

Научная статья

УДК 004.942

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=179697>

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ ПРИ КОНИЧЕСКОМ СКАНИРОВАНИИ В УСЛОВИЯХ УГЛОВЫХ ЭВОЛЮЦИЙ НОСИТЕЛЯ

Егор Владимирович Балашов¹, Антон Александрович Сенцов²✉

¹ООО «Хедс энд хендс», Санкт Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», Санкт Петербург, Россия

¹evbalashov92@gmail.com

²toxx@list.ru✉

Аннотация. Статья посвящена описанию математической модели движения диаграммы направленности антенны радиолокационного координатора в пространстве с учетом колебания по углам тангажа и рысканья. Влияние угловых эволюций на результат пеленгации обусловлено соотношением угловой скорости вращения по углу крена и угловой скорости эволюций. В настоящей статье рассматривается случай, когда эти скорости сопоставимы. После рассмотрения ряда упрощенных моделей по аналитическому описанию движения трехмерной диаграммы направленности антенны в координатах «азимут - угол места» рассчитана трехмерная модель, а также ее проекция на земную поверхность. Корректность

математической модели подтверждается экспериментальными исследованиями, результаты получены путем установки радиолокационного координатора на линейно-движущийся беспилотный летательный аппарат, который подвержен угловым эволюциям и реализует пеленгационный метод конического сканирования. Таким образом, предложена концепция математической модели движения проекции диаграммы направленности антенны радиолокационного координатора на поверхность земли, осуществляющего коническое сканирование пространства в условиях линейного перемещения и угловых эволюций носителя. Модель применима для устройств и изделий, выступающих в роли радиолокационного координатора различного назначения. Модель основана на ряде упрощений, таких как линейные модели движения и модель Гаусса для описания диаграммы направленности антенны. Принятые упрощения могут быть уточнены без существенной переработки модели.

Ключевые слова: диаграмма направленности, радиолокационная станция, угловые эволюции, коническое сканирование, радиолокационный координатор

Для цитирования: Балашов Е.В., Сенцов А.А. Моделирование движения диаграммы направленности антенны при коническом сканировании в условиях угловых эволюций носителя // Труды МАИ. 2024. № 135. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=179697>

Original article

SIMULATION OF THE ANTENNA DIRECTIONAL PATTERN MOTION DURING CONICAL SCANNING UNDER CONDITIONS OF ANGULAR CARRIER EVOLUTIONS

Egor V. Balashov¹, Anton A. Sentsov²✉

¹Heads and Hands LLC, Sankt Petersburg, Russia

²Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Sankt Petersburg, Russia

¹evbalashov92@gmail.com

²toxx@list.ru✉

Abstract. The article deals with the description of a mathematical model of the directional pattern of the radar coordinator antenna in space, with account for fluctuations in pitch and yaw angles. The angular evolutions effect on the direction finding result is stipulated by the ratio of the angular velocity of rotation in the angle of roll and the angular velocity of evolutions. the presented article considers the case when these speeds are comparable. After considering a number of simplified models for analytical description of motion of the three-dimensional antenna directional pattern in the “azimuth - angle of location” coordinates, a three-dimensional model was computed, as well as its projection onto the Earth surface. The mathematical model correctness is confirmed by experimental studies, which results were obtained as an outcome of a radar coordinator installing on a linearly moving unmanned aerial vehicle, which is subjected to angular evolutions and implements the direction-finding method of conical scanning. Thus, the concept of a mathematical model of motion of the the directional pattern of the radar coordinator antenna projection onto the Earth surface, performing a conical scanning of space under conditions of linear displacement and angular evolutions of the carrier, is proposed. The said model is applicable for the devices and products functioning as a radar coordinator for various purposes. The model is based on a number of simplifications, such as linear motion models and the Gauss model for describing

the antenna pattern. The adopted simplifications may be clarified without significant reworking of the model.

Keywords: radiation pattern, radar station, angular evolutions, conical scanning, radar coordinator

For citation: Balashov E.V., Sentsov A.A. Simulation of the antenna directional pattern motion during conical scanning under conditions of angular carrier evolutions. *Trudy MAI*, 2024, no. 135. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=179697>

Введение

Разработка радиолокационных систем (РЛС) с активным электронным сканированием – сложная наукоемкая задача. Поэтому для лоцирования объектов не теряет актуальности применение классических электромеханических методов, например, конического сканирования [1].

Преимущество метода состоит в том, что он простой и относительно дешевый в реализации. РЛС, основанные на данном принципе, могут применяться в составе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [2, 3], так как одноканальная реализация позволяет добиться малых массогабаритных характеристик.

В случае жесткого крепления РЛС к корпусу носителя он будет являться радиолокационным координатором (РЛК). Сканирование может осуществляться за счет вращения РЛК или жестко связанной с ним платформы [4-6]. Основной проблемой на пути реализации такой системы является наличие угловых эволюций, которые могут вносить существенную погрешность в результат пеленгации объекта, а в ряде случаев сделать применение метода невозможным.

Под угловыми эволюциями, в данном случае, стоит понимать колебания по углам тангажа и рысканья. Следует отметить, что влияние угловых эволюций на результат пеленгации обусловлено соотношением угловой скорости вращения по углу крена ω_γ , которая является частотой сканирования, и угловой скорости эволюций ω_A . При условии, что $\omega_A \ll \omega_\gamma$, учет влияния осуществляется достаточно просто. В настоящей статье рассматривается случай, когда скорости сопоставимы.

Упрощенные динамические модели

РЛК совершает сложное движение, состоящее из линейного перемещения, вращения по крену с частотой сканирования и угловых эволюций. Для описания движения носителя РЛС используется линеаризованная модель, согласно которой линейное перемещение центра масс носителя описывается классической формулой равномерного движения:

$$\bar{S}(t) = \bar{V}t + \bar{S}_0, \quad (1)$$

где $\bar{S}(t)$ – перемещение; \bar{V} – вектор скорости носителя.

На данном этапе для объяснения сути модели таких упрощений достаточно. В дальнейшем достаточно просто перейти к более точной дифференциальной модели описания движения.

Вращение антенного полотна при коническом сканировании описывается простым уравнением вращательного движения:

$$\varphi(t) = \omega_y t + \varphi_0, \quad (2)$$

где φ – угол поворота; ω_γ – угловая скорость вращения по углу крена; φ_0 – начальная фаза вращения по углу крена.

В качестве модели описания угловых эволюций носителя используется пространственная гармоническая функция, описываемая соотношением:

$$Y(t) = \Lambda e^{-j(\omega_A t + \varphi_A)}, \quad (3)$$

где Λ – амплитуда угловых эволюций; ω_A – угловая скорость эволюций; φ_A – начальная фаза угловых эволюций.

Введем аналитическое описание движения трехмерной диаграммы направленности \hat{G} в пространстве. Используем произведение двух Гауссовых моделей, описанных в ортогональных координатах:

$$\hat{G}(A, B) = e^{-0,69 \left[\begin{pmatrix} A - A_0 \\ A_{0,5} \end{pmatrix} \right]^2} e^{- \left[\begin{pmatrix} B - B_0 \\ B_{0,5} \end{pmatrix} \right]^2}, \quad (4)$$

где A – координата по азимуту; A_0 – смещение максимума ДНА относительно РСН в азимутальной плоскости; $A_{0,5}$ – ширина ДНА в азимутальной плоскости; B – координата по углу места; B_0 – смещение максимума ДНА относительно РСН в угломестной плоскости; $B_{0,5}$ – ширина ДНА в угломестной плоскости.

Одна из реализаций трехмерной модели ДНА в координатах «азимут - угол места» представлена на рисунке 1.

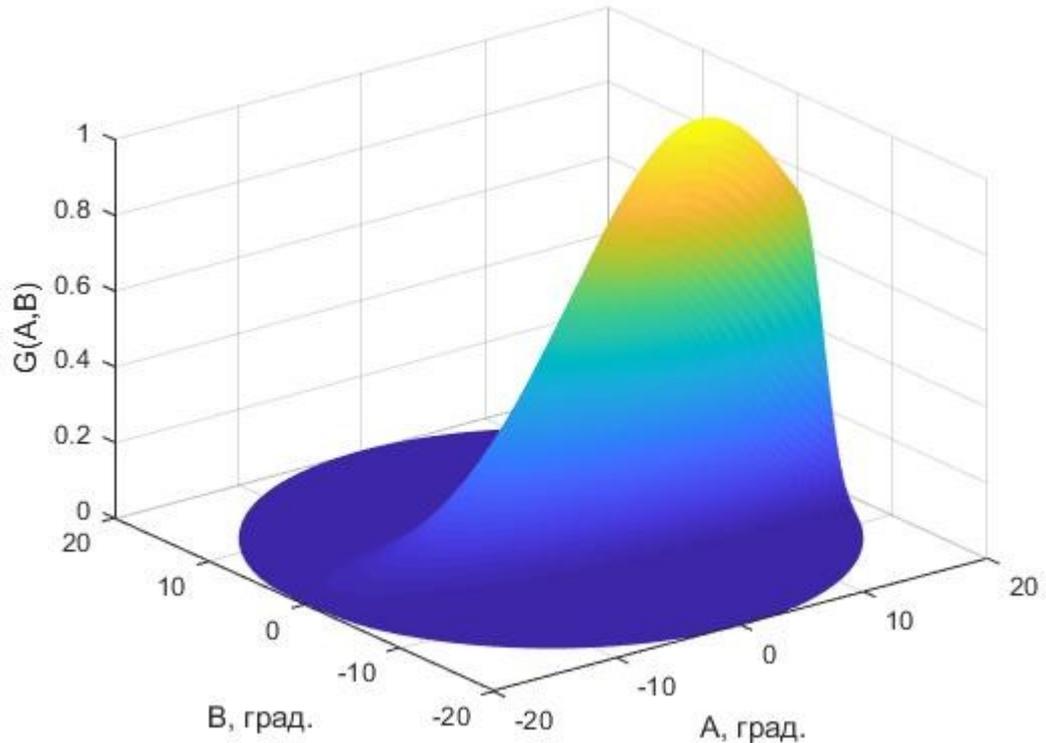


Рисунок 1 – Трехмерная модель ДНА в координатах «азимут - угол места»

Пару координат «азимут А» и «угол места В» можно заменить парой координат, «пеленг – угол крена». Связь координат определяется формулой Эйлера:

$$\Delta e^{-j\gamma} = \cos A - j \sin B, \quad (5)$$

Если совместить ось абсцисс системы координат (СК), представленной на рисунке 1, с вещественной осью комплексной плоскости, а ось ординат с мнимой осью, тогда можно ввести понятие комплексной координаты точки $Z = \Delta e^{-j\gamma}$.

С учетом того, что комплексные числа – математический аппарат для описания движения плоскости [7], вращение ДНА по углу крена (осуществление конического сканирования) в координатах «азимут - угол места» можно описать с помощью формулы

$$Z_p(\Delta_p, \gamma_p, t) = \Delta_p e^{-j\gamma_p} e^{-j(\omega_\gamma t + \varphi_\gamma)}, \quad (6)$$

где Z_p – комплексные координаты всех точек ДНА в момент времени t ; Δ_p – координаты пеленга всех точек ДНА; γ_p – координаты крена всех точек ДНА; ω_γ – угловая скорость вращения по крену; φ_γ – начальная фаза вращения по крену.

В качестве модели описания динамики угловых эволюций носителя используем формулу (3)

Вещественная часть $Re(Y(t))$ будет характеризовать колебания носителя по углу рысканья, а мнимая $Im(Y(t))$ по углу тангажа.

Подставляя выражение (3) в формулу (6), получаем описание вращательного движения точек ДНА в условиях угловых эволюций РСН:

$$Z_p(\Delta_p, \gamma_p, t) = (\Delta_p e^{-j\gamma_p} - \Lambda e^{-j(\omega_A t + \varphi_A)}) e^{-j(\omega_\gamma t + \varphi_\gamma)},$$

где Δ_p – координаты пеленга всех точек ДНА; γ_p – координаты по углу крена всех точек ДНА.

Для избавления от параметра времени произведем замену $\gamma = \omega_\gamma t + \varphi_\gamma$, а так же введем параметр $\Phi = \frac{\omega_A}{\omega_\gamma} \varphi_\gamma - \varphi_A$, описывающий разницу фаз процессов.

Окончательно получаем:

$$Z_p(\Delta_p, \gamma_p, \gamma) = \left(\Delta_p e^{-j\gamma_p} - A e^{-j\left(\frac{\omega_A}{\omega_\gamma} \gamma - \Phi\right)} \right) e^{-j\gamma} \quad (7)$$

Подставляя выражение (7) в формулу (4), получим описание пространственного движения ДНА в виде:

$$G(Z_p(\Delta_p, \gamma_p, \gamma)) = e^{-0,69 \left(\frac{(\operatorname{Re}(Z_p(\Delta_p, \gamma_p, \gamma)) - A_0)^2}{A_{0,5}} + \frac{(\operatorname{Im}(Z_p(\Delta_p, \gamma_p, \gamma)) - B_0)^2}{B_{0,5}} \right)} \quad (8)$$

Получение проекции ДНА на земную поверхность

Зная угловые координаты всех точек ДНА, можно описать движение проекции ДНА на земную поверхность [8] или, по-другому, зоны обзора (ЗО). Для этого можно использовать методом центрального проецирования.

Исходные данные: R_t – дальность текущая до пересечения оси ДНА с земной поверхностью; α – постоянный угол тангажа; β – постоянный угол рысканья; γ – угол крена; θ – угол тангажа, вызванный эволюциями носителя; ψ – угол рысканья, вызванный эволюциями носителя.

В общем случае, ДНА в пространстве можно упрощенно описать уравнением эллиптического конуса. Границы конуса можно определить по уровню половинной мощности.

Параметрическое уравнение поперечного сечения эллиптического конуса на расстоянии R_t от вершины:

$$X_0 = \begin{pmatrix} R_t \cdot E \\ R_t \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\eta_H}{2}\right) \cdot \cos(\zeta) \\ R_t \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\eta_E}{2}\right) \cdot \sin(\zeta) \end{pmatrix} \quad (9)$$

где ζ – параметр, задаваемый вектор-строкой в пределах $[0,360]$ с некоторым шагом;
 E – единичная матрица размерностью, совпадающей с ζ .

Геометрия наблюдения в плоскости XOY земной СК представлена на рисунке 2.

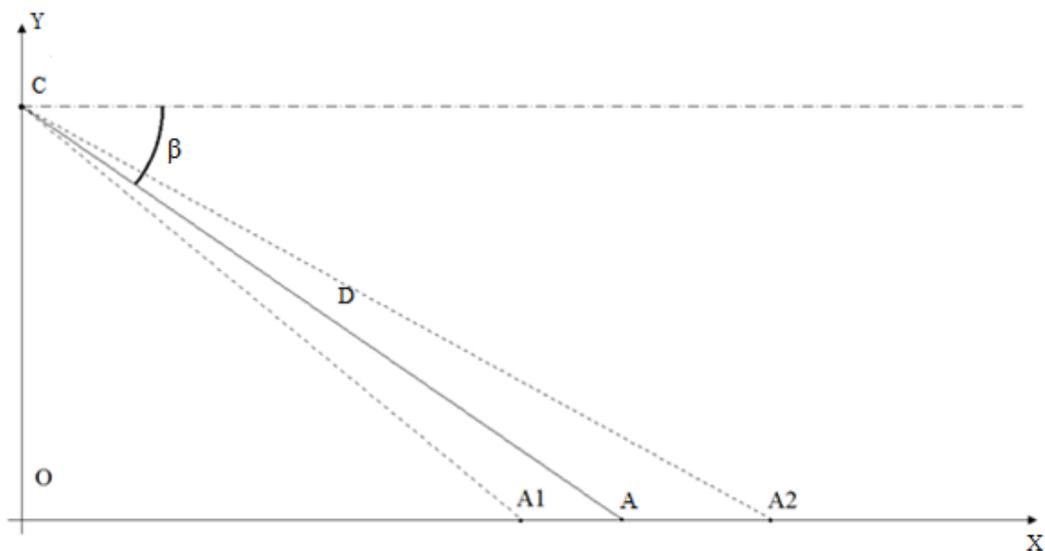


Рисунок 2 - Геометрия наблюдения в плоскости XOY земной СК

Здесь D – прямая дальность до точки пересечения линии симметрии с земной поверхностью. Пунктиром обозначены расстояния до ближней (CA_1) и дальней (CA_2) границ зоны обзора; β – постоянный угол тангажа.

Для того, чтобы получить координаты точек ЗО на поверхности земли, необходимо произвести центральное проецирование полученных точек ДНА в

картинной плоскости (x_a, y_a, z_a) на плоскость XOZ земной системы координат [9]. В качестве центра проецирования (x_s, y_s, z_s) используем координаты центра масс изделия $(0, 0, D * \sin(\beta))$.

Коэффициент, используемый для проецирования, рассчитывается по следующей формуле:

$$\lambda = \frac{x_s \cos(\Psi) \operatorname{ctg}(\beta - \theta) - y_s \sin(\Psi) \operatorname{ctg}(\beta - \theta) - D \cos(\beta - \theta) \operatorname{ctg}(\beta - \theta) - z_s}{(z_a - z_s) - (x_a - x_s) \cos(\Psi) \operatorname{ctg}(\beta - \theta) + (y_a - y_s) \sin(\Psi) \operatorname{ctg}(\beta - \theta)} \quad (10)$$

Геометрия наблюдения в земной СК представлена на рисунке 3.

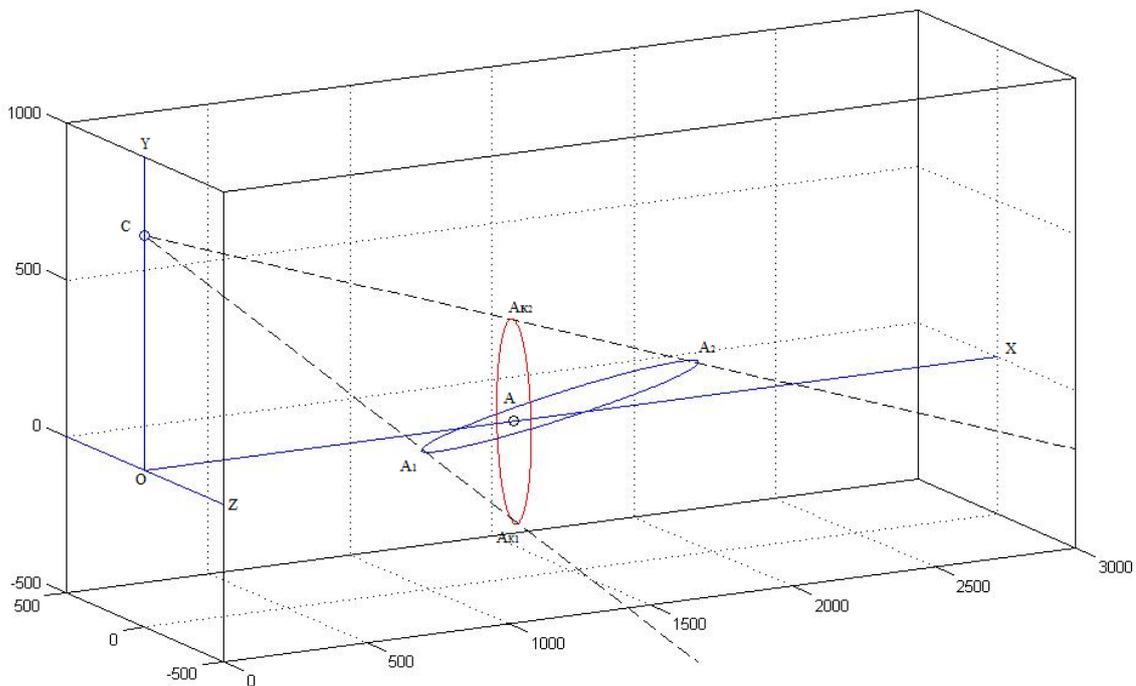


Рисунок 3 – Геометрия наблюдения в земной СК

Все точки фигуры, которой принадлежат точки A_1, A_2 лежат в плоскости XOZ земной СК. Эта фигура и есть проекция ЗО («след» ДНА) на местности. Эллипс, выделенный красным цветом и точки, ему принадлежащие A_{K1}, A_{K2} , лежат в картинной плоскости.

Здесь точка C – координаты носителя и соответственно центральная точка проецирования; точка A – центр эллипса в картинной плоскости (проекция этой точки имеет те же координаты, что и сама точка). Пунктиром выделены проецирующие лучи.

Координаты точек (x_a, y_a, z_a) можно получить, используя углы полученные с помощью соотношения (8). Применяя центральное проецирование через точку C к этим координатам, можно получить описание проекции ЗО в любой момент времени.

Выводы

В настоящей статье описывается концепция математической модели движения проекции ДНА РЛК на поверхность земли, осуществляющего коническое сканирование пространства в условиях линейного перемещения и угловых эволюций носителя. Модель применима для устройств и изделий, выступающих в роли радиолокационного координатора различного назначения [10-13], что является одной из технологий дистанционного управления. Акцент на важности совершенствования форм и способов применения войск и технических средств, обеспечивающих дистанционное бесконтактное воздействие на противника для достижения целей боя и операции, в своем докладе сделал начальник ГШ ВС РФ Валерий Герасимов "Основные тенденции развития форм и способов применения ВС, актуальные задачи военной науки по их совершенствованию".

Модель основана на ряде упрощений, таких как линейные модели движения и модель Гаусса для описания ДНА [14-17]. Для реализации модели требуется оптимальная обработка радиолокационной информации от пространственно-

распределенных целей при коническом сканировании [18-20]. Принятые упрощения могут быть уточнены без существенной переработки модели.

Список источников

1. Соловьев А.Э., Грибов Д.О., Ивахно Н.В., Зыкин С.И., Гладких А.В. Система управления приводом конического сканирования антенны радиолокационной станции // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. № 11. С. 231-240.
2. Сенцов А.А., Иванов С.А., Ненашев С.А. Возможности интеграции устройств в составе беспилотных летательных аппаратов при оперативном мониторинге земной поверхности // Международная научная конференция «Обработка, передача и защита информации в компьютерных системах» (Санкт-Петербург, 14–22 апреля 2021): сборник докладов. - Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2021. С. 117-122. DOI: [10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-117-122](https://doi.org/10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-117-122)
3. Сенцов А.А. Методика проектирования специализированных радиолокационных средств // V Международный форум «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» (Санкт-Петербург, 02 марта 2023): сборник статей. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2023. С. 131-132.
4. Блудов А.А., Горбатовский Г.А., Павлов В.С., Суворов А.Ф. Метод двухплоскостной широкоугольной пеленгации источника радиоизлучения // Труды XIX Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности». - СПб.: НПО СМ-ПАРАН, 2016. Т. 4. С. 468-472.

5. Сенцов А.А., Поляков В.Б., Дмитриев В.Ф. Регистрация параметров движения самолетного измерительного пункта при параллельном размещении мобильных радиолокационных станций комплекса внешнетраекторных измерений // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 2. С. 20-25.
6. Павлов В.С., Блудов А.А., Балашов Е.В. Анализ пеленгационного метода конического сканирования в условиях угловых эволюций равносигнального направления // Радиопромышленность. 2017. № 1. С. 37-43.
7. Арнольд В.И. Геометрия комплексных чисел, кватернионов и спинов. – М.: Изд-во МЦНМО, 2009. - 40 с.
8. Сенцов А.А., Иванов С.А. Оценка точности определения координат объектов в локальном навигационном поле // Первая Всероссийская научная конференция «Радиотехнические, оптические и биотехнические системы. Устройства и методы обработки информации» (Санкт-Петербург, 14-22 апреля): сборник докладов. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2020. С. 18-22. DOI: [10.31799/978-5-8088-1451-6-2020-1-18-22](https://doi.org/10.31799/978-5-8088-1451-6-2020-1-18-22)
9. Сергеев М.Б., Сенцов А.А., Григорьев Е.К., Ненашев С.А. Имитационная модель радиолокационной обстановки интеллектуальной системы управления распределенными средствами радиолокационных станций // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. Т. 8. № 3 (30). С. 14-15.
10. Чудаков Ю.В. Теоретические основы оценки эффективности в интересах оптимизации боевого применения и системы вооружения ракетных войск и артиллерии: монография. – СПб.: МВАА, 2003. – 354 с.

11. Сенцов А.А. Имитатор бортового оборудования и тактической установки для стендовой отработки РЭК // Вопросы радиоэлектроники. 2011. Т. 1. № 5. С. 137-146.
12. Сенцов А.А. Программно-аппаратные средства обеспечения стендовой отработки бортовых радиоэлектронных комплексов // Вопросы радиоэлектроники. 2010. Т. 2. № 1. С. 145-153.
13. Азаров А.В., Караваев М.Н., Рожков С.С., Славянский А.О., Смолка К.А. Синтез малогабаритного фазового пеленгатора авиационного базирования // Труды МАИ. 2022. № 123. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=165549>. DOI: [10.34759/trd-2022-123-12](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-12)
14. Буренко Е.А. Математическая модель контура управления системы радиотеленавещения // Труды МАИ. 2023. № 132. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=176855>
15. Гаврилов К.Ю., Каменский К.В. Методы численного моделирования траекторного сигнала в радиолокаторе с синтезированием апертуры // 17-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2018» (19–23 ноября 2018): тезисы докладов. – М.: Люксор, 2018. С. 254–255.
16. Козлов К.В., Волков А.П., Старовойтов Е.И., Попов Е.В. Численное моделирование электромагнитного поля бортовой РЛС землеобзора для обеспечения электромагнитной совместимости // Труды МАИ. 2022. № 122. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=164200>. DOI: [10.34759/trd-2022-122-11](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-11)
17. William L. Melvin, James A. Scheer. Principles of Modern Radar: Advanced Techniques, Scitech Publishing, 2012, 872 p.

18. Плужников А.Д., Когтева Л.В., Приблудова Е.Н., Сидоров С.Б., Чужайкин Е.Г. Качество радиолокационной пеленгации при коническом сканировании // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2021. № 24 (5). URL:<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-5-50-65>
19. Костоглотов А.А., Моисеев Д.В., Лазаренко С.В. Оптимальная обработка радиолокационной информации при сопровождении маневрирующих целей // Общие вопросы радиоэлектроники. Научно-технический сборник. - Ростов-на-Дону: РНИИРС, 2008. Вып. 1. С. 134-145.
20. Доросинский Л.Г., Трухин М.П. Теория и практика обработки сигналов от пространственно-распределенных целей. - Ульяновск: Зебра, 2015. С. 9-28.

References

1. Solov'ev A.E., Gribov D.O., Ivakhno N.V., Zykin S.I., Gladkikh A.V. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*, 2018, no. 11, pp. 231-240.
2. Sentsov A.A., Ivanov S.A., Nenashev S.A. *Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya «Obrabotka, peredacha i zashchita informatsii v komp'yuternykh sistemakh»*: sbornik dokladov. Saint Petersburg, Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet aerokosmicheskogo priborostroeniya, 2021, pp. 117-122. DOI: [10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-117-122](https://doi.org/10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-117-122)
3. Sentsov A.A. *V Mezhdunarodnyi forum «Metrologicheskoe obespechenie innovatsionnykh tekhnologii»*: sbornik statei. Saint Petersburg, Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet aerokosmicheskogo priborostroeniya, 2023, pp. 131-132.

4. Bludov A.A., Gorbatovskii G.A., Pavlov V.S., Suvorov A.F. *Trudy XIX Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye problemy zashchity i bezopasnosti»*. Saint Petersburg, NPO SM-RARAN, 2016, vol. 4, pp. 468-472.
5. Sentsov A.A., Polyakov V.B., Dmitriev V.F. *Voprosy radioelektroniki*, 2019, no. 2, pp. 20-25.
6. Pavlov V.S., Bludov A.A., Balashov E.V. *Radiopromyshlennost'*, 2017, no. 1, pp. 37-43.
7. Arnol'd V.I. *Geometriya kompleksnykh chisel, kvaternionov i spinov* (Geometry of complex numbers, quaternions and spins), Moscow, Izd-vo MTsNMO, 2009, 40 p.
8. Sentsov A.A., Ivanov S.A. *Pervaya Vserossiiskaya nauchnaya konferentsiya «Radiotekhnicheskie, opticheskie i biotekhnicheskie sistemy. Ustroistva i metody obrabotki informatsii»*: sbornik dokladov. Saint Petersburg, Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet aerokosmicheskogo priborostroeniya, 2020, pp. 18-22. DOI: [10.31799/978-5-8088-1451-6-2020-1-18-22](https://doi.org/10.31799/978-5-8088-1451-6-2020-1-18-22)
9. Sergeev M.B., Sentsov A.A., Grigor'ev E.K., Nenashev S.A. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii*, 2020, vol. 8, no. 3 (30), pp. 14-15.
10. Chudakov Yu.V. *Teoreticheskie osnovy otsenki effektivnosti v interesakh optimizatsii boevogo primeneniya i sistemy vooruzheniya raketnykh voisk i artillerii* (Theoretical bases of efficiency assessment for optimisation of combat use and weapon system of missile forces and artillery), Saint Petersburg, MVAA, 2003, 354 p.
11. Sentsov A.A. *Voprosy radioelektroniki*, 2011, vol. 1, no. 5, pp. 137-146.
12. Sentsov A.A. *Voprosy radioelektroniki*, 2010, vol. 2, no. 1, pp. 145-153.

13. Azarov A.V., Karavaev M.N., Rozhkov S.S., Slavyanskii A.O., Smolka K.A. *Trudy MAI*, 2022, no. 123. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=165549>. DOI: [10.34759/trd-2022-123-12](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-12)
14. Burenko E.A. *Trudy MAI*, 2023, no. 132. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=176855>
15. Gavrilov K.Yu., Kamenskii K.V. *17-ya Mezhdunarodnaya konferentsiya «Aviatsiya i kosmonavtika – 2018»: tezisy dokladov*. Moscow, Lyuksor, 2018, pp. 254–255.
16. Kozlov K.V., Volkov A.P., Starovoitov E.I., Popov E.V. *Trudy MAI*, 2022, no. 122. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=164200>. DOI: [10.34759/trd-2022-122-11](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-11)
17. William L. Melvin, James A. Scheer. *Principles of Modern Radar: Advanced Techniques*, Scitech Publishing, 2012, 872 p.
18. Pluzhnikov A.D., Kogteva L.V., Pribludova E.N., Sidorov S.B., Chuzhaikin E.G. *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika*, 2021, no. 24 (5), URL: <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-5-50-65>
19. Kostoglotov A.A., Moiseev D.V., Lazarenko S.V. *Obshchie voprosy radioelektroniki*. 2008, no. 1, pp. 134-145.
20. Dorosinskii L.G., Trukhin M.P. *Teoriya i praktika obrabotki signalov ot prostranstvenno-raspredeleennykh tselei* (Theory and practice of signal processing from spatially distributed targets), Ul'yanovsk, Zebra, 2015, pp. 9-28.

Статья поступила в редакцию 20.03.2024

Одобрена после рецензирования 26.03.2024

Принята к публикации 26.04.2024

The article was submitted on 20.03.2024; approved after reviewing on 26.03.2024; accepted for publication on 26.04.2024