

ИЗМЕРЕНИЕ УГЛА МЕСТА ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ДИФРАКЦИОННОЙ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН

В. Б. Разказовский, Ю. Ф. Логвинов

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

В приближении многократной дифракции Френеля на полуплоскостях численным методом исследованы особенности пеленгования источника излучения СВЧ радиоволн над поверхностью моря с ветровым волнением при малых углах скольжения и малых высотах над поверхностью. Показано, что такая модель не противоречит экспериментальным данным по пеленгованию источника излучения при высотах, сравнимых с высотой морских волн. Ил. 8. Библиогр.: 18 назв.

Ключевые слова: дифракция, морская поверхность, малые углы скольжения.

При изучении распространения метровых и более коротких радиоволн на сухопутных трассах со сложным рельефом во многих случаях отмечалось, что зависимость амплитуды поля от высоты подобна существующей при дифракции Френеля на полуплоскости [1-5]. Такие высотные структуры возникали тогда, когда на трассе распространения находились либо элементы рельефа местности типа холмов и горных вершин, либо трассу пересекали лесополосы или опушки леса. При пеленговании в таких условиях возникали значительные ошибки определения как угла места, так и азимутального направления на источник излучения [4-6].

В ряде случаев, например, при распространении в гористой местности для объяснения наблюдаемых особенностей поля используется гипотеза о дифракции Френеля последовательно на нескольких вершинах [2], и для расчета множителя ослабления предложен ряд методов, например [7-10]. Логическим развитием такого подхода явилось применение приближения многократной дифракции Френеля к распространению радиоволн в городской местности [11], когда количество препятствий на трассе велико.

В наших работах [12-14] обосновано применение модели многократной дифракции Френеля к описанию характеристик поля радиоволн см и мм диапазонов длин волн над поверхностью моря с ветровым волнением и показано, что такой подход позволяет объяснить экспериментально наблюдаемые особенности множителя ослабления поля на высотах, сравнимых с высотой морских волн.

Учитывая достаточно большое количество трасс, на которых доминирующим механизмом влияния на распространение радиоволн является однократная или многократная дифракция Френеля на деталях рельефа местности или поверхности, представляется необходимым проанализировать особенности работы в этих условиях пе-

ленингационных систем, в том числе использующих один из широко применяемых методов снижения ошибок пеленгования – внеосевой метод. При анализе ограничимся только составляющей ошибок пеленгования в вертикальной плоскости, которая, как показано в ряде теоретических и экспериментальных работ (см., например, [3-5]), существенно превосходит ошибки пеленгования в горизонтальной плоскости.

Анализ начнем с исследования особенностей пространственной структуры поля при распространении радиоволн на трассе с одиночным или несколькими последовательно расположенными препятствиями, предполагая, что для них выполняются условия работ [1-3], и потому правомерна замена реальных препятствий непрозрачными полуплоскостями (далее – экранами). Поскольку наибольший интерес представляют особенности пеленгования в вертикальной плоскости, т. е. по углу места, будем рассматривать двумерный случай, схема трассы для которого показана на рис. 1, а (одиночное препятствие) и рис. 1, б (группа препятствий типа городских строений). Вначале при анализе физической стороны явлений для упрощения расчетов будем предполагать все экраны, образующие группу, эквидистантными и равновысокими; влияние неэквидистантности и случайных высот будут рассмотрены позже. В случае одиночного экрана прямые PR и PT (см. рис. 1, а), проведенные через вершину препятствия из точек приема и излучения, являются геометрическими границами тени, и структура поля при выполнении неравенств

$$\frac{h_{T,R}}{D_{T,R}} \ll 1, \quad D_{T,R} \gg \lambda, \quad h_{T,R} \gg \lambda, \quad \psi \ll 1 \quad (1)$$

и критериев работ [1, 3] описывается дифракцией Френеля на непрозрачной полуплоскости. В (1) λ – длина волны, смысл остальных параметров понятен из рис. 1, а.

В зависимости от значения параметра

$$u = \psi \sqrt{\frac{k D_i (D - D_i)}{2 D}} \approx \left(\frac{h_T - h_i}{D - D_i} + \frac{h_R - h_i}{D_i} \right) \sqrt{\frac{k D_i (D - D_i)}{2 D}}, \quad (2)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

различают следующие области пространства:

– освещенная область пространства, характеристики поля в которой определяются, в первую очередь, влиянием среды распространения и многолучевым распространением над поверхностью раздела:

$$u \gg 1; \quad (3, а)$$

– переходная область:

$$u > 1; \quad (3, б)$$

– область полутени:

$$1 > u > -1; \quad (3, в)$$

– область глубокой тени, дифрагированное поле в которой имеет очень низкую интенсивность, и работа в ней радиосистем связана с использованием полей, проникающих за счет рассеяния в тропосфере или отражения от ионосферы:

$$u \ll -1. \quad (3, г)$$

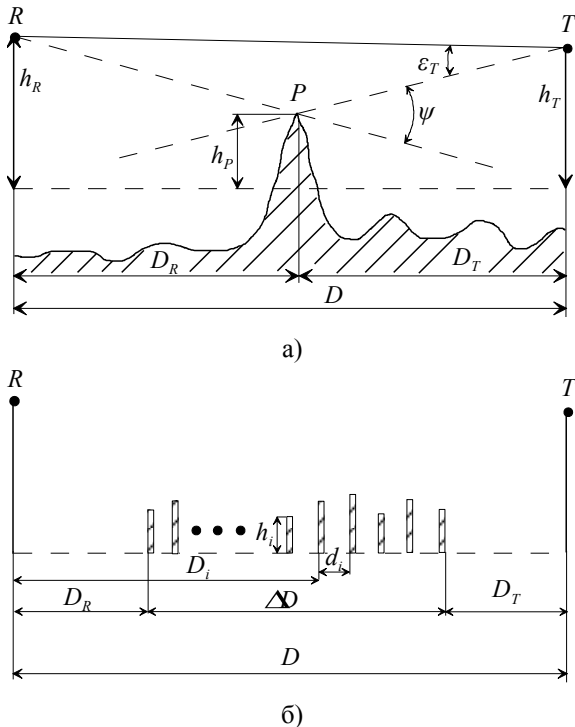


Рис. 1. Схема трассы распространения радиоволн: а) – одиночное препятствие; б) – группа препятствий типа городских строений

При группе препятствий, как показано в [4] и ряде других экспериментальных работ, предельными в некотором смысле являются две ситуации. При первой компактная группа препятствий занимает малую часть общей протяженности трассы. К таким, например, относятся лесополосы, группы компактно расположенных строений и тому подобные объекты. Высотная структура поля за такими объектами, по крайней мере, при значениях параметра u , не превышающих нескольких единиц, близка к картине дифракции Френеля на полуплоскости [1, 4, 5]. Противоположным рассмотренному является случай, когда препятствия заполняют трассу на всем ее протяжении. Такие условия имеют место при распространении над населенными пунктами, в частности, ряд авторов показывают применимость модели многократной дифракции Френеля к расчету уровней сигналов мобильной связи в условиях городской застройки [10].

Рассмотрим влияние дифракции на одиночном экране и на группе экранов на углы прихода радиоволн в точку наблюдения, находящуюся в области полутени или вблизи от нее. Особенности методики численного расчета поля при многократной дифракции Френеля изложены в наших работах [13, 14]. В них же проанализированы характеристики множителя ослабления как в функции высоты точки наблюдения, так и в зависимости от других параметров трассы. Локальное направление распространения волны в вертикальной плоскости для точки наблюдения на высоте h определялось как

$$\Theta(h) = \frac{1}{k} \frac{d\varphi(h)}{dh}, \quad (4)$$

где $\Theta(h)$ – угол между направлением распространения волны, т. е. нормалью к фазовому фронту волны в рассматриваемой точке, и горизонтальной осью координат; $\varphi(h)$ – фаза поля в функции высоты точки наблюдения.

Первичными данными численных расчетов являлись массивы значений комплексных амплитуд поля в точке наблюдения как функций номера отсчета n при шаге Δh

$$\dot{U}(h) \equiv \dot{U}(\Delta h \cdot n) \equiv \dot{U}(n) \equiv \text{Re } \dot{U}(n) + i \text{Im } \dot{U}(n),$$

через вещественную и мнимую части которых оценка производной фазы по высоте может быть представлена в виде

$$\frac{d\varphi}{dh} \approx \frac{\varphi[h \cdot n] - \varphi[h(n-1)]}{\Delta h} = \frac{\varphi(n) - \varphi(n-1)}{\Delta h} = \frac{1}{\Delta h} \arctg \left[\frac{\text{Im } \dot{U}(n) \text{Re } \dot{U}(n-1) - \text{Re } \dot{U}(n) \text{Im } \dot{U}(n-1)}{\text{Re } \dot{U}(n) \text{Re } \dot{U}(n-1) + \text{Im } \dot{U}(n) \text{Im } \dot{U}(n-1)} \right]. \quad (5)$$

Преимуществом использования (5) вместо вычисления $\varphi(h) = \varphi(\Delta h \cdot n)$ и последующего их попарного вычитания для оценки производной фазы по высоте является отсутствие у функции (5) скачков в точках $\varphi(n) = \pm\pi$.

Исходными при расчетах были следующие параметры трассы, которые, с одной стороны, соответствовали реально встречающимся в практике наземных радиолокационных систем, а с другой стороны, позволили получить достаточно точные и представительные результаты при приемлемых требованиях к ЭВМ и затратах машинного времени: длина волны $\lambda = 1$ см, протяженность трассы $D = 1$ км, интервал изменения высоты точки наблюдения с шагом 2,5 см составлял 20 м. Результаты расчетов для одиночного экрана, расположенного по дальности в центре трассы, приведены на рис. 2, а, по оси абсцисс которого отложены значения высоты точки наблюдения в метрах, а по оси ординат – значения углов распространения волны в точке наблюдения. Кривыми 1 и 2 обозначены углы прихода при высоте излучателя 0 м (кривая 1) и 2 м (кривая 2). Границы тени соответствуют при этом приемные высоты 4 и 2 м, а значению $u = 1$ – высоты 5,26 и 3,26 м. Прямая 3 показывает, каким было бы направление распространения, если бы источником цилиндрической волны являлась прямолинейная граница экрана, а прямая 4 соответствует направлению распространения волн от источника излучения при его высоте 0 м в отсутствие экрана, т. е. в условиях свободного пространства.

Из графиков видно, что в области выше границы тени угол прихода осциллирует вокруг существующего в свободном пространстве с амплитудой осцилляций, не превышающей одной угловой минуты, причем в рассматриваемом приближении дифракции Френеля эта амплитуда не изменяется с ростом параметра дифракции. В области $u < 0$ происходит асимптотическое сближение направлений распространения дифрагировавшей волны и так называемой краевой волны [15], источником которой является граница экрана. Из этого следует, что в области ниже границы тени при пеленговании будет определяться направление не на первичный источник излучения, находящийся в т. T (рис. 1), а на границу препятствия. Эта особенность пеленгования на реальных наземных трассах в области полутени и тени ранее отмечалась в ряде экспериментальных исследований [4, 5].

На рис. 2, б аналогичные результаты приведены для случая группы препятствий, моделируемых системой из десяти равновысоких эквидистантных экранов с высотой границ 2 м, расстояния между экранами составляют 90 м, а удаления крайних из них от позиций излучателя и точки наблюдения равны 100 м. Расчет выполнен

для трех значений высоты излучателя: 1 м (кривая 1), 2 м (кривая 2) и 4 м (кривая 3). Прямая 4 на этом рисунке показывает направление прихода волны от края ближайшего к точке наблюдения экрана, а прямые 5 и 6 – направление прихода волн в свободном пространстве от источника излучения при его высотах 1 и 4 м соответственно. При высоте излучателя 1 м граница тени формируется ближайшим к нему экраном, ее высота в месте приема составляет 11 м. При $h_T = 2$ м она совпадает с линией границ экранов.

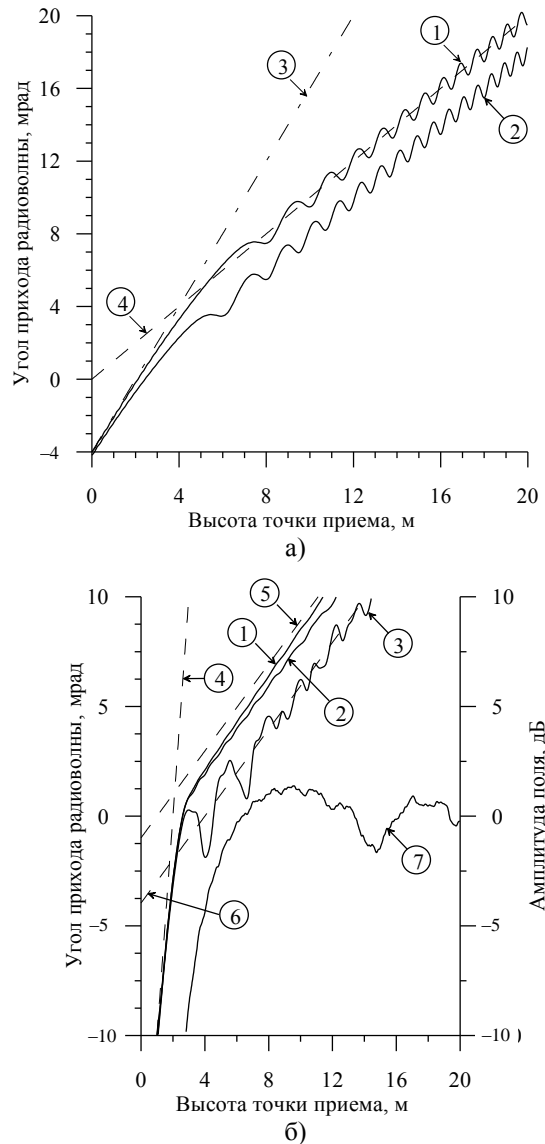


Рис. 2. Углы прихода и амплитуда поля радиоволны при дифракции Френеля: а) – одиночный экран; б) – группа из 10 эквидистантных равновысоких экранов

Начиная с высоты около 2,2 м при $h_T = 4$ м для точки приема и для всех экранов, выполняется условие $u > 1$. Как видно из графиков (кривые 1, 2, 3), ниже границы тени, как и в случае

одиночного экрана, направления прихода дифрагированных волн асимптотически стремятся к углу, соответствующему волне, излученной краем ближайшего к точке наблюдения экрана (прямая 4). Как показывает анализ, в более общем случае неравновысоких экранов доминирующую роль будет играть граница экрана, для которого дифракционный параметр выражения (2) имеет наименьшее значение, т. е. создающего более глубокую тень. Выше границы тени направление прихода дифрагированной волны практически совпадает с направлением прихода в свободном пространстве непосредственно от источника (прямые 5, 6), причем осцилляции, имевшие место в предыдущем случае одиночного экрана, отсутствуют (они появляются при значительно больших высотах, соответствующих превышению границы тени от ближайшего к источнику излучения экрану). При источнике излучения, находящемся выше плоскости границ экрана и $u \gg 1$, зависимость направления прихода от высоты имеет осцилляции (кривая 3), природа и характеристики которых аналогичны случаю влияния плоской границы раздела сред, совпадающей с плоскостью границ экранов. Заметим, что точка перегиба кривых 1, 2 лежит в области сравнительно низких интенсивностей дифракционного поля, что следует из зависимости нормированной амплитуды поля от высоты точки наблюдения (кривая 7) при высоте излучателя 2 м.

До сих пор рассматривалось влияние дифракции на локальные направления распространения волны в точке наблюдения. При измерении направлений на источник излучения реальным пеленгатором в большей или меньшей мере будет проявляться усредняющее действие апертуры приемной антенны. Обычно в пеленгаторах радиолокационных систем см и мм диапазонов длин волн применяются антенны с шириной диаграммы направленности $0,5 \div 2^\circ$, которой соответствуют размеры апертуры $(30 \div 120) \lambda$, причем, например, у бортовых наземных и авиационных систем размер антенны часто не должен превышать $0,5 \div 1$ м. При моделировании сплошная апертура пеленгационной антенны заменялась эквидистантно распределенными по высоте дискретными ненаправленными приемными элементами. При используемом нами числе элементов 13, расстоянии между соседними элементами 5 см (т. е. 5λ) и распределении поля по апертуре в форме функции Хемминга диаграмма направленности антенны по уровню -3 дБ составляла $20,5$ мрад, а уровень боковых лепестков был менее -38 дБ. Угловое расстояние между повторяющимися главными максимумами ДН (диаграммы направленности) составляло 200 мрад, что исключало влияние на результаты пеленгования даже ближайших к используемому повторных лепестков, так как существенно превышало

угловые размеры зоны, в которой находился как источник излучения, так и границы экранов.

Результаты численного моделирования пеленгования источника излучения разностно-фазовым методом антенной системой с диаметрами апертур каждой из антенн 60λ и разнесением их центров по высоте на 10 см иллюстрируются рис. 3, 4.

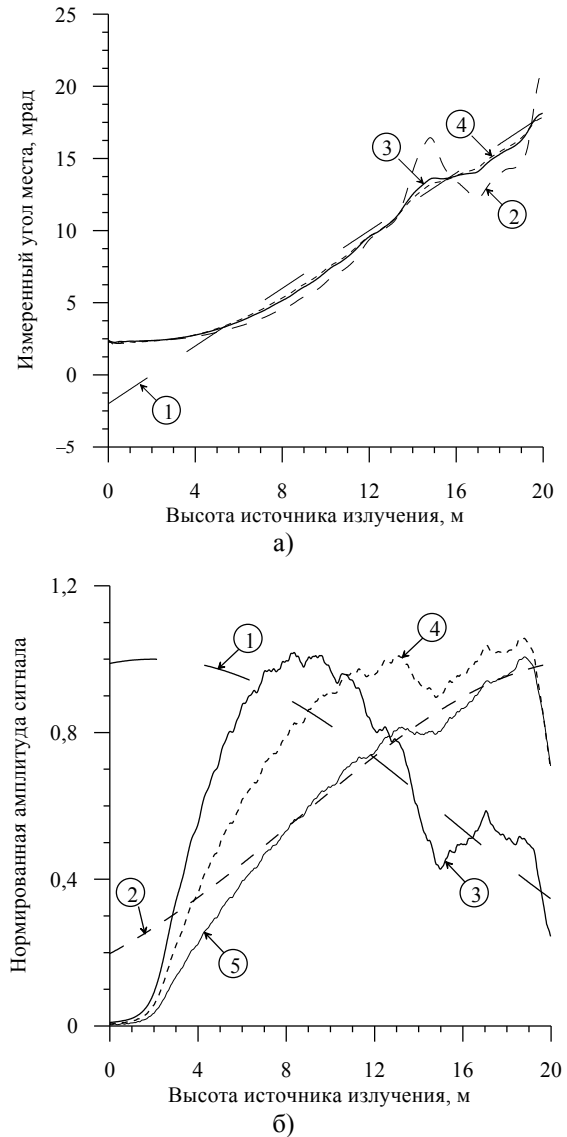


Рис. 3. Влияние группы из 10 равновысоких эквидистантных экранов на зависимость от высоты источника излучения характеристик поля для высоты центра приемной антенны 2 м при различной ориентации максимума диаграммы направленности приемной антенны: а) – измеренные углы места; б) – нормированные амплитуды сигнала

На рис. 3, а приведены графики текущих значений измеренного угла места в функции высоты излучателя при высоте центра пеленгационной антенны 2 м. Поскольку высота границ всех экранов также равнялась 2 м, то центр антенны лежал в плоскости границ экранов. При нулевой высоте

источника излучения практически вся апертура антенны пеленгатора находится ниже границы тени, и при подъеме излучателя постепенно сокращается доля затененной части апертуры антенны. При достижении высоты 5,2 м граница тени даже от ближайшего к пеленгатору экрана оказывается ниже нижней границы апертуры. Рассмотрим, что происходит с пеленгом (рис. 3, а) и амплитудой принятого сигнала (рис. 3, б) при изменении высоты источника излучения. Поскольку на уровень принятого сигнала и результаты пеленгования сильно влияет ориентация ДН антенны, исследуются два случая пеленгования: при горизонтально ориентированной оси ДН и при ее отклонении вверх на угол порядка полуширины ДН. Отклонение оси вверх, ослабляющее влияние переизлучения препятствиями, соответствует так называемому внеосевому измерению угла места и находит широкое применение на практике; отклонение вниз вызывается, в основном, несовершенством работы системы стабилизации антенны, реже – специальными соображениями.

На рис. 3, а прямая 1 показывает точное значение направления на источник излучения, т. е. пеленг в условиях свободного пространства, кривые 2, 3, 4 соответствуют углам возвышения оси 0° (горизонтально), 15 и 20 мрад. Из графиков видно, что при погружении источника в тень его пеленг перестает изменяться и асимптотически приближается к некоторому фиксированному значению, мало отличающемуся от направления на вершину препятствия. При высоте источника излучения, когда нижний край апертуры антенны выходит из области геометрической тени (примерно 5,2 м) форма зависимости пеленга от высоты становится осциллирующей, подобной зависимости при пеленговании над плоской границей раздела. Наклон луча вверх на угол 15 мрад приводит к существенному уменьшению амплитуды осцилляций: если при горизонтальном положении оси луча первый максимум соответствовал отклонению от точного направления примерно на 4,5 мрад, то при приподнятом луче он составил около 1 мрад. Увеличение угла возвышения до 20 мрад приводит к уменьшению ее еще примерно вдвое. При этом вид кривых вблизи границы тени и ниже нее практически не изменяется.

Влияние наклона максимума ДН на амплитуду принимаемого сигнала иллюстрируется рис. 3, б. Кривые 1 и 2 соответствуют изменению уровня сигнала в свободном пространстве, т. е. показывают форму ДН при углах $\varepsilon = 0$ и $\varepsilon = 15$ мрад в отсутствие препятствий. При дифракции на десяти экранах, как видно из сравнения кривых 3 (горизонтальный луч) и 4 (угол возвышения $\varepsilon = 15$ мрад), происходит незначительное снижение амплитуды сигнала (примерно на $\frac{1}{3}$) при малых высотах и возрастание его более чем в

два раза по сравнению со случаем $\varepsilon = 0$ (кривая 3) в окрестностях максимума ДН.

Дальнейшее увеличение угла возвышения сопровождается существенным (более чем в два раза) снижением уровня принятого сигнала в широком интервале высот источника излучения (кривая 5).

Аналогичные по содержанию зависимости для высоты центра антенны пеленгатора 4 м приведены на рис. 4. В этом сигнале практически при всех высотах излучателя, за исключением начального участка высотой около 2 м, линия визирования излучатель – пеленгатор лежит выше границы тени, и измеренные значения пеленга осциллируют вокруг точного значения.

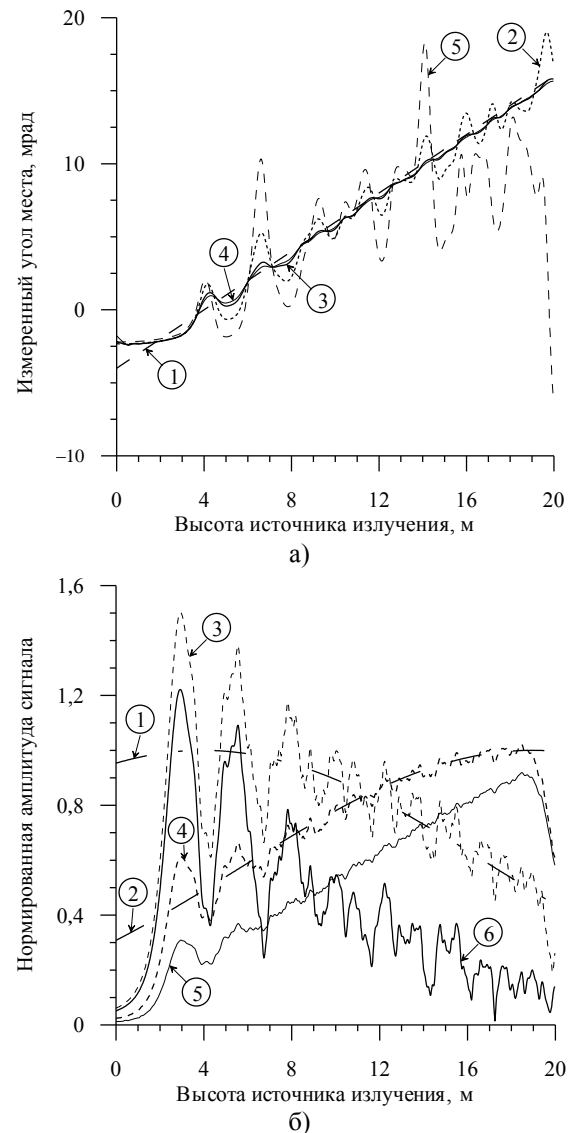


Рис. 4. Влияние группы из 10 равновысоких эквидистантных экранов на зависимость от высоты источника излучения характеристик поля для высоты центра приемной антенны 4 м при различной ориентации максимума диаграммы направленности приемной антенны: а) – измеренные углы места; б) – нормированные амплитуды сигнала

Как и в предыдущем случае (рис. 3, а), амплитуда осцилляций существенно уменьшается при отклонении луча вверх, это видно при сравнении кривой 2 (угол возвышения ДН 0°) с кривыми 3 и 4 (углы возвышения ДН 15 и 20 мрад соответственно). И наоборот: при отклонении луча вниз на 10 мрад (кривая 5) ошибки возрастают почти в три раза. В области высот источника излучения, когда значительная часть пеленгационной антенны оказывается в области тени, характер зависимости ошибок пеленгования от высоты источника аналогичен рассмотренному при анализе рис. 3, а. На рис. 4, б приведены зависимости, аналогичные рис. 3, б, дополненные кривой 6 для случая наклона луча пеленгационной антенны вниз на 10 мрад. Из вышеизложенного следует практически важный вывод: эффективность внеосевого метода пеленгования, разработанного для случая пеленгования над поверхностью моря при действии интерференционного механизма формирования поля, остается высокой и в случае механизма многократной дифракции.

Заметим, что угол возвышения в 15 мрад, составляющий 0,73 ширины ДН и использованный при расчете графиков рис. 3 и 4, близок к оптимальному значению, рекомендованному в [16, 17] для случая влияния отражения от шероховатой плоской поверхности (рекомендованное значение около 14 мрад).

Далее рассмотрим случай, когда высоты экранов являются независимыми случайными величинами с нормальным законом распределения. Остальные параметры трассы, а также метод пеленгования, база разностно-фазового пеленгатора и размер субапертур приемных антенн, когда это не оговорено специально, остались прежними. С целью сокращения объема вычислений при наборе статистических данных для каждого комплекта параметров ограничимся пятью независимыми реализациями ансамблей высот экранов, уменьшив до 10 м диапазон изменения высоты излучателя и увеличив ее шаг до 0,5 м. В разных вариантах расчетов использовались три значения среднеквадратического отклонения высот σ_h экранов от одинакового для всех среднего значения равного 0 м, а именно 0,1; 0,3 и 0,5 м. Критериями, характеризующими степень влияния разброса высот экранов на дифрагированное поле, являются следующие параметры:

– параметр, аналогичный параметру Релея для шероховатых поверхностей [12]

$$q_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \sigma_h \sin \psi; \quad (6)$$

– параметр, характеризующий отношение среднеквадратического отклонения высот экранов σ_h к поперечному размеру первой зоны Френеля a_0

$$q_2 = \frac{\sigma_h}{a_0}, \quad (7)$$

где

$$a_0 = \sqrt{\frac{\pi D_i(D - D_i)}{kD}}. \quad (8)$$

Здесь ψ – угол скольжения по отношению к горизонтальной границе, соответствующей средней высоте экранов; D_i – расстояние до рассматриваемого экрана. Наибольшими значениями q_1 , имеющим место при максимальных используемых высотах излучателя и приемника для принятой при моделировании протяженностью трассы и выбранных для расчета значениях σ_h , являются 0,75 (при $\sigma_h = 0,1$ м); 2,63 (при $\sigma_h = 0,3$ м) и 3,677 (при $\sigma_h = 0,5$ м). Это означает, что только при наименьшем значении разброса высот экранов их влияние на дифрагированное поле будет частично когерентным, в то время как в остальных случаях создаваемые возмущения поля (и, следовательно, пеленгов) будут суммироваться как независимые воздействия. Радиус первой зоны Френеля минимален для крайних экранов и равен 0,66 м. Это означает, что возмущения поля, пропорциональные затенениям первой зоны Френеля экранами, также значительны и будут зависеть, в первую очередь, от разброса высоты крайних экранов. Сказанное подтверждается результатами моделирования, приводимыми на рис. 5-8.

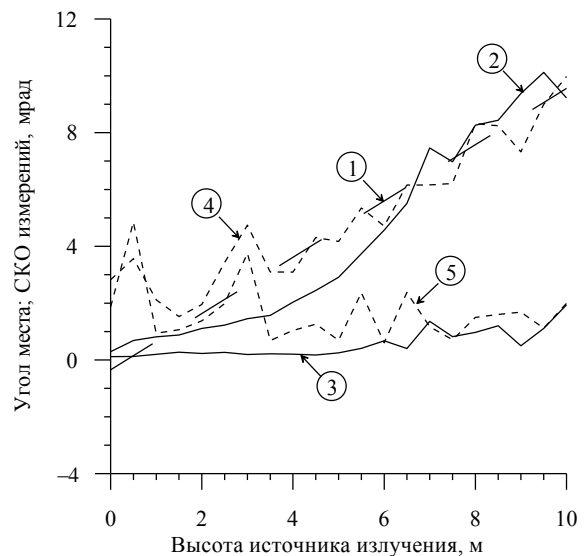


Рис. 5. Средние значения измеренных углов места и их СКО при высоте центра пеленгационной антенны 0,35 м

На рис. 5 показаны зависимости измеренного угла места от высоты излучателя при высоте центра пеленгационной антенны 0,35 м. Прямая 1 соответствует истинным (геометрическим) значениям угла места излучателя, кри-

вые 2, 3 являются средним значением и среднеквадратическим отклонением (СКО) измеренного угла места от его среднего значения при $\sigma_h = 0,1$ м, а кривые 4 и 5 соответствуют тем же величинам при $\sigma_h = 0,5$ м.

Из графиков видно, что при $\sigma_h = 0,1$ м зависимость средних значений измеренных углов подобна приведенной на рис. 3 для равновысоких экранов (с учетом отличия начальных высот центра пеленгационной антенны и излучателя), а значения СКО случайной составляющей (кривая 3) не превышают 2 мрад. При $\sigma_h = 0,5$ м на высотах до 3...4 м, где на результаты пеленгования доминирующее влияние оказывает высота первого, ближайшего к пеленгатору экрана, СКО измеренных углов места достигает 4...6 мрад, что соответствует случайным изменениям угловой высоты экрана (около 5 мрад). Случайный характер изменения в функции высоты средних значений углов места связан, по-видимому, с недостаточным объемом статистики (оценки рассчитывались по 5 независимым реализациям). При высоте центра пеленгационной антенны 2 м и $\sigma_h = 0,1$ м (рис. 6) как ошибки измерения среднего значения угла места, так и их СКО возрастают по сравнению с приведенными на рис. 5, что является следствием примерно одинакового влияния нескольких крайних экранов на поле в точке приема. В то же время при $\sigma_h = 0,5$ м обе составляющие ошибки измерения угла места заметно уменьшаются. Это объясняется тем, что при таком разбросе высот, как следует из (6), возмущения поля, создаваемые экранами, взаимно не когерентны, а влияние экранов, ближних к пеленгатору, ослабевает вследствие роста для них угла дифракции.

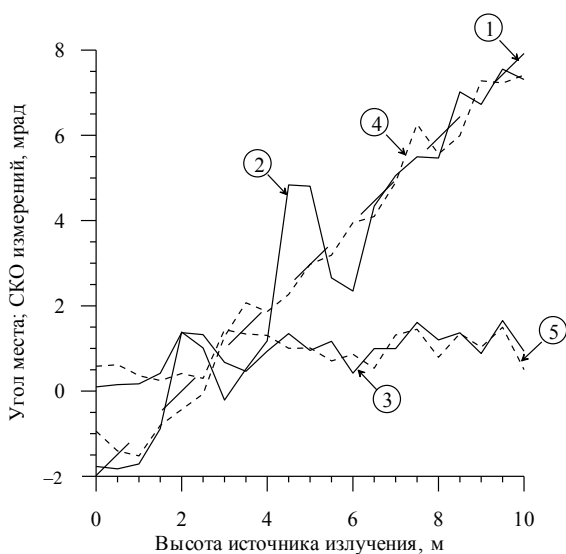


Рис. 6. Средние значения измеренных углов места и их СКО при высоте центра пеленгационной антенны 2 м

Рассмотрим влияние на результаты пеленгования размера апертуры пеленгационной антенны, т. е. фактически ширины ее диаграммы направленности, и наклона ее оси по отношению к горизонтальной оси, которая в нашей модели совпадает с линией средних высот экранов. Рис. 7 показывает зависимость СКО ошибок измерения углов прихода от высоты источника излучения при различных размерах апертур приемных антенн.

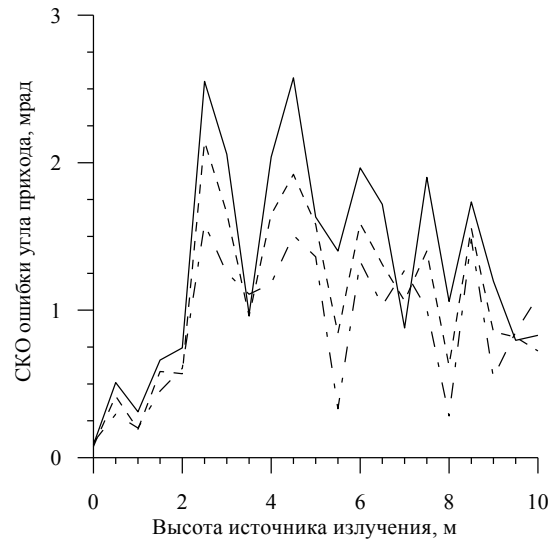


Рис. 7. Зависимость среднеквадратических значений ошибок измерения углов прихода радиоволны в зависимости от высоты источника при различных размерах апертур приемных антенн

Высота центра пеленгационной антенны составляла 2 м и $\sigma_h = 0,3$ м. Сплошная кривая соответствует диаметру апертуры 0,1 м, штриховая – 0,5 м и штрихпунктирная – 1 м. Видно, что во всем диапазоне изменений высот источника излучения увеличение апертуры антенны приводит к вполне ожидаемому снижению среднеквадратических ошибок измерения угла места.

На рис. 8 представлены зависимости среднеквадратических ошибок измерения угла места в зависимости от высоты источника излучения при различных наклонах приемной антенны в угломестной плоскости при $\sigma_h = 0,3$ м и высоте центра пеленгационной антенны 2 м.

Сплошная кривая показывает зависимость СКО ошибок измерений угла места источника излучения при наклоне антенной системы на -10 мрад, т. е. максимум диаграммы направленности антенной системы был наклонен в сторону границ экранов. Штриховая кривая соответствует наклону 0 мрад и штрихпунктирная кривая $+15$ мрад. Из рис. 7, 8 видно, что влияние как ширины диаграммы направленности, так и наклона ее

оси наиболее четко проявляются при высоте излучателя более 2 м (высота центра пеленгационной антенны при этих расчетах также составляла 2 м). При таких высотах прямая, соединяющая излучатель и приемник, на всем протяжении трассы находится на расстояниях от границ экранов, превышающих радиус первой зоны Френеля, равным примерно 1,1 м в центре трассы и 0,66 м в местах расположения крайних экранов. Это означает, что здесь выполняется неравенство (3, б) и работа происходит в переходной зоне [14], где применимо многолучевое приближение; эффективность применения метода внеосевого измерения угла места в таких условиях хорошо известна [16-18].

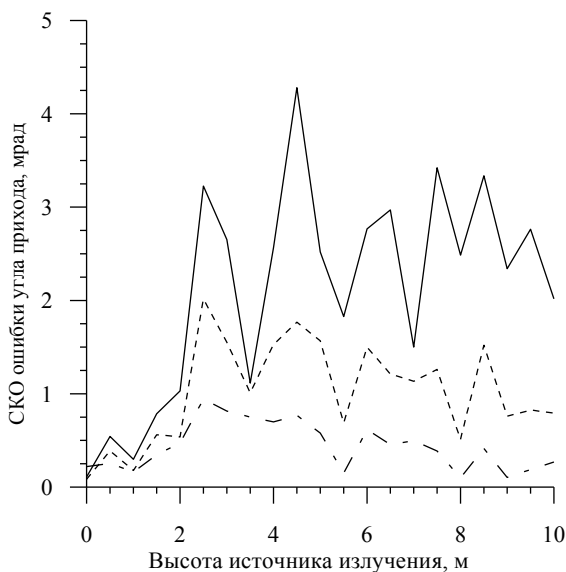


Рис. 8. Зависимость среднеквадратических значений ошибок измерения углов прихода радиоволны в зависимости от высоты источника при различных наклонах приемной антенной системы в угломестной плоскости

Выводы. С использованием численного метода моделирования многократной дифракции Френеля на последовательности экранов исследованы особенности измерения угла места источников излучения при малых углах скольжения в окрестностях границ тени.

Показано, что при измерении угла места источника излучения пеленгатором, находящимся ниже границы тени, создаваемой одиночным препятствием или их группой, измеренное значение оказывается близким к направлению на границу ближайшего к приемнику экрана. Выше границы тени результаты измерения в среднем соответствуют направлению на источник излучения, а осцилляции вокруг этого направления подобны существующим при пеленговании над шероховатой в среднем плоской поверхностью раздела.

В переходной области, когда расстояние от линии визирования пеленгатор – излучатель

на всей трассе превышает радиус первой зоны Френеля, существенно повысить точность измерения угла места позволяет применение внеосевого метода пеленгования. Таким образом, этот метод оказывается эффективен как в области влияния многолучевого распространения над поверхностью раздела, так и при многократной дифракции.

1. Dougherty H. T., Maloney L. J. Application of Diffraction by Convex Surfaces to Irregular Terrain Situation // Radio Science Journ. of Res. NBP/USNC-URSI. – 1964. – 68D, No. 2. – P. 239-250.
2. Калинин А. И. Распространение радиоволн на трассах наземных и космических радиолиний. – М.: Связь, 1979. – 296 с.
3. Barton D. Low-Altitude Tracking over rough Surfaces. Theoretical prediction // Conf. Proc. "EASCON'79, October 9-11, Arlington, VA". – 1979. – 2. – P. 224-234.
4. Кулемин Г. П., Разказовский В. Б. Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью Земли под малыми углами. – Киев: Наук. думка, 1987. – 230 с.
5. Разказовский В. Б. Поле миллиметровых радиоволн над сушей при малых углах скольжения // Зарубеж. радиоэлектрон. Успехи совр. радиоэлектроники. – 2000. – № 3. – С. 3-34.
6. Гонтарь И. Д., Кивва Ф. В., Разказовский В. Б. и др. Экспериментальное изучение влияния неоднородной трассы на азимутальные ошибки пеленгования // Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2006. – 11, № 2. – С. 222-228.
7. Pogorzelski R. J. A note on common diffraction link loss models. // Radio Science Journ. of Res. – 1982. – 17, No. 6. – P. 1536-1540.
8. Vogler E. An attenuation function for multiple knife-edge diffraction // Radio Science. – 1982. – 17, No. 6. – P. 1541-1546.
9. Andersen J. B. UTD Multiple-Edge Transition Zone Diffraction // IEEE Trans. Antennas Propagat. – 1997. – 45, No. 7. – P. 1093-1097.
10. Tzaras C., Saunders S. R. An Improved Heuristic UTD Solution for Multiple-Edge Transition Zone Diffraction // IEEE Trans. Antennas Propagat. – 2001. – AP-49, No. 12. – P. 1678-1682.
11. Walfisc H. L., Bertoni A. A theoretical Model of UNF Propagation in Urban Environments // IEEE Trans. Antennas Propagat. – 1988. – 36, No. 12. – P. 1788-1796.
12. Логвинов Ю. Ф., Педенко Ю. А., Разказовский В. Б. Дифракционная модель многолучевого распространения над неровной поверхностью при малых углах скольжения // Изв. вузов. Радиофизика. – 1996. – 39, № 5. – С. 547-558.
13. Разказовский В. Б., Логвинов Ю. Ф. Множитель ослабления радиоволн при распространении над морем под малыми углами скольжения: модель многократной дифракции // Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2007. – 12, № 1. – С. 168-176.
14. Разказовский В. Б., Логвинов Ю. Ф. Множитель ослабления радиоволн при распространении над морем под малыми углами скольжения: переходная зона // Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2007. – 12, № 1. – С. 177-184.
15. Уфимцев П. Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции. – М.: Сов. радио, 1962. – 243 с.
16. Barton D. K. Radar System Analysis and Modelling. – Artec House, Inc., 2005. – 700 p.
17. Dax P. R. Keep Track of that Low-Flying Attack. – Microwaves, 1976. – P. 36-50.
18. Разказовский В. Б., Педенко Ю. А. Сравнение методов пеленгования по углу места над морем // Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2004. – 9, № 1. – С. 216-227.

THE DIFFRACTION MODEL OF RADIOWAVE
PROPAGATION IN ELEVATION
MEASUREMENT OF TRANSMITTER

V. B. Razskazovsky, Yu. F. Logvinov

The elevation measuring of microwave transmitter above the sea surface with wind waves at small grazing angles and low altitudes have been studied in multiple Fresnel diffraction approach by means of numerical methods. It is shown that this model conforms to experimental data on measuring the elevation of transmitter at altitudes comparable to the sea wave height.

Key words: diffraction, sea surface, small grazing angles.

ВИМІР КУТА МІСЦЯ ДЖЕРЕЛА
ВИПРОМІНЮВАННЯ ПРИ ДИФРАКЦІЙНІЙ
МОДЕЛІ ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ

В. Б. Разказовський, Ю. Ф. Логвінов

У наближенні багаторазової дифракції Френеля на напівплощинах чисельним методом досліджено особливості пеленгування джерела випромінювання НВЧ радіохвиль над поверхнею моря з вітровим хвилюванням при малих кутах ковзання і малих висотах над поверхнею. Показано, що така модель не суперечить експериментальним даним з пеленгування джерела випромінювання при висотах, порівнянних з висотами морських хвиль.

Ключові слова: дифракція, морська поверхня, малі кути ковзання.

Рукопись поступила 3 июля 2008 г.