

Параметрическое преобразование амплитуды и частоты свистовой волны в магнитоактивной плазме

А. В. Костров¹⁾, М. Е. Гуцин, С. В. Коробков, А. В. Стриковский

Институт прикладной физики РАН, 603950 Нижний Новгород, Россия

Поступила в редакцию 22 сентября 2003 г.

Представлены результаты экспериментов, в которых исследовалось распространение высокочастотной свистовой волны в замагниченном плазменном дакте в присутствии интенсивной низкочастотной волны, также относящейся к свистовому диапазону частот. Обнаружена амплитудно-частотная модуляция высокочастотной свистовой волны, захваченной в дакт. Наблюдается глубокая амплитудная модуляция сигнала, которая может приводить к его дроблению на отдельные волновые пакеты. Показано, что при увеличении трассы распространения волны происходит уширение ее частотного спектра, наблюдается сдвиг спектра сигнала, преимущественно – в “красную” сторону. Преобразование частоты высокочастотной волны связано с нестационарным возмущением внешнего магнитного поля полем низкочастотной свистовой волны (относительное возмущение магнитного поля $\delta B/B \leq 5 \cdot 10^{-2}$).

PACS: 52.25.Xz, 52.35.-g, 52.72.+v

1. Модуляция волн особонизкочастотного (ОНЧ) диапазона в ионосфере и магнитосфере Земли – явление, давно известное по спутниковым и наземным наблюдениям [1]. Амплитуда и частота сигналов, распространяющихся в околоземной плазме в виде электронных свистов (вистлеров), преобразуются как при их резонансном взаимодействии с электронами радиационных поясов [2], так и при прохождении волны через области с гидродинамическим возмущением параметров плазмы и геомагнитного поля [3]. Вариации данных параметров приводят к модуляции частоты и огибающей сигналов, уширению их частотного спектра и генерации сателлитов [3–5]. Несмотря на то, что параметрические и нелинейные эффекты давно наблюдаются в натуральных экспериментах, лабораторное моделирование таких явлений ранее не производилось. В работе представлены результаты лабораторных экспериментов, в которых изучались амплитудно-частотные характеристики свистовой волны, распространяющейся в магнитоактивной плазме при интенсивном нестационарном возмущении внешнего магнитного поля. Эксперименты проведены на уникальном плазменном стенде “Крот”, специально созданном для моделирования явлений в космической и околоземной плазме.

2. Установка представляет собой вакуумную камеру длиной 10 м и диаметром 3 м. Магнитное поле пробочной конфигурации (пробочное отношение $R \simeq 2.4$, рис.1b) создается с помощью соленоида, установленного внутри вакуумного объема. Цилинд-

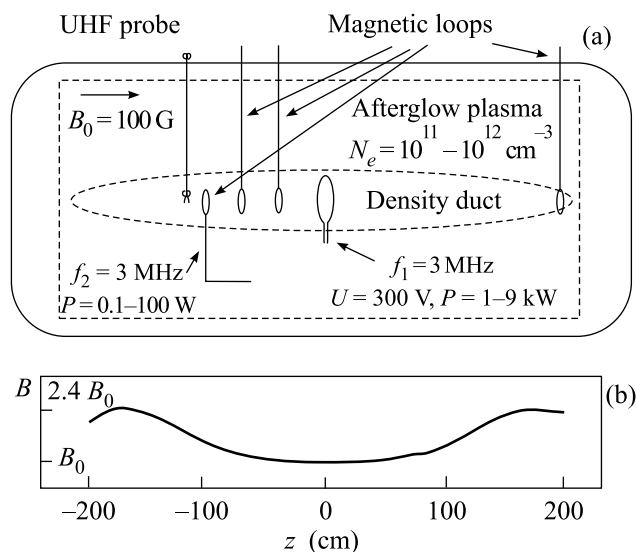


Рис.1. Схема экспериментальной установки “Крот” (а) и распределение внешнего магнитного поля вдоль оси вакуумной камеры (b)

рический плазменный столб (диаметр 1.5 м, длина 4 м) формируется в результате импульсного индукционного высокочастотного (ВЧ) разряда ($f = 5$ МГц, $P_{\text{gen}} = 250$ кВт, $t_{\text{pulse}} = 1$ мс) в аргоне при давлении $7 \cdot 10^{-4}$ торр, максимальная плотность плазмы в момент разряда достигает величины $\sim 10^{13}$ см⁻³, температура электронов $T_e = 10$ эВ, температура ионов $T_i \sim 0.5$ эВ. Эксперименты проводились в режиме распадающейся плазмы, после выключения плазмосоздающих генераторов, в момент, когда концентрация плазмы достигала $N \simeq 1.2 \cdot 10^{12}$ см⁻³. Распад

¹⁾e-mail: kstr@appl.sci-nnov.ru

плазмы определялся процессом амбиполярной диффузии вдоль магнитного поля, характерное время распада плазмы порядка 10 мс. В условиях данного эксперимента величина внешнего магнитного поля в минимуме составляла $B_0 = 100$ Гс. Для излучения и приема высокочастотных свистовых волн использовались одновитковые экранированные магнитные антенны диаметром $2 \div 3$ см, установленные в различных сечениях плазменного столба. Антенны были покрыты тонким слоем диэлектрика для уменьшения влияния плазмы на их импедансные характеристики. Концентрация плазмы измерялась с помощью миниатюрного зонда с СВЧ резонатором, изготовленного на отрезке двухпроводной линии.

Возбуждение ВЧ свистовой волны производилось одной из антенн диаметром 2 см, к которой подводился импульс на частоте $f_2 = 160$ МГц, длительностью $\tau = 1 \div 3$ мкс. Для каналирования излучаемой волны создавался дакт пониженной плотности плазмы, вытянутый вдоль внешнего магнитного поля [6]. Дакт формировался с помощью двухвитковой рамочной антенны диаметром 20 см, расположенной в центре камеры. К антенне прикладывался импульс ВЧ напряжения ($f_1 = 3$ МГц, $U_{HF} = 300$ В, $P = 9$ кВт, $\Delta t = 1$ мс). В результате локального нагрева электронов в ближнем поле антенны происходило термодиффузионное перераспределение плазмы с образованием за время порядка $t = 500$ мкс вытянутого вдоль оси системы канала с уменьшенной концентрацией [7, 6], рис.2а. Одновременно с нагревом электронов в дакте возбуждались интенсивные низкочастотные (НЧ) свистовые волны ($f_1 \ll f_H = 260$ МГц). Интерферометрические измерения показали, что возмущение плазмы НЧ полем носит волновой характер, оно представляет собой свистовую волну с волновым вектором, направленным почти перпендикулярно к направлению внешнего магнитного поля – так называемую волну конической рефракции [6] с поперечным волновым числом $k_{\perp} \sim \omega_p/c$, рис.2с. Амплитуда переменного магнитного поля (B_z и B_{φ} – компоненты, $f_1 = 3$ МГц) вблизи рамочной антенны составляла величину $\delta B \leq 5$ Гс (рис.2б,с).

Характерные осциллограммы ВЧ ($f_2 = 160$ МГц) сигналов с приемной антенны представлены на рис.3. Видно, что импульс, принимаемый из плазмы в присутствии НЧ возмущения магнитного поля, сильно модулирован (рис.3). Сигнал может иметь вид отдельных волновых пакетов (рис.3с,д), длительность которых равна половине периода изменения НЧ поля (частота $f_1 = 3$ МГц). При этом внутри периодов модуляции огибающей наблюдалась модуляция несущей частоты волны ($f_2 = 160$ МГц). Эффект амплитудно-

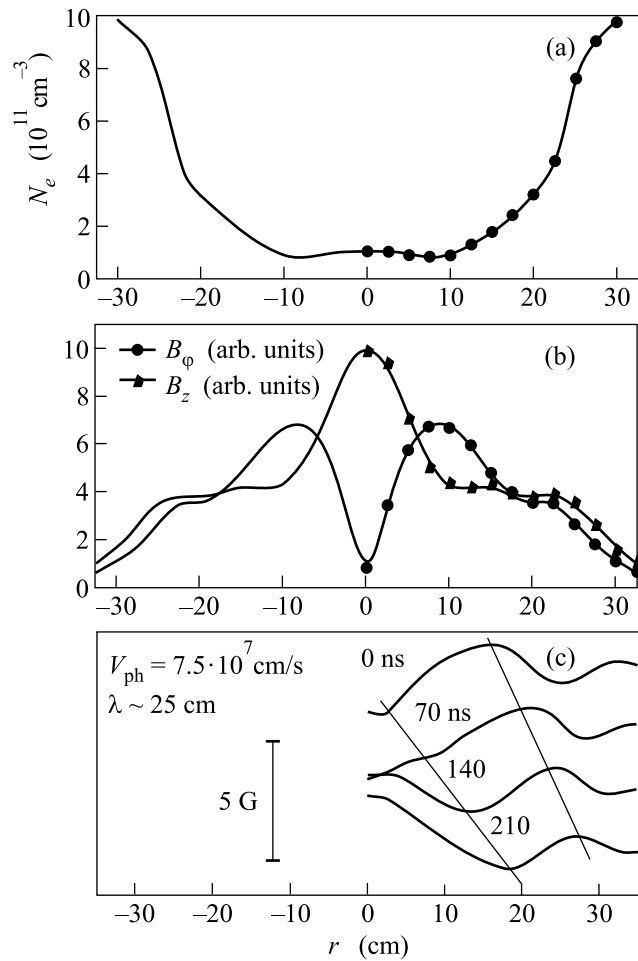


Рис.2. Радиальные распределения концентрации плазмы (а), амплитуды B_z и B_{φ} – компонент низкочастотного магнитного поля (б) (частота $f_1 = 3$ МГц); моментальные снимки B_z – компоненты (с) переменного магнитного поля (частота $f_1 = 3$ МГц) в различные моменты времени

частотной модуляции сигнала возрастал при увеличении трассы распространения волны в возмущенной плазме (рис.4). На краю плазменного канала антенной регистрировался сигнал малой амплитуды, но его частота и огибающая были сильно модулированы (рис.3д).

Спектральные измерения показывают, что с увеличением трассы распространения волны углубление модуляции сопровождается увеличением ширины частотного спектра сигнала – ростом числа спутников основной частоты и смещением спектра в сторону низких частот (рис.4). При удалении приемной антенны от излучающей амплитуда основной спектральной составляющей ($f_2 = 160$ МГц) уменьшалась и становилась меньше, чем амплитуда низкочастотных спутников (рис.4б).

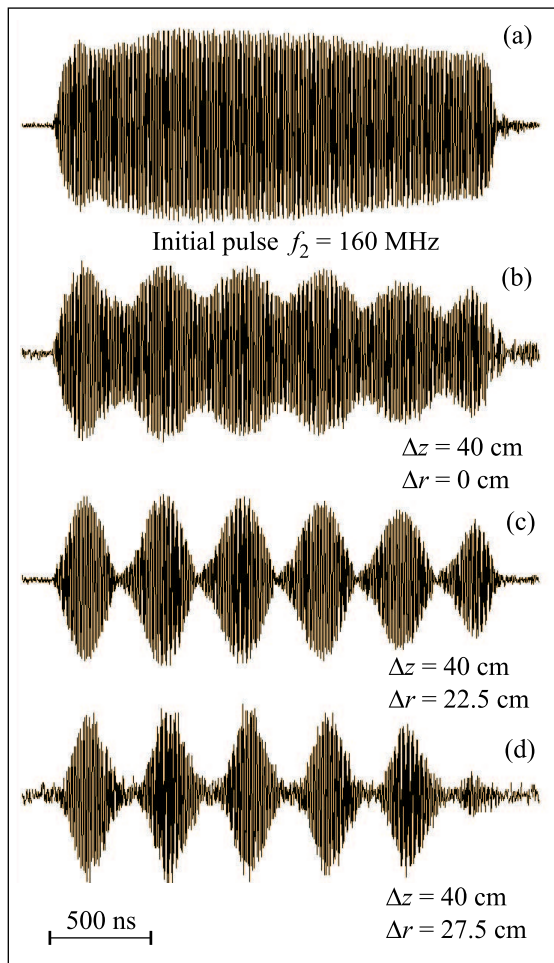


Рис.3. Осциллограммы высокочастотного импульса, излучаемого в плазму (а) ($f_2 = 160$ МГц) и принимаемого из плазмы (б), (с), (д) при различных радиальных положениях приемной антенны (во время низкочастотного возмущения плазмы на частоте $f_1 = 3$ МГц)

Было проведено исследование эффективности параметрического преобразования спектра в зависимости от амплитуды переменного поля ($f_1 = 3$ МГц), локализованного в дакте (рис.5). При увеличении параметра A амплитуда основного спектрального максимума $f = f_2 = 160$ МГц уменьшается – происходит перекачка энергии колебаний в НЧ спектральные составляющие.

3. Как известно, показатель преломления для электромагнитных волн свистового диапазона частот $\sqrt{\omega_H \Omega_H} < \omega < \omega_H \ll \omega_p$ может быть записан в следующем виде:

$$n^2 = \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega_H \cos \Theta - \omega)} \quad (1)$$

(c – скорость света в вакууме, ω и k – соответственно частота и волновое число свистовой волны, ω_p и ω_H – плазменная и циклотронная частоты электро-

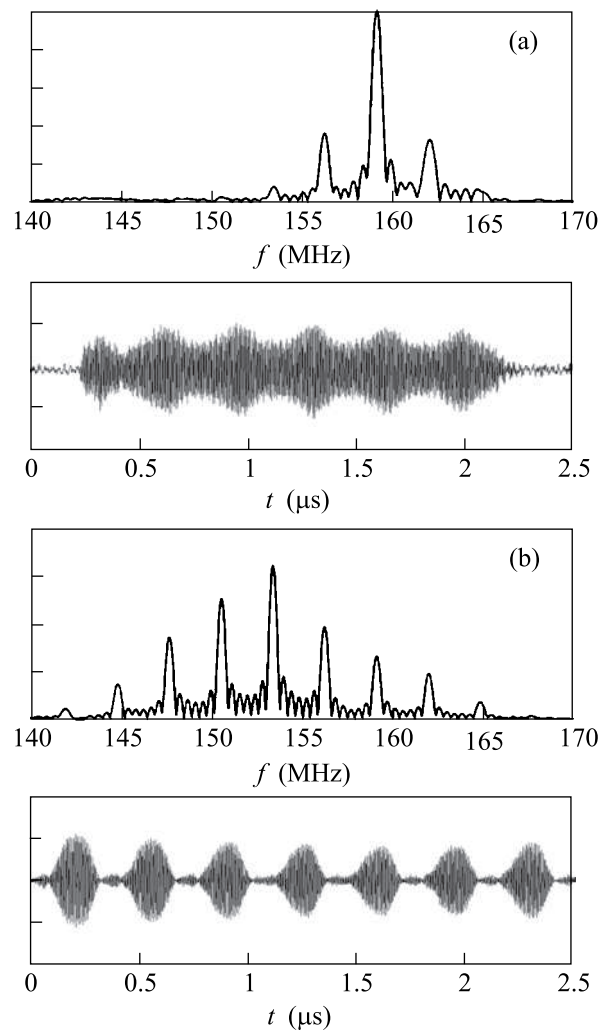


Рис.4. Характерные осциллограммы ВЧ импульса, принимаемого из плазмы, и спектры сигналов, полученные с помощью преобразования Фурье (приемная и излучающая рамки находятся на оси канала): (а) – длительность импульса 2 мкс, приемная антенна удалена от излучающей на расстояние $\Delta z = 40$ см, (б) – длительность импульса 3 мкс, приемная антенна удалена на расстояние $\Delta z = 260$ см

нов, Ω_H – ионная циклотронная частота, Θ – угол между направлением внешнего магнитного поля \mathbf{B}_0 и волновым вектором \mathbf{k}). Из (1) видно, что возмущение показателя преломления может быть связано как с вариациями магнитного поля (ω_H), так и с возмущением концентрации электронов плазмы (ω_p^2). Нетрудно показать, что в поле волны с $k_{\perp} \sim \omega_p/c$ относительное возмущение внешнего магнитного поля значительно больше, чем относительное возмущение концентрации плазмы:

$$\frac{\delta N}{N_0} \approx \left(\frac{\omega_H}{\omega_p}\right)^2 \frac{\delta B}{B_0}, \quad (2)$$

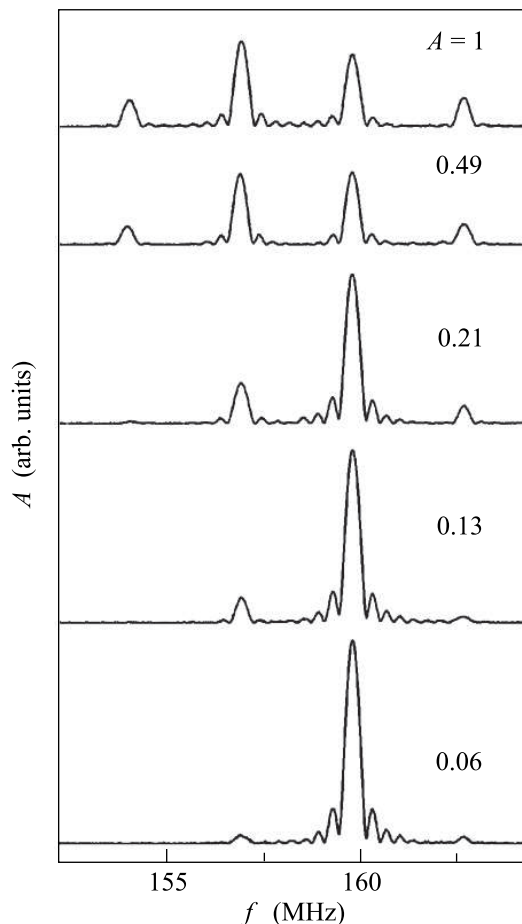


Рис.5. Преобразование частотного спектра свистовой волны в зависимости от относительного возмущения внешнего магнитного поля переменным полем на частоте $f_1 = 3$ МГц ($A \propto \delta B/B_0$, $A = 1$ соответствует $\delta B/B_0 \simeq 5\%$)

где δN и δB – возмущения плотности и магнитного поля в НЧ свистовой волне. В условиях эксперимента $\omega_H/\omega_p \simeq 0.1$. Возмущение внешнего магнитного поля достигает $\delta B/B \sim 5\%$, именно периодическая модуляция магнитного поля дает основной вклад в изучаемый параметрический эффект. Смещение спектра может быть объяснено как взаимодействием ВЧ сигнала с бегущей волной параметра (магнитного поля),

так и с сильной зависимостью декремента столкновительного затухания ВЧ свистовых волн от частоты.

Хотелось бы обратить внимание на необычный вид осциллограмм модулированных сигналов (рис.3,4) в виде отдельных, периодически повторяющихся волновых пакетов. Такой вид модулированного сигнала напоминает осциллограммы ионных свистов, принимаемых из околосредней плазмы в ультранизкочастотном диапазоне частот. Это – микропульсации $Pc-1$, так называемые “жемчужины” [8]. Подобие сигналов позволяет сделать предположение, что за генерацию квазипериодических последовательностей “жемчужин” отвечает механизм, сходный с механизмом, представленным в данной работе. Возможно, генерация $Pc-1$ связана с амплитудно-частотной модуляцией ионных свистов в районе экватора интенсивными НЧ возмущениями магнитного поля Земли.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант # 01-02-16578) и Российского департамента науки (финансирование уникальных установок, регистрационный номер 01-18).

1. Я. И. Лихтер, О. А. Молчанов, В. М. Чмырев, Письма в ЖЭТФ **14**, 475 (1971).
2. Y. Omura, D. Nunn, H. Matsumoto, and M. J. Rycroft, J. Atm. Terr. Phys. **53**, 351 (1991).
3. V. Sotnikov, V. Fiala, F. Lefeuvre, and D. Lagoutte, J. Geophys. Res. **96**, 11363 (1991).
4. S. Ohnami, M. Hayakawa, T. F. Bell, and T. Ondoh, Geophys. Res. Lett. **20**, 739 (1993).
5. V. Y. Trakhtengerts and M. Hayakawa, J. Geophys. Res. **98**, 19205 (1993).
6. Т. М. Заборонкова, А. В. Костров, А. В. Кудрин и др., ЖЭТФ **101**, 1151 (1992).
7. С. В. Егоров, А. В. Костров, А. В. Тронин, Письма в ЖЭТФ **47**, 86 (1988).
8. A. Gulielmi, J. Kangas, and A. Potapov, J. Geophys. Res. **106**, 25847 (2001).