

Научная статья

УДК 621.396

DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-4-39-47



Применение виртуальных магнитных диполей в антенной решетке для повышения точности пеленгации

Евгений Алексеевич Ищенко¹ ✉, kursk1998@yandex.ru

Юрий Геннадьевич Пастернак¹, pasternakyg@mail.ru

Владимир Андреевич Пендюрин², infonpp-acc.ru@yandex.ru

Сергей Михайлович Фёдоров¹, fedorov_sm@mail.ru

¹Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, 394006, Российская Федерация

²АО НПП «Автоматизированные системы связи»,
Воронеж, 394062, Российская Федерация

Аннотация: В статье рассматривается способ формирования виртуальной антенной решетки на основе магнитных диполей. Для проверки его эффективности проводилось моделирование БПЛА с пеленгационным комплексом из четырех векторных антенных элементов. Рассматриваются два способа пеленгации – на основе электрического и магнитного поля. В результате проведенного исследования было обнаружено, что использование магнитных диполей позволяет значительно повысить стабильность и точность пеленга как для электромагнитных волн с линейной поляризацией, так и с эллиптической. Приводятся основные математические выражения, используемые для определения характеристик пеленгации, а также зависимости пеленгов в исследуемом диапазоне частот.

Ключевые слова: виртуальная антенная решетка, пеленгация, магнитные диполи, БПЛА

Источник финансирования: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-79-10109, <https://rscf.ru/project/19-79-10109>.

Ссылка для цитирования: Ищенко Е.А., Пастернак Ю.Г., Пендюрин В.А., Фёдоров С.М. Применение виртуальных магнитных диполей в антенной решетке для повышения точности пеленгации // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 4. С. 39–47. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-4-39-47

Application of a Virtual Magnetic Dipoles in Antenna Array to Increase the Direction Finding Accuracy

Evgeny Ishchenko¹ ✉, kursk1998@yandex.ru

Yuri Pasternak¹, pasternakyg@mail.ru

Vladimir Pendyurin², infonpp-acc.ru@yandex.ru

Sergei Fedorov¹, fedorov_sm@mail.ru

¹Voronezh State Technical University,
Voronezh, 394006, Russian Federation

²Research and Development Enterprise “Automated Communication Systems”, JSC,
Voronezh, 394062, Russian Federation

Abstract: *The article discusses the method of forming a virtual antenna array based on magnetic dipoles. To test the effectiveness of the formation of a virtual antenna array, a simulation of an unmanned aerial vehicle with a direction-finding complex of four vector antenna elements was carried out. To perform direction finding, two methods are considered – based on the electric field and magnetic. On the basis of the study, it was found that the use of direction finding based on magnetic dipoles can significantly improve the stability and accuracy of the bearing for both linear and elliptical electromagnetic waves. The article presents the main mathematical expressions that are used to determine the characteristics of the direction finding, as well as the dependence of the bearings in the studied frequency range.*

Keywords: *virtual antenna array, direction finding, magnetic components of the electromagnetic field, unmanned aerial vehicle*

Funding: This research was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 19-79-10109, <https://rscf.ru/en/project/19-79-10109>.

For citation: Ishchenko E., Pasternak Yu., Pendyurin V., Fedorov S. Application of a Virtual Magnetic Dipoles in Antenna Array to Increase the Direction Finding Accuracy. *Proc. of Telecom. Universities*. 2022;8(4):39–47. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-4-39-47

Введение

Пеленгация электромагнитных волн востребована во многих задачах. Благодаря определению направления прихода электромагнитных волн становится возможным улучшение покрытия сети, обнаружение источника излучения и повышения качества связи. Для выполнения таких задач применяются радиопеленгационные комплексы, которые, как правило, помещаются на подвижных носителях. При выборе позиции для размещения комплекса важно обеспечить минимальное искажение волн, так как это внесет погрешность в измерение характеристик волн. Для решения этой задачи используется несколько способов: исследование диаграмм обратного рассеяния объекта (ДОР) и выбор наиболее «чистого» от искажений места; обработка сигналов с повышением отношения сигнал-шум (ОСШ), что повышает эффективность обработки и обнаружения; применение способов аппроксимации поля и технологии виртуальных антенных решеток (ВАР). Именно о последнем из перечисленных способов в данной работе пойдет речь.

Формирование ВАР основано на математическом аппарате, который используется для обработки измеренных характеристик электромагнитных волн комплексом пеленгации. В работе [1] приводится ряд алгоритмов, которые позволяют сформировать ВАР для разных реальных антенных решеток. В результате применения математических способов становится возможным обеспечить не только повышение точности обработки сигналов, улучшить характеристики диаграмм направленности, а также выбрать оптимальное расположение реальных антенных элементов.

Благодаря возможности выполнения аппроксимации и обработки электромагнитных волн технология ВАР может быть использована для формирования требуемой диаграммы направленности антенной решетки, при этом достигая минимального

числа антенных элементов в конструкции. Как показано в работе [2], применение технологии ВАР позволяет значительно снизить уровень боковых лепестков для цилиндрических антенных решеток, что значительно повышает точность обнаружения направления прихода волн, а также помехозащищенность канала. Для радаров технологию ВАР можно использовать для формирования узкого и направленного лепестка [3], при этом пик диаграммы направленности будет наблюдаться именно в направлении прихода волны. Для повышения точности результатов и эффективности обработки измерений используются способы ортогонального кодирования и цифровой обработки сигналов. Другим примером управления характеристиками диаграмм направленности является математическая обработка, которая приводится в работе [4]. В результате применения новых способов удалось повысить чувствительность ВАР к углу прихода волн, что является востребованной задачей в пеленгаторах.

Формирование ВАР возможно в любых диапазонах частот, что подтверждается работой [5]. За счет гибкости математических методов аппроксимация поля возможна не только на низких частотах, а также и в миллиметровом диапазоне волн, который востребован в сетях 5G. Полученные результаты показывают, что применение технологии ВАР возможно даже при использовании технологии ММО. Использование теории ВАР может повысить качество и эффективность технологии формирования луча для сетей пятого поколения и радаров диапазонов K и Ka .

Пеленгация с использованием ВАР является одним из основных способов, который повышает эффективность обнаружения электромагнитных волн, а также позволяет уменьшить число антенных элементов в комплексе пеленгации, как показано в работе [6]. Для формирования ВАР в данной работе

используется метод MUSIC, который является сейчас самым распространенным для этих целей.

Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) позволяет значительно повысить эффективность пеленгации [7]. Благодаря их малым размерам, высокой мобильности возможно выполнить быстрое исследование большого участка пространства. Поэтому размещение малого пеленгационного комплекса на БПЛА является важной и востребованной задачей, а применение способов повышения точности пеленгации гипотетически позволит также повысить эффективность применения таких систем.

На основе проведенного выше анализа можно заметить, что использование ВАР гипотетически позволяет повысить эффективность пеленгации, а размещение комплекса пеленгации на БПЛА – обеспечить мобильность и увеличить область применения.

Математические методы пеленгации и формирование магнитных диполей

В процессе решения задачи формирования ВАР на основе магнитных диполей использовались кубические антенные элементы, из которых возможно сформировать комплекс пеленгации. Вид антенного элемента приводится на рисунке 1.

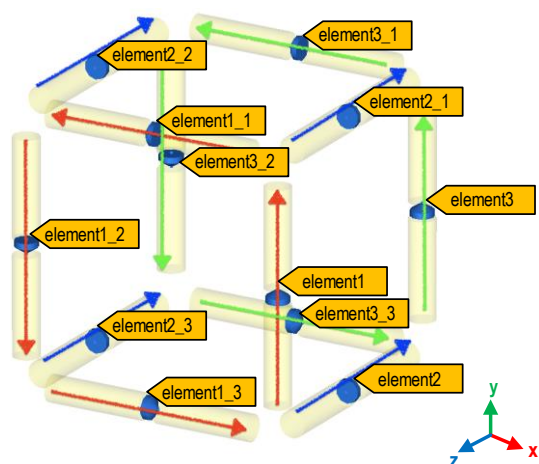


Рис. 1. Вид векторного антенного элемента (стрелки указывают направление тока)

Fig. 1. View of the Vector Antenna Element (Arrows Indicate Direction of Current)

Для формирования пеленгатора используется векторный антенный элемент из 12 симметричных диполей, которые располагаются в ребрах куба с гранями длиной 50 мм. В качестве нагрузок выступают эквивалентные схемы высокочастотных усилителей – последовательное соединение резистора с сопротивлением 50 Ом и конденсатором с емкостью 1,5 пФ.

Компоненты векторов напряженности магнитного поля, которые измерит антенна, связаны

напрямую со вторым уравнением Максвелла в интегральной форме:

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} d\vec{s}, \quad (1)$$

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

На основе этого уравнения можно получить значения магнитных компонент, которые можно применить для пеленгации. Ниже рассмотрим способы пеленгации, которые могут быть использованы для определения угла прихода электромагнитных волн.

При падении электромагнитной волны на антенный элемент в нагрузках будут возбуждаться напряжения, которые можно определить в комплексной форме:

$$\dot{u} = u_{Re} + ju_{Im}. \quad (2)$$

На основе измеренных напряжений для каждого антенного элемента можно сформировать электрическое поле, при этом важно сохранить направление обхода контура для нагрузок (их полярность).

Так, для антенного элемента (см. рисунок 1) компоненты электрического поля будут иметь вид:

$$E_x = \frac{\dot{u}_{13} - \dot{u}_{11} + \dot{u}_{33} - \dot{u}_{31}}{4}, \quad (3)$$

$$E_y = \frac{\dot{u}_1 - \dot{u}_{12} + \dot{u}_{13} - \dot{u}_{32}}{4}, \quad (4)$$

$$E_z = \frac{-\dot{u}_2 - \dot{u}_{21} - \dot{u}_{22} - \dot{u}_{23}}{4}, \quad (5)$$

где \dot{u}_{nm} – напряжения в нагрузках с соответствующими индексами n, m .

После этого компоненты электрического поля можно объединить в матрицы с присвоением им порядковых номеров, а также координат, то есть провести их параметризацию. Тогда суммарное поле для пеленгации по электрическим компонентам (проводилась по суммарному полю по всем трем компонентам, а также по z -компонентам поля) будет иметь вид (6, 7).

Далее на основе выражений (6, 7) и корреляционно-интерферометрического способа пеленгации определяется градусная мера угла прихода электромагнитной волны. Недостатком такой процедуры является то, что электрические компоненты поля являются более чувствительными к шумам и помехам, поэтому рассмотрим формирование ВАР на основе магнитных компонент поля (магнитных диполей).

$$D_{E_z} = \left| \sum_{n=1}^N E_{x_n} \cdot \exp(-jk_0(x_n \cos(\psi) + y_n \sin(\psi))) + \sum_{n=1}^N E_{y_n} \cdot \exp(-jk_0(x_n \cos(\psi) + y_n \sin(\psi))) + \sum_{n=1}^N E_{z_n} \cdot \exp(-jk_0(x_n \cos(\psi) + y_n \sin(\psi))) \right|, \quad (6)$$

$$D_{E_z} = \left| \sum_{n=1}^N E_{z_n} \cdot \exp(-jk_0(x_n \cos(\psi) + y_n \sin(\psi))) \right|, \quad (7)$$

где $E_{x_n}, E_{y_n}, E_{z_n}$ – матрицы на основе объединения E_x, E_y, E_z компонент, соответственно; k_0 – волновое число; x, y – координаты векторных антенных элементов в пеленгационном комплексе; ψ – угол сканирования и наблюдения; N – число антенных элементов в комплексе

Изначальными данными при начале пеленгации также являются напряжения, которые будут измерены в нагрузках, представленных формой (2). На их основе определяются компоненты магнитного поля по x, y, z , однако в таком случае они базируются на двух частичных компонентах:

$$H_{x1} = -\left(\frac{\dot{u}_3 - \dot{u}_{21} - \dot{u}_1 + \dot{u}_2}{j\omega\mu_0 a}\right), \quad (8)$$

$$H_{x2} = -\left(\frac{-\dot{u}_{32} - \dot{u}_{22} + \dot{u}_{12} + \dot{u}_{23}}{j\omega\mu_0 a}\right), \quad (9)$$

$$H_{y1} = -\left(\frac{\dot{u}_{31} - \dot{u}_{22} - \dot{u}_{11} + \dot{u}_{21}}{j\omega\mu_0 a}\right), \quad (10)$$

$$H_{y2} = -\left(\frac{\dot{u}_{13} + \dot{u}_2 - \dot{u}_{33} - \dot{u}_{23}}{j\omega\mu_0 a}\right), \quad (11)$$

$$H_{z1} = -\left(\frac{\dot{u}_1 + \dot{u}_{11} + \dot{u}_{12} + \dot{u}_{13}}{j\omega\mu_0 a}\right), \quad (12)$$

$$H_{z2} = -\left(\frac{\dot{u}_3 + \dot{u}_{31} + \dot{u}_{32} + \dot{u}_{33}}{j\omega\mu_0 a}\right), \quad (13)$$

где a – длина плеча векторной антенны (50 мм); μ_0 – магнитная постоянная свободного пространства; тогда с учетом частичных компонент полные будут определяться в соответствии с:

$$H_x = \frac{H_{x1} + H_{x2}}{2}, \quad (14)$$

$$H_y = \frac{H_{y1} + H_{y2}}{2}, \quad (15)$$

$$H_z = \frac{H_{z1} + H_{z2}}{2}. \quad (16)$$

Затем формируется суммарное поле, на основе которого будет проводиться пеленгация, где будет использоваться корреляционно-интерферометрический способ пеленгации для суммарного поля и его z -компонент (17, 18). Теперь на основе описанных способов рассмотрим ситуацию, когда пеленгационный комплекс устанавливается на БПЛА для определения направления прихода электромагнитных волн.

$$D_{H_z} = \left| \sum_{n=1}^N H_{x_n} \cdot \exp(-jk_0(x_n \cos(\psi) + y_n \sin(\psi))) + \sum_{n=1}^N H_{y_n} \cdot \exp(-jk_0(x_n \cos(\psi) + y_n \sin(\psi))) + \sum_{n=1}^N H_{z_n} \cdot \exp(-jk_0(x_n \cos(\psi) + y_n \sin(\psi))) \right|, \quad (17)$$

$$D_{H_z} = \left| \sum_{n=1}^N H_{z_n} \cdot \exp(-jk_0(x_n \cos(\psi) + y_n \sin(\psi))) \right|. \quad (18)$$

Исследуемая модель. Проверка работы метода пеленгации для плоской волны

При исследовании эффективности работы предложенного способа был сформирован пеленгатор из 4-х векторных антенных элементов, которые располагались в нижней части малого БПЛА, как

показано на рисунке 2, где: а) изометрический вид с установленными в нижней части векторными антенными элементами (указана длина корпуса); б) вид сбоку с указанием расстояния между крайними элементами комплекса пеленгации; с) вид спереди с указанием размеров комплекса пеленгации.

Для того, чтобы учесть влияние корпуса и отследить, как он искажает электромагнитное поле, была построена ДОР, а также найдена эффективная площадь рассеяния, при этом в ходе моделирования у БПЛА были указаны материалы: верхняя крышка, ножки, векторные антенные элементы – алюминий; остальные компоненты – пластик.

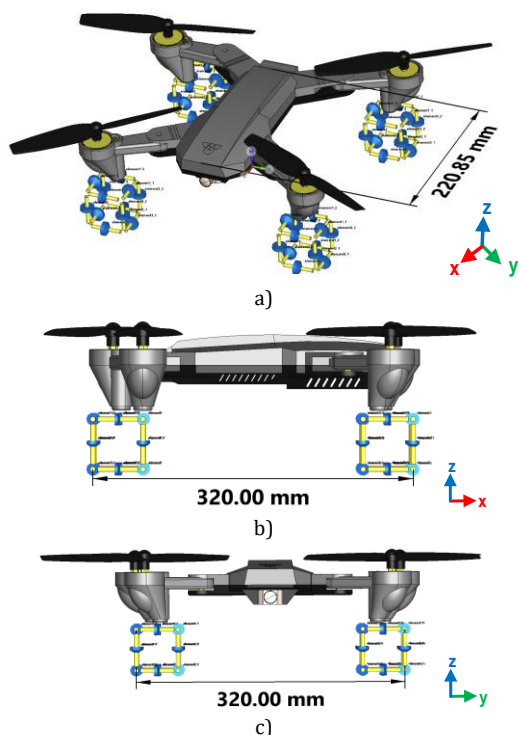


Рис. 2. Исследуемый БПЛА с четырьмя векторными антенными элементами,

Fig. 2. The Investigated UAV with Four Vector Antenna Elements

На рисунке 3 приводится картина ДОР на частоте 500 МГц (так как в процессе пеленгации исследуется диапазон от 300 до 700 МГц). Как видно, картина обратного рассеяния изрезана и соответственно изменяет характеристики электромагнитного поля, так как возникают отражения.

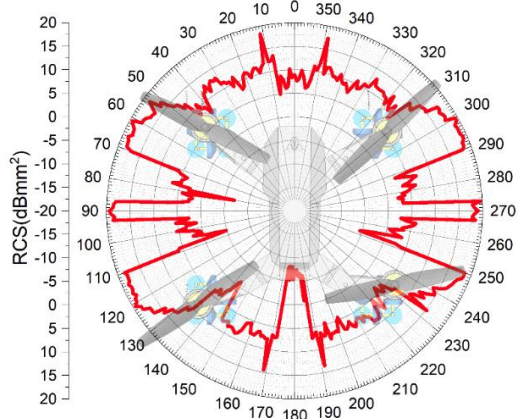
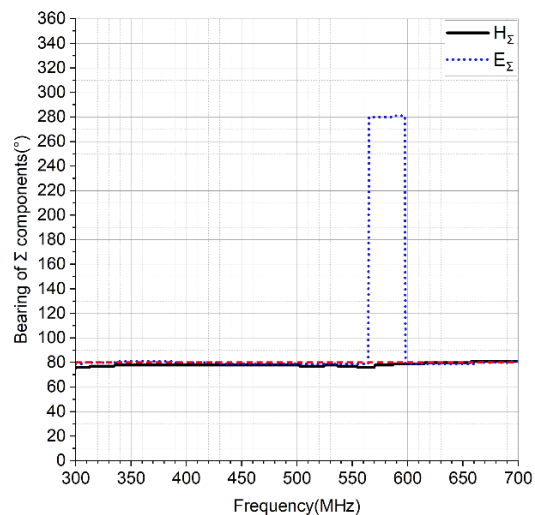


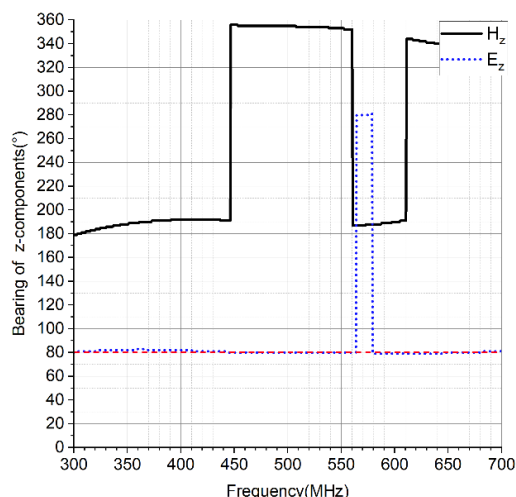
Рис. 3. Картина эффективной площади рассеяния БПЛА с векторными антенными элементами

Fig. 3. Pattern of the Radar Cross-Section of a UAV with Vector Antenna Elements

Для анализа возможности использования предложенного способа пеленгации БПЛА с векторными антенными элементами был облучен плоской электромагнитной волной с линейной поляризацией с углом прихода волны в 80° (азимут). Полученные картины пеленгов приводятся на рисунке 4.



a)



b)

Рис. 4. Пеленгация с использованием рассмотренного способа: а) определение направления прихода волны по суммарным компонентам поля; б) использование z-компонент поля

Fig. 4. Direction Finding Using Careful Analysis: a) Determining the Direction of Wave Arrival from the Cumulative Field Component; b) Using the z-Components of the Field

Так как исследование происходит в широком диапазоне частот, то для оценки точности выполнения пеленгации удобно использовать статистические показатели:

1) математическое ожидание пеленга:

$$m_1 = \frac{\sum_{n=1}^N x_n}{N}; \quad (19)$$

2) среднее квадратическое отклонение пеленга:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x_n - tg)^2}{N}}; \quad (20)$$

3) ошибка пеленга:

$$er = \frac{\sum_{n=1}^N |x_n - tg|}{N}; \quad (21)$$

где x_n – мгновенные значения случайной величины (в нашем случае значение пеленга на частоте); N – число точек, в которых производится измерение пеленга; tg – истинное значение пеленга.

В данном случае, который приводится на рисунке 4, статистические показатели приводятся в таблице 1 (истинный угол волны 80°).

ТАБЛИЦА 1. Статистические показатели пеленгации при приходе плоской волны с горизонтальной поляризацией

TABLE 1. Statistical Indicators of Direction Finding at the Arrival of a Plane Wave with Horizontal Polarization

| Параметр | H_Σ | E_Σ | H_z | E_z |
|----------|------------|------------|---------|--------|
| m_1 | 78,567 | 101,359 | 296,743 | 89,994 |
| σ | 2,005 | 66,374 | 229,017 | 44,701 |
| er | 1,721 | 22,677 | 216,743 | 10,453 |

Полученные статистические данные показывают, что в диапазоне частот от 300 до 700 МГц наблюдается стабилизация результатов, а наиболее точное значение пеленга – при использовании суммарного поля магнитной компоненты. Таким образом видно, что магнитное поле является наименее подверженным к искажениям, которые возникают при измерении. Аналогичная ситуация сохраняется и при изменении угла элевации. Но зачастую пеленгационный комплекс облучается электромагнитной волной с эллиптической поляризацией, поэтому следует провести такое исследование для нее, чтобы оценить эффективность способа формирования ВАР.

Оценка точности метода формирования ВАР при падении эллиптической волны

Рассмотрим более сложную задачу, которая заключается в том, что пеленгатор облучается плоской волной с эллиптической поляризацией. Последняя возникает, когда значения компонент поля не совпадают, а разность фаз между составляющими кратна $\pi/2$ или вне зависимости от величины компонент поля разность фаз не кратна $\pi/2$.

Выражения, которые определяют такое поле, имеют вид:

$$|\mathcal{E}_x| \neq |\mathcal{E}_y| \Rightarrow E_{x0} \neq E_{y0}, \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= \varphi_y - \varphi_x = \\ &= \begin{cases} +\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi, n = 0, 1, 2, 3, \dots RH \\ -\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi, n = 0, 1, 2, 3, \dots LH \end{cases} \end{aligned} \quad (23)$$

или

$$\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x \neq \pm \frac{n}{2}\pi = \begin{cases} > 0, RH \\ < 0, LH \end{cases}. \quad (24)$$

Так как вектор напряженности поля изобразит в пространстве эллипс, то у такой поляризации будет осевое отношение (AR):

$$AR = \frac{\text{большая ось}}{\text{малая ось}} = \frac{OA}{OB}, \quad 1 \leq AR < \infty, \quad (25)$$

где OA и OB определяются по выражениям (26 и 27).

При исследовании осевое отношение было выбрано 10 к 1, разность фаз между компонентами 90° . Моделирование выполнялось в диапазоне от 300 до 700 МГц для азимутальных углов от 0° до 180° с шагом в 20° . На рисунке 5 приводятся картины пеленгов для эллиптической поляризации.

Полученные графики показывают, что применение предложенного способа позволяет сохранить высокую точность обнаружения при формировании ВАР, однако чуть уменьшается диапазон частот, в котором возможна точная пеленгация – от 400 до 700 МГц. Также можно отметить, что при облучении эллиптической волной высокой точностью обладает пеленгация на основе H_z -компоненты поля, что, однако, дает промахи при облучении плоской волной. В таблице 2 приводятся статистические показатели при использовании магнитных диполей при пеленгации электромагнитной волны с эллиптической поляризацией. Значения выделены цветом в соответствии с величиной СКО (см. примечание к таблице 2).

Таким образом, по статистическим показателям отчетливо видно, что использование виртуальных магнитных диполей позволяет значительно повысить точность по сравнению с классической пеленгацией на основе электрических компонент поля. При выполнении пеленгации эллиптической волны отчетливо видно, что наибольшую точность обеспечивает пеленгация по z -компоненте магнитного поля.

$$OA = \left[\frac{1}{2} \left\{ E_{x0}^2 + E_{y0}^2 + [E_{x0}^4 + E_{y0}^4 + 2E_{x0}^2 E_{y0}^2 \cos(2\Delta\varphi)]^{1/2} \right\} \right]^{1/2}, \quad (26)$$

$$OB = \left[\frac{1}{2} \left\{ E_{x0}^2 + E_{y0}^2 - [E_{x0}^4 + E_{y0}^4 + 2E_{x0}^2 E_{y0}^2 \cos(2\Delta\varphi)]^{1/2} \right\} \right]^{1/2}. \quad (27)$$

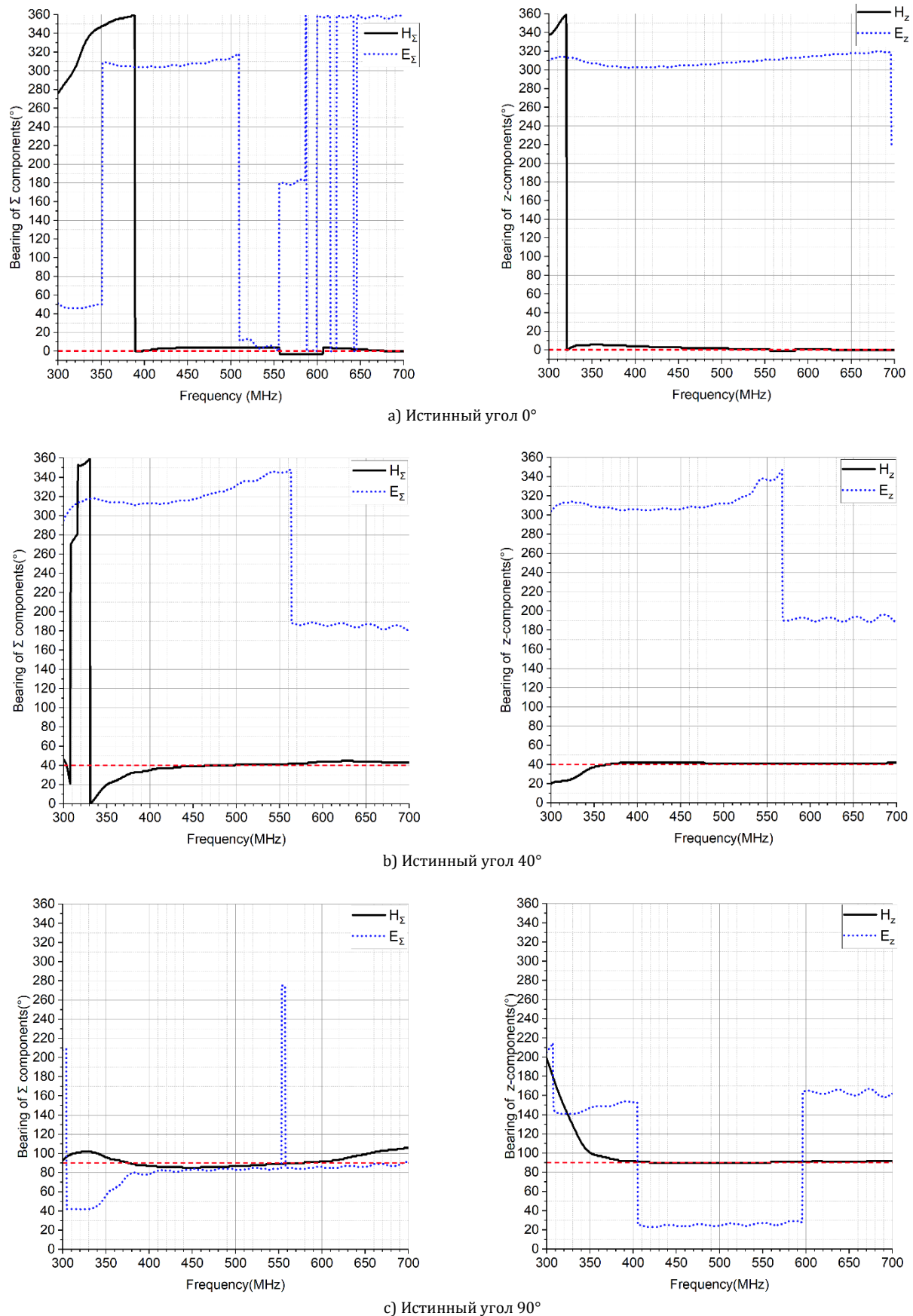


Рис. 5. Значения истинных пеленгов при облучении эллиптической электромагнитной волной: а) 0°; б) 40°; в) 90°

Fig. 5. Values of True Bearings when Irradiated by an Elliptical Electromagnetic Wave: a) 0°; б) 40°; в) 90°

ТАБЛИЦА 2. Статистические показатели пеленгации при приходе плоской волны с эллиптической поляризацией

TABLE 2. Statistical Indicators of Direction Finding at the Arrival of a Plane Wave with Elliptical Polarization

| Истинный пеленг, ° | H_x | | | E_x | | | H_z | | | E_z | | |
|--------------------|-------|----------|------|-------|----------|-------|-------|----------|------|-------|----------|-------|
| | m_1 | σ | er | m_1 | σ | er | m_1 | σ | er | m_1 | σ | er |
| 0 | 1,9 | 3,2 | 3,0 | 236,7 | 274,1 | 236,7 | 1,2 | 1,8 | 1,4 | 310,6 | 310,6 | 310,6 |
| 20 | 23,9 | 4,4 | 4,0 | 273,8 | 267,9 | 255,8 | 23,6 | 3,7 | 3,6 | 299,9 | 282,0 | 279,9 |
| 40 | 41,3 | 2,7 | 2,3 | 265,6 | 236,4 | 225,6 | 41,3 | 1,4 | 1,3 | 263,1 | 231,5 | 223,0 |
| 60 | 58,7 | 4,6 | 4,0 | 52,9 | 52,2 | 43,8 | 59,0 | 1,6 | 1,4 | 143,1 | 98,8 | 96,7 |
| 80 | 77,2 | 5,4 | 4,3 | 110,4 | 87,0 | 43,0 | 79,6 | 2,0 | 1,8 | 157,0 | 78,9 | 78,8 |
| 90 | 90,9 | 5,8 | 4,4 | 87,2 | 23,0 | 8,1 | 90,6 | 0,9 | 0,6 | 72,7 | 67,5 | 67,4 |
| 100 | 105,0 | 6,3 | 5,0 | 101,8 | 35,7 | 13,2 | 101,7 | 2,0 | 1,7 | 64,8 | 65,8 | 65,6 |
| 120 | 122,5 | 2,9 | 2,5 | 128,9 | 45,2 | 23,1 | 121,8 | 1,9 | 1,8 | 104,9 | 49,5 | 37,7 |
| 140 | 141,2 | 3,6 | 3,2 | 130,5 | 11,3 | 9,5 | 140,4 | 0,8 | 0,6 | 211,8 | 91,9 | 85,7 |
| 160 | 161,2 | 7,3 | 6,2 | 101,2 | 84,0 | 58,8 | 158,8 | 1,3 | 1,2 | 224,9 | 73,0 | 71,4 |
| 180 | 176,7 | 6,5 | 3,9 | 191,4 | 48,6 | 27,3 | 181,0 | 1,6 | 1,0 | 128,5 | 51,8 | 51,5 |
| среднее | – | 4,8 | 3,9 | – | 105,9 | 85,9 | – | 1,7 | 1,5 | – | 127,4 | 124,4 |

Условные обозначения:

 $\sigma = 0 \dots 1,0$ $\sigma = 1,1 \dots 5,0$ $\sigma = 5,1 \dots 10,0$ $\sigma = 10,1 \dots 20,0$ $\sigma \geq 20,1$

Заключение

Предложенный в данной статье способ формирования виртуальных магнитных диполей позволяет значительно повысить точность пеленгации электромагнитных волн по сравнению с пеленгацией на основе электрических компонент волн. Можно выделить, что наиболее оптимальным является использование суммарного поля магнитной компоненты H_x , так как их применение позволяет сохранить высокую точность пеленгации при любом типе электромагнитных волн. Применение предложенной конструкции пеленгатора обеспечивает обнаружение в диапазоне от 0° до 360° по азимуту, при этом угол элевации может быть любым от -90° до 90° . Если требуется выполнить обнаружение электромагнитной волны с эллиптической поляризацией, то наиболее оптимальным является использование H_z -компоненты электромагнитных волн. Проведенное исследование показывает высокую эффективность методов ВАР при формировании комплексов пеленгации

Подтверждена гипотеза о том, что корпус носителя радиопеленгаторной антенной системы явля-

ется рассеивателем электрического типа, в ближней зоне рассеянных волн которого отношение напряженности электрической компоненты поля к ее магнитной компоненте существенно превышает величину характеристического сопротивления свободного пространства. В результате корпус носителя существенно в большей степени искажает электрическое поле падающих волн. Поэтому для минимизации инструментальной погрешности измерений пеленгов, вызванных дифракцией волн на носителе, предпочтительным является пеленгование по магнитному полю.

Однако измерять электрическое поле гораздо проще с точки зрения технической реализации, т. к. электрически экранированные рамочные антенны имеют огромную добротность и сложны для согласования с трактом с волновым сопротивлением 50 Ом. Поэтому в статье предложено измерять сильно искаженное электрическое поле с помощью векторных антенных элементов, далее вычислять значения магнитных компонент поля и оценивать угловые координаты источников радиоизлучения с их использованием.

Список источников

1. Vaskelainen L.I. Virtual array synthesis method for planar array antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1998. Vol. 46. Iss. 3. PP. 391–396. DOI:10.1109/8.662658
2. 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.
3. Deng H., Himed B. A Virtual Antenna Beamforming (VAB) Approach for Radar Systems by Using Orthogonal Coding Waveforms // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2009. Vol. 57. Iss. 2. PP. 425–435. DOI:10.1109/TAP.2008.2011387

4. Li W., Li Y., Guo L., Yu W. Adaptive beamforming method for arc length based virtual antenna array // IEEE International Workshop on Electromagnetics, Applications and Student Innovation (IWEM, Taipei, Taiwan, 08–10 August 2011). IEEE, 2011. PP. 135–139. DOI:10.1109/IWEM.2011.6021492
5. Mudonhi A., D'Errico R., Oestges C. Indoor mmWave Channel Characterization with Large Virtual Antenna Arrays // Proceedings of the 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP, Copenhagen, Denmark, 15–20 March 2020). IEEE, 2020. PP. 1–5. DOI:10.23919/EuCAP48036.2020.9135628
6. Hirota A., Arai H., Nakano M. Characteristics of Virtual Planar Array Antenna for Direction-of-arrival Estimation // Proceedings of the European Conference on Wireless Technology (Manchester, UK, 10–12 September 2006). IEEE, 2006. PP. 51–54. DOI:10.1109/ECWT.2006.280432
7. Yang X., Lin D., Zhang F., Song T., Jiang T. High Accuracy Active Stand-off Target Geolocation Using UAV Platform // Proceedings of the International Conference on Signal, Information and Data Processing (ICSIDP, Chongqing, China, 11–13 December 2019). IEEE, 2019. PP. 1–4. DOI:10.1109/ICSIDP47821.2019.9172919

References


1. Vaskelainen L.I. Virtual array synthesis method for planar array antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1998;46(3):391–396. DOI:10.1109/8.662658
2. 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
3. Deng H., Himed B. A Virtual Antenna Beamforming (VAB) Approach for Radar Systems by Using Orthogonal Coding Waveforms. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2009;57(2):425–435. DOI:10.1109/TAP.2008.2011387
4. Li W., Li Y., Guo L., Yu W. Adaptive beamforming method for arc length based virtual antenna array. *IEEE International Workshop on Electromagnetics, Applications and Student Innovation, IWEM, 08–10 August 2011, Taipei, Taiwan*. IEEE; 2011. p.135–139. DOI:10.1109/IWEM.2011.6021492
5. Mudonhi A., D'Errico R., Oestges C. Indoor mmWave Channel Characterization with Large Virtual Antenna Arrays. *Proceedings of the 14th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP, 15–20 March 2020, Copenhagen, Denmark*. IEEE; 2020. p.1–5. DOI:10.23919/EuCAP48036.2020.9135628
6. Hirota A., Arai H., Nakano M. Characteristics of Virtual Planar Array Antenna for Direction-of-arrival Estimation. *Proceedings of the European Conference on Wireless Technology, 10–12 September 2006, Manchester, UK*. IEEE; 2006. p.51–54. DOI:10.1109/ECWT.2006.280432
7. Yang X., Lin D., Zhang F., Song T., Jiang T. High Accuracy Active Stand-off Target Geolocation Using UAV Platform. *Proceedings of the International Conference on Signal, Information and Data Processing, ICSIDP, 11–13 December 2019, Chongqing, China*. IEEE; 2019. p.1–4. DOI:10.1109/ICSIDP47821.2019.9172919

Статья поступила в редакцию 13.10.2022; одобрена после рецензирования 31.10.2022; принята к публикации 01.11.2022.


The article was submitted 13.10.2022; approved after reviewing 31.10.2022; accepted for publication 01.11.2022.

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 кафедры «Радиоэлектронных устройств и систем» Воронежского государственного технического университета,
 <https://orcid.org/0000-0002-2031-5531>

ПЕНДЮРИН
Владимир Андреевич

генеральный директор АО НПП «Автоматизированные системы связи»,
 <https://orcid.org/0000-0002-4697-5976>

ФЁДОРОВ
Сергей Михайлович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектронных устройств и систем» Воронежского государственного технического университета,
 <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>