

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЯВЛЕНИЯ СИГНАЛОВ С КРАТНЫМИ ЧАСТОТАМИ ПРИ КНЧ-МОДУЛЯЦИИ ВЧ-СИГНАЛОВ

А.А. Колмаков

## THE RESEARCH OF OCCURRENCE OF SIGNALS WITH MULTIPLE FREQUENCIES BY ELF MODULATION OF HF SIGNALS

A.A. Kolmakov

В рамках исследования явления КНЧ-модуляции ВЧ-сигналов рассмотрено возникновение при ионосферном распространении ВЧ-сигналов модулирующих КНЧ-сигналов с кратными частотами. Проведена оценка влияния нелинейности нагревного типа на возникновение кратных гармоник у модулирующих КНЧ-сигналов. В работе проводится сравнение результатов математического моделирования с экспериментальными данными. Установлено, что суточный ход коэффициента нелинейных искажений качественно меняется в зависимости от угла падения радиоволны на плазму. Показано, что рассчитанный суточный ход обладает рядом серьезных отличий от экспериментальных данных.

Within the framework of research of the phenomenon ELF modulation of HF signals occurrence is considered by ionospheric propagation of HF signals of modulating ELF signals with multiple frequencies. The estimation of influence of heating-nonlinearity on occurrence of multiple harmonics at modulating ELF signals is carried out. In work to be carried out comparison of results of mathematical modeling with the experimental data. It is established, that the daily course of factor of nonlinear distortions qualitatively varies depending on the angle of falling of a radio waves on plasma. It is shown, that the designed daily course possesses a line of serious differences from experimental data.

### Введение

При проведении экспериментальных исследований было установлено, что при ионосферном распространении ВЧ-сигналов различных радиовещательных станций в ряде случаев в огибающих этих сигналов появляются четко выраженные составляющие КНЧ-диапазона [1]. Это явление было названо КНЧ-модуляцией ВЧ-сигналов. Характерным типом модулирующих сигналов являются сигналы с кратными частотами (СКЧ). Спектральная структура сигнала  $s(\omega)$  и основные используемые обозначения представлены на рис. 1.

Несмотря на то, что международными нормативными актами запрещено излучение радиовещательными ВЧ-станциями сигналов, содержащих в спектре составляющие КНЧ-диапазона, полностью исключить эту возможность, по-видимому, нельзя. Известно, что мощная радиоволна, проходя сквозь ионосферную плазму, будет претерпевать самовоздействие. В частности, у модулированной волны будут изменяться амплитуда и фаза модулирующих

гармоник, будут появляться сигналы с частотами кратными основной модулирующей частоте.

### Постановка и решение задачи

Будем полагать, что плоская гармоническая волна с электрическим вектором, перпендикулярным к плоскости падения, приходит на границу плазмы из области свободного пространства (угол падения волны –  $\theta_0$ ). Чтобы определить характеристики сигнала, прошедшего сквозь плазму, с учетом нелинейных эффектов необходимо решить волновое уравнение (1). Диэлектрическая проницаемость плазмы изменяется в пространстве, а также в нашем случае зависит не только от частоты сигнала, но и от его амплитуды.

$$\Delta \vec{E} - \text{grad div} \vec{E} + \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon'(\omega, \vec{r}, E_0(\vec{r})) \vec{E} = 0, \quad (1)$$

где  $\vec{E}$  – вектор напряженности электрической компоненты электромагнитного поля,  $\omega$  – круговая частота ВЧ-поля,  $\epsilon'$  – комплексная диэлектрическая проницаемость плазмы,  $E_0$  – модуль вектора напряженности поля,  $\vec{r}$  – радиус-вектор.

Для решения нелинейного уравнения (1) будем использовать ряд упрощающих предположений:

- будем считать плазму плоскослойной с медленно меняющимися свойствами, так чтобы была обеспечена применимость приближения геометрической оптики

$$\frac{\lambda}{4\pi} \frac{d\epsilon'}{dz} (\epsilon')^{-3/2} \ll 1;$$

- до нижней границы ионосферы волна распространяется в свободном пространстве ( $\epsilon = 1$ );
- невозмущенная температура электронов равна температуре нейтральных частиц.

Решение будем искать в декартовой прямоугольной системе координат (рис. 2). Ось  $z$  совпадает с нормалью к слою.

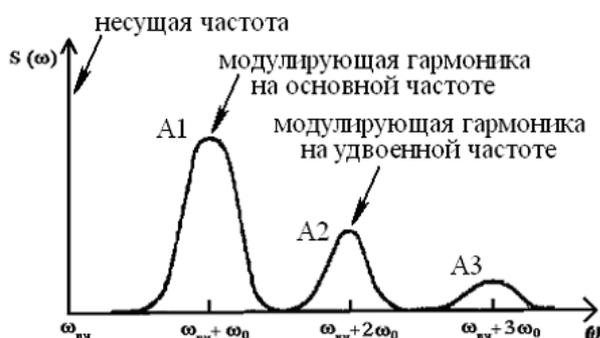


Рис. 1. Модуляция ВЧ-сигнала КНЧ-сигналами с кратными частотами. *Примечание.* ВЧ-сигнал с несущей частотой  $\omega_{вч}$ . Модулирующие гармоники, присутствующие в огибающей ВЧ-сигнала: гармоника на основной частоте модуляции –  $\omega_0$  ( $A_1$  – амплитуда гармоники на основной частоте), гармоники с частотами  $2\omega_0$ ,  $3\omega_0$  ( $A_2$  – амплитуда гармоники сигнала на удвоенной основной частоте,  $A_3$  – амплитуда гармоники сигнала на утроенной основной частоте).

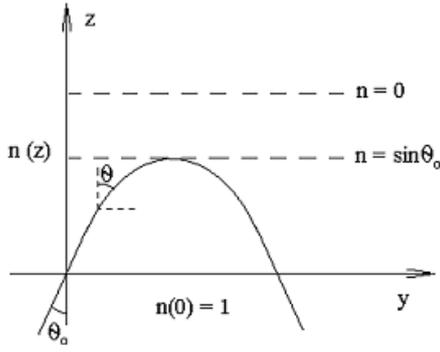


Рис. 2. Наклонное падение волны на слой.

Вектор поляризации ВЧ-радиоволны полагаем ортогональным плоскости распространения. Решение волнового нелинейного уравнения (1) с граничным условием (2) будем искать методом малых возмущений в приближении геометрической оптики. Решение уравнения (1) будет описывать напряженность поля в глубине плазмы.

Поле на границе плазмы представляется в виде

$$E|_{z=0} = E_0 [1 + \mu_0 \cos \Omega t] e^{-i \frac{\omega}{c} (\sin \theta_0 y + \cos \theta_0 z)} \quad (2)$$

Здесь  $\theta_0$  – угол падения волны,  $\mu_0$  – глубина модуляции,  $\Omega$  – модулирующая частота.

Коэффициенты модуляции  $\mu_{2\Omega}$ ,  $\mu_{3\Omega}$  на частотах  $2\Omega$  и  $3\Omega$  соответственно, появляющиеся в результате самовоздействия волны:

$$\mu_{2\Omega} = \frac{3}{2} \mu_0^2 q \delta_0 v_{e0} \sqrt{\frac{\delta_0^2 v_{e0}^2 + \frac{25}{9} \Omega^2}{(\delta_0^2 v_{e0}^2 + \Omega^2)(\delta_0^2 v_{e0}^2 + 4\Omega^2)}}, \quad (3)$$

$$\mu_{3\Omega} = \frac{\mu_0^3 q}{4} \frac{\delta_0 v_{e0}}{\sqrt{(\delta_0^2 v_{e0}^2 + 4\Omega^2)}}. \quad (4)$$

Здесь  $v_{e0}$  – невозмущенная (при отсутствии нагрева) эффективная частота соударений электронов,  $\delta_0$  – средняя доля теряемой электроном энергии при одном соударении. Величина  $q$  будет определять эффективность взаимодействия волны с плазмой (для случая ВЧ-волн, когда  $v_{e0} \ll \omega$ ):

$$q = \left[ \frac{E_0}{E_p} \right]^2 \frac{1}{n_0 \cos \theta} \left[ \frac{T_{e0}}{2v_{e0}} \left( \frac{dv_e}{dT_e} \right)_{T_{e0}} + \frac{\gamma_1}{2} \right] \times \left( 1 - e^{-\frac{\omega}{c} \int_0^{z_0} \chi_0(z) \sec \theta(z) dz} \right), \quad (5)$$

где  $E_p$  – плазменное поле [2],  $\gamma_1$  – коэффициент сдвига ионизационного равновесия (коэффициент пропорциональности между изменением концентрации и изменением температуры),  $T_{e0}$  – невозмущенная температура электронов,  $T_e$  – температура электронов в поле волны,  $n_0$  – коэффициент преломления,  $\chi_0$  – коэффициент поглощения.

При  $\theta = 0$  – имеем случай, полностью совпадающий с нормальным падением волны на слой [2], что свидетельствует о непротиворечивости полученного решения известному. Следует отметить, что данная

модель имеет ограниченное применение. Вблизи точки отражения волны ( $\theta = \pi/2$ ) данная модель оказывается неприменимой в силу того, что в выражении (5) возникает неопределенность типа (0/0).

Необходимые параметры плазмы (электронная концентрация, температура электронов, эффективные частоты соударений электронов) для рассматриваемого момента времени определялись из моделей IRI и MSIS 90 с учетом гелиогеофизической обстановки.

Первоначально в расчетах определялась траектория распространения радиоволны с учетом преломления. Затем определялось воздействие радиоволны на плазму – вычислялся нагрев электронов в поле волны вдоль пути распространения. На следующем этапе рассчитывалось изменение эффективной частоты соударений электронов в плазме, возникающее в результате нагрева. В заключение определялась величина нелинейных искажений, вносимых в сигнал.

Учитывая, что максимальные нелинейные искажения возникают на первом скачке при входе волны в плазму, для 1995 г. в рамках указанного приближения были определены значения  $q$  для различных радиостанций [1]. При увеличении угла падения наблюдается возрастание коэффициента нелинейных искажений  $q$ , характерное для любого времени суток. Для передающей станции, находящейся в Лондоне, с несущей частотой  $f = 15070$  кГц результат расчета представлен на рис. 3. В среднем за сутки с увеличением угла падения имеет место рост величины  $q$ , связанный с тем, что волна распространяется в области пространства, где нагрев плазмы осуществляется наиболее эффективно. В частности, для угла падения  $\theta_0 = 75^\circ$  и  $f = 6105$  кГц (Мюнхен) сравнение расчетных значений и экспериментальных данных приведено на рис. 4.

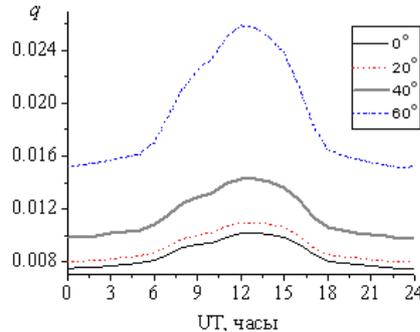


Рис. 3. Среднесуточный ход для 1995 г. величины нелинейных искажений для различных углов падения радиоволны на слой (радиостанция в Лондоне).

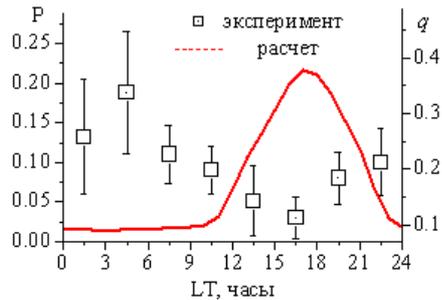


Рис. 4. Суточный ход вероятности появления СКЧ P (эксперимент), то же для величины нелинейных искажений  $q$  (расчет).

Проведенная оценка влияния нелинейности нагревного типа на возникновение кратных гармоник в модулирующих КНЧ-сигналах позволила установить, что наблюдаемая картина качественно не меняется в зависимости от угла падения радиоволны на плазму, но происходит увеличение коэффициента нелинейных искажений, обусловленное тем, что волна распространяется в области пространства, где нагрев плазмы осуществляется наиболее эффективно. Рассчитанный суточный ход обладает рядом серьезных отличий от суточного хода вероятности появления СКЧ, полученного при проведении измерений. Это, в свою очередь, опровергает принятые предположения и является косвенным доказательством того, что в спектре излученного ВЧ-сигнала КНЧ-гармоники отсутствуют.

#### **Заключение**

Полученное решение нелинейного волнового уравнения позволило провести оценку влияния нелинейности нагревного типа на возникновение кратных гармоник в модулирующих КНЧ-сигналах. Установлено, что наблюдаемая картина качественно не меняется в зависимости от угла падения радиоволны на плазму, но происходит увеличение коэф-

фициента нелинейных искажений, обусловленное тем, что волна распространяется в области пространства, где нагрев плазмы осуществляется наиболее эффективно.

Рассчитанный суточный ход обладает рядом серьезных отличий от суточного хода вероятности появления СКЧ, полученного при проведении экспериментальных исследований. Это, в свою очередь, опровергает принятые предположения и является косвенным доказательством того, что в спектре излученного ВЧ-сигнала КНЧ-гармоники отсутствуют.

#### *СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*

1. Колесник А.Г., Колесник С.А., Колмаков А.А., Шинкевич Б.М. Анализ данных многолетнего мониторинга электромагнитных полей // Изв. вузов Физика. 2000. № 1. С. 96–98.
2. Гуревич А.В., Шварцбург А.Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 1973. 272 с.

*Сибирский физико-технический институт при Томском государственном университете, Томск*