

Проектирование излучающей апертуры АФАР самолетной РЛС переднего обзора для системы наведения и посадки в автоматическом режиме

В.В. Чистюхин, К.С. Лялин, В.И. Орешкин, С.С. Меркулов, Ю.М. Мелёшин

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

APAA Radiating Aperture Design for Small-Size Aircraft Navigation and Automatic Landing System Radar

V.V. Chistyukhin, K.S. Lyalin, V.I. Oreshkin, S.S. Merkulov, Yu.M. Meleshin

National Research University of Electronic Technology, Moscow

Представлены результаты проектирования излучающей апертуры АФАР самолетной радиолокационной станции переднего обзора для системы наведения и посадки малогабаритных летательных аппаратов в автоматическом режиме. Показано, что рассмотренная методика проектирования позволяет в несколько раз сократить количество активных каналов приемной АФАР при сохранении основных электрических характеристик радиолокационной станции.

Ключевые слова: излучающая апертура; активная фазированная антенная решетка; радиолокационная станция; диаграмма направленности.

The results of designing the radiating APAA aperture of the aircraft forward view radar for automatic guidance and landing of aircraft have been presented. It has been shown that the considered design methods allow a several times reduction of the number of receiving APAA active channels while conserving the main electric characteristics of the radar unit.

Keywords: radiating aperture; active phased antenna array; radar; radiation pattern.

К самолетным радиолокационным станциям (РЛС) переднего обзора для системы посадки малоразмерных летательных аппаратов в автоматическом режиме, работающей в «ближней» зоне (порядка 300–500 м), предъявляются жесткие, а иногда противоречивые требования по массогабаритным и электрическим характеристикам [1]. С одной стороны, требуется минимизация массогабаритных характеристик, с другой – высокая разрешающая способность (порядка 5–10 м), сканирование лучом в секторе углов $\theta_0 \sim \pm 20^\circ$ в азимутальной плоскости и достаточно широкая диаграмма направленности (ДН) в угломестной плоскости (порядка 40–55°) без сканирования [2–4]. Известно, что разрешающая способность антенной решетки напрямую зависит от ширины ее ДН, которая, в свою очередь, зависит от размера апертуры решетки в данном сечении в соответствии с формулой

$$\Delta\theta_{0,5} = \frac{51^\circ \lambda}{L \cos \theta_0}, \quad (1)$$

где λ – рабочая длина волны; L – длина апертуры антенной решетки в данном сечении; θ_0 – максимальный угол сканирования.

При заданных требованиях на разрешающую способность и с учетом того, что $\theta_0 \sim \pm 20^\circ$, ширина ДН $\Delta\theta_{0,5}$ должна быть в пределах $1\text{--}1,5^\circ$. Учитывая данный сектор сканирования и заданную ширину ДН решетки в угломестной плоскости, межэлементное расстояние d можно рассчитать по формуле

$$d \leq \frac{\lambda}{\sin \theta_d + \sin \theta_0}, \quad (2)$$

где θ_d – угловое положение дифракционного максимума, при котором он подавляется ДН излучателя до уровня примерно -14 дБ.

Если принять $\theta_d = 70^\circ$ и учесть заданное значение θ_0 , то межэлементное расстояние $d \sim 0,7 \lambda$. Из теории активной радиолокации известно, что в этом случае в качестве ширины ДН следует принять произведение ДН передающей и приемной активной фазированной антенной решетки (АФАР) [5]. Если считать их идентичными, то при перемножении ДН происходит обужение совместной ДН с коэффициентом $\sim 0,7$. С учетом формулы (1) это приводит к длине апертуры АФАР в азимутальной плоскости $L_a \sim 20\text{--}30 \lambda$ и, соответственно, к требуемому количеству активных каналов АФАР в этой плоскости $N_a \sim 30\text{--}45$. В угломестной плоскости требования по ширине ДН можно удовлетворить при следующих значениях: $N_y \sim 3\text{--}4$ излучателя; размер апертуры $L_y \sim 2\text{--}3 \lambda$.

Таким образом, использование классического подхода к решению поставленной задачи приводит к необходимости применять либо одну приемопередающую АФАР с количеством активных каналов $N \sim 30\text{--}45$ (учитывая, что сканирование проводится только в азимутальной плоскости) и размером апертуры от $20 \lambda \times 2 \lambda$ до $30 \lambda \times 3 \lambda$, либо две разнесенные АФАР (приемную и передающую), каждая из которых имеет такое же количество каналов и размеры. В этом случае решение вопроса минимизации массогабаритных характеристик весьма проблематично. При этом важна и экономическая сторона, напрямую связанная с количеством активных каналов, используемых в АФАР. Например, в X-диапазоне стоимость только элементной базы одного передающего канала составляет примерно 400 долл., а приемного канала – 280 долл. (значительный вклад в цену канала вносят используемые фазовращатели, стоимость которых 180–200 долл.). С учетом изготовления механических корпусов, плат, монтажа и т.д. стоимость канала возрастает приблизительно в 1,5–2 раза. В результате стоимость системы посадки, состоящей из двух 40-элементных АФАР на прием и передачу, составляет 40–60 тыс. долл.

Проектирование АФАР. Для системы наведения, работающей в диапазоне от 2 км до «ближней» зоны, требования по разрешающей способности значительно мягче (порядка 100–300 м), сканирование лучом в секторе углов $\theta_0 \sim \pm 20^\circ$ в азимутальной плоскости и ДН в угломестной плоскости порядка $12\text{--}15^\circ$ без сканирования. Как показали предварительные расчеты, поставленным требованиям удовлетворяет антенная решетка с размером апертуры $L \sim 7 \lambda \times 3,5 \lambda$.

При проектировании АФАР переднего обзора учитывался немаловажный фактор – необходимость получения высокой развязки на прием и передачу (порядка 45–50 дБ).

Это нелегко реализовать в приемопередающем модуле, так как мощность на передачу в каждом канале может достигать десятка ватт. Кроме того, применение СВЧ-переключателей большой мощности неизбежно приводит к дополнительным потерям на передачу и на прием (примерно 1–1,5 дБ), к необходимости использования ограничителя мощности перед малошумящим усилителем в приемном канале (дополнительные потери ~ 1 дБ), что существенно ухудшает чувствительность приемной АФАР. Поэтому АФАР проектировалась с отдельными приемной и передающей решетками.

В качестве излучателя проектируемой АФАР предлагается использовать линейный вибратор, изготовленный по печатной технологии. В пользу выбора данного типа излучателя можно привести следующие аргументы:

- линейный вибратор имеет достаточно широкую рабочую полосу частот (легко реализовать до 10–15%);
- изменением геометрии вибратора (высоты расположения над экраном и угла наклона плеч) можно изменить ширину ДН в широком диапазоне;
- способ возбуждения линейного вибратора, изготовленного по печатной технологии, с помощью двухпроводной линии позволяет осуществлять его стыковку с приемным или передающим модулем АФАР в едином цикле изготовления без применения дополнительных разъемов и кабелей, что особенно важно в плане минимизации веса и стоимости всего изделия.

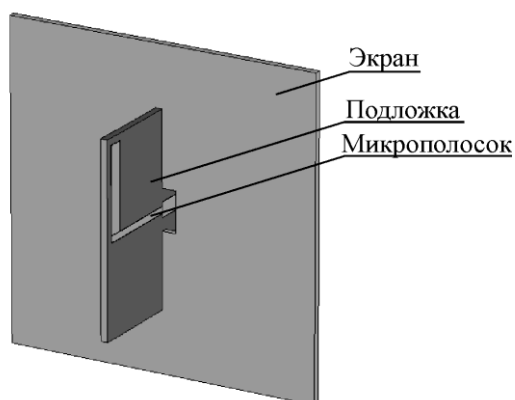


Рис.1. Модель печатного линейного вибратора

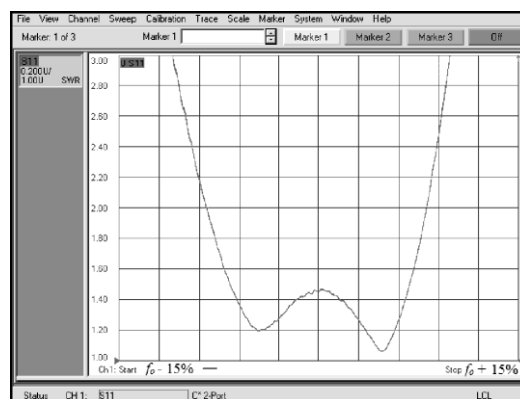


Рис.2. КСВН печатного линейного вибратора

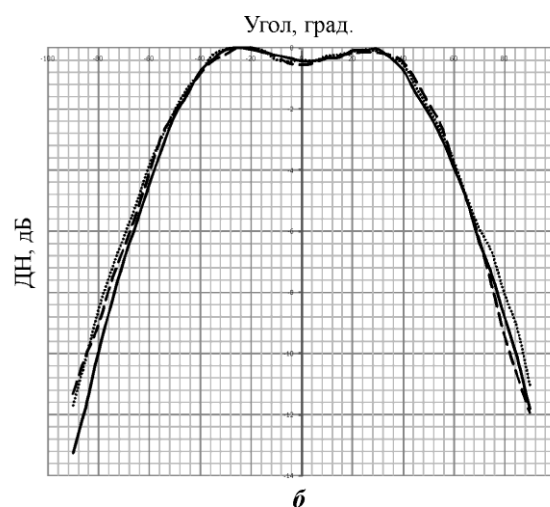
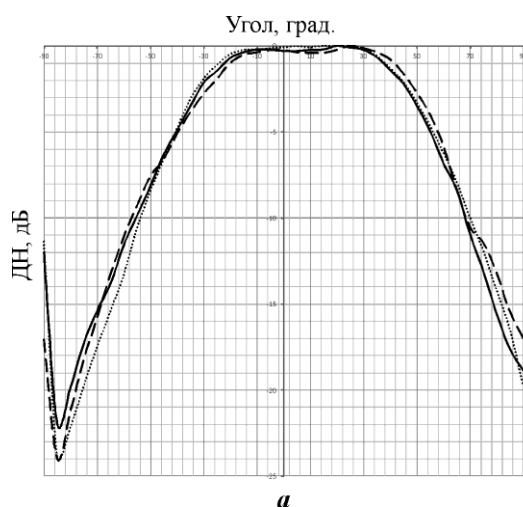


Рис.3. ДН печатного линейного вибратора в Е-плоскости (а) и Н-плоскости (б):

— f_0 ; $f_0 - 5\%$; --- $f_0 + 5\%$

На рис.1–3 представлены модель и измеренные электрические характеристики макета излучателя: коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) и ДН в E - и H -плоскостях в диапазоне частот $\Delta f = f_0 \pm 5\%$. Измеренный коэффициент усиления излучателя $g \sim 4$ дБ.

Анализ представленных результатов позволяет говорить о том, что данный тип излучателя вполне пригоден для решения поставленной задачи.

При проектировании облика излучающей апертуры АФАР системы наведения и посадки малоразмерных летательных аппаратов принято следующее:

- использовать одну и ту же передающую АФАР как в системе наведения, так и в системе посадки в качестве подсветки подстилающей поверхности;
- с целью минимизации стоимости всей системы создать две отдельных приемных АФАР для системы наведения и системы посадки;
- с учетом облика поперечного сечения фюзеляжа летательного аппарата разместить передающую и приемную АФАР системы наведения на круглом металлическом экране;
- в качестве излучающей апертуры приемной АФАР системы посадки использовать «разреженную» антенную решетку с межэлементным расстоянием в несколько λ , излучатели которой располагаются как на круглом металлическом экране рядом с излучателями приемной АФАР системы наведения, так и на передних кромках крыльев летательного аппарата.

Построенный облик излучающей апертуры АФАР системы наведения и посадки малоразмерных летательных аппаратов представлен на рис.4. Габариты и количество излучателей приемной и передающей апертур АФАР системы наведения определялись исходя из требований на их ширину ДН в азимутальной и угломестной плоскостях, межэлементные расстояния dx и dy рассчитывались по формуле (2) заданного сектора сканирования и измеренной ДН излучателя. Получены следующие межэлементные расстояния: $dx \sim 0,63 \lambda$, $dy \sim 0,7 \lambda$. Количество излучателей передающей АФАР составляет 32, а приемной 24.

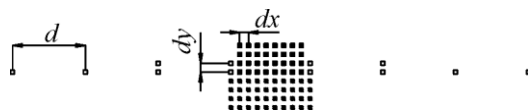


Рис.4. Излучающая апертура АФАР системы наведения и посадки

С учетом того что сканирование должно проводиться только в азимутальной плоскости, количество активных каналов, включающих усилители мощности на передачу, маломощные усилители на прием и фазовращатели, в обеих решетках равно 8. Расположенные в угломестной плоскости пары и четверки излучателей объединяются с помощью пассивных сумматоров/делителей, выходы/входы которых соединяются с активными модулями АФАР. На рис.5,а представлена экспериментально измеренная ДН полноразмерного макета передающей АФАР в азимутальной плоскости. Из представленных графиков видно, что ширина ДН $\Delta\theta_{0,5} \sim 8^\circ$, уровень боковых лепестков меньше -14 дБ, что хорошо совпадает с расчетными данными.

Использование «разреженной» антенной решетки с межэлементным расстоянием в несколько λ сокращает количество активных каналов в приемной АФАР системы посадки и тем самым минимизирует ее стоимость. С одной стороны, такой подход приводит к неизбежному появлению дифракционных максимумов в ее ДН, уровень которых с учетом измеренных ДН излучателей сравним с уровнем основного лепестка решетки, что в принципе недопустимо. С другой стороны, в активной радиолокации «работает» совмещенная ДН, которая в данном случае является произведением ДН передающей АФАР и ДН приемной АФАР системы посадки (если расчеты и измерения ДН проводить в децибелах, то это сумма этих ДН).

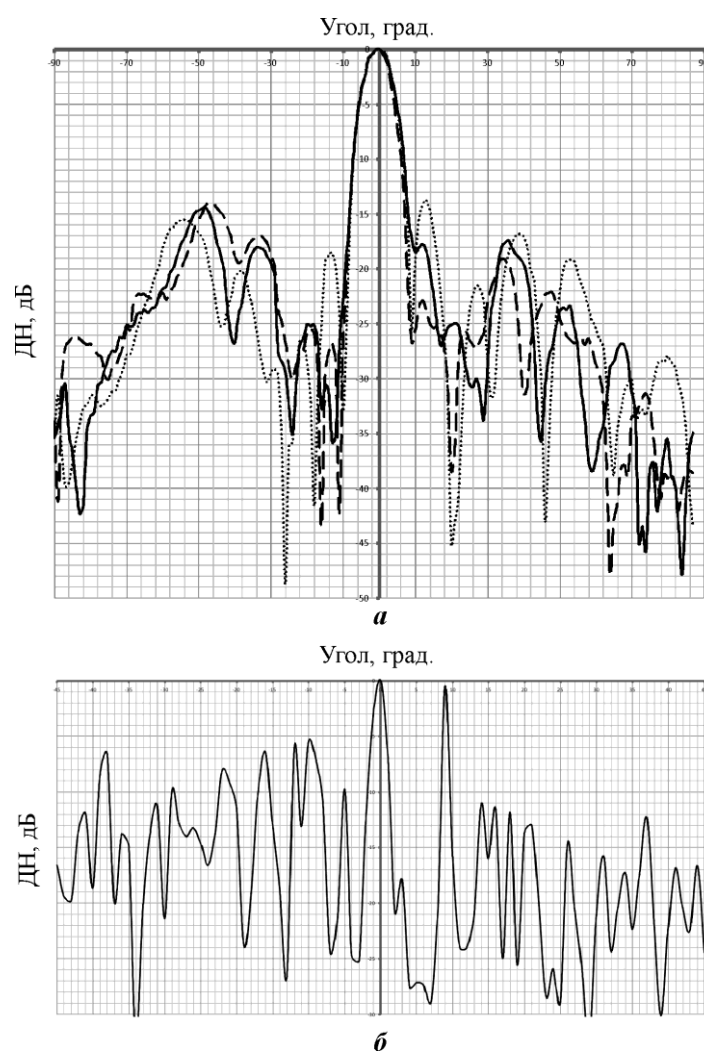


Рис.5. ДН макета передающей АФАР (а) и приемной АФАР (б):
 — f_0 ; $f_0 - 5\%$; --- $f_0 + 5\%$

Обсуждение результатов. Таким образом, проектирование приемной АФАР системы посадки, которая представляет собой линейную 8-элементную антенную решетку, сводится к подбору межэлементного расстояния d , при котором угловое положение возникающих дифракционных максимумов практически совпадает с минимумами ДН передающей АФАР (см. рис.5,а). В результате моделирования получено оптимальное значение межэлементного расстояния $d \sim 6 \lambda$. Подобный подход к проектированию приемной АФАР системы посадки позволяет сократить практически в восемь раз количество активных каналов и во столько же раз уменьшить ее стоимость. Для проверки результатов численного моделирования изготовлен полно-размерный макет излучающей апертуры АФАР в соответствии с рис.4 и измерены его ДН. На рис.5,б и 6 представлены ДН изготовленного макетного образца приемной АФАР системы посадки и совмещенная ДН. Как видно из рис.6, ширина совмещенной ДН $\Delta\theta_{0,5} \sim 1,2^\circ$, а уровень боковых лепестков не превышает -15 дБ, что удовлетворяет предъявленным требованиям.

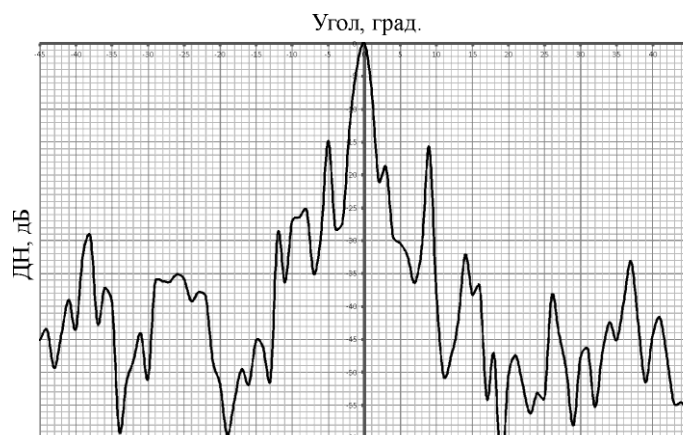


Рис.6. Совмещенная ДН макета АФАР системы посадки

Заключение. Анализ представленных результатов показывает полную жизнеспособность предложенного облика излучающей апертуры системы наведения и посадки малоразмерных летательных аппаратов.

Литература

1. **Верба В.С.** Обнаружение наземных объектов. Радиолокационные системы обнаружения и наведения воздушного базирования. – М.: Радиотехника, 2007. – 360 с.
2. Справочник по радиолокации / *Под ред. М.И. Сколника.* – М.: Техносфера, 2014.
3. **Канащенков А.И., Меркулов В.И., Самарин О.Ф.** Облик перспективных бортовых радиолокационных систем. Возможности и ограничения. – М.: ИПРЖР, 2002. – 176 с.
4. **Гоцуляк А.Ф., Беляев Ю.М.** Направления разработок антенн летательных аппаратов // Зарубежная радиоэлектроника. – 2004. – №5. – С. 97–99.
5. **Симанин А.И., Белый Ю.И.** Эволюция антенных систем для бортовых радиолокационных комплексов // Радиотехника. – 2005. – №2. – С. 40–45.

Статья поступила
2 июня 2015 г.

Чистюхин Виктор Васильевич – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой микросистемных радиотехнических устройств и систем (МРТУС) МИЭТ. *Область научных интересов:* антенно-фидерные устройства.

Лялин Константин Сергеевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры МРТУС МИЭТ. *Область научных интересов:* моделирование электромагнитных процессов.

Орешкин Виталий Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры МРТУС МИЭТ. *Область научных интересов:* цифровая обработка сигналов.
E-mail: oreshkinvi@gmail.com

Меркулов Сергей Сергеевич – инженер кафедры МРТУС МИЭТ. *Область научных интересов:* конструирование радиотехнических систем.

Мелёшин Юрий Михайлович – инженер кафедры МРТУС МИЭТ. *Область научных интересов:* приемопередающие устройства.