

Методика расчёта ослабления радиоволн СДВ и ДВ диапазонов с учётом параметров подстилающей поверхности

В. А. Сафаралеев, О. В. Падафет

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского
vka@mil.ru

Аннотация. В работе описывается метод расчета коэффициента ослабления радиоволн СДВ и ДВ диапазонов для маршрута, проходящего над подстилающей поверхностью с различными электрическими параметрами. Рассматриваемая методика позволяет автоматизировать расчет коэффициента ослабления для заданных точек приема и местоположения передатчика, что, в свою очередь, позволяет прогнозировать зоны уверенного приема.

Ключевые слова: земные радиоволны, подстилающая поверхность, затухание, зона уверенного приема

I. СУЩЕСТВУЮЩИЙ ПОРЯДОК РАСЧЁТА МОЩНОСТИ ЗЕМНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ

Ослабление поля радиоволны при распространении в реальных условиях будет больше, чем ослабление в свободном пространстве. Это дополнительное ослабление принято обозначать множителем ослабления $F_{\text{осл}}$. Если его значение известно, то применяют формулу Шулейкина-Ван-дер-Поля:

$$E_{\text{д}}[\text{мВ/м}] = \frac{245\sqrt{P_1[\text{кВт}]D_1}}{r[\text{км}]} F_{\text{осл}}$$

где P_1D_1 – эффективная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ), r – расстояние между передатчиком и точкой наблюдения, $F_{\text{осл}}$ – множитель ослабления. [1]

Процесс распространения радиоволн над поверхностью Земли неразрывно связан с поглощением энергии волны полупроводящими грунтами. В длинноволновой части спектра поглощение энергии волны подстилающей поверхностью является основным фактором, определяющим дополнительное ослабление. В этом случае множитель ослабления определяется как некоторая функция от безразмерного параметра x , называемого «численным расстоянием»: $x=r/s$. Здесь s – масштаб расстояний, определяемый комплексной диэлектрической проницаемостью подстилающей поверхности $\epsilon_k = \epsilon - j60\lambda\sigma$

$$s = |S| = \frac{\lambda}{\pi} \left| \frac{\epsilon_k^2}{\epsilon_k - 1} \right| = \frac{\lambda[\epsilon^2 + (60\lambda\sigma)^2]}{\pi\sqrt{(\epsilon - 1)^2 + (60\lambda\sigma)^2}} \quad (1)$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость грунта, σ – проводимость грунта и λ – длина волны.

Зависимость $F_{\text{осл}}$ от x определяется по графикам, составленным Берроузом или по приближённой формуле

$$F_{\text{осл}} = \frac{2 + 0,3x}{2 + x + 0,6x^2}$$

Следовательно, для нахождения мощности сигнала нам необходимо определить масштаб расстояний s . Для электрически однородной поверхности при этом сложностей не возникает. Но на практике чаще рассматриваются ситуации, когда трасса радиолинии проходит над разнородными грунтами. Для трасс, состоящих из двух однородных участков, существуют как точное решение (Фейнберг Е.Л. [2]), так и приближённые (в том числе и в Рекомендациях МСЭ [3]). Все предложенные способы определения итогового значения коэффициента затухания либо требуют больших вычислительных затрат, либо имеют ограничения по применению, либо основаны на работе с графиками. Следовательно, не подходят для автоматических расчётов.

Однако любые методики подтверждают практические результаты, выраженные в том, что общее значение ослабления не является простой суммой ослаблений на трассе. Конечный результат сильно зависит от взаимного расположения участков относительно точек передачи и приёма. Наибольший вклад вносят участки, непосредственно прилегающие к передатчику и приёмнику. Это явление Л.И. Мандельштам назвал площадками «взлёта» и «посадки».

II. ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО РАЗРАБОТКЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СПОСОБА РАСЧЁТА ОСЛАБЛЕНИЯ НА ТРАССЕ С РАЗНОРОДНОЙ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

В книге Ф.Б. Черного [4 стр.189] причиной приведённого явления указывается распределение энергии в пределах существенной зоны (имеющей форму вытянутого эллипсоида вращения) и поглощение энергии волны при её проникновении в толщу полупроводящего грунта. Однако количественных зависимостей в данной работе не представлено.

Возьмём за основу это описание физики процесса и определим численные зависимости, на основании которых можно будет реализовать алгоритм расчёта

множителя ослабления для разнородной подстилающей поверхности.

Предлагаемый способ основывается на следующих утверждениях:

- существенная зона представляет собой эллипсоид вращения с фокусами в точках передачи и приема;
- размеры существенной зоны определяются расстоянием между фокусами, длиной волны и номером учитываемой зоны Френеля (в работе принимается первая зона Френеля);
- распределение энергии в сечении существенной зоны описывается функцией Бесселя 1-го рода;
- высота слоя, в котором подстилающая поверхность оказывает влияние на электромагнитную волну, принимается равным половине длины волны.

Поясним сказанное на примере (рис. 1). Ближе к точкам передачи и приёма значительная часть энергии проходит близко к поверхности. Но в данном примере в этих местах подстилающая поверхность – море, обладающее малым ослаблением радиоволн. Среднюю часть радиотрассы занимает суша, оказывающая большое поглощение. Но существенная зона в средней части имеет большой радиус сечения, поэтому близко к поверхности проходит только малая часть энергии. Большая часть мощности проходит высоко и не поглощается.

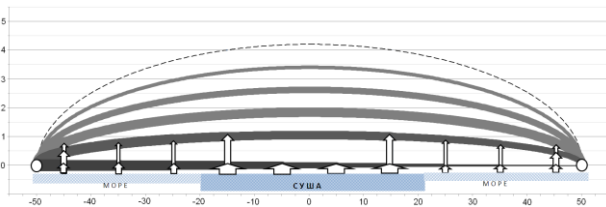


Рис. 1. Распределение энергии электромагнитной волны в продольном сечении существенной зоны и её поглощение подстилающей поверхностью. Толщина линии символизирует мощность ЭМВ в данной части пространства

Уровень поглощения в каждой точке определяется двумя значениями: характеристикой подстилающей поверхности s и долей энергии волны в слое поглощения. Характеристика s находится по (1) исходя из справочных данных о местности. Для определения доли энергии надо знать, какую часть высоты эллипсоида составляет слой поглощения, а также распределение энергии в сечении эллипсоида.

Часть высоты определяется выражением $h_{отн} = 0,5/h$, где $h = \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - (R/2 - x)^2} = b \sqrt{1 - \left(\frac{R/2 - x}{a}\right)^2}$ – высота эллипса в точке расчёта; a и b – большая и малая полуоси эллипса; R – расстояние между фокусами; x – расстояние от фокуса до точки расчёта. Полуоси находятся:

$$a = R + \frac{\lambda}{2} \quad b = \sqrt{R \frac{\lambda}{4} - \left(\frac{\lambda}{4}\right)^2},$$

где λ – длина волны.

Часть энергии, находящейся в слое $h_{отн}$, найдена методом численного интегрирования (рис.2 а, б) и аппроксимируется формулой:

$$\gamma(h_{отн}) = 1,784h_{отн} - 1,055h_{отн}^3 + 0,241h_{отн}^5 + 0,03h_{отн}^7$$

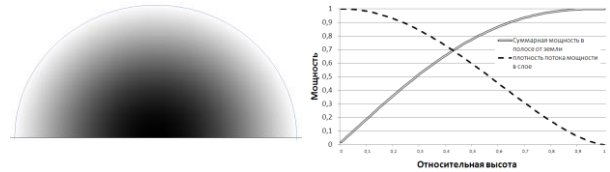


Рис. 2. Распределение плотности потока мощности в поперечном сечении существенной зоны и мощность в приземном слое

Точность расчёта зависит от шага промежуточных точек, особенно вблизи передатчика и приёмника.

III. РЕАЛИЗАЦИЯ СПОСОБА РАСЧЁТА ОСЛАБЛЕНИЯ НА ТРАССЕ С РАЗНОРОДНОЙ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

На основе указанных выше положений и зависимостей был разработан алгоритм (рис. 3) и выполнена его программная реализация.



Рис. 3. Алгоритм расчёта коэффициента ослабления электромагнитной волны за счёт поглощения разнородной подстилающей поверхностью

В алгоритме реализованы следующие шаги:

- загрузка данных по проводимости подстилающей поверхности ($\sigma_{\text{пп } \varphi, \lambda}$, $\varepsilon_{\text{пп } \varphi, \lambda}$);
- ввод географических координат передатчика и точки наблюдения ($\varphi_{\text{РЭС}}$, $\lambda_{\text{РЭС}}$);
- определение числа промежуточных точек;
- расчёт географических координат промежуточных точек (φ_i , λ_i);
- расчёт значения функции влияния (γ_i);
- определение электрических параметров почвы и расчёт множителя расстояния s_i для данной точки;
- суммирование произведения множителя расстояния и функции влияния для каждой промежуточной точки;
- нормирование полученной суммы (деление на сумму всех значений функции влияния);
- расчёт значения численного расстояния x ;
- расчёт значения коэффициента ослабления на заданной трассе.

Исходные данные по проводимости почв в диапазоне ОНЧ можно взять из Рекомендаций МСЭ [5] – «Мировой атлас проводимости почвы». Однако, для использования в программе эти данные необходимо предварительно подготовить. В указанном документе информация представлена чёрно-белым изображением, значения проводимости в пределах выделенной зоны указаны числом на изображении, а все линии, включая сетку координат, выполнены неровными линиями шириной в несколько пикселей, что затрудняет определение проводимости выбранного участка даже в ручном режиме и делает невозможным в автоматическом. Так как самая важная граница – это береговая линия морей и океанов, для хранения данных о проводимости материков используется готовая карта мира. Океаны и моря имеют проводимость 4000 мСм/м, а суша – 30, 10, 3, ..., 0,03 мСм/м (проводимости могут иметь произвольные значения, но в соответствии с рекомендациями МСЭ приводятся к указанному выше ряду значений). В программе используется карта мира в проекции Меркатора. Береговая линия отображена с высокой точностью, а зоны на суше переносятся из Атласа вручную. Значения проводимости кодируются цветом, а само изображение сохранено в 256-цветном формате, в результате чего каждый пиксель кодируется одним байтом.

Трасса по кратчайшему расстоянию строится как проекция прямой линии на поверхность Земного шара. Линия проводится через передатчик и точку наблюдения. Так же, через проекцию, определяются координаты каждой промежуточной точки, а через них – параметры грунта.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ ПРОГРАММЫ

Вначале было проведено сравнение результатов расчёта с практическими измерениями, в качестве которых использованы данные из учебника [2, с. 295]. Последние представлены в виде копии страницы (с поясняющими надписями) на рис. 4б. При проведении контрольного расчёта использовались те же исходные данные: мощность передатчика, длина волны, длины участков, параметры подстилающих поверхностей.

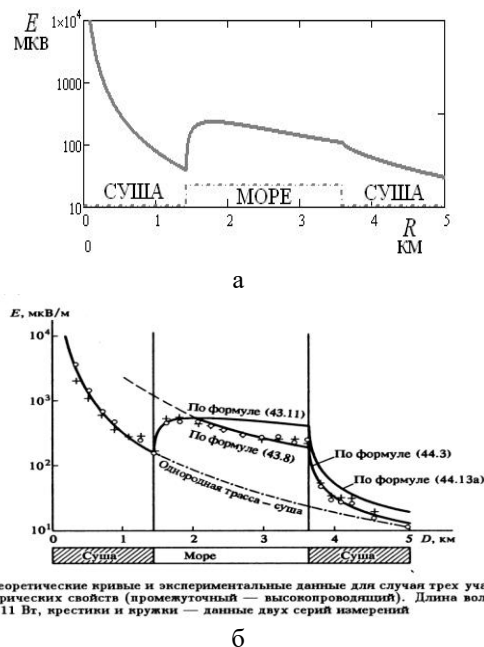


Рис. 4. Сравнение результатов расчёта (а) и экспериментальных данных (б)

Как видно из сравнения графиков, результаты расчётов хорошо согласуются с практическими измерениями.

Кроме численного решения задачи программа позволяет нанести на карту мира вычисленную трассу, соответствующую кратчайшему пути (рис. 5), и построить профиль величин, важных для расчёта коэффициента затухания (рис. 6).

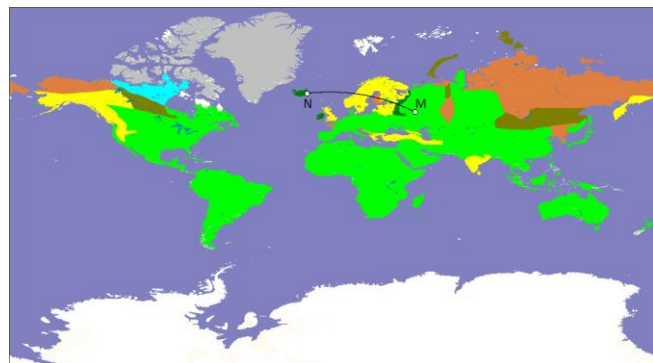


Рис. 5. Пример трассы между точкой М ($\varphi = 56^\circ$, $\lambda = 44^\circ$) и точкой N ($\varphi = 65^\circ$, $\lambda = -15^\circ$). Различными цветами обозначены значения проводимости грунта

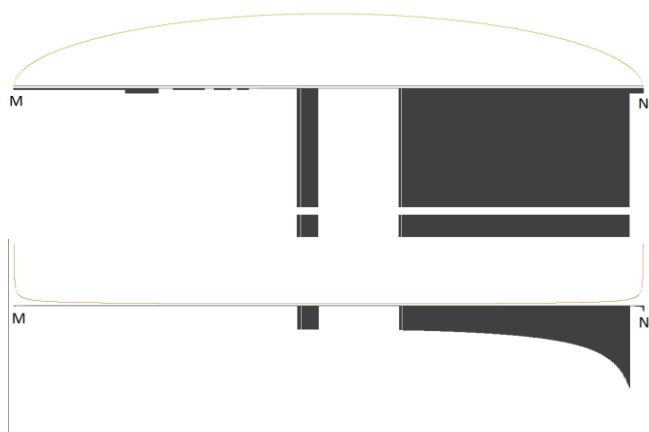


Рис. 6. Профиль трассы, отображающий изменения электрических параметров вдоль трассы: высота существенной зоны; масштаб расстояния s ; функция влияния γ ; величина влияния, равная произведению $s\gamma$

Для участков, соответствующих солёной морской воде, значения величины s в текущем масштабе выходит за пределы поля и изображены с разрывом. Важно

пояснить: большему значению s соответствует меньшее ослабление. Поэтому, для уменьшения ослабления нам надо стремиться максимально увеличить площадь на нижнем графике. Но в данном примере мы видим, что на участках, где значение функции влияния велико, подстилающая поверхность имеет малое значение параметра s , и наоборот. Там, где значение s велико, функция влияния имеет малое значение. В итоге площадь получается далеко не максимальной, а коэффициент ослабления – не минимальным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Долуханов М.П. Распространение радиоволн: Учеб. для вузов. М., «Связь», 1972. 336 с.
- [2] Фейнберг Е.Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. 2-е изд. М.:Наука. Физматлит, 1999. 496 с.
- [3] Рекомендация МСЭ-R P.368-9 Кривые распространения земной волны для частот между 10 кГц и 30 МГц Электронная публикация
- [4] Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. М.: «Советское радио», 1962. 480 с.
- [5] Рекомендация МСЭ-R P.832-4 Мировой атлас проводимости почвы Электронная публикация