

УДК 621.371.33: 519.245

О.Н. Киселев

Исследование закономерностей флуктуаций угла прихода УКВ за радиогоризонтом на основе численного имитационного эксперимента

Рассматривается механизм возникновения медленных флуктуаций угла прихода за радиогоризонтом. Получены закономерности таких флуктуаций на основе имитационного эксперимента. Результаты расчетов хорошо согласуются с опубликованными экспериментальными данными.

Ключевые слова: угол прихода, медленные флуктуации за радиогоризонтом, результаты имитационного эксперимента, экспериментальные данные.

Хотя теоретические и экспериментальные исследования ДТР УКВ ведутся уже более полувека, отдельные свойства этого явления изучены недостаточно. В частности, это касается механизма образования медленных флуктуаций угла прихода. С другой стороны, в связи с необходимостью разработки все новых радиосистем появляются и новые требования к описанию флуктуаций поля в месте приема, что и определило потребность в проведении данной работы.

Возникновение медленных флуктуаций за радиогоризонтом связывается с особенностями отражения радиоволн неоднородностями коэффициента преломления, имеющими наклонные поверхности [1]. Такие структуры могут возникать, например, в процессе переноса различного количества тепла и влаги от участков с разными свойствами земной поверхности в более высокие слои атмосферы [2]. Облака также представляют собой один из видов неоднородностей тропосферы, заметно влияющих на распространение ДТР УКВ [3]. Они существуют как в виде отдельных образований с наклонными отражающими границами, так и в составе облачных систем, часто волнообразных. В зависимости от сочетания основных физических параметров атмосферы, волнообразные облачные структуры в тропосфере возникают на разных высотах, но наиболее часто они встречаются в интервале высот от сотен метров до нескольких километров [4]. Помимо визуально наблюдаемых, волновые явления существуют в атмосфере и при безоблачном небе; об этом свидетельствуют данные радиолокационных измерений [5].

Теоретический расчет величины углов прихода в точке приема в зависимости от угла наклона и ориентации слоистой неоднородности выполнен по формулам, предложенным в [6]. Предполагается, что размеры отражающей поверхности больше первой зоны Френеля, что позволяет использовать расчетную формулу для лучевого приближения.

На рис. 1 представлена геометрия формирования траектории радиолуча при распространении волны от передатчика (T) к приемнику (R) при условии отражения от слоистой неоднородности с углом наклона β .

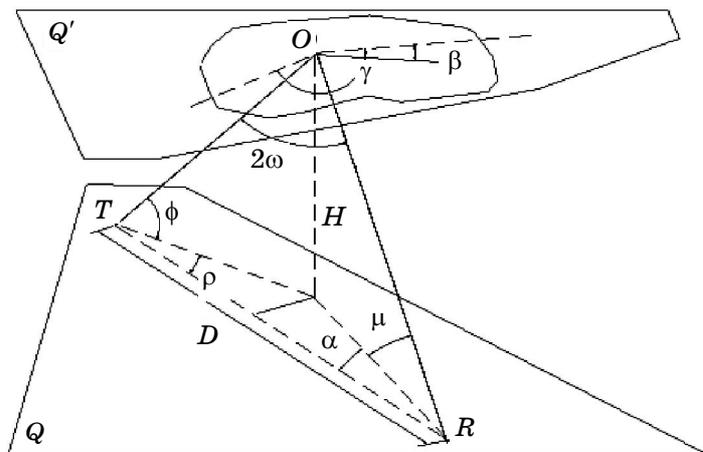


Рис. 1. Геометрия отражения от наклонного слоя [6]

Здесь изображены: Q' – плоскость, параллельная горизонтальной, расположенная на высоте точки отражения O ; β – линейный угол двугранного угла между плоскостью отражающего слоя и плоскостью Q' , являющийся углом наклона слоя; γ – угол в плоскости Q' , образованный перпендикуляром к ребру двугранного угла и линией, параллельной

линии TR , который назван [6] углом ориентации слоя. Точка отражения O находится на высоте H . Луч, выходя от передатчика под углами ρ и ϕ , падает на слой под углом ω , который определяется соотношением

$$\cos\omega = \sin\rho\cos\phi\sin\beta\sin\gamma - \cos\rho\cos\phi\sin\beta\cos\gamma + \cos\beta\cdot\sin\phi.$$

В точке приема величины угла прихода в горизонтальной плоскости α и угла места μ рассчитываются на основе формул

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{-\cos\phi\cdot\sin\rho + 2\cos\omega\cdot\sin\gamma\cdot\sin\beta}{\cos\phi\cdot\cos\rho + 2\cos\omega\cdot\cos\gamma\cdot\sin\beta}$$

и
$$\sin\mu = -\sin\phi - 2\cos\beta\cos\omega.$$

Задавая четыре параметра $(\beta, \gamma, \rho, \phi)$, рассчитываем в точке приема R величины угла места μ и азимутального угла α , которые и определяют отклонение приходящего луча от истинного направления на источник излучения. При этом для луча, приходящего в точку приема R , удаленную от передатчика на расстояние D , должны соблюдаться условия:

$$\operatorname{tg}\mu\cdot\sin\rho = \operatorname{tg}\phi\cdot\sin\alpha \quad \text{и} \quad \frac{\cos\rho}{\operatorname{tg}\phi} + \frac{\cos\alpha}{\operatorname{tg}\mu} = \frac{D}{H}.$$

Приведенные уравнения дают описание зависимости величин углов прихода в точку приема для известных величин наклона и ориентации слоя и при заданных углах выхода луча от передатчика. Так как аналитическую зависимость для расчета характеристик принимаемого сигнала от параметров слоя получить не удалось, задача была решена путём проведения численного имитационного эксперимента.

При расчетах углов прихода на трассах ДТР учитывались ограничения диапазонов изменения вертикальных углов выхода и прихода, накладываемые кривизной Земли (углы закрытия со стороны передатчика и со стороны приемника), и возможности отражения радиоволн с учетом как интенсивности реально существующих неоднородностей тропосферы, так и углов падения на слой. Максимальные значения углов определяются отражениями на больших высотах и зависят от угла падения, при котором еще возможно отражение слоем (при условии, что слой существует на таких высотах).

Учитывая, что углы наклона слоя могут изменяться в определенных пределах, а ориентация слоя может быть любой в интервале $0-360^\circ$, в программе, с помощью датчиков случайных чисел, генерировались величины наклона слоя с распределением их по нормальному закону с заданным значением СКО и равномерно распределенные величины угла γ . Для каждой пары углов β и γ задавалась серия значения углов ρ и ϕ . Затем для каждого набора параметров $(\beta, \gamma, \rho, \phi)$ рассчитывались величины μ и α . Из значений углов прихода, для которых выполнялись указанные выше условия, формировался массив данных, служивший основой для оценки статистических характеристик углов прихода. Объём таких массивов данных для разных серий опытов менялся от двух до пяти тысяч.

Расчет дистанционной зависимости флуктуаций угла прихода выполнен для распространения над сферической земной поверхностью при нулевой высоте антенн и эквивалентном радиусе Земли, равном 8500 км. На рис. 2 представлены результаты оценки среднеквадратической величины отклонений азимутального угла прихода в точке приема при СКО наклона слоя β , равном 6° , и произвольном значении γ .

Рисунок 3 иллюстрирует два варианта высотной зависимости интенсивности неоднородностей коэффициента преломления, использованных при расчете данных, представленных на рис. 2. Выбор такого вида зависимостей определен экспериментальными данными, приведенными в [7]. Низко расположенный максимум неоднородностей определяет наличие максимума СКО флуктуаций угла прихода на дальности около 200 км; «горб» дистанционной зависимости на дальности порядка 400 км формируется «выбросом» неоднородностей на высоте 2,5 км. Величина интервала высот, где имеются интенсивные слоистые неоднородности, определяет также и величину интервала дальностей, где регистрируются интенсивные флуктуации угла прихода. Подтверждение этому представлено на рис. 4, где верхняя кривая соответствует метеорологическим условиям, при которых интервал высот наличия «сильных» неоднородностей в три раза больше, чем для варианта модели, результаты расчета по которой изображены нижней кривой. В первом случае отражающие слои сосредоточены в интервале высот 0,8 км при средней высоте их расположения 0,7 км, а для нижней зависимости этот интервал уменьшен до 300 м.

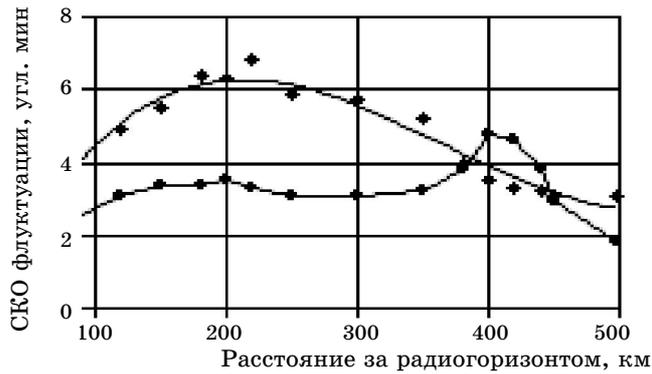


Рис. 2. Зависимость СКО азимутального угла прихода от дальности при разной высоте максимума неоднородностей

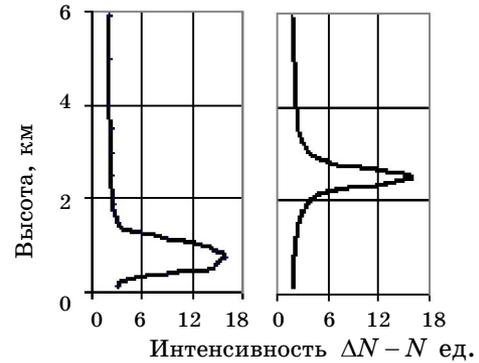


Рис. 3. Профили неоднородностей с различными величинами высоты их максимумов

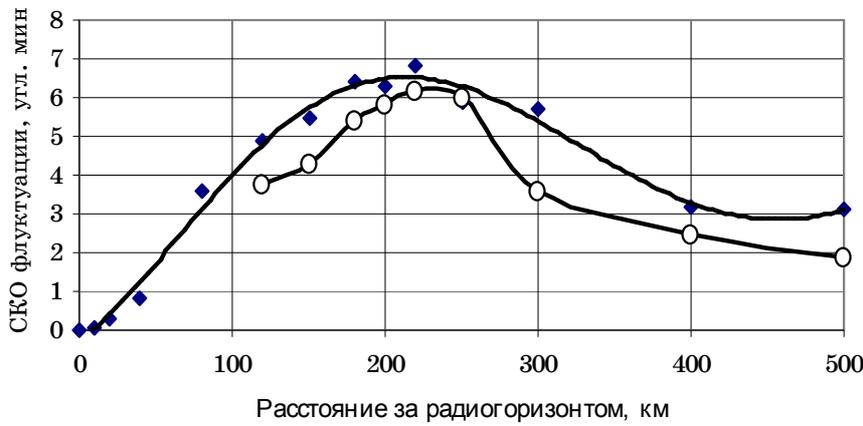


Рис. 4. Зависимость средневекторной величины отклонений азимутального угла прихода от дальности при разных интервалах высот неоднородностей.

Результаты расчетов сопоставлены с данными экспериментальных исследований медленных флуктуаций, проведенных в трех регионах с различными климатическими условиями и на разных трассах. На трассах Западной Сибири и Тихого океана были использованы установки с равными или соизмеримыми высотами передающих и приемных антенн. На наклонных трассах над акваторией Каспийского моря превышение приемного пункта над передающим было около 2300 м. Подробное описание условий проведения опытов приводится в работах [1, 8].

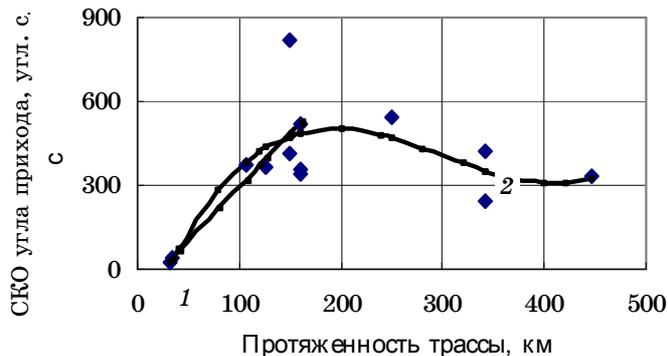


Рис. 5. Зависимость средневекторной величины отклонений азимутального угла прихода от дальности в зоне граничения

Аппроксимация результатов опытов на сухопутных трассах протяженностью до 200 км представлена линией 1; среднюю зависимость по всем экспериментам отражает кривая 2.

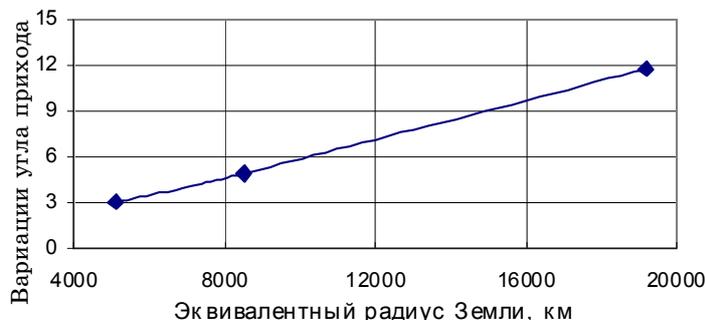
Предлагаемая модель была использована также для оценки влияния изменений среднего вертикального градиента коэффициента преломления на интенсивность флуктуаций угла прихода.

Как известно, изменение вертикального градиента g_n определяет изменение эквивалентного радиуса Земли $a_{\text{экв}}$. Чем меньше эквивалентный радиус, тем меньше, при одной и той же протяженности трассы, размер объема рассеяния в вертикальной плоскости, в пределах которого луч может пройти от передатчика к приемнику. И тем самым уменьшается интервал высот, где расположены слои, обеспечивающие отражение сигнала в точку приема. При большей величине $a_{\text{экв}}$ увеличивается интервал высот, где может быть

расположен отражающий слой, и, следовательно, увеличивается возможный диапазон изменений угла прихода. В качестве меры влияния величины $a_{\text{ЭКВ}}$ (т.е. меры влияния g_n) на возможные изменения азимутального угла от минимальной до максимальной величины принят параметр $\zeta = \alpha_{\text{max}} / \alpha_{\text{min}}$ для каждого конкретного значения $a_{\text{ЭКВ}}$.

Результаты расчета параметра ζ для трех значений $a_{\text{ЭКВ}}$ (5100, 8500 и 19200 км) представлены на рис. 6. Величина ζ рассчитывалась исходя из условия ограничения области переизлучения предельной высотой расположения слоя, принятой равной 4 км, исходя из известных данных [3] о высотах расположения слоистых неоднородностей. Расчет выполнен для параметров модели $\gamma=90^\circ$, $\beta=3^\circ$, $D=200$ км.

Рис. 6. Зависимость диапазона вариаций ζ азимутального угла прихода от величины эквивалентного радиуса Земли $a_{\text{ЭКВ}}$



Результаты работы показывают, что механизм медленных флуктуаций угла прихода при ДТР УКВ может быть связано с отражением радиоволн от наклонных слоев в тропосфере. Такой механизм их возникновения позволяет объяснить полученную при экспериментальных исследованиях дистанционную зависимость среднеквадратической величины медленных отклонений азимутального угла прихода от протяженности трассы и метеорологических условий.

Литература

1. Шарыгин Г.С. Статистическая структура поля УКВ за горизонтом. – М.: Радио и связь, 1983. – 140 с.
2. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы. – СПб.: Гидрометеиздат, 2000. – 778 с.
3. Казаков Л.Я. Неоднородности коэффициента преломления воздуха в тропосфере / Л.Я. Казаков, А.Н. Ломакин. – М.: Наука, 1976. – 165 с.
4. Облака и облачная атмосфера / Под ред. И.П. Мазина, А.Х. Хргиана. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 647 с.
5. Crane R.K. A Review of Transhorizon Propagation Phenomena // Radio Sci. – 1981. – V. 16, №5. – P. 649–669.
6. Gossard E.E. The reflection of microwaves by a refractive layer perturbed by waves // IRE trans AP. – 1962, May. – P. 317–325.
7. Дальнее тропосферное распространение ультракоротких волн / Под ред. Б.А. Введенского, М.А. Колосова, А.И. Калинина, Я.С. Шифрина. – М.: Сов. радио, 1965. – 416 с.
8. Киселев О.Н. Мезомасштабные неоднородности коэффициента преломления в тропосфере и их влияние на распространение радиоволн УКВ-диапазона. – Томск: Том. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. – 199 с.

Киселев Олег Николаевич

Канд. техн. наук, доцент, ст. науч. сотр. НИИ радиотехнических систем ТУСУРа
Тел.: (3822) 41-38-89
Эл. почта: rwplab@ms.tusur.ru

O.N. Kiselev

Regularity estimation of arrival angle fluctuations of VHF waves behind radio horizon on the basis of imitating experiment

The origin mechanism of slow fluctuations of radio waves arrival angle behind radio horizon is considered. Description of a model for calculation of the fluctuations characteristics is given. Regularity estimates of arrival angle fluctuations of VHF behind radio horizon are presented on the basis of imitating experiment. The calculation results well agree with the published experimental data.

Key words: angle-of-arrival, slow fluctuations, beyond radiohorizon, results of simulation, experimental data.