

ОБНАРУЖЕНИЕ КОМБИНАЦИОННЫХ ЧАСТОТ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ МОЩНОГО КОРОТКОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМОЙ

*Г.Г.Гетманцев, Н.А.Зуйков, Д.С.Котик
Л.Ф.Мироненко, Н.А.Митяков, В.О.Рапопорт,
Ю.А.Саонов, В.Ю.Трахтенгерц, В.Я.Эйдман*

Обнаружено излучение на частоте модуляции мощного КВ передатчика, обусловленное квадратичной нелинейностью в ионосфере. Радиопередатчик на частоте $5,75 \text{ МГц}$ имел среднюю мощность 130 кВт и работал на антенну с вертикальной диаграммой направленности. Коэффициент усиления антенны $G \approx 150$. На частотах модуляции передатчика в диапазоне $1,2+7 \text{ кгц}$ на расстоянии 180 км в дневное время был зарегистрирован сигнал напряженностью поля $E \sim 0,02 \text{ мкв/м}$. Показано, что основную роль в формировании сигналов комбинационных частот играет нагревная нелинейность в D слое ионосферы.

В 1960 г. В.Л.Гинзбургом и А.В.Гуревичем было показано, что при распространении в ионосфере двух интенсивных радиоволн с частотами f_1 и f_2 должно возникать электромагнитное поле с комбинационными частотами [1, 2]. Для обнаружения указанного эффекта использовался наземный радиопередатчик с непрерывной мощностью излучения до 150 кВт , работающий на частоте $f = 5,75 \text{ МГц}$. Передатчик работал в режиме амплитудной модуляции (глубина модуляции $\sim 95\%$) на синфазную многодипольную антенну с вертикальной диаграммой направленности с коэффициентом усиления $G = 150$ [3]. Работа производилась в условиях смены частоты модуляции F , которая последовательно принимала значения: $F = 1259,45; 1773,03; 2525,27; 4000,04; 7246,44 \text{ гц}$. Приемный пункт находился на расстоянии 180 км (по прямой) к северу от коротковолнового радиопередатчика. В указанном диапазоне частот чувствительность приемной аппаратуры лимитируется широкополосными атмосфер-

ными помехами или (в магнитовозмущенных условиях) естественным магнитосферным ОНЧ излучением. Поэтому для увеличения отношения сигнала к шуму при приеме слабого синусоидального сигнала использовался приемник с узкой полосой пропускания частот. Прием сигналов на указанных выше частотах проводился на рамочную антенну с эффективной площадью $nS = 2500 \text{ м}^2$. Принятые сигналы усиливались широкополосным усилителем (с полосой пропускания от 1 до 8 кГц) и поступали на синхронный детектор, где производилось перемножение напряжений сигнала и вспомогательного генератора, частота которого выбиралась на $0,01 \pm 0,03 \text{ Гц}$ ниже частоты сигнала. Преобразованный сигнал с разностной частотой $0,01 \pm 0,03 \text{ Гц}$ пропускался через фильтр с полосой $0,25 \text{ Гц}$ и записывался на ленте самописца. Пример записи сигнала на частоте $2525,27 \text{ Гц}$ приведен на рис. 1, где после включения мощного передатчика в 11 час. 01 мин. отчетливо видны биения с частотой $0,019 \text{ Гц}$, амплитуда которых пропорциональна напряженности поля сигнала. После выключения передатчика в 11 час. 20 мин. на ленте самописца регистрировались лишь хаотические атмосферные помехи.

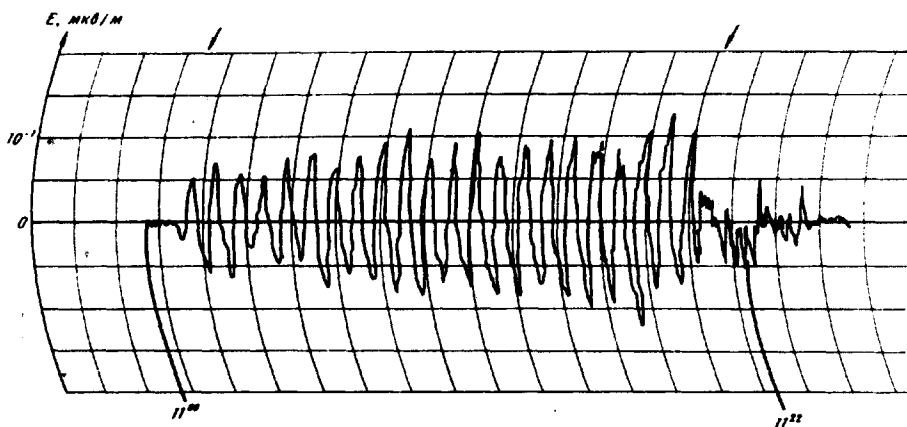


Рис. 1. Пример регистрации сигнала на частоте $2,5 \text{ кГц}$. Стрелками указаны моменты включения и выключения мощного передатчика

Сигналы на частоте модуляции мощного передатчика F были обнаружены на всех указанных выше частотах. Наблюдался четкий суточный ход напряженности поля сигналов. Как правило, напряженность поля достигала максимума в полуденные часы. В темное время суток сигналы отсутствовали. Частотный ход напряженности поля низкочастотного сигнала виден из рис. 2. Максимальной интенсивности сигнал достигал на частоте $F = 2,5 \text{ кГц}$. На крайних частотах ($F = 1,2$ и 7 кГц) сигналы регистрировались редко, тогда как на частотах $F = 2,5$ и 4 кГц в дневное время сигналы наблюдались регулярно. На частоте $2,5 \text{ кГц}$ напряженность поля менялась от дня ко дню от $2 \cdot 10^{-2}$ до $25 \cdot 10^{-2} \text{ мкВ/м}$. Напряженность поля низкочастотных сигналов в течении дня менялась случайным образом с характерными временами $1 - 2 \text{ час}$. Напряженность

поля на частоте F линейно зависела от изменения эквивалентной мощности передатчика. В октябре 1973 г., когда измерения проводились в магнитоспокойных условиях, изменения напряженности поля в течении дня имели плавный характер. В феврале 1974 г. часть наблюдений проводилась в магнитовозмущенных условиях, на фоне интенсивных естественных ОНЧ излучений. В этот период напряженности поля сигнала на частоте F менялась во времени значительно и иногда существенно превышала интенсивность сигнала в магнитоспокойные дни. Отметим также, что напряженность поля сигналов на низкой частоте совершенно не зависела от значений критической частоты f_c слоя ионосферы и, кроме того, не наблюдалось сдвигов частоты F принимавшихся сигналов с точностью до 10^{-3} гц.

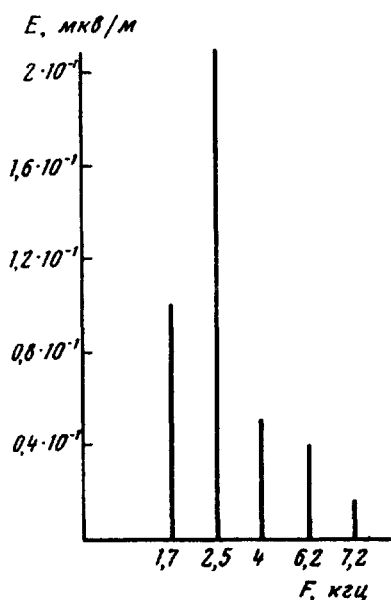


Рис. 2. Пример амплитудного спектра поля на комбинационных частотах в полуденные часы

Переходя к интерпретации результатов эксперимента подчеркнем, что появление сигналов комбинационных частот связана с процессами в нижней ионосфере. Об этом свидетельствует отсутствие сдвига частоты принимаемого сигнала, отсутствие какой-либо связи результатов измерений с критическими частотами f_c слоя ионосферы и характерный суточный ход напряженности поля на разностной частоте F .

Теоретическая оценка напряженности поля сигнала на частоте сводится к расчету нелинейного тока в D слое ионосферы, возбуждаемого полем мощного наземного радиопередатчика. Сравнение нелинейных токов, обусловленных нагревными и стрикционными эффектами, показывают, что нагревные токи в $(\omega + i\nu)/(\Omega + i\delta\nu)$ раз больше стрикционных (здесь $\Omega = 2\pi F$, $\omega = 2\pi f$, $\nu \sim 10^{-7}$ – частота соударений электронов, $\delta \sim 10^{-3}$ – относительная доля энергии, передаваемая электроном молекуле при одном соударении).

Плотность нелинейного тока, обусловленного тепловыми эффектами в однородной плазме ¹⁾ равна

$$J = \frac{i e \omega_e^2 (\Omega + 2i\nu) (i\vec{k} + \nu V_0 / V_{Te}^2) E_{\omega_1} E_{\omega_2}^*}{12\pi m (\Omega + i\nu) (\Omega + i\delta\nu) (\omega_1 + i\nu) (\omega_2 - i\nu)} e^{-i(\Omega t - \vec{k}\cdot\mathbf{v})}, \quad (1)$$

где $\vec{k} = \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2$ — разностный волновой вектор, $\Omega = \omega_1 - \omega_2$, ω_{oe} — ленгмюровская частота электронов, V_{Te} — тепловая скорость электронов, e и m — заряд и масса электронов, $V_0 = V_{oe} - V_{om}$ — разность между направленными скоростями электронов и молекул.

Первый член в числителе выражения для J связан с тепловым давлением электронов, второй с наличием регулярных движений электронной компоненты относительно молекул.

Грубая оценка, проведенная на базе уравнения (1), показывает, что даже при $V_0 = 0$ напряженность поля в приемном пункте в условиях эксперимента может составлять 10^{-2} мкв/м . В магнитовозмущенные дни, когда можно ожидать увеличения скорости V_0 , нелинейные токи могут определяться вторым членом уравнения (1) и напряженность поля будет возрастать.

Авторы выражают признательность Л.М.Ерухимову, А.Г.Литваку, В.А.Мионову и В.В.Тамойкину за полезную дискуссию.

Научно-исследовательский
радиофизический институт

Поступила в редакцию
3 июня 1974 г.
После переработки
15 июля 1974 г.

Литература

- [1] В.Л.Гинзбург, А.В.Гуревич. УФН, 70, 201, 393, 1960.
- [2] В.Л.Гинзбург. Распространение электромагнитных волн в плазме, М., изд. Наука, 1967.
- [3] Г.Г.Гетманцев, Г.П.Комраков, Ю.С.Коробков, Л.Ф.Мироненко, Н.А.Митяков, В.О.Рапопорт, В.Ю.Трахтенгерц, В.Л.Фролов, В.А.Череповицкий. Письма в ЖЭТФ, 18, 621, 1973.

¹⁾ В неоднородной плазме характерный градиент давления ∇NT может определяться не величиной κ , а масштабом неоднородного слоя L^{-1} .