

## ДИАГРАММА НАПРАВЛЕННОСТИ И СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЕННОЙ НЕСИММЕТРИЧНОЙ ВИБРАТОРНОЙ АНТЕННЫ

© 2019 г. Н. Н. Богачев<sup>a, b, \*</sup>, Н. Г. Гусейн-заде<sup>a, c</sup>, В. И. Нефедов<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

<sup>b</sup> МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

<sup>c</sup> Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова, Москва, Россия

\*e-mail: bgniknik@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.12.2017 г.

После доработки 02.08.2018 г.

Принята к публикации 25.10.2018 г.

Проведены сравнительные экспериментальные исследования диаграмм направленности и спектров излучения плазменной несимметричной вибраторной антенны и металлической несимметричной вибраторной антенны. Результаты измерения диаграмм направленности показали сходство двух антенн по направлениям главного и бокового лепестков, меньшую амплитуду максимума диаграммы направленности плазменной антенны, а также ее более узкую направленность. Полученные спектры излучения немодулированного сигнала позволяют оценить величину потерь энергии на создание плазмы в плазменной антенне. В ее спектре обнаружено нелинейное усиление кратных гармоник частоты излучаемого сигнала. Обсуждаются возможные причины этих нелинейных искажений и способ их снижения.

DOI: 10.1134/S0367292135030020

### 1. ВВЕДЕНИЕ

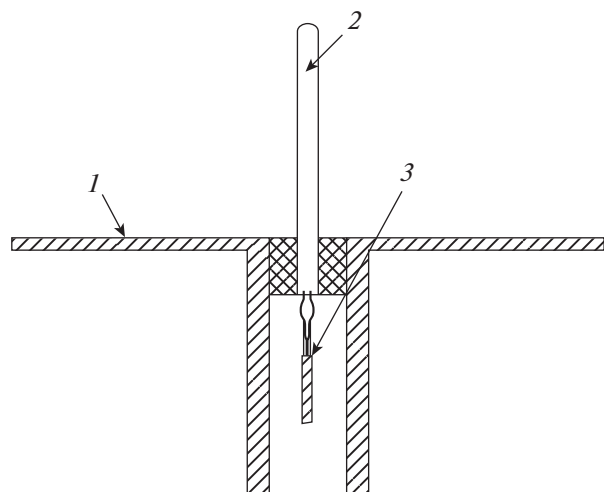
Плазменные антенны – класс антенн, в которых в качестве волноведущих, излучающих и управляющих элементов используется плазма [1–6]. Актуальность исследований плазменных антенн связана с необходимостью поиска новых решений задач современной радиотехники: создание интеллектуальных антенн с безынерционным управлением характеристиками (диаграммой направленности, частотным диапазоном и др.) для современных телекоммуникационных систем; снижение радиолокационной заметности антенных устройств; повышение защищенности радиотехнических систем от воздействий мощными электрическими импульсами.

В развитии плазменных технологий в антенной технике можно выделить несколько направлений: плазменные антенны из газоразрядных трубок; плазменные твердотельные (кремниевые) антенны; струйные плазменные антенны и др. [5]. Одно из наиболее интересных направлений – плазменные антенны из газоразрядных трубок [1, 2, 4, 6–12]. В данной работе исследуется плазменная несимметричная вибраторная антенна (ПНВА) на газоразрядной трубке и проводится сравнение ее характеристик (диаграммы направленности и спектра излучения) с характеристиками аналогичной металлической антенны.

Несмотря на то что ПНВА исследуется с 1999 г. [1, 2, 4, 6–9], еще остается ряд актуальных вопросов, в том числе исследование шумов и нелинейных искажений излучаемого сигнала ПНВА [11–13].

### 2. ПЛАЗМЕННАЯ НЕСИММЕТРИЧНАЯ ВИБРАТОРНАЯ АНТЕННА, ПИТАЕМАЯ ОТ КОАКСИАЛЬНОГО КАБЕЛЯ

Плазменная несимметричная вибраторная антенна, как и металлическая несимметричная вибраторная антенна (МНВА), состоит из вибратора, соединенного с центральным проводником коаксиального кабеля, и проводящего диска, соединенного с внешним проводником коаксиального кабеля. Оптимальной длиной плеча вибратора считается  $l_a = \lambda/4$  [14]. В случае плазменной антенны вибратор представляет собой газоразрядную трубку с плазмой (в простейшем случае люминесцентную лампу). Плазма в трубке может создаваться как за счет внешнего источника, подключаемого к газоразрядной трубке [1, 2, 11], так и за счет источника излучаемого высокочастотного сигнала (генератора или связанного передатчика) [4, 7]. Создание плазмы в газоразрядной трубке ПНВА за счет энергии сигнала от связанного передатчика имеет свои преимущества: позволяет упростить схему подключения плазменной антенны и сделать ее аналогичной схеме подключе-



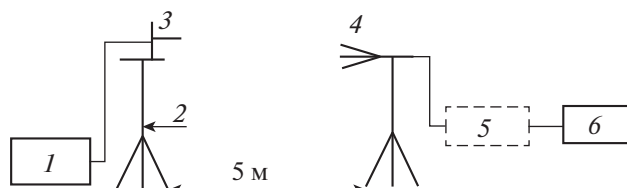
**Рис. 1.** Плазменная несимметричная вибраторная антенна с питанием от коаксиального кабеля: 1 – металлический экран, 2 – диэлектрическая трубка с плазмой, 3 – коаксиальный кабель (внутренний проводник).

ния МНВА. Стандартным способом подключения ПНВА к связному передатчику, как и в случае МНВА, является соединение с помощью коаксиального кабеля (рис. 1). При использовании стандартных коаксиальных кабелей с диаметром внутреннего проводника меньше, чем внутренний диаметр газоразрядной трубки, внутренний проводник соединяется напрямую с электродом газоразрядной трубки (рис. 1).

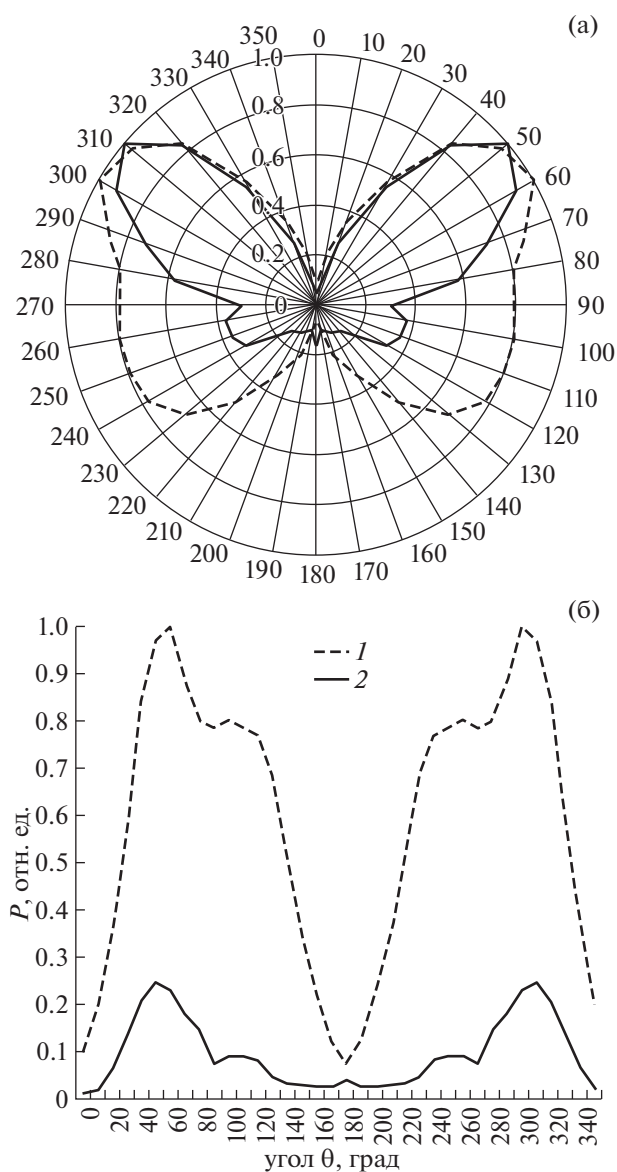
В данной работе исследовалась диаграмма направленности (ДН) и спектр излучения ПНВА длиной  $l_a = 29$  см и внешним диаметром газоразрядной трубки (люминесцентной лампы)  $d_a = 1.2$  см на частоте  $f_0 = 444...445$  МГц, в лампе находится смесь аргона с давлением 1...3 Торр (концентрация нейтральных частиц  $n = 0.6...1.3 \times 10^{17}$  см $^{-3}$ ) и паров ртути с давлением около  $10^{-3}$  Торр. Измеренные характеристики сравнивались с характеристиками аналогичной металлической антенны с длиной  $l_a = 29$  см и диаметром  $d_a = 1$  см.

### 3. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ СТЕНД

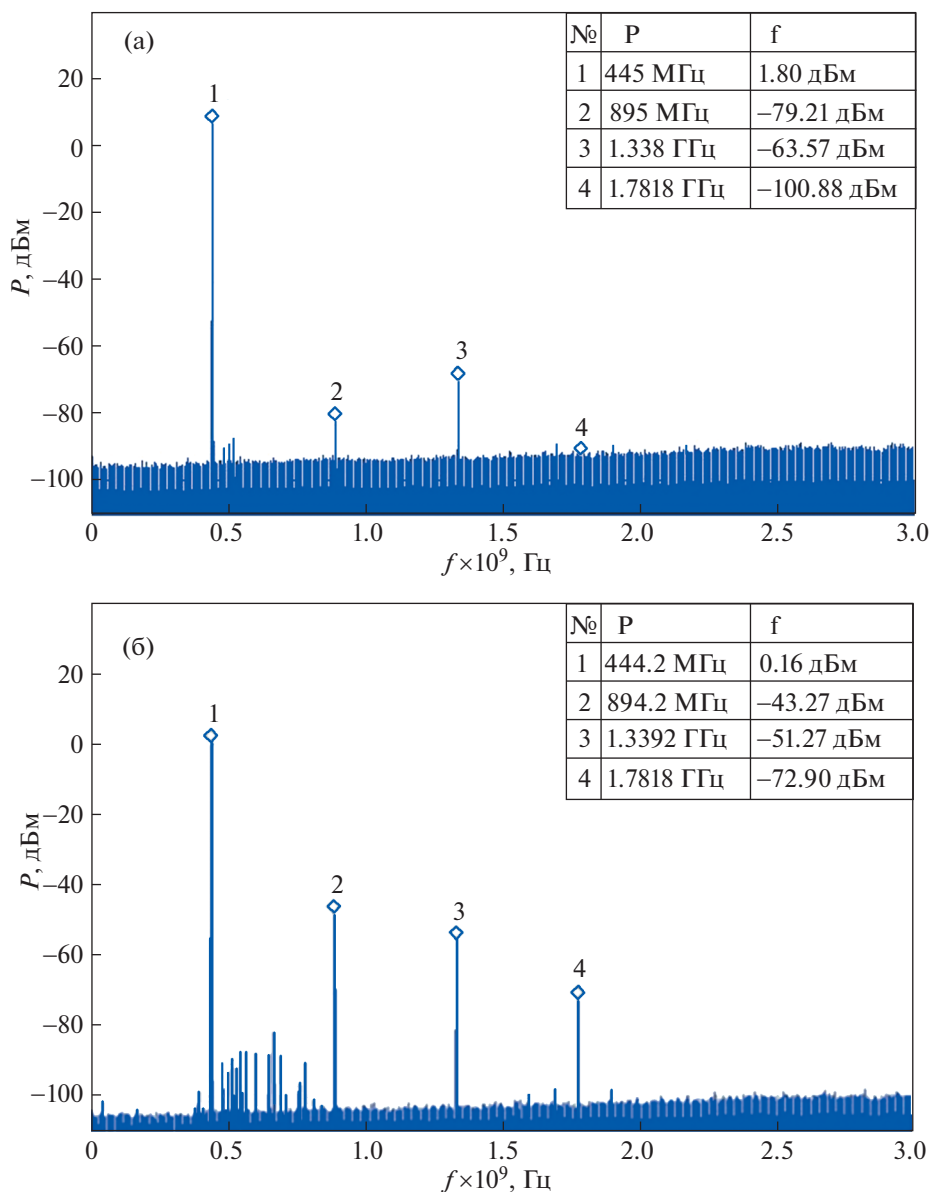
Измерения диаграмм направленности и спектров излучения ПНВА и МНВА проводились в безэховой камере с помощью измерительного стенда, схема которого представлена на рис. 2. Формируемый передатчиком 1 (радиопередающая станция Vertex VX-2100) немодулированный сигнал  $f_0 = 444...445$  МГц по коаксиальному кабелю подавался на закрепленную на поворотном устройстве 2 исследуемую (плазменную или металлическую) антенну 3. Излучаемый антенной



**Рис. 2.** Схема стенда для измерения спектра излучаемого сигнала: 1 – передающая радиостанция VX2100, 2 – поворотное устройство, 3 – исследуемая антенна, 4 – измерительная антенна, 5 – аттенюатор (использовался для проверки измерительной линии), 6 – анализатор сигналов (спектра) Agilent PXA N9030A.



**Рис. 3.** Диаграммы направленности по мощности (1 – МНВА, 2 – ПНВА): а) – в полярных координатах, нормированные на максимальное значение для каждой диаграммы; б) – в декартовых координатах, нормированные на максимальное значение диаграммы МНВА.



**Рис. 4.** Спектры излучения: а) – металлической несимметричной вибраторной антенны; б) – плазменной несимметричной вибраторной антенны.

сигнал принимался в дальней зоне (на расстоянии 5 м от исследуемой антенны) измерительной антенной 4. Принимаемый измерительной антенной сигнал поступал на анализатор сигнала (спектра) 6 Agilent PNX 9030A с диапазоном частот 3 Гц...13.6 ГГц. Для тестирования измерительного стенда в приемную цепь подключался аттенуатор 5 с коэффициентом подавления 20 дБ.

Диаграмма направленности антенн измерялась в Е-плоскости, поворотное устройство 2 вращалось с шагом 10°, и фиксировалось изменение принимаемой мощности на экране анализатора сигналов. После измерения диаграммы направленности и определения основного направления излучения (максимума ДН), поворотное устрой-

ство 2 выставлялось таким образом, чтобы максимум ДН исследуемой антенны 3 был направлен на измерительную антенну 4, и проводились измерения спектра, излучаемого исследуемой антенной.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 представлены диаграммы направленности в Е-плоскости для ПНВА и МНВА в полярных (рис. 3а) и декартовых (рис. 3б) координатах. Из рис. 3а видно, что максимумы основных лепестков ДН для ПНВА и МНВА близки по положению в пространстве (50°–60° и 300°–310°), а уровень бокового лепестка по отношению к ос-

новному у ПНВА много меньше, чем у МНВА. Рис. 3б показывает, что амплитуда максимума ДН МНВА в 4 раза больше, чем у максимума ДН ПНВА. Это объясняется затратами энергии электромагнитной волны на ионизацию плазмы в случае ПНВА и отличиями в соединении ПНВА и МНВА с коаксиальным кабелем, приводящими к высоким потерям мощности при использовании ПНВА. Амплитуда бокового лепестка диаграммы направленности ПНВА в 8 раз меньше амплитуды бокового лепестка ДН МНВА.

Также в данной работе были проведены измерения спектра излучаемого немодулированного сигнала исследуемых антенн. При данных измерениях поворотное устройство выставлялось таким образом, чтобы максимум ДН исследуемых антенн был направлен на измерительную приемную антенну. В измеренных спектрах излучения МНВА и ПНВА (рис. 4) присутствуют частота входного сигнала  $f_0 = 444...445$  МГц, вторая  $2f_0 = 894...895$  МГц и третья  $3f_0 = 1.338...1.339$  ГГц гармоники. Спектр излучения ПНВА также содержит четвертую гармонику  $4f_0 = 1.7818$  ГГц частоты входного сигнала. На основной частоте  $f_0$  мощность сигнала МНВА на 1.64 дБм больше сигнала ПНВА; это, как и в случае с диаграммой направленности, связано с тем, что часть энергии уходит на создание плазмы в диэлектрической трубке. На второй гармонике уровень мощности излучаемой ПНВА на 50 дБм больше, чем у МНВА, для третьей гармоники разность составляет 12.3 дБм. Уровень излучаемой мощности МНВА на четвертой гармонике не превышает уровень собственных шумов анализатора спектра, а для плазменной антенны этот уровень на 27.1 дБм выше уровня собственных шумов анализатора спектра. Высокий уровень кратных гармоник частоты  $f_0$  при излучении сигнала ПНВА можно объяснить нелинейным влиянием плазмы на излучаемый сигнал, а также отличием в соединении антенн коаксиальным кабелем: в случае с ПНВА (рис. 1) сигнал из коаксиального кабеля частично направлен через плазму с торца газоразрядной трубки. Изменение соединения ПНВА с коаксиальным кабелем, через согласующее устройство таким образом, чтобы сигнал не проходил через плазму, может снизить нелинейные искажения.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диаграммы направленности показали сходство (направленности главного и бокового лепестков) плазменной и металлической антенн. Однако плазменная несимметричная вибраторная антенна демонстрирует меньшую амплитуду максимума диаграммы направленности плазменной антенны, а также ее более узкую направленность. Полученные спектры излучения немоду-

лированного сигнала позволяют оценить, что величина потерь энергии на создание плазмы в ПНВА с помощью излучаемой электромагнитной волны составляет менее 27%. В спектре ПНВА обнаружено нелинейное усиление кратных гармоник частоты излучаемого сигнала в сравнении с спектром сигнала МНВА, обусловленное нелинейностью плазмы и не совсем удачным способом передачи сигнала на плазменную антенну. Использование согласующих переходников при подсоединении коаксиального кабеля может существенно уменьшить нелинейные искажения.

Авторы благодарят к.ф.-м.н. К.Ф. Сергейчева и Г.Г. Хадисова за помощь в проведении экспериментальных измерений, проф. А.А. Рухадзе и проф. А.М. Игнатова – за обсуждение и ценные замечания.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 16-08-00859 а.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Borg G.G., Harris J.H., Miljak D.G., Martin N.M. // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 74. P. 3272. doi 10.1063/1.874041
2. Овсяников В.В. // Радиофизика и радиоастрономия. 2001. Т. 6. № 3. С. 261.
3. Fathy A.E., Rosen A., Owen H.S., McGinty, F., McGee D.J., Taylor G.C., Amantea R., Swain P.K., Perlow S.M., ElSherbiny M. // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2003. V. 51. P. 1650. doi 10.1109/TMTT.2003.812559
4. Rayner J.P., Whichello A.P., Cheetham A.D. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. V. 32. P. 269. doi 10.1109/TPS.2004.826019
5. Пузанов А.О. // Радиофизика и электроника. 2007. Т. 12. № 1. С. 230.
6. Alexeff I., Anderson T., Parameswaran S., Pradeep E.P., Hulloli J., Hulloli P. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2006. V. 34. P. 166. doi 10.1109/TPS.2006.872180
7. Истомин Е.Н., Карфидов Д.М., Минаев И.М., Рухадзе А.А., Тараканов В.П., Сергейчев К.Ф., Трефулов А.Ю. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. С. 423.
8. Naifeng S.U.N., Wenzhong L.I., Shiqing W.A.N.G., Jian L.I., Jiayang C. // Plasma Sci. Technol. 2012. V. 14. P. 824.
9. Богачев Н.Н., Богданкевич И.Л., Гусейн-заде Н.Г., Рухадзе А.А. // Физика плазмы. 2015. Т. 41. С. 860. doi 10.7868/S0367292115100030
10. Кириченко Ю.В., Лонин Ю.Ф., Онищенко И.Н. // Радиотехника и электроника. 2014. Т. 59. № 3. С. 289. doi 10.7868/S0033849414030073
11. Belyaev V.A., Leksikov A.A., Leksikov A.A., Serzhanov A.M., Bal'va Y.F. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2014. V. 42. P. 1552.
12. Barro O.A., Himdi M., Lafond O. // IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett. 2016. V. 15. P. 726.
13. Bogachev N.N. // J. Phys.: Conf. Series. 2015. V. 661. 012054. doi 10.1088/1742-6596/661/1/012054
14. Weiner M.M. Monopole antennas. New York: Marcel Dekker, Inc., 2003.