

РАСПРОСТРАНЕНИЕ И РАССЕЯНИЕ ВОЛН

УДК 550.388.2:621.371.029.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СНЧ ЗАТУХАНИЯ ПО ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ АМПЛИТУДЫ РАДИОВОЛНЫ, ВОЗБУЖДЕННОЙ ИСКУССТВЕННЫМ ИСТОЧНИКОМ

А. П. Николаенко

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: sasha@ire.kharkov.ua*

Используется дистанционная зависимость амплитуды искусственного сверхнизкочастотного (СНЧ) радиосигнала, измеренного в Атлантике, по которой определяется погонное затухание на дискретной частоте. Показано, что полученное значение хорошо согласуется с литературными данными, а также с моделью, основанной на измерениях глобального (шумановского) резонанса. Отклонения не выходят за пределы погрешности измерений, которая определялась отношением сигнал/шум. Полученное затухание можно применять при тестировании моделей распространения радиоволн в промежутке Земля – ионосфера. Абсолютная калибровка тракта позволила оценить эффективный токовый момент источника поля. Ил. 4. Табл. 1. Библиогр.: 6 назв.

Ключевые слова: распространение радиоволн, сверхнизкие частоты, погонное затухание.

Погонное затухание радиоволны определяют по дистанционным изменениям амплитуды. На сверхнизких частотах (СНЧ), которые занимают диапазон от нескольких герц до нескольких килогерц, такие измерения затруднены, поскольку отсутствуют доступные перестраиваемые источники излучения. Поэтому в экспериментах используют радиоизлучение естественных источников поля – грозовых разрядов. У сверхнизкочастотного распространения имеется ряд особенностей. Главная из них обусловлена сферичностью промежутка Земля – ионосфера, из-за чего волна от источника сначала расходится, а потом сходится к антиподу. Такая фокусировка приводит к осцилляциям и возрастанию амплитуды, начиная с некоторой дистанции. Радиоволны нижней части диапазона сверхнизких частот, обогнув Землю, сохраняют достаточную интенсивность, чтобы возник глобальный (шумановский) резонанс. В энергетическом спектре естественных сигналов видны пики, и амплитуда поля на данной частоте зависит не только от затухания и расстояния до источника, но и от фазовой скорости волны.

Декремент затухания резонансных колебаний оценивают по относительной ширине того или иного пика (мода), т. е. по добротности колебаний, а полученную величину относят к номеру мода или к его пиковой частоте. Такая оценка может оказаться неточной, поскольку амплитуда колебаний может оказаться, например, равной нулю, когда приемник находится в узле поля данного типа колебаний. В этом случае измерения укажут на бесконечные потери, поскольку резонансный пик в спектре отсутствует.

Очевидно, что для оценки затухания колебаний отдельного типа необходимы специальные условия возбуждения: надо расположить вертикальные электрические диполи по дуге боль-

шого круга и обеспечить распределение амплитуд, характерное для данного мода (соответствующий полином Лежандра), а после этого одновременно излучить дельта-импульс. Тогда в полости Земля – ионосфера возникнут затухающие синусоидальные колебания, изменение амплитуды которых во времени позволит оценить потери. То же затухание можно оценить по ширине конкретной резонансной линии в энергетическом спектре колебаний, если источники излучают одновременно синусоидальную волну переменной частоты. Такое затухание характеризует изменения поля во времени (мнимую часть собственной частоты), но не в пространстве (мнимая часть постоянной распространения), именно для этого источники пришлось расположить так, чтобы возбудить конкретную стоячую волну.

Прямые измерения погонного затухания можно выполнить на частотах выше глобального резонанса, записав дистанционную зависимость амплитуды поля монохроматического источника подобно тому, как это делается в классической измерительной линии. Ниже мы приводим результаты эксперимента на частоте выше глобального резонанса. Дистанция от источника до приемника изменялась в интервале от 1 до 8 Мм (1 Мм = 1 тыс. км), поэтому наблюдалась только прямая волна. Как будет показано ниже, погонное затухание (мнимая часть постоянной распространения) оказалось близким к оценкам, основанным на экстраполяции декремента затухания шумановского резонанса во времени (мнимая часть собственных частот). Это обстоятельство подтверждает правомерность использования постоянной распространения, найденной по шумановскому резонансу, с другой стороны, погонное затухание на конкретной частоте представляет самостоятельный интерес.

1. Постановка эксперимента. Регистрация вертикальной компоненты электрического поля СНЧ радиоизлучения Кольского источника [1–3] проводилась на борту научно-исследовательского судна (НИС) «Профессор Зубов» в апреле – мае 1989 г. Измерения выполнены в Атлантике при возвращении сезонного состава 34-й Советской Антарктической экспедиции в г. Ленинград. Расположение источника поля и методика регистрации описаны в работе [1]. Приемная вертикальная электрическая антенна представляла собой емкостной датчик поля и располагалась на трехметровой металлической мачте по левому борту судна на навигационной палубе (см. рис. 1).



Рис. 1. Расположение вертикальной электрической СНЧ антенны на навигационной палубе НИС «Профессор Зубов»

Одновременно с СНЧ наблюдениями та же самая антенна принимала сигналы станций навигационной системы «Омега» на частоте 10,2 кГц. По дистанционным зависимостям сверхдлинноволнового радиосигнала, записанного от станций *F* – Аргентина, *B* – Либерия и *A* – Норвегия, была определена действующая высота антенны [2], которая оказалась равной $h_{eff} = 1,1$ м при стандартном отклонении $dh = 0,1$ м. Действующая высота оказалась ниже высоты мачты из-за того, что судовые механизмы и надстройки оказывали экранирующее действие. Часть этих надстроек видна на рис. 1. По известным h_{eff} и коэффициенту передачи приемного сверхнизкочастотного тракта были получены абсолютные значения поля, которые и используются ниже.

2. Результаты измерений. Исходная амплитуда поля (время накопления узкополосного сигнала составляло около 40 мин [1]) усреднялась

за сутки и представлялась как функция дистанции источник – приемник. Дистанция вычислялась по координатам наблюдателя в полдень по судовому времени. В таблице мы приводим экспериментальные результаты. Указаны даты измерений, широта и долгота судна, расстояние от источника поля, азимут наблюдателя и среднее за сутки значение амплитуды искусственного вертикального электрического поля на частоте 82 Гц, измеренное в децибелах относительно 1 В/м. Перерыв в наблюдениях с 1 по 7 мая связан со стоянкой судна в порту Гамбург. Карта на рис. 2 схематически показывает расположение источника и последовательные положения судна в Атлантическом океане для конкретных дат.

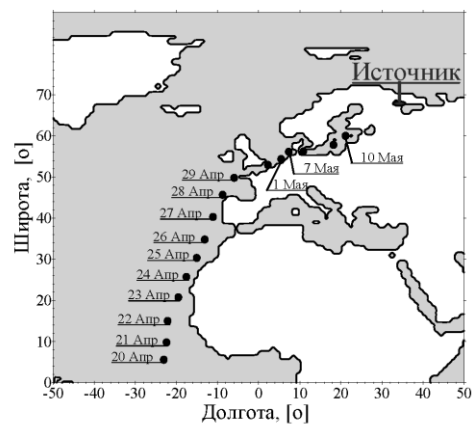


Рис. 2. Схема, показывающая положения НИС «Профессор Зубов» в апреле – мае 1989 г. по пути 34-й Советской антарктической экспедиции на родину

Зависимость амплитуды поля от дистанции источник – приемник представлена на рис. 3. Вдоль абсциссы отложено расстояние от судна до середины излучающей антенны в мегаметрах. Принимались следующие координаты центра антенны: $68,833^\circ$ с. ш. и $34,35^\circ$ в. д. [2, 3]. Вдоль ординаты рис. 3 отложена амплитуда поля в децибелах относительно 1 В/м. Кривая с точками показывает опытные данные, а сплошная кривая – результаты моделирования.

К сожалению, точное расположение центра излучателя неизвестно так же, как и точное направление диаграммы направленности антенны. Однако по измерениям, имеющим косвенное отношение к приводимым данным, мы знаем, что отклонения узла диаграммы излучения от меридиана не превышают $2 - 3^\circ$.

Таким образом, в проведенных измерениях азимуты приемника (см. таблицу) оказались такими, что ошибкой в ориентации излучающей антенны можно пренебречь и считать ее расположенной вдоль параллели. Легко оценить также изменения поля в точке приема при перемещении центра передающей антенны на ее левый или правый край.

Даты измерений, координаты НИС «Профессор Зубов», дистанционная зависимость амплитуды поля СНЧ передатчика, измеренная в Атлантике в 1989 г.

Дата	Широта, [°]	Долгота, [°]	Дистанция, Мм	Азимут наблюдателя, [°]	Амплитуда, дБ
20,04	5,5	-22,833	8,1657	119,25	-95,8
21,04	10,1166	-22,4166	7,6650	118,10	-91,7
22,04	15,5	-21,3333	7,0614	117,26	-92,4
23,04	20,5833	-19,6666	6,4704	117,00	-91,4
24,04	25,8166	-17,5	5,8483	117,04	-90,5
25,04	30,5833	-15	5,2659	117,45	-84,9
26,04	35,3333	-13,1666	4,7129	116,88	-85,7
27,04	40,4666	-11,1666	4,1209	115,83	-85
28,04	45,5833	-8,1666	3,5036	115,26	-81,8
29,04	49,5833	-3,3333	2,9399	117,19	-82
30,04	52,0833	2,9166	2,4812	122,49	-80,7
1,05	54,3333	6,4166	2,1480	124,40	-80,3
7,05	56,1833	7,4833	1,9377	122,94	-79,1
8,05	54,9666	10,98,,	1,9415	130,69	-81,7
9,05	58,7166	18,5166	1,3579	137,99	-80,9
10,05	59,3833	23,1	1,1792	147,35	-79,9

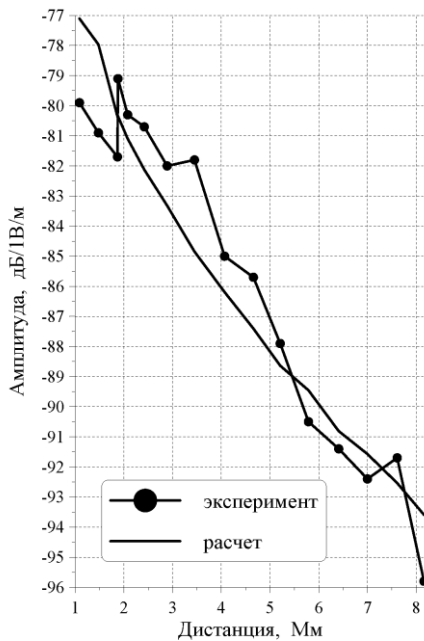


Рис. 3. Амплитуда поля как функция расстояния источник - приемник. Линия с точками показывает экспериментальные данные

Это перемещение изменяет дистанцию и направление на наблюдателя. Оказалось, что для наибольшей дистанции 8 Мм (20 апреля) смещение центра излучателя может привести к относительному изменению наблюдаемой амплитуды поля на $\pm 2,5\%$.

Для наименьшей дистанции около 1 Мм (10 мая) вариации оказываются равными $\pm 6,8\%$. Таким образом, неточности, связанные с положением центра антенны, также оказываются невелики. Они меньше, чем погрешность измерений амплитуды поля, последняя составляла около 10% и была обусловлена величиной отношения сигнал/шум, которое достигало ~ 10 на наибольшей дистанции. Следовательно, мы имеем все основания считать, что электрический центр антенны совпадает с ее геометрическим центром, а минимум диаграммы направленности лежит на меридиане, проходящем через этот центр.

3. Моделирования и решение обратной задачи. Поля, создаваемые рамочной антенной описываются следующими формулами [4, 5].

$$E = \frac{-iv \left(\epsilon + 1 \right) M \cos \eta}{\omega 4h_E a^3 \epsilon_0} \cos \eta \frac{P_v^1 \left| \cos \zeta - \theta \right|}{\sin \pi \nu}; \quad (1)$$

$$H_\varphi = \frac{-M \cos \eta}{4h_M a^2 \sin \pi \nu} \left(\epsilon + 1 \right) P_v^1 \left| \cos \zeta - \theta \right| + \operatorname{ctg} \theta P_v^1 \left| \cos \zeta - \theta \right|; \quad (2)$$

$$H_\theta = \frac{-M \cos \eta}{4h_M a^2} \sin \eta \frac{P_v^1 \left| \cos \zeta - \theta \right|}{\sin \pi \nu}; \quad (3)$$

Здесь a – радиус Земли; $M(\omega)$ – токовый момент рамочной антенны в $A \cdot m^2$, равный произведению тока на площадь рамки; множители $\cos \eta$ и $\sin \eta$ учитывают угловую диаграмму направленности излучающей антенны; угол η отсчитывается от направления на восток из центра антенны; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; θ – угловое расстояние от центра антенны до наблюдателя; $P_v \cos \zeta - \theta$, $P_v^1 \cos \zeta - \theta$ – функция и присоединенная функция Лежандра; $\nu(f)$ – комплексная постоянная распространения СНЧ радиоволн; h_E и h_M – электрическая и магнитная высоты ионосферы соответственно (см. например [6]).

В расчетах электрического поля по формуле (1) момент тока источника принимался равным $M(\omega) = 10^{11} A \cdot m^2$. Средняя высота ионосферы $h_E = 63,5$ км [5], реальная часть постоянной распространения $\text{Re}\{\nu\} = (f - 2)/6 = 13,3333$, а ее мнимая часть подбиралась так, чтобы минимизировать сумму квадратов отклонений расчетных данных от экспериментальной кривой.

Использовалась следующая процедура. При фиксированном затухании в диапазоне значений $\text{Im}\{\nu\} \in [-1,02; -0,82]$, вычислялась амплитуда поля $Y(T)$ как функция даты T . Затем строилась разность $Z(T) = X(T) - Y(T)$, где $X(T)$ обозначает экспериментально измеренную зависимость. Если изменять $\text{Im}\{\nu\}$, то сумма квадратов (вариация) величины $Z(T)$ тоже станет изменяться. Остается найти затухание, при котором вариация минимальна, оно оказалось равным $\text{Im}\{\nu\} = -0,9225$ (см. рис. 4). Одновременно с этим вычислялась средняя за время наблюдения разность измеренного и расчетного полей (в децибеллах), что необходимо для оценки неизвестной амплитуды источника.

Обе характеристики показаны на рис. 4 как функции мнимой части постоянной распространения. Первая из них выглядит как парабола, а вторая изменяется линейно.

Отличие токового момента источника от постулированного значения $10^{11} A \cdot m^2$ при оптимальном затухании составило $-8,83$ дБ. Таким образом, средний токовый момент источника составлял $M(\omega) = 0,36 \cdot 10^{11} A \cdot m^2$. Обеспечив наилучшее соответствие модельных и опытных данных, мы показали на рис. 3 экспериментальную и расчетную зависимости поля от дистанции. Здесь вдоль горизонтальной оси отложено расстояние от наблюдателя до источника, а по вертикальной оси – уровень поля в децибелах относительно 1 В/м. Кривая с точками показывает опытные данные, а сплошная кривая – расчет, который

удовлетворяет условию минимизации суммы квадратов отклонений расчета от эксперимента.

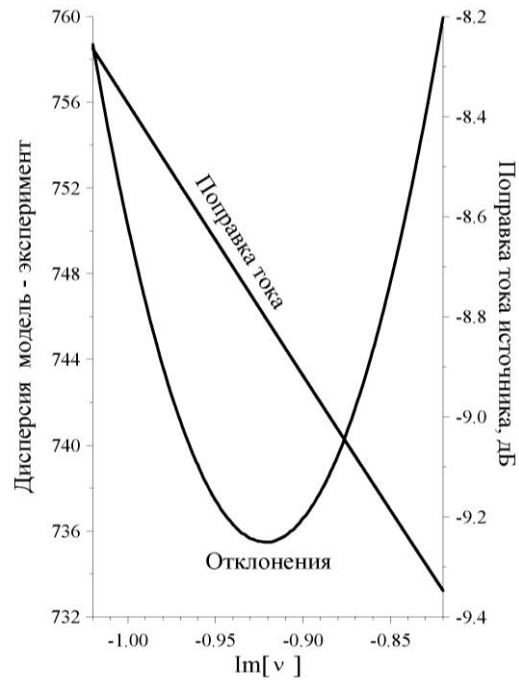


Рис. 4. Выбор оптимальных параметров модели

Выводы. По результатам проведенного исследования погонное затухание СНЧ радиоволн на частоте 82 Гц оказалось равным $\text{Im}\{\nu\} = -0,9225$. Оно было получено по дистанционному разрезу поля, снятому в Атлантике в интервале дистанций от 1 до 8 Мм.

Погонное затухание хорошо согласуется с затуханием во времени, например, с линейной моделью, основанной на измерениях шумановского резонанса [4]. Отклонение составляет 9%. По зарубежным данным [5] на частоте 76 Гц ночью $\text{Im}\{\nu\} = -0,82$, а днем $\text{Im}\{\nu\} = -1,075$, так что среднее значение из литературы на 8% отличается от данных наших измерений. И те, и другие отличия не выходят за пределы 10% погрешности измерений, которая обусловлена отношением сигнал/шум ~ 10 .

Полученное затухание можно использовать при тестировании моделей распространения радиоволн в промежутке Земля - ионосфера. Например, для отбора тех или иных вертикальных профилей проводимости средней атмосферы.

Измерения СНЧ поля сопровождалось записью сигналов станций навигационной системы «Омега» на частоте 10,2 кГц. Это позволило оценить действующую высоту приемной электрической антенны, установленной на борту НИС «Профессор Зубов», и получить абсолютную калибровку СНЧ записей. Оказалось, что $h_{eff} = 1,1 \pm 0,1$ м.

Знание абсолютной амплитуды СНЧ поля позволило оценить эффективный токовый момент излучающей антенны Кольского источника на рабочей частоте. Оказалось, что токовый момент $M(f) = 0,36 \cdot 10^{11} \text{ А} \cdot \text{м}^2$ во время измерений. Эта величина позволяет определить эффективную площадь рамки, если известен ток, протекающий в антенне.

Автор выражает искреннюю признательность И. Лесникову за активное участие в сезонных измерениях 34-й Советской Антарктической Экспедиции.

Окончательная обработка данных была выполнена при поддержке гранта №2070 НТЦУ.

1. Николаенко А. П. Влияние неоднородности ионосферы день – ночь на амплитуду СНЧ радиосигнала // Радиофизика и электроника. - Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. - 2007 - 12, №2. - С.345-355.
2. Nickolaenko, A. P. ELF/VLF Propagation measurements in the Atlantic during 1989 // *J. Atmos. Terr. Phys.* - 1995. - 57. - С.821-833.
3. Беляев П. П., Поляков С. В., Ермакова Е. Н. и др. Первые эксперименты по генерации и приему искусственных УНЧ излучений (03 - 12 Гц) на дистанции 1500 км // Известия вузов. Радиофизика. - 2002. - 45. - С.151-162.
4. Nickolaenko A. P., Hayakawa M. *Resonances in the Earth-ionosphere cavity.* – Dordrecht-Boston-London: Kluwer Academic Publishers, 2002. - 380 p.
5. Bannister P. R. Further examples of seasonal variations of ELF radio propagation parameters // *Radio Science.* - 1999. - 34. - P.199-208.
6. Николаенко А. П. и Рабинович Л. М. О возможности существования глобальных электромагнитных резонансов на планетах Солнечной системы // *Космические исследования.* - 1982. - 20. - С. 82-88.

ELF ATTENUATION FACTOR DERIVED FROM DISTANCE DEPENDENCE OF RADIO WAVE AMPLITUDE PROPAGATING FROM AN ARTIFICIAL SOURCE

A. P. Nickolaenko

The distance dependence is demonstrated of the artificial ELF radio signal measured in the Atlantic. The wave attenuation factor was found at a discrete frequency. The value thus obtained is in accord with the literature data as well as with the model based on the Schumann resonance. Deviations lie within the standard error conditioned by the finite signal to noise ratio. The attenuation factor obtained might be used for testing propagation models in the Earth – ionosphere cavity. Absolute calibrations of measurements provided the effective current moment of the field source.

Key words: Radio wave propagation, extremely low frequencies, wave attenuation.

ВИЗНАЧЕННЯ ННЧ ЗАГАСАННЯ ЗА ДИСТАНЦІЙНОЮ ЗАЛЕЖНІСТЮ АМПЛІТУДИ РАДІОХВИЛІ, ЗБУДЖЕНОЇ ШТУЧНИМ ДЖЕРЕЛОМ

О. П. Ніколаєнко

Використано дистанційну залежність амплітуди штучного наднизькочастотного (ННЧ) радіосигналу, отриманого у Атлантиці, за допомогою якої визначено погонне затухання радіохвилі дискретної частоти. Подано, що отримане значення добре узгоджується з даними літератури, а також із моделлю, яка базується на вимірюваннях глобального електромагнітного (шумановського) резонансу. Відміни даних не виходять за межі похибки вимірювань, що визначалась відношенням сигнал/гам. Затухання, що одержано, можна використувати для тестування моделей поширення радіохвиль у порожнині Земля – іоносфера. Абсолютне калібрування тракту дозволило визначити ефективний токовий момент джерела поля.

Ключові слова: поширення радіохвиль, наднизькі частоти, погонне затухання.

Рукопись поступила 3 октября 2007 г.