

Ю. С. Русов, А. А. Будкин, В. М. Крехтунов,
О. Ю. Шевцов, А. В. Артюшев

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН

Рассмотрены направления и результаты модернизации интегрированного элемента проходной фазированной антенной решетки (ФАР) Ka-диапазона волн, содержащего волноводный ферритовый фарадеевский фазовращатель и волноводно-диэлектрические излучатели. Приведены результаты исследования влияния проводящих экранов в раскрывах решеток апертурных и приемных излучателей на их согласование и решены вопросы оптимизации их длин. Даны оценки увеличения коэффициента усиления ФАР.

E-mail: rusov.yu.s@gmail.com

***Ключевые слова:** фазированная антенная решетка, волноводно-диэлектрический излучатель, проводящий экран, канал Флоке, диаграмма направленности, коэффициент усиления.*

К настоящему времени в мировой практике накоплен большой опыт разработки, внедрения и серийного производства волноводных ферритовых фазовращателей, излучателей и интегрированных элементов фазированных антенных решеток (ФАР), предназначенных для работы в сантиметровом диапазоне волн [1]. Пример успешного решения поставленной задачи описан в работе [2], где обобщен опыт разработки и серийного производства элементов большой ФАР комплекса С-300 ПМУ и описаны технологические операции, качество и точность выполнения которых существенно влияют на характеристики волноводных ферритовых фазовращателей и элемента ФАР в целом. Элементы проходных и отражательных ФАР Ka-диапазона волн также широко применяются и серийно производятся [3, 4]. На основе обобщения опыта серийного производства проведена модернизация элемента ФАР с целью увеличения коэффициента усиления антенной решетки и улучшения согласования ее раскрывов с пространством.

Направления модернизации элемента ФАР. Модернизируемый элемент проходной ФАР является практической реализацией патента [5]. Схема элемента ФАР показана на рис. 1.

Основой элемента ФАР служит волноводный ферритовый фарадеевский фазовращатель, содержащий волновод в виде ферритового стержня квадратного поперечного сечения с токопроводящим покрытием боковой поверхности, обмотку намагничивания и магнитопровод в виде четырех П-образных скоб. Применяемая конструкция фа-

звращателя обеспечивает малые поперечные размеры элементов ФАР, допускающие их размещение в раскрыве антенной решетки с шагом $d_{\Delta} \leq 0,68\lambda$. При этом реализуется двумерное электрическое сканирование луча с отклонением от нормали к раскрыву ФАР на угол до $45 \dots 50^\circ$.

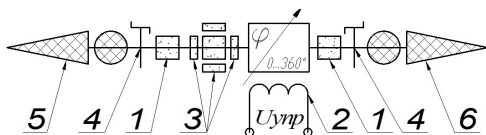


Рис. 1. Схема элемента проходной ФАР:

1 — ферритовый стержень; 2 — обмотка намагничивания; 3 — магнитопроводы; 4 — согласующие волноводные переходы; 5, 6 — апертурный и приемный волноводно-диэлектрические излучатели

Приемный и апертурный волноводно-диэлектрические излучатели (ВДИ) содержат конические стержни из диэлектрика с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 4$. Корпус элемента ФАР выполнен в виде тонкостенной металлической цилиндрической гильзы. На наружной поверхности корпуса расположена печатная плата, к контактам которой припаяны провода обмотки намагничивания.

На рисунке 2 приведена схема проходной ФАР.

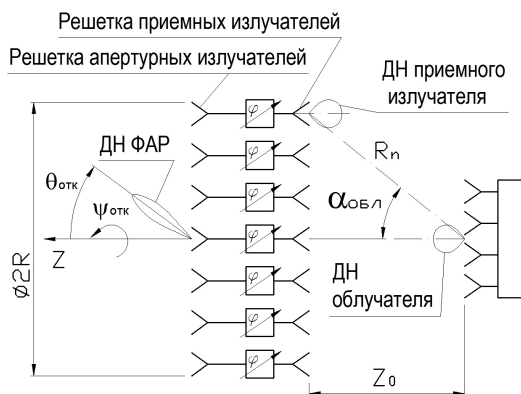


Рис. 2. Схема проходной ФАР:

$\theta_{отк}, \psi_{отк}$ — углы отклонения луча от нормали к раскрыву решетки апертурных излучателей; $2\alpha_{обл}$ — угол облучения решетки приемных излучателей облучателем

Коэффициент усиления (КУ) ФАР определяется формулой

$$G_0(\lambda, \theta_{отк}, \varphi_{отк}) = D_0(\lambda, \theta_{отк}, \varphi_{отк}) \eta(\lambda, \theta_{отк}, \varphi_{отк}),$$

где G_0, D_0 — коэффициенты усиления и направленного действия (КНД) антенны в направлении максимума отклоненного луча соот-

ветственно; η — коэффициент полезного действия (КПД) антенны; λ — длина волны. Таким образом, для повышения КУ необходимо проводить оптимизацию элементов ФАР как по КНД, так и по КПД.

Коэффициент направленного действия ФАР для решетки с заданной геометрией определяется размером и формой раскрыва, а также амплитудно-фазовым распределением электромагнитного поля по апертурным излучателям. При этом амплитудное распределение поля задается диаграммой направленности (ДН) облучателя и его положением относительно раскрыва решетки приемных излучателей и зависит также от ДН приемных излучателей в решетке.

Коэффициент полезного действия ФАР определяется потерями в тракте, в элементах ФАР, на перелив энергии электромагнитной волны облучателя за границы раскрыва решетки приемных излучателей, на отражение от приемного и апертурного раскрывов, на деполяризацию волны при сканировании луча. Также должны быть учтены потери на просачивание энергии падающих на решетку электромагнитных волн в межэлементное пространство, если между ними имеются зазоры. Последние могут быть минимизированы или полностью устранены при введении общих проводящих экранов в решетках апертурных и приемных излучателей, как показано на рис. 3. Однако в реальных ФАР из конструктивных соображений общие экраны порой отсутствуют.

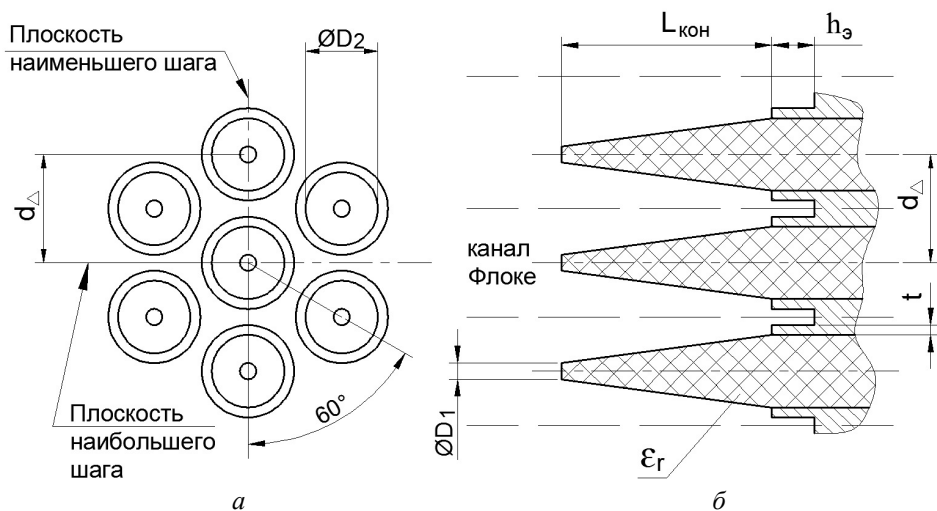


Рис. 3. Решетка ВДИ с проводящим экраном в раскрыве (а) и ее продольный разрез (б)

Преимуществом проходной ФАР перед отражательной является возможность независимой оптимизации решеток приемных и апертурных излучателей.

В связи с этим решают следующие задачи:

- оптимизация решетки апертурных излучателей с целью улучшения их характеристик при сканировании луча;
- оптимизация приемных излучателей с целью повышения эффективности возбуждения антенной решетки облучателем;
- исследование влияния общих проводящих экранов в решетках апертурных и приемных излучателей;
- оптимизация положения экранов относительно плоскостей раскрывов волноводов приемных и апертурных излучателей с целью улучшения согласования антенных решеток, улучшения характеристик ФАР в секторе сканирования луча и максимизации коэффициента усиления.

Исследование эффекта просачивания энергии электромагнитной волны в пространство между корпусами элементов ФАР. Это явление имеет место в антенных решетках, не имеющих общих экранов в раскрыве. В этом случае между волноводами излучателей могут возбуждаться электромагнитные волны, фазы которых не управляются фазовращателями ФАР. Эти волны не участвуют в формировании требуемого амплитудно-фазового распределения поля в раскрыве ФАР и являются дополнительным источником потерь, а следовательно и снижения КУ ФАР.

Для оценки этих видов потерь решена задача дифракции электромагнитной волны при ее падении на решетку ВДИ без проводящего экрана. Таким образом, оценена доля мощности падающей волны, прошедшая между волноводами излучателей.

Решение выполнено векторным методом конечных элементов [6] и методом Трефтца [7]. В примененной реализации метода конечных элементов выполняется построение нерегулярного разбиения трехмерной ячейки Флоке на области тетраэдральной формы, позволяющее с высокой точностью аппроксимировать геометрию анализируемой структуры. При использовании метода Трефтца канал Флоке представляется в виде каскадного соединения продольно однородных волноводов [8]. Волновой канал, образованный корпусами элементов ФАР, моделируется введением коаксиального волновода. Собственные волны волноводов находятся методом Бубнова — Галеркина в виде разложения по редуцированной системе поперечных векторных функций.

Расчетные зависимости, полученные для излучателей разной длины $L_{\text{кон}}$ и приведенные на рис. 4, показывают, что при наличии зазора между корпусами элементов потери на просачивание могут достигать 20 % при длине диэлектрического стержня от 1λ до 2λ . При этом характер кривых существенно зависит от длины ВДИ.

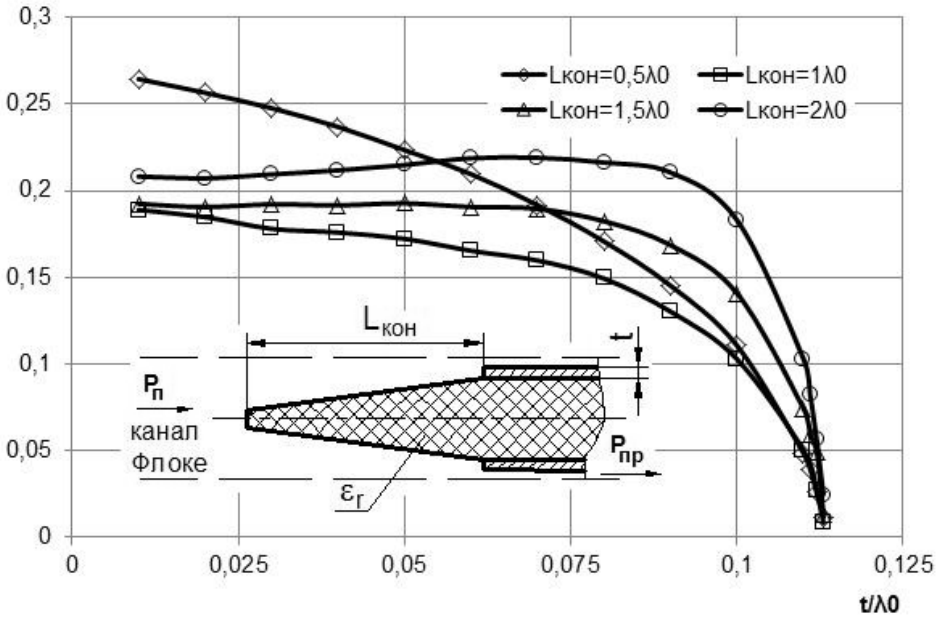


Рис. 4. Зависимости отношения мощности электромагнитной волны, прошедшей в межэлементное пространство, к мощности падающей волны для решетки ВДИ с параметрами $\epsilon_r = 4$, $\varnothing D_1 = 0,113\lambda$, $\varnothing D_2 = 0,453\lambda$, $d_\Delta = 0,68\lambda$

Исследование влияния проводящего экрана на согласование решетки волноводно-диэлектрических излучателей. Введение общего проводящего экрана позволяет устранить эффект просачивания энергии в межэлементное пространство. При этом появляется дополнительный параметр оптимизации — расстояние от плоскости раскрывов волноводов излучателей до проводящего экрана.

Для исследования влияния расположения проводящего экрана решена задача дифракции плоской электромагнитной волны на решетке ВДИ со сплошным проводящим экраном, показанной на рис. 3. Получены зависимости коэффициента отражения электромагнитной волны в решетке ВДИ от расположения проводящего экрана при изменении длины диэлектрического стержня $L_{кон}$ от $0,5\lambda$ до 2λ . Результаты электродинамического моделирования решетки ВДИ при различных положениях экрана представлены на рис. 5.

На рисунке 5 видно, что в области значений параметра $h_3 = 0,25\lambda \dots 0,4\lambda$ сохраняется согласование раскрыва решетки ВДИ по модулю коэффициента отражения не более 0,1 при длине диэлектрического стержня от 1λ до 2λ . При этом зависимость имеет плавный характер, что позволяет выбирать h_3 в указанных пределах из других соображений, в частности, конструктивных.

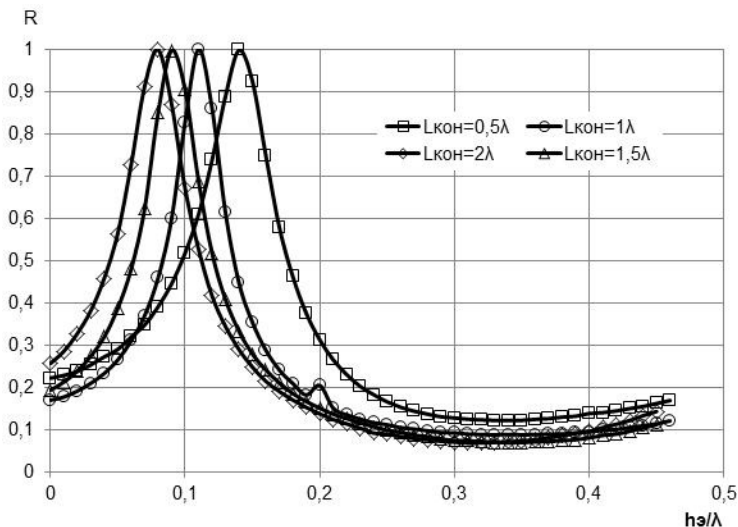


Рис. 5. Зависимости коэффициента отражения волны в решетке ВДИ с параметрами $\epsilon_r = 4$; $\varnothing D_1 = 0,113\lambda$; $\varnothing D_2 = 0,453\lambda$; $d_\Delta = 0,68\lambda$, $t = 0,034\lambda$ от расположения проводящего экрана при различной длине диэлектрических стержней

Оптимизация длин апертурных излучателей. Апертурный излучатель должен обеспечивать согласование раскрыва антенной решетки в заданном диапазоне углов сканирования при низком уровне вносимых потерь.

Для определения оптимальных размеров апертурного излучателя рассчитаны характеристики согласования раскрыва антенной решетки в заданном секторе углов сканирования в плоскости минимального и максимального шага для различных длин диэлектрического стержня при близком к оптимальному значении $h_0 = 0,3\lambda$. Рассматривались ВДИ со стержнями длиной $1,5\lambda$, $1,75\lambda$, 2λ , $2,25\lambda$. Другие параметры соответствовали серийному элементу ФАР.

В результате анализа полученных результатов выявлено, что при длине диэлектрического стержня порядка $1,5\lambda$ характеристика согласования решетки ВДИ становится сильно нерегулярной вблизи границы сектора электрического сканирования луча. При длинах диэлектрического стержня $1,75\lambda \dots 2,25\lambda$ характеристики согласования решетки ВДИ отличаются незначительно. При больших длинах диэлектрических стержней ВДИ характеризуются большими вносимыми потерями. При длине диэлектрического стержня меньше $1,5\lambda$ не удастся обеспечить требуемую ширину ДН ВДИ. При длине стержня 2λ наблюдается наилучшее согласование решетки ВДИ при неотклоненном луче.

Рассчитанные зависимости коэффициентов отражения волн с ортогональными круговыми поляризациями поля от угла отклонения луча в плоскостях наименьшего и наибольшего шага решетки для ВДИ с длиной диэлектрического стержня 2λ приведены на рис. 6.

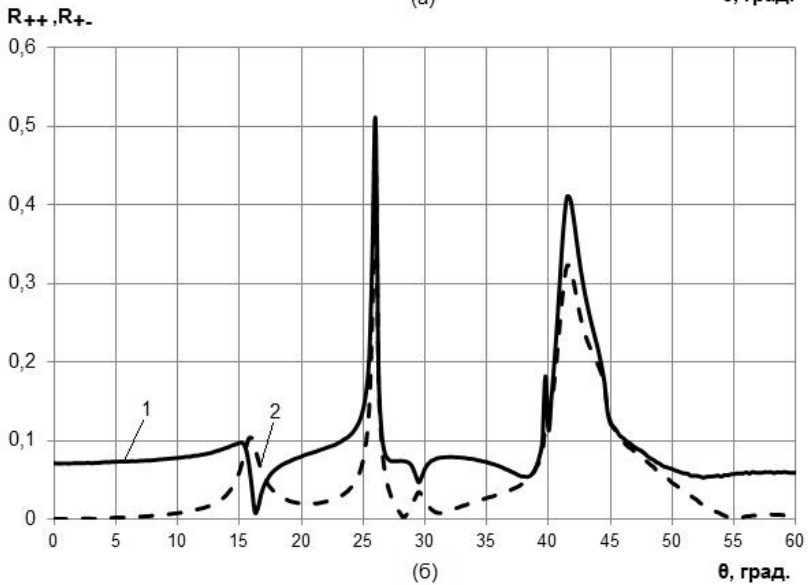
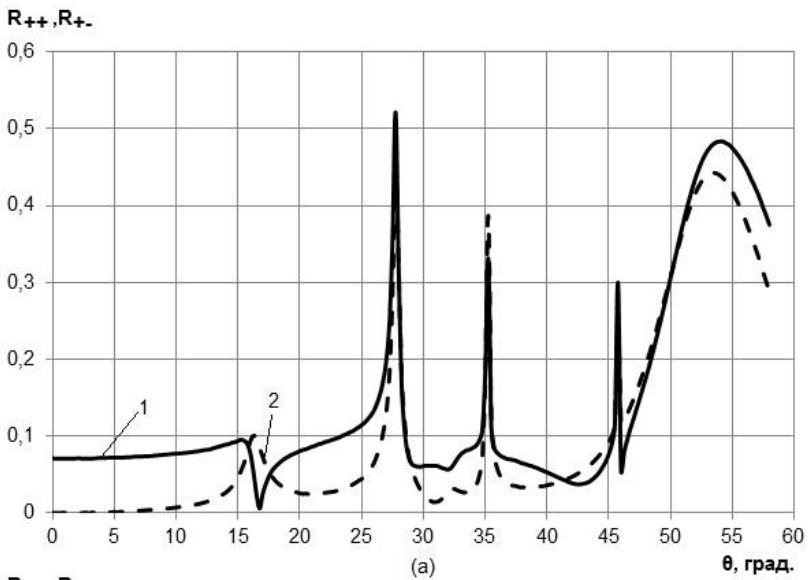


Рис. 6. Характеристика согласования решетки ВДИ при сканировании в плоскости наименьшего (а) и наибольшего (б) шага для $L_{\text{кон}} = 2\lambda$ и $h_s = 0,3\lambda$:

1 — основная поляризация; 2 — ортогональная поляризация

В результате проведенного исследования показано, что при оптимальном положении проводящего экрана обеспечивается хорошее согласование ФАР в заданном секторе углов сканирования. При этом длина излучателя $L_{\text{кон}} = 2\lambda$ является близкой к оптимальной.

Оптимизация длин приемных излучателей. В целях достижения максимальной эффективности облучения приемного раскрыва ФАР требуется обеспечить максимальную ширину ДН приемного ВДИ в решетке при условии согласования ее раскрыва.

Расчет ДН приемных ВДИ с учетом их взаимного влияния проведен при оптимальном расположении проводящего экрана на расстоянии $h_3 = 0,3\lambda$ от плоскости раскрытов волноводов. На рис. 7 показаны ДН приемного ВДИ, рассчитанные при различной длине его конической части $L_{\text{кон}}$. ДН излучателя $F_p(\theta, \varphi)$ получена по характеристикам согласования решетки на основной $R_{++}(\theta, \varphi)$ и ортогональной $R_{+-}(\theta, \varphi)$ поляризациях на основании соотношения

$$F_p(\theta, \varphi) = (1 - R_{++}^2(\theta, \varphi) - R_{+-}^2(\theta, \varphi)) \cos(\theta),$$

при этом предполагается, что в отраженном поле присутствуют только волны основного типа.

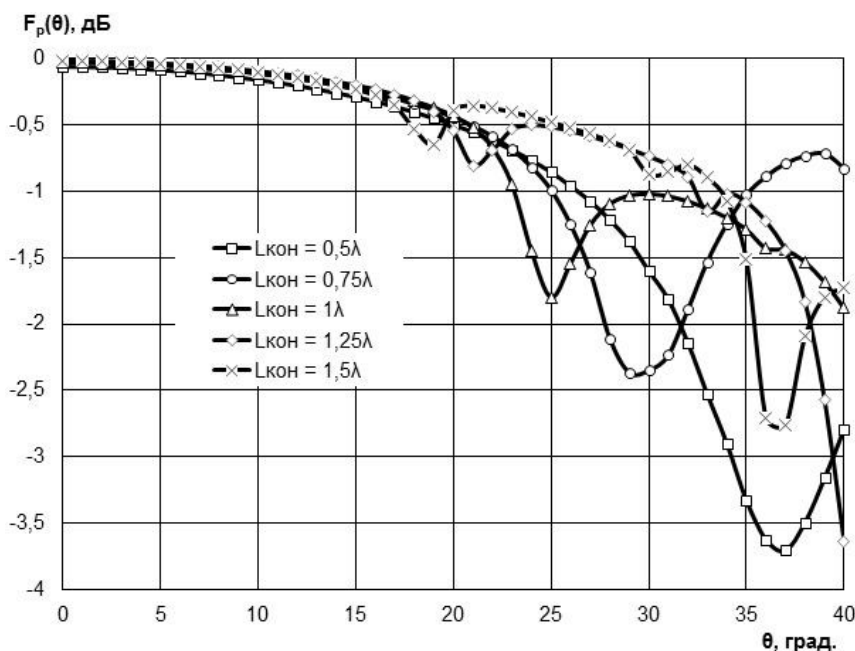


Рис. 7. Диаграммы направленности приемного ВДИ при $h_3 = 0,3\lambda$ и различной длине диэлектрического стержня в плоскости наибольшего шага решетки

Видно, что при уменьшении $L_{\text{кон}}$ ДН ВДИ расширяется. С увеличением длины диэлектрического стержня глубина провала ДН уменьшается, при этом провал смещается к осевому направлению.

В результате проведенного электродинамического моделирования и анализа полученных результатов показано, что при оптимальном положении проводящего экрана излучатель длиной 1λ позволяет добиться хорошего согласования в диапазоне углов облучения $\alpha_{\text{обл}}$ до 28° . Уменьшение длины приемного излучателя до $0,75\lambda$ позволяет получить более широкую ДН при сохранении уровня согласования.

Анализ результатов проведенных исследований показывает, что при введении проводящих экранов на оптимальном расстоянии от раскрывов волноводов апертурных и приемных излучателей практически полностью исключаются потери на отражение в решетках ВДИ и устраняется эффект просачивания мощности электромагнитных волн в межэлементное пространство. Это обуславливает увеличение КУ ФАР до 1,5 дБ в осевом направлении при улучшении регулярности усиления в заданном секторе углов. Реализация общего проводящего экрана потребовала увеличить продольный размер элемента ФАР, что было достигнуто удлинением ферритового стержня. Такое решение продиктовано технологическими соображениями. Согласно проведенным оценкам, увеличение вносимых потерь элемента ФАР, обусловленное увеличением его продольного размера, не превышает 0,25 дБ.

Сопоставление параметров исходного и модернизированного элементов ФАР приведено в таблице. Исходные параметры получены на основе экспериментальных данных.

Параметры серийного и модернизированного элементов ФАР

Параметр	Серийный элемент ФАР		Модернизированный элемент ФАР	
	Приемный	Апертурный	Приемный	Апертурный
Вносимые потери, дБ, не более	2		2	
ВДИ	Приемный	Апертурный	Приемный	Апертурный
Потери КУ в осевом направлении, связанные с рассогласованием раскрыва, дБ, не более	1,5	1,5	0,05	0,05
Потери на просачивание	Не оценены	Не оценены	Нет	Нет
Ширина ДН по уровню половинной мощности, град	60	90	70	90

Значительное увеличение КУ ФАР при введении проводящего экрана делает обоснованным проведение частичной модернизации, при которой не изменяются другие узлы элемента ФАР. При этом может быть достигнуто значительное снижение потерь мощности электромагнитных волн на отражение при минимальных изменениях конструкции элемента ФАР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приемопередающий элемент фазированной антенной решетки: пат. 2184410 РФ / Ю.Н. Афанасьев, В.В. Жигарев, Л.Н. Захарьев и др. Заявл. 26.06.2001, опубл. 27.06.2002. Бюл. № 18.
2. Boukkin B. V., Lemansky A. A. Experience of development and industrial production of X-band passive phased antenna arrays // International Conference on Radar. – Paris, 1994. – P. 20–24.
3. Особенности построения фазированных антенных решеток миллиметрового диапазона волн для РЛС зенитно-ракетного комплекса малой дальности / О.Ю. Шевцов, А.В. Артюшев, В.М. Крехтунов и др. // Известия РАН. – 2010. – № 3. – С. 61–69.
4. Разработка элементов проходной и отражательной фазированных антенных решеток миллиметрового диапазона волн с ферритовыми фазовращателями / В.М. Крехтунов, М.Е. Голубцов, Ю.С. Русов и др. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. Спец. вып. Антенны и устройства радио- и оптического диапазонов. – 2009. – С. 105–117.
5. Элемент фазированной антенной решетки: пат. 2325741 РФ / Л.Б. Рошаль, А.И. Фирсенков, В.М. Крехтунов, О.Ю. Шевцов. Заявл. 06.10.2006, опубл. 27.05.2008. Бюл. № 15.
6. Volakis J. L., Chatterjee A., Kempel L. C. Finite element method for electromagnetics: with applications to antennas, microwave circuits and scattering. – New York: IEEE Press, 1998. – 344 p.
7. Автоматизированное проектирование устройств СВЧ / В.В. Никольский, В.П. Орлов, В.Г. Феоктистов и др.; Под ред. В.В. Никольского. – М.: Радио и связь, 1982. – 272 с.
8. Русов Ю. С. Дифракция электромагнитных волн на периодической решетке волноводно-диэлектрических излучателей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. Спец. вып. Антенны и устройства радио- и оптического диапазонов. – 2009. – С. 157–163.

Статья поступила в редакцию 07.09.2012