

## Влияние точности позиционирования мобильных объектов с использованием ГНСС на энергетические характеристики канала связи в сетях 5G

Д.Д. Габриэлян<sup>1</sup> , М.Ю. Звездина<sup>1</sup> , Ю.А. Шокова<sup>2</sup> , О.А. Лаврентьев<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> ФГУП «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи»  
344038, Россия, г. Ростов-на-Дону,  
ул. Нансена, 130

<sup>2</sup> Донской государственный технический университет  
344000, Россия, г. Ростов-на-Дону,  
пл. Гагарина, 1

<sup>3</sup> Филиал «Государственного радиочастотного центра»  
в Южном и Северо-Кавказском федеральных округах  
344002, Россия, г. Ростов-на-Дону, пр. Буденновский, 50

*Аннотация* – Получены аналитические соотношения, определяющие зависимость между точностью позиционирования объектов-абонентов связи по сигналам ГНСС и точностью измерения псевдоудаленностей. На основе данных соотношений выявлена взаимосвязь между точностью позиционирования и распределением излучаемой антеннами мощности в пространстве, что позволяет оценить погрешность наведения лучей антенн в пространстве. Вывод данных соотношений основан на предположении о релейском канале распространения сигналов ГНСС. Показано, что точность позиционирования объектов при погрешности определения псевдоудаленности 1 м и ширине луча ДН 2 градуса определяет среднее снижение мощности сигнала в радиоканале, обусловленное погрешностями позиционирования объектов, не более 0,25 дБ, нормированное значение среднеквадратического отклонения –13,5 дБ. Вследствие погрешностей позиционирования возможно снижение мощности сигнала в радиоканале до 1 дБ.

*Ключевые слова* – сети 5G; позиционирование объектов в ГНСС; взаимное положение объектов; распределение мощности сигнала; статистические характеристики.

### Введение

Процесс формирования Глобальной информационной системы на базе Internet предполагает необходимость устойчивого доступа к широкополосным сетям связи со скоростью передачи более 10 Гб/с для мобильных абонентов независимо от места их нахождения [1]. Обеспечение устойчивого соединения в сетях 5G обуславливает жесткие требования на точность определения координат абонентов, что связано с высокой плотностью распределения абонентов и, соответственно, с использованием антенн с узкими диаграммами направленности (ДН) для выполнения требований электромагнитной совместимости абонентов [2–5]. В отличие от сетей 4G, где формирование луча антенны МИМО осуществляется для группы абонентов, в сетях 5G луч формируется для каждого из абонентов [6]. Указанное обстоятельство требует формирования узкого лепестка ДН для обеспечения электромагнитной совместимости, что, в свою очередь, обуславливает необходимость определения положения мобильного абонента с высокой точностью. Последнее может быть обеспечено, как правило, с использованием спутников ГНСС. Однако взаимосвязь точности

определения положения мобильных абонентов с энергетическими характеристиками радиоканала, необходимыми для устойчивого функционирования сетей 5G, хотя и рассмотрена в [7; 8], проанализирована не в полной мере.

Целью статьи является анализ взаимосвязи точности получаемых значений псевдоудаленностей абонентов по сигналам спутников ГНСС с энергетическим потенциалом радиоканала между мобильными объектами.

Задачи, связанные с достижением цели работы, включают:

- 1) Анализ точности позиционирования мобильных абонентов по сигналам ГНСС;
- 2) Исследование взаимосвязи точности позиционирования мобильных объектов с использованием ГНСС и энергетических характеристик канала связи в сетях 5G.

### 1. Анализ точности позиционирования мобильных абонентов по сигналам ГНСС

Рассмотрим радиоканал, формируемый двумя абонентами сети, расположенными в точках с предполагаемыми координатами  $\{x_1^{(0)}, y_1^{(0)}, z_1^{(0)}\}$

и  $\{x_2^{(0)}, y_2^{(0)}, z_2^{(0)}\}$  в геоцентрической системе координат Охуз. Положение мобильных объектов может быть оценено по сигналам спутников ГНСС на основе представления псевдодалностей мобильного объекта от спутника ГНСС. Такая оценка для каждого из объектов легко может быть получена из соотношений:

$$\begin{aligned} x_i &= x_i^{(0)} + \Delta x_i, & y_i &= y_i^{(0)} + \Delta y_i, \\ z_i &= z_i^{(0)} + \Delta z_i, & (i &= 1, 2), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $x_i^{(0)}$ ,  $y_i^{(0)}$  и  $z_i^{(0)}$  – предполагаемые координаты  $i$ -го объекта;  $\Delta x_i$ ,  $\Delta y_i$  и  $\Delta z_i$  – соответствующие уточняющие поправки координат.

Оценки  $\Delta x_i$ ,  $\Delta y_i$  и  $\Delta z_i$  для каждого из объектов ( $i = 1, 2$ ), образующих радиоканал, находятся из решения соответствующей переопределенной системы уравнений [9]:

$$\frac{x_i^{(0)} - X_j}{D_{i,j}^{(0)}} \Delta x_i + \frac{y_i^{(0)} - Y_j}{D_{i,j}^{(0)}} \Delta y_i + \frac{z_i^{(0)} - Z_j}{D_{i,j}^{(0)}} \Delta z_i = \delta D_{i,j}, \quad (2)$$

$(i = 1, 2, \quad j = 1, \dots, J),$

где  $X_j$ ,  $Y_j$ ,  $Z_j$  – геоцентрические координаты  $j$ -го спутника ГНСС, по отношению к которому определяется псевдодалность  $i$ -го объекта;

$$D_{i,j}^{(0)} = \sqrt{(x_i^{(0)} - X_j)^2 + (y_i^{(0)} - Y_j)^2 + (z_i^{(0)} - Z_j)^2}$$

– предполагаемое значение псевдодалности после учета поправок на распространение сигнала в атмосфере;  $\delta D_{i,j}$  – погрешности определения псевдодалности, связанные с шумами при приеме сигналов ГНСС.

Система уравнений (2) для определения поправок для каждого из абонентов может быть представлена в матричной форме:

$$\mathbf{A}_i \cdot \Delta \mathbf{P}_i = \delta \mathbf{D}_i, \quad (i = 1, 2), \quad (3)$$

где  $\mathbf{A}_i$  – матрица размерности  $J \times 3$ ;  $\Delta \mathbf{P}_i$  – вектор-столбец размерности  $3 \times 1$ ;  $\delta \mathbf{D}_i$  – вектор-столбец размерности  $J \times 1$ .

Матрица  $\mathbf{A}_i$ , вектор-столбец,  $\Delta \mathbf{P}_i$  и вектор-столбец  $\delta \mathbf{D}_i$  могут быть представлены в виде

$$\mathbf{A}_i = \begin{pmatrix} \frac{x_i^{(0)} - X_1}{D_{1,1}^{(0)}} & \frac{y_i^{(0)} - Y_1}{D_{1,1}^{(0)}} & \frac{z_i^{(0)} - Z_1}{D_{1,1}^{(0)}} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{x_i^{(0)} - X_J}{D_{1,J}^{(0)}} & \frac{y_i^{(0)} - Y_J}{D_{1,J}^{(0)}} & \frac{z_i^{(0)} - Z_J}{D_{1,J}^{(0)}} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$\Delta \mathbf{P}_i = \begin{pmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \\ \Delta z_i \end{pmatrix}, \quad \delta \mathbf{D}_i = \begin{pmatrix} \delta D_{i,1} \\ \dots \\ \delta D_{i,J} \end{pmatrix}.$$

Искомое решение записывается следующим образом:

$$\Delta \mathbf{P}_i = \left( \mathbf{A}_i^T \cdot \mathbf{A}_i \right)^{-1} \cdot \mathbf{A}_i^T \cdot \delta \mathbf{D}_i, \quad (i = 1, 2). \quad (5)$$

Статистические характеристики поправок  $\Delta x_i$ ,  $\Delta y_i$  и  $\Delta z_i$ , в частности среднеквадратические отклонения и ковариации их совместного распределения, определяются в соответствии с [10] соотношениями:

$$\sigma_{x,i}^2 = \sigma_{D,i}^2 Q_{11}^{(i)}, \quad \sigma_{y,i}^2 = \sigma_{D,i}^2 Q_{22}^{(i)}, \quad (6)$$

$$\sigma_{z,i}^2 = \sigma_{D,i}^2 Q_{33}^{(i)}, \quad (i = 1, 2),$$

где  $\sigma_{D,i}^2$  – дисперсия однократного измерения псевдодалности для  $i$ -го абонента;  $Q_{jj}^{(i)}$  – диагональные элементы матрицы  $\mathbf{Q}_i$  ( $j = 1, \dots, 3$ ):

$$\mathbf{Q}_i = \left( \mathbf{A}_i^T \cdot \mathbf{A}_i \right)^{-1}. \quad (7)$$

С учетом соотношений (5)–(7) истинное (определяемое с учетом поправок  $\Delta x_i$ ,  $\Delta y_i$  и  $\Delta z_i$ ) положение объектов в геоцентрической системе Охуз координат определяется соотношениями (1) и (5).

Поправки к положению мобильных объектов  $\Delta x_i$ ,  $\Delta y_i$  и  $\Delta z_i$  определяются с погрешностями  $\delta x_i$ ,  $\delta y_i$  и  $\delta z_i$ , что приводит, как отмечалось выше, к ошибкам наведения луча антенны и, соответственно, к снижению мощности принимаемого сигнала.

С учетом возникающих погрешностей определения координат объектов направление взаимного положения между абонентами определяется с ошибками  $\delta \theta$  и  $\delta \varphi$ , которые могут быть выявлены следующими соотношениями:

$$\delta \theta = - \frac{1}{\sqrt{1 - ((z_2 - z_1)/R)^2}} \left\{ \left[ \frac{\partial((z_2 - z_1)/R)}{\partial x} \right] \times \quad (8)$$

$$\times (\delta x_2 - \delta x_1) + \left[ \frac{\partial((z_2 - z_1)/R)}{\partial y} \right] (\delta y_2 - \delta y_1) + \left[ \frac{\partial((z_2 - z_1)/R)}{\partial z} \right] (\delta z_2 - \delta z_1) \right\},$$

$$\delta \varphi = - \frac{1}{\sqrt{1 - ((x_2 - x_1)/r)^2}} \times$$

$$\times \left\{ \left[ \frac{\partial((x_2 - x_1)/r)}{\partial x} \right] (\delta x_2 - \delta x_1) + \left[ \frac{\partial((x_2 - x_1)/r)}{\partial y} \right] (\delta y_2 - \delta y_1) \right\}.$$

Частные производные в (4) имеют вид

$$\frac{\partial((z_2 - z_1)/R)}{\partial \lambda} = - \frac{(z_2 - z_1)(\lambda_2 - \lambda_1)}{R^3}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial((z_2 - z_1)/R)}{\partial z} = \frac{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}{R^3},$$

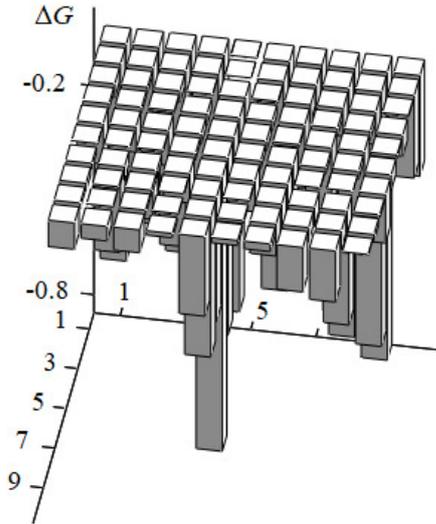


Рис. Нормированное распределение мощности сигнала в радиоканале  
Fig. Normalized signal power consumption in the radio channel

$$\frac{\partial((\xi_2 - \xi_1)/r)}{\partial \xi} = \frac{(\xi_2 - \xi_1)^2}{r^3},$$

$$\frac{\partial((\xi_2 - \xi_1)/r)}{\partial \zeta} = \frac{(\xi_2 - \xi_1)(\zeta_2 - \zeta_1)}{r^3}.$$

где  $\lambda_i = x_i, y_i, (i = 1, 2), \xi = x, y; \zeta = x, y$ .

## 2. Исследование взаимосвязи точности позиционирования мобильных объектов с использованием ГНСС и энергетических характеристик канала связи в сетях 5G

Будем считать, что сечение нормированной ДН антенны по мощности каждого абонента картинной плоскостью представляет собой эллипс, полуоси которого, равные  $\Delta\theta_i$  и  $\Delta\Phi_i$ :

$$F_i(\theta, \varphi) = 1 - 0,5 \left[ \frac{\theta_i^2}{\Delta\theta_i^2} + \frac{\varphi_i^2}{\Delta\Phi_i^2} \right]. \quad (10)$$

Суммарные потери в радиоканале  $\Delta G$  определяются формулой

$$\Delta G = \left| F_1(\delta\theta, \delta\varphi) \right|^2 \left| F_2(\delta\theta, \delta\varphi) \right|^2. \quad (11)$$

С использованием полученных соотношений проведены исследования зависимости снижения мощности сигнала в радиоканале сетей 5G от погрешности позиционирования мобильных объектов. Предполагалось, что расстояние мобильного абонента от базовой станции составляет 280 м. Ширина ДН антенных систем принята равной  $2^\circ$ , что соответствует плотности размещения абонентов  $100 \text{ км}^{-2}$  (без учета устройств Интернета

вещей). Позиционирование абонента проводится с использованием шести спутников ГНСС при точности измерения псевдодалности 1 м. Канал распространения сигналов ГНСС предполагался релейским.

Результаты исследований приведены на рисунке, где показано нормированное распределение мощности сигнала в радиоканале  $\Delta G$  в зависимости от изменяемых значений  $\delta\theta$  и  $\delta\varphi$ . Нормирование проводилось по значению, соответствующему точному наведению антенн обоих абонентов ( $\delta\theta = \delta\varphi = 0$ ).

Как показывают приведенные результаты, среднее значение нормированного распределения мощности сигнала составляет  $-0,25$  дБ, нормированное значение среднеквадратического отклонения (СКО)  $-13,5$  дБ. Однако, несмотря на малое значение СКО, возможны случаи снижения мощности сигнала на  $0,8-0,9$  дБ. Распределение мощности сигнала перестает быть нормальным. Этот результат показывает, что формируемый между двумя мобильными абонентами канал связи не является релейским.

## Заключение

1. Рассмотренные вопросы позиционирования объектов по сигналам ГНСС позволили выявить в удобной форме зависимости точности позиционирования объектов-абонентов связи с точностью измерения псевдодалностей. На основе данных зависимостей получены соотношения, устанавливающие взаимосвязь между точностью позиционирования и погрешностью наведения лучей антенн в радиоканале.

2. Проведенные при характерных значениях параметров сетей 5G исследования показали, что точность позиционирования объектов при погрешности определения псевдодалности 1 м и ширине луча ДН  $2^\circ$  определяет:

- среднее снижение мощности сигнала в радиоканале, обусловленное погрешностями позиционирования объектов, не более  $0,25$  дБ;
- нормированное значение среднеквадратического отклонения  $-13,5$  дБ. Несмотря на малое значение СКО, возможны случаи снижения мощности сигнала на  $0,8-0,9$  дБ;
- распределение мощности сигнала перестает быть нормальным, следовательно, формируемый между двумя мобильными абонентами канал связи становится не релейским.

## Список литературы

1. ECC Report 280. Satellite Solutions for 5G // ECO Documentation Database. URL: <http://docdb.cept.org/document/2989>
2. Рекомендации МСЭ-R S.1782-1. Руководящие указания, касающиеся глобального широкополосного доступа в интернет через системы фиксированной спутниковой связи. Женева: МСЭ, 2019. 14 с.
3. Луценко А. Особенности применения в спутниковых сетях протоколов передачи данных с подтверждением // Первая миля. 2013. № 5. С. 42–47.
4. Лашков Н.П., Холопцев А.Н. Стандартизация использования средства спутниковой навигации систем диспетчерского управления автотранспортными средствами и пути ее совершенствования // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2013. № 1. С. 79–86.
5. Затучный Д.А. Влияние динамических погрешностей измерения координат, ионосферных и тропосферных задержек на навигационные определения воздушных судов при помощи СРНС // Научный вестник МГТУ ГА. 2014. № 210. С. 129–130.
6. Overview of millimeter wave communications for fifth-generation (5G) wireless networks – With a focus on propagation models / T.S. Rappaport [et al.]. // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2017. Vol. 65, no. 12. P. 6213–6230. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2734243>
7. Фокин Г.А. Комплекс моделей и методов позиционирования устройств в сетях пятого поколения: специальность 05.12.13 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций», 05.12.04 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2021. 499 с.
8. Великанова Е.П., Ворошилин Е.П., Рогожников Е.В. Повышение точности оценки координат абонента системы мобильной связи посредством контроля за уровнем замираний в канале распространения // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321, № 5. С. 199–204.
9. Урмаев М.С. Орбитальные методы космической геодезии. М.: Недра, 1981. 256 с.
10. Мазмишвили А.И. Теория ошибок и метод наименьших квадратов. М.: Недра, 1978. 311 с.

## References

1. ECC Report 280. Satellite Solutions for 5G. ECO Documentation Database. URL: <http://docdb.cept.org/document/2989>
2. Recommendation ITU-R S.1782-1. Guidelines For Global Broadband Internet Access Via Fixed-Satellite Systems. Zheneva: MSE, 2019, 14 p. (In Russ.)
3. Lutsenko A. Features of the use of data transmission protocols with confirmation in satellite networks. *Pervaya milya*, 2013, no. 5, pp. 42–47. (In Russ.)
4. Lashkov N.P., Kholoptsev A.N. Standardization of the use of satellite navigation means of dispatch control systems for vehicles and ways to improve it. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka*, 2013, no. 1, pp. 79–86. (In Russ.)
5. Zatuchnyy D.A. Influence of dynamic errors of position measurement, ionospheric and tropospheric delays on aircraft navigation determinations using SRNS. *Nauchnyy vestnik MGTU GA*, 2014, no. 210, pp. 129–130. (In Russ.)
6. Rappaport T.S. et al. Overview of millimeter wave communications for fifth-generation (5G) wireless networks – With a focus on propagation models. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, vol. 65, no. 12, pp. 6213–6230. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2734243>
7. Fokin G.A. A Set of Models and Methods for Positioning Devices in Networks of the Fifth Generation: specialty 05.12.13 «Systems, networks and devices of telecommunications», 05.12.04 «Radio engineering, including television systems and devices». Dis. ... doct. tech. sciences. Saint Petersburg, 2021, 499 p.
8. Velikanova E.P., Voroshilin E.P., Rogozhnikov E.V. Improving the accuracy of estimating the coordinates of a mobile communication system subscriber by controlling the level of fading in the propagation channel. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2012, vol. 321, no. 5, pp. 199–204. (In Russ.)
9. Urmaev M.S. *Orbital Methods of Space Geodesy*. Moscow: Nedra, 1981, 256 p. (In Russ.)
10. Mazmishvili A.I. *Error Theory and Least Squares*. Moscow: Nedra, 1978, 311 p. (In Russ.)

---

## Physics of Wave Processes and Radio Systems 2022, vol. 25, no. 4, pp. 74–78

DOI 10.18469/1810-3189.2022.25.4.74-78

Received 6 May 2022  
Accepted 7 June 2022

## How the accuracy of mobile objects positioning with GNSS affects the energy characteristics of the communication channel in 5G networks

Dmitriy D. Gabriel'yan<sup>1</sup> , Marina Yu. Zvezdina<sup>1</sup> ,  
Yulia A. Shokova<sup>2</sup> , Oleg A. Lavrentev<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> FSUE «RNIIRS»

130, Nansen Street,

Rostov-on-Don, 344038, Russia

<sup>2</sup> Don State Technical University

1, Gagarin Square,

Rostov-on-Don, 344000, Russia

<sup>3</sup> Affiliate of «The General Radio Frequency Centre»  
in Southern and North-Caucasian federal districts

50, Budennov Avenue,

Rostov-on-Don, 344002, Russia

*Abstract* – The analytical relations determining the dependence between the accuracy of positioning objects-subscribers on the GNSS signals and the accuracy of pseudorange measurements were obtained. Based on these relationships, the relationship between positioning accuracy and the distribution of power radiated by the antennas into the space is revealed, which allows us to estimate the error of pointing the antenna beams in space. The correlations are based on the assumption of a Rayleigh channel for GNSS signal propagation. It is shown that the positioning accuracy of objects at the pseudo range error of 1 m and a beam width error of 2 degrees determines the average reduction in signal power in the radio channel, due to errors in positioning objects, not more than 0,25 dB, the normalized value of the standard deviation is equal to 13,5 dB. Due to positioning errors it is possible to reduce the signal strength in the radio channel by up to 1 dB.

*Keywords* – 5G networks; GNSS object positioning; mutual positioning of objects; signal strength distribution; statistical characteristics.

## Информация об авторах

**Габриэлян Дмитрий Давидович**, доктор технических наук, профессор, заместитель начальника ФГУП «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи», г. Ростов-на-Дону, Россия.

*Область научных интересов:* радиотехнические системы, определение местоположения объектов.

*E-mail:* d.gabrieljan2011@yandex.ru

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-9883-8826>

**Звездина Марина Юрьевна**, доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник ФГУП «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи», г. Ростов-на-Дону, Россия.

*Область научных интересов:* электромагнитная совместимость и электромагнитная экология.

*E-mail:* zvezdina\_m@mail.ru

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-8383-6003>

**Шокова Юлия Александровна**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиоэлектроники Донского государственного технического университета, г. Ростов-на-Дону, Россия.

*Область научных интересов:* электромагнитная совместимость и электромагнитная экология, численные методы электродинамики.

*E-mail:* jshokova@mail.ru

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-2884-8121>

**Лаврентьев Олег Александрович**, начальник отдела стационарного радиоконтроля филиала «Государственного радиочастотного центра» в Южном и Северо-Кавказском федеральных округах, г. Ростов-на-Дону, Россия.

*Область научных интересов:* радиотехнические системы, определение местоположения объектов.

*E-mail:* olav3@mail.ru

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-0946-4675>

## Information about the Authors

**Dmitriy D. Gabriel'yan**, Doctor of Technical Sciences, professor, deputy head of FSUE «RNIIRS», Rostov-on-Don, Russia.

*Research interests:* radio systems, object location.

*E-mail:* d.gabrieljan2011@yandex.ru

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-9883-8826>

**Marina Yu. Zvezdina**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, associate professor, principal scientist of FSUE «RNIIRS», Rostov-on-Don, Russia.

*Research interests:* electromagnetic compatibility and electromagnetic ecology.

*E-mail:* zvezdina\_m@mail.ru

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-8383-6003>

**Yulia A. Shokova**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor of the Department of Radioelectronics, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia.

*Research interests:* electromagnetic compatibility and electromagnetic ecology, numerical methods of electrodynamics.

*E-mail:* jshokova@mail.ru

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-2884-8121>

**Oleg A. Lavrentev**, head of the Department of Stationary Radio Frequency Control, Affiliate of «The General Radio Frequency Centre» in Southern and North-Caucasian federal districts, Rostov-on-Don, Russia.

*Research interests:* radio systems, object location.

*E-mail:* olav3@mail.ru

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-0946-4675>