova@mail.com, <sup>2</sup> caanyuta@yandex.ru, <sup>3</sup> slava.tyarkin@mail.ru

**Аннотация.** Разработка критерия эффективности для оценки погрешности при выполнении косвенных измерений в персонифицированной распределенной информационно-измерительной системе с автономными измерительными модулями и передачей результатов в центральный вычислитель.

**Ключевые слова:** погрешность измерения; персонифицированная распределённая информационно-измерительная система; критерий эффективности; косвенные измерения

## I. ВВЕДЕНИЕ

Персонифицированные распределенные информационно-измерительные системы (ПРИИС) предназначены для исследования кинематики движений человека [1–6]. Такие системы создаются с целью оценки пространственно-временных характеристик движения в рамках реабилитационных мероприятий, а также для прогнозирования изменения состояния исследуемых характеристик движения. ПРИИС строятся с применением измерительных модулей, включающих в себя: акселерометр, гироскоп, аналогово-цифровой преобразователь, микроконтроллер и устройство передачи данных по радиоканалу [7–8]. На основе полученных измерительных данных об ускорении определяются длительности фаз движения, по которым рассчитывают, например, такие характеристики, как темп и ритм шага. Количественные характеристики приводят по соответствующим шкалам к качественным характеристикам для оценки состояния испытуемого.

## II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В статье [9] авторы выделяют три активных фазы шага: 1 – первая фаза переноса, 2 – вторая фаза переноса, 3 – постановка каблука (рис. 1-2). На рис. 1 и 2 по оси абсцисс отложено время, по оси ординат – ускорение, выраженные в относительных единицах.

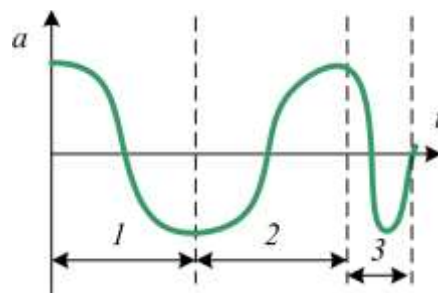


Рис. 1. График вертикальной составляющей линейного ускорения

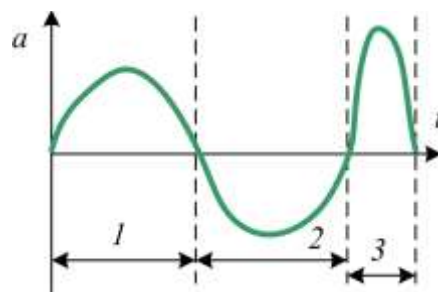


Рис. 2. График горизонтальной составляющей линейного ускорения по направлению движения

В персонифицированных распределенных информационно-измерительных системах на основе алгоритма дискретного вейвлет-преобразования определяют длительности фаз шага. Погрешность таких измерений составляет для момента начала фазы отрыва  $\gamma\theta_1 = 1,1\%$ , для момента начала фазы опоры  $\gamma\theta_5 = 2,6\%$ . [1]

В целях диагностики состояния испытуемого в области лечебной физкультуры и спорта оценивают такие характеристики, как темп  $R$  и ритм  $Rh$ . Темп и ритм являются косвенно измеренными величинами, и их значение вычисляются на основе измеренных временных характеристик фаз шага. Темп вычисляется согласно выражению:

$$R = \frac{T_{norm}}{T_r + T_l} = \frac{T_{norm} \sum_{k=1}^N \left( \frac{1}{\theta_{5rk} - \theta_{1rk}} + \frac{1}{\theta_{5lk} - \theta_{1lk}} \right)}{N},$$

где  $T_r$ ,  $T_l$  – длительности шагов правой и левой ног;  $N$  – количество шагов;  $\theta_{1r}$ ,  $\theta_{1l}$  – момент начала фазы отрыва

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект №22-29-20123 (50% вклада)

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Санкт-Петербургского научного фонда в соответствии с соглашением от 14.04.2022 № 14/2022 (50% вклада)

левой и правой стопы;  $\theta_{5r}$ ,  $\theta_{5l}$  – момент начала фазы опоры;  $k$  – номер шага;  $T_{norm}$  – нормирующее значение.

Для информационно-измерительных систем (ИИС) могут нормироваться только погрешности измерительных каналов, выполняющих прямые измерения  $x_j$ . Каждый результат косвенного измерения должен сопровождаться информацией о его погрешности, в ИИС происходит одновременное вычисление результата косвенного измерения  $Y$  и вычисление погрешностей  $\Delta Y$  и  $\gamma_Y$  [10].

Абсолютную погрешность  $\Delta R$  результата косвенного измерения темпа  $R$  вычисляют на основе частных производных:

$$\frac{\partial R}{\partial \theta_{5r}} = -\frac{T_{norm}}{N} \sum_{k=1}^N \frac{1}{(\theta_{5rk} - \theta_{1rk})^2};$$

$$\frac{\partial R}{\partial \theta_{5l}} = -\frac{T_{norm}}{N} \sum_{k=1}^N \frac{1}{(\theta_{5lk} - \theta_{1lk})^2};$$

$$\frac{\partial R}{\partial \theta_{1r}} = \frac{T_{norm}}{N} \sum_{k=1}^N \frac{1}{(\theta_{5rk} - \theta_{1rk})^2};$$

$$\frac{\partial R}{\partial \theta_{1l}} = \frac{T_{norm}}{N} \sum_{k=1}^N \frac{1}{(\theta_{5lk} - \theta_{1lk})^2};$$

Для некоррелированных составляющих  $\Delta \theta_{1r}$ ,  $\Delta \theta_{1l}$ ,  $\Delta \theta_{5r}$ ,  $\Delta \theta_{5l}$  результирующая погрешность определяется как их алгебраическая сумма, т.е. знаки производных не должны учитываться при суммировании [10]. В персонафицированной распределенной информационно-измерительной системе следует применять следующее выражение для расчета абсолютной погрешности темпа  $\Delta R$ :

$$\Delta R = \frac{T_{norm}}{N} \sum_{k=1}^N \left( \frac{1}{(\theta_{5rk} - \theta_{1rk})^2} \cdot \Delta \theta_{5r} + \frac{1}{(\theta_{5lk} - \theta_{1lk})^2} \cdot \Delta \theta_{5l} + \frac{1}{(\theta_{5rk} - \theta_{1rk})^2} \cdot \Delta \theta_{1r} + \frac{1}{(\theta_{5lk} - \theta_{1lk})^2} \cdot \Delta \theta_{1l} \right).$$

Таким образом, при медленной ходьбе (менее 1 шага в секунду) абсолютная погрешность измерения темпа  $\Delta R$  будет уменьшаться за счет уменьшения величин частных производных, при быстрой ходьбе (более 1 шага в секунду) погрешность  $\Delta R$  будет увеличиваться.

Ритм является косвенно измеряемой величиной второго рода и вычисляется согласно выражению:

$$Rh_k = \frac{\min(T_{rk}, T_{lk})}{\max(T_{rk}, T_{lk})} = \frac{\min(\theta_{5rk} - \theta_{1rk}, \theta_{5lk} - \theta_{1lk})}{\max(\theta_{5rk} - \theta_{1rk}, \theta_{5lk} - \theta_{1lk})}.$$

Расчет абсолютной погрешности  $\Delta Rh_k$  результата косвенного измерения ритма  $Rh_k$  в персонафицированной распределенной информационно-

измерительной системе должен выполняться согласно выражению:

$$\Delta Rh_k = \frac{1}{\theta_{5lk} - \theta_{1lk}} \cdot \Delta \theta_{5r} + \frac{1}{\theta_{5lk} - \theta_{1lk}} \cdot \Delta \theta_{1r} + \frac{\theta_{5rk} - \theta_{1rk}}{(\theta_{5lk} - \theta_{1lk})^2} \cdot \Delta \theta_{5l} + \frac{\theta_{5rk} - \theta_{1rk}}{(\theta_{5lk} - \theta_{1lk})^2} \cdot \Delta \theta_{1l}$$

при  $(\theta_{5rk} - \theta_{1rk}) \leq (\theta_{5lk} - \theta_{1lk})$ ;

$$\Delta Rh_k = \frac{1}{\theta_{5rk} - \theta_{1rk}} \cdot (\Delta \theta_{5l} + \Delta \theta_{1l}) + \frac{\theta_{5lk} - \theta_{1lk}}{(\theta_{5rk} - \theta_{1rk})^2} \cdot (\Delta \theta_{1l} + \Delta \theta_{5l})$$

при  $(\theta_{5rk} - \theta_{1rk}) > (\theta_{5lk} - \theta_{1lk})$ .

Основная трудность, с которой сталкивается экспериментатор при проведении косвенных измерений, состоит в том, что даже если погрешности прямых измерений распределены по нормальному закону, то зачастую, косвенно измеряемая величина связана с аргументами нелинейно. При нелинейной зависимости измеряемой величины от аргументов (рис. 3) закон распределения результата измерения косвенной величины никогда не будет подчиняться нормальному закону распределения. Темп  $R$  и ритм  $Rh$  связаны нелинейно со своими аргументами  $\theta_{1r}$ ,  $\theta_{1l}$  – моментами начала фазы отрыва левой, правой стопы и  $\theta_{5r}$ ,  $\theta_{5l}$  – моментами начала фазы опоры.

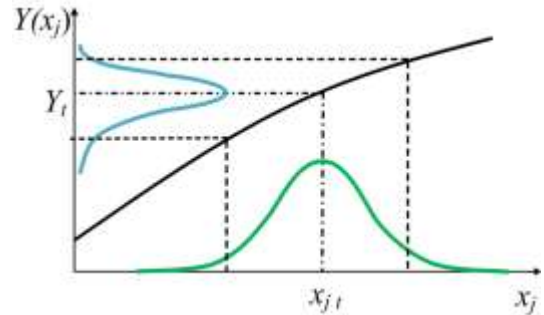


Рис. 3. Формирование закона распределения косвенно измеряемой величины  $Y$  при разбросе случайной величины  $x_j$  по нормальному закону

При рассмотрении функции зависящей от одного аргумента  $Y(x_j)$ , линейные участки выделяют при помощи полинома Тейлора. Ряд Тейлора выделяет само значение функции в рассматриваемой точке и линейную часть функции в данной точке:

$$Y(x_j) = Y(x_{tj}) + \frac{\partial Y(x_{tj})}{\partial x_j} (x_j - x_{tj}) + R_1(x_j),$$

где  $x_{tj}$  – истинное значение величины  $x_j$ .  $R_1(x_j)$  – остаточный член ряда Тейлора, который показывает, какой производной ограничились в ряде Тейлора.

При такой аппроксимации допускается погрешность равная остаточному члену ряда Тейлора  $R_1(x_j)$ .

Линеаризация считается выполненной верно, если выполняется условие:

$$R_1(x_j) \leq 0.8\sigma_y^-,$$

где  $\sigma_y^-$  с.к.о. величины  $Y$ . [11]

Остаточный член  $R_{1R}(\theta_{1r}, \theta_{1l}, \theta_{5r}, \theta_{5l})$  ряда Тейлора, применяемого при линеаризации функции темпа  $R$ , можно представить в виде:

$$\begin{aligned} R_{1R}(\theta_{1r}, \theta_{1l}, \theta_{5r}, \theta_{5l}) = & \frac{\partial^2 R(\theta_{1r}, \theta_{1l}, \theta_{5r}, \theta_{5l})}{\partial \theta_{1r}^2} (\theta_{1r} - \theta_{1rt}) + \\ & + \frac{\partial^2 R(\theta_{1r}, \theta_{1l}, \theta_{5r}, \theta_{5l})}{\partial \theta_{1l}^2} (\theta_{1l} - \theta_{1lt}) + \\ & + \frac{\partial^2 R(\theta_{1r}, \theta_{1l}, \theta_{5r}, \theta_{5l})}{\partial \theta_{5r}^2} (\theta_{5r} - \theta_{5rt}) + \\ & + \frac{\partial^2 R(\theta_{1r}, \theta_{1l}, \theta_{5r}, \theta_{5l})}{\partial \theta_{5l}^2} (\theta_{5l} - \theta_{5lt}) + R_{2R}(\theta_{1r}, \theta_{1l}, \theta_{5r}, \theta_{5l}), \end{aligned}$$

или если подставить выражения для частных производных:

$$\begin{aligned} R_{1R}(\theta_{1r}, \theta_{1l}, \theta_{5r}, \theta_{5l}) = & -\frac{2}{(\theta_{5r} - \theta_{1r})^3} (\theta_{1r} - \theta_{1rt}) - \\ & -\frac{2}{(\theta_{5l} - \theta_{1l})^3} (\theta_{1l} - \theta_{1lt}) + \\ & + \frac{2}{(\theta_{5r} - \theta_{1r})^3} (\theta_{5r} - \theta_{5rt}) + \\ & + \frac{2}{(\theta_{5l} - \theta_{1l})^3} (\theta_{5l} - \theta_{5lt}) + R_{2R}(\theta_{1r}, \theta_{1l}, \theta_{5r}, \theta_{5l}), \end{aligned}$$

Таким образом, при медленной ходьбе (менее 1 шага в секунду) остаточный член ряда Тейлора будет уменьшаться пропорционально кубу длительности шага за счет уменьшения величин частных производных, при быстрой ходьбе (более 1 шага в секунду) остаточный член будет увеличиваться. Аналогичные рассуждения можно привести для оценки остаточного члена полинома Тейлора при линеаризации функции ритма  $Rh$ .

Если отличие между измеренным значением аргумента  $x_{jt}$  и истинным значением аргумента  $x_j$  приводит к выходу функции  $Y(x_j)$  из зоны линеаризации, то это приводит к ошибкам в оценке значения косвенного измерения и его погрешности [12–16] из-за отклонения закона распределения измеряемой величины от нормального (рис. 4).

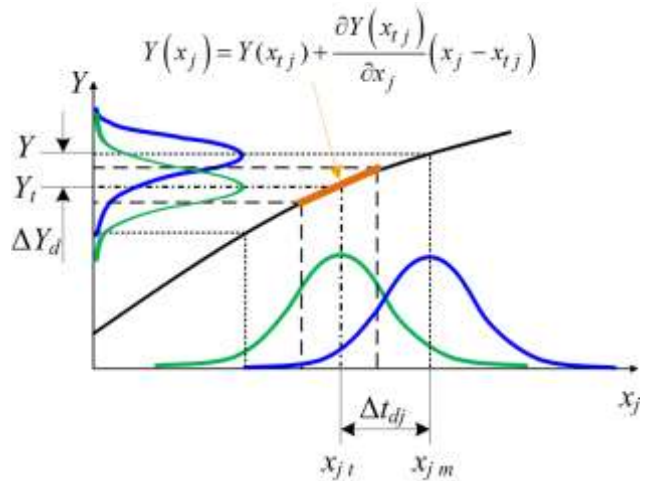


Рис. 4. Формирование погрешности косвенных измерений, обусловленной сдвигом момента измерения

Таким образом, в качестве критерия эффективности можно использовать отношение величины  $R_{1R}(\theta_{1r}, \theta_{1l}, \theta_{5r}, \theta_{5l})$  к с.к.о. величины темпа  $R$  и отношение величины остаточного члена полинома Тейлора при аппроксимации функции ритма  $R_{1Rh}(\theta_{1r}, \theta_{1l}, \theta_{5r}, \theta_{5l})$  к с.к.о. величины ритма  $Rh$ .

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В докладе представлены выражения для вычисления значений погрешностей косвенных измерений ритма и темпа ходьбы. В персонафицированной распределенной информационно-измерительной системе каждый результат косвенного измерения будет сопровождаться значением погрешности. В качестве критерия эффективности предложено использовать отношение величины  $R_{1R}(\theta_{1r}, \theta_{1l}, \theta_{5r}, \theta_{5l})$  к с.к.о. величины темпа  $R$  и отношение величины  $R_{1Rh}(\theta_{1r}, \theta_{1l}, \theta_{5r}, \theta_{5l})$  к с.к.о. величины ритма  $Rh$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Царёва А.В. Алгоритмическое обеспечение информационноизмерительной системы определения временных параметров шага человека: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб., 2020. 18 с.
- [2] Romantsova N.V., Suloeva E.S., Tsareva A.V. Metrological parameters of information and measurement systems for the study of a kinematic portrait of a person. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1703(1), doi:10.1088/1742-6596/1703/1/012005
- [3] Tsareva A.V., Romantsova N.V., Korolev P.G. Information-Measuring System for the Study of Motion Kinematics. В сборнике: Select the Frequency of Measurement Information Transmission. 2019 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS), Sochi, Russia, 23-27 Sept. 2019, С. 380-382. DOI: 10.1109/ITQMIS.2019.8928416
- [4] Romantsova N.V., Tsareva A.V., Alekseev V.V., Avdeeva E.N., Methods for Creating a Task for the Study of a Kinematic Portrait of a Person, 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2021, С. 1046-1050, doi: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396440.
- [5] Korolev P.G., Romantsova N.V., Galimullina E.E., Akolzin A.I. Movement Kinematics Research Systems. The Measuring Experiment Organization, 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2019, С. 553-555, doi: 10.1109/EIConRus.2019.8656718.
- [6] Tsareva A.V., Romantsova N.V., Zhurbilo P.G. The Validity of the Step Phase Identification Algorithm, 2020 IEEE Conference of

- Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus), 2020, С. 913-916, doi: 10.1109/EIconRus49466.2020.9039517.
- [7] Lomachenko A.A., Romantsova N.V., Tsareva A.V. Telecommunication subsystem algorithmic maintenance of a distributed measurement system, 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus), 2018, С. 916-918, doi: 10.1109/EIconRus.2018.8317238.
- [8] Korolev P.G., Romantsova N.V., Sukhotski V.A. Communication in technical diagnostics systems, 2016 XIX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), 2016, С. 365-368, doi: 10.1109/SCM.2016.7519783.
- [9] Jeong Won Kim. A Step, Stride and Heading Determination for the Pedestrian Navigation System / Jeong Won Kim, Han Jin Jang, Dong-Hwan Hwang, Chansik Park // Journal of Global Positioning Systems. 2004. С. 273-279
- [10] Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений / 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. 304 с.
- [11] Метрология, стандартизация и сертификация: учебник для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки "Приборостроение", "Оптотехника" / [Б.Я. Авдеев, В.В. Алексеев, Е.М. Антонюк и др.]; под ред. В.В. Алексева. 2-е изд., стереотип. М.: Издательский центр "Академия", 2008. 384 с.
- [12] Романцова Н.В. Составление расписания работы многоканальной измерительной системы с минимизацией погрешности датирования: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб., 2015. 18 с.
- [13] Tsvetkov E.I., Suloeva E.S. Analysis of the Parameters That Determine the Reliability of the Results of a Verification of Measuring Instruments."Measuring equipment" application / Measurement Techniques 201861(9), С. 872-877 DOI: 10.32446/0132-4713-2018-3-3-13
- [14] Tsvetkov E.I., Suloeva E.S. Metric identification for random value density distribution В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. 13. Сер. 13th Multiconference on Control Problems, МССР 2020 2021. С. 012092.
- [15] Gosteva D.R., Korolev P.G., Romantsova N.V., Minchev N.V. // Accuracy of dating of linear acceleration measurements / 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus), 2018, С. 869-871, doi: 10.1109/EIconRus.2018.8317226
- [16] Glazebnyy K.I., Romantsova N.V. and Sokolov A.N. Algorithmic Support for Calculating the Compositions of Distribution Laws, // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus), 2021, С. 360-363, doi: 10.1109/EIconRus51938.2021.9396547.