

УДК 623.746.-519+621.396.96

Фазированные антенные решетки радаров летательных аппаратов малой и средней дальности. Достоинства и ограничения

Е. М. Ильин, М. И. Нониашвили, А. И. Полубехин, Д. А. Репников,
В. И. Флегонтов, А. Г. Черевко

Рассмотрены достоинства и ограничения фазированных антенных решеток многофункциональных бортовых радиолокационных комплексов (МБРЛК) для летательных аппаратов (ЛА) малой и средней дальности (МД и СД) при решении оборонных и народнохозяйственных задач.

Ключевые слова: летательный аппарат, беспилотный летательный аппарат, многофункциональный бортовой радиолокационный комплекс, волноводно-щелевая антенная решетка, фазированная антенная решетка, ЛА, БЛА, МБРЛК.

1. Введение

Летательные аппараты малой и средней дальности (МД и СД) и, в частности, комплексы с БЛА находят широкое применение как при ведении боевых действий, борьбе с терроризмом, так и в народном хозяйстве при разведке полезных ископаемых в труднодоступных районах, в чрезвычайных ситуациях при ликвидации последствий стихийных катаклизмов. В настоящее время особенно широкое распространение получили при решении вышеназванных задач БЛА малой и средней дальности [1].

Большое разнообразие применения БЛА требует от их создателей разработки множества различных целевых нагрузок-датчиков: видеокамер, многоспектральных приёмников ИК-диапазонов, многодиапазонных средств радиотехнической и радиолокационной разведок и др.

На разных стадиях создания находятся отечественные БЛА малой и средней дальности типа «Корсар», «Иноходец», «Форпост-Р» и др. с высотой полета до 7 км, дальностью – до 350 км, скоростью – до 220 км/час, массой целевой нагрузки – 45...120 кг [1–3].

Интенсивно идет разработка радиоэлектронного оборудования для этих БЛА, в частности оптико-электронных и радиолокационных средств, средств радиотехнической разведки. К современным средствам разведки и целеуказания предъявляются высокие требования по разрешающей способности, дальности действия, точности целеуказания, оперативности и многофункциональности [4]. Так, например, при предельной высоте полета БЛА 7 км дальность лоцирования объектов с БЛА физически ограничивается дальностью до линии горизонта (ДЛГ) и составляет около 300 км. При средней высоте полета БЛА 3...5 км ДЛГ лежит в пределах 190...250 км.

Исходя из вышеназванных задач и режимов функционирования БЛА формируются требования к составу и тактико-техническим характеристикам (ТТХ) их целевых нагрузок и, в частности, радиолокационных целевых нагрузок [2–3]:

- функционирование в различных частотных диапазонах в пределах 0.1...100 ГГц;

- картографирование/мониторинг земной/морской поверхности на дальностях до 100 км с разрешением до 0.1 м;
- мониторинг окружающего пространства с полосой обзора до 60 км;
- обнаружение и измерение координат неподвижных радиоконтрастных и движущихся наземных (надводных) объектов на дальностях до 300 км;
- радиомониторинг окружающего пространства в полосе частот МБРЛК;
- оценка метеобстановки с дальностью обнаружения метеообразований с отражаемостью 40 дБZ до 200 км.

2. Бортовые РЛК ЛА МД и СД

Существующие разработки отечественных радиолокационных целевых нагрузок ЛА МД и СД, как правило, оснащены волноводно-щелевыми антенными решётками (ВЩАР).

Одним из успешных примеров создания такой нагрузки является многофункциональная бортовая радиолокационная станция (МБРЛС) с ВЩАР Ку-диапазона длин волн (рис. 1), разработанная МГТУ им. Н. Э. Баумана. Она предназначена для применения в составе разведывательно-ударных комплексов с БЛА МД и СД и работает в следующих режимах [2–3, 5]:

- картографирование поверхности с реальным лучом (КРТ-РЛ) или с синтезированием апертуры антенны (КРТ-СА) при полосовом, секторном или телескопическом обзоре;
- селекция наземных (надводных) движущихся целей (СНДЦ), в том числе с одновременным формированием радиолокационных изображений (РЛИ) подстилающей поверхности;
- оценка метеобстановки (режим МЕТЕО) с формированием РЛИ сечений метеообразований (вертикальных, горизонтальных);
- измерение наклонной дальности (ИДЗ) до поверхности по заданному угловому целеуказанию;
- информационное обеспечение полёта на малых высотах (режим МВП);
- радиомониторинг (РМ) в пределах полосы рабочих частот МБРЛС и др.

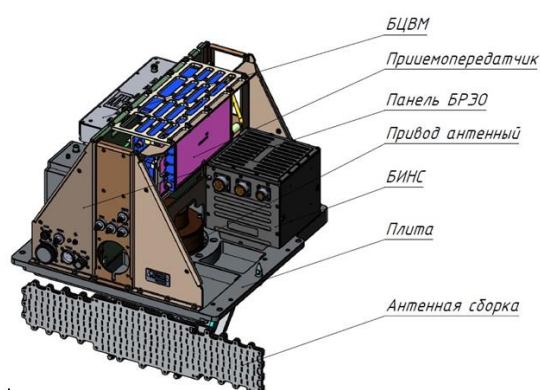


Рис. 1. МБРЛС Ку-диапазона длин волн [3]

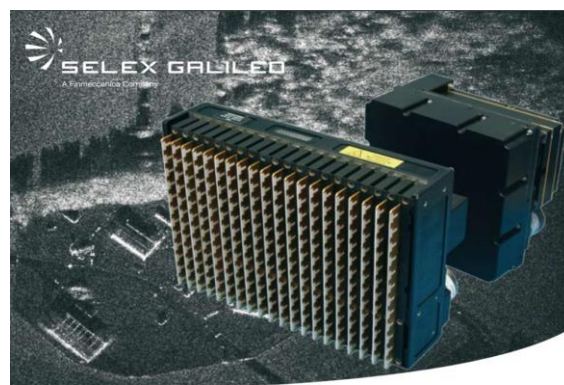


Рис. 2. Бортовая РЛС PicoSAR с АФАР Х-диапазона (Англия) [6]

За рубежом также активно ведутся разработки малогабаритных РЛС как с традиционными антеннами, так и с фазированными антенными решетками (ФАР).

Аналогом вышеприведенной отечественной МБРЛС в коротковолновом диапазоне может служить малогабаритная бортовая РЛС PicoSAR с активными ФАР (АФАР) Х-диапазона (рис. 2), предназначенная для БЛА оперативно-тактического звена, вертолётов и лёгких самолётов и функционирующая в режимах картографирования и селекции наземных движущихся целей [6].

РЛС PicoSAR выполнена в блочно-модульном исполнении с массой 10 кг и состоит из двух блоков: процессор (БЦВМ) в габаритах (высота x ширина x глубина) 200x200x125 мм³ и непосредственно АФАР в габаритах 220x310x85 (до 140) мм³

Тактико-технические характеристики отечественной МБРЛС (экспортный вариант) и РЛС PicoSAR приведены в табл. 1 [5–6].

Выбор Ку-диапазона длин волн в отечественной МБРЛС обусловлен тем, что позволяет получать детальные РЛИ объектов, близкие к оптическим, но в отличие от оптических датчиков – в любое время суток, в любых погодных условиях, на поле боя в условиях дымовых и пылевых завес.

На рис. 3 приведено РЛИ участка местности с разрешением 0.5 м, полученное на этой МБРЛС [2–3]. Здесь же для сравнения приведен космический фотоснимок того же участка. Видно их отличное совпадение.

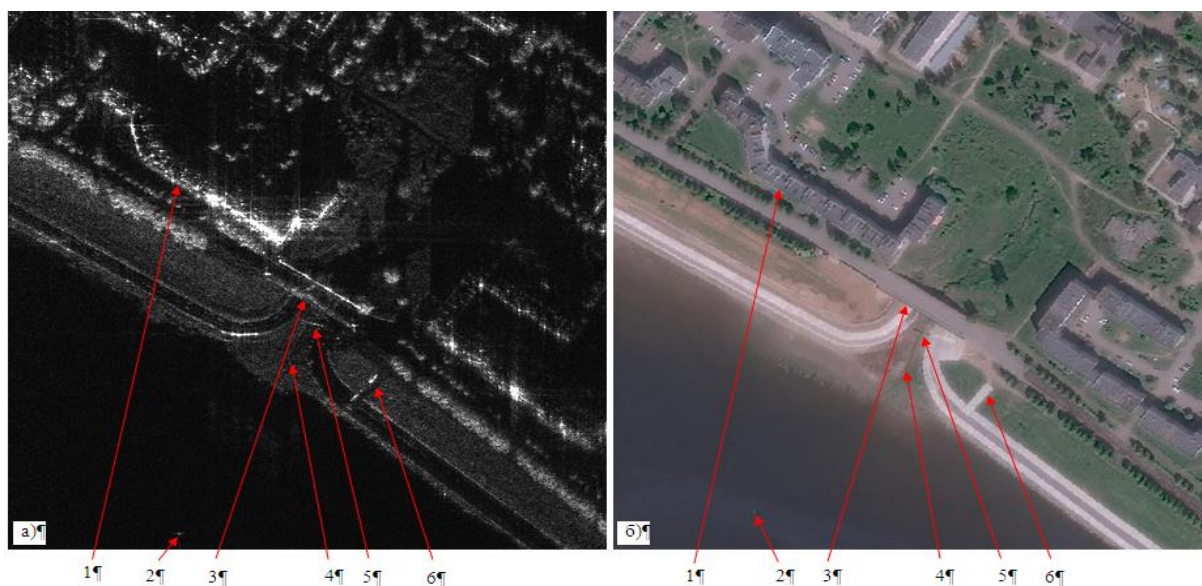


Рис. 3. РЛИ с разрешением 0.5 м (а) и спутниковый фотоснимок (б) района наб. Космонавтов (г. Рыбинск).

Режим КРТ-СА. Телескопический обзор. Расстояние 11.2 км. Высота 2300 м.

1 – крыша здания, 2 – бакен, 3 – автомобильный мост, 4 – ручей, 5 – пешеходный переход, 6 – спуск к реке

На рис. 4 приведено РЛИ участка местности с разрешением 1 м, полученное в РЛС PicoSAR. Здесь же для сравнения приведен космический фотоснимок того же участка [6].



Рис. 4. РЛИ с разрешением 1 м и спутниковый фотоснимок одной и той же местности

По современным задачам от МБРЛК БЛА МД и СД требуется обеспечить большее по сравнению с РЛС PicoSAR количество боевых режимов, дальность картографирования до 300 км, дальность обнаружения объектов до 100 км, разрешение в режиме картографирования не хуже $0.1 \times 0.1 \text{ м}^2$.

3. Оценка основных параметров антенных систем РЛС БЛА МД и СД

С целью анализа достоинств и ограничений антенных систем РЛС МД и СД проведем аналитически-расчетные оценки основных параметров отечественной МБРЛС с ВЦАР (рис. 1) и зарубежной РЛС PicoSAR с АФАР (рис. 2). В табл. 1 кроме ТТХ данных РЛС [5–6] приведены ТТХ гипотетического МБРЛК с ФАР – аналога по функциональным возможностям МБРЛС с ВЦАР по дальности, разрешению и режимам функционирования. При этом попробуем оценить, что дает замена в локаторе ВЦАР на ФАР в различных режимах функционирования БЛА.

Таблица. 1 ТТХ РЛС

ТТХ/режим	МБРЛС с ВЦАР [5]	РЛС PicoSAR с АФАР [6]	Гипотетический МБРЛК с ФАР
Диапазон рабочих частот	Ku (2 см)	X (3 см)	X (3 см)
Режимы работы	КРТ-РЛ, КРТ-СА, СНДЦ, МЕТЕО, ИДЗ, МВП, РМ	КРТ, СНДЦ	КРТ-РЛ, КРТ-СА, СНДЦ, МЕТЕО, ИДЗ, МВП, РМ
Дальность картографирования, км	до 60	до 20	до 300 ¹
Разрешение, м	0.5	1	0.1 ²
Дальность обнаружения движущихся целей, км	до 70	до 20	до 100
Ширина спектра частот, МГц	640	-	640
Потребляемая мощность, Вт	400	300	до 400
Импульсная (средняя) мощность излучения всей антенны, Вт	150 (30)	-	500 (100)
Скважность	5	-	5
Масса, кг	39	10	30...40
Размер полотна антенны (ШхВ), мм	520x140	310x220	520x150
Кол-во излучателей (ШхВ): Вариант А	-	20x12 (240)	34x10 (340)
Вариант Б	-	-	24x6 (144)
Ширина ДНА (по уровню 3 дБ), град	по азимуту -2.4 по углу места -10	- -	по азимуту -2.4 по углу места -10
Сканирование луча	Механическое: по азимуту +90° ... -90° по углу места +0° ... -30°	Электронное +45° ... -45°	Электронное: по азимуту +45° ... -45° по углу места +5° ... -45°
Точность позиционирования ДНА, угл. мин.	2	-	2

Производительность БЦВМ, ГФлопс	38.4	-	180...190
Объем оперативной памяти БЦВМ, ГБайт	16	-	до 20
Объем накопителя SSD, Гбайт	128	-	128
Охлаждение	Воздушное	Воздушное	Воздушное

Примечания:

1. При разрешении около 30...50 м.

2. При таком разрешении возможно выделение хорошо отражающих объектов, расположенных на поверхности с удельной ЭПР $-40...-25$ дБ/м². Слабо отражающие объекты будут находиться на уровне шумов.

3. Варианты ФАР: А – расстояние между излучателями 0.5λ ; Б – 0.7λ при прямоугольной компоновке ППМ. При гексагональной компоновке плотность ППМ в ФАР может быть увеличена в 2 раза.

Увеличение производительности БЦВМ МБРЛК с ФАР вызвано необходимостью организации электронного сканирования ее диаграммы направленности (ДНА).

На рис. 5 приведена расчетная ДНА ФАР гипотетического МБРЛК, которую необходимо получить для реализации функциональных возможностей МБРЛС с ВЦАР. ДНА определяется размерами полотна ФАР и расстоянием между ее излучателями (табл. 1). Наименьшим искажениям ДНА ФАР при ее электронном сканировании в пределах требований табл. 1 (по азимуту: $+45^\circ...-45^\circ$, по углу места: $+5^\circ...-45^\circ$) подвержена при расстояниях между излучателями $0.5\lambda...0.7\lambda$. Эти размеры определяют поперечные габариты ППМ ФАР [7].

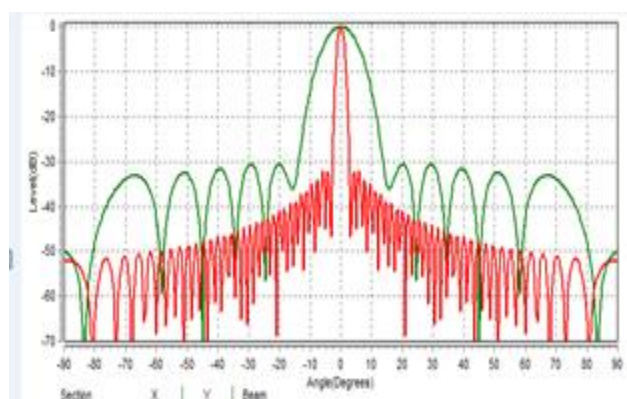


Рис. 5. Расчетная диаграмма направленности (ДНА) виртуальной ФАР X-диапазона: широкая – по углу места; узкая – по азимуту

ВЦАР – волноводно-щелевая антенная решетка состоит из параллельно расположенных волноводов с излучающими щелями и расположенного перпендикулярно им возбуждающего волновода с наклонными щелями в их общей широкой стенке для связи с излучающими волноводами. Возбуждающий волновод заканчивается фланцем для подсоединения источника энергии.

Фазированные антенные решетки (рис. 6) конструктивно различают: пассивные (ПФАР), полуактивные (ПАФАР) и активные (АФАР) [7].

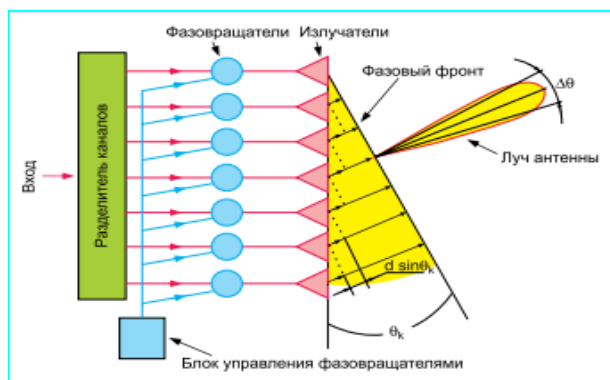


Рис. 6. Обеспечение наклона луча фазированной антенной решетки [7]

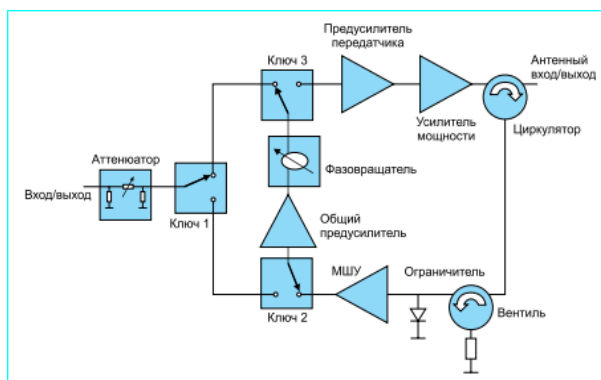


Рис. 7. Обобщенная структурная схема приемо-передающего модуля АФАР [7]

АФАР состоит из активных излучающих элементов (или конструктивно объединенных групп таких элементов – многоканальных модулей), каждый из которых состоит из излучающего элемента и активного устройства (приемопередающего модуля, ППМ). Приемопередающий модуль АФАР (рис. 7) по меньшей мере регулирует начальную фазу несущей радиосигнала, проходящего через активный излучающий элемент (для электрического сканирования луча), а также усиливает передаваемый и/или принимаемый этим элементом радиосигнал.

В отличие от АФАР в пассивной ФАР приемное и передающее устройства конструктивно разделены и являются сосредоточенными. В пассивной ФАР ППМ не содержат активных устройств. Например, в передающей системе, оснащённой пассивной ФАР, радиосигнал генерируется и усиливается до требуемой мощности в едином для всей системы радиопередатчике, после чего распределяется (а мощность радиосигнала делится) между излучающими элементами. Приемный сигнал «собирается» суммирующей системой и затем поступает в приемное устройство, в котором происходит его усиление и, как правило, перенос на промежуточную частоту.

Полуактивная ФАР – промежуточный вариант, в котором полотно антенны набирается из нескольких пассивных подрешеток – пассивных фрагментов ФАР. Каждый такой фрагмент данной ФАР соединяется с одним каналом приемопередающего модуля, а общая мощность системы набирается за счет нескольких ППМ, которые в этом случае распределены по полотну решетки. Также возможен вариант объединения нескольких приемных и передающих каналов в едином корпусе, например, 2, 4, 8, что определяется конструкцией антенной системы и массогабаритными характеристиками.

Каждая из антенн имеет свои плюсы и минусы. Для качественного сравнения МБРЛС с ВЦАР и МБРЛК с ФАР проведем расчет потенциальных характеристик МБРЛК с ФАР в Х-диапазоне. Для оценки аналогичных параметров локатора с ВЦАР воспользуемся ТТХ МБРЛС с ВЦАР [5] в Ку-диапазоне (табл. 1).

Требуемая дальность действия локатора по цели до 100 км определяет импульсную/среднюю (при скважности 5) мощность СВЧ-сигнала в раскрые антенны до 500/100 Вт.

При расчетном количестве излучателей в ФАР 340 (144) импульсная/средняя мощность одного излучателя составляет 1.5/0.3 Вт (3.5/0.7 Вт). Получение данной мощности на выходе ППМ Х-диапазона не является проблематичным [7–8].

Очевидными проблемами при разработке МБРЛК с ФАР для ЛА МД и СД являются ограничение по потребляемой мощности, обеспечение теплоотвода, достижение приемлемых массогабаритных показателей и снижение стоимости [7].

Рассмотрим проблемы теплоотвода и ограничения по потребляемой мощности.

В МБРЛС с ВЦАР Ку-диапазона [2–3,5] антенна имеет потери до 1.5...2 дБ, которые необходимо компенсировать. Поэтому при требуемом в нашем случае уровне импульсной/средней мощности СВЧ-сигнала в луче 500/100 Вт выходная импульсная/средняя мощ-

ность передатчика должна быть не менее 900/160 Вт. Примерно 60 Вт средней мощности уйдут на нагрев ВЩАР. При КПД передатчика 20 % примерно 800 Вт необходимо отвести от самого передатчика. При ограничении потребляемой мощности на уровне 400 Вт вариант МБРЛС с ВЩАР с мощностью излучения 500/100 Вт реализуем при КПД передатчика не менее 40 %.

В реализованном варианте МБРЛС с ВЩАР потребляемая мощность не превышает 400 Вт, при этом примерно 370 Вт уходят на тепловые потери, которые отводятся от локатора с помощью принудительного воздушного охлаждения [5].

Анализ параметров существующей компонентной базы ФАР [7–8] позволяет оценить тепловые потери мощности в них.

Для пассивной ФАР величина потерь при традиционной схеме запитки составит на фазовращателе (около 4–8 дБ) плюс потери в тракте на рассогласование. В итоге СВЧ-усилитель на входе ПФАР должен компенсировать потерю по мощности около 7–11 дБ, что превосходит аналогичный параметр ВЩАР. При уровне импульсной/средней мощности СВЧ сигнала в луче 500/100 Вт средняя мощность на входе ПФАР должна быть до 1 кВт, при этом до 0.9 кВт средней мощности уйдут на нагрев антенны. Очевидно, что при аналогичном КПД передатчика 20 % проблема теплоотвода от локатора в целом в этом случае существенно усложняется по сравнению с МБРЛС с ВЩАР. При ограничении потребляемой мощности на уровне 400 Вт вариант пассивной ФАР с требуемыми параметрами не реализуем.

Для активной ФАР КПД усилителей мощности ППМ X-диапазона обычно не превышает 15...30 %, следовательно, при прочих равных условиях 70...85 % мощности в АФАР уходит на нагрев ее полотна. Так, при средней полезной мощности АФАР 100 Вт на ее полотне выделится тепловая мощность до 230...570 Вт. Эта величина несколько превышает потери на тепло в ВЩАР, но при этом потери на тепло от локатора в целом снижаются.

При ограничении потребляемой мощности на уровне 400 Вт рассматриваемый вариант АФАР реализуем при КПД ППМ не ниже 25 %.

Очевидно, что для полуактивных ФАР эти параметры будут промежуточными.

Полученные уровни потерь мощности позволяют в нашем случае применить кондуктивное/воздушное охлаждение антенных систем РЛС БЛА МД и СД.

Сравнение массогабаритных показателей.

В табл. 2 приведены массогабаритные параметры основных функциональных узлов и их крепежа с элементами сопряжения сравниваемых РЛС. Для РЛС PicoSAR с АФАР и гипотетического МБРЛК с ФАР недостающие параметры получены аналитически-расчетным методом.

Таблица 2. Масса (кг) и габариты (ВхШхГ, мм³) основных функциональных узлов РЛС

Тип МБРЛС	Антенна	Подвес с приводами	ППУ	БЦВМ	Крепеж узлов с элементами сопряжения	РЛС в целом
МБРЛС с ВЩАР [3]	1.5 520x140x70	13.3 -	6 430x303x500	5.1 280x228x77	13.1 -	39 430x303x500
РЛС PicoSAR с АФАР [4]	6.5 220x310x85 (до 140)	9 - (подвес с приводом по азимуту)	- -	3.5 200x200x125	- -	10 (без привода, крепежа и элементов сопряжения)

Гипотетический МБРЛК с ПФАР	8 520x140x85 (до 140)	9/- (подвес с приводом по азимуту)	8 -	5.1/ 280x228x77	8.9 -	39 430x303x500
Гипотетический МБРЛК с АФАР	17/10 520x140x85 (до 140)	9 - (подвес с приводом по азимуту)	- -	5.1 280x228x77	8.9 -	40/33 430x303x500

В РЛС PicoSAR с АФАР [6] масса ППМ по всей видимости не превосходит 30 г.

При этих же условиях масса АФАР гипотетического МБРЛК не будет превышать 9 кг, однако более реалистичной оценкой для отечественных ППМ является масса 50 г (вариант А) / 70 г (вариант Б), соответственно, масса АФАР составит не менее 17/10 кг. С учетом ограничений по массе предпочтительным является вариант Б – с расстояниями между излучателями 0.7 λ.

Отказ от привода антенны по углу места «компенсируется» более мощным приводом по азимуту, поэтому не позволяет существенно снизить массу МБРЛК с ФАР в целом по сравнению с МБРЛС с ВЦАР.

Сравнение стоимостных показателей.

Стоимость МБРЛС с ВЦАР не существенно зависит от стоимости антенны. В случае МБРЛК с ФАР стоимость антенны во многом определяет стоимость лоатора в целом.

Ориентировочная стоимость одного ППМ в X/Ku-диапазонах составит не менее 50 тыс. руб., соответственно стоимость в МБРЛК только АФАР составит не менее 17 млн руб. (вариант А) / 7 млн руб. (вариант Б). И это оптимистичная оценка.

4. Достоинства и ограничения антенных систем РЛК БЛА МД и СД

Проведенные выше оценки позволяют отметить достоинства и ограничения различных антенных систем применительно к их использованию в МБРЛС БЛА МД и СД.

Активная ФАР обладает во много раз большим потенциалом по повышению чувствительности. Дело в том, что в пассивной ФАР, использующей один приёмопередатчик, имеют место существенные потери энергии в волноводах и фазовращателях. В АФАР непосредственно по антенне распределены отдельные приёмопередающие модули – и потери энергии минимальны.

Еще одним несомненным преимуществом ФАР по сравнению с ВЦАР является их большая широкополосность. Так, в С-диапазоне длин волн можно говорить о полосе 600 МГц, в Х-диапазоне – до 1 ГГц, а в Ku-диапазоне – до 1.5...2 ГГц. Такая полоса антенной системы потенциально позволяет реализовать широкополосный зондирующий сигнал с субметровым разрешением по дальности, что существенно повышает информационные возможности РЛС. Однако формирование, усиление и обработка зондирующего сигнала с полосой свыше 200 МГц, не говоря уже о полосах 1 ГГц, приводит к существенному усложнению приемопередающей аппаратуры, синтезатора частот и аппаратуры обработки. Это неизбежно повлечет за собой увеличение массогабаритных характеристик и увеличение стоимости изделия. Особые требования потребуются предъявить и к системам стабилизации и микронавигации как летательного аппарата, так и РЛС для обеспечения когерентной обработки сигнала со сверхразрешением по дальности.

АФАР более надёжна в эксплуатации, так как выход из строя нескольких приёмопередающих модулей не ведёт к потере работоспособности радара: ППМ в антенне несколько десятков-сотен и АФАР вполне может выполнять задачи с отдельными неработающими ППМ.

В случае пассивной ФАР или ВЦАР выход из строя единственного приёмопередатчика приведёт к тому, что БЛА ослепнет. В РЛС с ПФАР или ВЦАР для увеличения надежности можно предусмотреть резервирование приемопередатчика, что, однако, приведет к увеличению массогабаритных показателей.

Функционально ФАР по сравнению с ВЦАР позволяет РЛС параллельно решать несколько задач. Например, не только действительно параллельно обслуживать несколько целей, но и, скажем, параллельно с обзором пространства ставить помехи радарам противника, а также повысить помехозащищенность РЛС. Также потенциально ФАР позволяет в режиме реального времени менять амплитудно-фазовое распределение в раскрыве антенны, а значит, и диаграмму направленности, и за счет этого более гибко настраивать различные режимы работы. Например, за счет расширения луча увеличивать полосу обзора или время нахождения цели в луче для реализации более качественного режима СДЦ.

Кроме этого, поскольку в современных бортовых РЛС антенные системы по габаритам составляют примерно 20–40 %, а по массе – 15–30 % от массогабаритных параметров бортовой РЛС в целом, то создание и внедрение конформных антенно-фидерных устройств (КАФУ) на основе ФАР, логично вписанных в конструктив летательного аппарата, даёт большие возможности по снижению массы и габаритов РЛС в целом [9].

Анализ твердотельной компонентной базы СВЧ показывает [7–8], что в настоящее время не существует каких-то проблем для получения выходной мощности вплоть до 350–500 Вт с одного транзистора в диапазонах L и S.

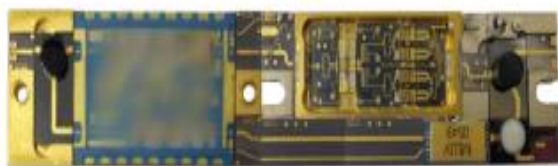


Рис. 6. 15 Вт УМ X-диапазона;
габариты 17x85 мм



Рис. 7. 6 Вт УМ Ku-диапазона;
габариты 5.5x20 мм

В Ku- и X-диапазонах эта проблема существует, тем не менее в настоящее время разработаны малогабаритные достаточно мощные усилители мощности (УМ), например, 15 Вт УМ X-диапазона (рис. 6), 6 Вт УМ Ku-диапазона (рис. 7), которые можно использовать в полуактивных и активных ФАР [8].

Для ВЦАР в МБРЛС применяется механический подвес-привод, обеспечивающий сканирование луча по азимуту $+90^0 \dots -90^0$ и углу места $+0^0 \dots -30^0$. Реализация кругового обзора в МБРЛК с ФАР возможна либо установкой ФАР на механическом подвесе-приводе, обеспечивающем дополнительный к электронному поворот ФАР по азимуту, либо размещением на подвесе без привода 3–4 ФАР для электронного сканирования луча по азимуту в пределах $0 \dots 360$ град., что существенно влияет на стоимость МБРЛК с ФАР.

Для МБРЛК БЛА МД и СД, требующего обычно от 100 до 500 модулей, стоимость ФАР становится неприемлемой, если модули стоят больше, чем сто долларов каждый, поскольку в этом случае стоимость МБРЛК с ФАР становится сопоставимой со стоимостью БЛА МД и СД в целом.

5. Заключение

Проведенный анализ показывает, что пассивная ФАР проигрывает по массе, стоимости, сложности реализации, охлаждению и потребляемой мощности волноводно-щелевой антенной системе и выигрывает только в возможности реализации более широкополосного сигнала. Однако недостатки все же перевешивают потенциальные достоинства, поэтому использование ПФАР в БЛА МД и СД выглядит малоцелесообразным.

АФАР оказывается сопоставимой по массе, охлаждению и потребляемой мощности с волноводно-щелевой антенной системой и позволяет реализовать расширенный функционал и обеспечить потенциально лучшую информативность за счет широкополосного сигнала с субметровым разрешением по дальности. Но платой за расширение функционала и информативности является существенно большая их стоимость по сравнению с ВЩАР.

Таким образом, выбор того или иного варианта антенны для МБРЛК БЛА МД и СД должен осуществляться с учетом комплекса ограничений по теплоотводу, массогабаритным характеристикам, стоимости и требований по режимам боевого применения БЛА МД и МД.

Литература

1. Никитин В. Н. и др. Беспилотные летательные аппараты вооруженных сил мира // База данных. Свидетельство № 2019622386 от 17.12.2019. С. 104–109.
2. Ильин Е. М., Репников Д. А., Савостьянов В. Ю., Самарин О. Ф. и др. Режимы функционирования многофункциональной бортовой РЛС БЛА малой и средней дальности // Вестник СибГУТИ. 2019. № 2 (46). С. 79–89.
3. Ильин Е. М., Полубехин А. И., Самарин О. Ф., Савостьянов В. Ю. Перспективы развития многофункциональных бортовых радиолокационных комплексов, предназначенных для применения в качестве целевой нагрузки в составе БЛА средней и малой дальности // Тезисы докладов 1-й ВНК «Беспилотная авиация: состояние и перспективы развития», Воронеж, ВВУНЦ ВВС, 2019.
4. Молчанов А. С. Теория построения иконических систем воздушной разведки. Волгоград: Панорама, 2017. 224 с.
5. Рекламный паспорт № 387/18/ЭП от 24.12.2018 г. на экспортный образец МБРЛС Ку-диапазона для перспективных и модернизируемых вертолетов и комплексов с БЛА, Москва, Минобороны РФ, 2018.
6. PicoSAR: Compact, Lightweight Airborne Ground Surveillance Radar // SELEX Galileo Company, 2019.
7. Павлов С. В., Филиппов А. В. Антенные фазированные решетки. Обзор компонентной базы для реализации приемопередающих модулей // Компоненты и технологии. 2014. № 7.
8. Пчелин В. А., Корчагин И. П., Трегубов В. Б., Калита Д. В. Малогабаритные СВЧ-усилители мощности S-, X-, Ku-диапазонов. АО «НПО «Исток» им. Шокина, 2018.
9. Ильин Е. М., Кривов Ю. Н., Полубехин А. И., Кренин А. Н., Черевко А. Г. Многофункциональный бортовой РЛК с конформной антенной системой для беспилотных летательных аппаратов малой дальности // Вестник СибГУТИ. 2018. № 3 (43). С. 79–89.

Статья поступила в редакцию 13.03.2020.

Ильин Евгений Михайлович

д.ф.-м.н., профессор, ведущий аналитик Инновационного технологического центра комплекса научной политики МГТУ им. Н. Э. Баумана (105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), тел. 8-910-433-27-89, e-mail: evgil45@mail.ru.

Нониашвили Михаил Ильич

к.т.н., заместитель директора Научно-исследовательского института радиоэлектронной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана, тел. (499) 263-61-51, e-mail: min-st-1986@mail.ru.

Полубехин Александр Иванович

к.т.н., руководитель Инновационного технологического центра комплекса научной политики МГТУ им. Н. Э. Баумана, тел. (499) 263-68-46, e-mail: polub1980@mail.ru.

Репников Дмитрий Александрович

заместитель директора Инновационного технологического центра МГТУ им. Н. Э. Баумана (105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), тел. (499) 263-68-46, e-mail: bauman@bmstu.ru.

Флегонтов Виталий Иванович

к.э.н, доцент, доцент кафедры экономики и финансов Одинцовского филиала МГИМО МИД РФ (143007, Московская область, Одинцово, ул. Ново-Спортивная, д. 3), тел. (499) 263-68-46, e-mail: Fvi55@yandex.ru.

Черевко Александр Григорьевич

к.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой физики, заведующий лабораторией физических основ телекоммуникаций СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), тел. 8-913-980-60-71, e-mail: perspl4@mail.ru.

**Phased array antenna for radars of UAVs shot – medium range aircraft.
Advantages and limitations**

**E. M. Il'in, M. I. Noniashvili, A. I. Polubekhin, D. A. Repnikov, V. I. Flegontov,
A. G. Cherevko**

The advantages and limitations of the phased arrays antenna multifunctional airborne radar systems of short- and medium-range aircraft for solving defense and national economic problems are considered.

Keywords: aircraft, UAV, multifunctional airborne radar system, slot-waveguide array antenna, phased array antenna.