

# Обобщенная нелинейная модель одноразрядной единичной ячейки проходной антенной решетки на основе PIN-диода

В.В. Кириллов, П.А. Туральчук

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

**Аннотация:** в данной работе представлены результаты анализа нелинейных искажений в единичной ячейке проходной антенной решетки, вызванных наличием управляющего элемента. Разработана обобщенная модель единичной ячейки с одноразрядным фазовращателем на основе PIN-диода, позволяющая оценить зависимости потерь и интермодуляционных продуктов третьего порядка от приложенного напряжения. Результаты измерений модулей коэффициента передачи и уровня интермодуляционных составляющих третьего порядка изготовленной единичной ячейки в зависимости от уровня входной мощности при различных напряжениях смещения хорошо согласуются с результатами моделирования. Это подтверждает возможность использования данной модели для оценки линейных и нелинейных характеристик проходных антенных решеток.

**Ключевые слова:** антенная решетка, единичная ячейка, диод, нелинейность, интермодуляция

## 1. Введение

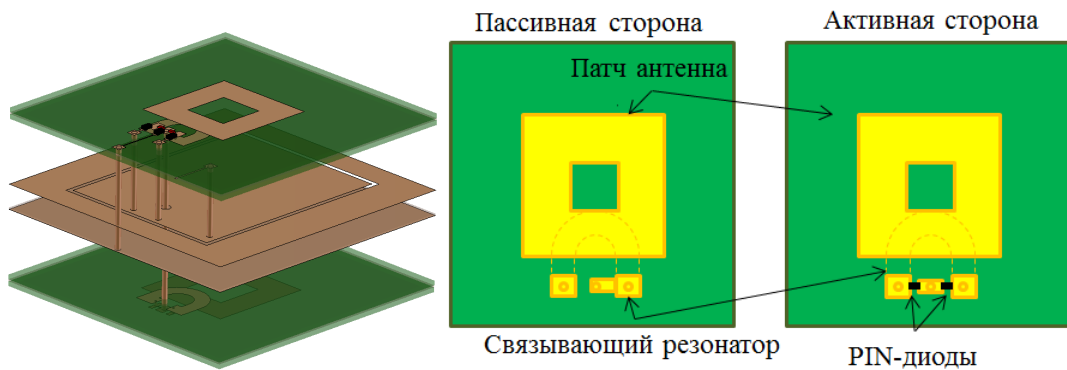
В настоящее время пропускная способность канала связи является одним из важнейших параметров современных систем связи вследствие увеличения числа пользователей, объема беспроводной передачи данных и стремительным развитием интернета вещей. В беспроводной связи ограничение пропускной способности происходит из-за низкого отношения сигнал/шум и в качестве одной из причин этого являются высокие потери на распространение электромагнитных волн. Они могут быть компенсированы с помощью антенных систем с высоким коэффициентом усиления, таких как диэлектрические линзы, метаповерхности, проходные или отражательные антенные решетки [1]-[3].

Проходные и отражательные решетки имеют схожую структуру и содержат антенный элемент с низким коэффициентом усиления, в качестве первичного облучателя, а также решетку периодически размещенных единичных ячеек со встроенными фазовращателями. Фазовращатели, интегрированные в единичные ячейки, основаны на одноразрядной конструкции фазовой дискретизации благодаря своей простоте и малым потерям [4]-[6], особенно на высоких частотах [7]. Существует множество различных способов реализации реконфигурируемых единичных ячеек, наиболее популярным элементом управления являются PIN-диоды из-за небольших размеров, широкого частотного диапазона работы и простоты схемы смещения. Однако диод является нелинейным элементом и генерирует нелинейные продукты, величины которых зависят от величины подаваемой входной мощности и напряжения смещения. Таким образом, имеется необходимость изучить линейные и нелинейные характеристики элементарной ячейки, для того чтобы оценить уровень нелинейных искажений и потери, создаваемые проходной антенной решеткой.

## 2. Нелинейная обобщенная модель единичной ячейки

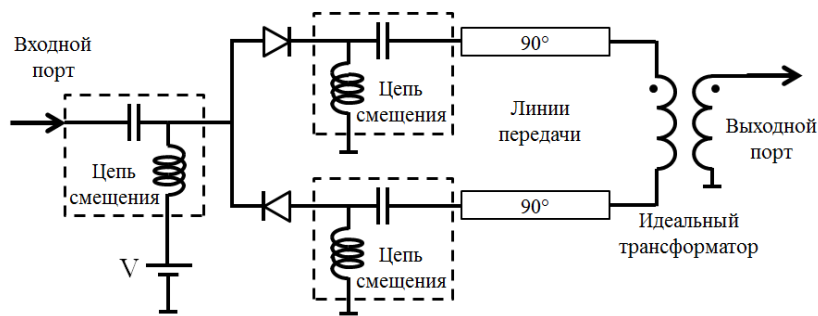
Конструкция реконфигурируемой одноразрядной единичной ячейки состоит из двух почти одинаковых сторон: активной и пассивной, как показано на рисунке 1. Обе

содержат антенну и элемент связи, которые соединяют обе стороны единичной ячейки. Патч-антенны широко используются в качестве антенных элементов в единичных ячейках [7], [8]. Активная сторона содержит два PIN-диода для электронного переключения фазовых состояний фазовращателя. Диоды обычно включаются встречно и соединены с противоположной стороной антенны или элемента связи. Для постоянного тока диоды включены параллельно источнику напряжения смещения, что значительно упрощает реализацию цепей смещения постоянного тока и конструкцию блока управления. Переключение состояния фаз в элементарных ячейках обеспечивается изменением полярности напряжения смещения на PIN-диодах. Смена полярности изменяет направление тока в антенне на активной стороне единичной ячейки по отношению к пассивной стороне, что позволяет достичь разности фаз между двумя состояниями  $180^\circ$ .



**Рисунок 1.** Топология единичной ячейки проходной антенной решетки (вид с двух сторон и объемная модель) [9].

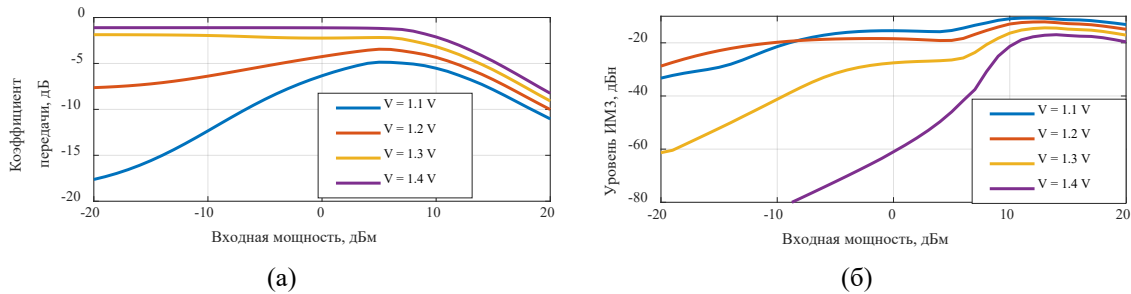
Обобщенная нелинейная модель для подобного типа единичных ячеек в составе проходной антенной решетки представлена на рисунке 2. Для упрощения модели потери в металлизированных и диэлектрических слоях структуры не учитываются. Обобщенная модель единичной ячейки позволяет оценить линейные и нелинейные характеристики проходной решетки, что позволяет выбрать оптимальный рабочий режим по мощности и напряжения смещения PIN-диодов.



**Рисунок 2.** Обобщенная нелинейная модель единичной ячейки.

Обобщенная модель представляет собой только активную сторону единичной ячейки. Два PIN-диода соединены через отрезки линии передачи электрической длиной  $90^\circ$  с противоположными сторонами идеального трансформатора, описывающего связь антенны со свободным пространством. Суммарная электрическая длина отрезков линий передачи составляет  $180^\circ$ , что эквивалентно электрической длине полуволнового разомкнутого кольцевого резонатора, связывающего антенну с металлизированным отверстием. При переключении фазовых состояний ячейки  $0^\circ/180^\circ$  путём изменения полярности источника напряжения  $V$

открыт только один диод, а другой закрыт, что описывается подключением входного порта к противоположным сторонам идеального трансформатора. Для точного моделирования была разработана модель диода, основанная на технических характеристиках, предоставленные производителем, и результатах измерений [10].



**Рисунок 3.** Результаты моделирования коэффициента передачи (а) и уровня ИМ3 (б) в зависимости от входной мощности при различных напряжениях смещения на диодах.

Для оценки уровней вносимых потерь и интермодуляционных составляющих третьего порядка единичной ячейки было проведено моделирование разработанной модели методом гармонического баланса. На рисунке 3(а) показана зависимость модуля коэффициента передачи от величины входной мощности для различных напряжений смещения диодов. В результате моделирования было установлено, что при увеличении напряжения смещения, растет величина коэффициента пропускания. Стоит обратить внимание, что вносимые потери возрастают, когда входная мощность превышает пороговое значение, равное 7,5 дБм. Такое поведение наблюдается за счет утечки сигнала через выключенный диод из-за неидеальной развязки. В соответствии с предложенной моделью при входной мощности выше 7,5 дБм сигнал проходит через оба диода, суммируясь в фазе. Чем выше входная мощность, тем больше утечка через закрытый диод при фиксированном напряжении смещения и, соответственно, тем выше вносимые потери. При фиксированной входной мощности утечка уменьшается с ростом обратного напряжения смещения на закрытом диоде.

Наиболее критичными нелинейными эффектами передаваемого сигнала являются интермодуляционные искажения третьего порядка (ИМ3) - это составляющие самого высокого уровня, которые лежат вблизи к исходному сигналу. В том случае, когда сигнал содержит два тона с частотами  $f_1$  и  $f_2$ , то наиболее близкие продукты ИМ3 будут наблюдаться на частотах  $2f_1 - f_2$  и  $2f_2 - f_1$ . Для модулированного сигнала с полосой пропускания  $\Delta f$  интермодуляционные продукты будут наблюдаться внутри полезной полосы сигнала, что в результате ухудшает отношение сигнал/шум. Кроме того, ИМ3 расширяет полосу сигнала, таким образом, создавая помехи в соседних каналах.

Моделирование характеристик ИМ3 на основе предложенной модели единичной ячейки проводилось для двухтонального сигнала с входной мощностью  $P_{f1} = P_{f2} = P_{ex}$  на частотах  $f_1 = 5,85$  ГГц и  $f_2 = 5,9$  ГГц. Результаты моделирования зависимости уровня составляющих ИМ3 от входной мощности для различных напряжений смещения диодов are представлены на рисунке 3(б). Длина отрезков линий передачи была выбрана  $90^\circ$  на частоте 5,875 ГГц, таким образом, уровни обеих составляющих ИМ3 равны. Результирующая зависимость уровня ИМ3 сильно зависит от входной мощности и напряжения смещения. Но для входной мощности выше 7,5 дБм и напряжения выше порогового сильной зависимости уровня ИМ3 нет. Следует отметить, что при напряжениях, значительно превышающих пороговое напряжение, нелинейных искажения будут отсутствовать, но 1,4 В является максимальным напряжением смещения, которое может быть приложено к данным диодам.

### 3. Результаты измерений

Элементарная ячейка была изготовлена в виде волноводной вставки для проведения волноводных измерений [11], рисунок 4(а). Многослойная структура элементарной ячейки состоит из 6 диэлектрических слоев. Антенны как на пассивной, так и на активной сторонах представлены квадратными патч-антеннами с центральными вырезами. Антенны возбуждаются с помощью полуволновых разомкнутых кольцевых резонаторов, которые соединены между собой металлизированным сквозным отверстием. Активная и пассивная стороны элементарной ячейки разделены двумя плоскостями заземления для устранения паразитной связи между патч-антеннами.

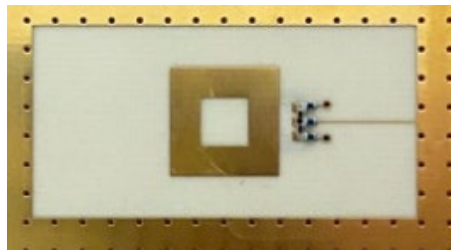


Рисунок 4. Фото изготовленной единичной ячейки.

Разность фаз  $180^\circ$  между двумя фазовыми состояниями обеспечивается переключением точки включения резонатора на активной стороне единичной ячейки путем изменения полярности напряжения смещения PIN-диодов. Полоса пропускания характеристики передачи по уровню  $-3$  дБ составляет 190 МГц ( $5,8 - 5,99$  ГГц). Фазовая ошибка не превышает  $\pm 1^\circ$  в полосе пропускания.

Для измерения уровня ИМЗ и коэффициента передачи единичная ячейка возбуждалась двухтональным сигналом на частотах  $f_1 = 5,85$  ГГц и  $f_2 = 5,9$  ГГц. Измерительная установка включала в себя два генератора R&S SMW200A. Двухтональный непрерывный сигнал объединялся гибридным 3 дБ ответвителем с развязкой более 20 дБ. Для измерения нелинейных характеристик использовался анализатор спектра R&S FPL1014. С учетом полосы пропускания изготовленной единичной ячейки более высокий уровень составляющих ИМЗ был измерен на частоте  $f_{ИМЗ} = 5,95$  ГГц.

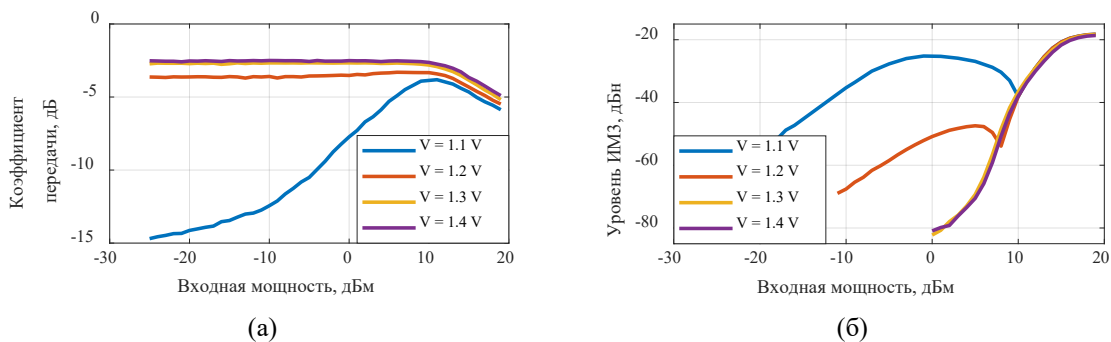


Рисунок 5. Результаты измерения коэффициента передачи единичной ячейки (а) и уровня ИМЗ (б) в зависимости от уровня входной мощности и напряжения смещения на диодах.

Результаты измерений коэффициента передачи и уровня ИМЗ в зависимости от входной мощности при различном напряжении смещения представлены на рисунке 5. Сравнивая полученные результаты с результатами моделирования на рисунках 3 (а) и (б), можно сделать вывод, что измеренные линейные и нелинейные характеристики разработанной единичной ячейки качественно совпадают с результатами расчета с помощью предложенной модели. Стоит заметить, что модель может быть уточнена с

учетом особенностей топологии единичной ячейки, чтобы добиться количественного согласования модели с результатами измерений. Например, уровень ИМЗ сильно зависит от импеданса линий передачи, подключенных к диоду, а также с учётом их частотной зависимости, включая вносимые потери в металле и диэлектрике.

### 3. Заключение

В данной работе предложена обобщенная нелинейная модель одноразрядной единичной ячейки на основе PIN-диода, предназначенной для работы в составе проходной антенной решетки. Модель описывает линейные и нелинейные характеристики передачи в зависимости от входной мощности и приложенного напряжения смещения. Результат измерений элементарной ячейки показывает аналогичное поведение в соответствии с разработанной моделью. Результаты измерений модуля коэффициента передачи хорошо согласуются с результатами моделирования. Продемонстрировано, что вносимые потери имеют тенденцию к росту, когда входная мощность превышает пороговое значение входной мощности 7,5 дБм из-за утечки сигнала через обратно смещенный диод. Уровень ИМЗ в зависимости от входной мощности при различном приложенном напряжении оценивался с помощью двухтонального сигнала. Некоторое расхождение результатов измерений с результатами моделирования связано с тем, что не учитываются особенности топологии единичной ячейки. Модель может быть уточнена путем добавления параметров отрезков линий передачи, резонаторов, металлизированного отверстия и т.п. Дальнейшие исследования будут сосредоточены на реализации проходной антенной решетки и оценке ее нелинейных характеристик.

Исследование выполнено за счет **гранта Российского научного фонда (проект № 17-79-20374-П).**

#### Список литературы

1. Ding F., Pors A., Bozhevolnyi S. I. Gradient metasurfaces: a review of fundamentals and applications //Reports on Progress in Physics. – 2017. – Т. 81. – №. 2. – С. 026401.
2. Hum S. V., Perruisseau-Carrier J. Reconfigurable reflectarrays and array lenses for dynamic antenna beam control: A review //IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2013. – Т. 62. – №. 1. – С. 183-198.
3. Reis J. R., Vala M., Caldeirinha R. F. S. Review paper on transmitarray antennas //IEEE Access. – 2019. – Т. 7. – С. 94171-94188.
4. Huang C. et al. 1-bit reconfigurable circularly polarized transmitarray in X-band //IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2015. – Т. 15. – С. 448-451.
5. Nguyen B. D., Pichot C. Unit-cell loaded with PIN diodes for 1-bit linearly polarized reconfigurable transmitarrays //IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2018. – Т. 18. – №. 1. – С. 98-102.
6. Wang M. et al. Design and measurement of a 1-bit reconfigurable transmitarray with subwavelength H-shaped coupling slot elements //IEEE transactions on antennas and propagation. – 2019. – Т. 67. – №. 5. – С. 3500-3504.
7. Kamoda H. et al. 60-GHz electronically reconfigurable large reflectarray using single-bit phase shifters //IEEE transactions on antennas and propagation. – 2011. – Т. 59. – №. 7. – С. 2524-2531.
8. Di Palma L. et al. 1-bit reconfigurable unit cell for Ka-band transmitarrays //IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2015. – Т. 15. – С. 560-563.
9. Kozlov D. et al. Characterization of tiled architecture for C-band 1-bit beam-steering transmitarray //Sensors. – 2021. – Т. 21. – №. 4. – С. 1259.
10. Kirillov V. V., Turalchuk P. A. Analysis of Nonlinear Distortions in Transmitarrays //2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). – IEEE, 2021. – С. 133-136.
11. Kirillov V., Munina I., Turalchuk P. Small-size square ring 1-bit reconfigurable transmitarray unit cell for C-band applications //Applied Sciences. – 2020. – Т. 10. – №. 9. – С. 3319.