

УДК 621.396.674, 533.9.072, 530.182

Б.А. БЕЛЯЕВ* ****, Ан.А. ЛЕКСИКОВ*, А.А. ЛЕКСИКОВ*, Я.Ф. БАЛЬВА**, А.М. СЕРЖАНТОВ***

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ СВОЙСТВ ПЛАЗМЕННОЙ АНТЕННЫ¹

Исследованы частотные характеристики и нелинейные свойства плазменной антенны на основе люминесцентной лампы. Показано, что в спектре излучения антенны наблюдаются высшие гармоники, имеющие сравнительно высокий уровень уже при мощности, несущей 1 Вт, связанные с нелинейностью плазмы.

Ключевые слова: плазменная антенна, полуволновой вибратор, нелинейные свойства, высшие гармоники, спектр сигнала.

Уже более тридцати лет вопрос применения плазменных технологий в создании антенных систем привлекает к себе большое внимание. Это связано с их малой «радиозаметностью» в нерабочем состоянии и возможностью реконфигурации. За это время были предложены различные конструкции плазменных антенн [1–3], плазменных линз и рефлекторов [1, 4], плазменных частотно-селективных поверхностей [1] и антенн с высокой скоростью управления диаграммой направленности [5]. Вместе с тем, остается ряд нерешенных проблем, среди которых важное место занимает вопрос проявления плазменными антеннами (ПА) нелинейных свойств: генерация высших гармоник будет искажать спектр сигнала, и это может приводить к ограничению мощности несущей.

Как известно, плазма является сильнонелинейной средой, поэтому естественно ожидать, что это должно отразиться и на работе ПА. Однако до сих пор нет однозначного ответа на этот вопрос. В одних работах авторы заявляют, что плазменные антенны не имеют в спектре своего излучения высших гармоник [1], в других утверждается, что высшие гармоники регистрируются не только в спектре передающей плазменной антенны [6], но и в спектре приемной антенны, когда передача осуществляется обычной металлической антенной [7]. Следует также отметить, что и в тех немногочисленных работах, которые опубликованы за последние 30 лет, где, так или иначе, затрагивается проблема нелинейных свойств ПА, вопросам ослабления высших гармоник, излучаемых самим генератором, а также анализу происхождения регистрируемых в экспериментах высших гармоник внимания не уделяется совсем. В настоящей работе предложен новый метод измерения нелинейных свойств плазменных антенн, при этом учитывается наличие высших гармоник в спектре самого генератора.

В качестве вибраторов плазменных антенн использовались (как это очень часто делается [1, 2]) обычные люминесцентные трубки энергосберегающих светильников. В эксперименте трубка длиной 330 мм и диаметром 13 мм монтировалась параллельно заземляемому основанию из латунной пластины толщиной 3 мм на высоте 20 мм над ним (рис. 1). Возбуждение плазмы осуществлялось источником импульсного тока с частотой 26 кГц, в качестве которого использовался электронный балласт из комплекта светильника с использованием проходных конденсаторов емкостью 330 пФ.

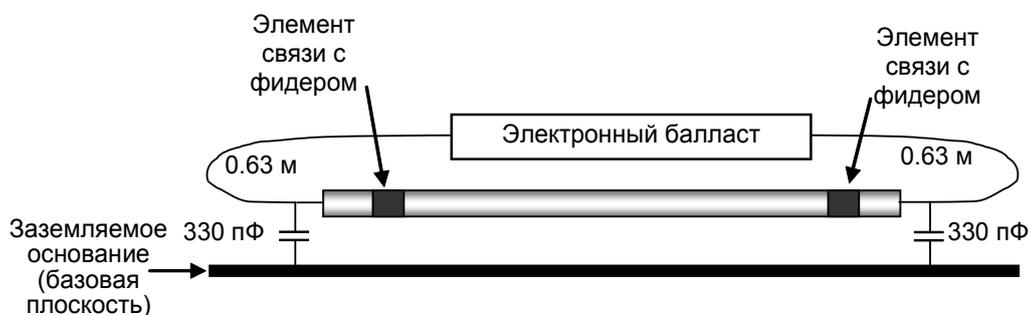


Рис. 1. Схема подключения плазменной антенны

Емкостная связь ПА с подводящими линиями осуществлялась посредством хомутов, выполненных из медной фольги толщиной 50 мкм. С их помощью вибратор подключался как резонатор

¹ Работа выполнена при поддержке грантом РФФИ № 12-02-12008-офи_м.

«на проход» со слабой связью либо в измерительный тракт векторного анализатора цепей (Rohde & Schwarz ZVK) для определения S -параметров, либо в схему для исследования нелинейных свойств, состоящую из генератора мощностью до 1 Вт, фильтра гармоник, фильтра верхних частот и анализатора спектра (Rohde & Schwarz ZVL).

На рис. 2, *а* приведены частотные зависимости модуля параметра S_{11} для различных положений фидера-хомута относительно конца антенны при зажженной плазме. Видно, что имеются точки подключения, оптимальные для возбуждения первого (полуволнового), второго (волнового) и третьего (3/2-волнового) резонансов, т.е. по этому параметру данная конструкция ведет себя как обычный полуволновой вибратор. Частота полуволнового резонанса антенны 280 МГц, что в 1,6 раза ниже полуволнового резонанса аналогичной по размерам металлической антенны. Длина волны на данной частоте составляет 108 см; ей соответствует длина стандартного вибратора 54 см.

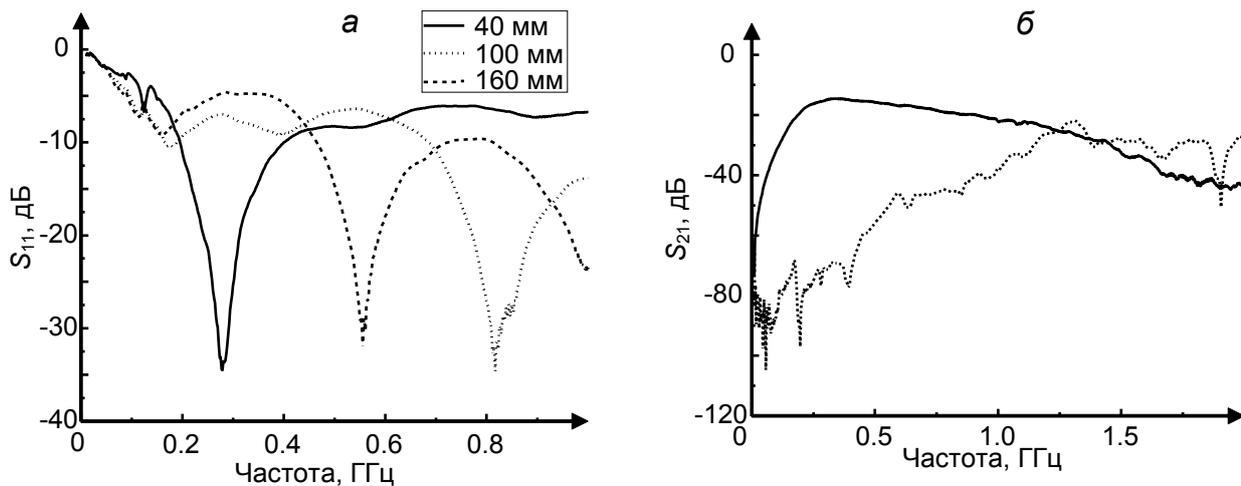


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициента отражения ПА для разных положений точки подключения относительно конца трубки (*а*); коэффициент прохождения сигнала при включении плазменного вибратора в измерительную цепь «на проход» со слабой связью. Сплошная линия – плазма горит, точки – плазма потушена (*б*)

На рис. 2, *б* приведены результаты измерения частотной зависимости модуля параметра S_{21} для двух случаев: плазма горит – сплошная линия и плазма потушена – точки. Как видно из рисунка, включение люминесцентной лампы, то есть поджиг плазмы, приводит к увеличению уровня прохождения на частотах до 1,2 ГГц, в результате образуется «полоса пропускания», в которую попадают резонансные частоты вибратора первых четырех или пяти мод. То, что сами резонансы при такой слабой связи не разрешились, свидетельствует об их низкой собственной добротности – проводимость плазмы на несколько порядков ниже металлической. На частотах свыше 1,2 ГГц уровни прохождения в том и другом случае практически одинаковы, т.е. наличие плазмы в трубке практически не оказывает влияния в этом случае на электромагнитные свойства плазменной трубки. Здесь мы, по-видимому, приближаемся к плазменной частоте и превышаем ее, что ведет к потере плазмой проводимости. Из этих результатов следует, что эта антенна будет работать только до частот чуть более 1 ГГц. Сравнительно высокий уровень прохождения сигнала на частотах выше 1,2 ГГц можно связать с прямой электромагнитной связью между хомутами.

Исследования нелинейных свойств ПА проводилось как традиционным способом, т.е. на плазменную антенну подавался сигнал несущей частоты (280 МГц) и ее излучение принималось на обычную рамочную или «короткую» штыревую антенну, подключенную к входу спектроанализатора, так и новым методом, когда вибратор ПА подключался в измерительную цепь «на проход» со слабой емкостной связью. Иными словами, к одному элементу связи (хомуту) подключался генератор, а ко второму – спектроанализатор. Полученные результаты оказались схожими, с той разницей, что в последнем случае мощность анализируемых сигналов (гармоник) была на несколько порядков выше, даже по сравнению с приемом в ближней зоне.

Для того чтобы минимизировать вклады от высших гармоник, присутствующих в спектре генератора, в измеряемые сигналы при исследовании нелинейных свойств на выходе генератора ус-

танавливался, как уже упоминалось, фильтр гармоник, который ослаблял первую гармонику (280 МГц) всего на 0,6 дБ, а высшие гармоники вплоть до 7-й – более чем на 50 дБ. При этом 2-я и 3-я гармоники подавлялись на 64 и 67 дБ соответственно. Для предотвращения перегрузки входных цепей анализатора спектра сигналом первой гармоники на его входе ставился фильтр верхних частот (ФВЧ), который подавлял 1-ю гармонику на 55 дБ, а высшие гармоники ослаблял менее чем на 1 дБ.

На рис. 3 приведены скриншоты дисплея анализатора спектра в диапазоне частот, охватывающем три первые гармоники сигнала, полученные в двух режимах: а) плазма горит и б) плазма потушена (но генератор включен). Как видно из рисунка, при выключенной плазме все равно наблюдаются три первые гармоники, очевидно являющиеся следствием наводок. При этом, однако, с выключением плазмы уровень 2-й и 3-й гармоник падает на несколько порядков сильнее, чем 1-й. Это свидетельствует о том, что основной вклад в них дают электромагнитные колебания, генерируемые плазмой. Следует иметь в виду, что здесь первая гармоника подавлена на 55 дБ благодаря ФВЧ, установленному на входе анализатора. Анализ полученных в ходе подобных измерений результатов показал, что уровень генерируемых ПА 2-й и 3-й гармоник составляет –54 и –57 дБ соответственно от мощности первой. Следует отметить, что такой уровень высших гармоник значительно превышает допустимый стандартами –60 дБ, притом что мощность генератора составляла лишь 1 Вт.

Низкоуровневые пики в спектрах на рис. 3 соответствуют дециметровым каналам местного телевизионного вещания, которые ПА также принимает.

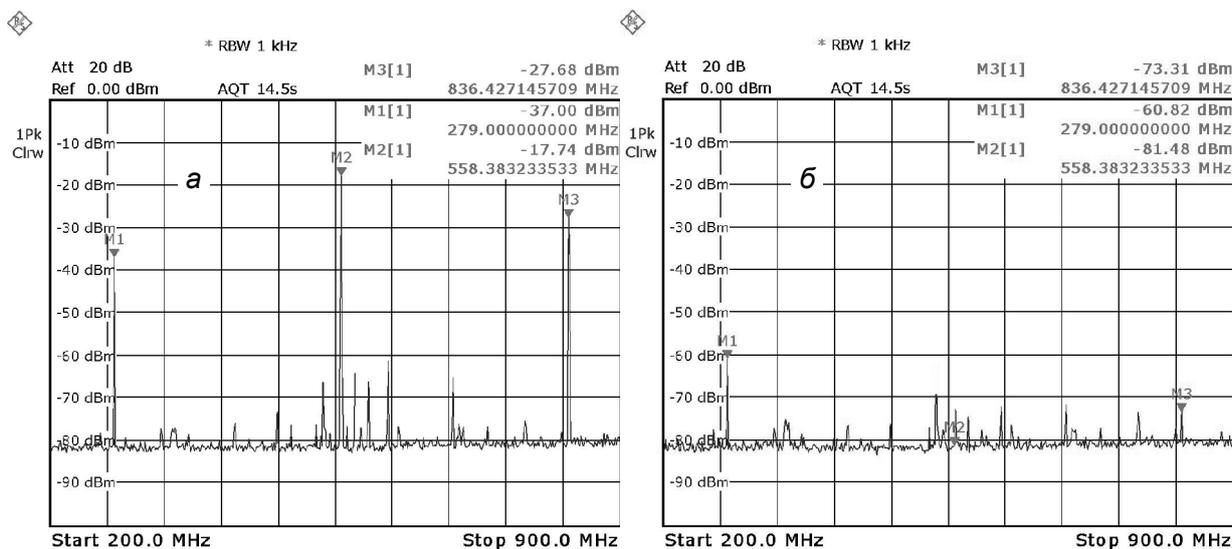


Рис. 3. Спектры трех первых гармоник сигнала: плазма горит (а) и плазма потушена (б)

По этой же схеме были проведены обычные (при исследованиях нелинейных эффектов) измерения зависимости уровня гармоник от мощности сигнала, подаваемого на частоте первой гармоники в исследуемый объект. Эти зависимости, построенные в логарифмическом масштабе, приведены на рис. 4. Там же сплошными линиями обозначены результаты их линейной аппроксимации. Параметры аппроксимирующих функций показывают, что для первой гармоники наклон зависимости $b = 1,16$, второй – $b = 2,04$, а третьей – $b = 3,16$. Полученные величины достаточно близки к 1, 2 и 3, т.е. значениям, предсказываемым общей теорией нелинейных явлений [8], а имеющиеся расхождения обусловлены погрешностью измерения мощности, подаваемой от генератора в антенну.

Таким образом, проведенные исследования показали, что в плазменной антенне происходит генерация высших гармоник в передаваемом сигнале, мощность которых может достигать недопустимого уровня. Поэтому плазменные антенны, обладая сильными нелинейными свойствами, не могут использоваться при передаче сигналов большой мощности, так как в этом случае может значительно искажаться спектр передаваемого сигнала. При использовании ПА на приеме нелинейные свойства плазмы на работе антенны, как ожидалось, не сказываются. Поведение уровня

мощности высших гармоник, генерируемых ПА, в зависимости от мощности сигнала на несущей частоте подчиняется обычным для нелинейных явлений закономерностям.

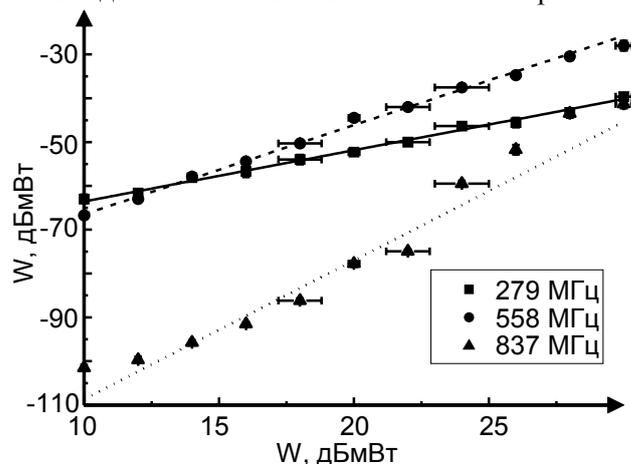


Рис. 4. Зависимости уровня трех первых гармоник от мощности входного сигнала ПА, построенные в логарифмическом масштабе, и их аппроксимации линейными зависимостями (линии)

Предложен новый высокочувствительный метод исследования нелинейных свойств плазменных антенн, который может быть использован и для исследования нелинейных электромагнитных свойств различных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alexeff I., Anderson T., Pradeep E.P., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2006. – V. 34. – No. 2. – P. 166–172.
2. Cerri G., De Leo R., Mariani Primiani V., and Russo P. // IEEE Trans. Instrument. Measurement. – 2008. – V. 57. – No. 2. – P. 242–247.
3. Kumar R. and Bora D. // J. Appl. Phys. – 2010. – V. 107. – No. 5. – P. 9.
4. Linardakis P., Borg G.G., and Martin N.M. // Res. Sch. of Phys. Sci. & Eng., Australian Nat. Univ., Canberra. – 2006. – V. 42. – No. 8. – P. 444–446.
5. Интернет-ресурс: www.PlasmaAntennas.com
6. Kumar R. and Bora D. // Plasma Sci. Technol. – 2010. – V. 12. – No. 5. – P. 592–600.
7. Rayner J.P., Whichello A.P., and Cheetham A.D. // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2004. – V. 32. – No. 1. – P. 269–281.
8. Sagers R.C. // 32nd IEEE Vehicular Technology Conference. – 1982. – V. 32. – P. 219–230.

*Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, г. Красноярск, Россия

Поступила в редакцию 15.07.13.

**Сибирский государственный аэрокосмический университет

им. акад. М.Ф. Решетнева, г. Красноярск, Россия

***Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

E-mail: a.a.leksikov@gmail.com

Беляев Борис Афанасьевич, д.т.н., профессор;

Лексиков Андрей Александрович, к.т.н.;

Лексиков Александр Александрович, д.т.н., доцент;

Бальва Ярослав Федорович, к.ф.-м.н.;

Сержантов Алексей Михайлович, к.т.н., доцент.

B.A. BELYAEV, An. A. LEKSIKOV, A.A. LEKSIKOV, Ya.F. BAL'VA, A.M. SERZHANTOV

INVESTIGATION OF NONLINEAR BEHAVIOR OF PLASMA ANTENNA

Frequency characterization and measurements of nonlinear properties were done for luminescent lamp used as adaptive plasma antenna. It was shown that in spectrum for this type of antenna higher harmonics exists with enough comparative level already for carrier power about one Watt.

Keywords: *plasma antenna, half-wave vibrator, non-linear effect, higher harmonics, signal spectrum.*