

Орест Вендик, профессор, д. т. н.  
Михаил Парнес, к. т. н.

# Фазовращатели сканирующих антенн для радаров обзора территорий

**В статье рассмотрено несколько новых типов фазовращателей для антенн со сканированием луча, имеющих малую стоимость. Такие недорогие сканирующие антенны могут быть использованы в обзорных радарх сантиметровых и миллиметровых диапазонов волн.**

## Введение

В настоящее время целый ряд радарных станций нуждаются в антеннах с электронным движением луча. И хотя существует множество разработок плоских антенных решеток с электрическим управлением, главной преградой на пути применения таких систем остается их высокая стоимость. Необходимость обеспечения больших углов качания при сравнительно высоком уровне коэффициента усиления 30–35 дБ, неизбежно приводит к увеличению количества элементов антенны, которое, для разных систем, может достигать от нескольких тысяч до нескольких десятков тысяч единиц и, как следствие этого, увеличению числа фазовращателей, формирующих фазовый фронт волн, излучаемых антенной. При применении традиционных систем управления на основе *p-i-n* диодных фазовращателей. Их стоимость по оценкам специалистов может достигать от \$100 до \$200 за штуку при массовом производстве. Естественно, такая цена фазовращателей делает антенны с электронным движением луча неконкурентоспособными по сравнению с механическими системами. Поэтому весьма важная задача — поиск нового типа фазовращателей, имеющих значительно меньшую стоимость, нежели существующие аналоги.

Для решения этой проблемы могут быть использованы следующие пути:

- 1) Использование полупроводниковых фазовращателей нового типа — отражательных излучателей-фазовращателей.
- 2) Использование сегнетоэлектрических фазовращателей.

## Фазовращатели сантиметрового и миллиметрового диапазонов

Базовым компонентом антенны с электрическим управлением диаграммой направленности является фазовращатель. Если не принимать в расчет ферритовые фазовращатели из-за сложности их реализации для коммерческих применений и большого потребления энергии в цепях управления (единицы Вт), то сегодня можно выделить несколько типов электрически управляемых фазовращателей, экспериментально ре-

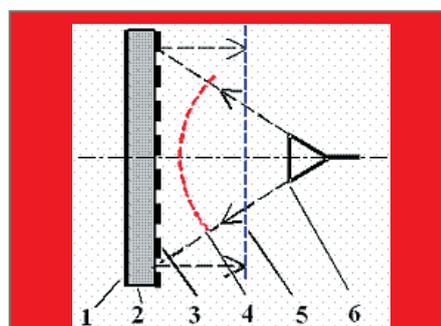
ализованных и отличающихся типом элемента управления: на полевых транзисторах, *p-i-n* диодах, варакторных диодах, микроэлектромеханических системах (МЭМС) и сегнетоэлектриках. Фазовращатели на полупроводниковых управляющих элементах, несомненно, занимают значительную позицию, главным образом, благодаря возможности реализации монолитной схемы СВЧ на основе GaAs или Si, включающей в себя малошумящие усилители и имеющие при этом сравнительно малые массогабаритные параметры и малое потребление мощности по цепям управления (несколько сотен мВт). Между тем, фазовращатели на полупроводниковых элементах сравнительно дороги при массовом производстве, а, кроме того, на частотах более 30 ГГц уступают по потерям своим сегнетоэлектрическим и МЭМС аналогам. Сейчас лидерами по характеристикам считаются фазовращатели на основе микроэлектромеханических систем, сочетающие в себе как малые вносимые потери (менее 1 дБ) практически во всем частотном диапазоне СВЧ (до 100 ГГц) при пренебрежимо малом потреблении мощности по цепям управления (единицы мВт), так и возможности монолитной технологии. Конечно, эти приборы не лишены недостатков, основной из которых — сравнительно низкое быстродействие. Наилучшим является время срабатывания порядка 10 мкс. Другим недостатком является ограниченное число механических переключений, то есть ограниченный срок службы, существенно меньший, чем у полупроводниковых ключей. Кроме того, остается неясным, какова будет себестоимость фазовращателей на МЭМС при массовом производстве, поскольку технология изготовления МЭМС усложняется изготовлением воздушного мостика, подвешенного на расстоянии 1,5 мкм над поверхностью подложки.

К преимуществам фазовращателей на основе сегнетоэлектрика можно отнести: малое время переключения (десятки наносекунд), малое потребление энергии в цепях управления (единицы мВт) низкие фазовые шумы, меньшую, по сравнению с полупроводниковыми аналогами, себестоимость, а также возможность интегрального исполнения устройств на основе сегнетоэлектрика. Особое внимание следует обратить на малые величины зазоров порядка 10 мкм планарного конденсатора или линии передачи, которые необходимы для получения требуемой напряженности управляющего поля при умеренной величине приложенного напряжения. Помимо низкой себестоимости, сегнетоэлектрические материалы обладают рядом преимуществ, которые позво-

ляют расширить возможности приборов и устройств, построенных на иных материалах и физических явлениях. Все перечисленные факты открывают очевидную перспективу использования сегнетоэлектрических материалов в качестве активных элементов современных ФАР. К сожалению, ни в России, ни за рубежом нет массового производства сегнетоэлектрических элементов для СВЧ-приложений.

### Отражательная антенная решетка

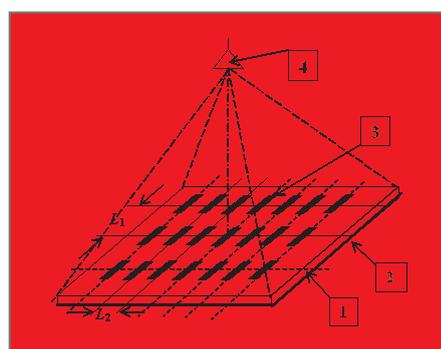
Одной из перспективных, с точки зрения снижения цены, схемы построения фазированной решетки является отражательная схема. В такой схеме (рис. 1)



**Рис. 1.** Микрополосковая отражательная антенная решетка: 1 — металлический экран; 2 — диэлектрическая плата; 3 — элемент «излучатель — фазовращатель»; 4 — сферический фронт падающей волны из облучателя; 5 — плоский фронт, сформированный антенной; 6 — облучатель

используется печатная плата с полупроводниковыми фазовращателями, совмещенными с микрополосковыми излучателями, и облучатель для освещения СВЧ-полем. Такая структура приводит к объединению в топологию нескольких компонентов, что и дает значительное упрощение схемы и, в конечном итоге, приводит к снижению стоимости.

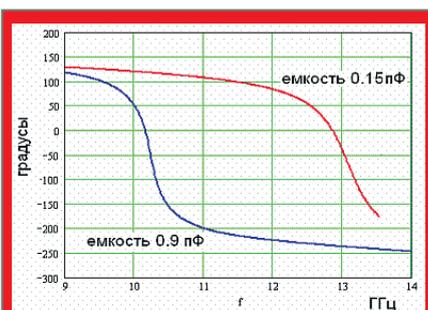
На рис. 2 показано взаимное расположение элементов «переизлучатель — фазовращатель» на печатной плате, при котором шаг  $L_x$



**Рис. 2.** Общий вид отражательной антенной решетки с электрическим сканированием: 1 — диэлектрик; 2 — экран; 3 — элемент «излучатель — фазовращатель»; 4 — облучатель

и  $L_y$  по X и по Y определяется из соображений получения необходимого сектора сканирования и бокового излучения. Принцип действия элемента «переизлучатель — фазовращатель» заключается в том, что в микрополосковый диполь вводится электрически управляемый конденсатор. При изменении емкости меняется электрическая длина диполя и, как следствие, фаза коэффициента отражения переизлученной волны. Устанавливая с помощью управляющих напряжений в каждом варикапе свою фазу, полученную по расчету антенной решетки, можно сформировать луч в нужном направлении. Фазоуправляемым элементом в такой антенне является варактор, в котором электрически перестраивается емкость обратного смещенного p-n-перехода.

Преимущества такой конструкции следующие: во-первых, использование стандартной технологической линии изготовления печатных плат и поверхностного монтажа электронных компонентов, во-вторых, отсутствие потерь в распределителе мощности, так как не используются линии передач и, в-третьих, технологические возможности современного оборудования для печатного монтажа позволяют использовать эту технологию вплоть до  $K_u$  (10–14 ГГц) и  $K_d$  (26–40 ГГц) диапазонов. Для расчета элемента «излучатель — фазовращатель» была создана аналитическая методика проектирования по математической модели в программе MathCAD и эквивалентная электрическая схема, которую можно рассчитать, например, с помощью программы Ansoft Designer. На рис. 3 показаны результаты расчета фазы в частотном диапазоне  $K_u$ , для крайних значений

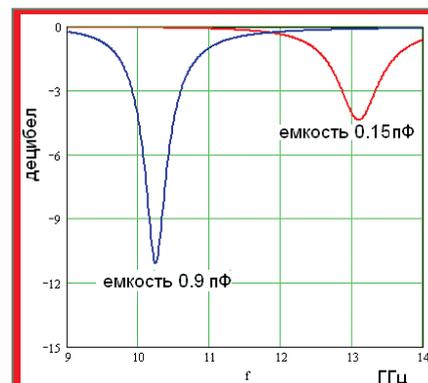


**Рис. 3.** Фаза коэффициента отражения ячейки микрополоскового элемента с включенным в него варактором; расчетная кривая выполнена по программе Ansoft Designer

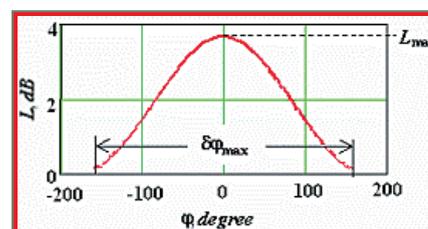
емкостей варактора 0,15 и 0,9 пФ, а на рис. 4, 5 показано, каковы будут потери в фазовращателе данного типа. Эти графики приведены для варикапа МА46Н120 (фирмы МАСОМ). Экспериментальные данные дают возможность установить, что фаза изменяется от 0° до 310°, а средние потери составляют 2,2 дБ. Рис. 6 представляет собой фотографии печатных плат с элементами

**Т а б л и ц а 1.** Цены комплектующих на единичную ячейку

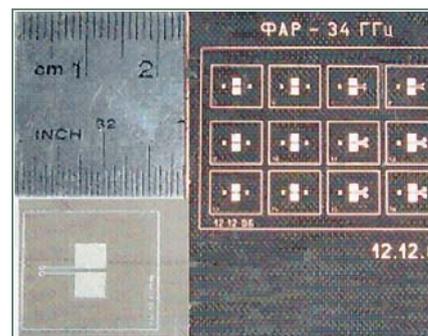
Рабочая частота, ГГц	Варактор	Конденсатор резистор, диэлектрик	Итого, \$
12	1,8	1,2	3
33	3,5	1,2	4,7



**Рис. 4.** Амплитуда коэффициента отражения ячейки микрополоскового элемента; расчеты выполнены по эквивалентной схеме в программе Ansoft Designer



**Рис. 5.** Экспериментальные данные потерь в зависимости от фазового угла на частоте 12 ГГц, варактор МА46Н120 с добротностью  $Q=3000$



**Рис. 6.** Фотографии печатных плат: ячейка 18×18 мм с варактором МА46Н120 для 12 ГГц и ячейка 6×6 мм с варактором MV39001 для 33 ГГц

«излучатель — фазовращатель» для диапазона 12 ГГц (варикап МА46Н120, ячейка размером 18×18 мм), а также для диапазона 33 ГГц (ячейка размером 6х6 мм с варикапом MV39001). Стоимостные (ориентировочные) характеристики для фазовращателей и для ФАР (рис. 7), построенных по этому принципу, сведены в таблицах 1 и 2.

**Т а б л и ц а 2.** Ориентировочная стоимость микрополосковой отражательной ФАР

Частота, ГГц	Количество элементов, шт.	Цена, \$
12	500	1500
	1000	3000
33	500	2350
	1000	4700



Рис. 7. Опытные образцы ФАР на частоту 12 ГГц, 532 излучателя с варакторами МА46Н120

### Радары сантиметрового и миллиметрового диапазона

При сложившейся рыночной ситуации должны быть найдены новые возможности для систем наблюдения и обнаружения, повышена надежность технологий наблюдения.

Есть несколько главных недостатков существующих решений:

- инфракрасные сенсоры не работают в условиях тумана и пыли;
- отсутствует возможность измерения расстояния;
- недостаточное качество распознавания целей.

Главное достижение технологии миллиметровых волн — электронное сканирование луча, который увеличивает дальность обнаружения и надежность распознавания.

Радары миллиметрового диапазона нового типа обладают рядом преимуществ:

- измеряется расстояние до объекта;



Рис. 8. Радар обзора территории, установленный на треноге

- возможно обнаружить перемещающуюся цель, включая ползущего и плавающего человека, с радиальной скоростью больше чем 0,1 м/с;
  - Возможно обнаружить цель на основе постоянного слежения, с определением факта движения вперед-назад за 1 с, движения цели вправо-влево за 3–5 с, с отображением детального спектрального портрета для идентификации;
  - радар «радиоскрытен» из-за малого излучения передатчика мощностью 0,1 Вт, что в 10 раз меньше мощности мобильного телефона;
  - радар миллиметрового диапазона работает при отсутствии видимости — при тумане и пыли.
- На базе описанных фазовращателей могут быть разработаны три типа радаров, для того, чтобы преодолеть недостатки существующих технологий и использовать преимущества микроволновой радарной технологии:
- Легкий портативный радар с дальностью 100–300 м, который устанавливается на треноге (рис. 8). Радар обнаруживает людей,

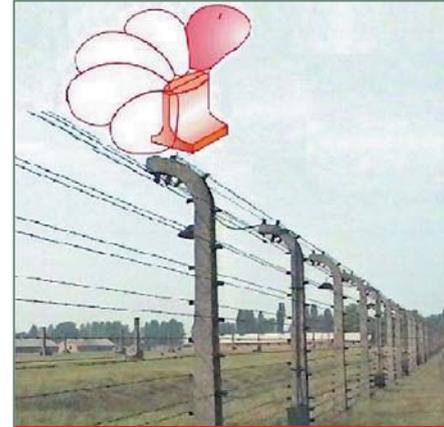


Рис. 9. Радар, установленный на границе охраняемой территории

транспортные средства и воднотранспортные объекты, перемещающиеся в пределах сектора  $90^\circ$  или  $180^\circ$ , при отсутствии видимости, то есть при тумане, дыме, пыли.

- Портативный радар с дальностью несколько километров. Радар используется для детального наблюдения за выбранным объектом. Обнаруживает идущих людей, транспортные и воднотранспортные средства. Радар выявляет и оценивает параметры движений и выполняет распознавание целей. Зона контроля в азимуте —  $60^\circ$ . Проводит измерение расстояния. Детализирует спектральный портрет.
- Радар, который обнаруживает вторжение в охраняемых областях и посылает тревожный сигнал. Предназначен для защиты аэропортов, промышленных зон и т. д. Радар устанавливается на ограждении 4–6 м высотой (рис. 9). Он обнаруживает двигающихся людей, транспортные средства и водный транспорт. Диапазон контроля одного радарного модуля — 2 км вперед и  $60-90^\circ$  в азимуте. ¶