

09

© 1992

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
НЕЛИНЕЙНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОШНЫХ  
КВ – СИГНАЛОВ В ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЕС.А. Дмитриев, Ю.А. Игнатьев,  
Г.С. Коротина, П.Б. Шавин, Ю.Я. Яшин

В результате теоретических исследований (см., например, [1–3]) установлено, что нелинейное взаимодействие двух электромагнитных волн в плазме может приводить к генерации плазменной волны в области пространственного синхронизма с достаточно высоким коэффициентом возбуждения. Характеристики электромагнитных и плазменных волн, участвующих в таком взаимодействии, зависят как от параметров волн, так и от состояния плазмы, в которой происходит взаимодействие волн. Это позволяет использовать анализ соответствующих характеристик взаимодействующих электромагнитных волн на частотах  $f_1$  и  $f_2$  для диагностики параметров неоднородной плазмы [4]. Аналогичный подход может быть применен и при анализе нелинейного взаимодействия электромагнитных волн в ионосферной плазме. Диагностика взаимодействия волн в ионосфере может осуществляться и по относительному изменению величин амплитуд возбуждающих электромагнитных волн и по анализу параметров волн комбинационных частот, которые могут генерироваться при взаимодействии мощных волн с ионосферной плазмой.

Именно экспериментальному исследованию нелинейного взаимодействия мощных радиоволн с ионосферой посвящена данная работа. Отличительной особенностью ионосферной плазмы является существенная неоднородность электронной концентрации по высоте с максимальной плазменной частотой  $f_o F2$ , называемой критической частотой слоя  $F2$ . В отличие от работ [5–6], где рассматривалось взаимодействие в ионосфере высокочастотных волн ( $f_1, f_2 \gg f_o F2$ ), здесь анализируется взаимодействие радиоволн КВ – диапазона, когда  $f_1$  и  $f_2$  порядка критической частоты. Эксперименты проводились в ночное время суток с 21.00 МДВ 28.05.91 г. до 09.00 29.05.91 г. и в течение суток с 09.00 29.08.91 г. по следующей методике. Экспериментальный стенд НИРФИ „Сура” для исследования взаимодействия мощного радиоизлучения с ионосферной плазмой [7] излучал вертикально две электромагнитные волны обыкновенной поляризации на частотах  $f_1$  и  $f_2$ . На частоте  $f_1$  стенд работал в пятиминутном режиме (2 мин – работа, 3 мин – пауза) с излучаемой мощностью  $P=500$  КВт, на частоте  $f_2$  стенд работал в двадцатиминутном режиме (15 мин – работа, 5 мин – пауза) с мощностью  $P=10, 50, 250$  КВт, меняемой через каждые 20 мин в течение часа соответственно. На рис. 1 приведено расписание работы стенда

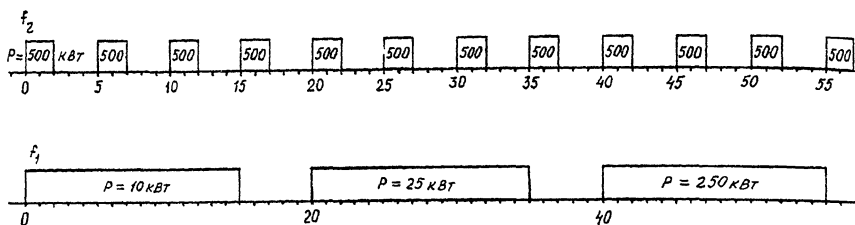


Рис. 1. Расписание работы стенда „Сура“ на частотах  $f_1$  и  $f_2$ ;  $P$  — мощность передатчика.

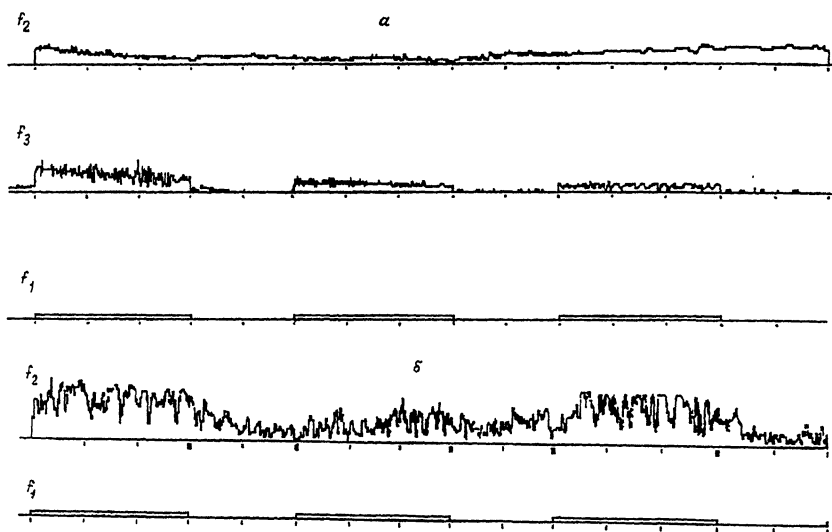


Рис. 2. Временная зависимость амплитуды сигнала на частотах а —  $f_2$ ,  $f_3$ ; б —  $f_2$  и интервалы работы передатчика на частоте  $f_1$ .

„Сура“ на частотах  $f_1$  и  $f_2$ . За время проведения экспериментов выбарались следующие пары взаимодействующих частот:  $f_1 = 9.31$  и  $f_2 = 4.785$  МГц;  $f_1 = 9.31$  и  $f_2 = 5.825$  МГц  $f_1 = 7.815$  и  $f_2 = 4.785$  МГц.

Регистрация сигналов на частотах  $f_1$ ,  $f_2$  и  $f_3 = f_1 - f_2$  осуществлялась на специализированном приеме-регистрирующем комплексе с полосой приемника порядка 5 КГц в пункте, расположенном на расстоянии 110 км к западу от стенда „Сура“. Приемная антенна представляла собой широкополосный квадрат с центром ле-

Т а б л и ц а

| 1 сеанс |      | 2 сеанс |     | 3 сеанс |      | 4 сеанс |      | 5 сеанс |      | 6 сеанс |     | 7 сеанс |      |
|---------|------|---------|-----|---------|------|---------|------|---------|------|---------|-----|---------|------|
| Р       | П    | Р       | П   | Р       | П    | Р       | П    | Р       | П    | Р       | П   | Р       | П    |
| 2.47    | 1.32 | 4.32    | 1.4 | 5.29    | 1.33 | 3.86    | 1.28 | 7.49    | 1.83 | 6.87    | 2.5 | 6.16    | 2.74 |

пестка диаграммы направленности, направленным в зенит, и полушириной порядка  $40^\circ$ . Ионосферная обстановка в приемном пункте контролировалась с помощью автоматической ионосферной станции, снимающей ионограммы вертикального зондирования с периодом в 15 мин.

В экспериментах было обнаружено наличие двух эффектов:

1. Появление сигнала на частоте  $f_3 = f_1 - f_2$ , амплитуда которого превышала уровень шума на 10–20 Дб только при одновременном излучении частот  $f_1$  и  $f_2$ . В периоды работы стенда „Сура“ только на частоте  $f_1$  или  $f_2$  (см. рис. 1) сигнала на частоте  $f_3$  обнаружено не было. На рис. 2, а в качестве примера приведена временная зависимость амплитуды сигнала на частотах  $f_2$ ,  $f_3$  и указаны интервалы работы передатчика на частоте  $f_1$  во время сеанса с 6.00 до 9.00 30.08.91 г.

В таблице приведены усредненные за 2 мин значения амплитуд на комбинационной частоте  $f_3 = f_1 - f_2 = 4.525$  МГц в течение последовательных 7 сеансов одновременной работы мощного стенда „Сура“ на частотах  $f_1 = 9.31$  МГц и  $f_2 = 4.785$  МГц, и паузы в работе на одной из частот (Р – работа, П – пауза в работе стенда на  $f_1$ ).

Заметных эффектов (более 0.1 с) развития и релаксации в процессе изменения амплитуды на частоте  $f_3$  замечено не было. В периоды пауз в работе стенда на  $f_1$  в таблице приведены усредненные за 3 мин значения амплитуды шума. Эффект появления сигнала на частоте  $f_3$  при одновременной работе стенда на частотах  $f_1$  и  $f_2$  наблюдался с 23.00 до 01.00 ч в первом цикле и с 06.00 до 09.00 ч во втором цикле наблюдений. В первом случае  $f_0 F2$  падала с  $\hat{\delta}$  до 7.3 МГц, во втором – увеличивалась с 4 до 9.3 МГц. Таким образом, при наблюдении эффекта появления сигнала на частоте  $f_3$  сигналы на частоте  $f_1 = 9.31$  МГц проходили через ионосферу без отражения, а сигналы на частоте  $f_2 = 4.785$  МГц испытывали полное внутреннее отражение в ионосфере.

2. Увеличение амплитуды отраженного от ионосферы сигнала на частоте  $f_2 = 4.785$  МГц при включении сигнала на другой взаимодействующей частоте  $f_1 = 7.815$  МГц на величину 3–10 Дб с последующим уменьшением при выключении работы стенда на частоте  $f_1$ . Время развития и последующей релаксации эффекта доходило до 1 мин. Этот эффект наблюдался 29.08.91 г. в период с 17.00 до 18.00 ч МДВ (критическая частота  $f_0 F2$  в этот период менялась от 9.1 МГц до 7.5 МГц), когда оба сигнала  $f_1$  и  $f_2$  отражались от ионосферы. На рис. 2, б в качестве примера приведена

временная зависимость амплитуды сигнала на частоте  $f_2$  и указаны интервалы работы передатчика на частоте  $f_1$ . Причем подобный эффект наблюдался и на другой паре частот  $f_1 = 9.31$  МГц,  $f_2 = 5.825$  МГц с 11.00 до 16.00 29.08.91 г. (критическая частота  $f_2$  слоя менялась от 10.8 МГц до 9.5 МГц). Зависимости от мощности, излучаемой на частоте  $f_2$ , обнаружено не было как в одном эффекте, так и в другом.

#### В ы в о д ы

1. Появление сигнала на разностной частоте  $f_3 = f_1 - f_2$  наблюдается в то время, когда волна более высокой частоты  $f_1$  проходит сквозь ионосферу без отражения, а волна  $f_2$  — отражается.

2. Возрастание амплитуды сигнала  $f_2$  во время работы передатчика на частоте  $f_1$  и соответственно уменьшение амплитуды сигнала  $f_2$  при выключении передатчика на частоте  $f_1$  наблюдается тогда, когда обе волны  $f_1$  и  $f_2$  отражаются в ионосферном слое.

3. Первый эффект не имеет времени запаздывания. У второго эффекта время запаздывания 1 мин.

4. При наблюдаемом взаимодействии, по-видимому, энергетический эффект обусловлен перекачкой энергии от волны на более высокой частоте  $f_1$  в волну на разностной частоте  $f_3$  и волну на нижней частоте  $f_2$ . Поэтому зависимости от мощности передатчика, работающего на частоте  $f_2$ , ни для первого, ни для второго эффектов не наблюдалось.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Ц и т о в и ч В.Н. Нелинейные эффекты в плазме. М.: Наука, 1967. С. 250.
- [2] З а с л а в с к и й Г.М., М е й т л и с В.П., Ф и л о н е н к о Н.Н. Взаимодействие волн в неоднородных средах. Новосибирск: Наука, 1982.
- [3] В и н о г р а д о в а М.В., Р у д е н к о О.В., С у х о р у к о в А.П. Теория волн. М.: Наука, 1979. С. 383.
- [4] У р у с о в а Н.А., Ф а й н ш т е й н С.М., Я ш и н Ю .Я. // Физика плазмы. 1990. Т. 16. С. 238.
- [5] Н о в о ж и л о в В.И., В е р г а с о в А.А., Т р у б а ч е в С.И. // Геомагнетизм и аэронавигация. 1984. Т. 24. С. 930.
- [6] К а р л о в В.Д., Т р у б а е в С.И. // Волновые возмущения в ионосфере. Алма-Ата: Наука, 1987. С. 95.
- [7] Б е л о в И.Ф., Б ы ч к о в В.В., Г е т м а н ц е в Г.Г. и др. Препринт 167. Горький: НИРФИ, 1983.

Поступило в Редакцию  
27 января 1992 г.