УДК 621.396.621

ОЦЕНКА ИСКАЖЕНИЙ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА МАЛОШУМЯЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ ПРИЕМНОГО ТРАКТА

Тимошенко А.В., *д.т.н., профессор, старший преподаватель Военного Учебного Центра МГУ им. М.В. Ломоносова, e-mail: u567ku78@gmail.com*
Захаров А.С., *лаборант факультета космических исследований МГУ им. М.В. Ломоносова, e-mail: zakharov.as17@physics.msu.ru*
Байкалов И.А., *инженер 1 категории лаборатории 341 АО «НПО дальней радиолокации им. А.Л.Минца», e-mail: ibaikalov@npodr.ru*
Урсегов А.К., *инженер лаборатории 422 АО «НПО дальней радиолокации им. А.Л. Минца», e-mail: aursegov@npodr.ru*
Савчук А.М., *д.ф-м.н., профессор факультета космических исследований МГУ им. М.В. Ломоносова, e-mail: savchuk@cosmos.msu.ru*

ESTIMATION OF RADIATION PATTERN DISTORTIONS OF A RADAR STATION UNDER THE NONSTATIONARY EFFECT OF THERMAL PROCESSES ON A LOW-NOISE AMPLIFIER OF THE RECEIVING PATH

Timoshenko A.V., Zakharov A.S., Baikalov I.A., Ursegov A.K., Savchuk A.M.

Modern radar stations strive to increase the resolution to accurately determine the coordinates and characteristics of objects. One of the promising methods to achieve this goal is the use of a super-resolution mode. However, thermal distortions occur during the operation of the radar, which significantly reduce the efficiency of superresolution. This article presents a new model for the analysis and compensation of these distortions, based on the use of the original integro-differential equation.

It is shown that the unsteady behavior of thermal processes leads to distortions of the amplitude-phase distribution, amplitude-frequency response and radiation pattern, which changes the resolution characteristics. It is proposed to compensate for the influence of thermal processes by means of operational calibration of amplitude and phase, taking into account the distortions of the radiation pattern.

A demonstration experiment was conducted to simulate the radiation pattern at different temperatures of low-noise amplifiers of the receiving path and the same heating rate.

Key words: radar station, receiving path, thermal conductivity, radiation pattern.

Ключевые слова: радиолокационная станция, приемный тракт, теплопроводность, диаграмма направленности.

Современные радиолокационные станции стремятся к повышению разрешающей способности для точного определения координат и характеристик объектов. Одним из перспективных методов для достижения этой цели является применение режима сверхразрешения. Однако в процессе работы радиолокационной станции возникают тепловые искажения, которые значительно снижают эффективность сверхразрешения. В данной статье представлена новая модель для анализа и компенсации этих искажений, основанная на использовании оригинального интегро-дифференциального уравнения.

Показано, что нестационарное поведение тепловых процессов приводит к искажениям амплитудно-фазового распределения, амплитудно-частотной характеристики и диаграммы направленности, что изменяет характеристики разрешения. Предложено компенсировать влияние тепловых процессов с помощью оперативной калибровки амплитуды и фазы с учетом искажений диаграммы направленности.

Проведен демонстрационный эксперимент по моделированию диаграммы направленности при разных температурах малошумящих усилителей приемного тракта и одинаковой скорости нагрева.

Введение

Современные требования к радиолокационным станциям мониторинга космического пространства (РЛС МКП) [1-5] помимо традиционных задач обнаружения и сопровождения космических объектов включают режим сверхраз решения для малоразмерных космических объектов (КО), целью которого является создание радиолокационных портретов (РЛП) [6]. Это возможно даже при использовании квазинепрерывных сигналов с длинными импульсами и низкой скважностью для радиолокационного сопровождения [7-11]. Для работы в режиме сверхразрешения требуется обеспечение равномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) системы передачи и приема сигнала [12, 13].

Выбор сигнала для создания радиолокационного портрета зависит от возможностей аппаратно-программного комплекса (АПК) РЛС, равномерности АЧХ системы и функции неопределенности (ФН), которая помогает восстанавливать профиль по дальности и скорости. ФН играет ключевую роль при анализе разрешающей способности сигналов в этих координатах.



Рисунок 1 – Обобщенная схема приемо-передающего тракта РЛС [15]

В настоящее время приемный тракт РЛС МКП состоит из малошумящего усилителей и блока цифровой обработки информации [14]. Общую структурную схему РЛС МКП можно представить в виде совокупности функциональных узлов приемной и передающей систем соответственно [15]. Обобщенная схема ключевых функциональных узлов приемо-передающего тракта МКП приведена на рисунке 1.

Указанные на схеме функциональные узлы обеспе--чивают, как формирование, так и прием и обработку высокочастотных сигналов, что обуславливает обеспечения требуемых значений функциональных характеристик. Одной из ключевых особенностей РЛС МКП, обуславливающих необходимость высоких требований в части разрешающей способности к функциональным узлам являются протяженные приемо-передающие тракты. Так же стоит отметить, что число данных трактов для одного образца может достигать нескольких тысяч, что создает предпосылки к возникновению взаимного влияния аппаратуры при непрерывном функционировании РЛС в энергонапряженных режимах. Одним из наиболее значимых с точки зрения прохождения сигналов элементом приемной системы РЛС МКП является малошумящий усилитель (МШУ), характеризующий в значительной степени шумовую температуру приемного тракта [15]. Неправильное изменение амплитуды и фазы сигнала после прохождения МШУ приведет к неточным результатам обработки и снижению разрешающей способности.

Тем самым, обеспечение требуемых характеристик сверхразрешения в широком диапазоне фаз и амплитуд достигается разработкой более точной и детальной модели изменения диаграммы направленности, которая является основой аппарата коррекции амплитудно-фазового распределения путем введения дополнитель--ных поправок к амплитуде и фазе сигнала в части цифровой обработки сигнала.

Модель изменения амплитуды и фазы

Как правило [16], моделирование тепловых процессов проводится с помощью уравнения теплопроводности, в то время как расчет электродинамических характеристик проводится на основе решений уравнений Максвелла в решении объединенной задачи.

Для описания модели изменения ФН введем уравнение теплопроводности для АФАР с электромагнитной мощностью в виде функции теплового источника представим в виде [14]:

$$c\rho\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial t}=\lambda\nabla^2 T+P_d,$$

где c – удельная теплоемкость материала, ρ – плотность материала, λ – коэффициент теплопроводности, P_d – электромагнитная мощность, рассеиваемая в единице объема пространства, $\nabla^2=\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласса (оператор набла в квадрате).

Электромагнитную мощность сигнала на частоте ω, можно представить как:

$$P=\left|\sum_{n=1}^{N}S_n^{'}\right|^2\omega C_R\, tg\delta\, d^2,$$

где tg – тангенс угла потерь в каналах приемного тракта, d – длина линии передачи, CR – емкость линий передачи. Представив объем и емкость как:

$$V=Sd,\ C_R=\frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}.$$

Можно получить электромагнитную мощность, рассеиваемую в единицу объема:

$$P_d=\omega\varepsilon_0\varepsilon\left|\sum_{n=1}^{N}S_n^{'}\right|^2\ \mathrm{tg}\delta.$$

где ε_0 – электрическая постоянная, ε – диэлектрическая проницаемость пространства в каналах приемного тракта.

Для проведения частотного анализа умножим обе части уравнения теплопроводности на оператор прямого преобразования Фурье без нормировочных множителей:

$$F_+\left[f(t)\right]=\int_{-\infty}^{\infty}f(t)e^{-j\omega t}dt.$$

Применяя оператор прямого преобразования Фурье к правой и левой части уравнения, получим:

$$F_+\left[c\rho\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial t}\right]=F_+\left[\lambda\nabla^2 T\right]+F_+\left[\omega\varepsilon_0\varepsilon\left|S^*\left(\omega,T\right)\right|^2\right].$$

Учитывая, что все константы и операторы выносятся из-под знака интеграла, то:

$$c\rho F_+\left[\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial t}\right]=\lambda\nabla^2 F_+\left[T\right]+\omega\varepsilon_0\varepsilon F_+\left[\left|S^*\left(\omega,T\right)\right|^2\right].$$

Воспользуемся следующим свойством прямого преобразования Фурье:

$$F_+\left[\frac{\partial T}{\partial t}\right]=j\omega F_+\left[T\right].$$

При подстановке данного свойства мы переходим от дифференциального уравнения к интегральному термочастотному уравнению для определения искажений сигнала при обработке:

$$j\omega c\rho F_+\left[T\right]=\lambda\nabla^2 F_+\left[T\right]+\omega\varepsilon_0\varepsilon F_+\left[\left|S^*\left(\omega,T\right)\right|^2\right].$$

Задачу можно записать в операторном виде. Процедура сводится к нахождению температурного распределения с помощью уравнения теплопроводности и подстановки в операторное уравнение на поиск искажений сигнала:

$$F_+\left[T\right]*\left\{\frac{j\omega c\rho-\lambda\nabla^2}{\omega\varepsilon_0\varepsilon}\right\}=F_+\left[\left|S^*\left(\omega,T\right)\right|^2\right].$$

Таким образом, можно получить искаженный сигнал после прохождения его через МШУ по формуле:

$$S^*\left(\omega,T\right)=\sqrt{F_-\left[F_+\left[T\right]*\left\{\frac{j\omega c\rho-\lambda\nabla^2}{\omega\varepsilon_0\varepsilon}\right\}\right]}.$$

Для расчета диаграммы направленности гексагональной АФАР перейдем в обобщенные сферические координаты u и v, тогда общая формула:

$$D(A,\phi)=\sum_i Ae^{j\phi}e^{j\frac{2\pi}{l}\left[x_i(u_i-a)+y_i(v_i-b)\right]}=$$

$$=\sum_i Ae^{j\phi}F(\lambda,x_i,y_i,v_i,u_i,b),$$

где F – множитель решетки; x, y – координаты излучателя; a, b – центр луча в обобщенных координатах, l – длина волны.

Тогда измененная диаграммы направленности будет равна:

$$D_{иск}(A,\phi)=\sum_i(A+\Delta A(T))e^{j(\phi+\Delta\phi)}F(\lambda,x_i,y_i,v_i,u_i,b).$$

Задав определенный сигнал или сочетание сигналов для режима сверхразрешения посчитать искажения сигнала и посчитать изменения диаграммы направленности, что ведет к повышению вероятности срыва сопровождения космического аппарата.

Демонстрационный эксперимент

В качестве демонстрационного эксперимента рассмотрим воздействие тепловых процессов на малошумящие усилители, температура по которым распределена равномерно, но при этом происходит линейное увеличение температуры во времени. В качестве сигнала сверхразрешения возьмем дискретно-кодированный по частоте (ДКЧ) сигнал и разбиением на 198 кодов по диаграмме Костаса. Моделирование проходило в среде MatLab.

Изначально были получены функции неопределенности на полотне время-частота, после чего снимались срезы и графики переводились в плоскость расстояние и радиальная скорость для анализа разрешающей способности. На рисунке 2 показаны срезы функции неопределенности по дальности и радиальной скорости при самой низкой температуре 20˚С и нулевой скорости нагрева.

Теперь увеличим скорость нагрева до 2˚С/мин, после чего проведем моделирование ДН на 40˚С, которое показано на рисунке 4.

Как мы видим из рисунка 4, помимо увеличения боковых лепестков и появление шумовых максимумов произошло небольшое расширение главного лепестка, что повышает разрешающую способность по дальности и углу места. Теперь рассмотрим максимальную температуру, при которой не происходит отключений аппаратуры, а именно 60˚С, при той же скорости нагрева. Срез ФН по скорости представлен на рисунке 5, а диаграмма направленности на рисунках 6 и 7.

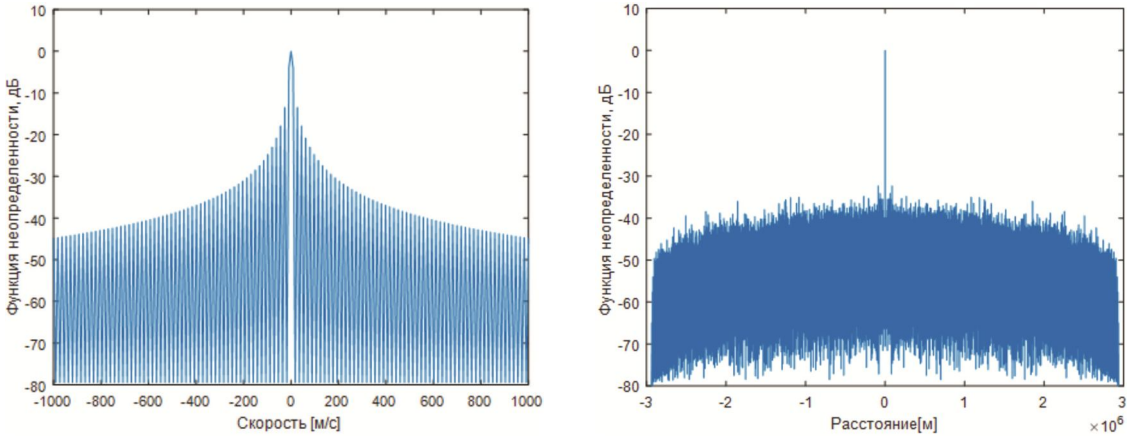


Рисунок 2 – Функции неопределенности в срезе на полотне расстояние/скорость

Диаграмма направленности в таких условиях показана на рисунке 3

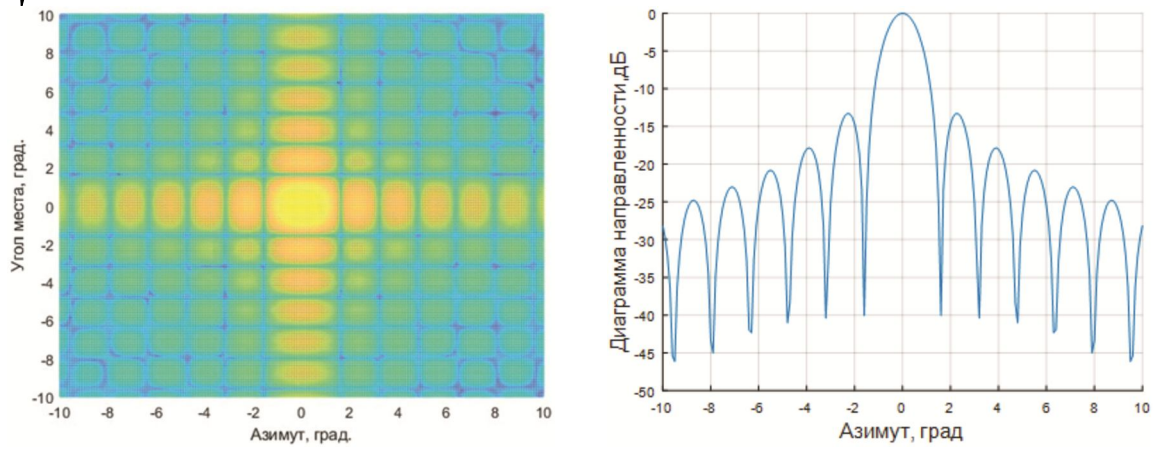


Рисунок 3 – Диаграмма направленности при температуре всех МШУ в тракте равной 20˚С

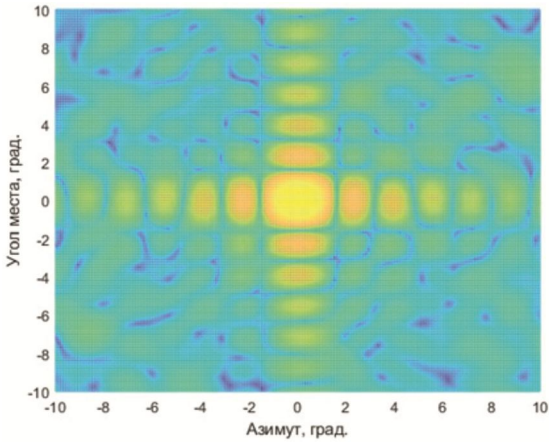


Рисунок 4 – Диаграмма направленности АФАР при нагреве всех МШУ до 40˚С и скорости нагрева 2˚С/мин

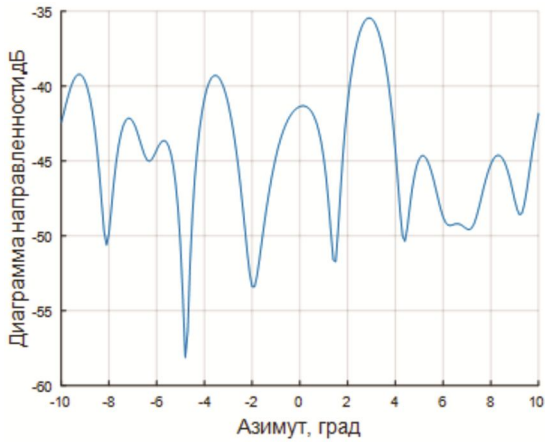


Рисунок 6 – Диаграмма направленности по азимуту при нагреве 2˚С/мин и равномерной температуре 60˚С

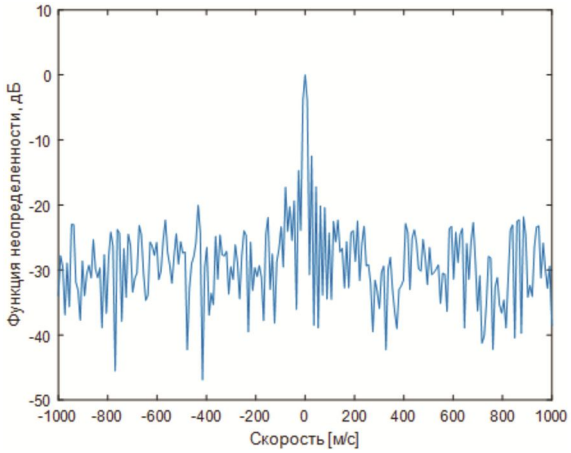


Рисунок 5 – Срез ФН по скорости при нагреве 2˚С/мин и равномерной температуре 60˚С

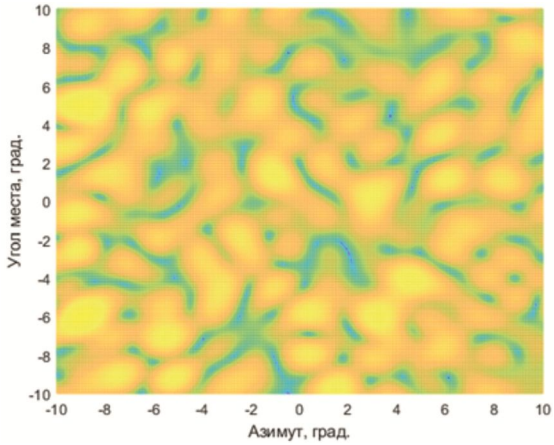


Рисунок 7 – Диаграмма направленности при нагреве 2˚С/мин и равномерной температуре 60˚С

В данном случае при перегреве МШУ происходит полное искривление диаграммы направленности, при которой невозможно определить угловые координаты космического аппарата.

Таким образом, при увеличении температуры и отсутствии калибровочных импульсов функционального контроля необходимо вводить поправки по фазе и амплитуде сигнала, позволяющие компенсировать тепловые искажения. Поправки можно вводить при обработке в части цифрового диагромообразования для уменьшения ошибок при обработке.

Заключение

В статье представлена модель искажений диаграммы направленности из-за теплового воздействия на МШУ приемного тракта РЛС для реализации режима сверхразрешения, отличающаяся от известных тем, что использовано оригинальное интегро-дифференциальное уравнение для расчета искажений ДН. Данное уравнение получено в результате формализации связи Фурье-образа температурного распределения в пространстве и времени с изменением амплитуды сигнала. Показано, что предложенная модель позволяет рассчитать харак-

теристики диаграммы направленности в широком диапазоне температур и скоростей нагрева МШУ. В дальнейших исследованиях предлагается использовать ананализ Фурье для расчета интегрального показателя эффективности режима сверхразрешения.

Проведен демонстрационный эксперимент при линейном и равномерном нагреве МШУ и показано, что после нагрев всех МШУ происходит ухудшение и полное искажение диаграммы направленности. В качестве будущих исследованиях построить алгоритм компенсации тепловых искажений на МШУ с целью увеличения разрешающей способности.

Работа выполнена при поддержке Программы развития МГУ, проект № 24-Ш01-04.

Литература

1. Мацеевич С.В., Владко У.А., Зюзина А.Д., Мочалов М.Н., Захаров А.С. Применение показателя когнитивной нагрузки графического элемента для обоснования требований к системе визуализации РЛС дальнего обнаружения. Научная визуализация, 2024 16.3: 87-96, DOI: 10.26583/sv.16.3.09

2. Шевцов В.А., Тимошенко А.В., Разиньков С.Н. Оценка состояния безопасности полета воздушного судна на основе анализа рисков авиационных инцидентов. Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2024. № 1. С. 39-44. EDN GELBAJ.

3. Зверев Г.П., Тимошенко А. В., Перлов А.Ю. и др. Применение теории нечетких множеств при решении задач управления временным ресурсом радиолокационной станции мониторинга космического пространства. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 3. С. 513-519. DOI 10.17586/2226-1494-2024-24-3-513-519. EDN STVNST.

4. D.S. Chirov and Y.A. Kochetkov. Assessment of the Accuracy of Determining the Coordinates and Speed of Small-Size UAV of a Multi-Position Radar with Omnidirectional Antenna Elements. 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russia, 2020, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ IEEECONF48371.2020.9078571. EDN STFMIM.

5. Васильев О.В., Зябкин С.А., Никоненко А.В., Чиров Д.С. Функционально-ориентированная модель формирования метеорологического продукта в X-диапазоне от гидрометеоров переохлажденной жидкости при полном поляризационном приеме. Цифровая обработка сигналов. 2023. № 1. С. 54-61. EDN VGWTVC.

6. Порсев В.И., Гелесев А.И., Красько А.Г. Угловое сверхразрешение сигналов с использованием «виртуальных» антенных решеток. Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2019;(4):24-34. https://doi. org/10.38013/2542-0542-2019-4-24-34

7. Чижов А.А. Сверхразрешение радиолокационных целей при воздействии активных шумовых помех по основному и ближним боковым лепесткам диаграммы направленности антенны РЛС. Информационно-управляющие системы. 2016. №1. С. 94-98. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2016.1.88

8. Миронов В.А. Филонович А.В. К вопросу о сверхразрешении стохастических сигналов в радиолокационных системах. «Воздушно-космические силы. Теория и практика». № 16, декабрь 2020. С. 272-281.

9. Haoxuan Y., Qiangyu Z., Jianxin H., Weather Radar Image Superresolution Using a Nonlocal Residual Network. Journal of Mathematics, 2021, 4483907, 11 p., 2021.doi.org/10.1155/2021/4483907

10. Muñoz-Ferreras, J.M., Pérez-Martínez, F. Superresolution versus Motion Compensation-Based Techniques for Radar Imaging Defense Applications. EURASIP J. Adv. Signal Process. 2010, 308379 (2010). https://doi.org/10.1155/2010/308379

11. Ильчук А.Р., Каргашин Ю.Д., Меркулов В.И., Чернов В.С. Угловое сверхразрешение в бортовых радиолокационных системах воздушного базирования. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2021. №11. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.12.3.

12. Wang, Y., Zhang C., Yongshun H. etc. Space Precession Target Classification Based on Radar High-Resolution Range Profiles. International Journal of Antennas and Propagation. 2019. 1-9. 10.1155/2019/8151620.

13. Чапурский В.В. Избранные задачи теории сверхширокополосных радиолокационных систем. Москва Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. 279 с

14. Zakharov A.S., Perlov A.Y., Timoshenko A.V., Sazonov V.V. Model for calculating changes in the radiation pattern and amplitude-phase distribution in the subarray of a large-aperture apaa based on a modified thermal conductivity equation. 2024 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. IEEE: 2024, pp. 1-4, Moscow, Russia. DOI:10.1109/ieeeconf60226.2024.10496770

15. Пилков А.В., Перлов А.Ю., Третьякова Т.Д., Буханец Д.И. Расчетно-аналитическая оценка влияния шумовой температуры приемного тракта на энергетический потенциал РЛС дальнего обнаружения. Электромагнитные волны и электронные системы. 2023. Т. 28, № 2. С. 36-42. DOI 10.18127/j5604128-202302-05

16. Шафир Р.С., Перлов А.Ю., Тимошенко А.В., Корпусов М.О. Моделирование тепловых процессов в высокопотенциальных радиолокационных станциях с плотной компоновкой радиоэлектронной аппаратуры с учетом неравномерного распределения температуры внутри блоков. Вычислительные технологии. 2023. Т. 28. № 5. С. 33-44.