

02;04;09

## **Электродинамический способ управления излучением волн свистового диапазона частот рамочной антенной в магнитоактивной плазме**

© М.Е. Гуцин, Т.М. Заборонкова, С.В. Коробков,  
А.В. Костров, А.В. Стриковский

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
E-mail: mguschin@appl.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 7 февраля 2006 г.

Предложен электродинамический способ управления работой рамочной антенны, используемой для излучения и приема волн свистового диапазона частот. Метод заключается в пропускании по антенне, наряду с переменным током на частоте  $\omega$ , постоянного тока, локально возмущающего внешнее магнитное поле. Исследована работа антенны в режимах излучения и приема; показано, что локальное увеличение магнитного поля позволяет повысить сопротивление излучения антенны.

PACS: 84.40.Ва

Рамочные антенны (антенны магнитного типа) широко используются при проведении активных экспериментов в плазме ионосферы и магнитосферы Земли [1,2], с их помощью осуществляется регистрация естественных излучений, прием сигналов наземных и спутниковых передатчиков. Такие антенны часто применяются при лабораторном исследовании волновых процессов в плазме [3]. Особый интерес представляют вопросы, связанные с возбуждением и приемом волн свистового диапазона (вистлеров). Известны различные способы увеличения излучаемой мощности и обужения диаграммы направленности рамочных излучателей, например за счет термодиффузионного переноса плазмы, нагретой в ближнем поле антенны [4], или ее стрикционного вытеснения [5]. Указанные методы принципиально являются нелинейными, кроме того, скорость перестройки параметров системы

„фидер–антенна–плазма“ ограничивается скоростью перераспределения электронной плотности.

В настоящей работе для управления излучением (и приемом) волн свистового диапазона частот ( $\sqrt{\Omega_H \omega_H} < \omega < \omega_H \ll \omega_p$ , где  $\omega_p$  — электронная плазменная частота,  $\omega_H$  и  $\Omega_H$  — циклотронные частоты электронов и ионов) рамочной антенной предлагается использовать зависимость показателя преломления вистлеров от циклотронной частоты электронов:

$$n \approx \frac{\omega_p}{\sqrt{\omega(\omega_H \cos \Theta - \omega)}}, \quad (1)$$

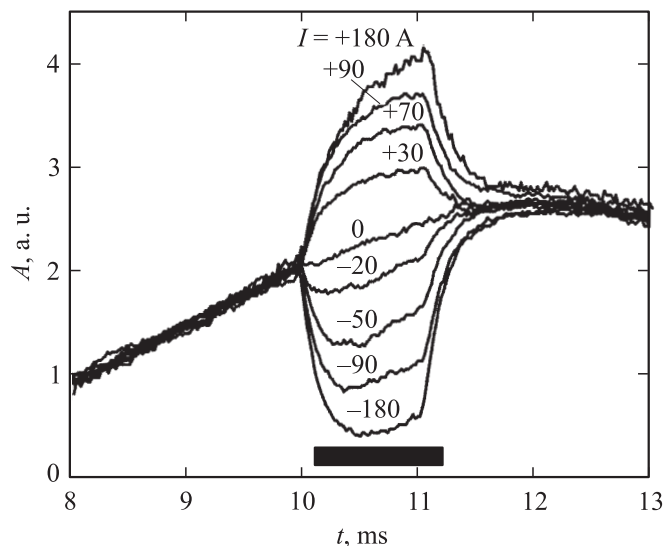
где  $\theta$  — угол между волновым вектором и направлением внешнего магнитного поля. Недавние лабораторные эксперименты [6] показали, что пространственно-неоднородные возмущения магнитного поля сильно влияют на структуру полей, возбуждаемых в плазме с однородным распределением плотности. Очевидно, что возмущение магнитного поля вблизи антенны модифицирует показатель преломления, а значит может привести к изменению импеданса антенны и соответственно ее полей излучения. Наиболее простым способом локального изменения магнитного поля является пропускание по антенне постоянного тока. Главными преимуществами такого метода являются простота и оперативность управления диэлектрическими свойствами среды. В космических экспериментах предлагаемый метод может оказаться достаточно эффективным: магнитное поле Земли невелико (на ионосферных высотах  $B_0 < 3 \cdot 10^{-1}$  Gs), и даже при использовании антенны большого диаметра ( $D \sim 20$  м [1]) пропускание тока порядка 100 А приводит к возмущению поля  $\delta B \sim 5 \cdot 10^{-2}$  Gs.

Характеристики полей, возбуждаемых и принимаемых рамочной антенной, исследовались на установке „Крот“. Плазменный столб (длина 4 м, диаметр 1.5 м) формируется в результате импульсного индукционного высокочастотного разряда (мощность  $P \sim 200$  kW, частота  $F = 5$  MHz, длительность импульса  $\tau = 1$  ms) в аргоне при давлении  $p = 7 \cdot 10^{-4}$  Torr, величина магнитного поля в условиях эксперимента составляла  $B_0 = 30$ –40 Gs. Измерения выполнялись в распадающейся плазме с плотностью  $N = 4$ –6  $\cdot 10^{10}$  cm $^{-3}$  при температуре электронов и ионов  $T_i \sim T_e = 0.2$  eV. Для возбуждения (режим „излучение“) и приема (режим „прием“) волн свистового диапазона частот использовалась экранированная рамочная антенна диаметром 6.5 см, покрытая слоем диэлектрика. Высокочастотная мощность, подводимая к антенне

в режиме „излучение“ ( $f = \omega/2\pi = 20 \div 80$  МГц), не превышала 0.1 W, что исключало развитие тепловых нелинейных эффектов [4]. Ток силой до 200 А пропусклся по рамке в виде импульса длительностью 0.2–1 ms, источник тока включался в подводный тракт антенны через специальную схему развязки. Рамка устанавливалась в плоскости, перпендикулярной линиям внешнего магнитного поля, направление протекания тока определялось полярностью подключения источника питания. Для измерения высокочастотных полей применялись экранированные рамки диаметром 1 см, установленные в различных сечениях плазменного столба. Сигналы с антенн регистрировались приемником с полосой 100 кГц. Измерения концентрации и температуры плазмы выполнялись соответственно миниатюрным зондом с СВЧ-резонатором [7] и двойным зондом.

Эксперименты показывают, что в исследуемом режиме параметров в плазме возбуждаются косые свистовые волны с длинами волн  $\lambda \sim 10\text{--}30$  см. Из измерений, выполненных на различных расстояниях ( $\Delta z = 5$  см, 28 см и 51 см) от антенны, работающей в режиме „излучение“, следует, что увеличение магнитного поля вблизи антенны приводит к возрастанию амплитуды волновых полей (рис. 1). При обратной полярности подключения рамки к источнику питания, когда магнитное поле около антенны уменьшается, эффективность возбуждения свистовых волн падает (рис. 1). Эксперименты, в которых исследовались поперечные распределения высокочастотных (ВЧ) полей, показали, что при локальном возмущении магнитного поля пространственная структура свистовых волн практически не изменяется. При фиксированном токе эффект усиления ВЧ-полей в плазме тем выше, чем больше частота подводимого к антенне сигнала (рис. 2). При небольших значениях силы тока коэффициент усиления возрастает по линейному закону, по мере увеличения тока наблюдается насыщение. Видно, что граница насыщения коэффициента усиления ВЧ-поля с ростом частоты смещается в сторону больших возмущений магнитного поля. На частоте  $f = 35$  МГц коэффициент усиления не превышает 20%, однако при  $f = 64$  МГц амплитуда полей в плазме увеличивается почти в 4 раза.

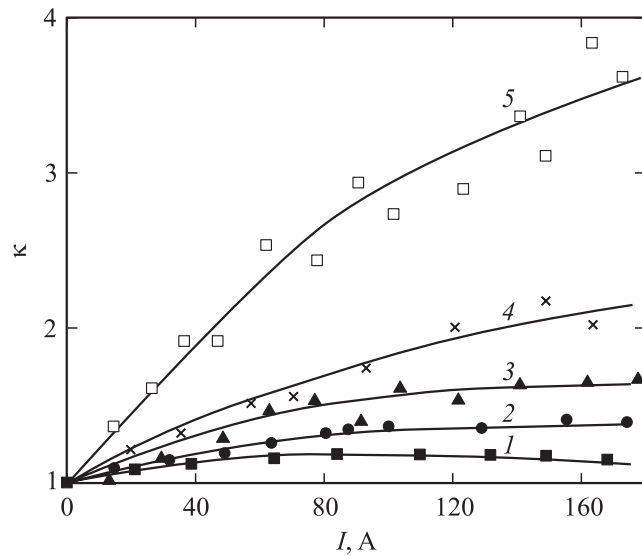
При исследовании работы антенны в режиме „прием“ вистлеры возбуждались диагностической рамкой диаметром 1 см. Излучающая и приемная антенны были разнесены на  $\Delta z = 28$  см. При пропускании по антенне тока в направлении, соответствующем увеличению магнитного поля, чувствительность приема возрастает, на частоте  $f = 63$  МГц



**Рис. 1.** Осциллограммы сигнала ( $f = \omega/2\pi = 63$  МГц), принимаемого из плазмы при различных токах в излучающей антенне и различных полярностях подключения источника питания. Диагностическая антенна установлена на расстоянии  $\Delta z = 28$  см от излучающей, величина магнитного поля  $B_0 = 40$  Гс. Импульс тока изображен в виде темного прямоугольника, знаки „+“ и „-“ относятся к двум направлениям протекания тока, соответствующим локальному увеличению и уменьшению магнитного поля.

получен коэффициент усиления  $k = 2.5$ . При противоположном направлении протекания тока (локальном уменьшении магнитного поля) амплитуда сигнала в приемном тракте падает.

Заметим, что при возмущении магнитного поля не наблюдается дополнительного согласования антенны с подводящим трактом, которое могло бы объяснить сильное изменение амплитуды излучаемых волн и чувствительности приема. С другой стороны, измерения пространственных распределений ВЧ-полей, возбуждаемых в режиме „излучение“, показывают, что при протекании по антенне постоянного тока изменяется полная мощность, излучаемая в плазму. Оба обстоятельства указывают на изменение сопротивления излучения рамочной антенны, обусловлен-



**Рис. 2.** Зависимость коэффициента усиления волновых полей от силы тока в излучающей антенне и частоты сигнала в передающем тракте. Измерения выполнены в сечении  $\Delta z = 28$  см. Величина магнитного поля  $B_0 = 35$  Gs, плотность плазмы  $N = 4 \cdot 10^{10}$  cm $^{-3}$ . 1 — 35 MHz, 2 — 50 MHz, 3 — 55 MHz, 4 — 60 MHz, 5 — 64 MHz.

ное, по-видимому, локальной модификацией поляризационных (холловских) токов, наводимых в плазме около антенны. Экспериментальные данные, а также численный расчет, выполненный в соответствии с [8], показывают, что распределение ВЧ-полей кольцевой антенны определяется соотношением ее диаметра и длины квазипродольной свистовой волны. В частности, если антенну нельзя считать электрически малой (как в настоящем эксперименте), то ее ближнее ВЧ магнитное поле может существенно отличаться от распределения поля витка с током в вакууме. Поле антенны экранируется токами, наведенными в плазме, поперечный масштаб локализации ВЧ магнитного поля может быть оценен как  $\delta \sim \frac{c}{\omega_p} \sqrt{\frac{\omega_p}{\omega}}$ . Локальное возмущение статического магнитного поля приводит фактически к изменению глубины проникновения ВЧ-полей антенны в плазму, а значит к изменению структуры

поляризованных токов. При увеличении магнитного поля масштаб  $\delta$  возрастает, что соответствует частичному устранению экранировки ВЧ-полей токами поляризации. При сильном уменьшении магнитного поля, напротив, ближние ВЧ-поля в результате экранировки „прижимаются“ к проводу антенны и эффективность излучения свистовых волн падает.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 04-02-17188 и № 04-02-16344), Федерального агентства по науке и инновациям (ФЦНТП „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники“) и Фонда содействия отечественной науке.

## Список литературы

- [1] Арманд Н.А., Семенов Ю.П., Черток Б.Е. и др. // Радиотехника и электроника. 1988. Т. 33. В. 11. С. 2225–2233.
- [2] Sonwalkar V.S., Inan U.S., Bell T.F. et al. // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. N A4. P. 6173–6189.
- [3] Krafft C., Starodubtsev M.V. // Earth, Moon, and Planets. 1998. V. 80. P. 155–178.
- [4] Заборонкова Т.М., Костров А.В., Кудрин А.В. и др. // ЖЭТФ. 1992. Т. 101. В. 4. С. 1151–1165.
- [5] Костров А.В., Смирнов А.И., Стародубцев М.В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1998. Т. 67. В. 8. С. 548–551.
- [6] Гуцин М.Е., Коробков С.В., Костров А.В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2005. Т. 81. В. 5. С. 274–277.
- [7] Stenzel R.L. // Rev. Sci. Instrum. 1976. V. 47. P. 603–607.
- [8] Заборонкова Т.М., Костров А.В., Кудрин А.В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1996. Т. 39. № 2. С. 192–202.