

## АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 533.9;537.8;621.396.67.095.3;621.396.674.3

### УПРАВЛЕНИЕ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ АНТЕНН ВИБРАТОРНОГО ТИПА

© 2020 г. О. В. Тихоневич<sup>а, \*</sup>, Ю. Е. Векшин<sup>б,</sup>, И. М. Минаев<sup>а, \*\*</sup>,  
Г. П. Кузьмин<sup>а,</sup> **А. А. Рухадзе**

<sup>а</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,  
ул. Вавилова, 38, Москва, 119991 Российская Федерация

<sup>б</sup>16 Центральный научно-исследовательский испытательный институт МО РФ им. маршала А.И. Белова,  
Мытищи-6, Московской обл., 141006 Российская Федерация

\*E-mail: [tichon@kapella.gpi.ru](mailto:tichon@kapella.gpi.ru)

\*\*E-mail: [minaev1945@mail.ru](mailto:minaev1945@mail.ru)

Поступила в редакцию 01.08.2018 г.

После доработки 11.01.2019 г.

Принята к публикации 21.01.2019 г.

Проведен анализ возможностей управления диаграммой направленности многоэлементных плазменных вибраторных антенн типа волновой канал. Показано, что плазменная вибраторная антенна в рабочем диапазоне является узкополосным частотным фильтром. В многоэлементной линейной плазменной вибраторной антенне, отключение пассивного плазменного вибратора позволяет производить управление шириной диаграммы направленности электронным способом.

DOI: 10.31857/S0033849420020199

#### ВВЕДЕНИЕ

В ряде прикладных задач возникает необходимость управления электродинамическими параметрами антенн (например, обеспечение электромагнитной совместимости антенн различного частотного диапазона, управление диаграммой направленности, управление эффективной площадью рассеяния антенн и т.п.). Такая возможность появляется, если в качестве токнесущего элемента, вместо металлического проводника, использовать плазму.

Вибраторные антенны используются в миллиметровом, сантиметровом, дециметровом, метровом и в более длинноволновых диапазонах волн вплоть до сверхдлинных волн и представляют собой прямолинейные проводники (одиночные вибраторные антенны) или системы прямолинейных проводников (антенные решетки), возбуждаемые в определенных точках. Вибраторные антенны применяются в системах радиосвязи, радионавигации, телевидении, телеметрии и других областях радиотехники.

Одиночные вибраторные антенны являются слабонаправленными. Для увеличения коэффициента направленного действия и получения диаграммы направленности (ДН) требуемой формы применяют многовибраторные антенны. Теория

построения многоэлементных вибраторных (металлических) антенн разработана и широко представлена в литературе [1–3]. Возможность построения многоэлементных плазменных вибраторных антенн, насколько известно авторам, в печати не рассматривалась. Как показано в [4–9], характеристики плазменных одновибраторных антенн при плотности электронов в плазме  $n_e \gg n_{кр}$  ( $n_{кр}$  – концентрация электронов, при которой рабочая частота  $\omega$  равна плазменной частоте  $\omega_p$ , где

$\omega_p = \sqrt{4\pi n_e e^2 / m}$ ,  $e$  – заряд,  $m$  – масса электрона,  $n_e$  – концентрация электронов) практически не отличаются от характеристик металлических одновибраторных антенн. Поэтому для указанных выше целей плазменные антенны могут полностью заменить металлические антенны. Однако в силу того, что параметрами плазмы можно управлять, возможности плазменных антенн могут быть шире, чем у металлических. Так, например, у многовибраторной антенной решетки за счет отключения плазменных рефлекторов можно менять число элементов антенны. При этом в отличие от металлических антенн отключенные элементы практически не будут влиять на диаграмму направленности, формируемую оставшимися элементами. Кроме режима “включен-выключен” имеется возможность управлять величиной ком-

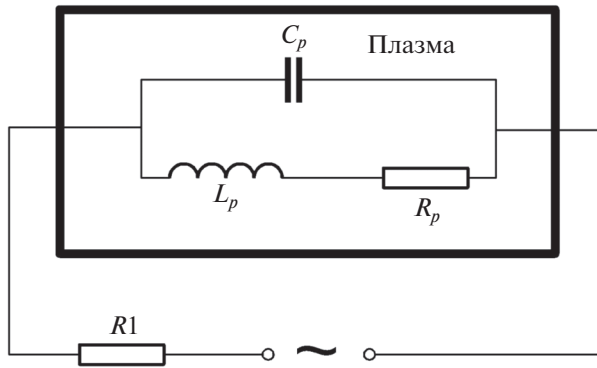


Рис. 1. Эквивалентная схема плазменного вибратора.

плексного сопротивления вибраторной антенны, которое определяется рабочей частотой  $\omega$  и плазменной частотой  $\omega_p$  (концентрацией электронов в плазме  $n_e$ ).

Плазменная вибраторная антенна представляет собой диэлектрическую трубку, заполненную инертным газом, в которой тем или иным способом зажигается разряд, например, с помощью поверхностной волны [4, 10, 11]. Длина плеча у плазменных антенн  $\sim \lambda/4 \dots \lambda/2$ , такая же как и у металлических. Плотность плазмы, создаваемой электрическим разрядом, определяется параметрами источника и в таких устройствах может достигать значений  $n_e \gg n_{кр}$ . Если плазменная антенна попадает в переменное электромагнитное поле, то возбуждаемые в плазме токи приводят к возникновению рассеянного плазменной антенной электромагнитного поля, амплитуда и фаза которого зависят от плотности плазмы  $n_e$  и, как в металлической антенне, от длины антенны  $l$  и диаметра  $a$ . Представляет интерес рассмотреть возможность управления параметрами плазменной многоэлементной вибраторной антенной решетки за счет изменения  $n_e$  (величины комплексного сопротивления).

## 1. КОМПЛЕКСНЫЙ ИМПЕДАНС И МОЩНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЕННОЙ ВИБРАТОРНОЙ АНТЕННЫ

Для расчета характеристик плазменной вибраторной антенны представим диэлектрическую трубку в виде конденсатора, который в отсутствие диэлектрического заполнения имеет емкость  $C_0$ .

Конденсатор, заполненный веществом с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon(\omega)$ , соответствующей плазме

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\nu_e)} \quad (1)$$

(где  $\nu_e$  – частота столкновений электронов с нейтральными частицами), будет иметь импеданс такой же, как двухполюсник [12, 13] (рис. 1).

Комплексный импеданс двухполюсника (плазменного конденсатора) можно представить в виде

$$Z_p(\omega) = Z_p(\omega)' + iZ_p(\omega)'' \quad (2)$$

При расчете характеристик плазменного конденсатора положим, что можно пренебречь крайними эффектами и считать плазму однородной в поперечном направлении (перпендикулярно оси трубки). При параллельном соединении емкости  $C_p$  и индуктивности  $L_p$ , когда активное сопротивление  $R_p$  включено последовательно с индуктивностью (см. рис. 1), комплексный импеданс рассчитывается по формуле

$$Z = \frac{Z_c(Z_L + R_p)}{Z_c + Z_L + R_p} = \frac{i}{\omega C} \frac{\omega(\omega + iR_p/L_p)}{\omega(\omega + iR_p/L_p) - \omega_p^2} \quad (3)$$

Подставляя  $R_p = \nu L_p$  и  $L_p = 1/\omega_p^2 C_0$  [12, 13] получим

$$Z = i \frac{1}{\omega C_0} \frac{\omega(\omega + i\nu)}{\omega(\omega + i\nu) - \omega_p^2} \quad (4)$$

Выделяя действительную и мнимую части из (4), имеем

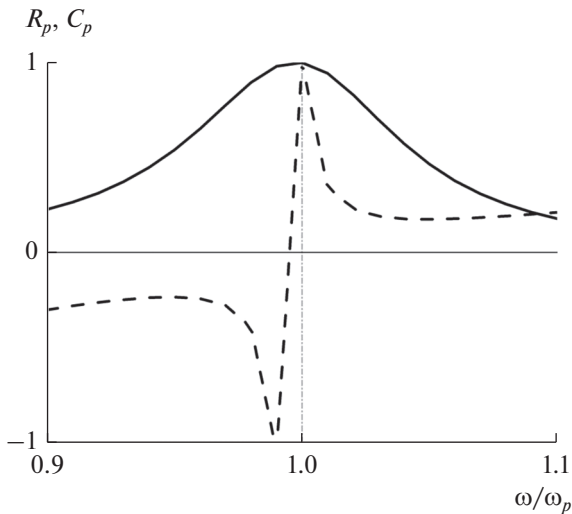
$$R_p(\omega) = \frac{1}{C_0} \frac{\nu \omega_p^2}{(\omega^2 - \omega_p^2)^2 + \omega^2 \nu^2}, \quad (5)$$

$$C_p(\omega) = C_0 \left( \frac{(\omega^2 - \omega_p^2)^2 + \omega^2 \nu^2}{\omega^2 (\omega^2 - \omega_p^2 + \nu^2)} \right).$$

Графики зависимости  $R_p(\omega)$  и  $C_p(\omega)$  представлены на рис. 2. При  $\omega/\omega_p \sim 1$  действительная часть импеданса  $R_p(\omega)$  всегда положительна, а мнимая часть меняет знак. В цитируемых работах исследование характеристик плазменной вибраторной антенны проводилось при условии  $\omega > \omega_p$ . Так, например, исследование условий излучения плазменного слоя в [10, 11] проводилось при  $\omega_p^2 > 2\omega^2$ .

Из рис. 2 видно, что наиболее сильно электротехнические параметры меняются в области плазменной частоты  $\omega \sim \omega_p$ . При снижении величины отношения  $\omega/\omega_p$  отрицательная мнимая часть растет, а характеристики плазменного вибратора приближаются к характеристикам металлического вибратора [4]. При росте величины отношения  $\omega/\omega_p$  плазма становится прозрачной для излучения (величина  $\epsilon(\omega)$  стремится к 1 на рабочей частоте) и эффективность возбуждения плазменного вибратора падает.

Для оценки мощности излучения, представим плазменную антенну в виде диполя с длиной пле-



**Рис. 2.** Зависимости  $R_p(\omega)$  (сплошная кривая) и  $C_p(\omega)$  (штриховая) от отношения  $\omega/\omega_p$  в области плазменной частоты ( $\omega/\omega_p = 1$ ).

ча  $l$ . Мощность излучения  $P$  диполя можно представить в виде [14]

$$P = \frac{\omega^4}{3c^3} 2p_0^2, \quad (6)$$

где  $p_0$  – дипольный момент,  $c$  – скорость света.

Преобразуем формулу для мощности так, чтобы в нее входил ток в вибраторе  $I_B$ , для чего воспользуемся соотношением [14]

$$p_0 = (I_B l) / \omega, \quad (7)$$

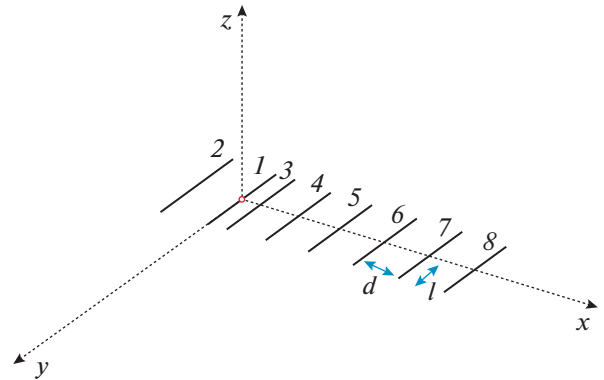
где  $I_B = U / R_p$ .

При  $U \approx El$  [13] получаем

$$P = \frac{2\omega^2}{3c^3} \frac{1}{R_p^2} E^2 l^2. \quad (8)$$

Величина тока, протекающего в плазменном столбе в области резонанса, определяется сопротивлением  $R_p(\omega)$ . Таким образом, изменение величины отношения  $\omega/\omega_p$  на 10%, как видно из рис. 2, приведет к изменению мощности излучения более чем на порядок (8).

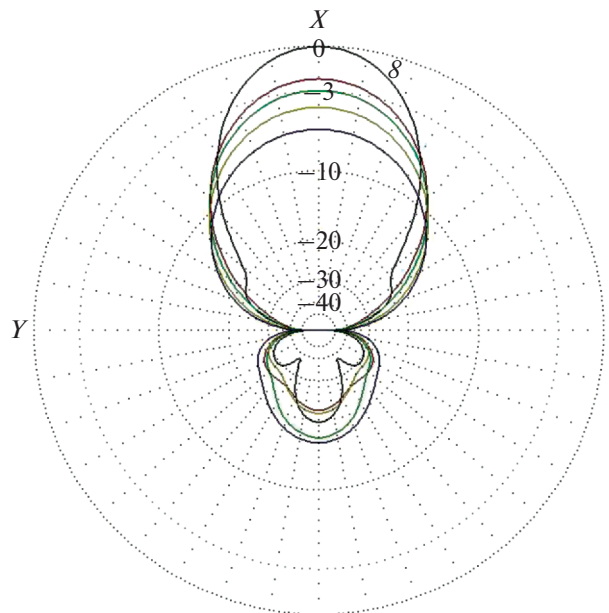
В многоэлементных вибраторных антеннах возбуждение пассивных элементов происходит за счет токов, индуцируемых электрическим полем  $E$  излучателя. Влияние излучения пассивного излучателя на форму ДН определяется величиной и фазой тока в пассивном вибраторе. Изменение концентрации  $n_e$  в плазменной антенне позволяет управлять фазой (за счет изменения мнимой части импеданса) и амплитудой (за счет изменения действительной части импеданса) тока в плазменных вибраторах. Наиболее сильно эти зависимости



**Рис. 3.** Многоэлементная вибраторная линейная решетка: активный излучатель (1) и пассивные излучатели – рефлектор (2), директоры (3–8).

проявляются при  $\omega \sim \omega_p$ . Полученные результаты показывают (см. рис. 2), что в области  $\omega \sim \omega_p$  плазменная вибраторная антенна является узкополосным частотным фильтром. При использовании плазменных вибраторов в многоэлементной вибраторной антенне, когда рабочая частота лежит в области  $\omega_p$ , любое отклонение отношения  $\omega/\omega_p$  от единицы будет приводить к расстройке по частоте всей системы.

Для иллюстрации возможности работы в режиме “включен–выключен” на рис. 3 приведен вид восьмиэлементной линейной плазменной вибраторной антенны и на рис. 4 – картина изменения ДН (MMANA <http://gal-ana.de/promm/index.htm>):



**Рис. 4.** Диаграмма направленности восьмиэлементной плазменной антенны при отключении отдельных элементов (для наглядности не показаны ДН при отключении 8-го, 7-го и 6-го элементов).

за счет отключения пассивных элементов начиная с 8-го. Из рис. 4 видно, как меняется ширина главного лепестка ДН при последовательном отключении пассивных плазменных элементов антенны.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что плазменная вибраторная антенна в рабочем диапазоне  $\omega \sim \omega_p$  является узкополосным частотным фильтром. При использовании плазменных вибраторов в многоэлементной вибраторной антенне, когда рабочая частота лежит в области  $\omega_p$ , любое отклонение отношения  $\omega/\omega_p$  от единицы за счет изменения электротехнических параметров плазменного вибратора приводит к частотной расстройке всей системы, в области  $\omega \ll \omega_p$  отключение пассивного плазменного вибратора позволяет производить управление шириной ДН электронным способом.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Марков Л.Н.* Антенные системы радиоэлектронной техники. М.: Воениздат, 1993.
2. *Айзенберг Г.З., Белоусов С.П., Журбенко Э.М. и др.* Коротковолновые антенны. 2-е изд. М.: Радио и связь, 1985.
3. *Айзенберг Г.З., Ямпольский В.Г., Терешин О.Н.* Антенны УКВ. М.: Связь, 1977.
4. *Истомин Е.Н., Карфидов Д.М., Минаев И.М. и др.* // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 5. С. 423.
5. *Коновалов В.Н., Кузьмин Г.П., Минаев И.М. и др.* // РЭ. 2015. Т. 60. № 7. С. 742.
6. *Гусейн-заде Н.Г., Минаев И.М., Рухадзе К.З., Рухадзе А.А.* // РЭ. 2011. Т. 56. № 10. С. 1345.
7. *Кирсанов Н.А., Коновалов В.Н., Минаев И.М., Рухадзе А.А.* // Радиотехника. 2012. № 10. С. 1611.
8. *Кузьмин Г.П., Минаев И.М., Тихонович О.В. и др.* // РЭ. 2012. Т. 57. № 5. С. 590.
9. *Богачев Н.Н., Богданкевич И.Л., Гусейн-заде Н.Г., Рухадзе А.А.* // Физика плазмы. 2015. Т. 41. № 10. С. 860.
10. *Кириченко Ю.В.* // РЭ. 2017. Т. 62. № 2. С. 165.
11. *Кириченко Ю.В.* // РЭ. 2017. Т. 62. № 12. С. 1215.
12. *Вайнштейн Л.А.* Электромагнитные волны. М.: Радио и связь, 1988.
13. *Александров А.Ф., Кузелев М.В.* Теоретическая плазменная электротехника. М., 2011.
14. *Корбанский И.Н.* Теория электромагнитного поля. М.: Наука, 1964.