

УДК 550.388.2

**ЗАТУХАНИЕ ВЧ РАДИОВОЛН ВБЛИЗИ МПЧ**

П.Ф. Денисенко, Г.И. Кулешов, А.И. Сказик

Изложена новая методика оценки затухания ВЧ волн в отклоняющей области по наблюдениям поля вблизи границы мертвой зоны. По измерениям на трассе Москва – Ростов (рабочая частота 9.996 МГц) подтверждено наличие дополнительных потерь, вызванных рассеянием на неоднородностях, и существование дополнительного усиления поля, не связанного с фокусировкой на границе мертвой зоны.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ИОНОСФЕРА, ВЧ ВОЛНЫ, МПЧ, ЗАТУХАНИЕ.

**ВВЕДЕНИЕ**

Наблюдения поля ВЧ передатчиков показывают, что при прохождении границы мертвой зоны (ГМЗ) через пункт приема регистрируются картины, представленные на рис. 1 и 2. Эти картины отражают интерференцию верхних и нижних лучей необыкновенной (х) поляризации. На рис.1 представлен случай, когда ГМЗ удаляется от передатчика, а на рис. 2 – приближается к передатчику. В работе [1] предложен простой и изящный способ использования интерференционных структур для оценки эквивалентной частоты соударений электронов  $V_e$  в области F ионосферы в утреннее и вечернее время, когда слои D и E выражены слабо. Эта идея была обоснована и подтверждена экспериментально на трассе Москва – Харьков, протяжённостью 640 км [1].

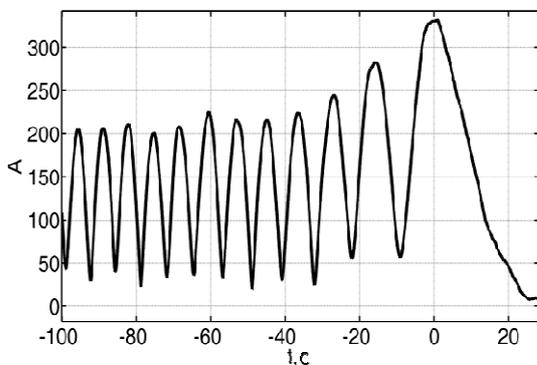


Рис. 1. Пример наблюдения на частоте  $f=9.996$  МГц интерференционной картины х-волн на трассе Москва-Ростов протяжённостью 950 км в вечернее время, LMT 18:59, 30.09.2004.

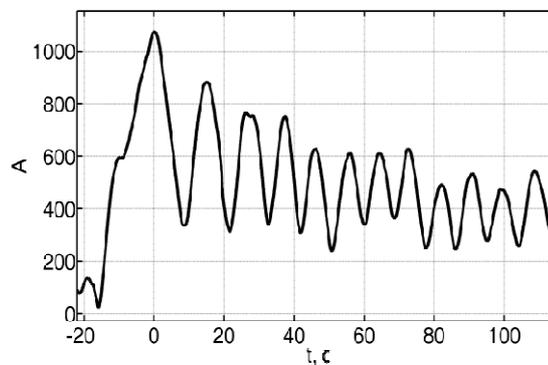


Рис. 2. Пример наблюдения на частоте  $f=9.996$  МГц интерференционной картины х-волн на трассе Москва-Ростов протяжённостью 950 км в утреннее время, LMT 10:29, 07.10.2005.

Первоначально при анализе интерференционной картины ионосфера принималась плоской, магнитным полем пренебрегалось. При выполнении условия  $v_e/\omega \ll 1$  поглощение  $L$  представляется в виде:

$$L = \frac{\bar{v}_e}{2c} (P_g - P), \quad (1)$$

где  $\omega$  – циклическая частота волны,  $\bar{v}_e$  – некоторое среднее по высоте значение частоты соударений,  $c$  – скорость света,  $P_g$ ,  $P$  – групповой и фазовый пути сигнала.

Методика определения затухания вблизи ГМЗ базируется на оценке эквивалентной частоты соударений электронов  $\bar{v}_e$ , отражающей все возможные энергетические потери в терминах обычного столкновительного поглощения. Начиная со второго максимума применимо прибли-

жение геометрической оптики [2]. В этом случае амплитуды верхнего ( $u$ ) и нижнего ( $d$ ) лучей, порождающих интерференционную картину на ГМЗ, могут быть представлены следующим образом:

$$A_{u,d} = \frac{C}{r_{eff}} \exp[-L(\Delta_{u,d})], \quad r_{eff} = \sqrt{\tan(\Delta)D(\Delta)|dD/d\Delta|}, \quad (2)$$

где  $C$  – постоянная, характеризующая излучатель,  $D$  – расстояние между приемником и передатчиком,  $\Delta_{u,d}$  – углы прихода (скольжения) соответственно верхнего и нижнего лучей. Параметр  $r_{eff}$  учитывает пространственное ослабление поля точечного источника [2]. Для плоской ионосферы и восходно–заходных периодов, когда в областях  $D$  и  $E$  электронная концентрация мала, высотный  $N(h)$ –профиль в области  $F$  принимался параболическим [1]. Величины  $D(\Delta)$ ,  $L(\Delta)$  находились аналитически и использовались в дальнейших расчетах.

Для определения  $\bar{v}_E$  по экспериментальным данным использовались безразмерные величины:

$$M_i = (A_{max,i} - A_{min,i}) / (A_{max,i} + A_{min,i}), \quad (3)$$

где  $A_{max,i}$ ,  $A_{min,i}$  – значения  $i$ -го максимума и минимума огибающей результирующего сигнала, начиная со второго. Для этого временной интерференционной структуре ставилась в соответствие пространственная структура поля. Учитывая, что  $A_{min,i}$  и  $A_{max,i}$  получаются в результате синфазного и противофазного сложения поля верхнего и нижнего лучей, находились расстояния, соответствующие этим условиям. Для каждого из них рассчитывались амплитуды (2) и путем вариаций  $\bar{v}_E$  теоретические значения отношений (3) подгонялись к экспериментальным. Окончательная оценка  $\bar{v}_E$  находилась усреднением примерно по 10-ти индивидуальным значениям.

Однако данный метод обладает рядом недостатков. Во-первых, не учитывается сферичность Земли и ионосферы, которая оказывает большее влияние на пространственное ослабление волн, чем плоская среда; во-вторых, не учитывается геомагнитное поле. В дальнейшем эти недостатки были устранены. Параболический профиль был заменен на квазипараболический [3]. Учет магнитного поля произведен за счет замены рабочей частоты  $f$  на  $\sqrt{1 - f_H/f}$ , где  $f_H$  – гирочастота электронов [4]. Использование соотношения (3) учитывает малую часть информации, содержащейся в интерференционной структуре поля вблизи ГМЗ.

Целью работы является изложение новой методики оценки параметра  $\bar{v}_E$  и результатов определения затухания радиоволн вблизи ГМЗ на трассе Москва – Ростов протяженностью 950 км.

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОЙ ЧАСТОТЫ СОУДАРЕНИЙ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ЗЕМЛИ И ИОНОСФЕРЫ

Оценка  $\bar{v}_E$  производится в три этапа. На первом этапе для середины трассы корректируются параметры квазипараболического распределения электронной концентрации таким образом, чтобы ГМЗ наблюдалась на расстоянии  $D_E$  в пункте приема.

На втором этапе производится согласование временной и пространственной интерференционной структуры. Для временной картины за начало отсчета времени берется момент прохождения первого максимума через пункт наблюдения. Первый максимум соответствует условию фокусировки излучения на границе мертвой зоны. Его пространственное нахождение на поверхности Земли не соответствует расстоянию  $D_E$  [2]. В пространственной области отсчет расстояний ведется от ГМЗ  $\Delta D = D - D_E$ . Реперными точками во временной и пространственной области являются положения максимумов и минимумов интерференционной картины, начиная со вторых. В пространственной области их положение не зависит от амплитуды interfering сигналов, а только от разности фаз. Таким образом, реперные расстояния  $\Delta D_r$  находятся из условия  $\cos[\varphi_u(\Delta D_r) - \varphi_d(\Delta D_r)] = \pm 1$ , где  $\varphi_u$  и  $\varphi_d$  – фазы верхнего и нижнего лучей. Со-

гласование реперных моментов времени  $t_r$  и расстояний  $\Delta D_r$  находится путем минимизации квадратичного функционала:

$$S(v, a, \delta t) = \sum_r [\Delta D_r - v(t_r - \delta t) + (a/2)(t_r - \delta t)^2]^2,$$

где  $v$  – скорость,  $a$  – ускорение движения интерференционной картины по поверхности Земли;  $\delta t$  – разность моментов прохождения первого максимума и ГМЗ через пункт наблюдения. В результате каждому моменту времени экспериментальной зависимости  $A(t)$  ставится во взаимно однозначное соответствие расстояние от ГМЗ

$$\Delta D = v(t - \delta t) + (a/2)(t - \delta t)^2. \quad (4)$$

Расстояния  $\Delta D$  и время  $t$  берутся с положительным знаком.

Интерференция поля нижних и верхних лучей дает пространственное распределение для амплитуды результирующего поля:

$$A = CA_n^{tsor}(\bar{v}_g) = C \sqrt{A_u^2 + A_d^2 + 2A_u A_d \cos[\delta\varphi(\Delta D)]}, \quad (5)$$

где  $A_u$  и  $A_d$  – амплитуды верхних и нижних лучей;  $\delta\varphi(\Delta D)$  – разность фаз между ними. Амплитуда каждого из сигналов может быть представлена в виде:

$$A_{u,d} = \frac{1}{r_{eff}} \exp[-L_{u,d}(\bar{v}_g)], \quad r_{eff} = \sqrt{\tan(\Delta_{u,d}) r_g \sin \frac{D}{r_g} \left| \frac{\partial D}{\partial \Delta} \right|}, \quad (6)$$

$r_{eff}$  – эффективное расстояние учитывает сферичность среды [2],  $r_g$  – радиус Земли.

Для определения параметра  $\bar{v}_g$  используется следующая процедура. В качестве исходных экспериментальных данных берутся нормированные на второй максимум значения временной зависимости амплитуд (начиная со второго максимума):

$$A_{n,i}^{exp} = A^{exp}(t_i) / A_{max,2}^{exp}, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Для времен  $t_i$  находятся по формуле (4) соответствующие расстояния  $\Delta D_i$ . Для каждого из них рассчитываются углы прихода верхних и нижних лучей, разности фаз между ними и эффективные расстояния. Затем производится минимизация квадратичного функционала:

$$Q(C, \bar{v}_g) = \sum_i [A_{n,i}^{exp} - CA_{n,i}^{tsor}(\bar{v}_g)]^2.$$

Суммирование производится по всем точкам выбранного интервала интерференционной картины. Пример согласования пространственных и временных координат представлен на рис. 3, а нормированных экспериментальных  $A_n^{exp}$  и расчетных  $A_n^{tsor}$  картин представлен на рис. 4.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Изложенная выше методика была использована для оценки  $\bar{v}_g$  по результатам наблюдений интерференционных структур, порожденных х-волнами вблизи ГМЗ на трассе Москва – Ростов протяженностью 950 км. Регистрировалось излучение станции точного времени RWM на частоте 9.996 МГц. Оно имеет периодичность 30 мин и на каждом периоде в течение 8 мин излучается монохроматический сигнал, который формирует интерференционную структуру. При благоприятных условиях в утренние и вечерние часы интерференционная картина наблюдалась в пункте Ростов. Измерения проводились выборочно с 2004 г. по 2011 г. При этом менее 0.5% наблюдений были пригодны для обработки данных, остальные имели сложный вид.

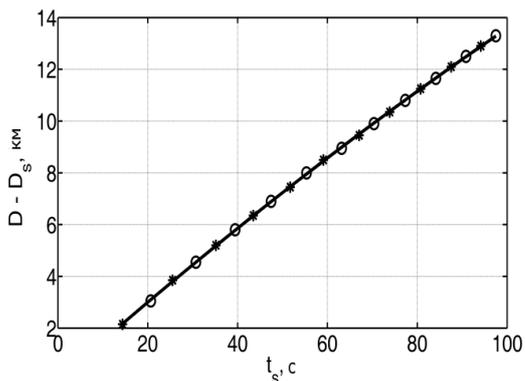


Рис. 3. Согласование пространственных и временных координат, LMT 18:59, 30.09.2004. «Звездочки» - соответствуют максимумам, а «кружки» - минимумам интерференционной картины:  $\delta t = -2.0085$  с,  $v = 0.15$  км/с,  $a = -3.7 \times 10^{-4}$  км/с<sup>2</sup>.

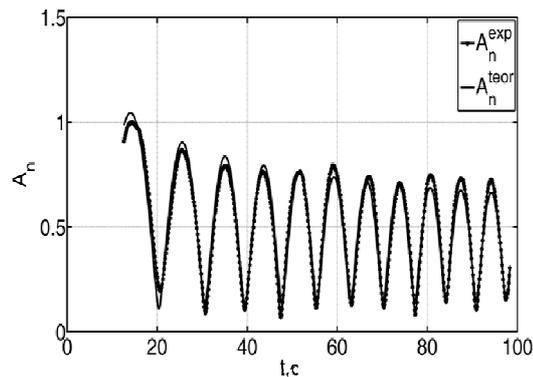


Рис. 4. Сопоставление нормированных экспериментальных значений амплитуд  $A_n^{exp}$  с нормированными теоретическими значениями амплитуд  $A_n^{teor}$  для условий рис. 3.

Результаты оценок  $\overline{v_e}$  и расчетов затухания  $L_s$  радиоволн необыкновенной поляризации на ГМЗ на частоте 9.996 МГц представлены в виде диаграмм на рис.5 и 6. Использовалась выборка из 80 наблюдений. На обеих диаграммах слева выделены две соответствующие друг другу области. На рис.5 первая левая колонка примерно в 7% случаев соответствует отрицательным значениям  $-2000 < \overline{v_e} < 0$  с<sup>-1</sup>. Это, как видно из рис. 6, означает, что вместо затухания в 7% случаев имеет место дополнительное усиление сигнала, которое может достигать 2.5 дБ. Вторая колонка рис.5 в 18% случаев соответствует газокинетическим значениям  $0 < \overline{v_e} < 1000$  с<sup>-1</sup>, что приводит в 15% случаев к поглощению радиоволн, не превышающему 1 дБ (рис. 6). Таким образом, в 78% случаев на ГМЗ имеет место дополнительное затухание, достигающее 18 дБ. В 50% случаев дополнительные потери не превышают 8 дБ.

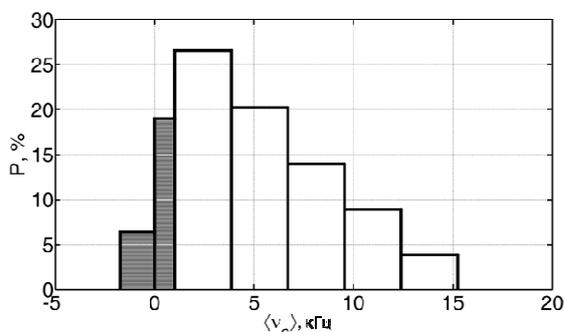


Рис. 5. Диаграмма распределения средней эффективной частоты соударений электронов по наблюдениям на трассе Москва — Ростов в период 2004-2011 гг. на частоте 9.996 МГц.

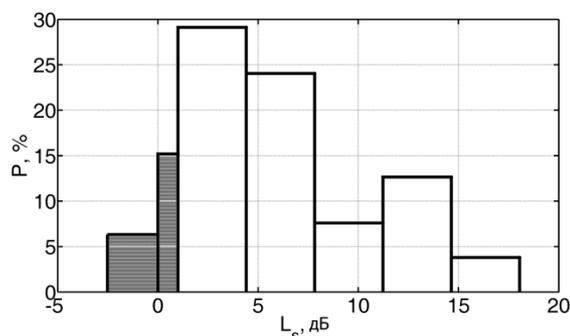


Рис. 6. Диаграмма распределения затухания радиоволн необыкновенной поляризации на ГМЗ по наблюдениям на трассе Москва — Ростов в период 2004-2011 гг. на частоте 9.996 МГц.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложена новая методика оценки затухания ВЧ радиоволн в области F ионосферы на границе мертвой зоны. Она базируется на анализе временной интерференционной структуры поля, порожденной х-волнами вблизи ГМЗ на трассе Москва – Ростов протяженностью 950 км. Регистрировалось монохроматическое излучение станции точного времени RWM на частоте 9.996 МГц. Наша методика учитывает весь отрезок интерференционной структуры. Это уменьшает погрешность оценки  $\overline{v_e}$ . Значительное превышение  $\overline{v_e}$  над газокинетическими оценками отмечалось и ранее [3-5]. Новым элементом является обнаружение в 7% дополнительного усиления сигналов. Наличие этого эффекта на небольшом объеме измерений отмечалось в [4, 5]. Природа этого эффекта пока не выявлена.

**ATTENUATION HF WAVE NEAR MUF**

P.F. Denisenko, G.I. Kuleshoff, A.I. Skazik

Introduced a new method of estimating the attenuation of HF waves in the deviative region from observations of the field near the boundary of the dead zone. According to the measurements on the route Moscow - Rostov (operating frequency of 9.996 MHz) confirmed the presence of additional losses due to scattering by irregularities, and the existence of an additional field increasing that is not associated with focusing near the dead zone boundary.

**KEYWORDS:** IONOSPHERE, HF WAVES, MUF, ATTENUATION.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Анютин А.П., Галушко В.Г., Ямпольский Ю.М. О возможности определения поглощения в отклоняющей области ионосферы по измерениям поля вблизи мертвой зоны // Изв. вузов. Радиофизика. 1985. Т. 28, № 2. С. 247–249.
2. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. - М.: Наука. 1980. 304 с.
3. Денисенко П.Ф., Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г., Сказик А.И. Дополнительные энергетические потери высокочастотных волн в ионосфере вблизи максимально применимой частоты // Электромагнитные волны и электронные системы. 2005. Т. 10, № 5. С. 67–70.
4. Денисенко П.Ф., Вертоградов В.Г., Сказик А.И., Новиков В.М. Энергетические потери ВЧ волн вблизи границы мертвой зоны // Электромагнитные волны и электронные системы. 2009. Т. 14, № 5. С. 25–28.
5. Денисенко П.Ф., Сказик А.И., Котов М.Ю. Особенности затухания дециметровых радиоволн вблизи границы мертвой зоны // Антенны. 2013. № 10. С. 50–54.