

УДК: 621.396.96

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭХОСИГНАЛОВ КОРРЕЛЯЦИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ СКОРОСТИ И УГЛА СНОСА НА МАТРИЧНОМ ИМИТАТОРЕ

А.В. Киселев, Т.И. Сабитов

*Новосибирский государственный технический университет*

В данной работе рассмотрены матричные имитаторы применительно к задаче имитации эхосигналов трехантенных радиолокационных систем с неподвижными и параллельно ориентированными диаграммами направленности. В качестве такой трехантенной системы взят корреляционный измеритель скорости и угла сноса. Разработан облик двумерной матрицы имитатора из шести излучателей, который обеспечивает имитацию отражений от радиолокационных объектов как по азимуту, так и по углу места независимо для каждого канала приема. Получены соотношения, которые позволяют синтезировать матрицу. Данные соотношения связывают между собой координаты излучателей матрицы и начальные фазы излучаемых сигналов с длиной волны эхосигнала и геометрическими размерами антенной конфигурации испытываемой системы. Для типовых значений параметров трехантенного корреляционного измерителя скорости и угла сноса синтезирована матрица излучателей. С помощью численного эксперимента осуществлена ее апробация, где учитывались переотражения от безэховой камеры и ошибки фазировки, имеющие стохастический характер. Отсчеты излучаемых сигналов формировались с учетом заданных параметров движения антенной системы над моделируемой подстилающей поверхностью. Результаты экспериментов подтверждают достоверность полученных теоретических результатов. Они могут быть использованы для синтеза матричных имитаторов эхосигналов трехантенных радиолокационных систем.

**Ключевые слова:** матричный имитатор, трехантенная радиолокационная система, моделирование эхосигналов.

DOI: 10.17212/1727-2769-2022-1-51-58

## Введение

При разработке радиолокационных систем (РЛС) на этапах полунатурного моделирования все большее распространение получают матричные имитаторы (МИ) [1–3]. За счет электронного плавного управления положением кажущегося центра излучения (КЦИ) МИ позволяют имитировать перемещения объектов по любым траекториям с требуемой скоростью. При этом имитируемые объекты могут быть как точечными, так и распределенными [4, 5]. Положение КЦИ определяется величинами амплитуд и фаз сигналов излучателей МИ в точке приема в соответствии с соотношением [5]:

$$\Delta\xi = \frac{\left(\sum_i E_i \cos \varphi_i\right) \left(\sum_i \xi_i E_i \cos \varphi_i\right) + \left(\sum_i E_i \sin \varphi_i\right) \left(\sum_i \xi_i E_i \sin \varphi_i\right)}{\left(\sum_i E_i \cos \varphi_i\right)^2 + \left(\sum_i E_i \sin \varphi_i\right)^2}, \quad (1)$$

Исследование выполнено при финансовой поддержке в рамках реализации программы развития НГТУ, научный проект № С21-14.

где  $E_i$ ,  $\varphi_i$  – амплитуда и фаза напряженности электрического поля в точке приема от  $i$ -го излучателя;  $\Delta\xi$  и  $\xi_i$  – угловые либо линейные координата КЦИ и координата  $i$ -го излучателя, нормированные к угловому либо линейному размеру матрицы.

Вопросы синтеза МИ достаточно подробно освещены в литературе [6–8], однако при этом МИ рассматриваются применительно лишь к одноантенным системам, т. е. таким системам, которые используют в своей работе только одну приемную антенну. Вопросы синтеза МИ для многоантенных систем начали изучаться относительно недавно [9, 10].

Цель данной работы – обосновать синтез матричного имитатора для имитации эхосигналов трехантенной системы измерения скорости и угла сноса.

### 1. Теория

Авторами данной работы был разработан облик МИ для имитации эхосигналов трехантенной системы с неподвижными диаграммами направленности. В качестве такой системы был взят корреляционный измеритель скорости и угла сноса (КРИСС). Облик матрицы излучателей и взаимное расположение антенн КРИСС представлены на рис. 1.

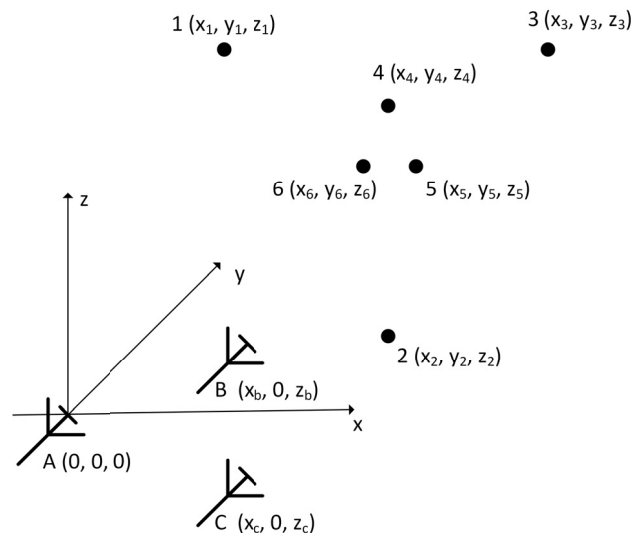


Рис. 1 – Матричный имитатор эхосигналов корреляционного измерителя скорости и угла сноса

Fig. 1 – Matrix simulator of echo signals of the correlation meter of speed and drift angle

Разработанный МИ основан на взаимокompенсации сигналов для обеспечения возможности имитации эхосигналов независимо для каждой антенны [9]. При этом используется то, что ориентация ДН антенн системы КРИСС неизменна в процессе работы, а главные лепестки ДН антенн достаточно широкие и практически полностью перекрывают друг друга. Как следствие, сигнал отдельно взятого излучателя матрицы взвешивается ДН каждой антенны с практически одним и тем же весом. Это позволяет ввести предкоррекцию сигналов МИ с целью устранить влияние взвешивания сигналов ДН на результат моделирования [11].

Для антенны  $A$  отражения от объекта имитирует группа излучателей 1, 2, 3 и 4. Для антенны  $B$  – 1, 2, 3 и 5. Для антенны  $C$  – 1, 2, 3 и 6.

Рассмотрим матрицу относительно антенны  $A$ . Обозначим сигналы излучателей с 1-го по 4-й как  $S_1, S_2, S_3$  и  $S_4$ . Они имитируют эхосигнал для антенны  $A$ . Чтобы эти сигналы не влияли на результат моделирования для других антенн, выполняются условия компенсации [9]. То есть мощность сигнала  $S_4$  задается равной суммарной мощности сигналов  $S_1, S_2$  и  $S_3$ . При этом в точке приема  $A$  они синфазны, а в двух других сигнал  $S_4$  находится в противофазе по отношению к остальным трем. Аналогичные рассуждения справедливы и относительно других двух антенн.

По сути, условие компенсации было сужено к требованию того, чтобы сигналы излучателей были синфазны либо противофазны во всех точках приема. Выполнение данных условий фазировки достигается за счет размещения излучателей и управления начальными фазами излучаемых сигналов, что можно формализовать в виде систем уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} (R_{1A} - R_{2A}) \frac{2\pi}{\lambda} - \Delta\varphi_2 = 2\pi n_1, \\ (R_{1A} - R_{3A}) \frac{2\pi}{\lambda} - \Delta\varphi_3 = 2\pi n_2, \\ (R_{1A} - R_{4A}) \frac{2\pi}{\lambda} - \Delta\varphi_4 = 2\pi n_3, \\ (R_{1B} - R_{4B}) \frac{2\pi}{\lambda} - \Delta\varphi_4 = \\ = (2n_4 + 1)\pi, \\ (R_{1C} - R_{4C}) \frac{2\pi}{\lambda} - \Delta\varphi_4 = \\ = (2n_5 + 1)\pi, \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} (R_{1B} - R_{2B}) \frac{2\pi}{\lambda} - \Delta\varphi_2 = 2\pi k_1, \\ (R_{1B} - R_{3B}) \frac{2\pi}{\lambda} - \Delta\varphi_3 = 2\pi k_2, \\ (R_{1B} - R_{5B}) \frac{2\pi}{\lambda} - \Delta\varphi_5 = 2\pi k_3, \\ (R_{1A} - R_{5A}) \frac{2\pi}{\lambda} - \Delta\varphi_5 = \\ = (2k_4 + 1)\pi, \\ (R_{1C} - R_{5C}) \frac{2\pi}{\lambda} - \Delta\varphi_5 = \\ = (2k_5 + 1)\pi, \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (R_{1C} - R_{2C}) \frac{2\pi}{\lambda} - \Delta\varphi_2 = 2\pi m_1, \\ (R_{1C} - R_{3C}) \frac{2\pi}{\lambda} - \Delta\varphi_3 = 2\pi m_2, \\ (R_{1C} - R_{6C}) \frac{2\pi}{\lambda} - \Delta\varphi_6 = 2\pi m_3, \\ (R_{1A} - R_{6A}) \frac{2\pi}{\lambda} - \Delta\varphi_6 = (2m_4 + 1)\pi, \\ (R_{1B} - R_{6B}) \frac{2\pi}{\lambda} - \Delta\varphi_6 = (2m_5 + 1)\pi, \end{array} \right.$$

где  $R_{ik}$  – расстояние между  $i$ -м излучателем и  $k$ -й точкой приема;  $\lambda$  – длина волны;  $\Delta\varphi_i$  – фазовая добавка к сигналу  $i$ -го излучателя;  $n, k, m$  – целые числа.

Для заданных параметров системы КРИСС с помощью численных методов решения систем нелинейных уравнений [12] может быть получено решение

систем (2) в виде координат излучателей МИ и значений начальных фаз излучаемых сигналов.

Были заданы следующие типовые параметры КРИСС [13].

Координаты точек приема во введенной системе координат, связанной с антенной  $A$  (см. рис. 1):  $(x_A; y_A; z_A) = (0; 0; 0)$  мм,  $(x_B; y_B; z_B) = (110; 0; 30)$  мм,  $(x_C; y_C; z_C) = (110; 0; -30)$  мм.

Зондирующий сигнал – пачка из 1500 радиоимпульсов прямоугольной формы; длина волны  $\lambda = 7$  см; длительность одного радиоимпульса  $\tau_{\text{и}} = 10,5$  нс; период повторения  $T_{\text{п}} = 7,5$  мкс.

Движение системы КРИСС относительно подстилающей поверхности прямолинейное и равномерное со скоростью 200 м/с, направление вектора скорости совпадает с осью  $OX$  (см. рис. 1).

Для заданных параметров КРИСС была синтезирована матрица излучателей. Координаты точек расположения излучателей МИ, выраженные в метрах:

- $x_1 = -1,937, x_2 = 0,104, x_3 = 2,157, x_4 = 0,104, x_5 = 1,122, x_6 = -0,914;$
- $y_1 = 5, y_2 = 5, y_3 = 5, y_4 = 5,373, y_5 = 6,294, y_6 = 6,328;$
- $z_1 = 3,492, z_2 = -3,992, z_3 = 3,492, z_4 = 3,473, z_5 = -0,259, z_6 = -0,26.$

Начальные фазы излучаемых сигналов матрицы:  $\Delta\varphi = (0; 0; 0; 0; \pi; \pi)$  рад.

## 2. Апробация результатов

Для апробации матрицы была использована модель подстилающей поверхности, которая представляла собой плоскость со случайно распределенными на ней точечными отражателями – светящимися точками. Их общее число составляло 100 тыс. Высота полета над поверхностью 100 м. Распределение отражателей по плоскости задавалось равновероятным законом.

Для имитации эхосигнала от отдельного отражателя движущейся поверхности в соответствии со следующими соотношениями рассчитывались амплитуды сигналов матричного имитатора [5]:

$$E_{1k} = \frac{E_{\Sigma}}{2} \left[ \frac{2\alpha_u - \alpha_3 - \alpha_K}{\alpha_2 - \alpha_3} - \frac{2\theta_u - \theta_3 - \theta_K}{\theta_2 - \theta_3} \right] \cdot \left[ \frac{\alpha_1 - \alpha_3}{\alpha_2 - \alpha_3} - \frac{\theta_1 - \theta_3}{\theta_2 - \theta_3} \right]^{-1},$$

$$E_{2k} = \frac{E_{\Sigma}}{2} \left[ \frac{2\alpha_u - \alpha_3 - \alpha_K}{\alpha_2 - \alpha_3} \right] - E_{1k} \frac{\alpha_1 - \alpha_3}{\alpha_2 - \alpha_3},$$

$$E_{3k} = \frac{E_{\Sigma}}{2} - E_{1k} - E_{2k}, \quad E_4 = E_5 = E_6 = \frac{E_{\Sigma}}{2},$$

где  $E_{\Sigma}$  – амплитуда сигнала имитируемого точечного отражателя (в нашем эксперименте  $E_{\Sigma} = 1$  в относительных единицах);  $k, K$  – индексы, где значениям  $k = \{A, B, C\}$  соответствуют  $K = \{4, 5, 6\}$ ;  $\alpha_i, \theta_i$  – угловые координаты излучателей (азимут и угол места);  $\alpha_{\text{ц}}, \theta_{\text{ц}}$  – угловые координаты КЦИ (азимут и угол места).

Для имитации эхосигнала всей поверхности использовался принцип суперпозиции [14].

Условия численного эксперимента учитывали переотражения от безэховой камеры с коэффициентом безэховости  $-35$  дБ и ошибку фазировки излучателей, которая задавалась в виде случайной величины, имеющей нормальное распределение с нулевым средним и среднеквадратичным отклонением  $\sigma_{\text{ф ош}} = 4^\circ$ .

В результате численного эксперимента были получены отсчеты комплексных огибающих сигналов, снимаемых с антенн КРИСС. В качестве примера представлены зависимости амплитуды и фазы сигнала, снимаемого с антенны *A* (рис. 2), где «--\*--» – для имитации эхосигналов с помощью МИ; «—» – для модели отражений от реальной поверхности. Данные зависимости получены в результате моделирования ситуации имитации эхосигналов от подстилающей поверхности с помощью разработанного МИ. Эти зависимости сопоставлены с соответствующими зависимостями, полученными для модели эхосигналов от отражателей реальной поверхности.

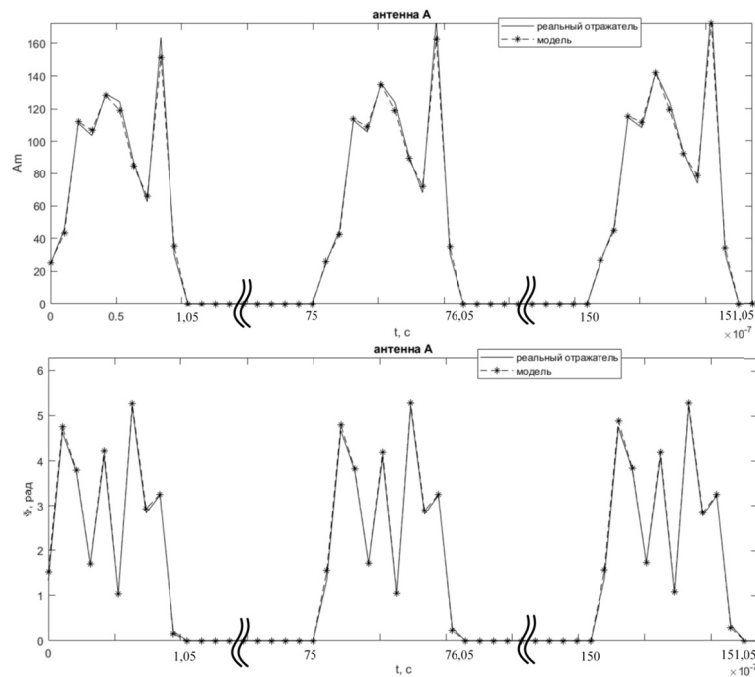


Рис. 2 – Зависимости амплитуды и фазы первых трех импульсов сигнала, снимаемого с антенны *A*, от имитируемой МИ и реальной поверхности

Fig. 2 – Dependences of the amplitude and phase of the first three pulses of the antenna *A* signal from the surface simulated by MS and the real one

На основе полученных зависимостей были получены взаимокорреляционные функции (ВКФ) сигналов, снимаемых с антенн. В качестве примера на рис. 3 представлены зависимости ВКФ сигналов, снимаемых с антенн *A* и *C*, где «--\*--» – для имитации эхосигналов с помощью МИ; «—» – для модели отражений от реальной поверхности.

Для оценки влияния случайной ошибки фазировки и случайных переотражений от безэховой камеры на результат моделирования было осуществлено 1000 экспериментов. В результате усреднения данных по 1000 экспериментам было установлено:

- значения корня из среднего квадрата ошибок амплитуды моделируемого эхосигнала, нормированные к среднему значению амплитуды, не превышают 8,2 %;
- значения корня из среднего квадрата ошибок ВКФ моделируемых эхосигналов, нормированные к максимальному значению ВКФ, не превышают 2,4 %;
- средняя ошибка смещения максимума ВКФ не превышает 3,17 мкс (значение периода дискретизации взятия отсчетов ВКФ 7,5 мкс, что соответствует периоду повторения радиоимпульсов).

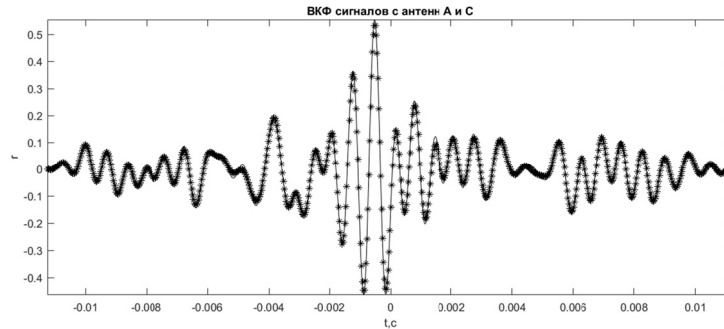


Рис. 3 – ВКФ комплексных огибающих эхосигналов, снимаемых с антенн А и С, от имитируемой МИ и реальной поверхности

Fig. 3 – CCF of complex envelopes of echo signals taken from antennas A and C from the surface simulated by MS and the real one

Из результатов численных экспериментов видно, что разработанный проект МИ обеспечивает адекватность моделирования эхосигналов КРИСС.

### Заключение

Результаты данной работы расширяют область применения МИ по направлению их использования для имитации эхосигналов трехантенных радиоэлектронных систем. Они могут быть использованы для разработки матричных имитаторов эхосигналов систем КРИСС.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Patent Application Publication № 2009/0058715 US. Methods and systems for generating virtual radar targets / G. Sarafian. – Publ. date 05.03.2009.
2. Patent № 104133376 A China. Target vector control method used for radio frequency simulation / Yu M., Yang S., Liu D. – Publ. date 05.11.2014.
3. Angular glint error simulation using attributed scattering center models / K. Guo, G. Xiao, Y. Zhai, X. Sheng // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 35194–35205. – DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2846538.
4. Elizavetin I., Paillou P. The ground surface backscattering modeling using integral equation model // EUSAR '98: European Conference on Synthetic Aperture Radar, 25–27 May 1998, Friedrichshafen, Germany. – Berlin, 1998. – P. 153–156.
5. Ostrovityanov R.V., Basalov F.A. Statistical theory of extended radar targets. – Dedham: Artech House, 1985. – 364 p.
6. Sisle M., McCarthy E. Hardware-in-the-loop simulation for an active missile // Simulation. – 1982. – Vol. 39. – P. 159–167. – DOI: 10.1177/003754978203900503.
7. Analysis and correction of triad field angle error in array radio frequency simulation / L. Hua, Z. Jianjiang, P. Minghai, Z. Hanwu // Future Communication, Computing, Control and Management. – 2012. – Vol. 2. – P. 125–134. – DOI: 10.1007/978-3-642-27314-8\_18.
8. Wayne D., McBride S., McKenna J. Multiple target, dynamic RF scene generator // AMTA 2016 Proceedings. – Austin, TX, 2016. – P. 319–324.
9. Сабитов Т.И., Киселев А.В. Имитация эхосигналов двухпозиционной системы с использованием матрицы из пяти излучателей // Вопросы радиоэлектроники. – 2020. – № 5. – С. 6–9. – DOI: 10.21778/2218-5453-2020-5-6-9.
10. Kiselev A.V., Sabitov T.I., Stepanov M.A. Simulating an object's altitude for two-position systems // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2020. – Vol. 59. – P. 217–222. – DOI: 10.1134/S1064230720020070.
11. Сабитов Т.И., Киселев А.В. Коррекция амплитудной ошибки в матричных имитаторах радиолокационных целей // Радиопромышленность. – 2020. – Т. 30, № 4. – С. 106–110. – DOI: 10.21778/2413-9599-2020-30-4-106-110.

12. Fletcher R. Practical methods of optimization. – New York: Wiley, 1980. – 120 p.
13. Завьялов В.В. Измерители скорости с линейной базой направленных приемников. – Владивосток: Морской гос. ун-т, 2004. – 176 с.
14. Тырыкин С.В., Киселев А.В. Экономичный алгоритм имитации сложных радиолокационных целей // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2003. – Т. 46, № 4. – С. 76–80.

## SIMULATION OF ECHO SIGNALS OF THE CORRELATION METER OF SPEED AND DRIFT ANGLE ON A MATRIX SIMULATOR

Kiselev A.V., Sabitov T.I.

*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

In this paper, matrix simulators are considered in relation to the problem of simulating echo signals of three-antenna radar systems with fixed and parallel-oriented radiation patterns. A correlation meter of speed and drift angle was taken as such a three-antenna system. A project of a two-dimensional matrix simulator of six emitters has been developed, which provides imitation of reflections from radar objects both in azimuth and in elevation independently for each receiving channel. Relationships are obtained that allow synthesizing the matrix. These ratios relate the coordinates of the matrix emitters and the initial phases of the emitted signals with the wavelength of the echo signal and the geometric dimensions of the antenna configuration of the system under test. The emitter matrix has been synthesized for typical parameters of a three-antenna correlation meter of speed and drift angle. With the help of a numerical experiment approbation of the matrix was carried out, where re-reflections from the nonreflecting room and phasing errors of a stochastic nature were considered. The readings of the emitted signals were formed considering the given parameters of the antenna system movement over the simulated underlying surface. The experimental results confirm the reliability of the theoretical results obtained. They can be used to synthesize matrix simulators of echo signals of three-antenna radar systems.

*Keywords:* matrix simulator, three-antenna radar, echo simulation.

DOI: 10.17212/1727-2769-2022-1-51-58

### REFERENCES

1. Sarafian G. *Methods and systems for generating virtual radar targets*. Patent Application US, no. 2009/0058715, 2009.
2. Yu M., Yang S., Liu D. *Target vector control method used for radio frequency simulation*. Patent China, no. 104133376 A, 2014.
3. Guo K., Xiao G., Zhai Y., Sheng X. Angular glint error simulation using attributed scattering center models. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 35194–35205. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2846538.
4. Elizavetin I., Paillou P. The ground surface backscattering modeling using integral equation model. *EUSAR '98: European Conference on Synthetic Aperture Radar*, 25–27 May 1998, Friedrichshafen, Germany. Berlin, 1998, pp. 153–156.
5. Ostrovityanov R.V., Basalov F.A. *Statistical theory of extended radar targets*. Dedham, Artech House, 1985. 364 p.
6. Sisle M., McCarthy E. Hardware-in-the-loop simulation for an active missile. *Simulation*, 1982, vol. 39, pp. 159–167. DOI: 10.1177/003754978203900503.
7. Hua L., Jianjiang Z., Minghai P., Hanwu Z. Analysis and correction of triad field angle error in array radio frequency simulation. *Future Communication, Computing, Control and Management*, 2012, vol. 2, pp. 125–134. DOI: 10.1007/978-3-642-27314-8\_18.
8. Wayne D.J., McBride S.T., McKenna J.T. Multiple target, dynamic RF scene generator. *AMTA 2016 Proceedings*, Austin, TX, 2016, pp. 319–324.
9. Sabitov T.I., Kiselev A.V. Imitatsiya ekhosignalov dvukhpozitsionnoi sistemy s ispol'zovaniem matritsy iz pyati izluchatelei [Simulation of echo signals of two-position radar

- station using matrix of five emitters]. *Voprosy radioelektroniki = Issues of radioelectronics*, 2020, no. 5, pp. 6–9. DOI: 10.21778/2218-5453-2020-5-6-9.
10. Kiselev A.V., Sabitov T.I., Stepanov M.A. Simulating an object's altitude for two-position systems. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2020, vol. 59, pp. 217–222. DOI: 10.1134/S1064230720020070.
  11. Sabitov T.I., Kiselev A.V. Korrektsiya amplitudnoi oshibki v matrichnykh imitatorakh radio-lokatsionnykh tselei [Amplitude error correction in matrix simulators of radar targets]. *Radiopromyshlennost' = Radio Industry (Russia)*, 2020, vol. 30, no. 4, pp. 106–110. DOI: 10.21778/2413-9599-2020-30-4-106-110.
  12. Fletcher R. *Practical methods of optimization*. New York, Wiley, 1980. 120 p.
  13. Zav'yalov V.V. *Izmeriteli skorosti s lineinoi bazoi napravlennykh priemnikov* [Linear base velocity meters for directional receivers]. Vladivostok, Maritime State University Publ., 2004. 176 p.
  14. Tyrykin S.V., Kiselev A.V. Ekonomichnyi algoritm imitatsii slozhnykh radio-lokatsionnykh tselei [Cost-effective algorithm for simulating complex radar targets]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenii. Radioelektronika = Radioelectronics and Communications Systems*, 2003, vol. 46, no. 4, pp. 76–80.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**Киселев Алексей Васильевич** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: моделирование сложной радиолокационной обстановки в реальном масштабе времени. Опубликовано более 150 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: nil\_rtu@ngs.ru).

**Kiselev Aleksey Vasil'evich** – Doctor of Sciences (Eng.), Professor, Head of the Department of Radio Receiving and Radio Transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University. Research interests: real-time modeling of complex radar conditions. Over 150 scientific papers have been published. (Address: Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: nil\_rtu@ngs.ru).



**Сабитов Тимур Ильясович** – аспирант, кафедра радиоприемных и радиопередающих устройств, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: радиолокация, имитационное моделирование. Опубликовано более 20 научных работ. (Адрес: 630073, Российская Федерация, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: sti0@mail.ru).

**Sabitov Timur Il'iasovich** – postgraduate student, Department of Radio receivers and radio transmitters, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on radiolocation, simulation modelling. Over 20 scientific papers have been published. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: sti0@mail.ru).

Статья поступила 08 октября 2021 г.  
Received October 08, 2021

#### To Reference

Kiselev A.V., Sabitov T.I. Modelirovanie ekhsignalov korrelyatsionnogo izmeritelya skorosti i ugla snosa na matrichnom imitatore [Simulation of echo signals of the correlation meter of speed and drift angle on a matrix simulator]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2022, no. 1 (54), pp. 51–58. DOI: 10.17212/1727-2769-2022-1-51-58.