

УМЕНЬШЕНИЕ УРОВНЯ БОКОВЫХ ЛЕПЕСТКОВ В КЛАСТЕРНЫХ МИКРОПОЛОСКОВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТКАХ БОРТОВЫХ МЕТЕОНАВИГАЦИОННЫХ РЛС ДЛЯ ЗАПОЛЯРНЫХ ШИРОТ

DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-11-22-29

Manuscript received 11 October 2024;
Accepted 05 November 2024

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект № 23-29-00044

Рыжиков Максим Борисович,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения,
г. Санкт-Петербург, Россия, maxrmb@yandex.ru

Ключевые слова: радиолокация, боковые лепестки, диаграмма направленности, кластерные решетки, погодные условия, Арктика

При решении задачи бортовой метеонавигации для автоматически управляемых авиационных платформ или воздушных судов малой авиации как в арктическом географическом поясе, так и в умеренном поясе одной из ключевых задач при выборе безопасной траектории полета является требование обхода или облета зон, в которых на основе анализа данных, полученных в отраженном сигнале, установлено наличие опасных для полета погодных условий: гроз, интенсивных осадков в виде снега или дождя, турбулентности или сдвига ветра. Как показывают результаты исследований, в том числе для заполярных широт, снижением уровня бокового излучения антенн в нижней полусфере можно уменьшить и вероятность ложных обнаружений опасных метеопреобразований, которые возникают после обработки переотраженных от подстилающей поверхности сигналов. Особенно актуальна данная проблема при условии выполнения носителем бортовой РЛС маловысотного полета. При возможности реализации традиционного амплитудного распределения можно уменьшить уровень боковых лепестков до относительно малых значений (минус 28 дБ и менее), при которых на экране бортовой РЛС не наблюдается ложных зон с опасными погодными условиями. Однако, как показывают результаты исследования в кластерных антенных решетках с единым амплитудным возбуждением объединенных излучателей возникают такие боковые лепестки, максимальный уровень которых уже не регулируется амплитудным распределением. Пути уменьшения данных боковых лепестков (в том числе только в нижней полусфере) и исследованы в данной работе. В работе активно использовался математический аппарат теории антенн и антенных решеток, а также численное моделирование с использованием

программного обеспечения на базе компьютерной среды матричных моделей, с интегрированными библиотеками для расчета параметров отдельных микрополосковых излучателей. Путем моделирования исследовать уровни боковых лепестков, характерные для кластерных микрополосковых антенных решеток с разными способами объединения излучателей в группы, а также исследовать пути его уменьшения за счет реализации модернизированного амплитудно-фазового распределения Дольфа-Чебышева, приводящего к несимметричной диаграмме направленности с уменьшенным уровнем излучения в нижней полусфере. Приведены результаты синтеза и моделирования характеристик излучения антенных решеток Ka-диапазона с уменьшенным уровнем бокового излучения, подтверждающие формирования не подавляемого бокового лепестка, причиной возникновения которого является кластерность антенной решетки, выполняемая с целью уменьшения стоимости изделия за счет снижения числа активных управляющих амплитудно-фазовым распределением элементов. Результаты работы могут быть использованы при реализации микрополосковых кластерных антенных решеток с минимальным уровнем бокового излучения. Они могут быть в свою очередь применяться в малогабаритных антенных решетках метеонавигационных бортовых импульсно-доплеровских РЛС с относительно короткими рабочими длинами волн, применение которых приводит к увеличению удельной эффективной площади рассеяния подстилающей поверхности и росту переотражений от земли с повышением вероятности принятия решения о наличии ложных опасных метеопреобразований.

Информация об авторе

Рыжиков Максим Борисович, к.т.н., доцент, Кафедра "Радиотехнических и оптико-электронных комплексов", Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования:

Рыжиков М.Б. Уменьшение уровня боковых лепестков в кластерных микрополосковых антенных решетках бортовых метеонавигационных РЛС для заполярных широт // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. №11. С. 22-29.

For citation:

Ryzhikov M.B. (2024). Reducing the level of side lobes in the cluster microstrip antenna arrays of airborne weather radars for polar latitudes. *T-Comm*, vol. 18, no.11 pp. 22-29. (in Russian)

Введение. Постановка задачи исследования.

Для бортовых РЛС, воздушные носители которых отличаются малыми габаритами, весом и стоимостью характерно использование микрополосковых антенных решеток [1, 2]. Для решения функциональной задачи построения безопасной траектории полета в относительно сложных погодных условиях одной из ключевых решаемых проблем является обеспечение достоверной информации о метеорологической обстановке в районе полета. Ее можно получить посредством использования неуправляемых авиационных платформ с малогабаритными РЛС [3, 4, 18]. Ухудшение достоверности и качества радиолокационной информации в данном случае возникает в антенных решетках с относительно высоким уровнем боковых лепестков (УБЛ) диаграммы направленности (ДН) в вертикальной плоскости. При низких высотах полета и относительно высокой удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) подстилающей поверхности растет и мощность переотражений от нее, которые можно принять за опасные погодные условия, среди которых для заполярных широт следует выделить плотные арктические облака, турбулентные потоки снежных воздушных масс, сдвиг ветра [5, 6]. Возникают требования как к ширине основного луча ДН антенной решетки, так и к ее боковым лепесткам, представленные в [5-7].

Поскольку в заполярных широтах большую роль играет использование малой авиации, летающей на относительно малых высотах, то проблема реализации функциональной задачи получения корректной информации о погодных условиях по курсу является одной из приоритетных задач в многофункциональной бортовой РЛС. Для воздушных судов целесообразно использование малогабаритных антенн, площадь которых может быть снижена за счет уменьшения габаритов при переходе к более коротковолновым решениям в радиодиапазоне. Поэтому в настоящем исследовании результаты численного моделирования получены для микрополосковых антенных решеток Ку-диапазона.

Уменьшение стоимости таких антенн достигается посредством снижения числа активных элементов СВЧ тракта, а именно числа приемно-передающих модулей (ППМ). В этом случае каждый ППМ подключен не к одному, а к группе излучателей, которые в свою очередь представляют собой кластер. Такое подключение может изменять амплитудно-фазовое распределение, при помощи которого формируется ДН кластерной антенной решетки.

Рассмотрим для примера несколько разных вариаций объединения излучателей в отдельные кластеры. Учтем, что возможны несколько вариантов управления максимумом ДН антенны в метеонавигационных РЛС [8]:

- а) за счет механического сканирования;
- б) путем электронного управления лучом за счет изменения фазового распределения.

Случай механического перемещения раскрыва характеризуется тем, что все антенны в кластере запитываются синфазно с целью максимизации энергетического потенциала, а амплитудное распределение носит ступенчатый характер. При электронном сканировании возможны два способа подключения: в первом случае фазовое, как и амплитудное распределение меняются ступенчато, то есть один фазовращатель и аттенуатор служит для установления фазы и амплитуды на группе излучателей. Второй вариант технического

исполнения позволяет отдельно регулировать фазой на излучателях, а кластер формируется для уменьшения числа ППМ, то есть ступенчатое распределение характерно для закона изменения амплитуд возбуждения отдельных антенн в решетке.

Результаты исследований, представленные в настоящей работе, показывают, как объединение излучателей в кластеры приводит к появлению побочных максимумов в диаграмме направленности, а также как боковые лепестки зависят от технической реализации кластера. Для снижения минимального уровня боковых лепестков в нижней полусфере при кластерном исполнении оценивается также способ модификации амплитудного и фазового распределения для крайних – нижней и верхних линеек излучателей на раскрыве решетки [7].

1. Критерий для сравнения метеонавигационных РЛС с разной структурой боковых лепестков. Определение диапазона углов в нижней полусфере в котором следует снижать уровень излучения

Для сравнения между собой РЛС с различающимися диаграммами направленности при разном техническом исполнении антенных решеток нужно определить с критерием сравнения. Корректное сравнение можно производить при условии, что условия зондирования метеобразований максимально идентичны. Для этого будем стремиться к реализации антенн с одинаковой шириной симметричного луча.

Различия в уровне и положении боковых лепестков ДН антенны в нижней полусфере требуют дополнительного сравнительного исследования. Актуальность такой постановки задачи для метеонавигационной радиолокации в условиях маловысотного полета (до 100-150 м) основывается на том, что нижняя граница даже арктических облаков располагается выше коридора высот полета, а облака для континентальных широт, даже грозовые размещаются над поверхностью еще выше. Для их зондирования и оценивания степени опасности целесообразно осуществлять сканирование с подъёмом основного луча чуть вверх от линии горизонта.

Рекомендации по выбору самого угла наклона луча для метео РЛС для заполярных широт и по сравнению эффективности технических способов его реализации с учетом понижения уровня переотражений от подстилающей поверхности даны в [7]. Сравнить влияние диаграмм направленности на обнаружение ложных метеобразований можно используя известный энергетический критерий сигнал/(шум+помеха)

$$K_{эфф} = \left(\frac{P_{c1}}{P_{ш1} + P_{п031}} \right) / \left(\frac{P_{c2}}{P_{ш2} + P_{п032}} \right), \quad (1)$$

где P_{c1} и P_{c2} – мощности полезных сигналов, отраженных от разрешаемого объема в главном луче, $P_{ш1}$ и $P_{ш2}$ – мощность внутриприемного теплового шума, $P_{п031}$ и $P_{п032}$ – мощности переотражений от земли причем для сигналов, приходящих по боковым лепесткам ДН антенны, так на дальностях больших чем та, которая соответствует прогнозируемой точке касания поверхности главным лучом, приемник бортовой РЛС перестает принимать сигналы. Оценивание $P_{п031}$ и $P_{п032}$ проведем чуть позднее. С помощью данного подхода можно провести сравнение двух РЛС при идентичных временных параметрах зондирующих сигналов (длительность импульса, скважность), одинаковых мощности излучения в импульсе и

ЭЛЕКТРОНИКА. РАДИОТЕХНИКА

потерях в приемно-передающих, в том числе в СВЧ трактах РЛС. Тогда различия проявятся в основном в коэффициентах направленного действия антенн (КНД) и в значениях локальных максимумов боковых лепестков, ориентированных на подстилающую поверхность. Так как мощность шума, приведенного на вход приемника, при одинаковых временных параметрах сигналов будет идентичной $P_{ш1} = P_{ш2}$, то (1) можно преобразовать следующим образом

$$K_{эфф} = \left(\frac{КНД_1}{КНД_2} \right)^2 \left(\frac{1 + \frac{P_{поз2}}{P_{ш}}}{1 + \frac{P_{поз1}}{P_{ш}}} \right) \approx \left(\frac{КНД_1}{КНД_2} \right)^2 \frac{P_{поз2}}{P_{поз1}}, \quad (2)$$

где учтено, что в условиях маловысотного полета $P_{поз}/P_{ш} \gg 1$.

Для реализации метеорежимов при относительно малых высотах полета $h \in [20; 300]$ м (для обеспечения многоспектрального зондирования поверхности с использованием в видимом или инфракрасном диапазонах) с отсутствием переотражений в области альтиметра можно рекомендовать устанавливать минимальную границу дальности, равной по соотношению $R_{мин} = h + ct_{имп}$; c – скорость света; $t_{имп}$ – длительность импульса. Тогда максимальный отрицательный угол места, с которого будут приходить переотражения от земли $\epsilon_{мин}(h) = -\arcsin\left(\frac{h}{R_{мин}}\right)$. Это позволяет установить ниж-

нюю границу диапазона углов, начиная от которой следует уменьшать УБЛ ДН антенны для того интервала высот, который характерен для полетов под нижнем краем облачности в заполярных широтах. Именно в этих условиях возможна и работа и оптико-электронных систем без существенных энергетических потерь и контраста в получаемых ими изображениях, падающего из-за помехи обратного рассеяния.

На рисунке 1 представлен график зависимости для минимального углового направления, начиная с которого возникает задача контроля значений ДН антенны в нижней полусфере, которая заканчивается на угловом направлении $\epsilon_{макс}$, которое соответствует первому нулю ДН в области отрицательных углов места.

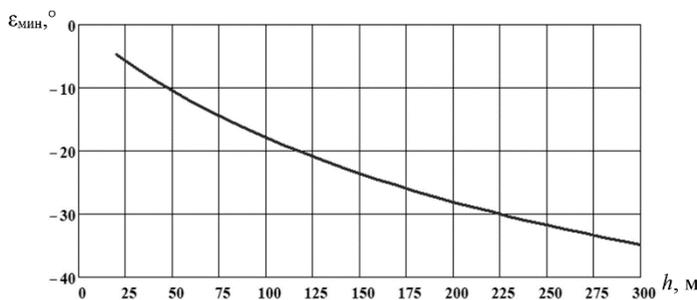


Рис. 1. Оценка диапазона углов наклона ДН антенны в нижней полусфере с которого приходят переотражения от земли при выбранном правиле формирования строба дальности

Данный график позволяет уточнить и численную оценку для критерия (2) с учетом пространственного влияния боковых лепестков ДН в отсутствие перестройки амплитудно-фазового распределения на прием и передачу.

$$K_{эфф} = \left(\frac{КНД_1}{КНД_2} \right)^2 \frac{P_{поз2}}{P_{поз1}} = \left(\frac{КНД_1}{КНД_2} \right)^2 \frac{F_2^2(\alpha, \epsilon)}{F_1^2(\alpha, \epsilon)} \approx \left(\frac{КНД_1}{КНД_2} \right)^2 \frac{\sum_{n=1}^{n2} F_2^2(0, \epsilon_{1n})}{\sum_{n=1}^{n1} F_1^2(0, \epsilon_{2n})}, \quad (3)$$

где F_1 и F_2 – значения ДН антенн от азимута α и угла места ϵ , $n1$ и $n2$ – число боковых лепестков в сравниваемых ДНА в пределах от $\epsilon_{мин}(h)$ до $\epsilon_{макс}$, $\epsilon_{1(2)n}$ – значение угла места, при котором наблюдается максимум каждого бокового лепестка с номером n для антенн с разным амплитудно-фазовым распределением.

2 Исследование диаграмм направленности при кластерной реализации микрополосковых антенных решеток при разных способах формирования групп излучателей и способа уменьшения их боковых лепестков

Механический способ сканирования один из базовых при реализации метеонавигационных бортовых РЛС для самолетных и вертолетных крупных носителей. При наличии достаточного места для размещения антенн с учетом вращения их раскрыва по азимуту или углу места он позволяет реализовать просмотр зоны обзора в более широком диапазоне углов без падения энергетического потенциала, то есть дальности обнаружения, а также точности определения азимутальных границ опасных метеообразований на краях зоны обзора по отношению к случаю электронного сканирования [9].

Для этого случая оптимален выбор простого типа питания микрополоскового кластера антенны, когда идентичные излучатели возбуждаются синфазно, например, когда в отрезке полосковой линии (ПЛ) между ними набегает фазовый набег равный [10]

$$\varphi = 2\pi = \frac{2\pi d_{пл} \sqrt{\epsilon_{эфф}}}{\lambda} \Rightarrow d_{пл} = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_{эфф}}};$$

$$\epsilon_{эфф} = \frac{\epsilon + 1}{2} + \frac{\epsilon - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h_{пл}}{a_{пл}}}},$$

где $d_{пл}$ – длина отрезка, ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость (ДП) (ДП), $\epsilon_{эфф}$ – эффективное значение ДП, $h_{пл}$ – высота подложки под ПЛ, $a_{пл}$ – поперечный размер ПЛ. Рекомендации по выбору относительной толщины подложки

$d^* = \frac{d}{\lambda \sqrt{\epsilon - 1}}$ для минимизации потерь на распространение в ней поверхностных волн приведены в [11].

Такой способ запитки излучателей в кластере представлен на рис. 2а). Он выбран для реализации преимущественной для бортовых метеонавигационных РЛС горизонтальной поляризации [12] и приводит к формированию ступенчатого амплитудного распределения (АР), представленному на рис. 2б сплошной линией, на том же графике точками отмечены значения амплитуд исходного распределения Дольфа-Чебышева, полученного при заданном УБЛ, равном минус 30 дБ.

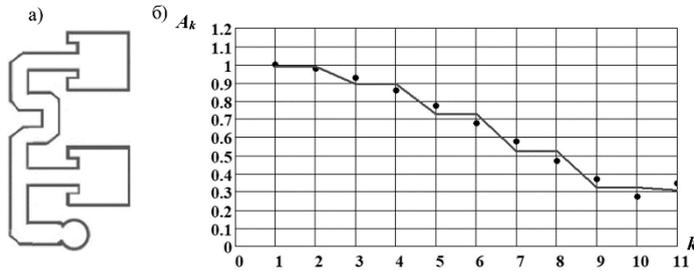


Рис. 2. Объединение в кластер (а), ступенчатое (сплошная линия) и исходное Дольфа-Чебышева (значения, указанные точками) амплитудные распределения на половине антенной решетки в функции от номера излучателя от центра антенны (б)

В ступенчатом распределении падение амплитуды при прохождении мощности от одного излучателя ко второму для минимально, на отрезке ПЛ размеров в одну эффективную длину волны излучения удельные потери для относительно тонких электрических подложек не велики и не превысят величину в 0,1 дБ. Такие относительно малые потери позволяют использовать в микрополосковых решетках линии питания, которые служат для возбуждения многих излучателей, поэтому кластеры могут быть и большего размера. Поэтому кроме случая использования вертикального кластера на два излучателя моделировались и варианты исполнения с большим числом излучателей, которые объединялись в группу. На рисунке 3 показано АР, которое было получено для трех излучателей, объединяемых линией питания.

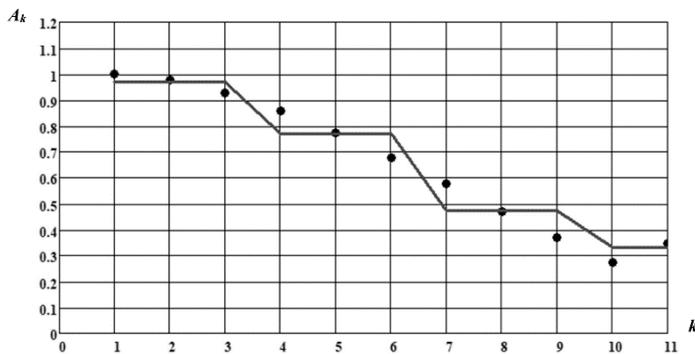


Рис. 3. Ступенчатое АР для трех объединенных излучателей (сплошная линия) и исходное Дольфа-Чебышева АР (значения, указанные точками) на половине антенной решетки в функции от номера излучателя от центра антенны

Численный расчет распределения амплитуд на излучателях зависит от того, четное или нечетное их количество размещается в столбце или в строке антенной решетки. Введем обозначение UBL для параметра, отвечающего за заданный уровень для максимумов боковых лепестков ДН антенны (в дБ) по мощности. Переводим в него в значение, которое будет характеризовать этот же уровень в разгах по напряженности поля, что позволит найти АР Дольфа-Чебышева на излучателях с номерами k , размещенными на половине раскрытия по соотношениям [13].

$$Q = 10^{\frac{UBL}{20}};$$

$$x = 0,5 \left[\left(Q + \sqrt{Q^2 - 1} \right)^{\frac{1}{N-1}} + \left(Q - \sqrt{Q^2 - 1} \right)^{\frac{1}{N-1}} \right];$$

$$A_k = (N-1)x^{2k-1} \sum_{\mu=0}^{p-k} (-1)^{p-k-\mu} x^{2\mu} \frac{(p+k+\mu-2)!}{(p-k-\mu)!(2k+\mu-1)!\mu!};$$

$$p = 0,5N;$$

$$B_k = (N-1)x^{2k} \sum_{\mu=0}^{w-k} (-1)^{w-k-\mu} x^{2\mu} \frac{(w+k+\mu-1)!}{(w-k-\mu)!(2k+\mu-1)!\mu!};$$

$$w = 0,5(N-1),$$

A_k – значения амплитуд на излучателях, когда их четное число в линейке (столбце) антенной решетки; B_k – значения амплитуд, когда их нечетное число.

В случае ступенчатого раскрытия, приближение к АР Дольфа-Чебышева находилось путем минимизации значения функции

$$F(v) = \sum_{z=vZ+1}^{(v+1)Z} (A_z - A_{st}(v))^2,$$

v – порядковый номер кластера, начинается от центра; Z – число элементов в кластере. Исключение составляет лишь в том случае, если в последнем кластере остается меньше, чем Z элементов, тогда именно по ним ищется минимум $F(v)$.

На рисунке 3 представлены результаты моделирования АР с шириной ДН порядка 5,6°, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к ширине ДН при обнаружении характерных для заполярных широт облаков и областей турбулентности, а также достаточно при оценивании опасности зон сдвига ветра [5, 6].

Сплошная линия на рисунке 4 – для амплитудного распределения Дольфа-Чебышева, пунктирная – для этого же АР, преобразованного в ступенчатое для кластера из двух излучателей, точками – АР для кластера из трех излучателей.

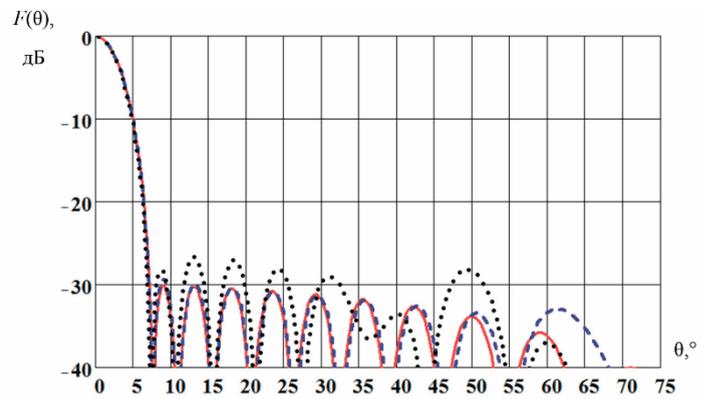


Рис. 4. ДН антенны для разных типов амплитудных распределений, полученных на базе АР Дольфа-Чебышева с уровнем минус 30 дБ (сплошная линия – исходное АР, пунктирная линия – АР с кластером из 2-х излучателей, линия точками – АР с кластером из 3-х излучателей)

Как следует из представленных графиков, преобразование АР в ступенчатое приводит к формированию боковых лепестков выше заданного уровня.

ЭЛЕКТРОНИКА. РАДИОТЕХНИКА

Боковые лепестки полученные из-за ступенчатости АР не подавляются путем задания новых параметров или вида АР, гарантирующего меньший уровень излучения вне главного лепестка. Примером может служить ДН, которая получена посредством задания для АР Дольфа-Чебышева требуемого уровня бокового излучения в минус 50 дБ. Результаты расчета для данного АР приведены на рисунке 5.

Как и ранее, сплошная линия на рисунке 5 – для АР Дольфа-Чебышева, пунктирная – для кластера из двух излучателей, точками – для кластера из трех излучателей. Как следует из рисунка 5 ДН для ступенчатого АР из трех излучателей, объединенных в кластер, стала даже хуже исходной, поскольку уровень бокового излучения даже вырос на 2 дБ с минус 27 дБ в максимуме до минус 25 дБ в максимуме.

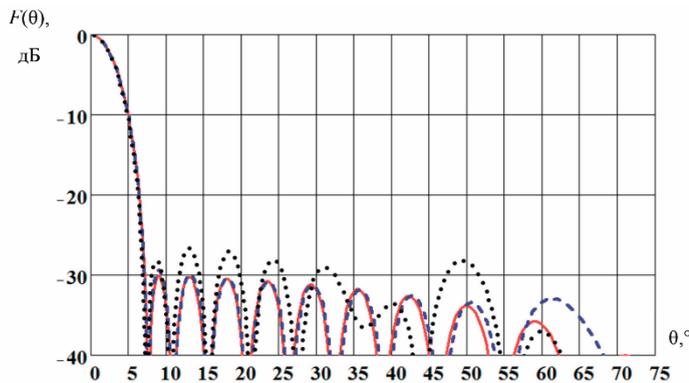


Рис. 5. ДН антенны для разных типов амплитудных распределений, полученных на базе АР Дольфа-Чебышева с уровнем минус 50 дБ (сплошная линия – исходное АР, пунктирная линия – АР с кластером из двух излучателей, линия точками – АР с кластером из трех излучателей)

При увеличении числа антенн, которые составляют один кластер, максимум боковых лепестков ДН антенны становится больше. В пределе, при переходе к одному кластеру с одинаковой амплитудой на излучателях получим традиционный уровень порядка минус 13 дБ.

Таким образом максимальный уровень бокового излучения в кластерных антенных решетках при равном возбуждении одинаковых антенн и при заданных требований к максимальному уровню бокового излучения в целом выше, чем в антенных решетках с плавным изменением закона спада амплитуды от излучателя к излучателю. Так, путем математического моделирования можно показать, что для кластера из двух излучателей он составит минус 33 дБ.

В целом данного уровня бокового излучения достаточно для применения в метеонавигационных РЛС. При этом для РЛС, предназначенных для маловысотной навигации в Арктике, в соответствии с рисунками 1 и 5 можно для требуемого диапазона углов от 0 до минус 40° подавить уровень бокового излучения до существенных значений до минус 40 дБ при использовании кластеров из двух антенн.

Для воздушных судов с большой высотой полета можно улучшить ситуацию с уровнем бокового излучения в нижней полусфере, незначительно снизив его максимум, но существенно уменьшив средний уровень для других боковых лепестков ДН антенны. Для этого можно применить модифицированное АР Дольфа-Чебышева [14]. Оно формируется из исходного путем создания независимых идентичных амплитуд

для нижней и верхней строк антенн, которые возбуждаются противофазно. Тем самым получается создать в пространстве несимметричную в вертикальной плоскости ДН антенны, у которой, с одной стороны от нормали к раскрытию, уменьшается уровень бокового излучения. Это демонстрирует рис.6, на котором максимальный УБЛ уменьшен с минус 33 до минус 34 дБ, а средний уменьшен на 3,5 дБ.

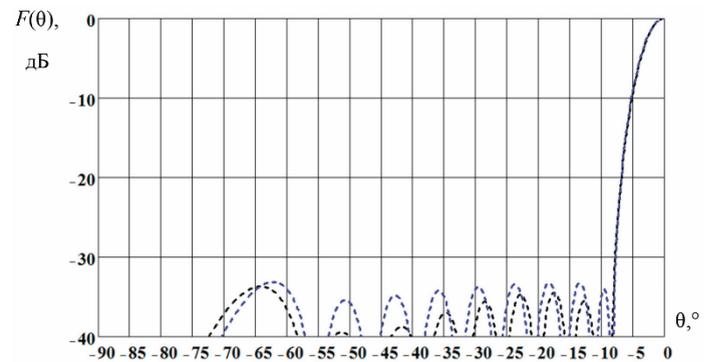


Рис. 6. ДН антенны, полученные на базе ступенчатого АР Дольфа-Чебышева (с заданным уровнем минус 34 дБ и двумя антеннами в кластере – синий пунктир) и его модификацией для несимметричной ДН с малым уровнем боковых лепестков в нижней полусфере (черный пунктир)

Механический способ сканирования не всегда приемлем в силу ограничений на размеры обтекателя относительно малого БПЛА. В этой связи целесообразно использовать электронное управление лучом на неподвижном раскрытии. Таким образом, следующий шаг исследования, определить при каких условиях допустимо подключение одного кластера АР не только к одному аттенуатору, но и к одному СВЧ фазовращателю. Для данного случая характерно не только ступенчатое распределение амплитуды, но и ступенчатое распределение фазы. Пример подобного распределения приведен на рисунке 7, где сплошной линией показано заданное линейное распределение фазы по излучателям с 1-го по 12-ый, а точками отмечены значения фазы при его ступенчатой аппроксимации.

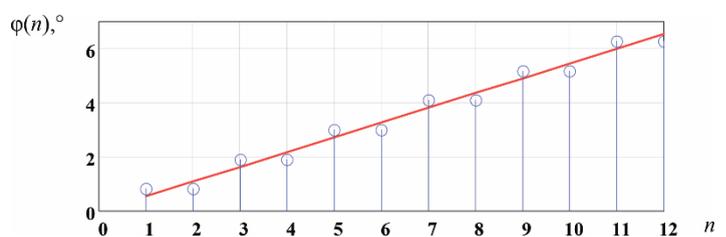


Рис. 7. Фазовое распределение по линейке излучателей, сплошная линия – заданное распределение, а линия из точек – его аппроксимация в кластере из двух излучателей

В результате такого подхода формируемая ДН антенной решеткой отличается повышенным уровнем бокового излучения в определенном угловом секторе. Если полет носителя бортовой РЛС осуществляется на относительно малых высотах, то тогда прием сигналов, как было показано ранее может быть осуществлен при реализации принципа стробирования по дальности, исключая область альтиметровых отражений и ближние дальности.

В определенном маловысотном коридоре для полетов в заполярье можно ограничиться приемом в секторе углов угла места до минус 40° . Это означает, что если при этом задать максимально допустимый уровень бокового излучения, допустим минус 28 дБ согласно рекомендациям [6], то можно установить, что можно реализовать сектор электронного сканирования в вертикальной плоскости от минус 20° до 20° . При этом он будет удовлетворять требованиям стандарта [15], в котором достаточный диапазон углов управления лучом составляет от минус 15° до 15° .

Таким образом можно реализовывать кластеры с вдвое уменьшенным числом аттенуаторов и СВЧ фазовращателей при определенных ограничениях на угловой сектор сканирования, который с одной стороны еще позволяет решить поставленную функциональную задачу в бортовой РЛС, как например, задачу метеонавигации для относительно малых высот полета, а с другой позволяет реализовать эффективное многоспектральное зондирование арктической пустыни в заполярных широтах или ледовой обстановки в акватории Северного Морского Пути, эффективное экономическое развитие которого сопровождается ростом трафика перевозок [16].

Пример ДН с установкой луча в крайнее положение по углу места для сектора обзора по углу в 40° представлен на рисунке 8.

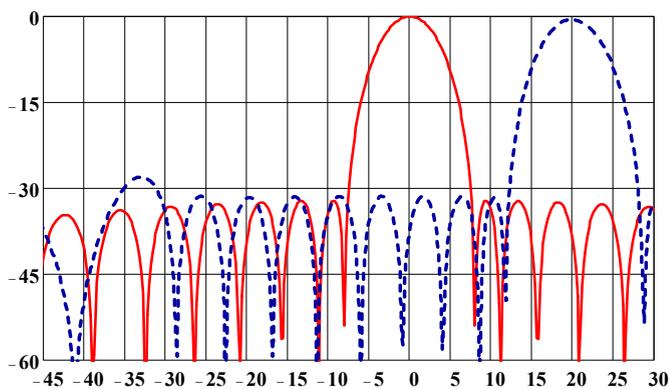


Рис. 8. Исходная ДН (сплошная линия) и ДН антенной решетки с кластерами излучателей (пунктирная линия), на которых реализуется как ступенчатое амплитудное, так и ступенчатое фазовое распределения при электронном отклонении луча

Антенная решетка, в которой осуществляется электронное сканирование для указанного случая состоит из двух излучателей, для которых характерно как одно значение амплитуды, так и одно значение фазы.

Расширить возможности кластерных решений для снятия ограничений на диапазон углов сканирования возможно, но для этого необходимо реализовать другое техническое исполнение кластера антенной решетки, которое позволит иметь одну точку подвода СВЧ мощности к излучателям, но само распределение фаз на излучателях менять независимо. Для этого можно использовать систему из трех слоев: слой полоскового делителя, соединяемого с волноводными ферритовыми фазовращателями Реджиа-Спенсера [17], с выхода которых возбуждаются микрополосковые излучатели.

В этом случае фазовое распределение перестает быть ступенчатым, а остается только ступенчатое распределение по амплитуде, однако стоимость такой антенной решетки становится более высокой.

Заключение

Рассмотрены разные вариации исполнения антенных систем для выполнения задачи для метеонавигации с учетом относительной малых высот полета авиационных неуправляемых платформ, на которых размещена бортовая РЛС переднего обзора. На примере микрополосковой антенной решетки Ку диапазона показано, что при кластерной реализации антенной решетки по вертикали допустим минимальный размер кластера из двух элементов. В этом случае формируемая ступенчатость амплитудных распределений приводит к такому ограничению на минимальный уровень боковых лепестков, который является достаточным для обеспечения эффективной метеонавигации при механическом качании полотна антенны по вертикали. Если использовать двумерное электронное сканирование с реализацией фазового ступенчатого распределения, то приходится ограничивать и потенциальный сектор сканирования по углу места. Однако такое ограничение не нарушает требования ARINC-708 к требуемому диапазону углов места в метеонавигационных бортовых РЛС, поэтому можно использовать и антенную решетку с уменьшенным числом фазовращателей.

Литература

1. Kashiwara H., Ito K., Sri Sumantyo J. T., Gao S., Izumi Y., Namba K. X-band Circularly Polarized Microstrip Array Antenna for Full Polarization UAV-SAR // 2023 8th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), Bali, Indonesia, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/APSAR58496.2023.10388716.
2. Singh V. K., Singh S., Chowdhury S., Biswas S., Kumar A., Chakrabarti S. Ku-Band Planar Antenna with High Gain, Wider Bandwidth and Higher Power Handling Ability for Airborne Application // 2023 3rd International Conference on Range Technology (ICORT), Chandipur, Balasore, India, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICORT56052.2023.10249126.
3. Pedro Pina, Gonçalo Vieira. UAVs for Science in Antarctica // Remote sensing, no.7. vol. 14, 2022, pp.1-39. <https://doi.org/10.3390/rs14071610>.
4. Eischeid I., Soininen E.M., Assmann J.J., Ims R.A., Madsen J., Pedersen A.O., Pirotti F., Yoccoz N.G., Ravolainen V.T. Disturbance Mapping in Arctic Tundra Improved by a Planning Workflow for Drone Studies: Advancing Tools for Future Ecosystem Monitoring // Remote Sensing, no.13, vol.21, 2021, pp. 1-25. <https://doi.org/10.3390/rs13214466>.
5. Ryzhikov M. B. Requirements for On-Board Radar Antennas to Reduce False Detections of Arctic Clouds Due to the Presence of Re-Reflections from the Earth's Surface // 2023 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), St. Petersburg, Russian Federation, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/WECONF57201.2023.10148050.
6. Ryzhikov M. B. Investigation of Conditions for Reducing the Number of False Wind Shear Detections in the Onboard Ka-band Radar for Polar Latitudes // 2024 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), St. Petersburg, Russian Federation, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/WECONF61770.2024.10564603.
7. Рызжиков М. Б. Разработка микрополосковой решетки с наклонным раскрытием и сниженным числом элементов регулировки амплитудно-фазового распределения для маловысотной метеонавигации БПЛА в Арктике // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17. № 10. С. 13-19.
8. David Ison. Navigating Weather: A Pilot's Guide to Airborne and Datalink Weather Radar/ Aviation Supplies & Academics, Inc., USA, 2021.

ЭЛЕКТРОНИКА. РАДИОТЕХНИКА

9. *Bringi V. N., Kumar Vijay Mishra, Merhala Thurai.* Advances in Weather Radar: Precipitation sensing platforms (Radar, Sonar and Navigation). Scitech Publishing, USA, 2024, 542 p.

10. *Praveen K. M.* Planar Antennas: Design and Application, Publishing House CRC Press, USA, 2021, 346 p.

11. *Анпилогов В. Р., Зимин И. В., Чекушкин Ю. Н.* Диссипативные потери в микрополосковых линиях и микрополосковых антеннах // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2018. Т. 5. № 3. С. 60-69.

12. Standard RTCA DO-220. A.2016. Minimum Operational Performance Standards for Airborne Weather Radar Systems. Washington, United States. 2016. 210 p.

13. *Ashok K. Agrawal.* Practical Aspects of Active Phased Array Antenna Development/ London, Artech House, 2023, 261 p.

14. *Бестужин А. Р., Рыжиков М. Б., Новикова Ю. А., Киришина И. А.* Оценка эффективности применения антенн с несимметричной диаграммой направленности для снижения влияния помех от земной поверхности на обнаружение со средней частотой повторения в

бортовых импульсных радиолокационных станциях//Радиотехника. 2023. Т. 87. №6. С. 32-40.

15. Standard ARINC708A-3. Airborne Weather Radar with Forward Looking Windshear Detection Capability, ARINC, Cedar Rapids, Iowa, USA. 1999, 120 p.

16. *Nakagawa A.* Perspectives of Northern Sea Route sustainable development // Intelligent engineering economics and Industry 5.0 (IEEEI_5.0_INPROM): Collection of works of the international scientific and practical conference, Saint Petersburg, Polytechnic Press, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2024, pp. 107-111.

17. *Гуськов А. Михайлов Н.* Быстродействующие ферритовые фазовращатели Реджиа-Спенсера для современных ФАР на основе ВРС // СВЧ-электроника. 2021. Т.16., № 1, с. 28-32.

18. *Чиров Д. С., Лобов Е. М.* Выбор сигнально-кодовой конструкции для командно-телеметрической линии радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами средней и большой дальности // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Т. 11. № 10. С. 21-28.

REDUCING THE LEVEL OF SIDE LOBES IN THE CLUSTER MICROSTRIP ANTENNA ARRAYS OF AIRBORNE WEATHER RADARS FOR POLAR LATITUDES

Maksim B. Ryzhikov, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia, maxrmb@yandex.ru

Abstract

When solving the problem of on-board meteorological navigation for automatically controlled aircraft platforms or small aircraft both in the Arctic geographical zone and in the temperate zone, one of the key tasks in choosing a safe flight path is the requirement to bypass or fly over zones in which, based on the analysis of data obtained in the reflected signal, the presence of dangerous weather conditions for flight is established conditions: thunderstorms, intense precipitation in the form of snow or rain, turbulence or wind shear. As the results of research show, including for polar latitudes, by reducing the level of lateral radiation of antennas in the lower hemisphere, it is possible to reduce the probability of false detections of dangerous weather formations that occur after processing signals re-reflected from the underlying surface. This problem is especially relevant if the carrier performs a low-altitude flight on-board radar. If it is possible to implement the traditional amplitude distribution, it is possible to reduce the level of the side lobes to relatively small values (minus 28 dB or less), at which no false zones with dangerous weather conditions are observed on the on-board radar screen. However, as the results of the study show, in cluster antenna arrays with a single amplitude excitation of combined radiators, such side lobes arise, the maximum level of which is no longer regulated by the amplitude distribution. The ways of reducing these side lobes (including only in the lower hemisphere) are investigated in this work. The mathematical apparatus of the theory of antennas and antenna arrays was actively used in the work, as well as numerical modeling using software based on a computer environment of matrix models, with integrated libraries for calculating the parameters of individual microstrip paths. By modeling, we investigate the levels of side lobes characteristic of cluster microstrip antenna arrays with different ways of combining emitters into groups, as well as explore ways to reduce it by implementing an upgraded amplitude-phase Dolph-Chebyshev distribution, leading to an asymmetric radiation pattern with a reduced radiation level in the lower hemisphere. The results of synthesis and modeling of the radiation characteristics of Ka-band antenna arrays with a reduced level of side radiation are presented, confirming the formation of an unstoppable side lobe, the cause of which is the clustering of the antenna array, performed in order to reduce the cost of the product by reducing the number of active controls of the amplitude-phase distribution of elements. The results of synthesis and modeling of the radiation characteristics of Ka-band antenna arrays with a reduced level of side radiation are presented, confirming the formation of an unstoppable side lobe, the cause of which is the clustering of the antenna array, performed in order to reduce the cost of the product by reducing the number of active controls of the amplitude-phase distribution of elements.

Keywords: radar, side lobes, cluster arrays, directional pattern, weather conditions, Arctic

This work was supported by the Russian Science Foundation under grant no № 23-29-00044

References

- [1] V. K. Singh, S. Singh, S. Chowdhury, S. Biswas, A. Kumar and S. Chakrabarti, "Ku-Band Planar Antenna with High Gain, Wider Bandwidth and Higher Power Handling Ability for Airborne Application," *2023 3rd International Conference on Range Technology (ICORT)*, Chandipur, Balasore, India, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICORT56052.2023.10249126.
- [2] H. Kashihara, K. Ito, J. T. Sri Sumantyo, S. Gao, Y. Izumi and K. Namba, "X-band Circularly Polarized Microstrip Array Antenna for Full Polarization UAV-SAR," *2023 8th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR)*, Bali, Indonesia, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/APSAR58496.2023.10388716.
- [3] Pedro Pina, Gonçalo Vieira, "UAVs for Science in Antarctica", *Remote sensing*, no.7. vol. 14, pp.1-39/. 2022, <https://doi.org/10.3390/rs14071610>.
- [4] Eischeid I, Soininen EM, Assmann JJ, Ims RA, Madsen J, Pedersen A.O, Pirotti F, Yoccoz NG, Ravolainen VT, "Disturbance Mapping in Arctic Tundra Improved by a Planning Workflow for Drone Studies: Advancing Tools for Future Ecosystem Monitoring," *Remote Sensing*, no.13, vol.21, pp. 1-25, 2021, <https://doi.org/10.3390/rs13214466>.
- [5] M. B. Ryzhikov, "Requirements for On-Board Radar Antennas to Reduce False Detections of Arctic Clouds Due to the Presence of Re-Reflections from the Earth's Surface," *2023 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, St. Petersburg, Russian Federation, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/WECONF57201.2023.10148050.
- [6] M. B. Ryzhikov, "Investigation of Conditions for Reducing the Number of False Wind Shear Detections in the Onboard Ka-band Radar for Polar Latitudes," *2024 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, St. Petersburg, Russian Federation, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/WECONF61770.2024.10564603.
- [7] M. B. Ryzhikov, "Development of a inclined patch antenna array with reduced number of elements for adjusting the amplitude-phase distribution for low-altitude weather radar navigation of UAVs in the Arctic", 2023, *T-Comm*, vol. 17, no.10, pp. 13-19.
- [8] David Ison, "Navigating Weather: A Pilot's Guide to Airborne and Datalink Weather Radar", Aviation Supplies & Academics, Inc., USA, 2021.
- [9] V. N. Bringi, Kumar Vijay Mishra and Merhala Thurai, "Advances in Weather Radar: Precipitation sensing platforms (Radar, Sonar and Navigation)," Scitech Publishing, USA, 2024.
- [10] Praveen Kumar Malik, "Planar Antennas: Design and Applications," CRC Press, 2021.
- [11] V. R. Anpilogov, I. V. Zimin and Y.N. Chekushkin, "Dissipative losses in microstrip lines and microstrip antennas," *Radio engineering and space communications*, 2018. Vol. 5, no 3, pp. 60-69.
- [12] Standard RTCA DO-220. A.2016 (2016), Minimum Operational Performance Standards for Airborne Weather Radar Systems, RTCA, Washington, United States.
- [13] Ashok K. Agrawal. Practical Aspects of Active Phased Array Antenna Development. London, Artech House, 2023, 261 p.
- [14] A. R. Bestugin, M. B. Ryzhikov, Y. A. Novikova, I. A. Kirshina, "Evaluation of the effectiveness of using antennas with an asymmetric radiation pattern to reduce the influence of interference from the ground on detection with an average repetition rate in onboard pulse radars," *Journal Radioengineering*, 2023, vol. 87, no. 6, pp. 32-40
- [15] Standard ARINC708A-3 (1999), Airborne Weather Radar with Forward Looking Windshear Detection Capability, ARINC, Cedar Rapids, Iowa, USA.
- [16] A. Nakagawa, "Perspectives of Northern Sea Route sustainable development," *Intelligent engineering economics and Industry 5.0 (IEEI_5.0_INPROM): Collection of works of the international scientific and practical conference*, Saint Petersburg, Polytechnic Press, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2024, pp. 107-111.
- [17] A. Guskov, N. Michailov, "High-speed ferrite Regia-Spencer phase shifters for modern phased array antennas based on waveguide distribution systems," *Microwave Electronics magazine*, 2021. Vol. 16, no. 1, pp. 28-32.
- [18] D. S. Chirov, E. M. Lobov, "Choice of signal-code constructure for the command-telemetry radio communication line with medium and long range unmanned aerial vehicles," *T-Comm*. 2017. Vol. 11, no. 10, pp. 21-28.

Information about author:

Maksim B. Ryzhikov, Ph.D. (Tech.), Associate Professor, Department "Radio-engineering and Fiber-optic Complexes", Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia