

## Эффект межмодовой кроссмодуляции шумановских резонансов

Ю. М. Ямпольский, В. С. Белей, С. Б. Кашцев, Б. В. Лазебный, В. Е. Пазнухов, А. Г. Рохман

*Радиоастрономический институт Национальной Академии наук Украины  
Украина, 310002, Харьков, ул. Краснознамённая, 4*

*Статья поступила в редакцию 26 ноября 1997 г.*

В работе исследован эффект нелинейного взаимодействия сигналов СНЧ диапазона (4 - 40 Гц), возбуждаемых мировой грозовой активностью в шумановском резонаторе Земля-ионосфера. Разработан специальный алгоритм обнаружения слабых нелинейностей, основанный на формировании функции когерентности принимаемого сигнала с мультипликативной функцией отклика цифрового анализирующего устройства. Проведены долговременные наблюдения СНЧ шумов, в спектрах которых экспериментально обнаружены комбинационные линии на удвоенных, суммарных и разностных частотах первых трёх мод шумановского резонатора. Обсуждены возможные механизмы возникновения межмодовой кроссмодуляции за счёт природных нелинейных эффектов в атмосфере и нижней ионосфере.

В роботі досліджено ефект нелінійної взаємодії сигналів ННЧ діапазону (4 - 40 Гц), що збуджуються світовою грозовою активністю в шуманівському резонаторі Земля-іоносфера. Розроблено спеціальний алгоритм виявлення слабких нелінійностей, заснований на формуванні функції когерентності сигналу, що приймається з мультипликативною функцією відгуку цифрового аналізуючого пристрою. Проведено довготривалі спостереження ННЧ шумів, в спектрах яких експериментально виявлено комбінаційні лінії на подвоєних, сумарних та різницевих частотах перших трьох мод шуманівського резонатора. Обговорено можливі механізми виникнення міжмодової кроссмодуляції за рахунок природних нелінійних ефектів в атмосфері та нижній іоносфері.

### 1. Введение

Процесс распространения радиоволн в ионосфере в общем случае всегда вызывает нелинейное взаимодействие электромагнитного поля с плазмой, модифицируя её электродинамические свойства. Принципиальным для реального наблюдения таких эффектов является вопрос о чувствительности методов и устройств для их регистрации. В основе диагностики нелинейного взаимодействия волны с плазмой лежат два подхода. Первый основан на исследовании характеристик воздействующего поля (или совокупности полей), прошедшего через среду, другой предполагает диагностику самой среды распространения с помощью “независимых сенсоров” - пробных сигналов от других источников, собственного стимулированного излучения и т.д. Следует заметить, что пороговые уровни внешних полей для стимулирования нелинейных эффектов в ионосферной плазме весьма малы и для различных видов воздействий на разных высотах варьируются от  $10^{-5}$  до  $10^{-2}$  В/м [1]. Эти оценки, выполненные в конце 60-х - начале 70-х годов, послужили основанием для создания специальных мощных наземных радиопередающих систем для искусственного электромагнитного воздействия на ионосферу. Активная работа “нагревных” стенов в США, Совет-

ском Союзе (а позднее в России и Украине), Норвегии позволила исследовать ряд новых эффектов в околоземной плазме [2]. Очевидно, что проведение таких экспериментов весьма сложно как с технической, так и с экономической точек зрения. Кроме того, искусственное воздействие на околоземную плазму сталкивается с растущим протестом со стороны представителей экологических движений. В то же время, на наш взгляд, можно исследовать нелинейные взаимодействия природных волновых полей с ионосферой, не прибегая к активным экспериментам. Такой подход был реализован авторами в работе [3], в которой был обнаружен и интерпретирован эффект кроссмодуляции шумановских резонансов (ШР) с кругосветными КВ сигналами. Роль основного воздействующего на ионосферу фактора играло поле ясной погоды, “на плечах” которого происходило нелинейное взаимодействие СНЧ и КВ полей.

В настоящей работе предпринята попытка обнаружения нелинейных эффектов только в СНЧ диапазоне (4 - 40 Гц), формирующем спектр шумановского резонатора. При постановке исследований мы воспользовались следующими рассуждениями. Прохождение радиосигнала через нелинейное “устройство” (среду распространения) сопровождается появлением в его спектре комбинационных линий на частотах  $f_{ij}$ , представляющих

собой либо высшие гармоники исходных спектральных составляющих  $f_{ij} = j \cdot f_i$  ( $i, j$  - целые числа,  $f_i$  - спектральная компонента исходного сигнала), либо суммо-разностные комбинации частот, содержащихся в спектре входного воздействия  $f_{ij\pm} = f_i \pm f_j$ . Иными словами, нелинейное воздействие порождает спектральные составляющие на "новых" частотах. Отличительной особенностью "новых" комбинационных составляющих является их статистическая связь с компонентами исходного спектра на частотах  $f_i$  и  $f_j$ . Естественно, что интенсивность кратных гармоник основного спектра по отношению к комбинационным линиям на частотах  $f_{ij\pm}$  зависит от типа нелинейности и может содержать полезную информацию для построения физической модели взаимодействия сигнала со средой распространения. Очевидно также, что для СНЧ диапазона обычная нелинейность нагревного типа будет весьма мала в меру малости мощности шумановского сигнала  $\sim E_S^2$  по сравнению с мощностью плазменного поля  $\sim E_P^2$  на высотах нижней ионосферы. Оценки, сделанные нами в работе [3], показали, что в СНЧ диапазоне

$$\frac{E_S^2}{E_P^2} \approx 10^{-6}, \quad (1)$$

и прямой нагрев ионосферной плазмы полем шумановских резонансов не превышает  $10^{-4} \text{ К}$ . Поэтому для обнаружения весьма слабых комбинационных эффектов в этом диапазоне времена усреднения должны существенно превышать интервалы наблюдения самих шумановских максимумов.

Выбор этого диапазона для поиска эффектов природной нелинейности, несмотря на неутешительность оценки (1), обусловлен рядом обстоятельств. Во-первых, глобальный резонатор Земля - ионосфера всегда существует, во-вторых, он всегда возбуждается мировой грозовой активностью, в-третьих, параметры резонатора в среднем высоко стабильны, наконец, в-четвёртых, спектр резонансов носит многомодовый характер с априорно известными частотами максимумов  $F_1 \approx 7,8 \text{ Гц}$ ,  $F_2 \approx 14,0 \text{ Гц}$ ,  $F_3 \approx 20,0 \text{ Гц}$ ,  $F_4 \approx 26,1 \text{ Гц}$ ,  $F_5 \approx 31,8 \text{ Гц}$  [4]. К этому следует также добавить то обстоятельство, что в атмосфере и нижней ионосфере существуют достаточно сильные природные нелинейности, вызываемые сверхмощными грозowymi разрядами, которые могут играть роль

нелинейных преобразователей падающих электромагнитных волновых полей [5,6].

## 2. Методика измерений, энергетические спектры шумановских резонансов

Эксперименты по исследованию нелинейных эффектов в СНЧ диапазоне проводились в течение двух летних сезонов 1996 и 1997 годов в Радиоастрономическом институте НАН Украины на низкочастотной обсерватории РИ НАНУ в селе Мартова (50° N, 37° E). Измерительный комплекс представлял собой приёмно-усилительную систему, включающую электрическую антенну (Ант), антенный усилитель (АУ), фильтр верхних частот (ФВЧ), режекторный фильтр (РФ) для подавления сетевых гармоник, фильтр нижних частот (ФНЧ) и оконечный усилитель (ОУ). Антенной служил несимметричный электрический диполь с собственной ёмкостью  $C_a \approx 150 \text{ пФ}$ . Измерялась вертикальная электрическая компонента СНЧ сигналов. Уровень собственных шумов АУ не превышал  $10^{-6} \text{ В}\cdot\text{Гц}^{-1/2}$ , коэффициент усиления  $K_{АУ}=1$ , линейный динамический диапазон составлял 80 дБ. Основной особенностью приёмного тракта являлось формирование "прямоугольной" частотной характеристики в полосе первых 5-ти шумановских мод (4 - 40 Гц) и подавление узкополосной активной помехи на частоте первой гармоники питающего напряжения 50 Гц. Эти требования были выполнены с использованием активных Баттервортовских фильтров 8-го порядка с крутизной спадов АЧХ около 43 дБ на октаву. Все фильтры имели согласованный динамический диапазон порядка 80 дБ и идентичные коэффициенты передачи  $K_{Ф}\approx 1,3$ . Режекторный узкополосный фильтр осуществлял подавление первой гармоники питающего напряжения 50 Гц на уровне 70 дБ. Оконечный усилительный каскад позволял производить ступенчатое изменение коэффициента усиления до 66 дБ с шагом 6 дБ. Типичный уровень шумовых сигналов в единичной полосе, отождествляемых с шумановскими резонансами в месте приёма варьировался в пределах  $|E_z| \approx (2 \div 4) \cdot 10^{-4} \text{ В/м}$ , что совпадает с известными литературными данными [7]. С выхода ОУ принятый сигнал подавался на 12-разрядный АЦП, а затем на анализирующую ЭВМ. Темп оцифровки задавался равным  $F_S = 150 \text{ Гц}$ , что, с одной стороны, позволяло удовлетворить условию Котельникова для восстановления спектра во всей полосе анализа  $F_A = 75 \text{ Гц}$  ( $F_S \geq 2F_A$ ), с другой - уменьшить до минимума эффект паразитного цифрового гетеродинамирования "хвостов" спектра в полосу анализа.

На первом этапе обработка сигнала состояла в вычислении в реальном времени амплитудных спектров сигнала  $U(t)$ :

$$S(\omega) = \sqrt{\langle |S_i(\omega)|^2 \rangle}, \quad (2)$$

где  $S_i(\omega) = (2/T) \int_{t_i}^{t_i+T} U(t) \cdot e^{-j\omega t} dt$  - текущий спектр, косые скобки означают статистическое усреднение по  $N$  реализациям:

$$\langle |S_i(\omega)|^2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |S_i(\omega)|^2. \quad (3)$$

Здесь  $t_i = t_0 + (i-1) \cdot T$  ( $t_0$  - время начала измерений,  $T$  - длительность одной реализации,  $i = 1, 2, \dots, N$ ). В эксперименте  $T = 6,8$  с (число отсчетов  $2^{10}$ , частотное разрешение  $1/T \approx 0,145$  Гц). Как известно [4], оптимальное время усреднения для формирования стационарных ШР составляет  $(3 \div 6) \cdot 10^2$  с. Однако в спектрах, получаемых с такими временами накопления отсутствуют какие-либо признаки нелинейных преобразований исследуемых сигналов (подъемы спектральной плотности вблизи удвоенных частот максимумов ШР). Поэтому при исследовании спектров СНЧ сигналов мы использовали значительно большие времена усреднения ( $10^3$  единичных реализаций или около 2 часов накопления). На рис. 1 приведены типичные виды ШР для случая низкого уровня местных помех (рис. 1,а) и для сильно зашумленных условий (рис. 1,б). Шумовая обстановка в этом диапазоне для вертикальной компоненты электрического поля определяется рядом факторов, главные из которых - это ближние грозовые разряды, осадки и ветер. Такие шумовые помехи характеризуются широкополосностью, нарастанием интенсивности в низкочастотной части спектра, превышением уровня ШР в десятки и сотни раз. Типичным признаком появления этих шумов является кратковременное возрастание уровня сигнала с временными интервалами от 0,1 с до нескольких секунд. Для устранения маскирующего влияния таких помех в обработку был включён алгоритм порогового ограничения, суть которого состояла в исключении из усреднения интервалов наблюдений длительностью 6,8 с, в течение которых наблюдался хотя бы один выброс, превышающий средний уровень сигнала на 20 дБ.

В общей сложности за два измерительных цикла (июль 1996 г., июль-август 1997 г.) было проведено свыше 100 часов непрерывных наблюдений ШР. Рассчитывались средние амплитудные спек-

тры на интервалах от 2 до 4 часов. Но и для таких сеансов не было обнаружено заметного роста спектральной плотности в окрестности удвоенной частоты первого ШР  $2f_1 = (15,6 \pm 0,5)$  Гц и в диапазонах комбинационных частот  $f_{12-} = (6,2 \pm 0,5)$  Гц и  $f_{12+} = (21,8 \pm 0,5)$  Гц.

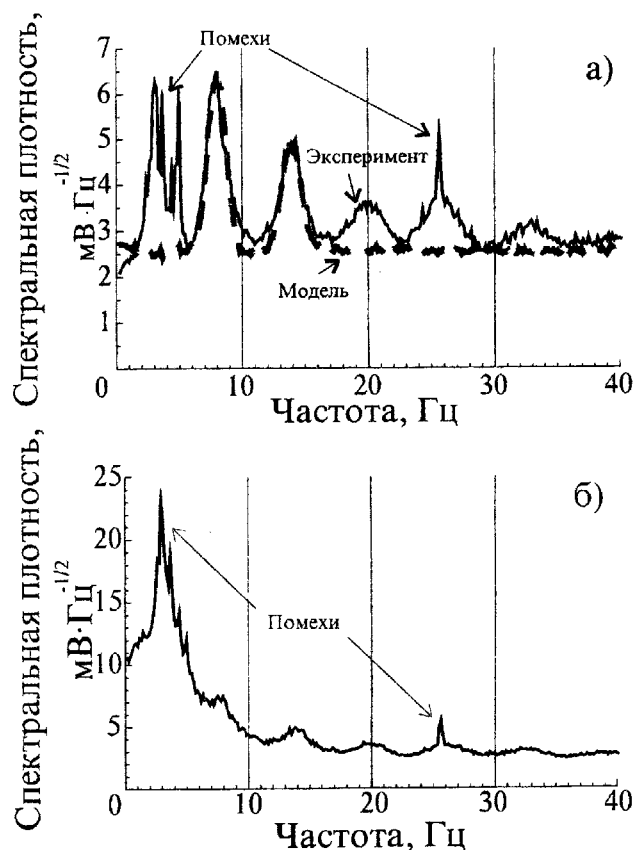


Рис. 1. Амплитудные спектры шумановских резонансов для случая низкого (а) и высокого (б) уровня местных помех

### 3. Мультипликативный алгоритм обработки ШР

Для поиска комбинационных линий в спектрах шумановских резонансов был разработан специальный мультипликативный алгоритм цифровой обработки, суть которого состояла в следующем. Предположим, что в исходном сигнале  $U(t)$  наряду с узкополосными составляющими вблизи частот  $f_1$  и  $f_2$  присутствуют их комбинационные гармоники  $f_{12+} = f_2 + f_1$  и  $f_{12-} = f_2 - f_1$ . Применяя цифровую фильтрацию, выделим исходные узкополосные компоненты

$$U_1(t) = A_1 \cdot \cos(2\pi f_1 t - \varphi_1) \text{ и}$$

$$U_2(t) = A_2 \cdot \cos(2\pi f_2 t - \varphi_2)$$

и перемножим их:  $U_{12}(t) = U_1(t) \cdot U_2(t)$ . Очевидно, что в таком синтезированном сигнале будут присутствовать комбинационные гармоники, когерентные с имеющимися в исходном широкополосном сигнале и, как предполагается, порождённые естественными нелинейными физическими процессами. Тогда, если вычислить функцию когерентности сигналов  $U(t)$  и  $U_{12}(t)$ , то на комбинационных частотах  $f_{12+}$  и  $f_{12-}$  она будет отличаться от нуля.

Запишем последовательность действий, производимых в ходе анализа СНЧ излучения с помощью предложенного алгоритма. На первом этапе вычислим комплексный спектр принятого сигнала  $S(f) = F\{U(t)\}$ , где символом  $F\{\}$  будем обозначать прямое, а  $F^{-1}\{\}$  - обратное преобразование Фурье ( $U(t) = F^{-1}\{S(f)\}$ ). Для выделения сигналов  $U_i(t)$  ( $i=1,2$ ) применим прямоугольные в частотной области полосовые фильтры с шириной полосы пропускания  $2\Delta f$ :

$$\prod(f)_i = \begin{cases} 0, & f < f_i - \Delta f, \\ 1, & f_i - \Delta f \leq f \leq f_i + \Delta f, \\ 0, & f > f_i + \Delta f. \end{cases} \quad (4)$$

Тогда на выходах фильтров  $U_i(t) = F^{-1}\{S(f) \cdot \prod(f)_i\}$ .

Далее вычислим комплексный спектр произведения этих сигналов  $S_{12}(f) = F\{U_1(t) \cdot U_2(t)\}$ . Выходным продуктом алгоритма, как уже отмечалось, является функция когерентности  $\Gamma(f)$ , получаемая в ходе усреднения взаимного спектра сигналов  $U(t)$  и  $U_{12}(t)$  и нормировки на их энергетические спектры, т.е.

$$\Gamma(f) = \frac{\langle S(f) \cdot S_{12}^*(f) \rangle}{\sqrt{\langle |S(f)|^2 \rangle \cdot \langle |S_{12}(f)|^2 \rangle}}, \quad (5)$$

где угловыми скобками обозначен оператор усреднения, а звездочкой - комплексное сопряжение. Заметим, что описанный алгоритм можно рассматривать как специфический частный случай метода биспектрального анализа [8].

Перейдём к описанию результатов обработки экспериментальных данных. Остановимся на двух случаях, принципиально отличающихся с точки зрения помеховой обстановки. Вначале обратимся к "спокойному" участку записи, практически не содержащему нестационарных помех (рис. 1,а). На рисунке отчётливо видны как шумановские

резонансы (до пятого мода включительно), так и спектральные максимумы, возникающие из-за помех в сети и низкочастотных "ветровых" помех. График на рис. 2,а иллюстрирует наличие когерентной составляющей на удвоенной частоте (16 Гц) первого мода резонансов (в этом случае оба цифровых фильтра (4) были настроены на частоту 8 Гц с полушириной  $\Delta f = 1$  Гц). Уровень функции когерентности порядка 0,25 существенно превышает "фоновый" (около 0,1). Аналогичные результаты были получены также при настройке цифровых фильтров на максимумы модов с отличающимися номерами. Рис. 2,б и рис. 3 иллюстрируют наличие максимумов функции когерентности вблизи комбинационных частот  $f_{12-} = 6$  Гц и  $f_{12+} = 22$  Гц (рис. 2,б),  $f_{13-} = 12$  Гц и  $f_{13+} = 28$  Гц (рис. 3,а) и  $f_{23-} = 6$  Гц и  $f_{23+} = 34$  Гц (рис. 3,б), т.е. нелинейное взаимодействие между различными модами шумановских резонансов.

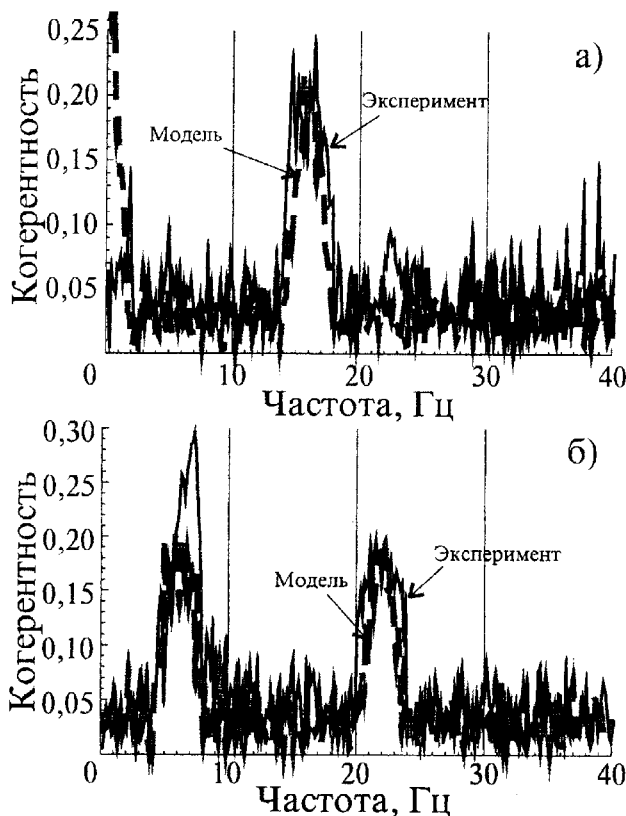


Рис. 2. Когерентность второй гармоники первого (а) и первого и второго (б) модов шумановских резонансов

Далее отметим, что уровень когерентности значительно понижается (вплоть до "фоновой" значения) в случае ухудшения помеховой обстановки. Для примера на рис. 1,б показан амплитудный спектр, измеренный ночью 1 августа при повышенном уровне помех. Видно, что в данном случае относительно слабые максимумы резонансов проявляются на мощном пьедестале ветровых

помех (особенно это касается 1-го мода вблизи 8 Гц). Этим, по-видимому, можно объяснить предельно слабый уровень когерентности 2-й гармоники (вблизи 16 Гц) первого мода шумановских резонансов (см. рис. 4,а). Несколько лучше на рис. 1,б просматриваются 2-й и 3-й максимумы (около 14 и 20 Гц). Видимо поэтому когерентность вблизи их комбинационных частот (6 и 34 Гц) имеет, хотя и неярко выраженные, максимумы (рис. 4,б).

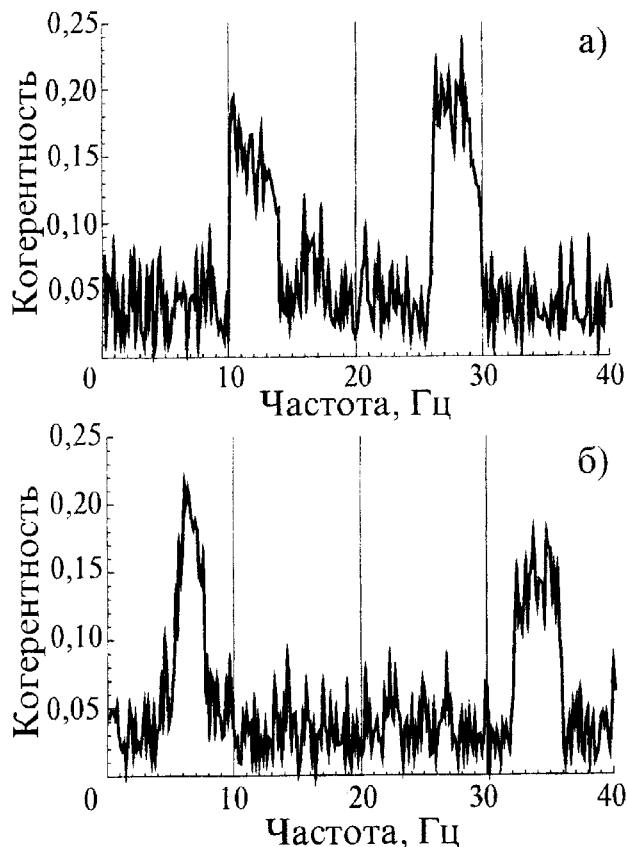


Рис. 3. Когерентность первого и третьего (а) и второго и третьего (б) модов шумановских резонансов

Результаты, подобные приведенным на рисунках 2 - 3, были получены для подавляющего большинства сеансов наблюдений для дневных и ночных условий, что свидетельствует о существовании эффекта нелинейного межмодового взаимодействия. После его обнаружения были дополнительно проведены тщательные проверки приёмно-измерительного комплекса, системы регистрации и алгоритма обработки. Сразу отметим, что ни в одном из контрольных экспериментов не было обнаружено повышения уровня когерентности в диапазонах комбинационных гармоник в отсутствие реального сигнала ШР. Линейный динамический диапазон всей установки определялся 12-ти разрядным АЦП и был не менее 72 дБ. Мы не будем приводить результатов всех испытаний, ограничимся лишь описанием ключевого экспе-

римента, наиболее приближённого к реальным условиям наблюдений. Суть его состояла в излучении вблизи приёмной антенны контрольного сигнала, представлявшего собой суперпозицию двух синусоидальных компонент на частотах  $f_1$  и  $f_2$ , генерируемых независимыми источниками. Схема синтеза контрольных сигналов позволяла смешивать их в двух вариантах: линейно - через активное сопротивление, и нелинейно - через диод с известной вольт-амперной характеристикой. Коэффициент нелинейного преобразования регулировался с помощью реостатного делителя. Уровни контрольных синусоид подбирались такими, чтобы на входе приёмной антенны они создавали напряжённости поля, соизмеримые с уровнем природного поля вблизи первого максимума ШР. Частоты настройки генераторов задавались равными  $f_1 = 11,7$  Гц и  $f_2 = 17$  Гц, т.е. располагались в области минимумов шумановского поля. Кроме того, контрольные измерения проводились в условиях, наименее благоприятных для

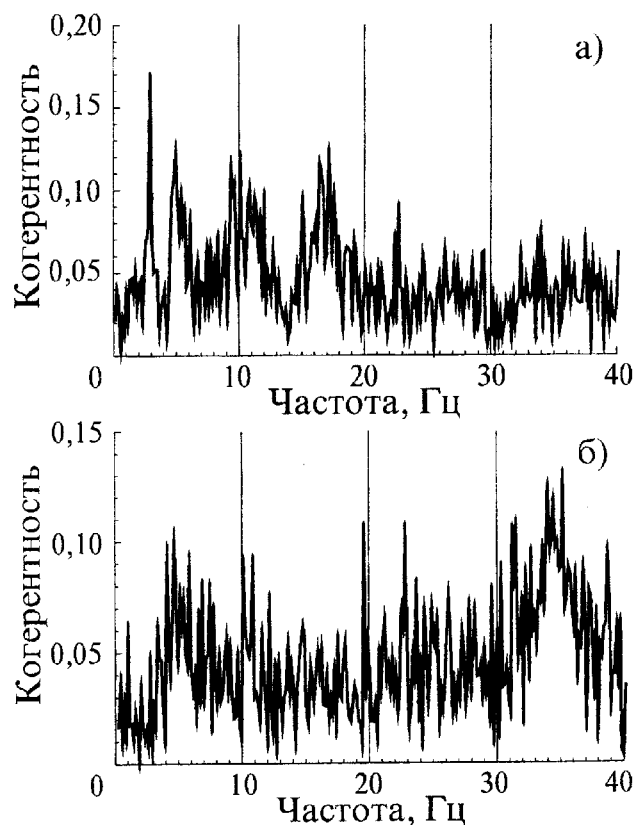


Рис. 4. Когерентность второй гармоники первого (а) и второго и третьего (б) модов шумановских резонансов при повышенном уровне шумов

обнаружения ШР (случай сильных помех), чтобы минимизировать возможное возрастание уровня когерентности за счёт естественных нелинейных эффектов в резонаторе Земля-ионосфера. Как и

следовало ожидать, при линейном суммировании контрольных сигналов в выходных спектрах приёмника и в функции когерентности на уровнях порядка 72 дБ комбинационных частот  $f_{12\pm}$  обнаружено не было. Это в очередной раз подтвердило линейность приёмного и обрабатывающего устройств. При частичном нелинейном смещении сигналов возрастание функции когерентности в областях  $f_{12\pm}$  было зарегистрировано значительно раньше, чем в амплитудных спектрах. Функция когерентности в сильно “зашумленных” условиях оказалась, как минимум, на 20 дБ чувствительнее, чем амплитудные спектры для обнаружения слабых нелинейностей.

Таким образом, проведенные проверки измерительного комплекса и мультипликативного алгоритма обнаружения подтвердили наличие природной межмодовой кроссмодуляции ШР.

#### 4. Обсуждение результатов

В настоящий момент авторы не могут построить строгую физическую модель, которая позволила бы интерпретировать обнаруженный экспериментальный факт нелинейного преобразования поля в резонаторе Земля-ионосфера в терминах его электродинамических характеристик. Тем не менее, можно уверенно сделать ряд выводов. Например, нами оценивалась доля энергии шумановских полей, которая преобразовывалась в высшие и комбинационные гармоники ШР под действием пока неизвестного природного механизма. С этой целью проводился следующий модельный эксперимент. Предполагалось, что нелинейное преобразование носит квадратичный характер и на ЭВМ численно синтезировался модельный входной сигнал вида

$$U(t) = N(t) + u(t) + K \cdot u^2(t), \quad (6)$$

где  $N(t)$  - “белый” шум, равномерно распределённый в полосе приёма с нулевым средним и дисперсией  $\sigma_N^2$ ,  $u(t)$  - суперпозиция двух узкополосных компонент с гауссовыми энергетическими спектрами вида

$$S_{1,2}^2(f) = A_{1,2}^2 \cdot e^{-2\left(\frac{f-f_{1,2}}{2\Delta f_{1,2}}\right)^2}. \quad (7)$$

Коэффициент  $K$  характеризовал “крутизну” нелинейного преобразования. Функция  $N(t)$  моделировала реальный шумовой сигнал в точке приёма, не связанный с ШР. Его уровень определялся из экспериментальных амплитудных спектров в минимумах спектров ШР и выше по частоте

те 5-го резонансного мода ( $f > 35$  Гц). Как видно, например, из рис. 1,а, уровень спектральной плотности в минимумах остаётся постоянным и может быть с точностью до 10 % оценён в  $2,6 \text{ мВ} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ .

Спектральные компоненты  $S_1$  и  $S_2$  моделировали два первых мода ШР с центральными частотами  $f_1 = 8$  Гц,  $f_2 = 14$  Гц и соответствующими полосами  $\Delta f_1 = 0,63$  Гц и  $\Delta f_2 = 0,69$  Гц. Определение характеристик этих модельных сигналов проводилось путём численного “вписывания” гауссоид  $S_1$  и  $S_2$  в реально полученную спектральную зависимость ШР. Таким образом был создан модельный сигнал “похожий” на ШР (пунктир на рис. 1,а). Коэффициент  $K$  варьировался до тех пор, пока функция когерентности (5) для модельного сигнала не принимала численного значения, примерно равного наблюдаемому в эксперименте (пунктирные кривые на рис. 2). Оказалось, что в такой модели коэффициент нелинейного преобразования с точностью до 10 % не меняется для возбуждения вторых гармоник первых двух модов ШР и их комбинаций  $f_{12\pm}$ :

$$K \approx 2,4 \cdot 10^{-1} \text{ мВ}^{-1}. \quad (8)$$

Проводя его калибровку по спектральной плотности реально наблюдаемых и модельных спектров, можно оценить, какая доля запасённой в резонаторе энергии трансформируется в результате квадратичного нелинейного преобразования. Оказалось, что около 0,5 % мощности сигналов ШР преобразуется в высшие и комбинационные гармоники.

На наш взгляд, существует две альтернативные гипотетические модели, поясняющие обнаруженный эффект.

Первая может заключаться в глобальном нелинейном отклике верхней границы резонатора - ионосферы на распределённое поле ШР. Хотя, как было отмечено в начале статьи, эффект прямого нагрева ионосферы полем ШР весьма слаб (1), можно допустить, что и в этом случае роль “подогревающего” поля, как и в [3], играет поле ясной погоды  $E_0$ , создающее на ионосферных высотах слабо нелинейную “вольт-амперную” характеристику, с которой взаимодействует поле ШР. Очевидны трудности такой интерпретации, поскольку мы имеем дело с системой с распределёнными, а не сосредоточенными характеристиками.

Другая гипотеза состоит в возможности “локального” нелинейного преобразователя. Предположим, что в резонаторе расположена ограниченная область пространства с нелинейными электродинамическими характеристиками в низ-

кочастотном диапазоне, например, очаг грозовой активности. В такой зоне могут существовать сильно нелинейные проводимости как в атмосферном промежутке, так и на высотах нижней ионосферы [6]. Эта область может играть роль "квадратичного" переизлучателя шумановского поля. Интенсивные спорадические нелинейности могут существовать в полярных областях, а также в сейсмоактивных регионах.

### 5. Выводы

Сформулируем основные результаты работы.

1) Экспериментально обнаружен эффект межмодовой кроссмодуляции сигналов шумановского резонатора Земля - ионосфера.

2) Разработан специальный мультипликативный алгоритм обработки сигналов для обнаружения слабых нелинейностей, основанный на вычислении функции когерентности исследуемого сигнала с синтезированным нелинейно.

3) В рамках квадратичной модели нелинейности получена оценка преобразования энергии ШР в высшие и комбинационные гармоники. Приблизительно 0,5% мощности природных низкочастотных резонансов трансформируется нелинейным образом.

4) Предложены две гипотезы "глобальной" и "локальной" нелинейностей в атмосфере и нижней ионосфере, поясняющие обнаруженный эффект.

5) Необходима разработка строгой физической модели обнаруженного явления.

Авторы считают приятным долгом поблагодарить своего учителя проф. П.В. Блюха за плодотворные дискуссии и полезные замечания, а также В.Г. Галушко за помощь в анализе особенностей мультипликативного алгоритма обработки.

### Литература

1. А.В. Гуревич, А.Б. Шварцбург. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. Москва, Наука, 1973.

2. P. Stubbe. The Ionosphere as Plasma Laboratory. In: Modern Ionospheric Science. European Geophys. Society, Berlin, 1996, pp. 274 - 345.

3. Y. Yampolski, P. Bliokh, V. Beley, V. Galushko, and S. Kascheev. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 1997, 59, No. 3, pp. 335 - 342.

4. П.В. Блюх, А.П. Николаенко, Ю.Ф. Филиппов. Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля-ионосфера. Киев, Наукова думка, 1977.

5. A.P. Nikolaenko, and M. Hayakawa. Geophysical Research Letters. 1995, 22, No. 22, pp. 3015 - 3018.

6. Y.N. Taranenko, U.S. Inan, and T.F. Bell. Geophysical Research Letters. 1993, No. 20, p. 1539.

7. M.J. Rycroft. England Radio Sciences. 1965, 69D, 8, p. 1071.

8. A.W. Wernik. In: Modern Ionospheric Science. Edited by H. Kohl, R. Ruster, and K. Schlegel. European Geophysical Society, Katlenburg-Lindau, FRG 1996.

### Cross Modulation Effect of Schumann Resonances

Yu. M. Yampolski, V. S. Beley, S. B. Kascheev, B. V. Lazebny, V. E. Paznukhov, and A. G. Rokhman

Effect of non-linear interaction of the ELF band (4 to 40 Hz) signals, excited by world lightning activity in the Earth - ionosphere cavity is investigated in the paper. A specific algorithm for weak non-linearity detection, based on calculation of coherence function between received signal and multiplicative response function of digital analyzing device, has been developed. Long term observations of the ELF signals were carried out. In the signals spectra combination lines at doubled, summed and differential frequencies of the first three modes of Schumann resonances were detected. Possible mechanisms of the cross modulation due to natural non-linear effects in the atmosphere and lower ionosphere are discussed.