УДК 004.4

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДВУХ АЛГОРИТМОВ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ РУПОРНОЙ АНТЕННЫ

Ю. В. Мерзляков, генеральный директор АО «ППО ЭВТ ИМ. В.А. Ревунова», Пенза, Россия;
e-mail: analizer@ppoevt.ru
Д. В. Пащенко, д.т.н., профессор, ректор ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет», Пенза, Россия;
orcid.org/0000-0003-4756-0040, e-mail: d.paschenko@penzgtu.ru
А. В. Моисеев, к.ф-м.н., доцент, заведующий кафедрой «Математика и физика» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет», Пенза, Россия;
orcid.org/0000-0001-9534-2465, e-mail: amoiseev@penzgtu.ru
А. И. Мартышкин, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Программирование» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет», Пенза, Россия;
orcid.org/0000-0002-3358-4394, e-mail: mai@penzgtu.ru

Рассматривается экспериментальное исследование алгоритмов позиционирования рупорной антенны: «классического», основанного на суммировании значений горизонтальной и вертикальной диаграмм направленности, представленных в логарифмическом масштабе, и взвешенной суммы. ***Целью работы*** *является проведение сравнительного анализа двух упомянутых алгоритмов позиционирования рупорной антенны. Совершенствование методов испытаний радиоэлектронных средств в контексте современного развития электроники и автоматизации производства является актуальной проблемой. Авторы проводят сравнительный анализ двух алгоритмов позиционирования рупорной антенны на основе вычислительного эксперимента, выявляя оптимальные параметры для их практического применения. Полученные результаты позволяют сделать вывод о предпочтительности метода взвешенной суммы восстановления диаграммы направленности при испытании рупорных антенн на различных частотах работы. В заключении статьи представлены основные результаты и выводы по проведенному исследованию.*

Ключевые слова: *вычислительный эксперимент, диаграмма направленности, классический метод восстановления трехмерной диаграммы направленности, коэффициент усиления, метод взвешенной суммы, ориентация антенн, рупорная антенна, сигнал.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2024-88-31-37

Введение

В современном мире развитие электронной техники и автоматизации производственных процессов требует постоянного совершенствования методов испытаний радиоэлектронных средств (РЭС), эффективность и надежность которых напрямую зависят от качества проведения испытаний в ходе их производства и эксплуатации. Однако традиционные методы тестирования зачастую не могут обеспечить достаточную «точность-скорость» и стабильность процесса, что актуализирует вопрос о внедрении автоматизированных способов испытаний.

Цель работы – провести сравнительный анализ двух алгоритмов позиционирования рупорной антенны.

Теоретическая часть

Рассматривается одна из ключевых проблем разработки автоматизированного комплекса – ориентация антенны в направлении принимаемого сигнала. Современные инженерные решения пока не достигли возможности быстро и эффективно настраивать систему из двух антенн для достижения максимального коэффициента усиления [1-7]. В работе [8] приводится методика преобразования функции, описывающей диаграмму направленности (ДН) рупорной антенны, во взвешенный граф, которая необходима для проведения испытаний ан-

тенн. Предлагается разбиение испытаний на два этапа. Первый предполагает ориентацию антенны в направлении максимума ДН. Для выполнения этого этапа рассматривается задача определения координат вектора направления на источник сигнала. Эта задача относится к задачам радиопеленгации и решается на основе решающего правила Байеса [9]. В результате измерения сигнала в двух точках мы наблюдаем пару зависимых случайных событий $\left(h_k; A_{ij}\right)$, в которой мы знаем событие h_k. Это позволяет выбрать событие A_{ij} с наибольшей апостериорной вероятностью. Предлагаемый подход позволяет уменьшить перемещение антенны. Это важно, так как существенное время уходит именно на перемещение антенны. Второй этап предполагает построение реальной ДН, опираясь на имеющуюся библиотеку ДН и используя найденный максимум для эталонной антенны.

По результатам проведенных экспериментов приведем сравнительный анализ двух алгоритмов позиционирования рупорной антенны.

Экспериментальные исследования

Исследование вероятностного алгоритма позиционирования эталонной рупорной антенны в направлении, обеспечивающем максимальное значение коэффициента передачи сигнала

Вычислительный эксперимент выполнялся в разработанной программе, реализующей указанный алгоритм. Вначале исследовалась зависимость количества итераций до определения точки с максимальным значением коэффициента передачи сигнала от количества сгенерированных интервалов. Количество интервалов определяется размером интервала разбиения (количеством точек, которые попадают в один интервал). Данный параметр влияет на количество узлов сформированного взвешенного графа [8], в которых будут пересчитаны вероятности состояний. В силу этого параметр влияет на количество итераций до определения положения антенны и время вычисления матриц вероятностей и на общее время работы алгоритма.

В ходе эксперимента исследуются два вычислительных алгоритма восстановления трехмерной ДН по двумерным проекциям ДН на горизонтальную и вертикальную плоскости, которые описаны в работах [10-13]: «классический», основанный на суммировании значений горизонтальной и вертикальной диаграмм, представленных в логарифмическом масштабе, описываемый выражением $f(\theta,\varphi) = f_H(\varphi) + f_E(\theta)$, и взвешенной суммы, который описывается выражением $f(\theta,\varphi) = \dfrac{w_1(\theta,\varphi) f_H(\varphi) + w_2(\theta,\varphi) f_E(\theta)}{\sqrt{w_1^2(\theta,\varphi) + w_2^2(\theta,\varphi)}}$, где $w_1(\theta,\varphi) = F_E(\theta)\cdot\left(1 - F_H(\varphi)\right)$, $w_2(\theta,\varphi) = F_H(\varphi)\cdot\left(1 - F_E(\theta)\right)$ – весовые коэффициенты, θ – угол места, φ – угол азимута. В этих выражениях $f(\theta,\varphi)$ – значение функции ДН в логарифмическом масштабе, $f_H(\varphi)$ и $f_E(\theta)$ – функции, описывающие горизонтальную и вертикальную составляющие ДН в логарифмическом масштабе, $F_H(\varphi)$ и $F_E(\theta)$– функции, описывающие горизонтальную и вертикальную составляющие ДН в натуральном масштабе.

На рисунках 1, 2 приведены результаты исследования вероятностного алгоритма позиционирования эталонной рупорной антенны в направлении, обеспечивающем максимальное значение коэффициента передачи сигнала.

На рисунке 1 показана зависимость среднего количества итераций от размера интервала разбиения для «классического» метода восстановления ДН.

Согласно представленной зависимости прослеживается увеличение количества шагов при увеличении размера интервала разбиения. Отметим, что данная зависимость характеризует «классический» метод восстановления ДН, который в большей степени подходит для всенаправленных антенн [14, 15], а значит, должен применяться при испытании рупорных антенн на

более высоких частотах работы. В этом случае нам необходимо выбрать размер интервала разбиения в 110 точек, что обеспечивает минимальное количество итераций (рисунок 1).

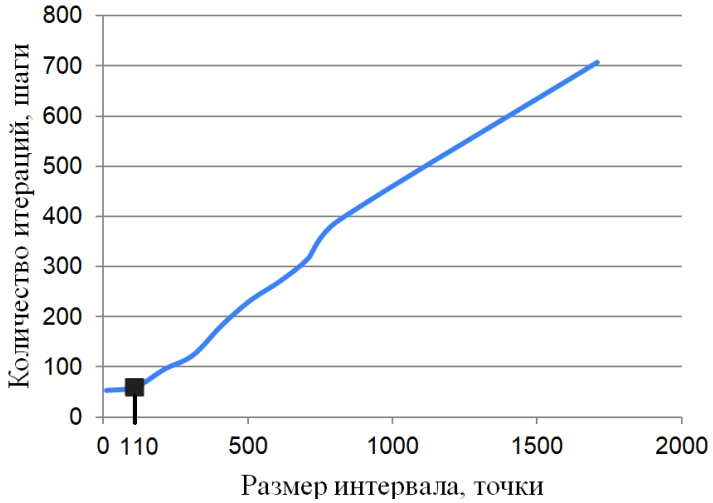

Рисунок 1 – Зависимость количества итераций (шагов) в среднем от размера интервала разбиения для «классического» метода восстановления диаграммы направленности
Figure 1 – Dependence of average number of iterations (steps) on the size of the partition interval for «classical» method of directional pattern reconstruction

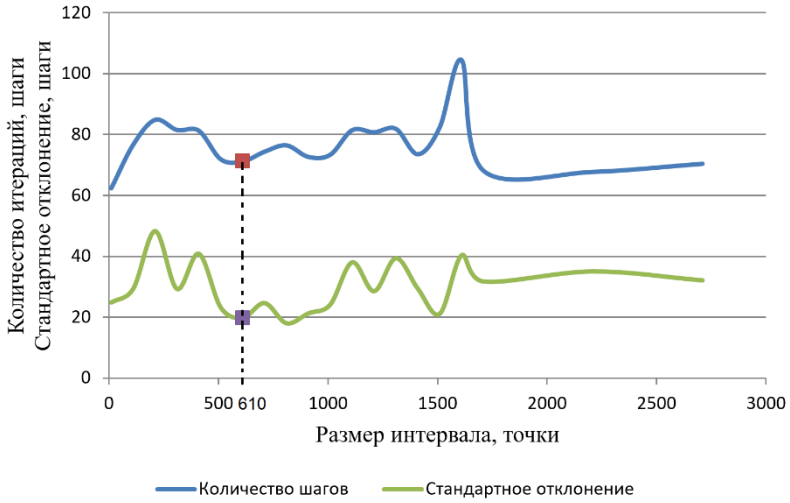

Рисунок 2 – Зависимость количества итераций (шагов) в среднем и стандартного отклонения от размера интервала разбиения для метода взвешенной суммы восстановления диаграммы направленности
Figure 2 – Dependence of mean and standard deviation number of iterations (steps) on the size of the partitioning interval for the weighted sum method of directional pattern reconstruction

На рисунке 2 показана зависимость среднего количества итераций и стандартного отклонения от размера интервала разбиения для метода взвешенной суммы восстановления ДН. Из графика на рисунке можем отметить, что зависимость количества итераций от числа точек в интервале разбиения не столь очевидная, как на рисунке 1. Следует обратить внимание на всплеск количества итераций в районе размера интервала 1600 точек. Это вызвано некоторым зацикливанием алгоритма поиска, что приводит к увеличению на порядок количества итераций. Рассматриваемый метод восстановления ДН лучше подходит для узконаправленных антенн, а значит, должен применяться при испытании рупорных антенн на более низких частотах работы. В этом случае нам необходимо выбрать размер интервала разбиения в 610 точек. При данном количестве точек разбиения при приемлемом количестве итераций наблюдается меньшее значение стандартного отклонения (рисунок 2).

Резюмируя вышесказанное, приходим к выводу, что дальнейшее уменьшение размера интервала нецелесообразно, так как не приведет к существенному увеличению количества шагов, но позволит уменьшить среднее время вычисления условных вероятностей.

Опираясь на описанные выше результаты, можно сказать, что реализация алгоритма при «классическом» восстановлении трехмерной ДН будет использовать 110 точек в интервале разбиения, а при применении метода взвешенной суммы будет использовано 610 точек.

В виду узкой направленности ДН рупорных антенн на широком спектре частот предпочтение необходимо отдать алгоритму взвешенной суммы восстановления ДН [14, 15]. В этом случае при 610 точках в интервале разбиения среднее количество шагов до точки максимума ДН составит 82.

Исследование вероятностного алгоритма позиционирования испытуемой рупорной антенны в направлении, обеспечивающем максимальное значение коэффициента передачи сигнала

Вычислительный эксперимент выполнялся в разработанной программе, реализующей указанный алгоритм. Особое внимание уделим процедуре выбора ДН из имеющейся библиотеки ДН в результате пересчета вероятностей соответствия при анализе взвешенного графа, который описывает ДН согласно методике, приведенной в [8]. Библиотека ДН сформирована на основе проведения испытаний рупорных антенн, соответствующих параметрам, а также антенн, имеющих характерные дефекты. Для формирования библиотеки ДН использовались 3 вида рупорных антенн, аналогичных антенне П6-23М.

В настоящий момент имеется библиотека ДН, содержащая описание 10 антенн. Был проведен вычислительный эксперимент, в ходе которого диаграммы направленности выбирались случайным образом согласно вероятности их встречаемости, поэтому самые редко встречаемые диаграммы под номерами 1 и 3 в выборку не попали. Для остальных диаграмм приведена статистика конечной вероятности соответствия после останова алгоритма при пороговом значении 0,9.

На рисунке 3 представлена зависимость вероятности выбора ДН в библиотеке от номера испытуемой антенны с известной ДН.

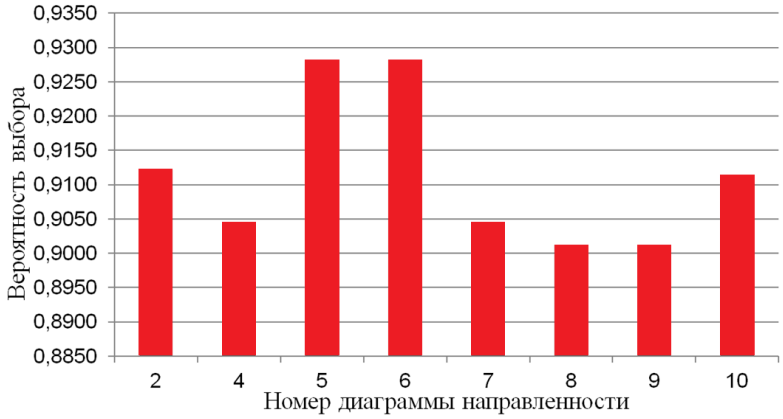

Рисунок 3 – Зависимость вероятности выбора диаграммы направленности в библиотеке от номера испытуемой антенны с известной диаграммы направленности
Figure 3 – Dependence of the probability of selecting a pattern in the library on the number of the tested antenna with known pattern

Алгоритм предусматривает остановку пересчета при достижении определенного значения вероятности соответствия испытуемой антенны ДН из имеющейся в библиотеке ДН. На рисунке 3 представлены вероятности выбора для порога остановки пересчета, равного 0,9. Для антенн, соответствующих ДН под номерами 8 и 9, прирост вероятности при пересчете незначительный, поэтому алгоритм останавливается, и результат несущественно превосходит 0,9. Для антенн, соответствующих ДН под номерами 5 и 6, прирост вероятности при пе-

ресчете значительный в силу существенного отличия этих ДН от других, имеющихся в библиотеке. Также отметим, что ДН под номером 7 существенно отличается от всех остальных и поэтому может быть определена с минимальным количеством шагов.

На рисунке 4 представлена зависимость количества итераций до точности выбора с вероятностью 0,9 ДН в библиотеке от номера испытуемой антенны с известной ДН.

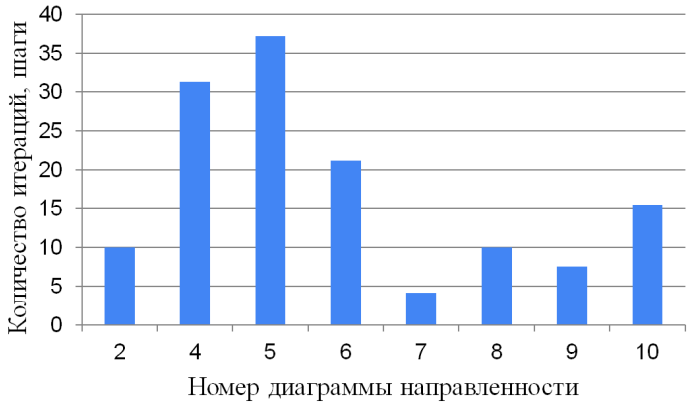

Рисунок 4 – Зависимость количества итераций до точности выбора с вероятностью 0,9 диаграммы направленности в библиотеке от номера испытуемой антенны с известной диаграммой направленности
Figure 4 – Dependence of the number of iterations with 0,9 probability selection accuracy of library radiation pattern on the number of test antenna with known pattern

По рисунку 4 можно заметить, что минимальное количество шагов в среднем требуется для идентификации антенны с ДН под номером 7. Как было указано выше, это обусловлено существенным отличием ДН под номером 7 от всех остальных, что отличает ее от ДН под номерами 4, 5, 6, которые до последнего шага имеют практически одинаковые вероятности идентификации принадлежности испытуемой антенны к ДН из имеющейся библиотеки. В силу этого требуются дополнительные шаги для идентификации антенн, соответствующих этим ДН. Для идентификации антенны с ДН под номером 7 требуется в среднем 4 итерации, а для идентификации антенны с ДН под номером 5 – 37 итераций.

Заключение

В настоящей статье приводится сравнительный анализ двух алгоритмов позиционирования рупорной антенны. Были проведены экспериментальные исследования в части проверки работоспособности предложенных и программно реализованных алгоритмов. Полученные в ходе экспериментов данные позволили настроить параметры алгоритмов, а также свидетельствуют об адекватности предложенных алгоритмов, методик и разработанного на их основе программного обеспечения. Предложенные алгоритмы обеспечивают максимальное значение коэффициента усиления сигнала, ориентируя антенны в направлении максимума диаграммы направленности за минимальное время.

Библиографический список

1. **Толкачев В.И., Пикалов О.Г., Паньчев С.В., Новиков И.Г.** Расчет коэффициента усиления антенн через трехмерное представление диаграмм направленности и оценка их взаимного влияния // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2018. Т. 5. № 1. С. 75-80.

2. **Шестаков Е.Н., Гриц В.И., Шестаков И.Я., Малышев Д.О.** Основные методы измерения коэффициента усиления антенн // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: сборник материалов V Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики. В 3-х т. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова, 2019. С. 500-502.

3. **Наумов Н.Д.** Оптимизированный метод расчета рупорной антенны // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 5. С. 508-513.

4. **Драч В.Е., Луганская А.И.** Моделирование влияния преграды на характеристики рупорной антенны // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. № 65. С. 19-25.

5. **Калинин Ю.Н., Чавдарь М.А.** Измерение коэффициента усиления методом трех антенн в планарных сканерах ближнего поля // Вестник метролога. 2017. № 1. С. 10-14.

6. **Пащенко Д.В., Мерзляков Ю.В.** Радиолокация в современной авиации // Информационные системы и технологии (ИСТ 2023): труды научно-технической конференции с международным участием, 2023. С. 65-74.

7. **Пащенко Д.В., Мерзляков Ю.В.** Проблемы настройки и испытаний авиационных радиоэлектронных комплексов // Информационные системы и технологии (ИСТ 2023): труды научно-технической конференции с международным участием, 2023. С. 74-79.

8. **Мерзляков Ю.В., Пащенко Д.В.** Методика преобразования диаграммы направленности рупорной антенны во взвешенный граф // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2024. Т. 13. № 1(65). С. 68-74. EDN: VEWPLQ.

9. **Puga J., Krzywinski M. & Altman N.** Bayes' theorem. Nat Methods 12, 277-278 (2015). https://doi.org/10.1038/nmeth.3335.

10. **Reconstruction of 3-D Radiation Pattern from 2-D Orthogonal Slices.** MATLAB & Simulink [Электронный ресурс]. – URL: https://www.mathworks.com/help/antenna/ug/3d-reconstruction-of-radiation-pattern-from-2d-orthogonal-slices.html (дата обращения: 20.01.2024).

11. **Chen J., Raye D., Khawaja W., Sinha P., Guvenc I.** Impact of 3D UWB Antenna Radiation Pattern on Air-to-Ground Drone Connectivity // IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Chicago, IL, USA, 2018, p. 1-5. DOI: 10.1109/VTCFall.2018.8690726.

12. **Lan T. et al.** (2022). A UAV-Based Measurement Method for Three-Dimensional Antenna Radiation Pattern. In: Liang, Q., Wang, W., Liu, X., Na, Z., Zhang, B. (eds) Communications, Signal Processing, and Systems. CSPS 2021 // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2022. vol. 879, pp. 587-594, https://doi.org/10.1007/978-981-19-0386-1_74.

13. **Maeng S. J., Kwon H., Ozdemir O., Güvenç İ.** Impact of 3-D Antenna Radiation Pattern in UAV Air-to-Ground Path Loss Modeling and RSRP-Based Localization in Rural Area in IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, vol. 4, pp. 1029-1043, 2023. DOI: 10.1109/OJAP.2023.3322145.

14. **Vasiliadis T. G., Dimitriou A. G., Sergiadis G. D.** A novel technique for the approximation of 3-D antenna radiation patterns, in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 53, no. 7, p. 2212-2219, July 2005. DOI: 10.1109/TAP.2005.850752.

15. **Leonor N. R., Caldeirinha R. F. S., Sánchez M. G., Fernandes T. R.** A Three-Dimensional Directive Antenna Pattern Interpolation Method, in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 15, p. 881-884, 2016. DOI: 10.1109/LAWP.2015.2478962.

UDC 004.4

COMPARATIVE ANALYSIS OF TWO HORN ANTENNA POSITIONING ALGORITHMS

Y. V. Merzlyakov, CEO in JSC «PPO EVT named After V.A. Revunov», Penza, Russia;
e-mail: analizer@ppoevt.ru
D. V. Pashchenko, Doctor in Technical Sciences, full professor, Rector of PSTU, Penza, Russia;
orcid.org/0000-0003-4756-0040, e-mail: d.paschenko@penzgtu.ru
A. V. Moiseev, PhD (in physics and mathematics), associate Professor, Head of Mathematics and Physics Department, Penza, Russia;
orcid.org/0000-0001-9534-2465, e-mail: amoiseev@penzgtu.ru
A. I. Martyshkin, PhD (in technical sciences), associate Professor, Head of Programming Department PSTU, Penza, Russia;
orcid.org/0000-0002-3358-4394, e-mail: mai@penzgtu.ru

The paper deals with the experimental study of horn antenna positioning algorithms: «classical», based on summating the values of horizontal and vertical directivity diagrams presented in logarithmic scale, and the weighted sum. ***The aim of the work*** *is to carry out a comparative analysis of two mentioned algorithms for horn antenna positioning. The improvement of radio-electronic test methods in the context of modern development of electronics and production automation is of urgent importance. The authors conduct a comparative analysis of two horn antenna positioning algorithms on the basis of computational experiment,*

identifying optimal parameters for their practical application. The results obtained allow us to conclude that the weighted sum method of directional pattern reconstruction is preferable for testing horn antennas at different operating frequencies. The conclusion of the article presents the main results and conclusions of the research.

Keywords: *computational experiment, radiation pattern, classical method of three-dimensional directional pattern reconstruction, gain, the weighted sum method, antenna orientation, horn antenna, signal.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2024-88-31-37

References

1.**Tolkachev V.I., Pikalov O.G., Pan'chev S.V., Novikov I.G.** Raschet kojefficienta usilenija antenn cherez trehmernoe predstavlenie diagramm napravlennosti i ocenka ih vzaimnogo vlijanija. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informacionnye sistemy*. 2018, vol. 5, no. 1, pp. 75-80. (in Russian).

2.**Shestakov E.N., Grits V.I., Shestakov I.Y., Malyshev D.O.** Osnovnye metody izmerenija kojefficienta usilenija antenn. *Aktual'nye problemy aviacii i kosmonavtiki*: *sbornik materialov V Mezhdunarodnoj nauch-no-prakticheskoj konferencii, posvjashhennoj Dnju kosmonavtiki*. V 3-h t. / pod obsh. red. Ju. Ju. Loginova. 2019, pp. 500-502. (in Russian).

3.**Naumov N.D.** Optimizirovannyj metod rascheta rupornoj antenny. *Uspehi prikladnoj fiziki.* 2017, vol. 5, no. 5, pp. 508-513. (in Russian).

4.**Drach V.E., Luganskaya A.I.** Modelirovanie vlijanija pregrady na harakteristiki rupornoj antenny. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotehnicheskogo universiteta.* 2018, no. 65, pp. 19-25. (in Russian).

5.**Kalinin Y.N., Chavdar M.A.** Izmerenie kojefficienta usilenija metodom treh antenn v planarnyh skanerah blizhnego polja. *Vestnik metrologa.* 2017, no. 1, pp. 10-14. (in Russian).

6.**Pashchenko D.V., Merzlyakov Yu.V.** Radiolokacija v sovremennoj aviacii. *Informacionnye sistemy i tehnologii (IST 2023)*: trudy nauchno-tehnicheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, 2023. pp. 65-74. (in Russian).

7.**Pashchenko D.V., Merzlyakov Yu.V.** Problemy nastrojki i ispytanij aviacionnyh radiojelektronnyh kompleksov. *Informacionnye sistemy i tehnologii (IST 2023)*: trudy nauchno-tehnicheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. 2023, pp. 74-79. (in Russian).

8.**Merzlyakov Yu.V., Pashchenko D.V.** Metodika preobrazovanija diagrammy napravlennosti rupornoj antenny vo vzveshennyj graf. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastojashhego pljus*. 2024, vol. 13, no. 1(65). pp. 68-74. EDN: VEWPLQ. (in Russian).

9.**Puga J., Krzywinski M. & Altman N.** Bayes' theorem. *Nat Methods*. 12, 277-278 (2015), https://doi.org/10.1038/nmeth.3335.

10.**Reconstruction of 3-D Radiation Pattern from 2-D Orthogonal Slices.** *MATLAB & Simulink* [Jelektronnyj resurs]. URL: https://www.mathworks.com/help/antenna/ug/3d-reconstruction-of-radiation-pattern-from-2d-orthogonal-slices.html (data obrashcheniya: 20.01.2024).

11.**Chen J., Raye D., Khawaja W., Sinha P., Guvenc I.** Impact of 3D UWB Antenna Radiation Pattern on Air-to-Ground Drone Connectivity. *IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, Chicago, IL, USA, 2018, p. 1-5. DOI: 10.1109/VTCFall.2018.8690726.

12.**Lan T. et al.** (2022). A UAV-Based Measurement Method for Three-Dimensional Antenna Radiation Pattern. In: Liang Q., Wang W., Liu X., Na Z., Zhang B. (eds) Communications, Signal Processing, and Systems. CSPS 2021. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2022. vol. 879. p 587-594, https://doi.org/10.1007/978-981-19-0386-1_74.

13.**Maeng S. J., Kwon H., Ozdemir O., Güvenç İ.** Impact of 3-D Antenna Radiation Pattern in UAV Air-to-Ground Path Loss Modeling and RSRP-Based Localization in Rural Area // *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*. 2023, vol. 4, p. 1029-1043. DOI: 10.1109/OJAP.2023.3322145.

14.**Vasiliadis T.G., Dimitriou A.G., Sergiadis G.D.** A novel technique for the approximation of 3-D antenna radiation patterns. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. July 2005, vol. 53, no. 7, p. 2212-2219. DOI: 10.1109/TAP.2005.850752.

15.**Leonor N.R., Caldeirinha R.F.S., Sánchez M.G., Fernandes T.R.** A Three-Dimensional Directive Antenna Pattern Interpolation Method // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2016, vol. 15, p. 881-884. DOI: 10.1109/LAWP.2015.2478962.