

М. С. Батутина¹, А. А. Кузьмин¹, А. Н. Михайлов¹

¹ АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс»

АНТЕННА С ПОВОРОТОМ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ПЛОСКОГО НЕОСЕССИММЕТРИЧНОГО ТРАНСРЕФЛЕКТОРА

Описан вариант конструкции антенны с поворотом плоскости поляризации (АППП) на основе плоского неосесимметричного трансрефлектора, выполненного по технологии многослойных печатных плат. Приведен принцип построения плоского неосесимметричного трансрефлектора путем вырезки его части из осесимметричной поляризационной структуры. Форма вырезки определяется проекцией неосесимметричного параболического трансрефлектора на плоскость, перпендикулярную фокальной оси. Для исследования характеристик излучения в диапазоне КВЧ была построена электродинамическая модель АППП с плоским неосесимметричным трансрефлектором. Проведен сравнительный анализ характеристик излучения АППП на основе плоских многослойных осесимметричного и неосесимметричного трансрефлекторов. Рассмотрены технологические преимущества разработанной плоской структуры над неосесимметричным параболическим трансрефлектором, которые достигаются за счет применения известной технологии многослойных печатных плат.

Ключевые слова: поляризация поля, облучатель, параболический трансрефлектор, твистрефлектор, диаграмма направленности

Введение

Антенны с поворотом плоскости поляризации (АППП) получили широкое распространение в радиолокационных станциях (РЛС) различного назначения [1] (включая автомобильные радары [2]) и системах связи [3]. Антенны такого типа обладают рядом преимуществ над классическими зеркальными антеннами [4].

Основным недостатком классической АППП является сложность изготовления параболического трансрефлектора, обусловленная криволинейностью его поверхности параболической формы, необходимостью ее металлизации и дальнейшего скрайбирования для создания поляризационной структуры. Этот недостаток возможно частично устранить за счет построения АППП на основе плоского трансрефлектора [5].

В работах [5, 6] подробно описан принцип действия плоского осесимметричного трансрефлектора, а также приведен вариант конструкции АППП на его основе. Плоский многослойный трансрефлектор обеспечивает преобразование сферического фронта электромагнитной волны (ЭМВ), падающей от облучателя, который расположен на фокальной оси осесимметричной АППП, путем создания дискретного фазового распределения. Плоский трансрефлектор состоит из полноволновых зон,

количество которых определяется диаметром D трансрефлектора, расположенных на M диэлектрических подложках толщиной:

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

где $\lambda_D = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon}}$ – длина волны в диэлектрической подложке, $M = 3, 4, \dots$ – параметр дискретизации фазы, ϵ – диэлектрическая проницаемость диэлектрической подложки, $p = 1, 2, 3, \dots, M$ – номер диэлектрической подложки, $q = 1, 2, 3, \dots$ – коэффициент толщины p -й диэлектрической подложки. В этом случае преобразование приходящего на раскрыт плоского трансрефлектора сферического фронта ЭМВ в плоский фронт осуществляется фазовой компенсацией от 0° до 180° в пределах каждой полноволновой зоны. Это достигается делением каждой полноволновой зоны на M подзон с постоянным фазовым сдвигом $2\pi/M$ в каждой подзоне.

Концентрические кольцевые подзоны расположены на различных поверхностях подложек, так что i -я полноволновая зона имеет $(M-j)$ слоев подложек, расположенных выше проводящих колец над j -й подзоной ($j = 1, 2, 3, \dots, M$). При этом радиусы r_{ij} j -й подзоны в i -й полноволновой зоне определяются выражением:

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

где F – фокусное расстояние.

Таким образом, формируется ступенчатое дискретное фазовое распределение, корректирующее сферический фронт приходящей волны.

Результаты экспериментального исследования макетного образца АППП на основе плоского осесимметричного трансрефлектора, приведенные в [6], показали хорошее совпадение характеристик антенны при упрощении процесса его производства по сравнению с параболическим трансрефлектором. При этом изготовление платы многослойного трансрефлектора осуществлялось по хорошо отработанной технологии производства многослойных печатных плат [12].

Положительные результаты, полученные при построении АППП на основе плоского симметричного трансрефлектора, позволяют рассмотреть возможность создания неосесимметричной АППП с плоским трансрефлектором.

Принцип построения плоского неосесимметричного трансрефлектора

В отличие от осесимметричной структуры плоского трансрефлектора [5], в которой максимум сформированной диаграммы направленности (ДН) излучения совпадает с нормалью к плоскости трансрефлектора за счет его симметричной структуры, в неосесимметричной АППП волна падает на поверхность трансрефлектора под углом α , определяемым углом смещения оси облучателя относительно фокальной оси трансрефлектора. При этом максимум излучения ДН, сформированной трансрефлектором, должен быть также направлен по нормали к его поверхности, что требует создания неосесимметричной поляризационной структуры. Такая структура может быть сформирована как вырезка из плоского многослойного осесимметричного трансрефлектора.

На рис. 1 показан процесс получения вырезки плоского многослойного неосесимметричного трансрефлектора и проведена аналогия с неосесимметричной параболической вырезкой [8–10].

Для построения неосесимметричной АППП на основе плоского многослойного трансрефлектора с вынесенным облучателем необходимо определить границы зон Френеля, координаты которых могут быть рассчитаны по формуле (2).

Форма вырезки плоского многослойного неосесимметричного трансрефлектора (рис. 1б) определяется проекцией неосесимметричного параболического трансрефлектора (рис. 1а) на плоскость, перпендикулярную фокальной оси, и является, согласно [8], окружностью, диаметр которой равен диаметру D вырезки из неосесимметричного параболического зеркала. Дугообразные полупрозрачные подзоны на слоях многослойного трансрефлектора образованы вырезками из кольцевых полупрозрачных подзон радиусами r_{ij} на соответствующих слоях осесимметричного плоского многослойного трансрефлектора.

Пересечение кольцевых полупрозрачных подзон радиусами r_{ij} с окружностью диаметром D с координатами точек начала и конца дугообразных полупрозрачных подзон на плате определяется выражениями:

$$x_n = \pm r_{ij} \sqrt{1 - \left(\frac{2r_{ij} h + r_{ij}^2}{r_{ij}(r_{ij\max} + h)}\right)^2}; y_n = \frac{2r_{ij} h + r_{ij}^2}{r_{ij\max} + h}; h = H - r, \quad (3)$$

где r_{ij} – радиус n -й кольцевой подзоны, $r_{ij\max}$ – максимальный радиус кольцевой подзоны, H – координата положения центра вырезки, r – радиус вырезки печатной платы.

Для исследования характеристик излучения АППП с плоским неосесимметричным трансрефлектором в диапазоне КВЧ была построена ее электродинамическая модель (рис. 2).

Представленная модель имеет следующие основные геометрические размеры:

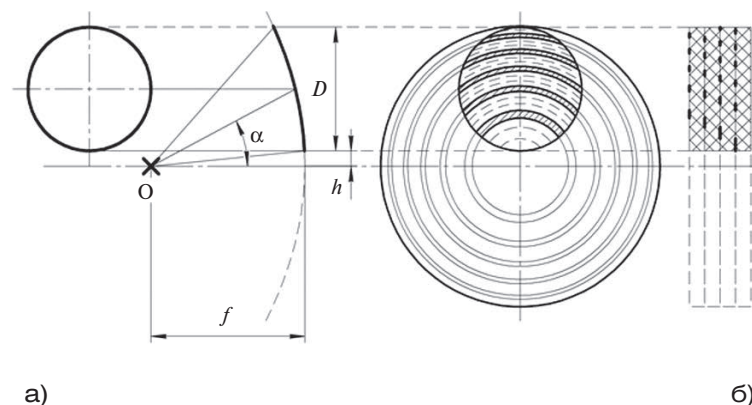


Рисунок 1. Процесс получения вырезки плоского многослойного неосесимметричного трансрефлектора

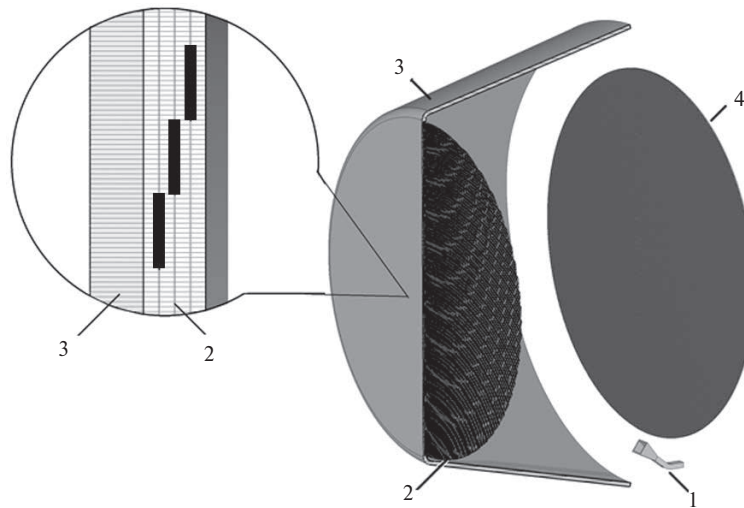


Рисунок 2. Компьютерная модель антенны с поворотом плоскости поляризации с плоским неосесимметричным трансрефлектором: 1 – облучатель; 2 – структура неосесимметричного трансрефлектора; 3 – диэлектрический колпак трансрефлектора; 4 – твистрефлектор

- облучатель – пирамидальный рупор длиной 9,5 мм с апертурой размерами 5,5 и 5,0 мм в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно;
- угол между осью облучателя и фокальной осью трансрефлектора $\alpha = 38^\circ$;
- диаметр трансрефлектора $D_{\text{тр}} = 150$ мм с отношением фокуса к диаметру $f/D_{\text{тр}} = 0,75$;
- дискрет фазирования трансрефлектора составляет 90° ($M = 4$);
- диаметр твистрефлектора $D_{\text{ТВ}} = 160$ мм.

Толщина плоской части диэлектрического колпака совместно с толщиной плоского трансрефлектора должна быть равна $h_{\Sigma} = u \frac{\lambda_{\text{д}}}{2}$ [11], где $u = 1, 2, 3 \dots$ При этом целесообразно использовать

материалы диэлектрического колпака и подложек плоского трансрефлектора с одинаковыми диэлектрическими параметрами. Моделирование характеристик излучения АППП с плоским неосесимметричным трансрефлектором в диапазоне КВЧ проводилось методом конечных разностей во временной области (FDTD).

Результаты моделирования

Результаты моделирования ДН, а также коэффициента направленного действия (КНД), ширины диаграммы направленности (ШДН) и уровня первого бокового лепестка (УБЛ), характеризующих излучение исследуемой АППП, показаны на рис. 3. В сводной таблице для сравнения приведены характеристики излучения АППП на основе плоского осесимметричного [6] и неосесимметричного трансрефлекторов.

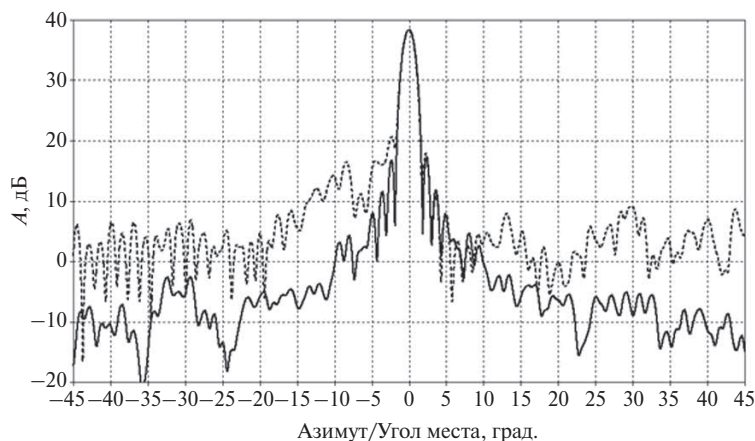


Рисунок 3. Диаграмма направленности антенны с поворотом плоскости поляризации с плоским неосесимметричным трансрефлектором в азимутальной (непрерывная линия) и угломестной (штриховая линия) плоскостях

Таблица. Характеристики излучения АППП диаметром 150 мм с двумя типами плоских трансрефлекторов

Тип АППП	С осесимметричным трансрефлектором		С неосесимметричным трансрефлектором	
	Азимутальная	Угломестная	Азимутальная	Угломестная
КНД, дБ	39,1		38,4	
ШДН по 3 дБ, град.	1,4	1,5	1,5	1,5
УБЛ, дБ	-21,4	-21,9	-21,3	-17,7

Как видно из результатов моделирования, формы основного лепестка ДН, сформированного АППП с плоским многослойным неосесимметричным и осесимметричным трансрефлекторами, практически не отличаются друг от друга. Основные изменения касаются снижения КНД на 0,7 дБ и роста УБЛ в угломестной плоскости на 4,2 дБ, которые можно объяснить следующими факторами:

- неоптимизированной ДН облучателя и его угловым положением;
- прохождением части сферической электромагнитной волны, излучаемой облучателем, который расположен под углом α к фокальной оси, через пространство между содержащими полупрозрачные подзоны слоями с последующим излучением в свободное пространство;

- увеличенной толщиной диэлектрического колпака, являющегося конструктивным элементом антенны, в зоне расположения плоского трансрефлектора.

Выводы

В работе показаны результаты моделирования характеристик излучения, свидетельствующие о принципиальной возможности создания неосесимметричной АППП на основе плоского многослойного трансрефлектора. Такое устройство проще в изготовлении по сравнению с неосесимметричным параболическим трансрефлектором благодаря применению хорошо известной технологии многослойных печатных плат. Учет при разработке антенны факторов, приведших к некоторому увеличению УБЛ в вертикальной плоскости и снижению КНД, позволит улучшить указанные характеристики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авиационные радиолокационные комплексы и системы / П. И. Дудник, Г. С. Кондратенков, Б. Г. Татарский, А. Р. Ильчук, А. А. Герасимов. М.: ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 2006. 1112 с.
2. Du Preez J., Sinha S. Millimeter-wave antennas: configurations and applications. Springer, 2016. 155 p.
3. Menzel W., Moebius A. Antenna concepts for automotive radar sensors // Proceedings of the IEEE. 2012. Vol. 100. No. 7. P. 2372–2379.
4. Holzman E. L. Transreflector antenna design for millimeter-wave wireless links // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2005. Vol. 47. No. 5. P. 9–22.
5. Патент РФ на полезную модель № 167147 / 27.12.2016. Кузьмин А. А., Михайлов А. Н. Трансрефлектор.
6. Кузьмин А. А., Михайлов А. Н. Антенна с поворотом плоскости поляризации на основе плоского транс-рефлектора // Матер. 27-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 2017. С. 1187–1193.
7. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ. М.: Высшая школа, 1988. С. 388–389.
8. Rudge A. W., Adatia N. A. Offset-parabolic-reflector antennas: a review // Proceedings of the IEEE. 1978. Vol. 66. No. 12. P. 1592–1618.
9. Krichevskiy V., Difonzo D. D. Optimum beam scanning in offset single and dual reflector antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1985. Vol. AP-33. No. 2. P. 179–188.
10. Jamnejad-Dailami V., Rahmat-Samii Y. Some important geometrical features of conic-section generated offset reflector antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1980. Vol. AP-28. No. 6. P. 952–957.
11. Пригода Б. А., Кокунько В. С. Обтекатели антенн летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1970. 288 с.
12. Федюлов А. А., Устинов Ю. А., Котов Е. П. Технология многослойных печатных плат. М.: Радио и связь, 1990. 208 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Батутина Мария Сергеевна, ведущий инженер, АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», Российская Федерация, 197375, Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, д. 37, лит. А, тел.: 8 (953) 364-61-67, e-mail: batutina_ms@radar-mms.com.

Кузьмин Александр Александрович, к.т.н., начальник отделения, АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», Российская Федерация, 197375, Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, д. 37, лит. А, тел.: 8 (921) 312-15-08, e-mail: kuzmin_aa@radar-mms.com.

Михайлов Артемий Николаевич, инженер, АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», Российская Федерация, 197375, Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, д. 37, лит. А, тел.: 8 (981) 793-36-53, e-mail: mihajlov_an@radar-mms.com.

For citation: Batutina M. S., Kuzmin A. A., Mikhailov A. N. Transreflector antenna design based on flat multilayer transreflector. Voprosy radioelektroniki, 2019, no. 2, pp. 26–30. DOI 10.21778/2218-5453-2019-2-26-30

M. S. Batutina, A. A. Kuzmin, A. N. Mikhailov

TRANSREFLECTOR ANTENNA DESIGN BASED ON FLAT MULTILAYER TRANSREFLECTOR

The paper considers an embodiment of the antenna design based on a flat non-axis-symmetrical transreflector made by using multilayer printed circuit board technology. The construction principle of a flat non-axis-symmetrical transreflector by cutting it from the flat polarizing structure is given. The form of the flat multi-layer non-axisymmetric transreflector board is determined by the projection of the non-axisymmetric parabolic transreflector onto a plane perpendicular to the focal axis. An electrodynamic model of the antenna with a flat non-axis-symmetrical reflector to study the radiation characteristics in the UHF range was constructed. A comparative analysis of the radiation characteristics of antennas on the basis of planar multilayer axisymmetric and flat multilayer non-axis-symmetrical transreflectors was performed. A number of technological advantages of the developed flat structure over a non-axis-symmetrical parabolic transreflector due to use of the known technology of multilayer printed circuit boards is also described.

Keywords: electric field polarization, feed system, parabolic transreflector, non-axis-symmetrical transreflector, farfield

REFERENCES

1. Dudnik P. I., Kondratenkov G. S., Tatarskii B. G., Ilchuk A. R., Gerasimov A. A. *Aviatsionnye radiolokatsionnye komplekсы i sistemy* [Aviation radar complexes and systems]. Moscow, N. E. Zhukovskiy VVIA Publ., 2006, 1112 p. (In Russian).
2. Du Preez J., Sinha S. *Millimeter-wave antennas: configurations and applications*. Springer, 2016, 155 p.
3. Menzel W., Moebius A. Antenna concepts for automotive radar sensors. *Proceedings of the IEEE*, 2012, vol. 100, no. 7, pp. 2372–2379.
4. Holzman E. L. Transreflector antenna design for millimeter-wave wireless links. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2005, vol. 47, no. 5, pp. 9–22.
5. Patent RUS No. 167147 / 27.12.2016. Kuzmin A. A., Mikhailov A. N. Transreflector. (In Russian).
6. Kuzmin A. A., Mikhailov A. N. Antenna with rotation of the plane of polarization based on a flat transreflector. (Conference proceedings) 27-ya Mezhdunarodnaya Krymskaya konferentsiya «SVCh-tehnika i telekommunikatsionnye tekhnologii». Sevastopol, 2017, pp. 1187–1193. (In Russian).
7. Sazonov D. M. *Antenny i ustroystva SVCh* [Antennas and microwave devices]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988, pp. 388–389. (In Russian).
8. Rudge A. W., Adatia N. A. Offset-parabolic-reflector antennas: a review. *Proceedings of the IEEE*, 1978, vol. 66, no. 12, pp. 1592–1618.
9. Krichevskiy V., Difonzo D. D. Optimum beam scanning in offset single and dual reflector antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1985, vol. AP-33, no. 2, pp. 179–188.
10. Jamnejad-Dailami V., Rahmat-Samii Y. Some important geometrical features of conic-section generated offset reflector antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1980, vol. AP-28, no. 6, pp. 952–957.
11. Prigoda B. A., Kokunko V. S. *Obtekateli anten letatelnykh apparatov* [Radomes of aircraft]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970, 288 p. (In Russian).
12. Fedulov A. A., Ustinov Yu. A., Kotov E. P. *Tehnologija mnogoslojnykh pechatnykh plat* [Multilayer printed circuit boards technology]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1990, 208 p. (In Russian).

AUTHORS

Batutina Mariya, engineer, «NPP «Радар ммс» JSC, 37A, Novoselkovskaya St., Saint-Petersburg, 197375, Russian Federation, tel.: +7 (953) 364-61-67, e-mail: batutina_ms@radar-mms.com.

Kuzmin Aleksandr, Ph. D., head of sub-branch, «NPP «Радар ммс» JSC, 37A, Novoselkovskaya St., Saint-Petersburg, 197375, Russian Federation, tel.: +7 (921) 312-15-08, e-mail: kuzmin_aa@radar-mms.com.

Mikhailov Artemy, engineer, «NPP «Радар ммс» JSC, 37A, Novoselkovskaya St., Saint-Petersburg, 197375, Russian Federation, tel.: +7 (981) 793-36-53, e-mail: mihajlov_an@radar-mms.com.