

МОДУЛЯЦИЯ СПЕКТРА И АМПЛИТУДЫ НИЗКОЧАСТОТНОГО СИГНАЛА В МАГНИТОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЕ

Я.И. Лизтер, О.А. Молчанов, В.М. Чмырев

В данном сообщении обсуждаются некоторые результаты эксперимента по зондированию магнитосферы Земли мощными низкочастотными импульсами с несущей частотой $f_0 = 15 \text{ кГц}$. Поскольку известно, что в магнитосферной плазме волны такой частоты канализируются вдоль силовых линий магнитного поля Земли [1], прием сигналов проводился в магнитосопряженной передатчику области. Передавались импульсы длительностью $\tau = 200, 400$ и 800 мсек и периодом следования $T = 3 \text{ сек}$. Практически все время принимались два сигнала: волноводный, прошедший над земной поверхностью в волноводе Земля - ионосфера по трассе длиной $S_1 \approx 10000 \text{ км}$, с задержкой $t_1 = 32 \text{ мсек}$ и магнитосферный с задержкой $t_2 \approx 500 + 900 \text{ мсек}$, что при длине трассы $S_2 \approx 30000 \text{ км}$ соответствует среднему групповому показателю преломления вдоль траектории $n_g \approx 5 + 10$. Пример динамического спектра принимаемого сигнала приведен на рис. 1. По осям отложены частота f и текущее время t , спектральная интенсивность в каждый момент передается почернением бумаги. Видно, что в отличие от волноводного сигнала A_1 ($\tau = 400 \text{ мсек}$) динамический спектр уширяется в некоторой части магнитосферного сигнала A_2 и появляется квазимонохроматическое индуцированное (так называемое триггерное) излу-

чение A_3 . Максимальное уширение шумового спектра не выходит за пределы $\Delta f_{\text{ш max}} \approx 100 \div 400$ $\mu\text{ц}$. Частота триггерного излучения f_T может как повышаться, так и понижаться, иногда зависимость $f_T(t)$ имеет несколько экстремумов и излучение продолжается еще $100 \div 300$ $\mu\text{сек}$ после прекращения первичного сигнала на частоте f_0 . $\Delta f_{T \text{ max}} = |f_T - f_0|_{\text{ max}} = 1 \div 3$ кц . Триггерное излучение уже наблюдалось ранее [2] и в этой работе подробно обсуждаться не будет.

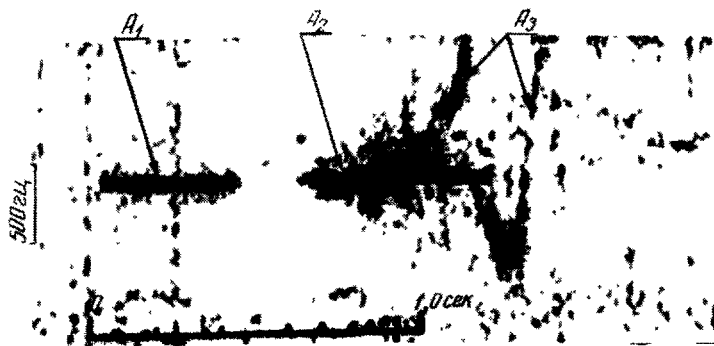


Рис. 1

В нашем эксперименте обнаружен эффект периодической модуляции квазিশумового спектра магнитосферного сигнала и связанной с ним амплитудной модуляции. Это явление впервые наблюдалось нами в 1968 г [3], однако в наиболее ярком виде оно проявилось в описываемом эксперименте, когда длительность посылок была увеличена. На рис. 2 приведены динамический спектр (а) и амплитудная запись (б) принимаемого сигнала. Длительность излучаемого импульса в этом случае была $\tau = 800$ $\mu\text{сек}$; на амплитудной записи был исключен волноводный сигнал, так как из-за недостаточно большой задержки магнитосферного сигнала оба сигнала, как это видно по спектральной записи, частично перекрывались (медленные вариации несущей частоты, видимые на рис. 2, а, обусловлены нестабильностью регистрирующей аппаратуры и не связаны с описываемым эффектом). Характерно, что максимумы уширения спектра совпадают с максимумами амплитуды сигнала. По амплитуде сигнал промодулирован почти полностью. Интересно, что квазিশумовой спектр несимметричен относительно f_0 , причем преобладают более высокие частоты. На рис. 2 присутствует также и триггерное излучение. Как в этом, так и в других случаях оно появляется преимущественно в конце сигнала и начинается, как правило, вблизи максимумов квазিশумового спектра. На амплитудной записи триггерное излучение почти не видно из-за того, что регистрация амплитуды велась в сравнительно узкой полосе $2\Delta f = 500$ $\mu\text{ц}$. Четкая модуляция магнитосферного сигнала зарегистрирована примерно в 20% сеансов; период модуляции менялся от сеанса к сеансу в пределах $T_M \approx 100 \div 200$ $\mu\text{сек}$, однако в течение одного сеанса оставался приблизительно постоянным. В конце некоторых сеансов мы имели возможность принимать длинные посылки ($\tau > 10$ сек), которые были на всем протяжении промодулированы с тем же периодом, что и во время сеанса. Эти факты, по-видимому, свидетельствуют об устойчивости модуляции. Изменения периода модуляции от сеанса к сеансу связаны с из-



Рис. 2

менениями амплитуды E принимаемого сигнала, которая определяется условиями распространения волны в магнитосфере. Эта зависимость иллюстрируется рис. 3. Чтобы исключить вариацию амплитуды, связанную с поглощением в ионосфере, мы провели нормировку E к среднему значению с учетом времени суток в каждом сеансе. Из-за недостаточно большого количества экспериментальных данных трудно выявить детальную зависимость $T_M(E)$, однако тенденция уменьшения T_M с увеличением E прослеживается достаточно хорошо. Это свидетельствует о существенно нелинейной природе описываемого эффекта.

По-видимому, модуляция возникает при квазипродольном распространении импульса на вершинных участках траектории, удаленных от поверхности Земли на расстояние $\sim 10^4$ км. В этой области магнитосферы кроме холодных электронов ($T_e \sim 1$ эв) присутствует малая добавка горячих электронов ($T_e \approx 10 + 100$ кэв) с анизотропным распределением по скоростям ($T_{\perp e}' / T_{\parallel e}' > 1$) [4], следовательно возможен эффективный циклотронный резонанс с захватом электронов в потенциалъ-

ную яму из-за продольной силы $e s^{-1} [v_{\perp} \times H]$ (H — магнитная компонента волны) [5]. Оцененная средняя частота осцилляций электрона в потенциальной яме $\sim 10^2$ μ . Таким образом можно объяснить возникновение квазишумового уширения спектра магнитосферного сигнала. Модуляция квазишумового спектра и амплитуды сигнала может быть обусловлена присутствием интенсивной посторонней, в частности, квазимонохроматической ионно-звуковой волны ($f_s \sim 5$ μ) в соответствующих областях магнитосферы [6].

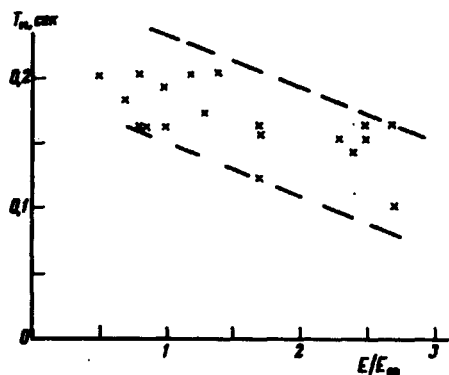


Рис. 3

С другой стороны, весьма возможно, что модуляция связана с движением резонансных частиц между зеркальными точками в геомагнитном поле. Оцененный нами период такого движения (200 — 300 μ сек) близок к периоду модуляции. Еще одна возможность объяснения наблюдаемого эффекта описана в работе [7].

Авторы признательны В.И.Карпману, Н.И.Будько и О.А.Похотелову за полезное обсуждение результатов работы.

Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
16 сентября 1971г.

Литература

- [1] R.A.Helliwell. Whistlers and Related Ionospheric Phenomena. Stanford, California, 1965.
- [2] R.A.Helliwell, J.Katsufakis, M. Trimpi, N.Brice. J. Geophys. Res., 69, 2391, 1964.
- [3] Ю.В.Киселев, Я.И.Лихтер, О.А.Молчанов. Сб. "Низкочастотные излучения во внешней ионосфере", М., Изд. Наука, 1972, (в печати).
- [4] Б.А.Тверской. Динамика радиационных поясов Земли М., Изд. Наука, 1968.
- [5] Т.Стикс. Теория плазменных волн. М., Атомиздат, 1965.
- [6] В.М.Чмырев. Сб. "Низкочастотные излучения во внешней ионосфере", М., Изд. Наука, 1972. (в печати).
- [7] Н.И.Будько, В.И.Карпман, О.А.Похотелов. Письма в ЖЭТФ, данный номер, стр. 469.