Научная статья
УДК 621.396
https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-4-48-61

CC BY 4.0

Реализация высокомобильного комплекса пеленгации для БПЛА с применением виртуальных магнитных диполей

Евгений Алексеевич Ищенко✉, kursk1998@yandex.ru
Юрий Геннадьевич Пастернак, pasternakyg@mail.ru
Сергей Михайлович Фёдоров, fedorov_sm@mail.ru
Илья Андреевич Баранников, 8thbar@gmail.com

Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, 394006, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность. *В условиях развития современных широкополосных систем связи особенно актуальной становится задача выполнения пеленгации сигналов с использованием высокомобильных комплексов пеленгации (БПЛА), которые накладывают ограничения на размеры антенных элементов, на расстояние между ними, что приводит к росту математической ошибки пеленга.*

Постановка задачи. *В статье ставится задача рассмотреть возможность повышения точности пеленгации высокомобильного комплекса путем применения технологии виртуальных магнитных диполей. Особенностью данного метода является минимизация искажений, которые вносятся корпусом-носителем в характеристики измеряемого поля. Для измерения характеристик поля, а также их парциальных компонент применялись векторные антенные элементы.*

Целью работы *является исследование характеристик комплекса радиопеленгации с использованием методов виртуальных магнитных диполей в условиях искажений, вносимых корпусом-носителем. В качестве примера рассматриваются случаи пеленгации разнополяризованных волн, учета влияния обтекателей антенных элементов, оценка предельной точности разрешения, а также шумовой устойчивости. При моделировании использовался* ***метод*** *конечных элементов, реализованный в DS CST Studio Suite 2024.*

Результаты. *Во время исследования на БПЛА с комплексом пеленгации падала плоская волна с разными пеленгами, что позволило проводить наиболее точное исследование. К результатам работы также следует отнести создание модели комплекса радиопеленгации, который может быть установлен на малом БПЛА, обеспечивающего высокую точность пеленгации волн в пассивном режиме.*

Новизна *применяемого метода заключается в формировании виртуальных магнитных диполей на основе измеренных характеристик искаженного электрического поля. Также новизной данной работы являются случаи моделирования, которые связаны с шумовым подавлением, влиянием корпусов антенных элементов, а также оценки предельной разрешающей точности.*

Практическая значимость *заключается в создании модели комплекса радиопеленгации на основе векторных антенных элементов, которые применяются для измерения характеристик электромагнитного поля с последующей пеленгацией на основе магнитного поля. В процессе исследования были рассмотрены все аспекты и случаи влияния внешних факторов на точность радиопеленгационного комплекса.*

Ключевые слова: *пеленгация, виртуальная антенная решетка, векторная антенна, обтекатель антенны, шумовая устойчивость, применение БПЛА*

Источник финансирования: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда по гранту № 19-79-10109, https://rscf.ru/project/19-79-10109

Ссылка для цитирования: Ищенко Е.А., Пастернак Ю.Г., Фёдоров С.М., Баранников И.А. Реализация высокомобильного комплекса пеленгации для БПЛА с применением виртуальных магнитных диполей // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 4. С. 48–61. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-4-48-61. EDN:YZJDJC

© Ищенко Е.А., Пастернак Ю.Г.,
Фёдоров С.М., Баранников И.А., 2024

Original research
https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-4-48-61

Implementation of a Highly Mobile UAVs Direction Finding Complex Using Virtual Magnetic Dipoles

Evgeniy Alekseevich Ishchenko✉, kursk1998@yandex.ru
Yuri Gennadievich Pasternak, pasternakyg@mail.ru
Sergey Mikhailovich Fedorov, fedorov_sm@mail.ru
Ilya Andreevich Barannikov, 8thbar@gmail.com

Voronezh State Technical University,
Voronezh, 394006, Russian Federation

Annotation

Relevance. *In the context of the development of modern broadband communication systems, the task of performing direction finding of signals using highly mobile direction finding systems (UAVs) is becoming especially urgent. They impose restrictions on the size of antenna elements and the distance between them, which leads to an increase in the mathematical error of the bearing.*

Problem statement. *The paper sets the task of considering the possibility of increasing the direction finding accuracy of a highly mobile complex by using virtual magnetic dipole technology. A feature of this method is the minimization of distortions introduced by the carrier body into the characteristics of the measured field. To measure the field characteristics, as well as their partial components, vector antenna elements were used.*

Goal of the work *is to study the characteristics of a radio direction finding complex using virtual magnetic dipole methods in conditions of distortions introduced by the carrier body. As an example, cases of direction finding of differently polarized waves, taking into account the influence of radomes of antenna elements, assessment of the maximum resolution accuracy, as well as noise stability are considered. The finite element* ***method*** *implemented in DS CST Studio Suite 2024 was used in the modeling.*

Result. *During the research, a plane wave with different bearings fell on a UAV with a direction finding complex, which made it possible to carry out the most accurate research. The results of the work also include the creation of a model of a radio direction finding complex, which can be installed on a small UAV, providing high accuracy of wave direction finding in passive mode.*

The ***novelty*** *of the method used lies in the application of methods for the formation of virtual magnetic dipoles based on the measured characteristics of the distorted electric field. New to this work are modeling cases that are associated with noise suppression, the influence of antenna element housings, as well as assessment of the maximum resolution accuracy.*

Practical significance *of the work lies in the creation of a model of a radio location system based on vector antenna elements, which are used to measure the characteristics of the electromagnetic field with subsequent direction finding based on the magnetic field.*

Keywords: *direction finding, virtual antenna array, vector antenna, antenna radome, noise immunity, UAV application*

Funding: The work was supported by the Russian Science Foundation, contract number 19-79-10109, https://rscf.ru/project/19-79-10109

For citation: Ishchenko E.A., Pasternak Yu.G., Fedorov S.M., Barannikov I.A. Implementation of a Highly Mobile UAVs Direction Finding Complex Using Virtual Magnetic Dipoles. *Proceedings of Telecommunication Universities.* 2024;10(4):48–61. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-4-48-61. EDN:KIGLSY

Введение

Применение высокомобильных пеленгационных комплексов является важной и актуальной задачей. Особое внимание стоит уделить возможности установки комплексов пеленгации – их антенные блоки на БПЛА. Таким образом, возникает

ограничение, которое вызвано двумя факторами – антенные системы на БПЛА должны быть малыми по весу; число антенн, которые могут быть установлены на БПЛА, ограничено ввиду сохранения электромагнитной совместимости, а также уменьшения помех для объектов. Поэтому можно заметить, что оптимальным вариантом является ситуация, которая связана с применением векторных антенных элементов, которые объединяются в антенную решетку пассивного пеленгатора. Пример использования векторных антенных элементов в роли пеленгационных антенн рассматривается в работе [1]. Авторы отмечают преимущества такого решения: высокая точность измерения характеристик поля, парциальные измерения компонент, возможность применения с использованием эллиптически поляризованных и линейных волн. Однако недостатками данной работы является то, что модель пеленгатора описана только с точки зрения математических моделей, при этом не приводится самой конструкции антенны.

Другим примером реализации векторного сканирования пространства является работа [2]. В процессе исследования авторы предлагают использовать векторное сканирование пространства на основе многолучевой антенны с переключаемыми лучами. Пеленгация базируется на измерении векторных характеристик сигналов, которые возбуждаются от волн, падающих от источника радиоизлучения (ИРИ). Полученная методика позволяет находить пеленг с высокой точностью – 5 °, однако выбранная конструкция антенны достаточно велика для БПЛА, а также требует использования дополнительных активных цепей, которые приводят к росту энергопотребления, что, в свою очередь, увеличивает расход аккумулятора, в результате – уменьшается дальность работы, и ограничивается возможность применения БПЛА.

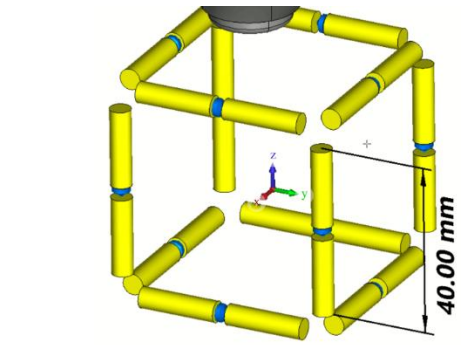
В работе [3] авторы предлагают конструкцию векторных антенн на основе диполей. Преимуществами такого решения является возможность упрощения конструкции обтекателей антенны, а также снижение веса; однако выбранный диапазон частот – VHF – приводит к большим размерам антенны, что не позволяет ее использовать совместно с БПЛА (ширина плеча составляет 350 мм), при этом стоит учитывать, что для комплекса пеленгации требуется установка нескольких антенн, а это не позволяет применять предложенную конструкцию на БПЛА ввиду ее больших размеров. Другим примером конструкции векторных антенн является антенна, которая рассматривается в [4]. Предложенная антенна позволяет обеспечить быстрое измерение характеристик поля, при этом она имеет малые размеры, а также – возможность переключения между портами. Все указанные характеристики позволяют сделать высокоэффективную пеленгационную векторную антенну, однако у приведенной антенны наблюдается нестабильность диаграммы направленности, что может вызывать искажения пеленгационной характеристики, а, следовательно, – дополнительные ошибки определения пеленга. Для решения проблемы искажения характеристик пеленга, которые могут быть вызваны корпусом-носителем, неоднородностью диаграмм направленности на разных частотах, а также шумового воздействия, применяются алгоритмы аппроксимации поля, оптимизации диаграмм направленности, формирования дополнительных отсчетов – все эти методы принято объединять в единую группу формирования виртуальных антенных решеток (ВАР). В работе [5] приводится пример формирования ВАР на основе цилиндрической оптимизации и аппроксимации поля, при этом измерения базовых характеристик реальной антенной решетки (РАР) выполняются на основе дипольных антенных элементов. Предложенная методика позволила значительно снизить боковые лепестки, а, следовательно, уменьшить уровень шумового воздействия на характеристики, измеряемые антенной. Другим примером построения ВАР является работа [6], как показывают полученные в ней результаты, использование технологии аппроксимации поля позволяет значительно повысить точность пеленгации, при этом обеспечить рост шумовой стабильности. При этом авторами показано, что для обеспечения оптимального функционирования ВАР требуется использовать определенное количество виртуальных антенных элементов, так как слишком большое их число, как и недостаточное, приводит к росту ошибок пеленга ввиду возникающих ошибок при решении систем уравнений (переопределенность системы). В работе [7] авторы рассматривают возможность модификации одного из наиболее распространенных методов формирования ВАР – MUSIC, ESPRIT [8], root-MUSIC [9]. Выбранный алгоритм прост в реализации и надежен, однако требует большой статистической выборки для точной настройки определения пеленга, что является его недостатком. Таким образом, отчетливо видно, что использование ВАР значительно улучшает точность пеленгации, однако ввиду малых размеров БПЛА необходимо использовать новые алгоритмы их формирования, вызванные ограничениями размеров РАР [10]. Для решения проблемы расположения применяется множество методов, например, использование роя БПЛА, каждый из которых может нести отдельную пеленгационную антенну [11–14], однако применение такого метода определения характеристик целей приводит к ошибкам, которые могут быть вызваны расположением, разностью высот, а также необходимостью применения нескольких БПЛА.

В данной работе предлагается методика реализации виртуальных магнитных диполей (ВМД) для пеленгационного комплекса, который применяется на БПЛА, использующий в роли пеленгаторных антенн векторные антенны. Предложенный метод позволяет обеспечить высокоэффективное сканирование пространства путем применения одного БПЛА, что повышает надежность и точность определения пеленга. В работе приводится анализ стабильности работы предложенного метода, а также его математическое описание с проведением электродинамического моделирования в программном обеспечении DS CST Studio Suite 2024.

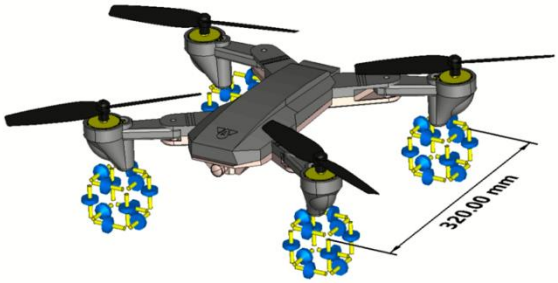
Описание исследуемой задачи

В процессе исследования производилось моделирование комплекса пеленгации, который формировался из кубических векторных антенных элементов, конструкция которых схожа с работой [15]. Так, каждый векторный антенный элемент имел кубическую форму, а характеристики поля измерялись с использованием 12 симметричных вибраторов длиной по 40 мм (размер грани куба 50 мм, по 5 мм оставлено для изоляции проводников, а также возможности их крепления). Каждый антенный элемент был нагружен на эквивалентную схему малошумящего усилителя, которая представляла из себя последовательное соединение резистора в 50 Ом и емкости 1,5 пФ. Благодаря выбранной кубической форме антенный элемент способен выполнять парциальные измерения всех компонент электрического и магнитного поля по x, y, z, а также способен выполнять пеленгацию при всех типах поляризации электромагнитных волн. В роли БПЛА-носителя был выбран квадрокоптер, к которому крепились четыре векторных антенных элемента, что позволяет обеспечить повышение точности пеленгации электромагнитных волн, при этом обеспечить высокую аэродинамическую эффективность и малый вес комплекса пеленгации. На рисунке 1 приводится вид векторного антенного элемента, а также комплекс пеленгации из четырех векторных антенных элементов, установленный на БПЛА.

В процессе исследования у БПЛА были указаны материалы изготовления, чтобы учитывать возможные потери и искажения характеристик поля, вызванные корпусом. Верх корпуса был выполнен из алюминия, низ и винты – из поликарбоната, двигатели – из меди и алюминия. Как видно, корпус БПЛА имеет сложную геометрическую форму, поэтому стоит ожидать, что из-за переотражений волн будут возникать искажения характеристик электрического поля, так как комплекс пеленгации и антенные элементы выступают рассеивателями электрического типа.



a)



b)

Рис. 1. Исследуемый комплекс пеленгации на основе векторных антенн: a) векторный антенный элемент; b) комплекс пеленгации, установленный на БПЛА

Fig. 1. The Investigated Direction-Finding Complex Based on Vector Antennas: a) Vector Antenna Element; b) Direction Finding Complex Installed on a UAV

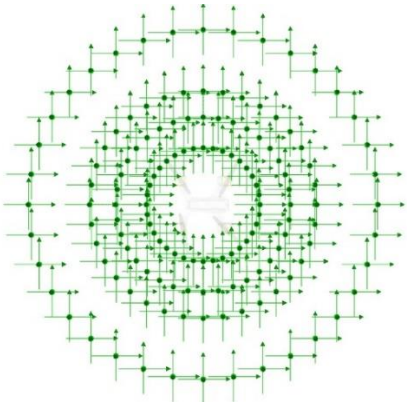
Для подтверждения данной теории можно провести электродинамическое моделирование полной конструкции, при этом на окружности вокруг модели – установить пробники электрического и магнитного полей. В результате чего можно будет выполнить измерения и определить характеристическое волновое сопротивление, которое имеет вид:

$$Z = \frac{E}{H}, \quad (1)$$

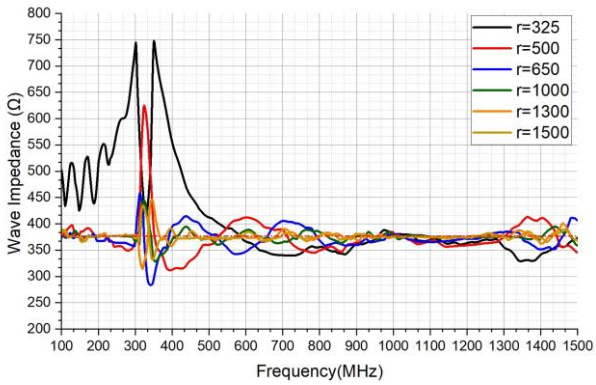
где Z – волновое сопротивление (Ом); E – напряженность электрического поля (В/м); H – напряженность магнитного поля (А/м).

Известно, что волновое сопротивление свободного пространства является постоянной величиной и составляет 120π или примерно 377 Ом. Именно от величины волнового сопротивления и будет зависеть тип рассеяния волн корпусом-носителем БПЛА, так если значение волнового сопротивления в ближней зоне превышает 120π, то корпус является рассеивателем электрического типа, а, следовательно, будут возникать большие искажения электрических компонент поля, что способно вызвать большие ошибки определения пеленга электромагнитных волн. Для определения типа рассеивателя корпуса-носителя выполнялось электродинамическое моделирование исследуемой задачи, так, вокруг БПЛА на уровне расположения антенн формировались пробники поля, которые измеряли E- и

H-поля, после чего определялось волновое сопротивление, причем расчет выполнялся на разных расстояниях от БПЛА – радиус пробников 325, 500, 650, 1000, 1300, 1500 мм. На рисунке 2 приводится вид БПЛА с установленными вокруг пробниками, а также значения волнового сопротивления.



a)



b)

Рис. 2. Оценка характеристик отношения компонент векторов электрического поля к магнитному в ближней зоне рассеяния волн: a) расположение пробников поля в ближней зоне; b) характеристическое волновое сопротивление на разном расстоянии от БПЛА

Fig. 2. Evaluation of the Characteristics of the Ratio of the Components of the Electric Field Vectors to the Magnetic Field in the Near Wave Scattering Zone: a) Location of Field Probes in the Near Zone; b) Characteristic Wave Impedance at Different Distances from the UAV

Как показывают полученные результаты, в ближней зоне корпуса БПЛА отчетливо наблюдается рост волнового сопротивления, что приводит к значительному искажению электрического поля ввиду его большего рассеяния. График волнового сопротивления в ближней зоне можно разделить на ряд основных участков: до 400 МГц – максимально нестабильный резонансный участок, когда наблюдаются перепады сопротивлений, что вызывает серьезные искажения полей; диапазон от 400 до 600 МГц – преобладание электрического типа рассеяния волн, следовательно – большие искажения *E*-компонент электромагнитного поля; от 600 до 1500 МГц – стабилизация волнового сопротивления, которое становится максимально близким к 120π. Таким образом, появляется возможность выдвинуть гипотезу, что пеленгация на основе электрических компонент поля будет приводить к большим ошибкам, однако их измерение намного проще магнитных. Рассмотрим методику формирования ВАР на основе ВМД.

Математическое описание формирования виртуальных магнитных диполей

С учетом полученных картин волновых сопротивлений можно сделать вывод, что при использовании для пеленгования электрического поля стоит ожидать грубых ошибок, которые вызваны его излишним зашумлением и искажением. Для решения данной проблемы предлагается применять магнитное поле, которое будут измерять ВМД, которые, в свою очередь, будут определять характеристики магнитного поля путем восстановления их из электрического, так как его проще измерить.

Известно, что электрическое и магнитное поле связаны между собой на основе уравнений Максвелла; так, на основании уравнений в интегральной форме:

$$\oint_L \vec{E}\,\overrightarrow{dl} = -\frac{d}{dt}\int_S \vec{B}\,\overrightarrow{ds}, \qquad (2)$$

где $\overrightarrow{dl}$ – единичный векторный элемент контура интегрирования L, который ориентирован против часовой стрелки; $\overrightarrow{ds}$ – единичный элемент площади, ориентированный по нормали к поверхности S, опирающейся на контур L; $\vec{B}$ – вектор магнитной индукции, пронизывающей поверхность S.

Путем интегрирования и парциальных преобразований вид магнитного поля на основе напряжений, возбужденных в нагрузках, будет иметь вид:

$$H = -\frac{\sum_{n=1}^{4} u_n^{(+,-)}}{i\omega\mu_a a}, \qquad (3)$$

где $u_n^{(+,-)}$ – напряжения в нагрузках, измеренные векторным антенным элементом; a – длина диполя; μ_a – абсолютная магнитная проницаемость.

Благодаря использованию векторных антенных элементов появляется возможность измерять парциальные измерения компонент поля, а также осуществлять пеленгацию по ним. Для определения пеленга предлагается использовать корреляционно-интерферометрический метод, который базируется на анализе диаграммы направленности пеленгатора (пеленгационной характеристики) с определением ее максимума.

Пеленгационная характеристика имеет вид:

$$D = \left|\sum_{n=1}^{N} F_{p_n} \cdot \exp\left(-jk_0(x_n\cos(\psi) + y_n\sin(\psi))\right)\right|, \qquad (4)$$

где F_{p_n} – поле, на основе которого выполняется пеленгация; p – парциальная компонента (x, y, z); k_0 – волновое число; x_n, y_n – координаты антенных элементов.

Благодаря выбранному методу появляются следующие возможности:

– пеленгация по E- или H-компонентам поля, соответственно используя электрические диполи, или ВМД;

– парциальная пеленгация – как по одной компоненте x, y, z, так и по парным или всем суммарным – наиболее точный способ, так как учитывает все измеренные характеристики;

– управление количеством антенных элементов для выполнения пеленгации (увеличение или уменьшение).

На основе разработанной математической модели проводились дальнейшие исследования эффективности работы разработанной методики повышения точности пеленгации на основе ВМД.

Оценка эффективности пеленгования с учетом разнополяризованных волн

Применение технологии ВМД напрямую связано с пеленгацией разнополяризованных волн. С точки зрения законов электродинамики существуют волны с эллиптической и линейной поляризацией. При этом важно отслеживать возможность верного определения пеленгов во всех случаях. При этом стоит заранее отметить, что не во всех типах волн присутствуют каждая парциальная компонента. Например, в линейно поляризованной волне отсутствует z-компонента поля, что не позволит выполнить верную пеленгацию; если же рассматривать эллиптически поляризованную волну, то оно может выполнять пеленгацию как на основе суммарных полей, так и по z-компоненте, так как она наименее искажена. Это особенно видно по диаграмме обратного рассеяния при падении волны на БПЛА с комплексом пеленгации (рисунок 3).

В процессе определения пеленга также важно рассчитывать статистические показатели пеленгации во всем диапазоне частот. На практике ИРИ передают сигналы в определенной полосе, что позволяет определить его пеленг путем расчета математического ожидания в сканируемом диапазоне частот и даст возможность повысить точность пеленгации.

С точки зрения статистической теории основные показатели имеют следующий вид:

– математическое ожидание:

$$m_1 = \frac{\sum_{n=1}^{N} x_n}{N}, \quad (5)$$

– среднеквадратическое отклонение пеленга:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{N}(x_n - tg)^2}{N}}, \quad (6)$$

– абсолютная ошибка пеленга:

$$err = \frac{\sum_{n=1}^{N}|x_n - tg|}{N}, \quad (7)$$

где m_1 – математическое ожидание пеленга; N – число отсчетов пеленга в диапазоне расчетов; x_n – мгновенное значение пеленга (градусов); tg – ожидаемое значение пеленга; σ – среднеквадратическое отклонение пеленга в диапазоне (градус); err – абсолютная ошибка пеленга (градусы).

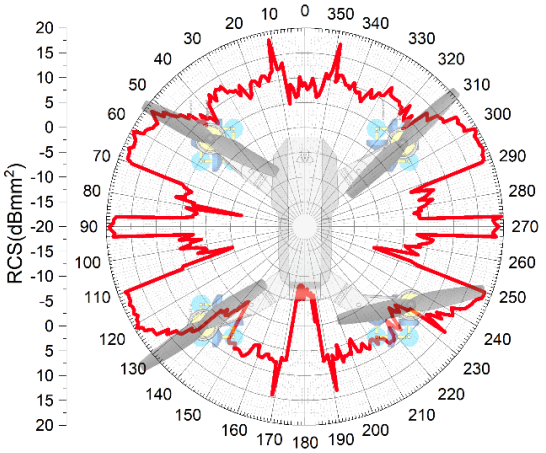
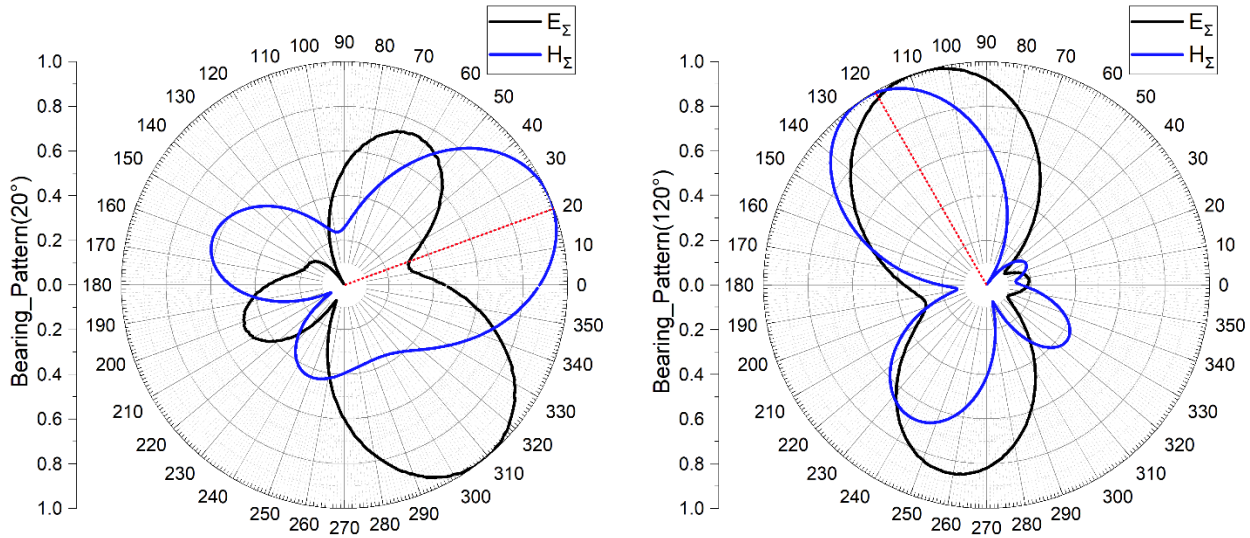


Рис. 3. Диаграмма обратного рассеяния БПЛА с комплексом пеленгации при облучении эллиптически поляризованной волны на частоте 500 МГц

Fig. 3. Radar Cross Section of a UAV with a Direction-Finding Complex When Irradiated by an Elliptically Polarized Wave at a Frequency of 500 MHz

Как уже было описано выше, в процессе моделирования на комплекс пеленгации падали электромагнитные волны с эллиптической (осевое отношение 10 к 1) и линейной поляризацией, после чего определялся пеленг электромагнитной полны. Так, в процессе пеленгации рассматривалась пеленгация по суммарным компонентам поля и по z-компонентам. Однако вторая ситуация может быть эффективно применена только в случае априорного наличия этой компоненты в волне, иначе следует использовать только суммарные компоненты электромагнитного поля. Полученные характеристики поля были использованы для расчета пеленга с использованием корреляционно-интерферо-метрического метода пеленгации, когда анализируется и обнаруживается пик пеленгационной характеристики. На рисунке 4 приводится вид пеленгационных характеристик, которые строятся с использованием суммарных компонент E- и H-поля при углах падения эллиптически поляризованной волны в 20 и 120 градусов на частоте 450 МГц, на которой как раз и стоит ожидать наибольших искажений характеристик волн.



а) б)

Рис. 4. Пеленгационная характеристика при пеленгации с использованием электрического и магнитного поля по суммарным компонентам: a) ИРИ = 20 °; b) ИРИ = 120 °

Fig. 4. Direction-Finding Characteristics During Direction-Finding Using Electric and Magnetic Fields Based on Total Components: a) True Bearing 20 °; b) True Bearing 120 °

Полученные картины отчетливо показывают, что при пеленгации с использованием ВМД удается достичь высокой точности определения пеленга электромагнитной волны, так как пик пеленгационной характеристики максимально близок к истинному углу падения волны. На рисунке 5 приводится зависимость пеленга электромагнитной волны от частоты при пеленгации по суммарным компонентам поля при облучении волнами с эллиптической и линейной поляризацией, при этом важно отметить, что в последующих исследованиях также будет рассматриваться и пеленгация по *z*-компоненте поля, так как для усложнения задачи использовалась эллиптически поляризованная волна, которая имеет все три компоненты поля. Приведенные пеленгационные характеристики были построены для углов падения в 20 ° и 120 ° в диапазоне частот от 100 до 1000 МГц, а в таблице 1 (значения пеленга приводятся с шагом в 20 °) указаны статистические характеристики пеленгации для диапазона частот 400–800 МГц, так как в нем обеспечивается наиболее стабильный пеленг.

ТАБЛИЦА 1. Характеристики пеленгации разнополяризованных волн

TABLE. 1. Characteristics of Direction Finding of Differently Polarized Waves

Пеленг, °	Линейная поляризация				Эллиптическая поляризация			
	E_Σ		H_Σ		E_Σ		H_Σ	
	m_1	σ	m_1	σ	m_1	σ	m_1	σ
0	2,90	3,10	2,40	2,30	333,65	345,13	1,38	1,59
20	31,86	10,91	15,55	4,48	312,62	292,63	23,55	3,61
40	73,02	35,04	40,00	0,00	245,94	218,38	41,92	2,55
60	59,63	15,35	62,29	5,73	113,32	80,67	60,85	3,26
80	108,51	75,86	79,63	1,37	127,39	99,43	86,29	6,48
100	120,65	56,04	98,47	1,64	101,91	29,97	109,91	10,24
120	131,76	34,62	117,65	2,48	129,56	43,98	124,88	4,94
140	140,42	0,67	137,00	3,00	130,7	17,35	142,06	2,91
160	156,29	20,99	156,91	3,18	163,32	3,45	165,65	6,18
180	180,00	0,00	179,56	0,69	185,87	5,9	176,32	3,91
Среднее	–	25,26	–	2,49	–	113,69	–	4,57

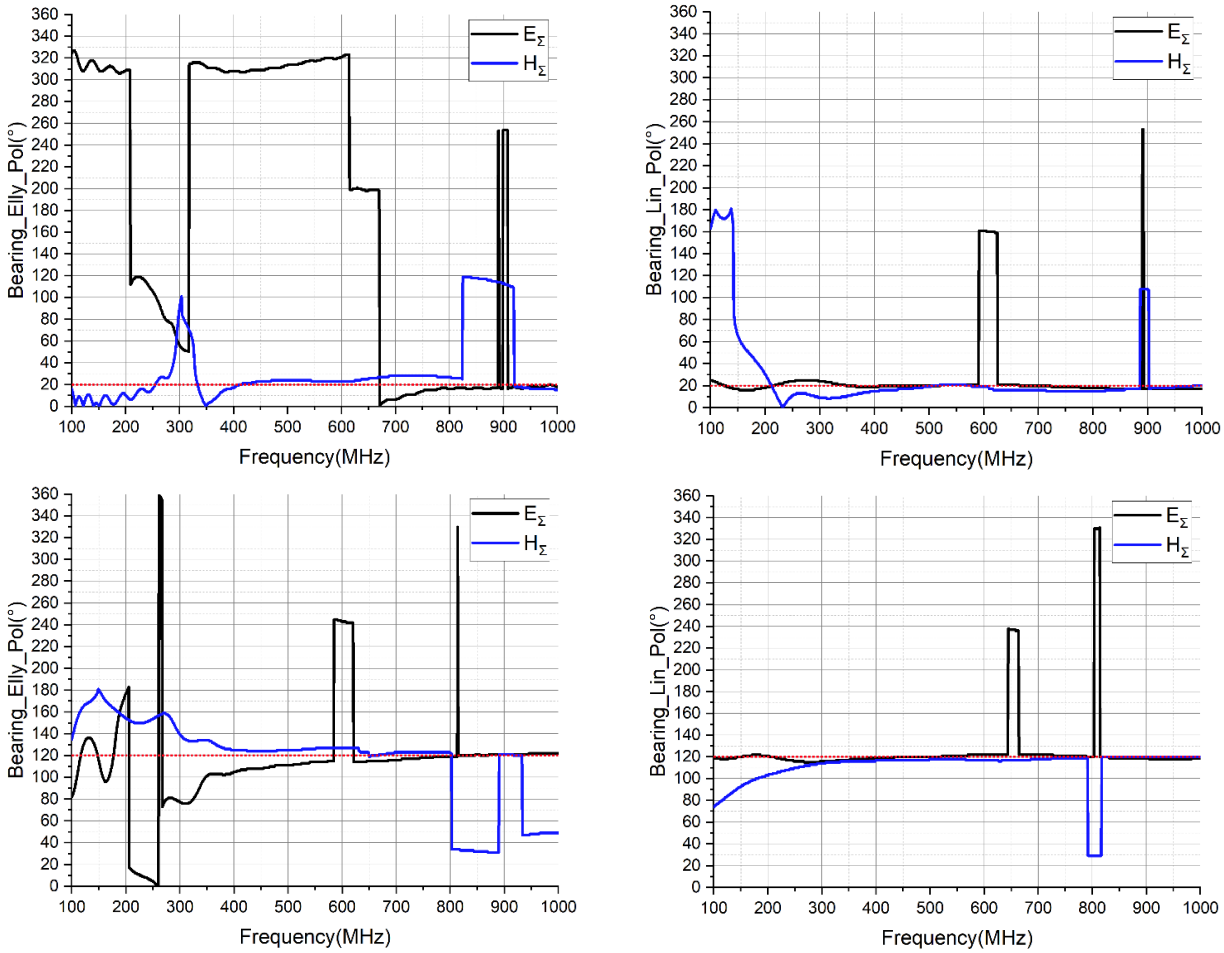


Рис. 5. Пеленгационные характеристики при эллиптической (слева) и линейной (справа) поляризации пеленгации разнополяризованных волн: истинный пеленг 20 ° (вверху) и 120 ° (внизу)

Fig. 5. Direction-Finding Characteristics for Elliptical (Left) and Linear (Right) Polarization of Direction-Finding of Differently Polarized Waves: True Bearing 20 ° (Top) and 120 ° (Bottom)

Полученные результаты показывают, что предлагаемый метод ВМД обеспечивает высокую точность пеленгации как при линейно, так и при эллиптически поляризованных волнах. Базовый алгоритм пеленгации на основе электрического поля и всех трех парциальных компонент обеспечивает допустимую точность только при облучении линейно (горизонтально) поляризованными волнами; вместе с тем при воздействии эллиптически поляризованных волн возникает грубая ошибка, которая не случается при применении пеленгации на основе ВМД. Для дальнейшей оценки эффективности предлагаемого метода рассмотрим его предельные разрешающие способности при воздействии эллиптически поляризованной волны и при углах пеленга от 0 °до 5 °.

Определение предельных разрешающих способностей при использовании предложенного метода

Как показали исследования, использование ВМД обеспечивает высокую точность пеленгации, особенно в случае пеленгации эллиптически поляризованных волн. Для того, чтобы определить предельную чувствительность пеленгационного комплекса, на него подавались волны с углами падения от 0 °до 5 ° с шагом в 1 °, при этом волна имела эллиптическую поляризацию с осевым отношением 10 к 1. На основе этого выполнялся расчет пеленгов волны с применением суммарных компонент и отдельной *z*-компоненты, так как у эллиптически поляризованной воны она присутствует. На рисунке 6 приводится вид картин пеленгов при пеленгации с использованием *E*- и *H*-компонент поля, а в таблице 2 приводится вид статистических показателей пеленгации при использовании ВМД, так как *E*-компонентное пеленгование дает грубые промахи. Пеленг рассчитывался в наиболее стабильном диапазоне частот от 400 до 800 МГц. Полученные результаты показывают, что применение предложенного пеленгатора позволяет различать даже малые изменения угла падения волн, однако стоит учитывать ошибку, которая сохраняется ввиду неполного исправления ошибок измерения, которые вызваны искажением характеристик поля.

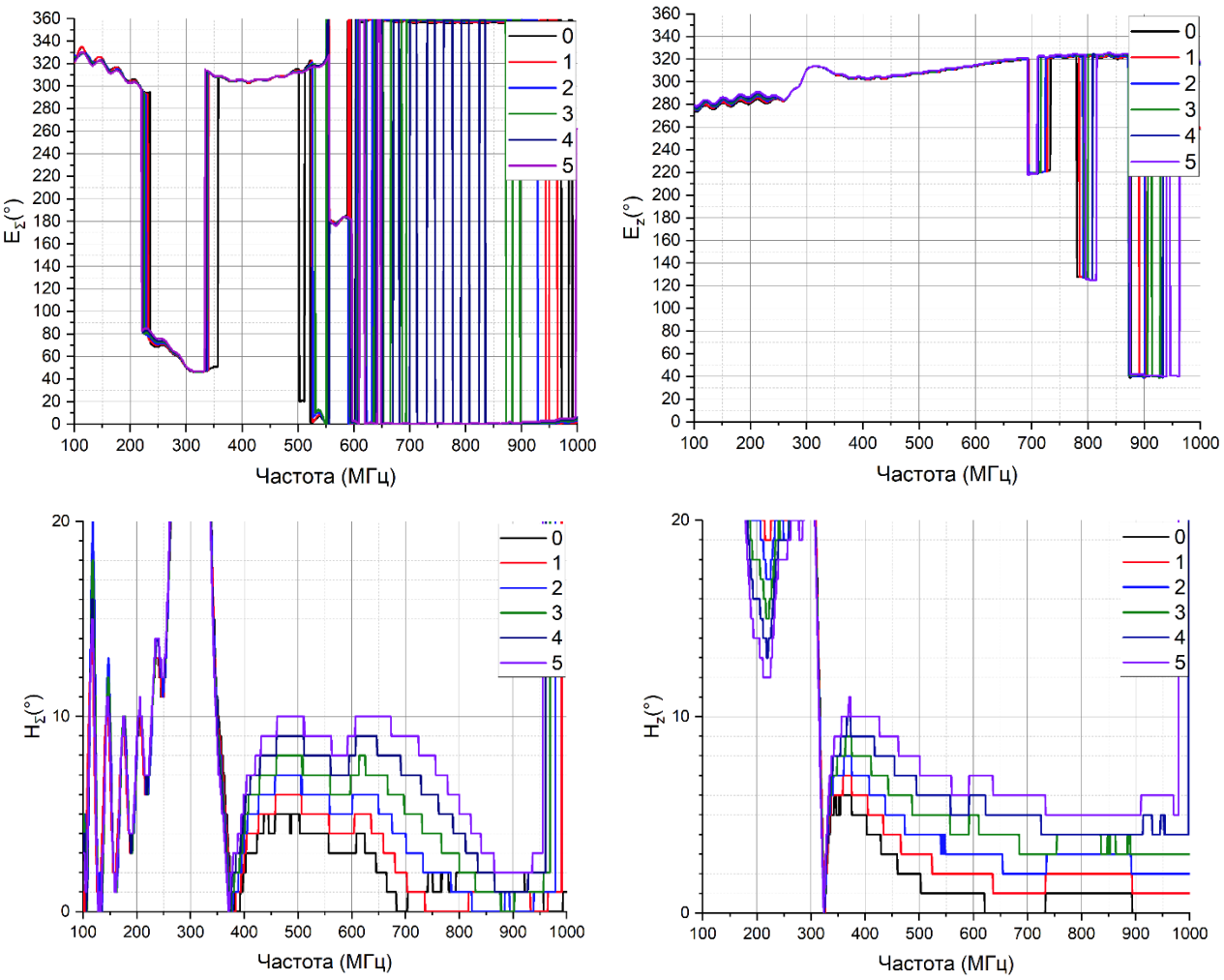


Рис. 6. Оценка предельного разрешения радиопеленгатора: пеленгация с использованием суммарного (слева) и *z*-компонент (справа) электрического (вверху) и магнитного (внизу) поля

Fig. 6. Estimating the Ultimate Resolution of a Direction Finder: Direction Finding Using the Sum (Left) and z-Components (Right) of the Electric (Top) and Magnetic (Bottom) Fields

ТАБЛИЦА 2. Статистические показатели предельного разрешения пеленгатора в диапазоне от 0 °до 5 °

TABLE 2. Statistical Indicators of the Maximum Resolution of the Direction Finder in the Range from 0 ° to 5 °

Истинный пеленг, °	H_Σ			Hz		
	m_1	σ	*err*	m_1	σ	*err*
0	1,38	1,59	1,60	0,31	0,56	0,31
1	1,61	1,53	1,19	1,31	0,56	0,31
2	2,46	1,79	1,46	1,40	0,49	0,40
3	5,23	2,54	2,23	3,49	0,70	0,49
4	6,98	3,17	2,98	4,63	0,78	0,63
5	8,72	3,85	3,72	5,69	0,83	0,69
Среднее	–	2,41	2,20	–	0,65	0,47

Также при пеленгации эллиптически поляризованных волн отчетливо заметно, что *z*-компоненты поля наименее искажены, что приводит к минимальной ошибке (среднеквадратическое отклонение менее 1 °). Таким образом, можно отметить высокую эффективность определения пеленга даже в случаях, когда требуется небольшая разрешающая способность радиопеленгационного комплекса. При этом можно отметить также тот момент, что применение пеленгации по *z*-компонентам поля расширяет рабочий диапазон частот до 950 МГц. Таким образом, отчетливо видно, что применение ВМД обеспечивает наибольшую эффективность пеленгации с использованием малого комплекса пеленгации, который установлен на БПЛА.

В рассмотренных случаях векторные антенные элементы помещались в свободном пространстве, но на практике такая реализация невозможна ввиду следующих причин:

– во-первых, не обеспечивается достаточная жесткость конструкции, что не позволит оптимально крепить антенные элементы;

– во-вторых, нарушается аэродинамический профиль БПЛА ввиду появления новых вихревых потоков, что уменьшит дальность полетов ввиду роста энергопотребления;

– в-третьих, не обеспечивается центровка векторных антенн, что может привести к возникновению дополнительных ошибок.

Для решения данной проблемы оптимально использовать обтекатель, в который помещается антенный элемент, однако изготовление обтекателя – достаточно трудоемкий процесс, так как требуется использование прозрачных материалов. В нашем случае для формирования неискаженного магнитного поля нас интересует магнитная проницаемость, которая в большинстве материалов равна одному. Рассмотрим случай, когда обтекатель будет выполнен из диэлектрически непрозрачного материала, что позволит повысить экономическую эффективность разработки корпуса устройства (например, путем применения аддитивных технологий).

Определение влияния корпуса обтекателя на точность пеленгации волн

В процессе исследования влияния обтекателя на характеристики радиопеленгационного комплекса рассматривались три случая: материал обтекателя радиопрозрачен ($\varepsilon_r = 1,\ \mu_r = 1$); материал близок к полистиролу или большинству 3D-печатных филаментов ($\varepsilon_r = 2, \mu_r = 1$); материал с высоким уровнем диэлектрической проницаемости ($\varepsilon_r = 5, \mu_r = 1$). Вид БПЛА с пеленгационными антеннами, помещенными в обтекатель, приводится на рисунке 7.

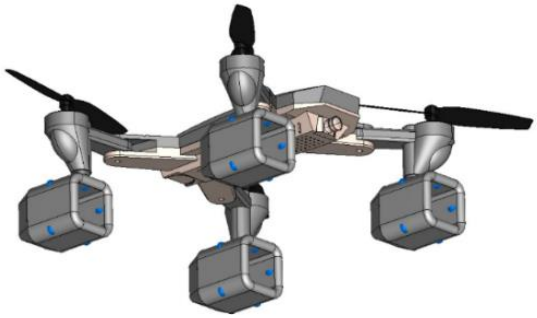


Рис. 7. Модель БПЛА с антеннами пеленгационного комплекса, помещенными в обтекатель

Fig. 7. Model of a UAV with Direction-Finding Antennas Placed in the Radome

Как видно по конструкции обтекателя, он представляет из себя аэродинамически профилированный корпус, который нацелен на стабилизацию воздушных потоков в нижней полусфере БПЛА. В процессе моделирования на БПЛА падала эллиптически поляризованная электромагнитная волна с осевым отношением 10 к 1. На рисунке 8 приводится вид пеленгационной характеристики для угла падения 60 , а в таблице 3 – статистические показатели пеленгации при углах падения от 0 ° до 180 ° с шагом в 20 °.

Статистические показатели приводятся для суммарных компонент поля, так как пеленгация по ним возможная вне зависимости от типов падающих волн. Полученные результаты показывают, что применение диэлектрически непрозрачных обтекателей не приводит к росту ошибки пеленга, которая при использовании ВМД практически не изменяется.

ТАБЛИЦА 3. Статистические показатели пеленгации при использовании диэлектрически непрозрачного обтекателя

TABLE 3. Statistical Indicators of Direction Finding When Using a Dielectrically Opaque Radome

Пеленг, °	$\varepsilon_r = 1$				$\varepsilon_r = 2$				$\varepsilon_r = 5$			
	m_1		σ		m_1		σ		m_1		σ	
	E_Σ	H_Σ	E_Σ	H_Σ	E_Σ	H_Σ	E_Σ	H_Σ	E_Σ	H_Σ	E_Σ	H_Σ
0	333	1,4	345	1,6	307	4,4	307	4,4	312	4,3	312	4,3
20	274	24	267	4,2	59	27	91	7,4	313	24	292	4,6
40	266	41	236	2,7	326	40	286	1,0	327	40	287	0,9
60	53	59	52	4,6	83	56	74,5	4,5	20	56	41	4,7
80	110	77	87	5,4	71	74	9,2	7,2	100	88	45	9,6
100	102	105	36	6,3	102	102	39	3,5	105	101	44	3,2
120	129	123	45	2,9	110	124	10	4,4	101	125	11	5,1
140	131	141	11	3,6	126	141	15	2,4	126	143	14	3,1
160	101	161	84	7,3	209	157	76	9,9	141	163	22	3,1
180	191	177	49	6,5	176	179	35	3,6	170	178	38	2,2
среднее	–	–	121,2	4,51	–	–	94,3	4,83	–	–	110,6	4,08

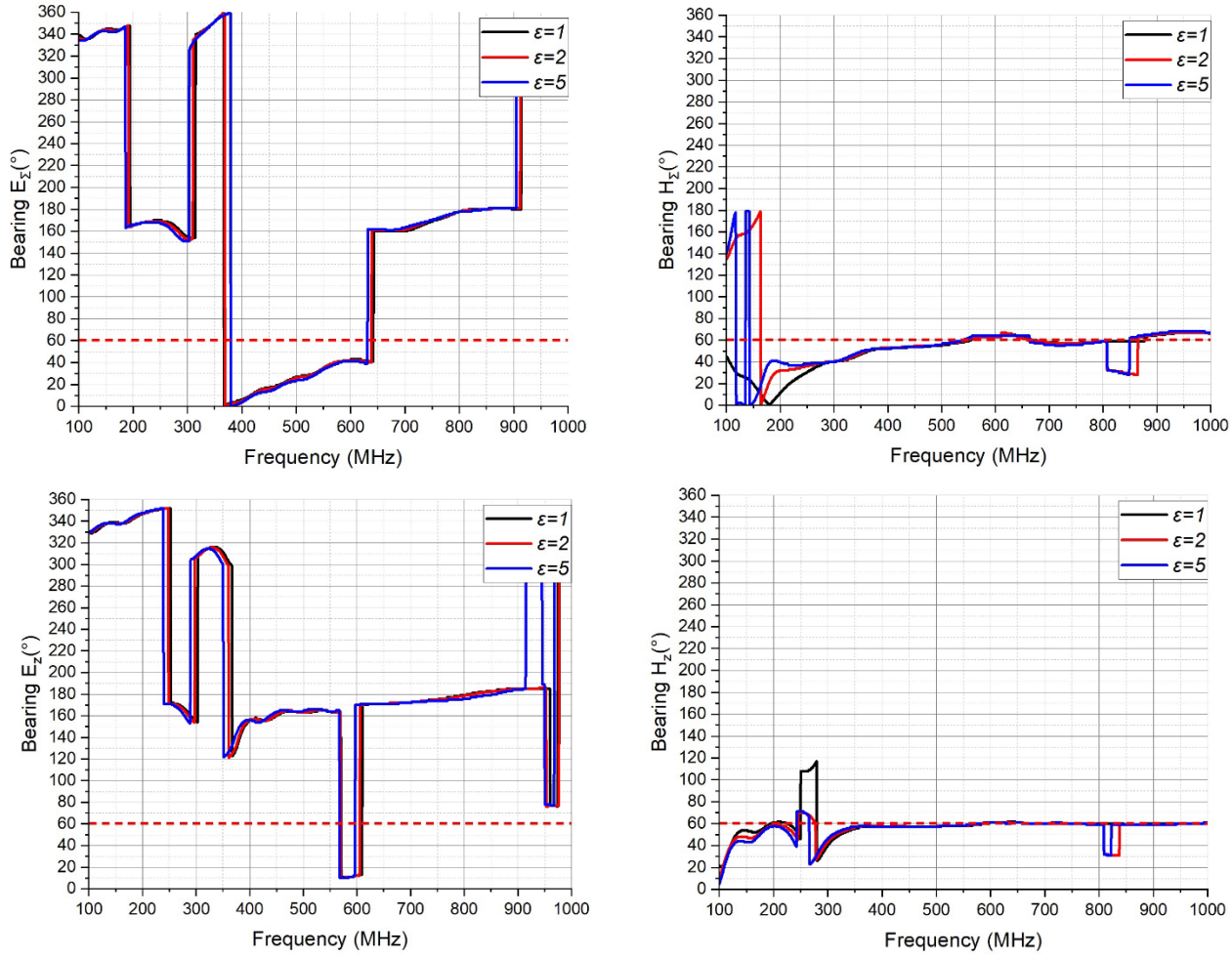


Рис. 8. Пеленгационные характеристики при установке векторных антенн в обтекатель: пеленгация на основе суммарного (вверху) электрического (слева) и z-компонент (внизу) магнитного (справа) поля

Fig. 8. Direction Finding Characteristics When Installing Vector Antennas in a Radome: Direction Finding Based on the Total (Top) Electric (Left) and z-Component (Bottom) Magnetic (Right) Field

Благодаря полученным результатам появляется возможность использовать аддитивные технологии для изготовления обтекателей, что значительно упрощает процесс производства и снижает стоимость радиопеленгационного комплекса. Таким образом, можно отметить, что применение предлагаемого алгоритма формирования ВМД обеспечивает высокую точность пеленгации при разных типах поляризации волн, обладает высокой разрешающей способностью и чувствительностью к углам падения электромагнитных волн, а также сохраняет стабильность характеристик при установке непрозрачного обтекателя на антенный элемент. Однако помимо влияния типов поляризации, корпуса-носителя и обтекателя, возможно возникновение шумового воздействия на измеряемые характеристики электромагнитных волн. Рассмотрим эффективность пеленгации в условиях шумового воздействия на пеленгационный комплекс.

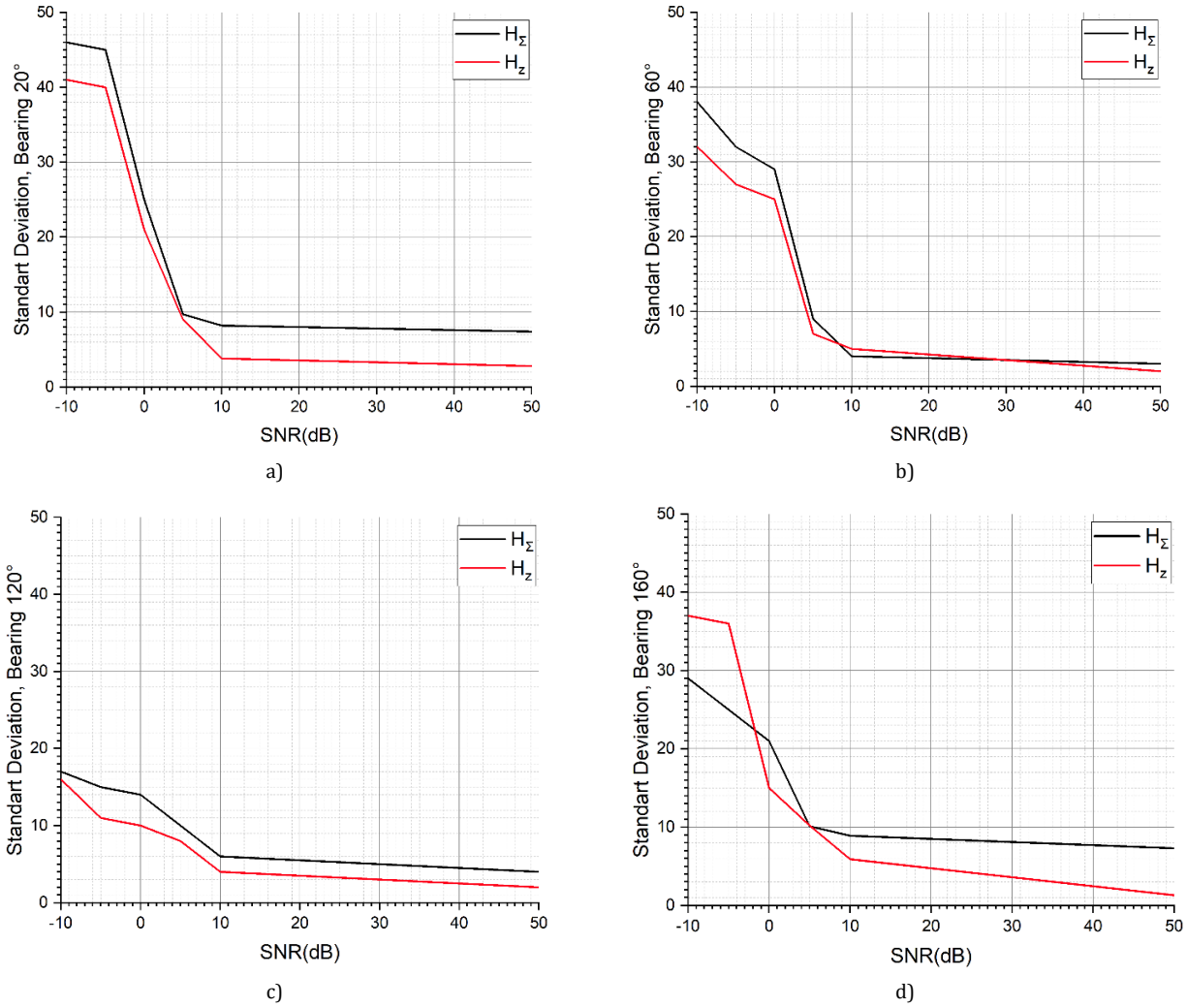
Оценка эффективности работы метода ВМД в условиях шумового воздействия

Как было описано выше, пеленгационные комплексы подвержены множеству влияний окружающих объектов. Однако полученные результаты моделирования показывают, что использование ВМД позволяет минимизировать искажения характеристик поля, что позволяет значительно повысить точность пеленгации. Рассмотрим случай, когда на комплекс пеленгации падает эллиптическая волна, которая возбуждает в нагрузках зашумленные напряжения. Для учета шумового влияния использовался комплексный аддитивный Гауссовский шум вида:

$$Noise = u_{ReGN} + i \cdot u_{ImGN} err = \frac{\sum_{n=1}^{N} |x_n - \text{tg}|}{N}. \quad (8)$$

В процессе исследования шумовой устойчивости радиопеленгатора производилось обучение БПЛА эллиптически поляризованной электромаг-

нитной волной, после чего рассчитывались пеленги сигналов при разных отношениях сигнал/шум (ОСШ) в диапазоне частот от 400 до 800 МГц. Для оценки устойчивости пеленга были построены зависимости среднеквадратического отклонения пеленга от ОСШ для пеленгации на основе ВМД (так как при пеленгации на основе электрического поля априори возникают грубые ошибки пеленга). На рисунке 9 приводятся зависимости среднеквадратического отклонения от уровня ОСШ для углов пеленгации в 20 °, 60 °, 120 °, 160 ° на основе суммарного магнитного поля и его *z*-компонент (так как волна эллиптически поляризована, то эти компоненты присутствуют).



a) b) c) d)

Рис. 9. Зависимость уровня среднеквадратического отклонения от уровня ОСШ при различных значениях пеленга: a) 20 °; b) 60 °; c) 120 °; d) 160 °

Fig. 9. Dependence of the Standard Deviation Level on the SNR Level: a) Bearing 20 °; b) Bearing 60 °; c) Bearing 120 °; d) Bearing 160 °

Полученные результаты показывают, что применение метода ВМД обеспечивает высокую эффективность пеленгации: до уровня ОСШ в 5 дБ. При таком ОСШ среднеквадратическое отклонение пеленга в диапазоне от 400 до 800 МГц приближается к 10 °, что уже можно считать порогом ошибки пеленгации, при этом все углы прихода волн сохраняют данный порог, что свидетельствует о стабильности работы предложенного метода; при этом пеленгация по *z*-компоненте поля обеспечивает меньшую ошибку определения пеленга благодаря большей помехозащищенности вертикальной компоненты магнитного поля.

Заключение

В работе была предложена методика повышения точности радиопеленгации за счет использования ВМД. Пеленгационный комплекс был установлен на малом высокомобильном БПЛА, что позволяет расширить скорость и область применения комплекса пеленгации. Были исследованы все основные характеристики предлагаемого комплекса радиопеленгации. Так, было получено, что предлагаемая методика формирования ВМД обеспечивает высокую точность пеленгации волн с разной поляризацией, обеспечивает высокую точность и чувствительность при малых изменениях угла, сохра-

няет высокую точность при размещении антенных элементов внутри обтекателя, а также в условиях шумового воздействия. Было показано, что корпус БПЛА является рассеивателем электрического типа в ближней зоне, что вызывает большие искажения характеристик электрического поля, однако измерение электрического поля намного проще, поэтому был предложен метод преобразования характеристик измеренного электрического поля в магнитное путем формирования ВМД.

Список источников

1. Sun B., Tan B., Ashraf M., Valkama M., Lohan E.S. Embedding the Localization and Imaging Functions in Mobile Systems: An Airport Surveillance Use Case // IEEE Open Journal of the Communications Society. 2022. Vol. 3. PP. 1656–1671. DOI:10.1109/OJCOMS.2022.3208945

2. Tarkowski M., Kulas L. RSS-Based DoA Estimation for ESPAR Antennas Using Support Vector Machine // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2019. Vol. 18. Iss. 4. PP. 561–565. DOI:10.1109/LAWP.2019.2891021

3. Musicant A., Almog B., Oxenfeld N., Shavit R. Vector Sensor Antenna Design for VHF Band // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2015. Vol. 14. PP. 1404–1407. DOI:10.1109/LAWP.2015.2409315

4. Duplouy J., Morlaas C., Aubert H., Potier P., Pouliguen P., Djoma C. Reconfigurable Grounded Vector Antenna for 3-D Electromagnetic Direction-Finding Applications // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2018. Vol. 17. Iss. 2. PP. 197–200. DOI:10.1109/LAWP.2017.2779878

5. Dawood H.S., El-Khobby H.A., Elnaby M.M.A., Hussein A.H. Optimized VAA Based Synthesis of Elliptical Cylindrical Antenna Array for SLL Reduction and Beam Thinning Using Minimum Number of Elements // IEEE Access. 2021. Vol. 9. PP. 50949–50960. DOI:10.1109/ACCESS.2021.3069795

6. Yahia A.A., Elkamchouchi H.M. Design of Virtual Antenna Array for Direction of Arrival Estimation Using Real Antenna Array System // Proceedings of the 34th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC, JeJu, South Korea, 23–26 June 2019). IEEE, 2019. DOI:10.1109/ITC-CSCC.2019.8793364

7. Zuo M., Xie S., Li Y., Zhang C. Joint Estimation Method for Frequency and DOA of Virtual Antenna Array in Space-Time Domain // Proceedings of the International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium – China (ACES, Nanjing, China, 08–11 August 2019). IEEE, 2019. DOI:10.23919/ACES48530.2019.9060452

8. Fayad Y., Wang C., Cao Q., Hafez A.E.-D. Improved ESPRIT algorithm used in spatial subspace for NULA // Proceedings of the 13th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST, Islamabad, Pakistan, 12–16 January 2016). IEEE, 2016. PP. 620–623. DOI:10.1109/IBCAST.2016.7429943

9. Ateşavcı C.S., Bahadırlar Y., Aldırmaz-Çolak S. DoA Estimation in the Presence of Mutual Coupling Using Root-MUSIC Algorithm // Proceedings of the 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE, Antalya, Turkey, 09–11 April 2021). IEEE, 2021. PP. 292–298. DOI:10.1109/ICEEE52452.2021.9415938

10. Lim J.-s., Song J., Sung K.-M. Forward-backward time varying forgetting factor Kalman filter based DOA estimation algorithm for UAV (Unmanned Aerial Vehicle) autolanding // Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. IEEE, 2002. PP. IV-3964–IV-3967. DOI:10.1109/ICASSP.2002.5745525

11. Keskin F., Filik T. Isotropic and Directional DOA Estimation of the Target by UAV Swarm-based 3-D Antenna Array // Proceedings of the 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT, Istanbul, Turkey, 22–24 October 2020). IEEE, 2020. DOI:10.1109/ISMSIT50672.2020.9254341

12.Cheng J., Guan K., Qutin F. A High-Accuracy DOA-Based Localization Method: UAV Virtual Multiantenna Array // Proceedings of the Seventeenth International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC 2021). 2021. PP. 10–15.

13. Abeywickrama S., Jayasinghe L., Fu H., Nissanka S., Yuen C. RF-based Direction Finding of UAVs Using DNN // Proceedings of the IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS, Chengdu, China, 19–21 December 2018). IEEE, 2018. PP. 157–161. DOI:10.1109/ICCS.2018.8689177

14. Павлов И.Д. Исследование влияния антенных элементов миллиметрового диапазона на ошибки пеленгации фазовым методом // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26. № 2. С. 25–36. DOI:10.32603/1993-8985-2023-26-2-25-36. EDN:FRDWEB

15. Ashikhmin A.V., Ishchenko E.A., Pasternak Y.G., Pershin P.V., Sivash M.A., Fedorov S.M. Design of Virtual Magnetic Dipole Antenna Array to Reduce the Systematic Bearing Error Caused by Wave Diffraction on the Antenna System and its Carrier Body // Proceedings of the 7th All-Russian Microwave Conference (RMC, Moscow, Russia, 25–27 November 2020). IEEE, 2020. PP. 111–114. DOI:10.1109/RMC50626.2020.9312312

References

1. Sun B., Tan B., Ashraf M., Valkama M., Lohan E.S. Embedding the Localization and Imaging Functions in Mobile Systems: An Airport Surveillance Use Case. *IEEE Open Journal of the Communications Society*. 2022;3:1656–1671. DOI:10.1109/OJCOMS.2022.3208945

2. Tarkowski M., Kulas L. RSS-Based DoA Estimation for ESPAR Antennas Using Support Vector Machine. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2019;18(4):561–565. DOI:10.1109/LAWP.2019.2891021

3. Musicant A., Almog B., Oxenfeld N., Shavit R. Vector Sensor Antenna Design for VHF Band. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2015;14:1404–1407. DOI:10.1109/LAWP.2015.2409315

4. Duplouy J., Morlaas C., Aubert H., Potier P., Pouliguen P., Djoma C. Reconfigurable Grounded Vector Antenna for 3-D Electromagnetic Direction-Finding Applications // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2018;17(2):197–200. DOI:10.1109/LAWP.2017.2779878

5. Dawood H.S., El-Khobby H.A., Elnaby M.M.A., Hussein A.H. Optimized VAA Based Synthesis of Elliptical Cylindrical Antenna Array for SLL Reduction and Beam Thinning Using Minimum Number of Elements. *IEEE Access*. 2021;9: 50949–50960. DOI:10.1109/ACCESS.2021.3069795

6. Yahia A.A., Elkamchouchi H.M. Design of Virtual Antenna Array for Direction of Arrival Estimation Using Real Antenna Array System. *Proceedings of the 34th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications, ITC-CSCC, 23–26 June 2019, JeJu, South Korea*. IEEE; 2019. DOI:10.1109/ITC-CSCC.2019.8793364

7. Zuo M., Xie S., Li Y., Zhang C. Joint Estimation Method for Frequency and DOA of Virtual Antenna Array in Space-Time Domain. *Proceedings of the International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium – China (ACES), 08–11 August 2019, Nanjing, China*. IEEE; 2019. DOI:10.23919/ACES48530.2019.9060452

8. Fayad Y., Wang C., Cao Q., Hafez A.E.-D. Improved ESPRIT algorithm used in spatial subspace for NULA. *Proceedings of the 13th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology, IBCAST, 12–16 January 2016, Islamabad, Pakistan*. IEEE; 2016. p.620–623. DOI:10.1109/IBCAST.2016.7429943

9. Ateşavcı C.S., Bahadırlar Y., Aldırmaz-Çolak S. DoA Estimation in the Presence of Mutual Coupling Using Root-MUSIC Algorithm. *Proceedings of the 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ICEEE, 09–11 April 2021, Antalya, Turkey*. IEEE; 2021. p.292–298. DOI:10.1109/ICEEE52452.2021.9415938

10. Lim J.-s., Song J., Sung K.-M. Forward-backward time varying forgetting factor Kalman filter based DOA estimation algorithm for UAV (Unmanned Aerial Vehicle) autolanding. *Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. IEEE; 2002. PP. IV-3964–IV-3967. DOI:10.1109/ICASSP.2002.5745525

11. Keskin F., Filik T. Isotropic and Directional DOA Estimation of the Target by UAV Swarm-based 3-D Antenna Array. *Proceedings of the 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, ISMSIT, 22–24 October 2020, 22–24 October 2020, Istanbul, Turkey*. IEEE; 2020. DOI:10.1109/ISMSIT50672.2020.9254341

12. Cheng J., Guan K., Qutin F. A High-Accuracy DOA-Based Localization Method: UAV Virtual Multiantenna Array. *Proceedings of the Seventeenth International Conference on Wireless and Mobile Communications, ICWMC 2021*. 2021. p.10–15.

13. Abeywickrama S., Jayasinghe L., Fu H., Nissanka S., Yuen C. RF-based Direction Finding of UAVs Using DNN. *Proceedings of the IEEE International Conference on Communication Systems, ICCS, 19–21 December 2018, Chengdu, China*. IEEE; 2018. p.157–161. DOI:10.1109/ICCS.2018.8689177

14. Pavlov I.D. Research into the Influence of Millimeter-Wave Antennas on Direction Finding Errors by Phase Method. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2023;26(2):25–36. (In Russ.) DOI:10.32603/1993-8985-2023-26-2-25-36. EDN:FRDWEB

15. Ashikhmin A.V., Ishchenko E.A., Pasternak Y.G., Pershin P.V., Sivash M.A., Fedorov S.M. Design of Virtual Magnetic Dipole Antenna Array to Reduce the Systematic Bearing Error Caused by Wave Diffraction on the Antenna System and its Carrier Body. *Proceedings of the 7th All-Russian Microwave Conference, RMC, 25–27 November 2020, Moscow, Russia.* IEEE; 2020. p.111–114. DOI:10.1109/RMC50626.2020.9312312

Статья поступила в редакцию 25.05.2024; одобрена после рецензирования 10.06.2024; принята к публикации 13.06.2024.
The article was submitted 25.05.2024; approved after reviewing 10.06.2024; accepted for publication 13.06.2024.

Информация об авторах:

Ищенко Евгений Алексеевич
аспирант кафедры радиоэлектронных устройств и систем Воронежского государственного технического университета
https://orcid.org/0000-0002-5270-0792

ПАСТЕРНАК Юрий Геннадьевич
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиоэлектронных устройств и систем Воронежского государственного технического университета
https://orcid.org/0000-0002-2031-5531

ФЁДОРОВ Сергей Михайлович
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем Воронежского государственного технического университета
https://orcid.org/0000-0001-9027-6163

БАРАННИКОВ Илья Андреевич
аспирант кафедры радиоэлектронных устройств и систем Воронежского государственного технического университета
https://orcid.org/0000-0003-3093-0455

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.
The authors declare no conflicts of interests.