

Антенна с поворотом плоскости поляризации на основе плоского транс-рефлектора

Описан вариант конструкции плоского трансрефлектора выполненного по технологии многослойных печатных плат, а также принцип его работы. Приведён сравнительный анализ характеристик излучения антенны с поворотом плоскости поляризации (АППП) на основе разработанного плоского многослойного транс-рефлектора с аналогичным устройством с параболическим транс-рефлектором. Также описан ряд технологических преимуществ разработанной плоской структуры над параболической.

Ключевые слова: антенна с поворотом плоскости поляризации, АППП, поляризация поля, облучатель, параболический транс-рефлектор, плоский транс-рефлектор, твист-рефлектор, диаграмма направленности.

Антенны с поворотом плоскости поляризации (АППП) получили распространение в различных радиолокационных системах различного назначения и в частности, в авто-радарх диапазона КВЧ. Антенны такого типа обладают известным рядом преимуществ над классическими зеркальными антеннами [1].

Антенна АППП состоит из 3х основных элементов: облучателя, транс-рефлектора и твист-рефлектора. Наиболее сложным с точки зрения изготовления элементом антенны является транс-рефлектор, поскольку представляет собой параболический колпак, выполненный из диэлектрического материала, с расположенной на нём поляризационной решёткой металлических полосок. Трудоёмкость его изготовления, обусловлена 3-мя факторами:

- Криволинейной поверхностью параболической формы;
- Необходимостью металлизации параболической поверхности;
- Необходимостью создания поляризационной структуры на металлизированной параболической поверхности;

Известны варианты плоских конструкций [2-4] транс-рефлектора выполненные с использованием технологии изготовления печатных плат, что позволило снизить трудоёмкость изготовления транс-рефлектора. Основным недостатком транс-рефлектора [3] является низкая фазовая эффективность, обусловленная высокой величиной дискретизации $\Delta\varphi$ фазовой задержки $\Delta\varphi=180^\circ$. Транс-рефлектор [4] может быть выполнен с малым дискретом фазовой задержки ($\Delta\varphi\leq 90^\circ$).

Схематическое изображение плоского многослойного транс-рефлектора представлено на рисунке 1. За основу плоского транс-рефлектора взята конструкция многослойной рефлекторной антенны Френеля (МРАФ) [5] для случая реализации фазовой задержки $\Delta\varphi=90^\circ$ ($M=4$). Основным отличием разработанного устройства от МРАФ является то, что кольцевые непрозрачные зоны выполнены в виде полупрозрачных кольцевых зон. В свою очередь полупрозрачные кольцевые зоны (подзоны) представляют собой полупрозрачные решётки, состоящие из параллельных металлических проводников, ограниченных концентрическими окружностями. При этом, как и в МРАФ, плоский транс-рефлектор выполнен в виде многослойной структуры, состоящей из $M=4$ зонных

поверхностей, состоящих из полупрозрачных кольцевых подзон Френеля 1,2,...4. Зонные поверхности расположены на диэлектрических подложках 5, 6, 7 толщиной h_p , определяемой по соотношению (1):

$$h_p = \frac{\lambda_d}{2M}(4q + 1) \quad (1)$$

а радиусы r_{ij} , ограничивающие полупрозрачные кольцевые подзоны, определяются формулой (2):

$$r_{ij} = \sqrt{2F \left(i + \frac{j}{M}\right) \lambda_0 + \left[\left(i + \frac{j}{M}\right) \lambda_0\right]^2} \quad (2)$$

где F – фокусное расстояние, λ_0 – длина волны в свободном пространстве, $i = 0,1,2 \dots$ – номер полноволновой полупрозрачной кольцевой зоны, $j = 1,2 \dots M$ – номер полупрозрачной кольцевой подзоны λ_d – длина волны в диэлектрической подложке, $M=4 \dots$ – параметр дискретизации фазы, ε – диэлектрическая проницаемость материала подложки, $p = 1,2,3 \dots M$ – номер диэлектрической подложки, $q = 0,1,2 \dots$ – коэффициент толщины p -ой диэлектрической подложки.

Дополнительный слой 8 диэлектрического материала имеет диэлектрическую проницаемость равную диэлектрической проницаемости подложек 5, 6 ... и толщину равную $\frac{\lambda_d}{2M}(4q + 1)$, где $q=0,1,2,3 \dots$ – коэффициент толщины дополнительного диэлектрического слоя. Суммарная толщина диэлектрических подложек 5,6 ... и дополнительного диэлектрического слоя 8 должна быть равной $h_\Sigma = s \frac{\lambda_d}{2}$, где $s = 1,2,3 \dots$, которая определяет минимальные потери электромагнитной энергии при её прохождении через транс-рефлектор [6].

Рассмотрим работу транс-рефлектора согласно рисунку 1. Для случая $M=4$ транс-рефлектор (Рисунок 2) содержит четыре полупрозрачные кольцевые подзоны 1, 2, 3, 4, расположенные на трех диэлектрических подложках 5, 6, 7, толщиной $\lambda_d/8$ и дополнительный слой диэлектрического материала 8 толщиной $\lambda_d/8$.

При работе транс-рефлектора в режиме «отражения» излучаемая первичным облучателем (например, рупором) расположенным в фокусе «О», сферическая электромагнитная волна (ЭМВ) с поляризацией вектора E электрического поля совпадающей с ориентацией металлических полосок полупрозрачных кольцевых подзон 1, 2, 3, 4, расположенных на диэлектрических подложках 5, 6, 7, достигает различных полупрозрачных кольцевых подзон с разными фазовыми задержками. При этом луч, совпадающий с фокальной осью ОА трансрефлектора, имеет наименьшую фазовую задержку в свободном пространстве, принимаемую в качестве опорной, а на краю апертуры (крайней полупрозрачной кольцевой подзоне 5) максимальную фазовую задержку равную φ_{max} .

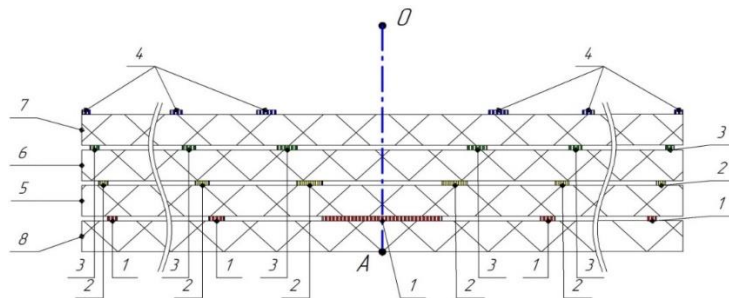


Рис. 1. Схематическое изображение плоского транс-рефлектора с параметром дискретизации фазы $M=4$.

Транс-рефлектор для формирования отражённой плоской ЭМВ должен обеспечить фазовые задержки которые изменяются от 0° на краю трансрефлектора до φ_{max}° в его центре. Необходимая коррекция фазовой задержки обеспечивается изменением длины путей лучей падающих и отражённых от полупрозрачных кольцевых подзон 1, 2, 3, 4. Так лучи ЭМВ падающие и отражённые от полупрозрачных кольцевых подзон 2, расположенных на диэлектрической подложке 6 толщиной $\frac{\lambda_d}{8}$ имеют разность длин путей относительно полупрозрачных кольцевых подзон 1, принятых за опорные, равную $\frac{\lambda_d}{4}$, т.е. обеспечивают фазовую задержку 90° . Аналогично лучи электромагнитной волны падающие и отражённые от полупрозрачных кольцевых подзон 3, 4, расположенных на диэлектрических подложках 6, 7 имеют разность длины путей относительно полупрозрачных кольцевых подзон 1 равную $\frac{\lambda_d}{2}$ и $\frac{3}{4}\lambda_d$, соответственно, т.е. фазовые задержки 180° и 270° . Таким образом, обеспечивается формирование фазового плоского фронта переотражённого от транс-рефлектора электромагнитной волны.

При падении на транс-рефлектор ЭМВ с поляризацией вектора E электрического поля перпендикулярного ориентации металлических полосок коэффициент прохождения электромагнитной волны близок к 1, при этом ЭМВ последовательно проходит через радиопрозрачные и полупрозрачные кольцевые подзоны (1, 2, 3, 4), расположенные на диэлектрических подложках (5, 6, 7), и дополнительный слой диэлектрического материала 8 толщиной $\frac{\lambda_d}{8}$ и излучается в свободное пространство.

В качестве объекта экспериментального исследования принята АППП диаметром 150 мм, с отношением фокуса к диаметру $f/D=0.5$ с двумя типами транс-рефлекторов: 1) с параболическим; 2) с многослойным плоским, имеющим параметр дискретизации фазы $M=4$, выполненным из диэлектрического материала RO 4003C с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3,55$ и тангенсом угла диэлектрических потерь $tg\delta = 0.0027$ (Рисунок 2). Компьютерное моделирование проводилось в программном пакете CST MWS во временной области в диапазоне КВЧ. Результаты компьютерного моделирования представлены в сводной таблице 1 и на рисунке 3.

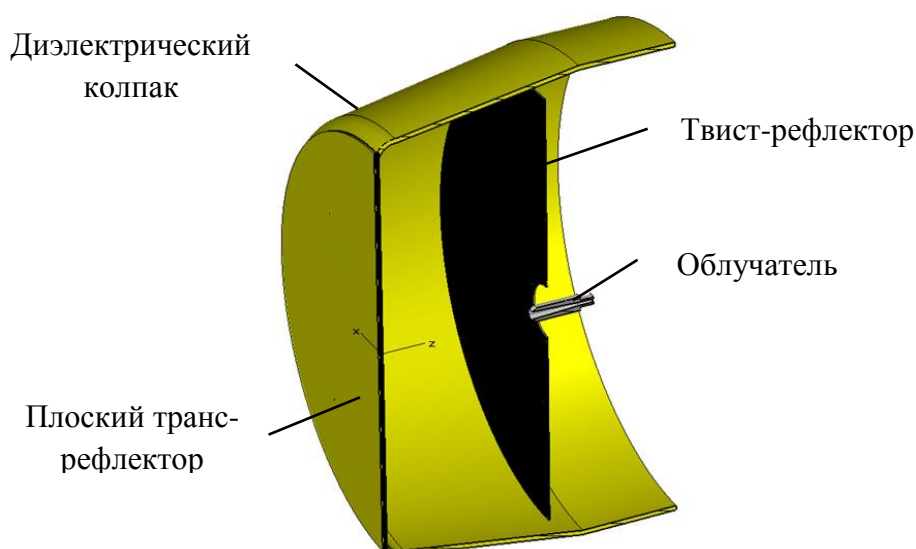


Рис. 2. Компьютерная модель АППП с плоским транс-рефлектором.

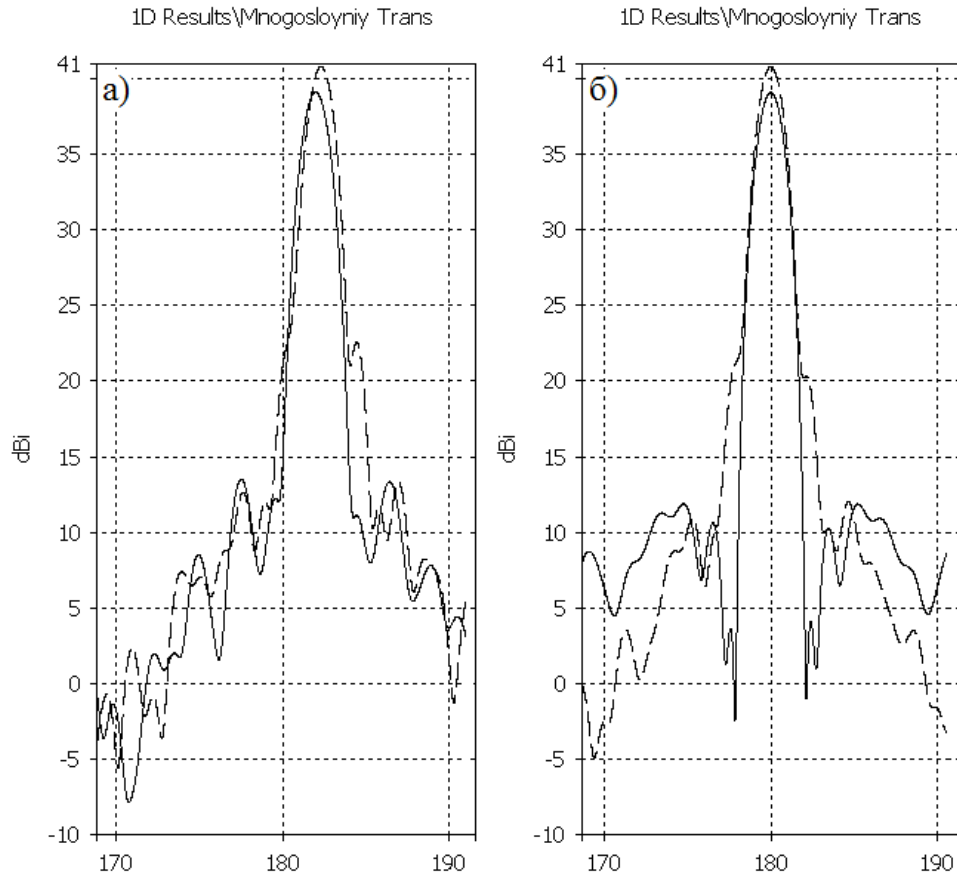


Рис. 3. Диаграммы направленности АППП с параболическим транс-рефлектором (Штриховая линия) и АППП с плоским транс-рефлектором (Сплошная линия) а) в Е – плоскости б) в Н – плоскости;

Анализ результатов компьютерного моделирования рассматриваемого АУ с плоским многослойным транс-рефлектором показал, что по сравнению с антенной имеющей параболический транс-рефлектор:

1. КУ снизился на 1,5 дБ.
2. УБЛ.
 - в азимутальной (Е – плоскости) плоскости снизился на 5,5 дБ;
 - в угломестной (Н – плоскости) плоскости снизился на 0,1 дБ;
3. ШДН
 - не изменилась и составляет 1.5 град.

Вид макета плоского многослойного и параболического транс-рефлектора показан на рисунке 4. Транс-рефлектор изготовлен по технологии многослойных печатных плат. Диэлектрические подложки 5 - 7 (рисунок 1) выполнены из материала типа RO 4003С толщиной 0.203 мм с двусторонней металлизацией и скреплены слоем препрега 6 типа RO 4350С. Дополнительный слой диэлектрического материала 8 выполнен из материала толщиной 0,813 мм имеющего параметры аналогичные материалу слоя 6, при этом суммарная толщина многослойной структуры $h_{\Sigma} \sim \lambda_d$. Результаты экспериментального исследования представлены в сводной таблице 1 и на рисунке 5.

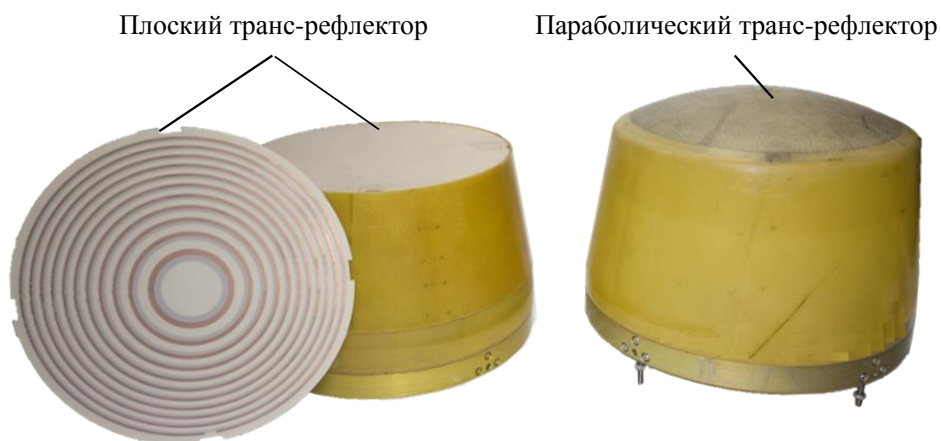


Рис. 4. Макет плоского многослойного и параболического транс-рефлектора.

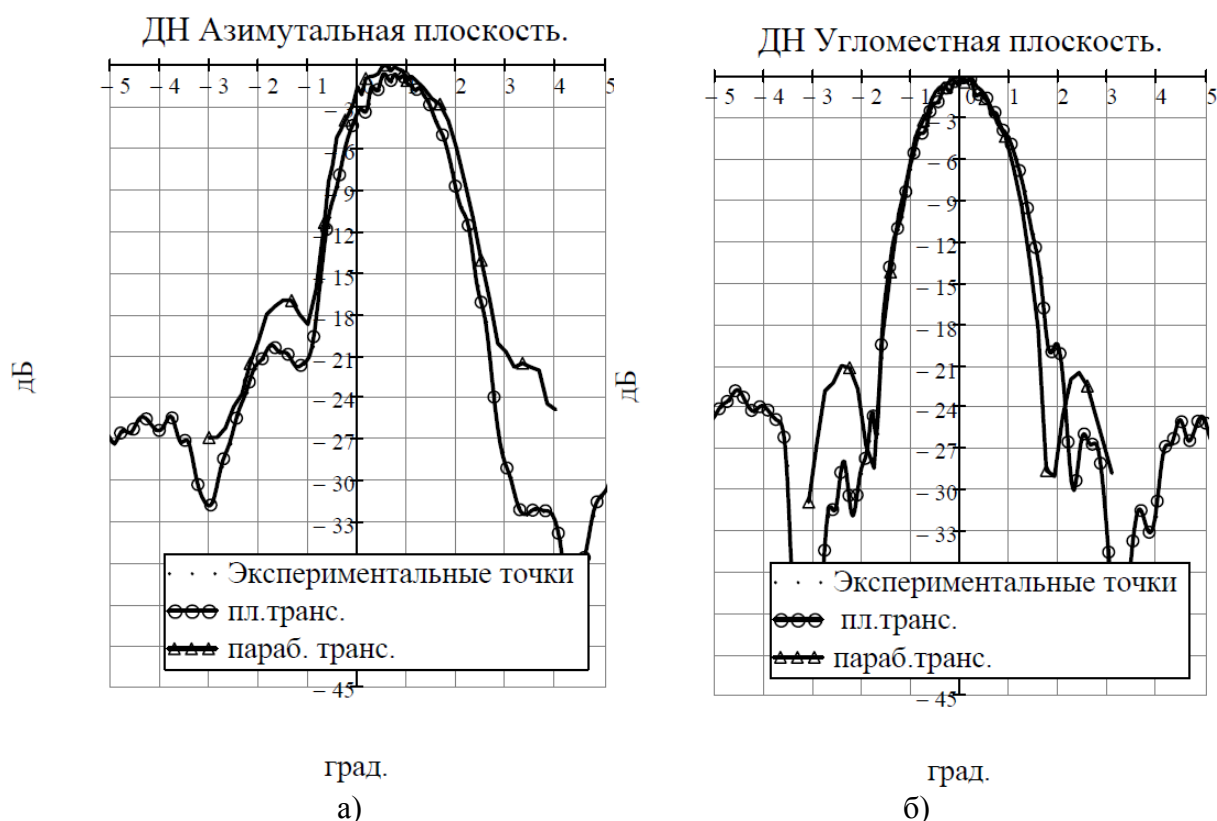


Рис. 5. Диаграммы направленности АППП с параболическим транс-рефлектором и АППП с плоским транс-рефлектором в: а) Е – плоскости б) Н – плоскости.

Таблица 1.
Характеристики излучения АППП диаметром 150 мм с двумя типами транс-рефлекторов.

№	Антенна Параметр	с параболическим транс-рефлектором				с плоским многослойным транс-рефлектором			
		Расчёт		Измерения		Расчёт		Измерения	
1.	Плоскость сечения.	Аз.	Ум.	Аз.	Ум.	Аз.	Ум.	Аз.	Ум.
2.	КНД, дБ	40.7		39.79		39.2		39.13	
3.	ШДН, град.	1.5	1.5	1.46	1.5	1.5	1.5	1.55	1.51
4.	УБЛ, дБ	-16.9	-25.2	-17.9	-21.27	-22.4	-25.3	-19.6	-22.2

Использование разработанного устройства позволяет упростить изготовление транс-рефлектора за счёт применения технологии многослойных печатных плат. Сравнительный анализ характеристик излучения АППП на основе плоского многослойного транс-рефлектора с аналогичным устройством с параболическим транс-рефлектором, приведённых в Таблице 1, показал что, характеристики макетного образца АППП с разработанным устройством практически полностью соответствуют расчётным, что подтверждает возможность практического использования АППП на основе плоского многослойного транс-рефлектора.

Библиографический список

1. E.L. Holzman Transreflector antenna design for millimeter-wave wireless links // IEEE Antennas and Propagation Magazine – Oct. 2005 vol.47, № 5 - pp. 9-22
2. C.A. Cochrane, High Frequency Radio Aerials, US Patent 2,736,895 February 28, 1956.
3. Пат.2439757 Российская Федерация, МПК H01Q15/24 (2006.01). Трансрефлектор/ Кузьмин А.А., Погребняков А.М.
4. Пат. на полезную модель 167147 Российская Федерация, МПК H01Q15/24 (2006.01). Трансрефлектор/ Кузьмин А.А., Михайлов А.Н.
5. Y. I. Guo, S. K. Barton, A High-Efficiency Quarter-Wave Zone Plate Reflector, IEEE Microwave and Guided Wove Lett., – Dec. 1992 vol. 2, no.12. - pp. 470-471,
6. Пригода Б.А., Кокунько В.С. Обтекатели антенн летательных аппаратов, М.:Изд. «Машиностроение», 1970 г., стр.51