

РАЗРАБОТКА МИКРОПОЛОСКОВОЙ РЕШЕТКИ С НАКЛОННЫМ РАСКРЫВОМ И СНИЖЕННЫМ ЧИСЛОМ ЭЛЕМЕНТОВ РЕГУЛИРОВКИ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛЯ МАЛОВЫСОТНОЙ МЕТЕОНАВИГАЦИИ БПЛА В АРКТИКЕ

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-10-13-19

Manuscript received 20 August 2023;
Accepted 17 September 2023*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект № 23-29-00044***Рыжиков Максим Борисович,**
ГУАП, Санкт-Петербург, Россия, maxrmb@yandex.ru**Ключевые слова:** заполярные широты, радиолокация, микрополосковая антенная решетка, диаграмма направленности, уровень боковых лепестков

Постановка проблемы. Освоение труднодоступных регионов при отсутствии наземных систем навигации и источников данных о метеонавигационной обстановке может сопровождаться потенциальными авиационными катастрофами, в том числе из-за быстро меняющихся погодных условий. Для малой арктической авиации возникает необходимость внедрения бортовых радиолокационных станций, решающих различные задачи: от обеспечения безопасности полета до анализа обстановки на море в районе следования сопровождаемого морского судна. В условиях полета на малой высоте переотражения от подстилающей поверхности, поступающие по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны, приводят к ложному выявлению в РЛС опасных для полета областей. В работе осуществлен поиск требований к диаграмме направленности, ориентированной на решение задачи метеонавигации в заполярных широтах с отсутствием ложных областей при полетах над снежной пустыней. Кроме того, представлены этапы разработки антенны с наклонным раскрывом и отклоненным основным лучом диаграммы направленности, гарантирующей требуемый малый уровень бокового излучения в нижней полусфере. **Методы исследования.** В работе активно использовался математический аппарат теории антенных решеток и обнаружения поверхностно и объемно протяженных радиолокационных целей. **Цель.** Обосновать перспективность применения антенных решеток с наклонным раскрывом и лучом для решения задач метеонавигации. Изложить основные этапы синтеза микрополосковой антенны, которая отличается малым уровнем бокового излучения в нижней полусфере. **Результаты.** Приведены результаты моделирования, позволяющие устанавливать требования к параметрам антенных систем для метеонавигационных бортовых РЛС, работающих в заполярных широтах. Представлены результаты сравнительного анализа наклонной микрополосковой антенной решетки и антенной решетки с наклоном раскрыва и наклоном луча противоположного знака для уменьшения уровня бокового излучения. **Практическая значимость.** Результаты могут быть использованы при определении требований к характеристикам излучения, а также при разработке оригинальных конструкций микрополосковых антенных решеток для малогабаритных бортовых метеонавигационных РЛС для маловысотных носителей.

Информация об авторе:**Рыжиков Максим Борисович,** к.т.н., доцент, кафедра "Радиотехнических и оптико-электронных комплексов", ГУАП, Санкт-Петербург, Россия**Для цитирования:**

Рыжиков М.Б. Разработка микрополосковой решетки с наклонным раскрывом и сниженным числом элементов регулировки амплитудно-фазового распределения для маловысотной метеонавигации БПЛА в Арктике // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №10. С. 13-19.

For citation:

Ryzhikov M.B. (2023) 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. T-Comm, vol. 17, no.10, pp. 13-19. (in Russian)

Введение. Постановка задачи исследования.

Относительно малые высоты полета беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в заполярных широтах напрямую связаны с более благоприятными условиями для обнаружения наземных ориентиров или картографирования, эффективностью информационного обеспечения морских судов в части: анализа наличия других судов на море, при оценке бальности морского волнения или при формировании данных о структуре и положении ледовых масс в районе следования судна. Наличие соответствующего информационного обеспечения позволяет улучшить навигацию морских судов и повысить безопасность транспортировок по Северному морскому пути [1].

Получение информации в этом случае может быть реализовано как в радиолокационном, так и в оптическом диапазоне. Но для антенн оптико-электронных систем арктического назначения необходимо предусматривать наличие защитных механизмов, например, узкополосных интерференционных покрытий, снижающих помеху обратного рассеяния из-за солнечной засветки от ярко отражающего снежного покрова [2,3]. Для антенн же бортовых многофункциональных радиолокаторов защита от переотражений, приходящих по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны, необходима как для обеспечения качества радиовидения (за счет пространственной фильтрации синтезированного луча от множественных дифракционных лепестков), а со стороны решения задач метеонавигации для корректного выбора траектории и снижения числа ложных обнаружений зон сильной облачности, опасной турбулентности или сдвига ветра [4].

Для бортовых метеонавигационных бортовых локаторов разработаны стандарты минимальных требований к тактико-техническим характеристикам, в частности к ширине основного луча (ШОЛ) и уровню боковых лепестков (УБЛ) диаграммы направленности (ДН) антенны [5,6]. Они позволяют говорить о том, что минимальная ШОЛ не должна превышать 6-8°, а уровень УБЛ должен быть не более, чем минус 23 дБ.

Однако для заполярных широт указанные требования не определены. Их уточнение напрямую связано с тем, что арктические метеоявления отличаются от тех, которые характерны для умеренных широт [7].

В первой части исследований найдем рекомендации к ШОЛ и УБЛ для случая обнаружения типового арктического слоисто дождевого облака в условиях приема помеховых переотражений от снежной пустыни по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны, а также рассмотрим задачу улучшения качества метеонавигации в ближней зоне бортовой РЛС, где наиболее сильны альтиметровые переотражения. Во второй части исследования будет описано предлагаемое техническое решение на основе класса антенн с наклонным раскрытием и лучом, улучшающее условия обнаружения опасной облачности в заполярных широтах на ближних дальностях.

1. Простая методика оценки рекомендуемых требований по ширине основного луча и рекомендации к уровню боковых лепестков ДН антенны при обнаружении опасной для полета арктической облачности

Определение дальности обнаружения опасной для полета облачности в умеренных широтах основано на понятии стандартной грозовой ячейки (СГЯ) [8]. СГЯ в пространстве представляет собой цилиндр с круглым основанием (поперечным

сечением) с диаметром $d_{обл}=5556$ м, расположенным по нормали к направлению зондирования (в горизонтальной относительно земной поверхности плоскости). Высота данного цилиндра равна протяженности элемента разрешения (ЭР) по дальности $\Delta R = 0,5ct_{имп}$, где c – скорость света, $t_{имп}$ – длительность зондирующего импульса. Таким образом, по дальности СГЯ полностью заполняет ЭР. Угловые размеры отражающей области в ЭР зависят от дальности R до СГЯ и ШОЛ $\Delta\alpha$. При дальностях $R \leq R_{гр}$ (первый участок дальностей), где

$$R_{гр} = d_{обл} / \Delta\alpha, \tag{1}$$

исследуемый ЭР полностью входит в СГЯ, а объем отражающей области (метеоцели) равен объему ЭР. При дальностях $R > R_{гр}$ (второй участок дальностей) СГЯ полностью помещается внутри ЭР, объем метеоцели равен объему СГЯ. Соответственно типовой объем метеоцели V_M для умеренных широт равен

$$V_M = 0,25\Delta R\pi d_M^2; \quad d_M = \begin{cases} \Delta\alpha R & \text{при } R \leq R_{гр}; \\ d_{обл} & \text{при } R > R_{гр}. \end{cases}$$

где d_M – диаметр поперечного сечения метеоцели.

Уравнение (1) является по сути дела критерием для поиска максимально допустимой оптимальной ширины луча при обнаружении СГЯ. Если принять для БПЛА максимальную дальность обнаружения СГЯ порядка 50 км, то можно рекомендовать максимальную ШОЛ $\Delta\alpha = 6,4^\circ$.

При обнаружении опасного арктического слоисто-дождевого облака желательно учитывать его типовые максимальные размеры. В соответствии с [7] для заполярных широт протяженность арктического облака по вертикали уменьшается по сравнению со случаем обнаружения СГЯ с 5,6 до 4,5 км. В этом случае следует рекомендовать ШОЛ $\Delta\alpha = 5,2^\circ$.

При этом, с одной стороны, для минимизации размера антенны лучше использовать более короткие длины волн λ , а с другой – для одновременной реализации оценки опасности гроз и турбулентностей (с максимальным среднеквадратическим отклонением (СКО) скорости ветра σ за одно зондирование soblности условие:

$$R_{max} = \frac{cT_{имп}}{2} = \frac{c}{2F_{имп}} = \frac{c}{2\left(2\left(6\frac{\sigma}{\lambda}\right)\right)} = \frac{c\lambda}{24\sigma},$$

которое говорит, например, о том, что на дальностях до 50 км в 2-х сантиметровой РЛС можно однозначно измерять СКО до 5 м/с. Такое значение СКО уже можно считать опасным для полетов БПЛА, так как она опасно даже при полетах более устойчивых к изменениям воздушных потоков вертолетов [9].

Это говорит о том, что в целом для БПЛА, летающего в заполярных широтах, можно рекомендовать выбранную ШОЛ менее $5,2^\circ$ и масштаб дальности не более 50 км.

Требуемый уровень боковых лепестков выбирается по отсутствию ложных обнаружений, приходящих по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны по методике, приведенной в [10].

Параметры подстилающей поверхности типа снег на земле можно найти в [11]. При $\lambda=2$ см она имеет удельную эффективную площадь рассеяния, равную минус 17 дБ.

В ходе оценки требуемого уровня боковых лепестков последний снижался до тех пор, пока превышение порога опасности по значению радиолокационной отражаемости в 20 дБZ не начинало наблюдаться только в двух смежных дискретах дальности, соответствующих области альтиметровых отражений. Исследование было проведено для следующих типовых параметров БРЛС и маловысотного полета: коэффициент усиления антенны 900; размер элемента разрешения по дальности 100 м; мощность в импульсе 500 Вт; высота полета БПЛА 150 метров.

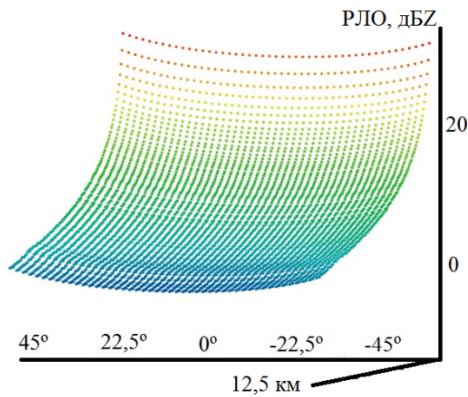


Рис. 1. Двумерный график распределения РЛО от угла сканирования и дальности

Проиллюстрировать, как формируется ложная область опасной облачности в метеонавигационной РЛС, можно с использованием результатов моделирования, представленных на рис. 1, в виде зависимости РЛО от направления зондирования и дальности до метеоцели (на ближнем интервале дальностей). Учтем, что за потенциально опасный уровень снежных осадков можно принять уровень РЛО в 20 дБZ (на графике желтый и красный цвета). Все, что меньше не представляет опасности для полета. Это связано с тем, что при указанной РЛО в соответствии с моделью Карлсона [11] идет выпадение снега с интенсивностью 0,25 мм/час, что может ухудшить снизить дальность работы бортовых систем технического зрения оптического диапазона до 500 м [12].

Как показали результаты моделирования, при уровне боковых лепестков порядка минус 32 дБ, ложная опасная облачность при полете на высоте порядка 300 метров, наблюдается на дальности от 300 до 500 метров, то есть занимает всего два смежных дискрета дальности, в которых можно не производить расчет РЛО в алгоритмах вторичной обработки радиолокационной информации.

При этом основной луч при выбранной ширине луча, высоте полета и сканировании по нормали к антенному полотну касается поверхности земли уже на дальности

$$R=2H/\Delta\alpha.$$

Так для высоты полета в $H=150$ метров это уже 3,3 км. Это говорит о том, что при маловысотном полете следует обеспечить подъем луча антенны на половину ширины основного луча по углу места. Это можно сделать путем соответствующего наклона раскрыва антенны.

Тогда максимальное падение коэффициента усиления антенны относительно направления на центр типового арктиче-

ского облака, расположенного на дальности, равной половине от рекомендованного масштаба дальности в 50 км, составит величину

$$\Delta G = F^2 (0,5\Delta\alpha - \alpha_{ц.м}) \cos^2 (0,5\Delta\alpha - \alpha_{ц.м}),$$

$\alpha_{ц.м}$ – угол между горизонтальной плоскостью и направлением на центр типового облака. Само типовое арктическое облако имеет максимальную радиолокационную отражаемость, которая заключена в интервале высот не более $\Delta H=3,5$ км, а нижняя граница (усредненная по временам года) начинается от высоты порядка 750 метров.

Это означает что ожидаемый центр облака удален от поверхности земли на расстояние порядка 2,5 км, а $\alpha_{ц.м} \approx 5,4^\circ$ при высоте полета 150 м.

Таким образом падение КУ по направлению зондирования на центр облака, оценивается малой величиной в минус 0,02 дБ, что говорит о целесообразности использования формирования наклонного луча в бортовых РЛС маловысотных носителей в заполярных широтах.

Реализация микрополосковых антенн с наклонным лучом и наклонным раскрывом

Помимо наклона раскрыва антенны, равного полуширине основного луча, при наличии потенциального объема для размещения антенны следует рассмотреть и другие технические возможности, позволяющие достичь снижения уровня бокового излучения в нижней полусфере, что уменьшает уровень переотражений от земли и ведет к снижению вероятности ложного обнаружения опасных для полета метеопреобразований, что позволяет избегать лишних траекторных маневров носителя РЛС.

В данной статье рассматривается недорогое техническое решение, которое позволяет это выполнить. Оно заключается в использовании микрополосковых антенн с несимметричным модернизированным амплитудным распределением Дольфа-Чебышева, которое реализуется путем изменения коэффициентов усиления отдельных излучателей, а наклон луча реализуется как за счет фазового набега посредством задержки в полосковых линиях, но при этом раскрыв антенны наклонен вверх на больший, чем половина ширины основного луча, угол относительно горизонта. Это позволяет дополнительно снизить уровень бокового излучения в нижней полусфере.

Для зондирования в метеонавигации применяется горизонтальная поляризация, поскольку она способствует повышению отраженной мощности от осадков в виде потенциального дождя, поэтому при формировании амплитудного распределения будем использовать запитку отдельных излучателей полосковой линией, подходящей к ним сбоку.

Внешний вид геометрической модели такой микрополосковой антенны приведен на рисунке 2.

Расчет длины отрезка микрополосковой линии (МПЛ) $d_{МПЛ}$ между точками А и Б на рисунке 2, соединяющего излучатели (с расстоянием по вертикали между ними, равном d_z) должен формировать определенный фазовый набег между излучателями, который гарантирует отклонение луча на угол α_1 .

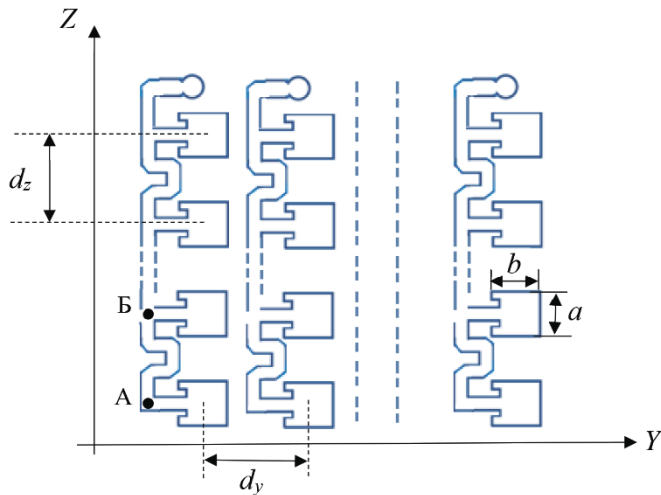


Рис. 2. Модель микрополосковой антенной решетки с горизонтальной поляризацией (пунктирными линиями обозначены не нарисованные повторения линеек прямоугольных излучателей)

При принятии решения о прямом отрезке МПЛ, соединяющем точки А и В, и выборе расстояния $d_z = \lambda/2$, получаем относительно простое соотношение:

$$\alpha_1 = \arcsin\left(2\nu - (-1)^{\xi-1} \sqrt{\epsilon_{эфф}}\right),$$

$\nu = -2, -1, 0, 1, 2, \dots$ – целое число, характеризующее порядок дифракционного максимума для формирования луча ДН, использующегося в качестве основного, $\xi=2$ или $\xi=1$ при запитке линеек излучателей сверху или снизу соответственно.

Значение эффективной диэлектрической проницаемости зависит от ширины линии $a_{мпд}$ толщины СВЧ платы h и ее относительной диэлектрической проницаемости ϵ [13]:

$$\epsilon_{эфф} = \frac{\epsilon + 1}{2} + \frac{\epsilon - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{a_{мпд}}}}$$

При выборе СВЧ диэлектрика для реализации антенны следует учесть, что с ростом ϵ увеличивается как мощность, так и число распространяющихся в подложке типов поверхностных волн [14]. Если определить относительную электрическую толщину подложки соотношением

$$h^* = \frac{h}{\lambda \sqrt{\epsilon - 1}},$$

то число способных распространяться в ней волн типа ТМ и ТЕ ($m_{ТМ}$ и $m_{ТЕ}$) можно оценить по системе уравнений [14]

$$\begin{cases} m_{ТЕ} = m, & \text{если } \pi(m - 0,5) < h^* \leq \pi(m + 0,5); \\ m_{ТМ} = q + 1, & \text{если } q\pi < h^* \leq \pi(q + 1), \end{cases}$$

где $m=1,2,3, \dots$; $q=0,1,2, \dots$ и т.д. Из данной системы уравнений следует, что в подложке всегда распространяется хотя бы одна поверхностная волна типа ТМ₀. Мощность, которая затрачивается на распространение поверхностной волны, уменьшается со снижением толщины подложки.

Так, при выборе толщины, соответствующей условию:

$$h < 0,05 \lambda \epsilon^{-0,5}$$

можно не рассматривать потери на распространение электромагнитных волн в толщине подложки. При длинах волн зондирующих сигналов $\lambda \approx 0,02$ м для данной цели был использован СВЧ диэлектрик RT/duroid 6006 толщиной $h=0,5$ мм с диэлектрической проницаемостью $\epsilon=6,15$ [15].

Это позволяет достичь угла отклонения луча вниз $\alpha_1 \approx 24^\circ$ с установкой раскрыва антенны под углом наклона $\alpha_2 \approx 27^\circ$ вверх. Согласно данным [16] это позволяет существенно снизить значения максимальной удельной ЭПР земной поверхности, минимум на 15-20 дБ, исключив из приема зеркальную компоненту и малые углы наклона, улучшив корректность оценки опасности метеообразований, в том числе на малых дальностях в области альтиметровых отражений.

В результате, согласно результатам моделирования, представленным в [17], при уровне бокового излучения в нижнюю полусферу не более минус 28 дБ гарантированно пропадет наличие ложных обнаружений опасных для полета метеообразований, полученных при отражениях от заснеженной поверхности, кроме области альтиметра.

Выбор расстояния d_y должен удовлетворять условию и соотношениям:

$$\begin{aligned} d_y &\geq 1,7b + a_{мпд}; & b &= \frac{\lambda}{2\sqrt{\epsilon_{эфф}}} - 2\Delta b; \\ \Delta b &= 0,412d \frac{\epsilon_{эфф} + 0,3}{\epsilon_{эфф} - 0,258} \frac{a^*}{h} + 0,264; & a^* &= 0,5\lambda \sqrt{\frac{2}{1+\epsilon}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Ширину МПЛ можно найти, задав определенное значение сопротивления МПЛ R , а также решив уравнение

$$\begin{aligned} &\frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{эфф}} \left(1,393 + \frac{a_{мпд} + \delta a}{d} + 0,667 \ln \left(1,44 + \frac{a_{мпд} + \delta a}{d} \right) \right)} - R = 0; \\ \delta a &= \frac{1,25t}{\pi} \left(1 + \ln \left(\frac{4\pi a_{мпд}}{t} \right) \right), \end{aligned}$$

где t – толщина проводящего слоя на поверхности МПЛ. Задание величины $R=50$ Ом позволяет выбрать $d_y = d_z$.

Рассмотрим далее особенности синтеза модифицированного амплитудного распределения для получения малого уровня бокового излучения в нижней полусфере. Оно производится следующим образом. Вначале производится расчет классического амплитудного распределения Дольфа-Чебышева с заданным уровнем бокового излучения на всех вертикальных линейках излучателей антенной решетки, кроме двух крайних, для которых формируются независимые значения амплитуд и фаз возбуждающих элементов. Принцип такой замены показан на рисунке 3.



Рис. 3. Принцип модернизации амплитудного распределения Дольфа-Чебышева

Фазы и амплитуды находятся из условия минимизации излучения в области первых боковых лепестков перебором значения фаз с шагом в $0,5^\circ$, а амплитуд в $0,02$ от нормированного максимума исходного амплитудного распределения.

Такой синтез при заданном уровне боковых лепестков в минус 28 дБ позволил получить антенну с несимметричной ДН в вертикальной плоскости, гарантирующей уровень боковых лепестков не более минус 34 дБ в нижней полусфере и минус 25 дБ в верхней (см. рис. 4).

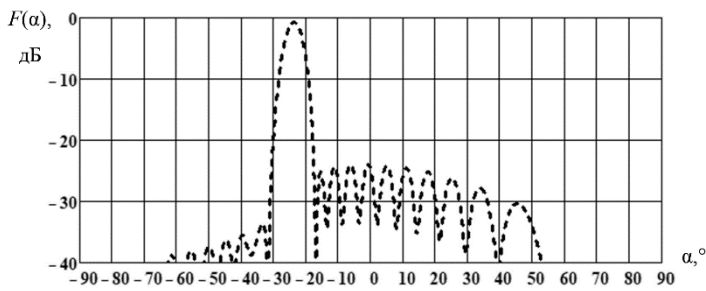


Рис. 4. Диаграмма направленности в вертикальной плоскости для антенны с наклонным раскрывом и лучом

Само амплитудное распределение реализуется за счет изменения ширины излучателей по следующей методике.

Для синтеза амплитудного распределения для всех излучателей сохраняется неизменной их длина, а, следовательно, и резонансная частота, что позволяет формировать решетки с фиксированным межэлементным расстоянием между ними.

Однако, при реализации наиболее простой конфигурации системы питания, состоящей исключительно из МПЛ одинакового сопротивления необходимо учитывать, что минимальная ширина излучателя должна быть больше, чем ширина подходящей к ней МПЛ, что несколько ограничивает возможности реализации амплитудных распределений.

Кроме того, при реализации линеек из прямоугольных излучателей, соединяемых между собой МПЛ, следует при формировании амплитудного распределения или компенсировать потери мощности, возникающие на линии запитки каждого излучателя.

Значения амплитуд непосредственно связаны с коэффициентом направленного действия излучателей D_n пропорциональностью следующего вида $D_n \sim A_n^2$. При этом максимальный КНД в излучателе прямоугольного вида реализуется при соотношениях сторон излучателя, оцениваемых по формулам (2).

В рамках резонаторного подхода к расчету характеристик антенны ее излучение является суммой полей, формируемых на концах антенны вдоль ее длины, исходящих из двух щелей. КНД для каждой щели задается следующим выражениями:

$$D_n^*(a_n) = (k_0 a_n)^2 G(a_n);$$

$$G(a_n) = \left(\int_0^\pi (\sin(0,5k_0 a_n \cos\theta))^2 \frac{\sin^3 \theta}{\cos\theta} d\theta \right)^{-1}.$$

Общий КНД, учитывая взаимную проводимость, оценивается по формуле

$$D_n(a_n) = \frac{2D_n^*(a_n)}{1 + \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \frac{\sin(0,5k_0 a_n \cos\theta)}{\cos\theta} J_0(k_0 b \sin\theta) (\sin\theta)^3 d\theta},$$

где J_0 – обозначение функции Бесселя нулевого порядка.

Данная формула показывает, что изменением ширины a_n от минимального значения до a^* при котором обеспечивается максимальный КНД антенны можно достичь формирования амплитудного распределения с соответствующими относительными уровнями амплитуд $A_n \sim \sqrt{\frac{D_n(a_n)}{D_n(a^*)}}$.

Кроме этого, для получения заданного амплитудного распределения необходимо компенсировать падение мощности, в самой МПЛ, что можно сделать по формулам, приведенным в [18].

В заключительной части исследования необходимо было сравнить эффективность применения полученного технического решения с другими вариантами исполнения антенн для метеонавигационного локатора.

Целесообразно использовать сразу два критерия для сравнения. В качестве первого выступает оценка падения квадрата коэффициента усиления антенны G в направлении на центр арктического облака для рассматриваемого случая (индекс 1 в формулах ниже) по сравнению с другими вариантами исполнения (индекс 2), т.е.

$$Kr_1 = \frac{G_1}{G_2}.$$

Второй критерий основан на сравнении отношений

$$Kr_2 = \frac{G_1/U_1}{G_2/U_2},$$

где $U_{1(2)}$ – средний уровень бокового излучения в диапазоне углов, охватывающих первые три-четыре боковых лепестка в нижней полусфере (при условии отсутствия более высокого уровня излучения для дальних боковых лепестков) для предложенного и другого варианта исполнения антенны соответственно.

По первому критерию синтезированная антенна уступает аналогичной антенне с традиционным амплитудным распределением Дольфа-Чебышева и наклонным раскрывом 0,45 дБ, а по второму превосходит на 1,5 дБ, что говорит о потенциально возможно улучшении на 1 дБ в области боковых лепестков близких к главному лучу, при этом, вследствие значительного угла наклона раскрыва вверх, наблюдается дополнительное снижение уровня мощности сигнала, приходящего из области альтиметра на 15-20 дБ, что гарантирует больший динамический диапазон работы бортовой РЛС и отсутствие ложных обнаружений на дальностях, близких к высоте полета.

Поскольку пространственная фильтрация помех от земли в предложенной антенне реализована путем простых конструктивных решений, необходимо осуществлять более строгий контроль ее характеристик излучения на стадии производства. Это можно сделать с использованием методов и подходов, предложенных в работах [19, 20].

Заключение

Результаты исследований содержат рекомендуемые требования к формированию ДН антенн для бортовых метеонавигационных РЛС для заполярных широт и результаты синтеза, обеспечивающей данные требования, антенны. Она представляет собой микрополосковую решетку из прямоугольных излучателей, которая отличается не только простой конструкции, требующей применения фазовращателей или аттенуаторов СВЧ, но и лучшими показателями по снижению мощности помеховых сигналов, переотраженных от земной поверхности.

Литература

1. Миляков Д.Ф., Николашин Ю.Л., Щесняк С.С., Биденко С.И., Присяжюк С.П., Черный С.Г. Направления организации альтернативного радионавигационного телекоммуникационного обеспечения судоходства в арктической морской зоне // Информация и космос, 2020, № 3. С. 102-111.
2. Котликов Е.Н., Новикова Ю.А., Юрковец Е.В. Синтез ахроматических светоделительных покрытий для Фурье-спектрофотометров дальнего ИК-диапазона // Известия высших учебных заведений. Приборостроение, 2018, № 6. Т.61. С. 521-529.
3. E. Kotlikov., N. Lavrovskaya., Y. Novikova., G. Tereshchenko. Determination of optical constants of silicon CZ-SI and CVD using reflection spectra from the surface // AIP Conference Proceedings 2402, 020017, 2021, p. 20017.
4. Novikova Y.A., Ryzhikov M.B., Kryachko A.F., Kulik R.V. The Method of Calculation the Range of Dangerous Weather Areas in Airborne Radars with Signal Processing in the Frequency Domain // 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), pp. 1-7.
5. Standard RTCA DO-220. A.2016. Minimum Operational Performance Standards for Airborne Weather Radar with Forward-Looking Windshear Detection Capability. Washington: RTCA. 2016. 210 p.
6. Standard 708A-3. Airborne Weather Radar with Forward Looking Windshear Detection Capability. 1999. 120 p.
7. Брылёв, Г. Б., Гашина С. Б., Низдойминова Г. Л. Радиолокационные характеристики облаков и осадков. Л.: Гидрометеиздат, 1986, 231 с.
8. Standard RTCA DO-173. Minimum Operational Performance Standards for Airborne Weather and Ground Mapping Pulsed Radars. Washington: RTCA, 1985. 84 p.
9. Roland L. Bowles and Bill K. Buck. A Methodology for Determining Statistical Performance Compliance for Airborne Doppler Radar with

Forward-Looking Turbulence Detection Capability, Report NASA CR-2009-215769 by AeroTech Research under subcontract to ARINC, 2009. 48 p.

10. M. B. Ryzhikov, Y. A. Novikova, E. V. Kucherova and R. V. Kulik. Simulation of Accounting for the Impact of Ground Clutter on the Calculation of Hazard Index of the Degree of Danger of Clouds in the On-Board Pulse Doppler Weather Radar, 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), St. Petersburg, Russia, 2019, pp. 1-5.
11. Д. А. Садов, А. В. Христенко, А. В. Новиков, М. Е. Ровкин. Экспериментальное исследование рассеяния электромагнитных волн подстилающей поверхностью в диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн // Радиотехника и электроника, 2019. Т. 64. № 4. С. 356-360.
12. Баранов А.М. Видимость в атмосфере и безопасность полетов. Л: Гидрометеиздат. 1991. 206 с.
13. Панченко Б. А., Нефедов Е. И. Микрополосковые антенны. М.: Радио и связь. 1986. 143 с.
14. Лось В. Ф. Микрополосковые и диэлектрические резонаторные антенны. САПР-модели: методы математического регулирования. М.: ИПРЖР. 2002. 96 с.
15. RT/duroid® 6006/6010LM High Frequency Laminates [Электронный ресурс] URL: www.4pcb.com/RT-duroid%206006-6010 LM%20Laminate% 20Data% 20Sheet.pdf (дата обращения: 16.08.2023).
16. Шувалов Р.И. Разработка радиометрической модели снимков поверхности земли, формируемых по данным измерений космических радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны//Вестник московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия естественные науки, 2009. Т. 35. № 4. С. 99-118.
17. Ryzhikov M. B. Requirements for On-Board Radar Antennas to Reduce False Detections of Arctic Clouds Due to the Presence of 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.
18. В. Р. Анпилогов, И. В. Зимин, Ю. Н. Чекушкин. Диссипативные потери в микрополосковых линиях и микрополосковых антеннах//Радиотехника и космическая связь, 2018. Т. 5. № 3. С. 60-69.
19. Якимов А.Н., Бестугин А.Р., Киришина И.А. Оценка влияния случайных факторов на точность производственного контроля антенн по излучению // Датчики и системы, 2020. Т. 249. №7. С. 50-55.
20. Якимов А.Н., Бестугин А.Р., Киришина И.А. Оценка влияния конструктивных элементов на погрешность производственного контроля антенны по ее излучению // Датчики и системы, 2019. Т. 241. №11. С. 55-60.

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

Maksim B. Ryzhikov, SUAI, Saint Petersburg, Russia, maxrmb@yandex.ru

Abstract

Problem statement. The development of hard-to-reach regions in the absence of ground-based navigation systems and data sources on the meteorological situation can cause an increase in the number of aviation accidents. For small Arctic aviation, there is a need to introduce onboard radar stations that solve various tasks: from ensuring flight safety to analyzing the situation at sea in the area of the escorted vessel. In low-altitude flight conditions, re-reflections from the underlying surface coming along the side lobes of the antenna pattern lead to the identification of false areas dangerous for flight. The paper searches for the requirements for a directional pattern focused on solving the problem of meteorological navigation in polar latitudes. The stages of the development of an antenna with an inclined opening and a deflected main beam of the radiation pattern, which guarantees a very low level of lateral radiation in the lower hemisphere, are presented. *Research methods.* The mathematical apparatus of the theory of antenna arrays and detection of surface and volume extended radar targets was actively used in the work. *Purpose.* To substantiate the prospects of using antenna arrays with an inclined opening and a beam to solve meteorological navigation problems. To outline the main stages of the synthesis of a patch antenna, which is characterized by a low level of lateral radiation in the lower hemisphere. *Results.* The results of modeling are presented, which allow us to obtain requirements for the parameters of antenna systems for meteorological navigation onboard radars operating in polar latitudes. The results of a comparative

analysis of an inclined patch antenna array and an antenna array with an opening slope and an inclination of the beam of the opposite sign to reduce the level of lateral radiation are presented. *Practical significance.* The results of the work can be used in determining the requirements for radiation characteristics, as well as in the development of original designs of patch antenna arrays of reduced cost for small-sized airborne radars of low-altitude carriers in order to increase the probability of correct detection of dangerous weather formations for flight.

Keywords: polar latitudes, radar, patch antenna array, radiation pattern, side lobe level

References

1. D.F. Milyakov, Y.L. Nikolashin, S.S. Shchesnyak, S.I. Bidenko, S.P. Prisyazhnyuk, and S.G. Cherny, "Directions of organization of alternative radar navigation telecommunication support of navigation in the Arctic sea zone", *Information and Space*, 2020, no. 3, pp. 102-111.
2. E.N. Kotlikov, Y.A. Novikova, and E.V. Iurkovets, "Synthesis of achromatic light-splitting coating for Fourier spectrometers of far IR range", *Journal of Instrument Engineering*, 2018, vol.61, no. 6, pp. 521-529.
3. E. Kotlikov, N. Lavrovskaya, Y. Novikova, and G. Tereshchenko, "Determination of optical constants of silicon CZ-SI and CVD using reflection spectra from the surface", *AIP Conference Proceedings*, 2021, no. 2402, 020017, p. 20017.
4. M.B. Ryzhikov, Y.A. Novikova, A.F. Kryachko, and R.V. Kulik, "The Method of Calculation the Range of Dangerous Weather Areas in Airborne Radars with Signal Processing in the Frequency Domain", *2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems*, 2019, 4p.
5. Standard RTCA DO-220. A.2016 (2016), Minimum Operational Performance Standards for Airborne Weather Radar with Forward-Looking Windshear Detection Capability, RTCA, Washington, USA.
6. Standard ARINC 708A-3 (1999), Airborne Weather Radar with Forward Looking Windshear Detection Capability, ARINC, Cedar Rapids, Iowa, USA.
7. G.B. Brylev, S.B. Gashina, G.L. Nizdoimnoga, "Radiolokacionny'e xarakteristiki oblakov i osadkov [Radar characteristics of clouds and precipitation], Hydrometeoizdat, Leningrad," 1986, USSR.
8. Standard RTCA DO-173, Minimum Operational Performance Standards for Airborne Weather and Ground Mapping Pulsed Radars. RTCA, Washington, 1985, USA.
9. R.L. Bowles, and K.B. Bill, "A Methodology for Determining Statistical Performance Compliance for Airborne Doppler Radar with Forward-Looking Turbulence Detection Capability," Report NASA CR-2009-215769 by AeroTech Research under subcontract to ARINC, 2009, 48 p.
10. M.B. Ryzhikov, Y.A. Novikova, E.V. Kucherova, and R.V. Kulik, "Simulation of Accounting for the Impact of Ground Clutter on the Calculation of Hazard Index of the Degree of Danger of Clouds in the On-Board Pulse Doppler Weather Radar", *2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems*, 2019, 5 p.
11. D.A. Sadoy, A.V. Khristenko, A.V. Novikov and M.E. Rovkin, "Experimental investigation of electromagnetic wave scattering by the underlying surface in the range of centimeter and millimeter waves", *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2019, vol. 64, no. 4, pp. 356-360.
12. A.M. Baranov, "Visibility in the atmosphere and flight safety," Leningrad: Hydrometeoizdat, 1991, USSR.
13. B.A. Panchenko, and E.I. Nefedov, "Microstrip antennas," Moscow: Radio and communications, 1986, USSR.
14. V.V. Los, "Microstrip and dielectric resonator antennas. CAD models: methods of mathematical regulation," Moscow: IPRZHR, 2002, Russia.
15. RT/duroid® 6006/6010LM High Frequency Laminates, available at: www.4pcb.com/RT-duroid%206006-6010LM%20Laminate%20Data%20Sheet.pdf.
16. R.I. Shuvalov, "Development of a radiometric model of images of the Earth's surface formed from measurements of space radars with synthesized antenna aperture," *Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Natural Sciences Series*, 2009, vol. 35, no. 4, pp. 99-118.
17. 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*, 2023, 5 p.
18. 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.
19. A.N. Yakimov, A.R. Bestugin, and I.A. Kirshina, "Evaluation of the influence of random factors on the accuracy of production control of antennas by radiation", *Sensors and systems*, 2020, vol. 249, no. 7, pp. 50-55.
20. A.N. Yakimov, A.R. Bestugin, and I.A. Kirshina, "Evaluation of the influence of structural elements on the error of the antenna production control by its radiation", *Sensors and systems*, 2019, vol. 241, no. 11, pp. 55-60.

Information about author:

Maksim B. Ryzhikov, Ph.D.(Tech.), Associate Professor, Department "Radio-engineering and Fiber-optic Complexes", SUAI, Saint Petersburg, Russia