

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.4.11>

УДК 623.76

УЛУЧШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПЕЛЕНГОВАНИЯ В МАЛОЭЛЕМЕНТНЫХ ЦИФРОВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТКАХ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ВИРТУАЛЬНЫХ АНТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Ратушняк В.Н., Кликно Д.Д., Дмитриев Д.Д., Гладышев А.Б.

Сибирский федеральный университет,
660074, г Красноярск, пр-т Свободный, 79

Статья поступила в редакцию 6 апреля 2026 г.

Аннотация. В статье рассматривается задача улучшения точности взаимной навигации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) при групповом применении за счет использования бортовой локальной радионавигационной системы на основе дальномерно-пеленгационного метода. Предложен метод формирования виртуальных антенных элементов в малоэлементной цифровой антенной решетке (ЦАР) путем экстраполяции амплитудно-фазового распределения, измеренного на реальных элементах. Такой подход позволяет синтезировать эффективную апертуру, значительно превышающую физическую, без увеличения массогабаритных характеристик. Проведен теоретический анализ разрешающей способности и погрешности пеленгования в зависимости от отношения сигнал/шум (ОСШ), числа элементов и апертуры. С помощью моделирования в среде MATLAB показано, что использование виртуального расширения апертуры снижает погрешность определения угловых координат с 9–14° до 1° и менее. Выполнена оценка современной элементной базы СВЧ-диапазона (Т/R-модули GaAs/GaN, многоканальные микросхемы, ПЛИС с интегрированными АЦП), на основе которой определены

массогабаритные параметры (менее 1,2 кг) и энергопотребление (около 30 Вт) бортовой системы. Сделаны выводы о технической реализуемости предложенной ЦАР на БПЛА взлетной массой 5–10 кг.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, групповая навигация, цифровая антенная решетка, виртуальные антенные элементы, сверхразрешение, пеленгование, отношение сигнал/шум, малоэлементная антенная решетка.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-20070, <https://rscf.ru/project/25-19-20070/>, гранта Красноярского краевого фонда науки.

Автор для переписки: Ратушняк Василий Николаевич, oborona-81@yandex.ru

Введение

Современные тенденции развития бортовых навигационных комплексов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) характеризуются активным внедрением методов и средств обеспечения их группового применения – полетов в плотных строях (роях), в составе организованных групп с распределением задач между членами группы и т.п. Реализация таких сценариев предполагает повышенные требования к точности взаимной навигации между членами группы. Использование приемников глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) для решения данной задачи, несмотря на их доступность, малые массогабаритные показатели, приемлемую точность и другие достоинства, сопряжено с рядом ограничений – недостаточная точность определения автономных координат без использования дифференциальных поправок и высокая уязвимость к радиоэлектронным помехам. Это критически снижает уровень траекторной безопасности БПЛА при их совместном маневрировании в составе групп. Автономные навигационные средства (инерциальные системы, одометрические датчики) в отдельности также не обеспечивают требуемой точности из-за накопления погрешностей.

В связи с вышеизложенным на первый план выходит актуальная задача разработки методов навигационного обеспечения группового применения БПЛА, базирующихся на непосредственном высокоточном определении взаимного положения членов группы. В этом случае в качестве альтернативы ГНСС-приемникам можно предложить применение бортовых локальных систем радионавигации, основанных на дальномерно-пеленгационном способе измерения взаимного положения. Данный подход представляет собой комбинированный метод, включающий измерение дальности между БПЛА – членами группы посредством оценки времени распространения навигационного радиосигнала и азимута и угла места (пеленга) источника излучения, размещенного на БПЛА. Вычислительные мощности системы могут быть размещены как на борту БПЛА-лидера в централизованном варианте, так и на каждом БПЛА автономно в децентрализованном варианте, что определяется принятой схемой управления группой [1, 2].

Одной из основных проблем реализации методов пеленгования для организации группового полета БПЛА является их низкая точность при использовании антенных систем с малой апертурой. Эффективным инструментом преодоления этого противоречия являются методы сверхразрешения на основе алгоритмов MUSIC. Их применение в сочетании с малогабаритными цифровыми антенными решетками (ЦАР), содержащими ограниченное число антенных элементов (АЭ), представляет особую значимость для БПЛА малого и среднего классов. Такая комбинация позволяет минимизировать массогабаритные характеристики бортового радиоэлектронного оборудования и рационально использовать ограниченный ресурс полезной нагрузки, поскольку требует относительно невысоких аппаратных и вычислительных затрат. В контексте предлагаемого решения определение угловых координат соседнего БПЛА предлагается осуществлять посредством алгоритмов сверхразрешения с виртуальным расширением апертуры на базе малоэлементной ЦАР. Данный подход обеспечивает требуемую точность пеленгования при сохранении компактности ЦАР.

1. Применение в малоэлементных ЦАР реальных и виртуальных антенных элементов

Традиционно сканирование пространства диаграммой направленности в ЦАР осуществляется электронным способом за счет управления значениями комплексных весовых коэффициентов фазовращателей Q_1, Q_2, \dots, Q_n на АЭ, которые формируют требуемое амплитудно-фазовое распределение (АФР) ЦАР [10, 11]. При использовании амплитудной пеленгации угловое разрешение источников излучения определяется пределом разрешения Релея, что не позволяет применять малоэлементные ЦАР для целей высокоточного пеленгования, а создание ЦАР с большим числом АЭ вызывает серьезные конструктивные трудности для их применения на БПЛА. В качестве устранения данного противоречия предлагается применение совместно с реальными антенными элементами ЦАР виртуальных.

Для оценки углового положения соседних БПЛА при помощи виртуальных АЭ предполагается, что принятый ими сигнал имеет такие же свойства, как и у принятого реальными АЭ, а вектор принятых виртуальными АЭ сигналов можно разложить в том же базисе фазирующих векторов, что и вектор комплексных сигналов, принятых реальными АЭ (рис. 1). Сигналы виртуальной и реальной ЦАР представляются в виде суперпозиции одних и тех же волновых фронтов принимаемого сигнала. Элементы виртуальной ЦАР конфигурируются симметрично вокруг реальных АЭ и фазового центра подрешетки ЦАР [11, 13].

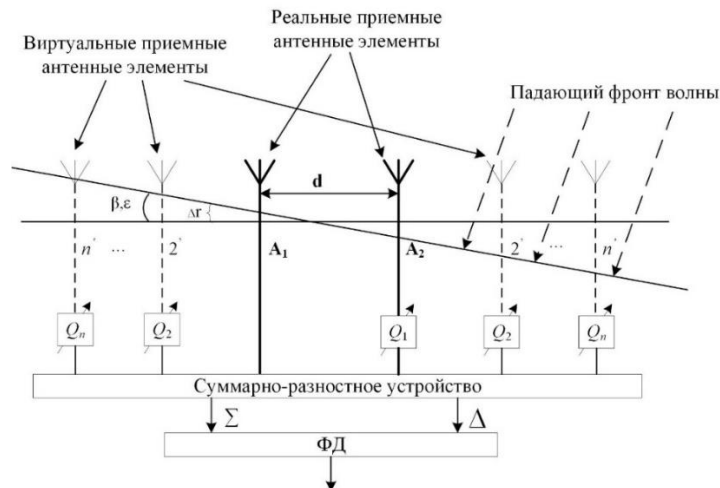


Рис. 1. Конфигурация линейной ЦАР с виртуальными элементами.

Рассмотрим процесс измерения пеленгов в ЦАР, сочетающей реальные и виртуальные АЭ. На начальном этапе производится измерение фазовых сдвигов между принятыми сигналами реальными АЭ. Далее, в соответствии с измеренными фазовыми сдвигами, производится расчет значений фазовых сдвигов на виртуальных АЭ, что позволяет сформировать виртуальный раскрыв ЦАР. Таким образом, формируются требуемое АФР на виртуальных АЭ, которое в совокупности с АФР реальных АЭ, формирует требуемую результирующую ДН ЦАР, размер апертуры которой определяется совокупностью реальных и виртуальных АЭ.

Конфигурация виртуальных АЭ подбирается таким образом, чтобы обеспечить требуемые углы сканирования по азимуту и углу места при сохранении формы диаграммы направленности. Количество виртуальных АЭ определяется балансом между требуемой разрешающей способностью по угловым координатам, вычислительными возможностями и допустимой погрешностью измерения угловых координат. Разбиение ЦАР на перекрывающиеся подрешетки, содержащие реальные и виртуальные АЭ, производят таким образом, чтобы каждая подрешетка сканировала пространство вдоль своего соответствующего координатного направления (рис. 2).

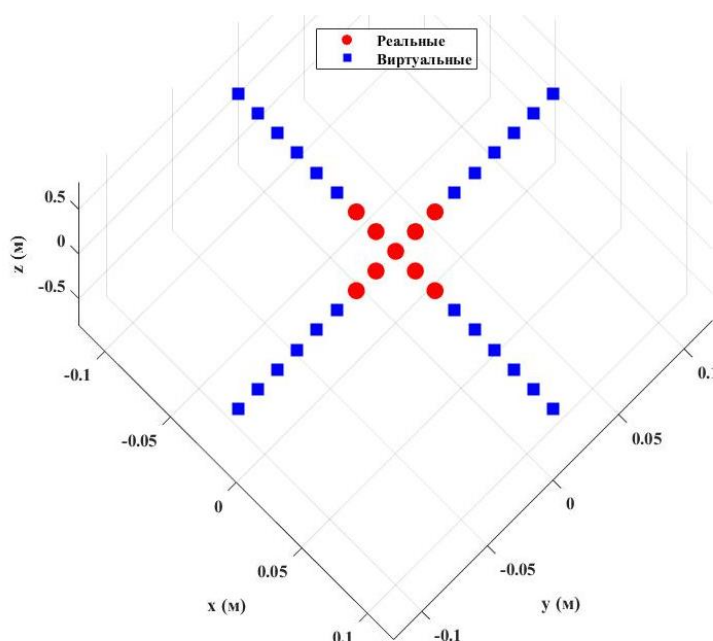


Рис. 2. Конфигурация ЦАР (синим цветом обозначены виртуальные, а красным – реальные АЭ).

Количество координатных направлений и сами направления выбирают из условий и применяемых методов сканирования пространства, размеров секторов сканирования пространства, специфики наблюдения за БПЛА в группе и т.д. Расстояние между АЭ реальной и виртуальной частей подрешеток должен составлять менее половины длины волны, а шаг между фазовыми центрами подрешеток – меньше длины волны и удовлетворял условию электрического сканирования пространства лучами в заданном секторе углов.

2. Оценка погрешности измерения угловых координат в ЦАР с реальными и виртуальными АЭ

Количественные характеристики погрешности оценки угловых координат могут быть получены только в результате анализа дисперсий оценок на основе границы Крамера-Рао, определяющей минимальную возможную дисперсию оценки в зависимости от числа антенных элементов, ДН одиночного элемента АР, конфигурации ЦАР, отношения сигнал/шум и др. [6, 13].

Соотношение характеристик пеленгационного рельефа и уровня отношения сигнал/шум (ОСШ) является фундаментальным для оценки эффективности пеленгации. В общем случае, высокий уровень ОСШ обеспечивает формирование «идеального» пеленгационного рельефа с четко выраженным максимумом и низким уровнем боковых лепестков, в то время как снижение ОСШ ведет к его деградации – уширению главного пеленга, росту боковых лепестков и, как следствие, к потере точности и разрешающей способности. При высоком ОСШ оценка пеленга является состоятельной и несмещенной. Это означает, что при многократных измерениях среднее значение оценок будет стремиться к истинному направлению на источник, а дисперсия (разброс) этих оценок будет минимальной (главный лепесток рельефа узкий и острый), а это обеспечивает высокую разрешающую способность, позволяя надежно разделять сигналы близко расположенных источников. С уменьшением ОСШ точность резко падает. Во-первых, растет дисперсия оценки – пеленг начинает «флуктуировать» под воздействием шума. Во-вторых, и это более

критично, при очень низком ОСШ или наличии мощных помех оценка пеленга может стать смещенной. В данном случае шум «размывает» главный лепесток, делая его более широким и пологим. Из-за этого два близких пика могут слиться в один, и система не сможет различить два отдельных источника. Параметры антенны (число и шаг излучателей) также влияют на ширину лепестка, но ОСШ является тем фактором, который определяет, насколько эти потенциальные возможности будут реализованы на практике.

Исследования показывают, что даже относительно слабый необнаруженный источник с уровнем всего минус 15 дБ (т.е. существенно слабее шума) способен вызвать смещение оценки пеленга на другой источник величиной около 1 градуса. Для многих практических задач это недопустимая погрешность. Ширина главного пика пеленгационного рельефа определяет, насколько близко могут находиться два источника, чтобы система воспринимала их как отдельные.

Для реальных ЦАР связь разрешающей способности пеленгации (минимального углового расстояния δ_θ между двумя источниками, при котором они различимы) с ОСШ q выражается математически через предел углового разрешения. В современной теории обработки сигналов эта связь выводится из информационных критериев, чаще всего с использованием неравенства Крамера-Рао. Наиболее наглядная и строгая математическая формулировка для линейной антенной решетки с M элементами, принимающей сигналы от двух узкополосных источников в дальней зоне, имеет следующий вид. Минимально разрешаемый угол δ_θ определяется как:

$$\delta_\theta = \sqrt{\frac{2}{L^2 \cos^2 \theta_0 \cdot M \cdot q^2}}, \quad (1)$$

где: δ_θ – минимальное угловое расстояние между двумя источниками, при котором они еще различимы (рад); q – отношение сигнал/шум для одного источника; M – количество элементов в антенной решетке; θ_0 – среднее направление на два источника (опорный угол); L – нормированная апертура

(ширина) решетки, которая в свою очередь равна $L=Md/\lambda$; d – расстояние между элементами решетки; λ – длина волны сигнала.

Из представленной формулы видна обратная пропорциональная зависимость между разрешающей способностью и ОСШ:

$$\delta_{\theta} \propto \frac{1}{q}. \quad (2)$$

Соотношение характеристик пеленгационного рельефа с уровнем ОСШ в ЦАР с виртуальными АЭ имеет ту же физическую природу, что и для реальных решеток, но приобретает ряд важных особенностей. Главное отличие заключается в том, что применение виртуальных АЭ позволяет достичь более высокой разрешающей способности и точности при том же физическом ОСШ, однако сама процедура виртуализации предъявляет повышенные требования к минимальному уровню ОСШ и может по-новому проявлять эффекты, связанные с шумами.

Общей проблемой для многих методов формирования ЦАР с виртуальными АЭ является их требовательность к величине ОСШ на входе. При низком ОСШ шум может «разрушить» математические взаимосвязи между сигналами, необходимые для корректного синтеза виртуального раскрыва. Кроме того, большое число виртуальных АЭ при малом числе реальных вызывает резкий рост уровня боковых лепестков в пеленгационном рельефе. Шум дополнительно «поднимает» этот и без того высокий уровень боковых лепестков, что может привести к появлению ложных пиков. Борьба с этим эффектом требует применения сложных алгоритмов пространственного сглаживания.

Кроме того, одним из важнейших применений ЦАР с виртуальными АЭ является компенсация искажений, вносимых корпусом носителя (БПЛА). Реальные АЭ устанавливаются на БПЛА, который искажает принимаемое электромагнитное поле. Применение виртуальных элементов позволяет математически «восстановить» поле в точках виртуальной ЦАР так, как если бы она находилась в свободном пространстве, вдали от искажающих объектов.

В этом контексте ОСШ определяет эффективность такой компенсации. При высоком ОСШ можно точно восстановить структуру поля и практически полностью убрать инструментальную ошибку пеленгования, связанную с влиянием корпуса. При низком ОСШ восстановление поля становится неустойчивым, и ошибки, вызванные носителем, начинают доминировать над шумовыми. В итоге, если в классических решетках низкое ОСШ просто ухудшает характеристики рельефа, то в ЦАР с виртуальными АЭ оно ставит под угрозу саму возможность его корректного формирования.

Таким образом, увеличение количества виртуальных АЭ не повышают отношение сигнал/шум на выходе ЦАР, и оно определяется только количеством реальных АЭ. Кроме того, важно отметить, что при обычной пеленгации пеленгационный рельеф определяется зависимостью мощности поступающего сигнала на выходе антенной решетки от угловых координат азимута и угла места при сканировании пространства. При достаточном уровне отношения сигнал/шум обнаружения сигнала от БПЛА в группе, дисперсия максимально правдоподобных оценок стремятся к границе Крамера-Рао и погрешность оценки угловых координат определяется в общем виде:

$$\sigma_{\sin(\beta, \varepsilon)}^2 \geq \frac{K}{(2\pi d / \lambda)^2} \cdot \frac{1}{q} \quad (3)$$

где, $\sigma_{\sin(\beta, \varepsilon)}$ – стандартное отклонение точности оценки синуса угла прихода сигнала по азимуту, углу места, q – отношение сигнал-шум на выходе согласованного фильтра одного из элементов АР, K – коэффициент, учитывающий количество антенных элементов, взаимное расположение и конфигурацию антенной решетки, d – расстояние между элементами решетки, λ – длина волны сигнала [13].

Исходя из опыта эксплуатации фазометрической аппаратуры, аппаратная погрешность измерения фазовых сдвигов составляет $\Delta\varphi \approx 4^\circ$ (при отношении сигнал/шум $q \approx 30$). При применении приемных устройств с накоплением сигнала (зная априорно кодовую структуру сигнала), возможно указанным методом углового сверхразрешения определять пеленг источников излучения

уровень по мощности, сигнала которых ниже уровня собственных шумов приемника, а также источников сигналов с достаточным уровнем отношения сигнал/шум. Данный метод углового сверхразрешения позволяет снизить погрешность измерения угловых координат (менее 2°) при отсутствии неоднозначности измерения фазовых сдвигов в заданных диапазонах измеряемых углов азимута и угла места. Вместе с этим необходимо отметить, что при отклонении пеленга источника излучения от нормали к плоскости решетки (более 40°) и изменении азимута сканирования в прямоугольной ЦАР пеленгационная характеристика ДН ухудшается и резко повышается уровень боковых лепестков.

3. Моделирование малоэлементной ЦАР с виртуальными АЭ

Рассмотрим синтез диаграммы направленности ЦАР в программном обеспечении среды Matlab и специально разработанных программ-дополнений для конфигурации АЭ, представленной на рис. 2. Созданная программная модель позволяет формировать ЦАР произвольной конфигурации с расположением АЭ на плоскости. При моделировании не учитываются эффекты взаимного влияния элементов ЦАР, различие АЧХ и ФЧХ ЦАР и приемных трактов. Алгоритм сканирования ЦАР предусматривает подстройку комплексных весовых коэффициентов в БЦОС для ЦАР с целью позиционирования равносигнального направления ДН ЦАР в заданном направлении в рамках ограничений, накладываемых конкретной конфигурацией ЦАР. В программе предусмотрено задавать произвольное направление (пеленг) на БПЛА и энергетические параметры сигнал/шум на входе ЦАР [16].

В ходе моделирования проводилось исследование влияния величины ОСШ на входе реальных АЭ на погрешность измерения фазовых сдвигов сигнала между реальными АЭ ЦАР, и, как следствие, на итоговый пеленгационный рельеф (с учетом внесения рассчитанной погрешности измерения фазовых сдвигов в виртуальные АЭ ЦАР) и форму ДН метода пеленгования сигналов соседних БПЛА в рамках произвольных конфигураций ЦАР.

Рассмотрим форму диаграммы направленности ЦАР с реальными и виртуальными АЭ. Направление прихода пеленгуемого сигнала равно $\varepsilon = 30^\circ$ и $\beta = 20^\circ$ от нормали к плоскости ЦАР с уровнем ОСШ равным 10 дБ. На рис. 3 и 4 приведены результаты моделирования диаграммы направленности ЦАР с учетом только реальных АЭ (9 элементов) и совокупности реальных и виртуальных АЭ (24 элемента). На рис. 5 показана крутизна пеленгационной характеристики ЦАР в зависимости от ОСШ.

На рис. 6 представлен сравнительный анализ производной от крутизны пеленгационной характеристики реальной и ЦАР представленных конфигураций в зависимости от величины ОСШ, из которого видно, что при низком ОСШ невозможно определять пеленг БПЛА, а максимальное значение крутизны характеристики при достижении достаточного уровня ОСШ зависит от суммарной апертуры ЦАР и ее количества элементов, конфигурации и т.д.

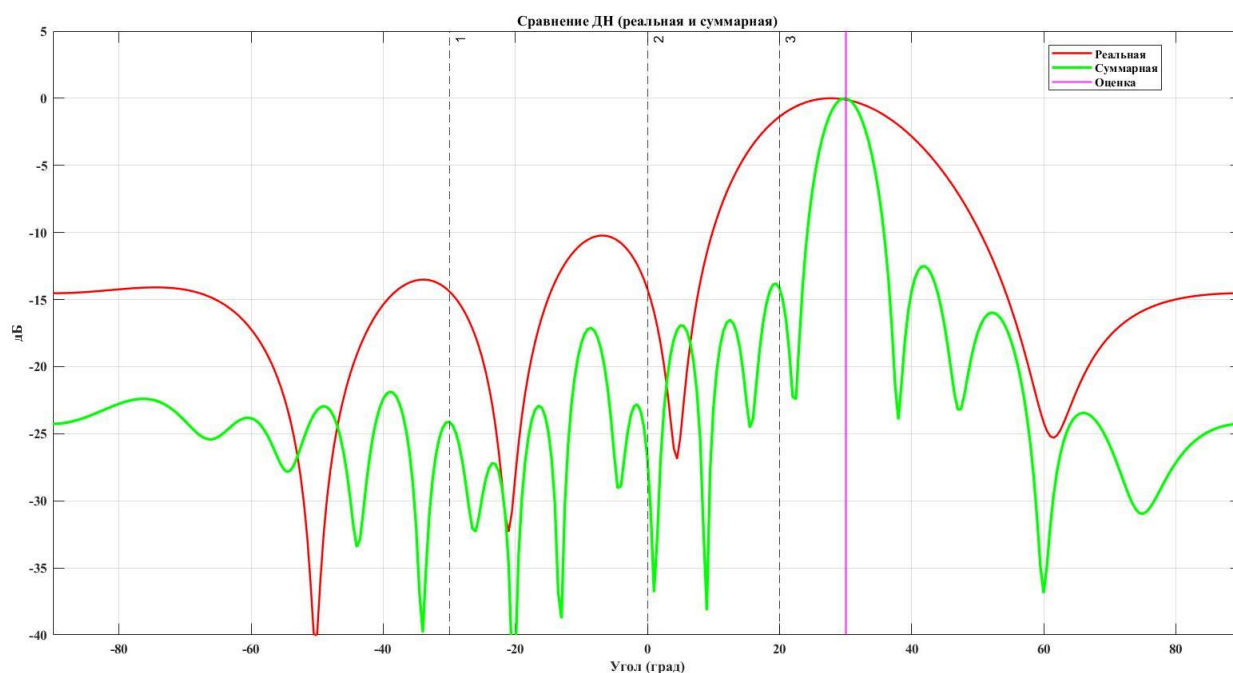


Рис. 3. Диаграмма направленности ЦАР с учетом только реальных АЭ (красным) и совокупности реальных и виртуальных АЭ (зеленым).

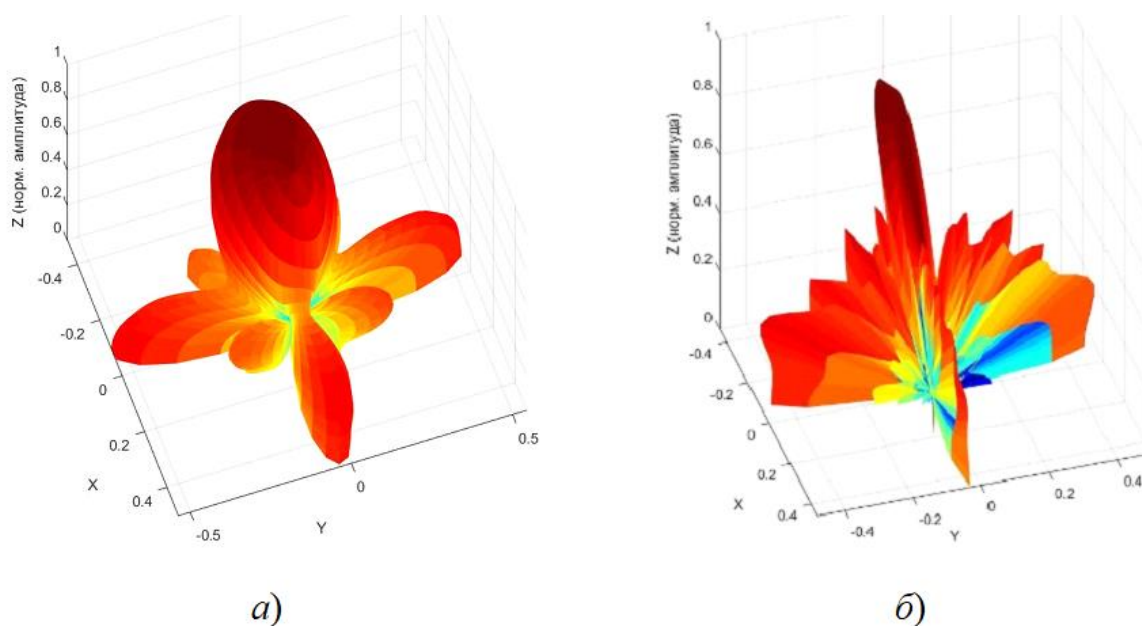


Рис. 4. Диаграмма направленности ЦАР с учетом только реальных АЭ (а) и совокупности реальных и виртуальных АЭ (б).

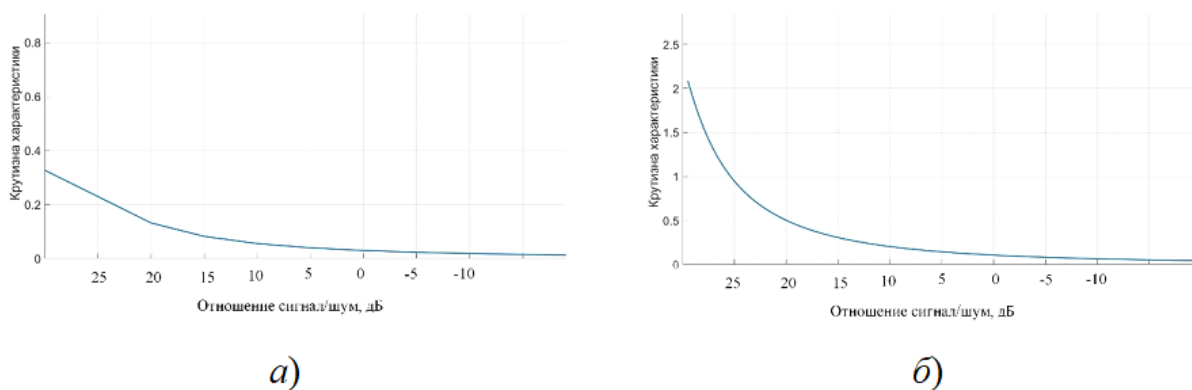


Рис. 5. Крутизна пеленгационной характеристики ЦАР с учетом только реальных АЭ (а) и совокупности реальных и виртуальных АЭ (б).

Из анализа результатов моделирования можно сделать вывод о перспективности применения виртуальных АЭ в малоэлементных ЦАР для улучшения точности пеленгования. Видно значительное улучшение пеленгационной характеристики, при этом погрешность определения источника излучения уменьшилась с $14...9^\circ$ (по реальным АЭ) до 1° и менее (по совокупности реальных и виртуальных АЭ).

4. Оценка массы, габаритов и энергопотребителя ЦАР для целей пеленгования

Рассмотрим существующие готовые решения (приемо-передающие модули, ПЛИС, ЦАР), и произведем расчеты полезной нагрузки для различных вариантов компоновки на типовом носителе БПЛА. Проведем приближенный расчет массы и габаритов аппаратуры для цифровой антенной решетки с числом физических элементов от 4 до 16.

Практическая реализация системы пеленгации на борту БПЛА накладывает жесткие ограничения на массу, габариты и энергопотребление аппаратуры. Ключевым требованием является также работа в диапазоне частот, обеспечивающем приемлемое соотношение между разрешающей способностью и затуханием в атмосфере. В качестве рабочего предлагается X-диапазон (4...12 ГГц) как компромиссный вариант, позволяющий использовать относительно компактные антенны и доступную элементную базу.

Современная микроэлектроника СВЧ предлагает два основных направления для построения приемо-передающих модулей (T/R-модулей):

1) технология GaAs характеризуется хорошими шумовыми характеристиками и умеренной стоимостью. Типовые представители приемо-передающих модулей, выполненные по этой технологии (например, продукция MACOM, Analog Devices), обеспечивают импульсную выходную мощность до 5 Вт с коэффициентом полезного действия (КПД) 30...40 %. Основное преимущество – миниатюрность (корпуса типа 10×10×2 мм) и малая масса (менее 1 г на модуль).

2) технология GaN применяется, когда требуется более высокая выходная мощность. Изделия Qorvo или Wolfspeed могут выдавать до 20 Вт в более широкой полосе частот (2...18 ГГц) при КПД 45–55 %. Однако это достигается ценой некоторого увеличения массы (2...3 г) и габаритов (15×15×3 мм) модуля.

Выбор между GaAs и GaN определяется требуемой дальностью действия системы и энергетическим бюджетом радиолинии. Для целей взаимной

навигации БПЛА внутри роя (дальность до сотен метров) приоритет следует отдать GaAs-решениям ввиду их меньшей массы и энергопотребления.

Архитектура ЦАР предполагает либо использование дискретных T/R-модулей на каждый элемент, либо применение многоканальных интегральных микросхем. Второй путь предпочтительнее с точки зрения миниатюризации. Примером могут служить микросхемы серии ADAR1000 (Analog Devices), которые интегрируют 16 приемных и 16 передающих каналов с фазовращателями и усилителями в корпусе 70×70 мм, потребляя около 250 мВт на канал в режиме приема. Это позволяет значительно упростить разводку высокочастотных линий и снизить общую массу радиочастотного блока. Для решетки с числом элементов от 4 до 16 возможно использование как четырех таких 16-канальных микросхем (избыточно), так и поиск специализированных 4-канальных решений, что даст дополнительный выигрыш в массе.

Функционирование ЦАР в реальном масштабе времени требует высокой производительности вычислительных средств. Необходимо выполнять быстрое преобразование Фурье (БПФ), цифровое формирование диаграммы направленности, корреляционную и суммарно-разностную обработку сигналов. Этим требованиям удовлетворяют программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС). Наиболее перспективным семейством для таких задач являются системы на кристалле типа Xilinx Zynq UltraScale+ RFSoc. Их ключевая особенность – интеграция высокоскоростных АЦП/ЦАП (с частотой дискретизации до 6 ГГц) непосредственно с программируемой логикой, что позволяет оцифровывать сигналы СВЧ-диапазона непосредственно на промежуточной частоте, отказываясь от громоздких аналоговых гетеродинов. Производительность таких ПЛИС достигает 4000 GMACs при энергопотреблении 10...20 Вт. Масса чипа с обвязкой на модуле оценивается в 15...20 г, а типовой отладочный модуль (плата с разъемами и памятью) имеет массу порядка 100...150 г. Для управления ЦАР и первичной обработки сигналов в составе 16-элементной ЦАР достаточно одной ПЛИС среднего класса с периферией (DDR4, Ethernet). К вспомогательным элементам относятся опорные

генераторы (термостатированные или кварцевые), обеспечивающие когерентность сигналов, а также блоки питания и преобразователи напряжений. Их суммарная масса оценивается в 150...250 г, а энергопотребление – в единицы ватт (без учета силовой части).

Физические элементы ЦАР предполагается выполнить в виде микрополосковых патч-антенн на диэлектрической подложке (FR4 или Rogers). На частоте 10 ГГц размер одного излучателя составляет около 10×10 мм. При размещении 16 элементов с шагом $\lambda/2$ (≈ 15 мм) в плоской фазированной решетке площадь полотна составит порядка 120×120 мм. В случае объемной компоновки (например, цилиндрической) габариты могут незначительно увеличиться. Масса антенного полотна с подложкой, экраном и элементами крепления оценивается в 200...300 г.

При использовании дискретных GaAs T/R-модулей (16 шт. по 2 г) масса приемо-передающего тракта составит 32 г. Применение многоканальных микросхем (например, 4 4-канальных модуля) позволит снизить этот показатель до 10...15 г. Типовой модуль на базе ПЛИС (например, плата с Zynq UltraScale+) с учетом разъемов и экранирования имеет массу порядка 100...150 г. Блок питания, преобразователи напряжения, корпус и соединители добавят еще 150.250 г.

Таким образом, суммарная масса полезной нагрузки (без учета аккумуляторной батареи) оценивается в 0,5...0,7 кг. Габаритные размеры функционального блока могут составить примерно 150×150×80 мм при вынесенной наружу антенной системе.

Произведем расчет средней потребляемой мощности:

1) Приемо-передающие модули:

а) передающий режим: 16 элементов × 5 Вт (импульсная) при скважности 10 % дают среднюю мощность около 8 Вт;

б) приемный режим: 16 элементов × 0,25 Вт = 4 Вт.

2) ПЛИС и логика: 15 Вт.

3) Потери в преобразователях и вспомогательные цепи: 5 Вт.

Итого средняя потребляемая мощность составляет порядка 30 Вт.

Обеспечение часового полета в таком режиме потребует аккумуляторной батареи емкостью не менее 2 А·ч при напряжении 24 В (≈ 50 Вт·ч).

Проведенная оценка показывает, что построение малогабаритной ЦАР на современной элементной базе для использования в БПЛА малого и среднего классов является технически реализуемой задачей. Суммарная масса бортового комплекса (включая аккумулятор) не превысит 1,2 кг при энергопотреблении около 30 Вт. Такие характеристики делают систему совместимой с широким классом БПЛА средней взлетной массой от 5 до 10 кг, имеющих достаточный ресурс полезной нагрузки и грузоподъемность для размещения предложенной аппаратуры.

Заключение

В настоящей работе рассмотрена актуальная проблема повышения точности взаимной навигации в групповых полетах БПЛА, в частности, при реализации роевых конфигураций на основе дальномерно-пеленгационного метода с использованием малоэлементных ЦАР с виртуальными АЭ.

Теоретический анализ показал, что применение методов сверхразрешения в сочетании с виртуальным расширением апертуры позволяет существенно повысить точность пеленгования при ограниченном числе физических элементов, что критически важно для БПЛА малого и средних классов. Предложенный метод формирования виртуальных АЭ базируется на экстраполяции АФР, измеренного на реальных АЭ, и обеспечивает формирование требуемой диаграммы направленности с эффективной апертурой, определяемой числом виртуальных элементов, а погрешность пеленгования в предложенной системе определяется ОСШ, числом элементов решетки и ее апертурой. Результаты моделирования в среде MATLAB подтвердили эффективность предложенного подхода. Продемонстрировано, что использование виртуального расширения апертуры позволяет снизить погрешность определения угловых координат с $9...14^\circ$ (при использовании

только реальных элементов) до 1° и менее. Исследовано влияние отношения сигнал/шум на крутизну пеленгационной характеристики, подтверждена необходимость обеспечения достаточного энергетического потенциала для реализации преимуществ методов сверхразрешения.

В работе выполнен анализ современной элементной базы СВЧ-диапазона, включая T/R-модули на основе GaAs- и GaN-технологий, многоканальные приемо-передающие микросхемы и высокопроизводительные ПЛИС с интегрированными АЦП. На основе проведенных оценок определены массогабаритные характеристики и энергопотребление бортовой аппаратуры для ЦАР с числом физических элементов от 4 до 16. Показано, что суммарная масса полезной нагрузки не превышает 1,2 кг при средней потребляемой мощности порядка 30 Вт, что подтверждает техническую реализуемость системы на типовых БПЛА взлетной массой 5...10 кг. Предложены варианты компоновки и размещения антенной системы на борту носителя, оптимизирующие аэродинамические характеристики и обеспечивающие требуемый сектор обзора.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-20070, <https://rscf.ru/project/25-19-20070/>, гранта Красноярского краевого фонда науки.

Литература

1. Дмитриев Д.Д. и др. Навигационное обеспечение беспилотных летательных аппаратов для организации их группового применения // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2025. – Т. 18. – №. 4. – С. 498-508.
2. Гладышев А.Б. и др. Определение взаимного местоположения беспилотных воздушных судов, действующих в составе группы // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2025. – Т. 18. – №. 5. – С. 649-659.

3. Фищев М.А., Вещев Д.А. Построение виртуальной антенной решетки корреляционного интерферометра по экспериментальным данным пеленгования // Общество, наука, инновации (НПК-2013). – 2013. – С. 1057-1062.
4. Патент № 2746063 МПК H01Q 21/29 (РФ). Способ углового сверхразрешения в приемной цифровой антенной решетке. / Винник Л.В., Литвинов А.В., Мищенко С.Е., Шацкий В.В. Приоритет от 21.07.2020. Опубликовано 06.04.2021. Бюл. № 10. Патентообладатель ФГУП РНИИРС.
5. Ашихмин А.В., Пастернак Ю.Г., Рембовский Ю.А. Методика повышения инструментальной точности мобильных радиопеленгаторов, основанная на оптимальном выборе координат элементов «виртуальной» антенной решетки // Антенны. – 2009. – №. 9. – С. 44-51.
6. Винник Л.В. и др. Метод синтеза линейной виртуальной антенной решетки // Журнал радиоэлектроники. – 2020. – №. 1.
7. Ermolayev V.T., Flaksman A.G., Shmonin O.A. Using the Concept of a Virtual Antenna Array in a MIMO Radar in the Presence of Reflections from the Ground Surface // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2020. – V. 63. – №. 3. – P. 218-226.
8. Ашихмин А.В. и др. Использование «виртуальной» антенной решетки из диполей для повышения инструментальной точности радиопеленгатора бортового базирования // Антенны. – 2020. – №. 6. – С. 34-40.
9. Порсев В.И., Гелесев А.И., Красько А.Г. Угловое сверхразрешение сигналов с использованием «виртуальных» антенных решеток // Вестник Концерна ВКО Алмаз-Антей. – 2019. – №. 4 (31). – С. 24-34.
10. Ратынский М.В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. – Радио и связь, 2003.
11. Ratushnyak V.N. et al. Two-stage Direction Finding Method in Low-Element Antenna Arrays // 2025 Antennas Design and Measurement International Conference (ADMInC). – IEEE, 2025. – P. 66-69.

12. Ratushnyak V.N. et al. Research on Recurrent Super-Resolution Algorithm in Small-Element Antenna Array // 2025 9th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT). – IEEE, 2025. – P. 1-4.
13. Ратушняк В.Н. и др. Концепция виртуальной антенной решетки РЛС вертикального зондирования для решения задач сверхразрешения // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. – 2025. – №. 2. – С. 43-55.
14. Ратушняк В.Н. и др. Синтез алгоритма сверхразрешения в малоэлементной антенной решетке // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 9.
15. Dmitriev D.D. et al. Use of a Group of Unmanned Aerial Vehicles to Detect Radio-Emitting Devices // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2025. – Т. 18. – №. 7. – С. 931-939.
16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025663727 Российская Федерация. Компьютерная модель алгоритма сверхразрешения цифровой антенной решетки и пеленгации источников излучения : заявл. 22.05.2025 : опубл. 29.05.2025 / В.Н. Ратушняк, И.В. Тяпкин, Д.Д. Дмитриев [и др.] ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет».

Для цитирования:

Ратушняк В.Н., Кликно Д.Д., Дмитриев Д.Д., Гладышев А.Б. Улучшение точности пеленгования в малоэлементных цифровых антенных решетках за счет применения виртуальных антенных элементов // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 4.