

РАСПРОСТРАНЕНИЕ И РАССЕЯНИЕ ВОЛН

УДК 621.371(260).029.65

В. Б. Разказовский, Ю. Ф. Логвинов

ОШИБКИ ПЕЛЕНГОВАНИЯ ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ ПО АЗИМУТУ ПРИ ВЛИЯНИИ ДИФРАКЦИИ РАДИОВОЛН НА ГРАНИЦЕ ПРЕПЯТСТВИЯ

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

В приближении дифракции Френеля на полуплоскости численным методом исследованы азимутальные ошибки пеленгования источника излучения СВЧ-радиоволн. Проанализировано влияние на азимутальные ошибки гладкого и шероховатого края экрана при его различных ориентациях по отношению к вертикальной плоскости падения волн. Ил. 9. Библиогр.: 18 назв.

Ключевые слова: дифракция, азимутальные ошибки, малые углы скольжения.

Влияние на распространение радиоволн дифракции на препятствии, близкой по своим свойствам к дифракции Френеля на границе непрозрачного экрана, известно давно; условия применимости такого подхода проанализированы, например, в работах [1, 2]. До 1980-х гг. основное внимание уделялось изучению влияния элементов рельефа (вершины холмов, горных хребтов) либо одиночных, либо двух-трех, на интенсивность поля в месте приема [3, 4]. Развитие систем телевидения, УКВ-связи в городах, а затем и мобильной связи стимулировало проведение исследований характеристик и механизмов распространения радиоволн в условиях городской застройки, когда на трассе прохождения сигнала от излучателя к приемнику обычно находятся препятствия, исключающие прямую видимость между ними. В качестве теоретического метода описания распространения в таких условиях было предложено применять модель многократной дифракции Френеля на непрозрачных экранах с горизонтальными прямолинейными границами, также были развиты соответствующие методы расчета [5–7].

Экспериментальные исследования распространения миллиметровых (мм) и сантиметровых (см) радиоволн над сушей и морем показали, что при малых, порядка единиц метров, высотах корреспондирующих пунктов во многих случаях влияние реальной поверхности раздела на работу радиосистем также может быть описано с использованием теории дифракции Френеля. Даже на равнинных трассах без явно выраженных пригорков формы зависимостей уровня поля и ошибок измерения угла места от высоты корреспондирующего пункта вблизи границы тени оказывались близкими к предсказываемым для модели дифракции Френеля. При наличии на трассе даже небольших холмиков, складок рельефа, опушек леса или лесополос (в период существования густого листового покрова) высотные

зависимости амплитуды сигнала и углов прихода становились такими, как при дифракции Френеля на краях экрана [8, 9]. Согласно данным о высотной структуре поля на волнах 8 и 4 мм, относящимся к местности с холмистым рельефом [9], в 54 % случаев наблюдались структуры типа дифракции Френеля и лишь в 19 % – типа интерференционной, характерной для поля над равнинными участками местности.

С самых ранних этапов изучения влияния распространения над поверхностью раздела на работу радиолокационных систем (см., например, [10]) известно, что наибольшие ошибки измерения угловых координат, сравнимые с шириной диаграммы направленности (ДН) антенны, имеют место при измерении углов прихода в вертикальной плоскости («углов места цели»). Именно они ограничивают минимальные высоты радиолокационного сопровождения целей и наведения средств их поражения, вследствие чего именно их изучению уделялось основное внимание исследователей и разработчиков. В рамках разрабатываемой модели угломестным ошибкам посвящена работа [11]. В отличие от них, ошибки измерения угловых координат в горизонтальной плоскости – азимутальные ошибки – составляют обычно лишь единицы угловых минут, как показали экспериментальные исследования, например, описанные в работах [8, 9, 12, 13]. В связи с этим они стали объектом исследований позже, при появлении и развитии систем высокоточного наведения. Методы теоретического описания и расчета характеристик азимутальных ошибок достаточно хорошо разработаны для области углов скольжения, где применимо приближение метода касательной плоскости [14] и отсутствуют затенения значительной части неровной поверхности раздела. Методы и некоторые результаты таких расчетов приведены, например, в работах [13–15].

Как показано в работе [16], при углах скольжения менее единиц градусов метод касательной плоскости не применим для описания распространения мм и см волн над реальными поверхностями суши и моря с ветровыми волнами. Показано, что альтернативой ему в этих условиях может служить представление электромагнитного поля над поверхностью как продукта дифракции Френеля на краях неровностей, а в случае морской поверхности – как продукта многократной дифракции Френеля на гребнях волн. В рамках такого подхода с использованием ряда упрощающих допущений о свойствах неровностей в работах [16, 17] получены оценки характеристик амплитуды поля и азимутальных ошибок при распространении над в среднем плоской шероховатой поверхностью раздела. Однако именно при радиолокации наземных или находящихся на высотах в единицы метров над поверхностью суши целей сильное влияние на распространение радиоволн оказывают отдельные неровности поверхности как естественного, так и антропогенного происхождения, а также строения и другие препятствия. Если площадь проекции такого объекта на плоскость фронта радиоволны сравнима с площадью первой зоны Френеля, а расстояние до нее от линии визирования цель – радиолокатор составляет менее нескольких радиусов первой зоны, то именно его влияние на интенсивность сигнала и ошибки измерения координат становится доминирующим. В таких условиях ошибки измерения азимута становятся аномально большими, сравнимыми с ошибками измерения угла места; примеры экспериментальных данных, полученных в таких ситуациях, приведены, в частности, в работах [8, 9].

В данной работе в приближении дифракции Френеля оцениваются ошибки измерения азимута при дифракции на границе непрозрачного экрана, причем, в отличие от наиболее часто исследуемого случая, когда плоскость экрана перпендикулярна линии визирования, а его граница горизонтальна, рассматривается более общий случай: плоскость экрана повернута вокруг вертикальной оси на некоторый угол, а ее граница, в том числе неровная, имеет наклон по отношению к горизонту. Такая модель охватывает достаточно большой круг встречающихся на практике случаев при работе в мм диапазоне волн.

Методика расчета и анализ результатов. Геометрия задачи схематически приведена на рис. 1. Координатную плоскость XOY в дальнейшем будем считать горизонтальной, а плоскость XOZ , в которой в точке $R(0, 0, Z_R)$ находится центр приемной антенны и в точке $T(D, 0, Z_T)$ – точечный излучатель, будем считать вертикальной. Плоскость экрана также является вертикальной и в общем случае образует угол α с координатной плоскостью YOZ . Ось волнистой границы экрана проходит через точку O' под углом наклона θ по отношению к плоскости XOY . Во вспомогательной системе координат $Z'O'Y'$ с началом в точке O' , совпадающей с плоскостью экрана, и осью Y' , являющейся осью границы экрана, форма волнистой границы выражается зависимостью

натной плоскостью YOZ . Ось волнистой границы экрана проходит через точку O' под углом наклона θ по отношению к плоскости XOY . Во вспомогательной системе координат $Z'O'Y'$ с началом в точке O' , совпадающей с плоскостью экрана, и осью Y' , являющейся осью границы экрана, форма волнистой границы выражается зависимостью

$$z'_S(y') = z_m \sin\left(\frac{2\pi}{L} y'\right), \quad (1)$$

где z_m – амплитудное значение отклонения границы экрана от оси $O'Y'$; L – пространственный период.

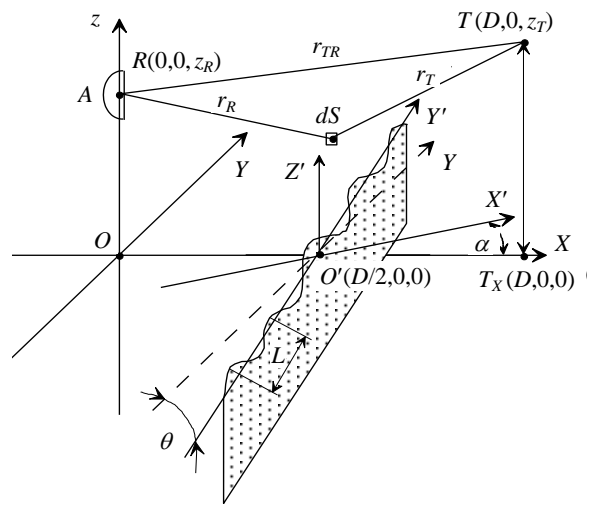


Рис. 1. Схема трассы

При расчетах использовались следующие значения параметров: длина волны 0,01 м; протяженность трассы $D = 1\,000$ м, высота центра приемной антенны 2 м (основная), 0,35 и 4 м (дополнительные); высота точечного изотропного излучателя $h_T = 0 \dots 20$ м; угол поворота плоскости экрана относительно координатной плоскости YOZ $\alpha = 0, 15, 30^\circ$; угол наклона прямолинейного края экрана или оси волнистого края экрана относительно плоскости XOY $\theta = 0, 15, 30, 45^\circ$; шаг (дискрет) изменения высоты излучателя 0,1; 0,5 м; шаг (дискрет) интегрирования в плоскости экрана $0,01 \times 0,01 \text{ м}^2$; шаг (дискрет) интегрирования в апертуре приемной антенны $0,01 \times 0,01 \text{ м}^2$; период гармонической составляющей границы экрана $L = 1,8$ м; амплитуда отклонений гармонической составляющей границы экрана от осевой прямой 5, 10, 15 см.

Применялись два метода расчета ошибок пеленгования. В основе первого лежит метод геометрической теории дифракции [18] в варианте для скалярного поля и освещенной области пространства. По нему рассчитывались как функ-

ции высоты излучателя комплексные амплитуды поля в двух точках, смещенных по отношению друг к другу в направлении оси OY . Расстояние между ними служило базой разностно-фазового пеленгатора, позволяющего определить направление прихода волны в горизонтальной (азимутальной) плоскости; оно задавалось равным 0,1 м. Как видно из рис. 2, пространственные масштабы изменения поля существенно превышают эту величину и, следовательно, при изотропных ДН приемных элементов результаты измерения таким пеленгатором соответствуют направлению нормали к фазовому фронту волны, приходящей в точку приема.

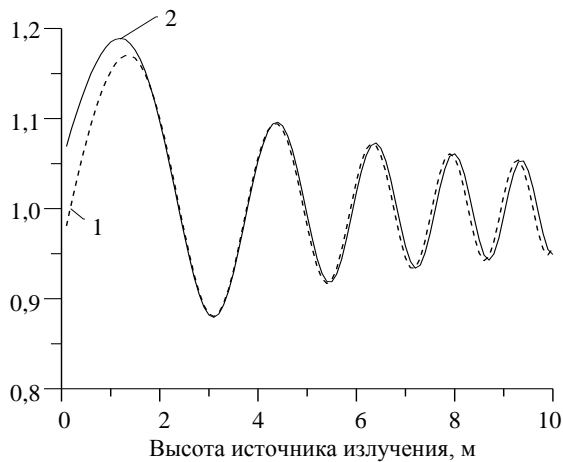


Рис. 2. Зависимость множителя ослабления амплитуды поля от высоты излучателя при различных ориентациях границы экрана: 1 – расчет по точной формуле при $\alpha = 30^\circ, \theta = 30^\circ$; 2 – расчет с использованием асимптотического приближения при $\alpha = 30^\circ, \theta = 30^\circ$

Сравнение кривых 1 и 2 показывает также, что при высотах излучателя более 2 м зависимости, полученные с использованием точного (интегрального) выражения для множителя ослабления и упрощенного с заменой интеграла Френеля его асимптотическим представлением, практически совпадают, а в области высот до 2 м – отличаются менее чем на 10%. Расчеты этим методом выполнялись только для случая прямолинейной границы экрана; они позволили установить следующие особенности ошибок пеленгования по азимуту. Во-первых, в отсутствие наклона границы экрана, т. е. при $\theta = 0$, в секторе углов поворота плоскости экрана $|\alpha| \leq 30^\circ$ (для больших значений α расчеты не производились) ошибки измерения азимута не превышают 10^{-2} мрад, что значительно ниже инструментальных ошибок существующих радиолокационных пеленгаторов и реально наблюдаемых при измерении угловых координат целей и источников излучения в условиях влияния поверхностей суши или моря [8, 9, 12, 13]. Существенное их возрастание происходит при наклон-

ной границе раздела, что видно из сравнения кривых 1, 3, 4, 5 рис. 3, на котором приведены зависимости азимутальных ошибок от высоты источника при четырех значениях угла наклона.

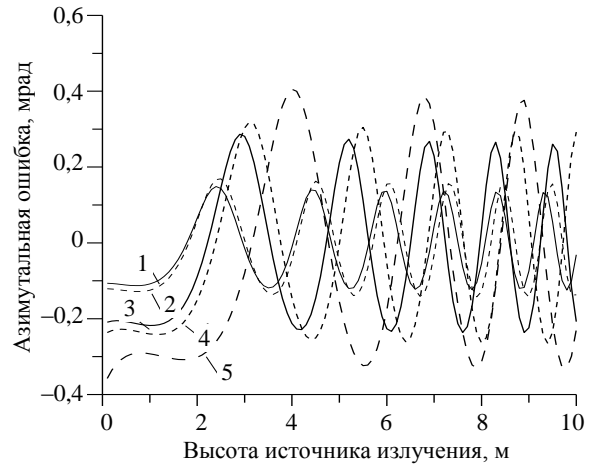


Рис. 3. Зависимости ошибок измерения азимута от высоты источника при различных ориентациях границы экрана: 1 – $\alpha = 0^\circ, \theta = 15^\circ$; 2 – $\alpha = 30^\circ, \theta = 15^\circ$; 3 – $\alpha = 0^\circ, \theta = 30^\circ$; 4 – $\alpha = 30^\circ, \theta = 30^\circ$; 5 – $\alpha = 30^\circ, \theta = 45^\circ$

Сравнение пар кривых 1, 2 и 3, 4, соответствующих одинаковым наклонам θ и разным углам поворота плоскости экрана α , показывает, что увеличение последнего приводит к незначительным смещениям кривых по высоте и небольшому возрастанию амплитудных значений ошибок.

Эти характеристики азимутальных ошибок не учитывают влияние на результаты пеленгования апертуры антенны, размеры которой могут быть сравнимыми с пространственным периодом изменений поля. Вследствие этого разным частям апертуры могут соответствовать разные условия облучения, и интегрирующее действие антенны может существенно влиять на результат. Особенно сильно этот эффект может проявиться, когда нижняя часть антенны оказывается вблизи границы тени или даже в тени. Оценки ошибок измерения азимута для таких ситуаций могут быть получены только численными методами; результаты их применения будут приведены позже. При расстоянии от границы тени края апертуры антенны, превышающем примерно радиус первой зоны Френеля, для оценки можно воспользоваться приближенным методом, считая приемные антенны точечными, но имеющими ДН, соответствующие выбранному размеру апертуры антенны. Основанием для этого является следующее. Как показано в геометрической теории дифракции, в частности, в работе [18], при оговоренном ранее условии достаточной удаленности линии визирования от границы экрана поле в точке приема может быть представлено суммой двух полей: невозмущенным полем свободного

пространства и полем так называемой краевой волны. Ее вторичным источником при сферической первичной волне является точка на границе экрана, соответствующая точке стационарной фазы при дифференцировании суммарного пути переизлученной волны вдоль границы экрана (уравнение для определения координаты этой точки приведены в работе [18]). Таким образом, механизм формирования поля в точке приема является двухлучевым, и влияние антенны на принятый сигнал может быть описано ее ДН.

При расчетах ДН предполагалась осесимметричной с зависимостью

$$G(\gamma) = \frac{1,25J_1(1,6\gamma\gamma_0^{-1})}{\gamma\gamma_0^{-1}}, \quad (2)$$

где γ – угол между осью ДН и направлением прихода луча; $J_1(\dots)$ – функция Бесселя первого порядка; γ_0 – полуширина ДН по уровню -3 дБ. Расчет выполнен для $\gamma_0 = 0,5^\circ$, что близко к значению этой величины для апертуры антенны, используемой при численном методе. Рассмотрены два варианта ориентации оси антенны. При первом ось антенны предполагалась ориентированной параллельно оси X , а при втором считалось, что она всегда направлена в точку, где находится излучатель; условно назовем это следящим режимом. Результаты расчета иллюстрирует рис. 4, на котором показаны ошибки измерения азимута в функции высоты излучателя при $\alpha = 0$, и $\theta = 30^\circ$ и двух указанных выше вариантах ориентации оси антенны. Из графиков видно, что при выбранной для расчета ширине ДН и фиксированной горизонтальной ориентации ее оси азимутальные ошибки незначительно уменьшаются с увеличением высоты излучателя. При ориентации оси антенны на источник излучения, что соответствует следящему режиму работы пеленгатора, скорость убывания ошибок существенно возрастает: при высоте 20 м их амплитудные значения меньше примерно в 12 раз, чем при ненаправленной антенне, и в 7 раз по сравнению со случаем горизонтальной ориентации оси ДН.

В основе второго метода лежит расчет комплексных амплитуд поля в элементах плоской апертуры приемной антенны путем численного интегрирования выражения, являющегося скалярной формой интеграла Кирхгофа–Гюйгенса:

$$U(\vec{R}) = -\frac{ik}{2\pi} \int_S \frac{e^{ik(r_T+r_R)}}{r_T r_R} ds, \quad (3)$$

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

где r_T, r_R – расстояние от точек R и T до элемента ds освещенной поверхности S , являющейся

продолжением плоскости экрана. Нижним пределом интегрирования является граница экрана z'_S .

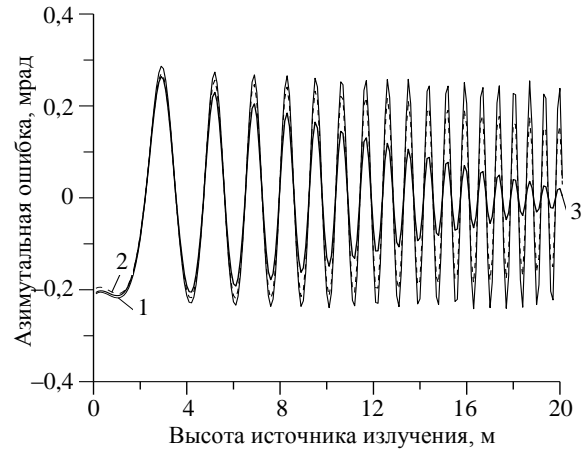


Рис. 4. Влияние на ошибки ДН и ориентации антенны: 1 – изотропная ДН; 2 – ось ДН направлена горизонтально; 3 – ось ДН антенны направлена на излучатель

Пределы интегрирования по x, y и верхний предел по z выбираются как компромисс: с одной стороны, их расширение обеспечивает повышение точности расчета, с другой, вызывает возрастание объема вычислений и, соответственно, затрат машинного времени. Пределы интегрирования выбирались такими, что учитывалось более 60 зон Френеля, а для ослабления влияния границы интегрирования в подынтегральное выражение в виде множителя вводилась предложенная в работе [6] «нейтрализующая» функция, обеспечивающая плавное уменьшение амплитуды поля при приближении к границам, соответствующим пределам интегрирования. Следуя рекомендациям упомянутой работы, выбирался и шаг (дискрет) интегрирования. Результирующая погрешность расчета дифрагированного поля не превышала 10%. Принятый сигнал на выходе приемной антенны формировался как сумма полей в элементах приемной антенны с весовой функцией Хемминга. ДН синтезированной таким способом антенны имела ширину около 1° в обеих плоскостях, а ее ось всегда была параллельна оси X , за исключением случая моделирования так называемого внеосевого метода сопровождения источника излучения. Для определения пеленга разностно-фазовым методом формировались два принятых сигнала, при расчете которых фазовые центры синтезированных апертур были смещены по отношению друг к другу параллельно оси Y на расстояние 0,1 м, являющееся базой разностно-фазового пеленгатора.

Результаты расчетов показывают следующее. Во-первых, принципиальным отличием от случая прямолинейной границы экрана является существование азимутальных ошибок значимой

величины даже при горизонтальной границе препятствия. Это видно из рис. 5, на котором показаны значения азимутальных ошибок при разных амплитудах волнистости края экрана и при различной его ориентации. Кривые 1 и 2 ориентированы строго перпендикулярно линии связи с нулевым наклоном ($\alpha = \theta = 0$) и отличаются только амплитудой шероховатости края экрана. Кривая 3 соответствует нулевому повороту экрана и наклону его на 15° ($\alpha = 0, \theta = 15^\circ$). Кривая 4 представляет азимутальные ошибки для экрана с нулевым наклоном края экрана и поворотом его относительно линии связи на 15° ($\alpha = 15^\circ, \theta = 0$).

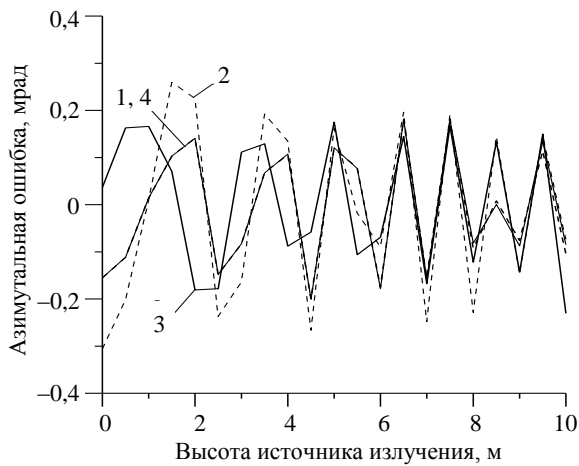


Рис. 5. Высотные зависимости ошибок измерения азимута источника излучения: 1, 3, 4 — амплитуда синусоидальной неровности края экрана 5λ (5 см); 2 — амплитуда синусоидальной неровности края экрана 10λ (10 см)

Наложение гармонической волны амплитудой 15 см на наклонный край экрана приводит к незначительным искажениям высотной зависимости ошибок по сравнению с прямолинейной границей, что следует из рис. 6.

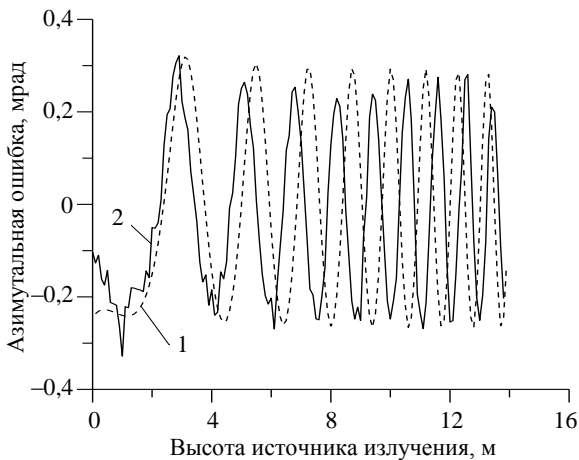


Рис. 6. Зависимости ошибок измерения азимута от высоты источника при различных видах границы экрана: 1 — гладкий экран $\alpha = 30^\circ, \theta = 30^\circ$; 2 — экран с волнистым краем амплитудой 15 см

Малая величина искажений в случае наложения на наклонный край синусоидальной неровности по сравнению с ошибками при горизонтальном крае объясняется тем, что амплитуда волнистости мала по сравнению с диаметром первой зоны Френеля, который в моделируемом нами случае составляет около 4,5 м. При этом изменение средней высоты границы экрана в ее пределах за счет наклона $15^\circ \div 30^\circ$ составляет примерно $1,2 \div 2,4$ м, чем и обусловлено доминирующее влияние этого фактора. Заметим, это применение приближения геометрической теории дифракции в рассматриваемом случае практически исключается из-за возможного появления нескольких переизлучающих точек и сложной формы каустик. Численные расчеты подтвердили также вывод о слабом влиянии на величину ошибок увеличения апертуры антенны до 1,1 м и соответствующего сужения ее ДН при неизменном горизонтальном положении ее оси, и наоборот, существенном повышении точности при подъеме оси ДН приемной антенны по углу места, что видно из рис. 7, 8. Кривые 1–3 на рис. 8 представляют азимутальные ошибки при ориентации оси ДН антенной системы на 25, 0 и -10 мрад соответственно. Ширина ДН составляла около 16 мрад (0,6 м диаметр апертуры), один экран располагался посередине трассы перпендикулярно линии связи с нулевым наклоном.

Численные расчеты показали также незначительное снижение азимутальных ошибок при увеличении высоты центра приемной антенны (рис. 9). Кривые 1–3 этого рисунка соответствуют высотам центра приемной антенны 0,35; 2 и 4 м. Принципиальным отличием азимутальных ошибок рассмотренной природы от ошибок, получаемых в рамках приближения касательной плоскости, является их существенно различная зависимость от высоты корреспондирующих пунктов.

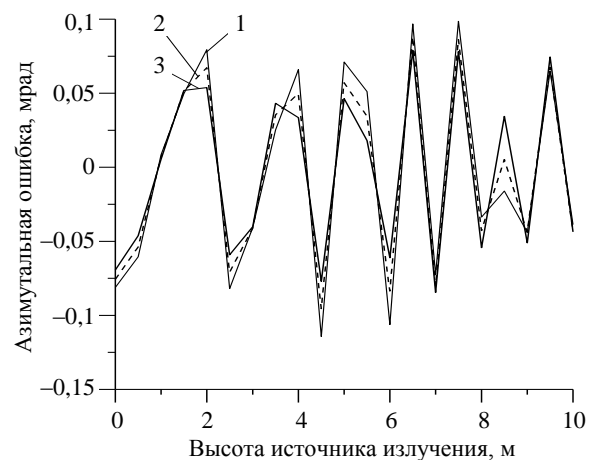


Рис. 7. Высотные зависимости ошибок измерения азимута источника излучения при различных диаметрах приемных антенн: 1 — диаметры приемных антенн 0,1 м; 2 — диаметры приемных антенн 0,7 м; 3 — диаметры приемных антенн 1,1 м

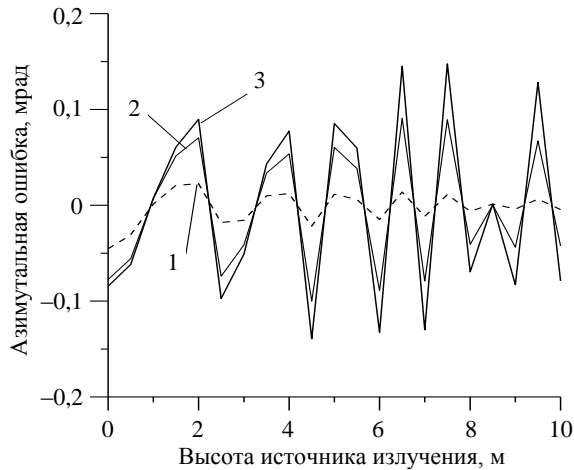


Рис. 8. Высотные зависимости ошибок измерения азимута источника излучения при отклонении в вертикальной плоскости оси главного лепестка ДН приемной антенной системы от направления на горизонт. Край экрана – синусоидальная шероховатость амплитудой 5λ

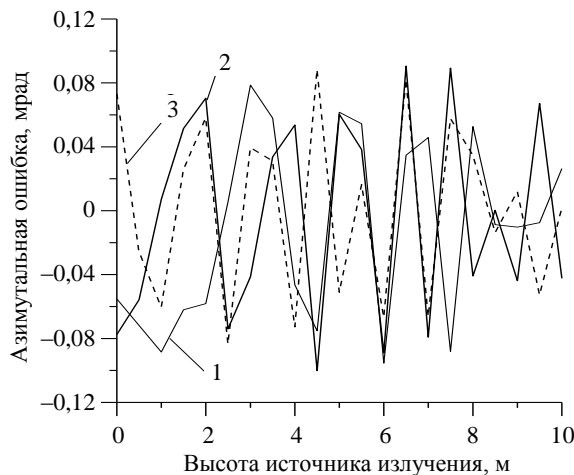


Рис. 9. Высотные зависимости ошибок измерения азимута источника излучения при различных высотах центра приемной антенной системы

Как видно из приведенных выше рисунков, при дифракции Френеля ошибки либо практически не зависят от высоты, либо убывают с ее ростом, если учитывается влияние направленных свойств антенны. Именно это и характерно для экспериментально полученных данных, приводимых в работах [8, 9, 13]. В отличие от них, при использовании приближения касательной плоскости при малых высотах над поверхностью азимутальные ошибки возрастают примерно пропорционально высоте источника излучения.

Выше оценены ошибки измерения азимутального угла, возникающие под влиянием края одиночного препятствия, что является вполне реальным случаем, но не наиболее типичным для реальных трасс. Как показывает анализ экспериментальных данных [8, 9, 12, 13], при распространении мм и см радиоволн над сушей и морем

в большинстве случаев можно говорить о влиянии нескольких или множества препятствий; еще более естественным является такое представление при распространении над жилыми массивами и промышленными зонами как в городской, так и сельской местности [6, 7]. При расстояниях вдоль трассы распространения между не затеняющими друг друга препятствиями или складками рельефа в десятки и сотни метров можно считать, что создаваемые ими возмущения распространяющегося электромагнитного поля независимы. Тогда и обусловленные ими ошибки измерения азимута складываются как независимые, создавая наблюдаемую в экспериментах [8, 9, 12, 13] пространственную структуру и величину.

Выводы. В приближении дифракции Френеля исследованы ошибки пеленгования источника излучения по азимуту, которые объясняются влиянием препятствия, моделируемого непрозрачным экраном с прямолинейной или волнистой границей. Проанализированы зависимости ошибок пеленгования от ориентации границы экрана относительно плоскости падения радиоволны и от амплитуды неровностей границы, имеющих синусоидальную форму. Расчеты при прямолинейной границе выполнены в приближении геометрической теории дифракции, а при волнистой границе – методом численного интегрирования в приближении Кирхгофа.

Показано, что основной вклад в азимутальные ошибки вносит наклон границы экрана по отношению к горизонтальной плоскости. По порядку величины их значения и характер зависимости от высоты согласуются с полученными экспериментально на наземных трассах, в отличие от предсказываемых в рамках приближения касательной плоскости.

При горизонтальной границе экрана азимутальные ошибки имеют значимые, сравнимые с экспериментально наблюдаемыми, значения только при волнистости края экрана. При наклонной границе ее волнистость при амплитуде неровностей, существенно меньших относительно размеров первой зоны Френеля, проявляется в более или менее значимом искажении вида высотной зависимости ошибок по сравнению с прямолинейным краем.

При остронаправленной ДН пеленгационной антенны, изменяя ориентацию ее максимума, в частности, отклоняя вверх на фиксированный угол (так называемый внеосевой метод сопровождения) или моделируя слежение за направлением на излучатель, можно существенно уменьшить ошибки пеленгования по азимуту.

Полученные результаты позволяют качественно объяснить полученные в экспериментальных исследованиях особенности азимутальных ошибок пеленгования.

1. Dougherty H. T. Application of Diffraction by Convex Surfaces to Irregular Terrain Situation / H. T. Dougherty, L. J. Maloney // Radio Science J. Res. NBP/USNC-URSI. – 1964. – 68D, N 2. – P. 239–250.
2. Barton D. Low-Altitude Tracking over rough Surfaces. Theoretical prediction / D. Barton // EASCON'79: Proc. – Arlington, 1979. – 2. – P. 224–234.
3. Калинин А. И. Распространение радиоволн на трассах наземных и космических радиолиний / А. И. Калинин. – М.: Связь, 1979. – 296 с.
4. Pogorzelski R. J. A Note on Some Common Diffraction Link Loss Models / R. J. Pogorzelski // Radio Sci. – 1982. – 17, N 6. – P. 1536–1540.
5. Vogler L. E. An Attenuation Function for Multiple Knife – Edge Diffraction / L. E. Vogler // Radio Sci. – 1982. – 17, N 6. – P. 1541–1546.
6. Логвинов Ю. Ф. Дифракционная модель многолучевого распространения над неровной поверхностью при малых углах скольжения / Ю. Ф. Логвинов, Ю. А. Педенко, В. Б. Разказовский // Изв. вузов. Радиофизика. – 1996. – 39, № 5. – С. 547–558.
7. Разказовский В. Б. Дифракция на полуплоскости с неровным краем в задаче распространения радиоволн над поверхностью при малых углах скольжения / В. Б. Разказовский // Изв. вузов. Радиофизика. – 1997. – 40, № 8. – С. 965–979.
8. Разказовский В. Б. Ошибки пеленгования маловысотных источников миллиметрового радиоизлучения над сушей / В. Б. Разказовский // Радиофизика и радиоастрономия. – 2001. – 6, № 1. – С. 50–70.
9. Разказовский В. Б. Поле миллиметровых радиоволн над сушей при малых углах скольжения / В. Б. Разказовский // Зарубеж. радиоэлектрон. Успехи соврем. радиоэлектрон. – 2000. – № 3. – С. 3–34.
10. Kerr D. E. Propagation of Short Radio Waves / D. E. Kerr. – N.-Y.: McGraw-Hills, 1951. – 728 p.
11. Разказовский В. Б. Измерение угла места источника излучения при дифракционной модели распространения радиоволн / В. Б. Разказовский, Ю. Ф. Логвинов // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – X., 2008. – 13, № 3. – С. 494–502.
12. Экспериментальные исследования влияния неоднородной трассы на точность пеленгования / И. Д. Гонтарь, Ф. В. Кивва, В. Б. Разказовский и др. // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – X., 2006. – 11, № 2. – С. 222–228.
13. Кулемин Г. П. Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью Земли под малыми углами / Г. П. Кулемин, В. Б. Разказовский. – К: Наук. думка, 1987. – 230 с.
14. Островитянов Р. В. Статистическая теория радиолокации протяженных целей / Р. В. Островитянов, Ф. А. Басалов. – М: Радио и связь, 1982. – 232 с.
15. Горбач Н. В. Спектр флуктуаций пеленга над неровной поверхностью раздела / Н. В. Горбач, И. М. Фукс // Изв. вузов. Радиофизика. – 1989. – 32, № 12. – С. 1485–1493.
16. Полищук Ю. М. Корреляция пространственных флуктуаций амплитуды и фазы волны, дифрагированной на неровном экране / Ю. М. Полищук // Изв. вузов. Радиофизика. – 1968. – 11, № 1. – С. 72–82.
17. Разказовский В. Б. Дифракция на полуплоскости с неровным краем в задаче распространения радиоволн над поверхностью при малых углах скольжения / В. Б. Разказовский // Изв. вузов. Радиофизика. – 1997. – 40, № 8. – С. 965–979.
18. Kouyoumjian R. G. Uniform Geometrical Theory of Diffraction for an edge in a Perfectly Conducting Surface / R. G. Kouyoumjian, P. H. Pathak // Proc. IEEE. – 1974. – 62, N 11. – P. 1448–1461.

V. B. Razskazovskyy, Yu. F. Logvinov

ERRORS OF DIRECTION-FINDING OF RADIANT ON AZIMUTH AT INFLUENCE OF DIFFRACTION OF RADIO WAVES ON BORDER OF OBSTACLE

In Fresnel diffraction approximation on a semiplane the azimuthal errors of direction-finding of microwave radiant are investigated by numerical method. Influence on the azimuthal errors of smooth and rough edge of screen is analyzed at its different orientations on a route.

Key words: diffraction, azimuthal errors, small angles of sliding.

В. Б. Разказовський, Ю. Ф. Логвінов

ПОМИЛКИ ПЕЛЕНГУВАННЯ ДЖЕРЕЛА ВИ- ПРОМІНЮВАННЯ ПО АЗИМУТУ ПРИ ВПЛИВІ ДИФРАКЦІЇ РАДІОХВИЛЬ НА МЕЖІ ПЕРЕШКОДИ

У наближенні дифракції Френеля на напівплощині числовим методом досліджено азимутальні помилки пеленгування джерела випромінювання НВЧ-радіохвиль. Проаналізовано вплив на азимутальні помилки гладкого та шорсткого краю екрана при його різних орієнтаціях по відношенню до вертикальної площини падіння хвиль.

Ключові слова: дифракція, азимутальні помилки, малі кути ковзання.

Рукопись поступила 11.03.10 г.