

Кроссмодуляция волн свистового диапазона частот в магнитоактивной плазме

Н. А. Айдакина, М. Е. Гуцин, И. Ю. Зудин¹⁾, С. В. Коробков, А. В. Костров, А. В. Стриковский

Институт прикладной физики РАН, 603950 Н.-Новгород, Россия

Поступила в редакцию 25 ноября 2014 г.

После переработки 17 декабря 2014 г.

В лабораторных экспериментах, выполненных на крупномасштабном плазменном стенде “Крот”, обнаружено явление кроссмодуляции волн свистового диапазона частот в слабостолкновительной замагниченной плазме. Наблюдается амплитудно-фазовая модуляция пробных волн малой интенсивности, проходящих через область плазмы, модифицированную волной накачки с глубокой гармонической модуляцией огибающей. При больших периодах модуляции накачки обогащение спектра пробных волн происходит преимущественно за счет возмущений плотности плазмы. При малых периодах модуляция пробных волн предположительно обусловлена механизмом “магнитной” нелинейности, т.е. возмущениями внешнего магнитного поля.

DOI: 10.7868/S0370274X15040050

Волны диапазона очень низких и крайне низких частот (ОНЧ и КНЧ), распространяющиеся в околоземной плазме преимущественно в свистовой моде, представляют значительный фундаментальный интерес [1], важны с точки зрения организации и обеспечения сверхдальней радиосвязи [2], являются мощным инструментом диагностики ионосферы и магнитосферы [3]. Активное волновое воздействие на ионосферу и магнитосферу в диапазоне КНЧ–ОНЧ – одна из приоритетных задач современной плазменной геофизики [4]. Для генерации волн с интенсивностью, достаточной для их уверенной регистрации после прохождения длинных ионосферных и магнитосферных трасс, применяются наземные станции мощностью до нескольких мегаватт, при работе которых в плазме неизбежно развиваются нелинейные явления, включая нагрев и перераспределение ионосферной плазмы [5–7], возникновение потоков ускоренных заряженных частиц [8, 9]. В результате при распространении низкочастотных волн по общим трассам за счет нелинейных эффектов возможно взаимное обогащение их частотного спектра, в частности кроссмодуляция, т.е. модуляция одной волны по закону изменения огибающей другой волны [10].

Механизмы нелинейного взаимодействия волн, приводящие к подобным явлениям, нередко вызывают споры [11]. При интерпретации данных по взаимодействию низкочастотных волн в околоземной плазме наряду с теоретическим анализом и числен-

ными экспериментами большие надежды связываются с лабораторным моделированием нелинейных плазменно-волновых явлений. Оно выгодно отличается от натурального эксперимента контролем параметров плазмы и излучения, а также возможностью многократного воспроизведения исследуемых процессов с целенаправленным варьированием условий их протекания. Постановка таких экспериментов возможна на ограниченном числе лабораторных установок мира, позволяющих формировать высокооднородный столб низкотемпературной замагниченной плазмы с размерами, существенно превышающими длины волн излучения. В данной работе впервые в лабораторных условиях обнаружено и исследовано явление кроссмодуляции низкочастотных волн в замагниченной плазме в условиях, приближенных к реализуемым в ионосфере Земли по параметрам подобия.

Эксперименты были проведены на плазменном стенде “Крот” в столбе распадающейся плазмы индукционного разряда длиной около 4 м и диаметром 1.5 м при концентрациях электронов $n_e = (10^{10} - 10^{12}) \text{ см}^{-3}$, электронной температуре $T_e = (0.5 - 1) \text{ эВ}$, величине внешнего магнитного поля $B_0 \sim 100 \text{ Гс}$ (электронная циклотронная частота $f_{ce} = 300 \text{ МГц}$). Масштабируемые параметры эксперимента – концентрация плазмы n_e и индукция внешнего магнитного поля B_0 – в лабораторном эксперименте были подобны значениям, реализуемым во внешней ионосфере и магнитосфере Земли, с масштабным множителем $\gamma = 300 - 3000$ [12]. Для немасштабируемого параметра – частоты столкновений –

¹⁾e-mail: zudin@appl.sci-nnov.ru

сохранено сильное неравенство с частотой излучения: $\nu_{ei} \ll f$.

Возбуждение низкочастотных волн производилось одновитковыми экранированными рамочными антеннами диаметром 1–7 см, устанавливаемыми на оси плазменного столба (радиальная позиция $r = 0$ см). Волна накачки возбуждалась на частоте несущей, $f_0 = 75$ МГц, в форме подводимого к антенне диаметром $d_0 = 7$ см радиоимпульса длительностью до 150 мкс с глубокой амплитудной модуляцией по гармоническому закону. Частота модуляции изменялась в пределах $f_m = (0.1–1.5)$ МГц. Уровень мощности, подводимой к антенне, составлял $P_0 = 125$ Вт. Максимальная интенсивность поля накачки достигалась в ближней зоне антенны. Вдали от антенны в плазме возбуждались волны свистового диапазона, распространявшиеся преимущественно вдоль направления внешнего магнитного поля. Длина волны составляла около 15 см. К окончанию импульса накачки за счет нагрева и термодиффузионного перераспределения плазмы формировалась вытянутая вдоль оси плазменного столба область с пониженной относительно фона на 30% электронной концентрацией – дакт плотности, в котором волна накачки удерживалась в режиме волноводного распространения и который определял поперечный масштаб локализации интенсивных электромагнитных полей [13]. Область плазмы, модифицированная накачкой, просвечивалась пробными волнами с частотами $f_p = (30–60)$ МГц, возбуждавшимися с помощью рамочных антенн диаметром $d_p = (1–5)$ см на уровне мощности, не превышавшем $P_p \sim 0.1$ Вт, которые также захватывались в дакт. Измерения фонового значения и возмущений плотности плазмы производились зондом с СВЧ-резонатором на четвертьволновом отрезке двухпроводной линии [14]. Возмущения внешнего магнитного поля регистрировались экранированными шестивитковыми магнитными зондами диаметром 2 см, изолированными от плазмы слоем диэлектрика. Сигналы с антенн и зондов подавались на вход цифрового осциллографа с функцией анализатора спектра. Для предупреждения нелинейных эффектов в измерительной цепи и снижения уровня электромагнитных помех использовались режекторные фильтры, ослаблявшие сигнал накачки на уровне не хуже 80 дБ. Выходные тракты генератора накачки и пробных волн защищались ферритовыми вентилями и полосовыми фильтрами, настроенными на рабочие частоты.

Полученные результаты представлены на рис. 1 и 2. Установлено, что спектр пробной волны при прохождении через модифицированную накачкой об-

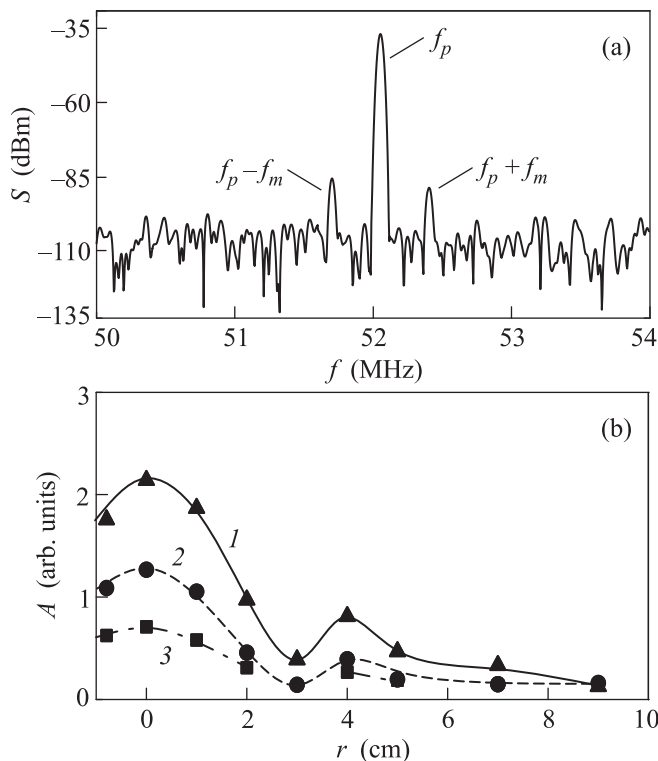


Рис. 1. (а) – Спектр пробной волны после прохождения области плазмы, модифицированной амплитудно-модулированной накачкой. (б) – Поперечное распределение амплитуды сигналов на частоте несущей (f_p , 1), “красного” спутника ($f_p - f_m$, 2), “синего” спутника ($f_p + f_m$, 3); амплитуда несущей f_p уменьшена в 100 раз; расстояние до излучающей антенны $z = 45$ см

ласть плазмы обогащается спутниками, отстроенными от несущей f_p на частоту модуляции накачки f_m : в лабораторном эксперименте наблюдается кроссмодуляция низкочастотных волн, подобная имеющей место при проведении активных ионосферных экспериментов [6, 10]. Уровень спутников ниже уровня сигнала на основной частоте f_p (несущей) на 40–50 дБ, причем спектр пробной волны обогащается несимметрично: амплитуда “красного” спутника ($f_p - f_m$) превышает амплитуду “синего” ($f_p + f_m$). Измерения поперечной структуры пробной волны показали, что амплитуда спутников по всему сечению волнового пучка изменяется пропорционально амплитуде несущей (рис. 1б). Уровень спутников, возникающих в спектре пробной волны, уменьшается относительно уровня несущей с повышением частоты модуляции накачки. При этом на полученных зависимостях можно выделить два характерных участка (рис. 2). При низких частотах модуляции (до $f_m \sim 0.5$ МГц) амплитуда спутников изменяется по закону, близкому к f_m^{-1} . При более высоких частотах модуляции она выходит на постоянный уро-

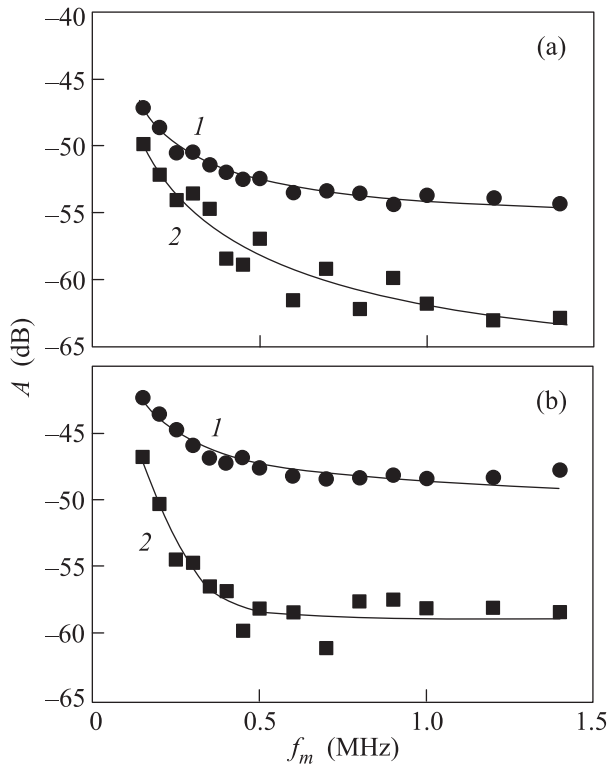


Рис. 2. Амплитуды спутников A_s , отнесенные к амплитуде пробной волны A_p на частоте несущей f_p , в зависимости от частоты модуляции: 1 – “красный” спутник, 2 – “синий” спутник. Измерения выполнялись на оси плазменного столба на расстоянии 45 см (а) и 65 см (б) от излучателя

вень. Важно, что уровень спутников в спектре пробной волны увеличивается по мере удаления от излучающей антенны: кроссмодуляционный эффект накапливается при распространении пробной волны по трассе, близкой к оси пучка накачки. Для установления характера модуляции пробных волн использовалась цифровая обработка волновых форм (осциллограмм) сигналов, к которым применялось преобразование Гильберта для выделения огибающей и заполнения. Частотные спектры амплитуды (переменная составляющая амплитуды пробной волны, отнесенная к среднему значению) и фазы заполнения сигнала приведены на рис. 3. Видно, что в модифицированной области плазмы пробные волны испытывают комбинированную амплитудно-фазовую модуляцию.

Обсудим полученные результаты. В условиях эксперимента период модуляции накачки (0.1–10 мкс) выбирался меньшим характерных времен нагрева электронной компоненты плазмы, $(\delta\nu_{ei})^{-1} \sim (100\text{--}500)\text{ мкс}$, где $\delta = 2m_e/m_i$, m_e и m_i – массы электрона и иона соответственно, ν_{ei} – частота кулоновских столкновений. Поэто-

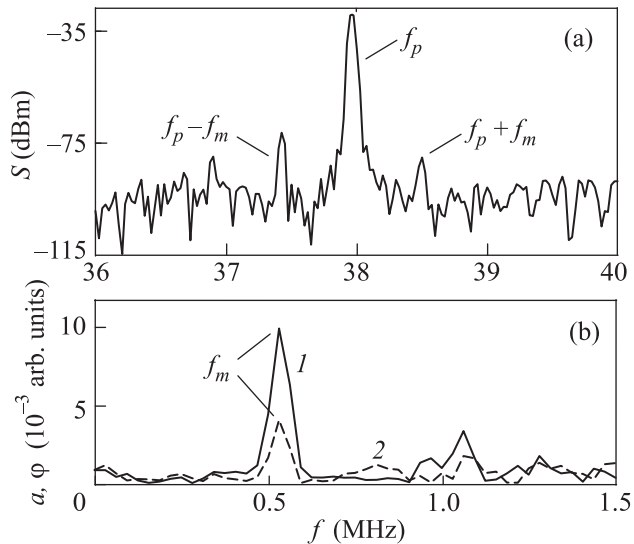


Рис. 3. (а) – Спектр пробной волны. (б) – Спектры амплитуды сигнала (1) и фазы заполнения сигнала (2). Измерения проводились на оси плазменного столба. Расстояние от антенны накачки $z_0 = 25$ см, $B_0 = 100$ Гс, $n_e = 2 \cdot 10^{11}$ см $^{-3}$

му эффекты тепловой нелинейности не успевают развиться и наблюдаемая кроссмодуляция, скорее всего, была вызвана нелинейностью, обусловленной усредненной ponderomotorной силой в пространственно-неоднородном высокочастотном поле накачки. В [15, 16] экспериментально показано, что усредненная ponderomotorная сила в замагниченной плазме может приводить, с одной стороны, к возмущениям плотности и магнитного поля за счет стрикционного эффекта, а с другой – к генерации замкнутых дрейфовых токов, возмущающих внешнее магнитное поле без модуляции плотности. Скорость перераспределения плазмы ограничена значениями порядка звуковых, тогда как генерация возмущений магнитного поля представляет собой малоинерционный эффект. На рис. 4 приводится измеренная амплитуда колебаний плотности на частоте модуляции накачки f_m , регистрируемых в модифицированной области плазмы, совместно с измеренными там же колебаниями аксиальной компоненты магнитного поля. При низких частотах (до 0.5 МГц) регистрируемые модуляции возмущения плотности и магнитного поля изменяются пропорционально. Возмущения плотности локализованы преимущественно в ближней зоне антенны накачки, просвечиваемой пробной волной. Данная зона характеризуется наибольшими значениями напряженности высокочастотного электромагнитного поля. Вариации плотности магнитоактивной плазмы на уровне $\delta n_e/n_e \sim (1\text{--}5) \cdot 10^{-3}$ за счет диамаг-

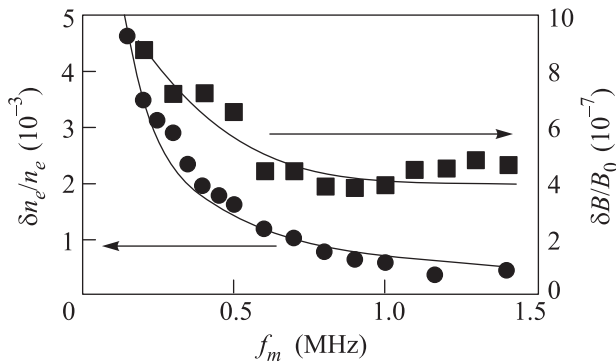


Рис. 4. Амплитуда возмущений плотности плазмы (кружки, левая ось) и аксиальной компоненты магнитного поля (квадраты, правая ось) в зависимости от частоты модуляции. Измерения проводились на оси плазменного столба. Расстояние от антенны накачки 25 см, $B_0 = 100$ Гс, $n_e = 2 \cdot 10^{11}$ см $^{-3}$

нитного эффекта сопровождаются возмущениями внешнего магнитного поля. Уровень последних $\delta B/B_0 \sim (2-10) \cdot 10^{-7}$ определяется балансом газокинетического давления и давления магнитного поля ($\delta n_e/n_e = B_0^2/(4\pi n_e T_e)(\delta B/B_0) \sim 5 \cdot 10^3 \delta B/B_0$ для концентрации $n_e = 2 \cdot 10^{11}$ см $^{-3}$ и температуры электронов $T_e \simeq 0.5$ эВ, для которых были получены данные рис. 4). В то же время, начиная с частот модуляции порядка 0.5 МГц, амплитуда колебаний магнитного поля выходит на постоянный уровень, тогда как уровень возмущений плотности по мере повышения частоты модуляции f_m спадает до нуля. При высоких частотах модуляции генерация возмущений магнитного поля, не сопровождаемых вариациями электронной плотности, обусловлена, по-видимому, малоинерционным механизмом “магнитной” нелинейности – генерацией замкнутых дрейфовых электронных токов, охватывающих область пучка накачки. Величина этих возмущений, $\delta B \sim 5 \cdot 10^{-5}$ Гс, согласуется с оценками низкочастотных магнитных полей, формируемых за счет пондеромоторной “магнитной” нелинейности в поперечно ограниченном амплитудно-модулированном пучке квазипродольных свистовых волн [15], $\delta B \simeq B_w^2/2B_0$, где $B_w \sim 10^{-1}$ Гс – амплитуда переменного магнитного поля волны накачки.

В результате проведенных экспериментов показано, что амплитудно-фазовая модуляция пробных волн в области плазмы, модифицированной накачкой, накапливается по трассе распространения и обусловлена возмущениями концентрации плазмы и магнитного поля. Обнаруженный режим кроссмодуляции низкочастотных волн может реализоваться в слабостолкновительной плазме магнитосферы, а

также в ионосфере при работе мощных наземных передатчиков в ночные часы. Отметим, что аналогичный режим модуляции низкочастотных волн может быть реализован при двухчастотном воздействии на околоземную плазму с помощью мощных наземных передатчиков с близкими значениями несущих. В этом случае возмущения параметров плазмы возникают на частоте биений волн накачки и обе волны накачки испытывают модуляцию, проявляющуюся как обогащение спектра принимаемого сигнала спутниками, отстроенными от несущих на частоту биений. Подобные результаты, полученные в магнитосферных и ионосферных активных экспериментах [6], могут объясняться механизмом, обсуждаемым в данной работе.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты # 13-02-97142 р_поволжье_a, 13-02-12241 офи_m, 14-02-00670-A) в рамках научной программы # 15 ОФН РАН.

1. R. A. Helliwell, Space Sci. Rev. **15**, 781 (1974).
2. K. L. Graf, N. G. Lehtinen, M. Spasojevic, M. B. Cohen, R. A. Marshall, and U. S. Inan, J. of Geophys. Res. Space Physics. **118**, 2708 (2013).
3. A. Rozhnoi, M. Solovieva, O. Molchanov, O. Akentieva, J. J. Berthelier, M. Parrot, P. F. Biagi, and M. Hayakawa, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. **8**, 1105 (2008).
4. U. S. Inan, T. F. Bell, and J. Bortnik, J. of Geophys. Res. **108**(A5), 1186 (2003).
5. Ю. И. Лихтер, О. А. Молчанов, В. М. Чмырев, Письма в ЖЭТФ **14**, 457 (1971).
6. R. A. Helliwell, U. S. Inan, J. P. Katsufraakis, and D. L. Carpenter, J. of Geophys. Res. **91**(A1), 143 (1986).
7. T. F. Bell, K. Graf, U. S. Inan, D. Piddychiy, and M. Parrot, Geophys. Res. Lett. **38**, L11103 (2011).
8. Р. А. Ковражкин, М. М. Могилевский, Ж. М. Боске и др., Письма в ЖЭТФ **38**, 332 (1983).
9. J. A. Sauvaud et al., Geophys. Res. Lett. **35**, L09101 (2008).
10. M. Golkowski, U. S. Inan, and M. B. Cohen, Geophys. Res. Lett. **36**, L15103 (2009).
11. K. L. Graf, U. S. Inan, and M. Spasojevic, J. of Geophys. Research. **116**(A12), A12313 (2011).
12. Г. Альвен, К.-Г. Фельтхаммар, Космическая электродинамика, Мир, М. (1967).
13. А. В. Костров, А. И. Смирнов, М. В. Стародубцев, А. А. Шайкин, Письма в ЖЭТФ **67**, 548 (1998).
14. Д. В. Янин, А. В. Костров, А. И. Смирнов, А. В. Стриковский, ЖТФ **78**, 133 (2008).
15. М. Е. Гуштин, С. В. Коробков, А. В. Костров, А. В. Стриковский, Письма в ЖЭТФ **88**, 834 (2008).
16. Н. А. Айдакина, М. Е. Гуштин, И. Ю. Зудин и др., Письма в ЖЭТФ **193**, 555 (2011).