

Ошибки пеленгования маловысотных источников миллиметрового радиоизлучения над сушей

В. Б. Разказовский

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

Статья поступила в редакцию 2 апреля 2001 г.

Рассмотрены результаты экспериментального изучения и методы теоретического описания ошибок измерения угла места и азимута излучателей радиоволн миллиметрового диапазона (8 мм и 4 мм) на реальных наземных трассах протяженностью 5÷6 км при высотах излучателей поверхностью грунта до десятков метров. Приведены примеры пространственных зависимостей ошибок на трассах разных типов. Проанализированы особенности многолучевого распространения радиоволн над реальной поверхностью суши, их дифракции на деталях рельефа местности и отдельных препятствиях различной природы. Установлено существование ряда количественных и качественных отличий пространственной структуры амплитуды поля и ошибок пеленгования излучателей в миллиметровом диапазоне от более длинноволновых.

Розглянуто результати експериментального вивчення та методи теоретичного опису помилок вимірювання азимута та кута місця випромінювачів радіохвиль міліметрового діапазону (8 мм та 4 мм) на реальних наземних трасах довжиною 5÷6 км при висотах випромінювачів над поверхнею ґрунту до десятків метрів. Наведено приклади просторових залежностей помилок на трасах різних типів. Проаналізовано особливості багатопроменевого поширення радіохвиль над поверхнею суші, їх дифракції на деталях рельєфу місцевості та перешкодах різного походження. Встановлено існування суттєвих кількісних та якісних відмінностей просторової структури амплітуди поля та помилок пеленгування випромінювачів у міліметровому діапазоні радіохвиль порівняно з більш довгохвильовими.

Введение

В 50-е годы XX века резко возрос интерес к проблеме распространения миллиметровых волн над сушей. К тому времени в результате преимущественно экспериментальных исследований был сделан вывод о непригодности сантиметрового и более длинноволновых диапазонов для решения задач радиолокационного обнаружения и сопровождения наземных целей, а также для управления новыми системами противотанкового оружия. Причиной этого явилось не техническое несовершенство соответствующих радиотехнических систем, а негативное влия-

ние принципиальной особенности распространения радиоволн вблизи поверхности раздела сред (в рассматриваемом нами случае – поверхности суши), получившей впоследствии в научной и технической литературе название многолучевого распространения [1-6]. Исходя из общеизвестного положения о том, что чем короче длина электромагнитной волны, тем точнее для нее соблюдаются законы геометрической оптики, разработчики радиосистем обратились к наиболее коротким из волн радиодиапазона – миллиметровым радиоволнам. Научный коллектив, на базе которого в 1955 г. был создан Институт радиофизики и электроники (в настоящее время ИРЭ

им. А. Я. Усикова НАН Украины), имел большой опыт в изучении распространения радиоволн над морем и достижения в создании элементной базы миллиметрового диапазона. В 1957 г. постановлением Совета Министров СССР институту было поручено выполнение комплексной НИР, основной задачей которой было исследование влияния процесса распространения миллиметровых радиоволн на работу различных классов наземных радиолокационных систем. В рамках этой НИР задачи формулировались при активном участии С. Я. Брауде; он же был назначен заместителем научного руководителя, а руководителем являлся директор института А. Я. Усиков.

В число ключевых проблем входило изучение влияния процесса распространения миллиметровых радиоволн вблизи поверхности суши на точность измерения угловых координат источников излучения и радиолокационных целей, а также разработка методов измерения, близких по точности к оптическим. Эта задача была новой для института; не существовало опыта ее решения и в других научных коллективах, не только в СССР, но, как стало ясно позже, и за рубежом. Исследования и разработки по этой проблеме стали основным направлением деятельности нескольких отделов ИРЭ НАН Украины, а позже и Радиоастрономического института НАН Украины, продолжают они и в настоящее время.

Не останавливаясь на описании явлений, приводящих к заметному, подчас катастрофическому ухудшению точности измерения угловых координат источников излучения или радиолокационных целей при влиянии поверхности раздела, которые достаточно подробно рассмотрены в ряде работ, в частности, в [1, 3, 4], обратимся к анализу особенностей миллиметровых волн.

Первым очевидным преимуществом миллиметрового диапазона по сравнению с более длинноволновыми является возможность создания узких диаграмм направленности при жестких ограничениях на размеры апертур антенн. Это позволяет сузить границы области углов места (углов возвышения), в пределах которой

наиболее сильно проявляется влияние поля, переизлученного поверхностью раздела.

Вторым преимуществом миллиметрового диапазона, как ожидалось, должно было стать резкое ослабление отраженного поля вследствие влияния неровностей земной поверхности. Как известно из теории рассеяния волн [1, 2, 7], амплитуда поля, зеркально отраженного неровной поверхностью, зависит от значения так называемого параметра Релея $\sigma_h \lambda^{-1} \sin \gamma$, где σ_h – среднеквадратическая высота неровностей, λ – длина радиоволны, γ – угол скольжения. Согласно расчетным и экспериментальным результатам, при значении параметра Релея более 0.15 зеркальное отражение практически полностью отсутствует. Это должно было обусловить существенное уменьшение ошибок измерения координат при углах возвышения, меньших ширины диаграммы направленности антенны. Следует заметить, что в настоящее время в миллиметровом диапазоне для измерения угловых координат применяются только модификации “классических” методов, в основном, моноимпульсного [8]. Для этих методов характерно использование разных законов облучения антенн со сплошной апертурой.

Проведенное в ИРЭ НАНУ экспериментальное изучение структуры поля миллиметровых волн вблизи поверхности суши на трассах различной протяженности в местностях с различным рельефом и растительным покровом, основные результаты которого изложены в [5, 9], показало следующее.

1) Укорочение длины волны, как правило, приводит к ослаблению интенсивности переизлучения поверхностью суши и, как следствие, к уменьшению искажений по сравнению с полем свободного пространства. Иллюстрацией к сказанному являются приведенные на рис. 1, 2 сводные данные многих экспериментальных работ об эффективных коэффициентах отражения $\rho_{эф}$ радиоволн частотой 10 ÷ 150 ГГц от участков суши с различными свойствами при углах скольжения около 1°. В отличие от коэффициента отражения ρ теоретических работ [1, 2, 7] эффективный коэффициент отражения $\rho_{эф}$ не является строго определяемой величиной. Обычно в эк-

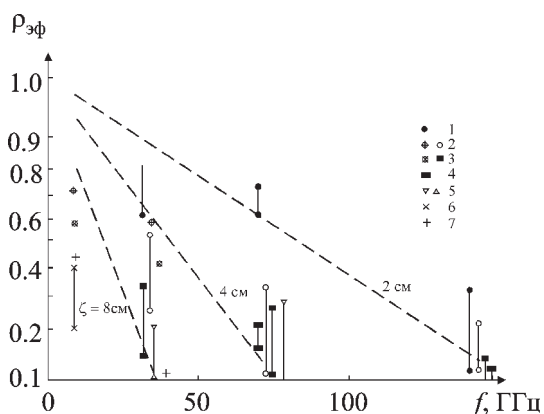


Рис. 1. Эффективные коэффициенты отражения $\rho_{\text{эф}}$ от участков поверхности суши (летом) в функции частоты f :

1 – грунт без растительного покрова (высота неровностей $\zeta \approx 3$ см); 2 – пашня; 3 – всходы травы высотой 3 ÷ 15 см; 4 – грунтовая дорога; 5 – грунт с травяным покровом (высота неровностей $\zeta = 0.2 \div 0.6$ см); 6 – кочковатый луг; 7 – картофельное поле с засохшими стеблями. Штриховые прямые – расчетные значения коэффициентов отражения для высоты неровностей $\zeta = 2; 4; 8$ см. Масштаб по оси ординат линеаризует функцию Гаусса

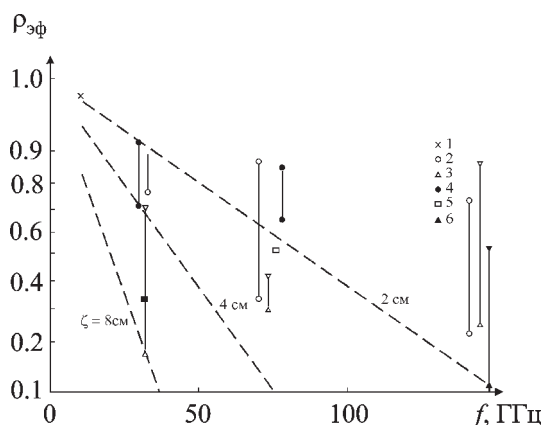


Рис. 2. Эффективные коэффициенты отражения $\rho_{\text{эф}}$ от участков поверхности (зимой) в функции частоты f :

1 – луг под снегом; 2 – пашня под снегом; 3 – ровная площадка под снегом; 4 – мерзлый песок; 5 – снег с настом; 6 – ровный снег. Штриховые прямые – расчетные значения коэффициентов отражения для высоты неровностей $\zeta = 2; 4; 8$ см. Масштаб по оси ординат линеаризует функцию Гаусса

спериментальных работах он вычисляется как

$$\rho_{\text{эф}} = \frac{\hat{E}_{\text{max}} - \hat{E}_{\text{min}}}{\hat{E}_{\text{max}} + \hat{E}_{\text{min}}}, \quad (1)$$

где \hat{E}_{max} , \hat{E}_{min} – оценки значений амплитуд поля в интерференционных максимумах и минимумах, чаще всего получаемые усреднением значений для нескольких экстремумов. Как видно из (1), $\rho_{\text{эф}}$ характеризует размах интерференционных изменений поля.

2) Изменяются статистические свойства переизлученного поля: происходит относительное возрастание случайной, называемой в литературе диффузной, составляющей по сравнению с зеркальной (называемой также когерентной).

3) Структура поля вблизи границы тени от деталей рельефа местности, препятствий, вершин деревьев соответствует не интерференции прямой и отраженной волн, а подобна полю при дифракции на непрозрачной полуплоскости.

Одной из важных особенностей распространения миллиметровых радиоволн над сушей является существенная зависимость характеристик структуры поля от координат соответствующих пунктов: изменение высоты или смещение любого из них перпендикулярно трассе на единицы или даже доли метров, вследствие смены переизлучающих участков поверхности, может приводить к существенному изменению параметров вторичного поля, например, коэффициента отражения, либо даже к смене механизма переизлучения. Из сказанного становится понятно, что теоретические методы описания как структуры поля над сушей, так и связанных с ней особенностей измерения угловых координат, призваны не предсказать, а лишь объяснить те или иные экспериментально полученные результаты. Именно такой подход используется практически во всех известных нам работах; примером их могут служить [3, 4, 10].

Как показал анализ экспериментальных результатов, по особенностям пространственной, главным образом, высотной, структуры

амплитуды поля и ошибок измерения угловых координат все трассы можно условно разделить на следующие группы:

- 1) равнинные (участки степи, луг и т. д.);
- 2) со сложным рельефом (холмистые, сильно пересеченные и т. д.);
- 3) трассы, значительная часть которых покрыта лесом;
- 4) трассы с сильным влиянием препятствий природного (одиночные деревья или рощи, выделяющиеся детали рельефа) или искусственного (земляные сооружения, строения и т. д.) происхождения.

Рассмотрим кратко методику экспериментального изучения ошибок измерения угловых координат на трассах перечисленных выше групп.

Основной объем исследований был выполнен на длинах волн около 8 и 4 мм. В процессе опытов производилось пеленгование источников излучения в этих диапазонах, высота источников изменялась дискретно (с шагом 0.5 м) от 0.5 м над уровнем грунта до 20 м. Высота антенны пеленгатора была около 2 м. Как пеленгаторы, так и передающая установка разме-

щались на автомашинах, что позволяло менять трассы, изучая явления в условиях различного рельефа и растительного покрова; эксперименты проводились в разное время года. На начальном этапе исследований с целью оценки влияния метода пеленгования параллельно использовались равносигнальный и разностнофазовый пеленгаторы с одинаковыми диаграммами направленности. Поскольку была установлена тождественность получаемых результатов, в большей части экспериментов применялся только равносигнальный пеленгатор. Сведения об излучающих и пеленгационных антеннах приведены в табл. 1.

Ошибка пеленгования определялась с помощью оптического визира как отклонение от направления на источник излучения при равенстве нулю сигнала разбаланса на выходе равносигнального пеленгатора. При разностнофазовом методе мерой ошибки являлся фазовый сдвиг сигналов в приемных антеннах при ориентации оси антенны на источник излучения. Перед каждым опытом в условиях, исключающих влияние поверхности раздела, контролировалось совмещение осей оптических приборов,

Таблица 1. Характеристики антенн измерительного комплекса

Назначение антенны	Длина волны, мм	Тип	Ширина ДН	
			Азимут	Угол места
Передающая антенна	8	Пирамидальный рупор	6°	8°
	4		6°	5°
Антенна равносигнального пеленгатора (симметричная)	8	Круглый параболоид	1°20′	1°20′
	4		1°20′	1°20′
Антенна равносигнального пеленгатора (несимметричная, пеленгование только по азимуту)	8	Усеченный параболоид	1°20′	6°
	4		1°20′	6°
Антенна разностнофазового пеленгатора	8	Рупорно-линзовая	1°40′	6°
	4		1°40′	6°

оси равносигнальной зоны и разностнофазового пеленгатора. С учетом всех погрешностей суммарная погрешность измерения при наличии оптической видимости источника излучения не превышала $15''$. Расстояние между передающим и приемным пунктами варьировалось примерно от 0.7 до 5 км. Общее представление о характеристиках исследованных трасс дает рис. 3. Трассы на рис. 3, а, б относились к равнинным, на рис. 3, в – к холмистым, а на рис. 3, г, д – к холмистым с лесными массивами, которые отмечены вертикальной штриховкой. На рис. 3, а, б точками с номерами 1-8 обозначены позиции подъемника с передатчиком; на рис. 3, в-д передающий пункт всегда находился в точке 0, а точками 1-7 обозначены позиции пеленгатора.

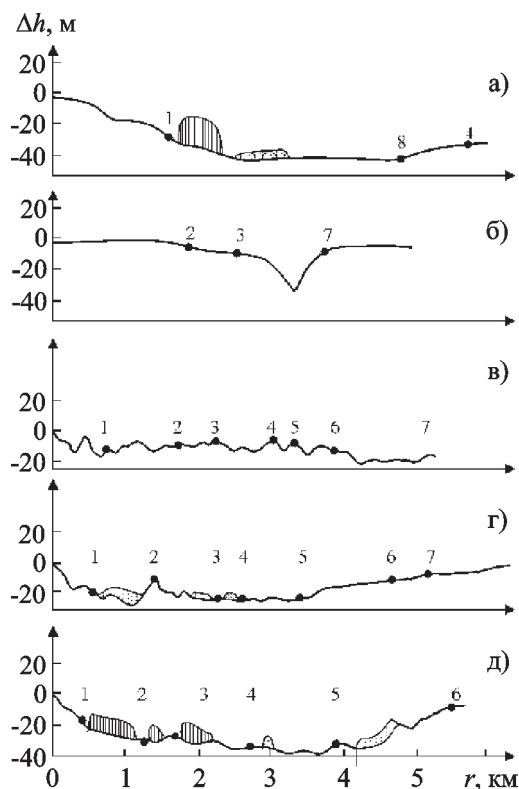


Рис. 3. Профили экспериментальных трасс: а, б – равнинные трассы; в – холмистая трасса; г, д – холмистые с лесными массивами; положение и высота лесных массивов условно показаны вертикальной штриховкой. Точками с номерами отмечены позиции передающего пункта (а, б) или пеленгатора (в-д)

Ошибки пеленгования по углу места

Ошибки пеленгования по углу места, в западной литературе именуемые чаще ошибками сопровождения по углу места, являются основной причиной ухудшения точности измерения координат источников излучения и целей, находящихся на малых высотах над поверхностями суши или моря. Именно в вертикальной плоскости направления прихода всех волн, переизлученных элементами поверхности, образуют наибольший угол с направлением прихода невозмущенной волны от источника излучения или цели. В то же время при приемлемых размерах антенных апертур даже в миллиметровом диапазоне этот угол меньше или сравним с шириной диаграммы направленности пеленгационной антенны. В рассматриваемом случае малых высот сигналы, переизлученные поверхностью раздела, мало отличаются от невозмущенного сигнала по частоте, поляризации или запаздыванию, что делает невозможным выделение невозмущенного сигнала на их фоне. Результаты пеленгования в таких условиях не совпадают с направлением на источник излучения, хуже того, в дециметровом и сантиметровом диапазонах, согласно [1], может одновременно существовать несколько пеленгов. Как показали первые опыты, в миллиметровом диапазоне над сушей всегда существует единственный пеленг, т. е. при любой высоте источника излучения или отражателя над поверхностью грунта существует единственная ориентация антенны, при которой реализуется условие равносигнальности или нулевой разности фаз.

Рассмотрим результаты опытов. Как и ожидалось на основании предшествующего анализа высотной структуры амплитуды поля в различных условиях, ошибки измерения угла места были наиболее значительными на равнинных трассах (рис. 3, а, б). Примеры высотных зависимостей ошибок при размещении передатчика в точках 2 и 8 приведены на рис. 4. Как это принято для высотных разрезов, по вертикальной оси отложены значения высот передатчика, при которых производились замеры, а по горизонтальной оси – его “измеренная” высота $h_{\text{изм}}$, определяемая по измеренному пе-

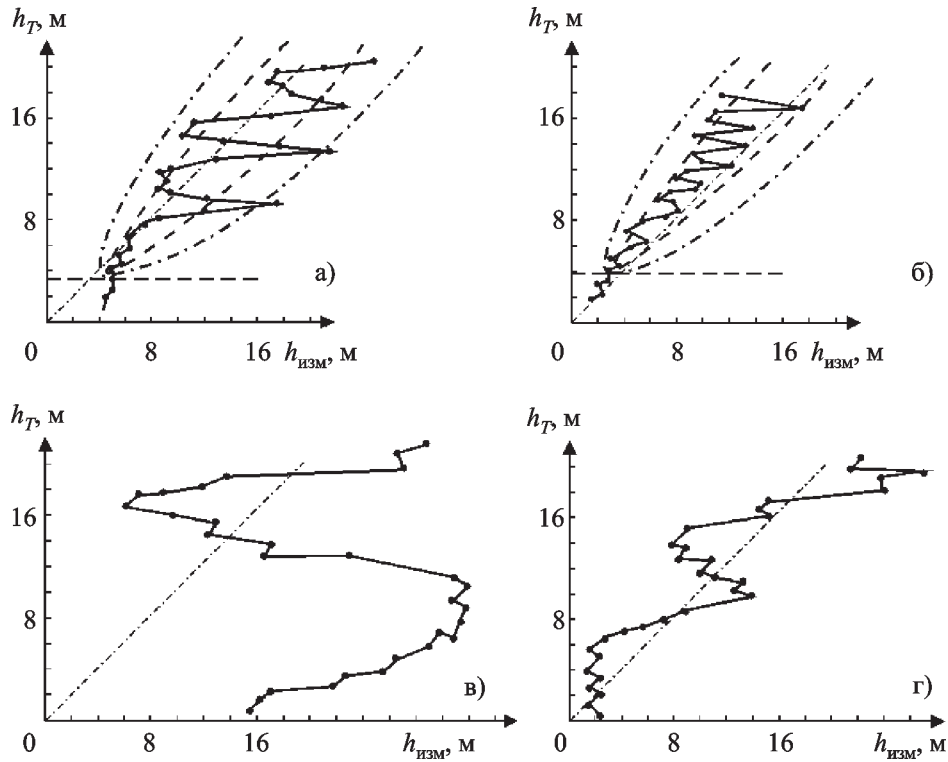


Рис. 4. Зависимости между высотой h_T источника излучения над поверхностью грунта и рассчитанной по угломестному пеленгу высотой $h_{изм}$ на трассах рис. 3, а, б: а – опыт в точке 2 на волне 8 мм; б – там же на волне 4 мм; в – опыт в точке 8 на волне 8 мм; г – там же на волне 4 мм

ленгатором углу места $\theta_{изм}$ из соотношения

$$h_{изм} = h_R + r_{RT} \theta_{изм}, \quad (2)$$

где r_{RT} – горизонтальное расстояние от пеленгатора до передатчика, h_R – высота антенны пеленгатора. Достоинством таких координат является постоянство масштаба при всех дистанциях, в то время как при использовании угловых единиц он менялся бы с дальностью, затрудняя сопоставление данных. На графиках точками, соединенными отрезками прямых, показаны результаты опытов, наклонные штрих-пунктирные прямые соответствуют точным пеленгам источника излучения, а штриховые и штрих-пунктирные кривые на рис. 4, а, б показывают расчетные границы экстремумов ошибок при коэффициентах отражения, равных $\rho = 0.2$ (штриховые кривые) и $\rho = 0.4$ (штрих-пунктирные кривые).

Сравнение высотных зависимостей ошибок на равнинных трассах с соответствующими им высотными зависимостями множителя ослабления показывает, что, как и следует из теории явления, положения экстремумов поля и ошибок совпадают, причем интерференционным минимумам множителя ослабления соответствуют острые положительные пики ошибок измерения угла места, а максимумам поля – “тупые” отрицательные экстремумы ошибок. На волне 8.2 мм в области максимумов значения измеренной высоты могут более чем в 4 раза отличаться от истинной высоты излучателя над поверхностью, как это имеет место в точке 8 на рис. 3, а. На этом графике видна еще одна часто встречающаяся на реальных трассах особенность: большая ошибка измерения угла места при нулевой высоте передатчика, которая может быть объяснена влиянием отражения радиоволн от наклонной площадки вблизи пеленгатора.

Поскольку влияние склонов при измерении угла места имеет некоторые особенности, рассмотрим этот вопрос подробнее. Геометрия задачи и обозначения величин понятны из рис. 5. Вследствие наклона касательной плоскости в точке зеркального отражения сигнала от склона изменяется ширина и положение интерференционных лепестков поля, что может быть учтено при расчете введением действующих высот соответствующих пунктов. Соответственно изменяется угол скольжения γ и размер зоны Френеля на отражающей площадке, а также возрастает угол ϵ_T между направлениями на источник излучения и на его зеркальное изображение. В частности, оценка по периоду интерференционной картины в точке 8 дает наклон около 5 мрад при расстоянии до точки отражения около 250 м. При этом действующая высота передающей антенны оказывается примерно на 22 м больше, чем ее высота над грунтом; в то же время угол не превосходит 8 мрад, т. е. отраженный луч практически не ослабляется приемной антенной. В таких условиях максимальная ошибка измерения высоты $\delta h_{\text{изм}}$ может достигать величины

$$\delta h_{\text{изм}} \approx 2h_{\text{ТД}} \frac{\rho}{1-\rho}, \quad (3)$$

где $h_{\text{ТД}}$ – действующая высота антенны, ρ – коэффициент отражения. При найденном для

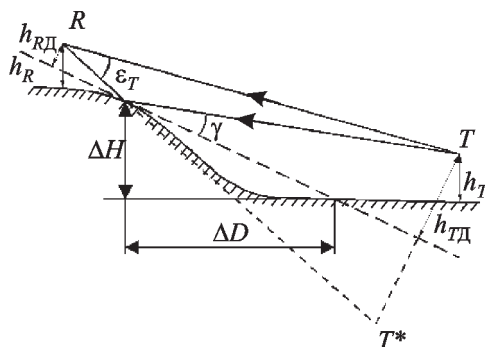


Рис. 5. Схема лучей при отражении от склона

точки 8 значению $h_{\text{ТД}} \approx h_T + 22$ м и оцененному по опытам в точке 1 значению $\rho_{\text{эф}} \approx 0,4$ действующая высота антенны может достигать 30 ÷ 40 м, что и имеет место в эксперименте. На трассах со сложным рельефом местности (рис.3, в-д) крутизна склонов, как правило, превышала 0.01. Это означает, что $\epsilon_T \approx 2\text{arctg } \Delta H / \Delta D > 80'$, т. е. превышает полуширину диаграммы направленности антенны, и поэтому прием отражений от таких склонов будет значительно ослаблен. При опытах в остальных точках равнинных трасс нулевая высота передатчика либо практически совпадала с границей оптической видимости (точка 1, рис. 3, а), либо была ниже последней, и при подъеме передатчик, только начиная с некоторой высоты, находился выше геометрической границы тени (например, точки 2, 3, 7 на рис. 3, б). В этих случаях в освещенной области наблюдалось удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных оценок. Сказанное видно, в частности, из рис. 4, а, б, на которых показаны расчетные положения границ ошибок измерения высоты для $\rho = 0.4$ (штрих-пунктирные кривые) и $\rho = 0.2$ (штриховые кривые). Правые граничные кривые соответствуют экстремумам угла места и высоты, измеренных в интерференционных минимумах поля, а левые кривые – интерференционным максимумам поля. Из сравнения результатов опытов на волнах 8 и 4 мм (рис. 4, а, в и 4, б, г соответственно) хорошо видно уменьшение ошибок с укорочением длины волны, что согласуется с ранее отмеченным (рис. 1) снижением значений коэффициента отражения от суши. Отметим также, что в проведенных измерениях углов места величина ошибок практически не зависела от ширины диаграмм направленности антенн в вертикальной плоскости и от метода измерения. Об этом наглядно свидетельствует сравнение результатов пеленгования равносигнальным и разностнофазовым пеленгаторами; ширина диаграммы направленности первого составляла $1^\circ 20'$, а второго – 6° . В то же время, как видно из сравнения графиков рис. 4, а, б (равносигнальный метод) и рис. 6, а, б (разностнофазовый метод), относящихся к опытам в одной и

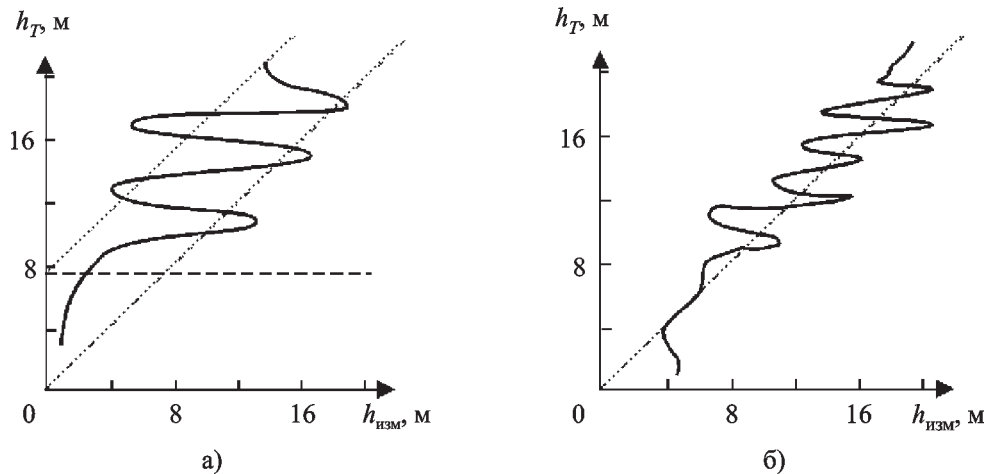


Рис. 6. Экспериментальные результаты измерения высоты излучателя разностнофазовым пеленгатором на равнинной трассе (рис. 3, б, точка 2): а – для волны 8 мм, б – для волны 4 мм

той же точке 2 трассы, приведенной на рис. 3, б, основные особенности высотных зависимостей ошибок сохраняются. Некоторые отличия могут быть связаны с незначительной разницей в высотах антенн пеленгаторов и их взаимным смещением перпендикулярно трассе на несколько метров.

Кроме систематических измерений на волнах 8 мм и 4 мм, проводившихся во всех точках равнинных трасс (рис. 3, а, б), в точке 1 были дополнительно проведены опыты на волне 2.3 мм, которые подтвердили отмеченное выше снижение ошибок пеленгования с укорочением длины волны. Результаты опытов в этой точке в одинаковых условиях на всех трех длинах волн (8 мм, 4 мм и 2.3 мм) приведены на рис. 7. Поверхность трассы во время проведения опытов была покрыта низкой дикорастущей травой. Из графиков рис. 7 видно, что ошибки на волне 2.3 мм, особенно в области малых высот, в 2 ÷ 3 раза меньше ошибок на волне 8 мм; как функция высоты они меняются хаотически. На рис. 4, а, б и рис. 6, а, б видна еще одна характерная особенность высотной зависимости ошибок: при уменьшении высоты источника излучения и его приближении к границе тени (она отмечена горизонтальной штриховой линией) изменение измеренной высоты замедляется, а после по-

гружения передатчика в тень совсем прекращается. Результат пеленгования в таких условиях соответствует направлению на границу затеняющего препятствия.

Графики изменения ошибок как функции высоты на всех рассмотренных волнах миллиметрового диапазона указывают на еще одну важную для работы радиосистем особенность: для фиксированного положения пеленгационной антенны равносигнальность может наблюдаться при нескольких высотах источника излучения. Сказанное поясняется рис. 8, на котором в координатах $\theta_T = f(\theta_{изм})$, где θ_T – угол места источника излучения, показан фрагмент графика высотной зависимости ошибок измерения угла места. При некоторой выбранной ориентации пеленгационной антенны, соответствующей углу места θ_A , равносигнальность будет существовать при углах места передатчика, равных $\theta_{T1}, \dots, \theta_{T5}$. Это означает, что по факту равенства нулю сигнала ошибки на выходе пеленгатора нельзя однозначно оценить угловую высоту источника излучения. При изменении высоты передатчика и фиксированном положении антенны сигнал ошибки на выходе пеленгатора будет изменяться так, как показано на рис. 9. Такие особенности изменения ошибок измерения угла места и сигнала ошибки как функций высоты отрицатель-

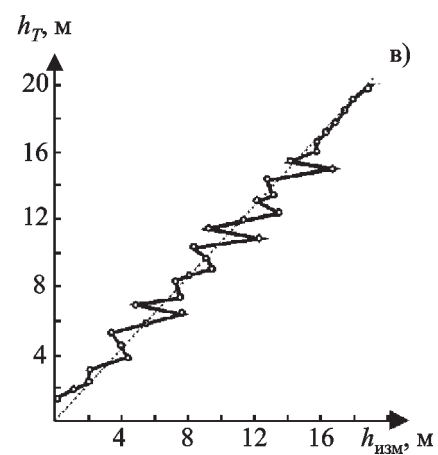
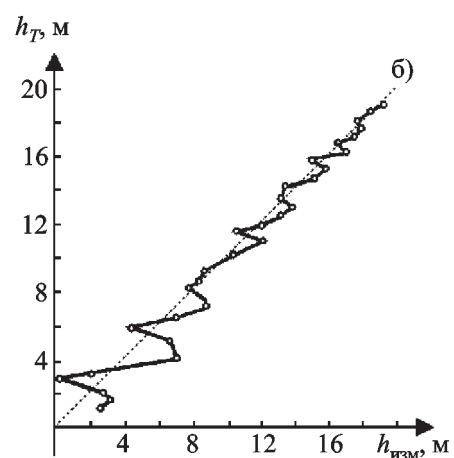
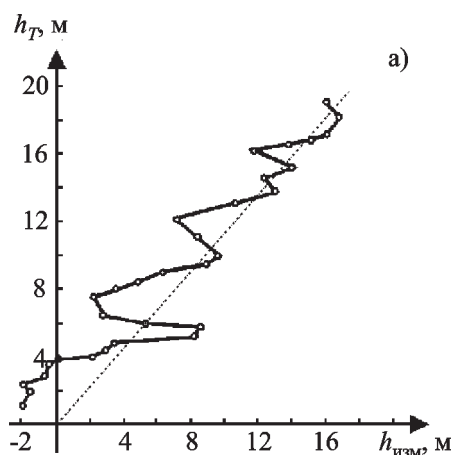


Рис. 7. Результаты равносигнального пеленгования по углу места на волнах 8 мм (а), 4 мм (б) и 2.3 мм (в)

но влияют на работу систем наведения по равносигнальной зоне, создавая области с обрат-

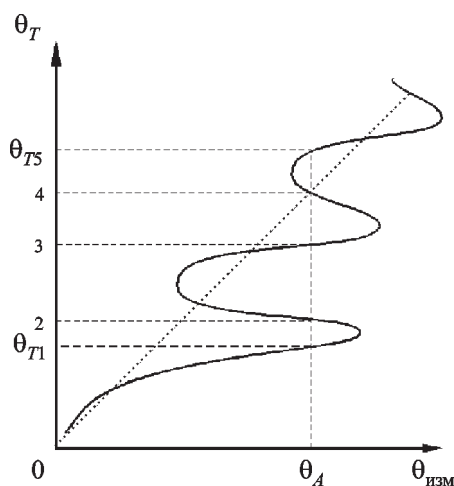


Рис. 8. Картина возникновения нескольких одновременно существующих равносигнальных зон

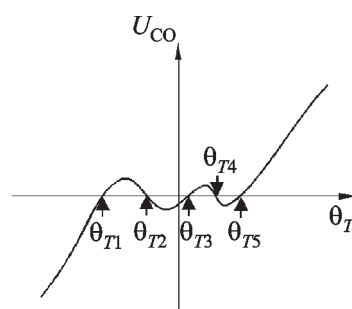


Рис. 9. Зависимость сигнала ошибки от угла места излучателя при существовании нескольких равносигнальных зон

ным, дестабилизирующим, знаком сигнала ошибки (точки θ_{T2} , θ_{T4}).

Как показал анализ высотных разрезов и расчеты с использованием реальных значений коэффициентов отражения, при диаграммах направленности применявшихся антенн и геометрии исследовавшихся трасс указанная особенность сохраняется с укорочением волны вплоть до 2 мм, хотя при этом происходит сужение области неопределенности. Это хорошо видно как из рис. 4 и рис. 6, так и из результатов экспериментальной работы [11], в которой высотные разрезы поля на частоте 140 ГГц производились перемещением прием-

ной антенны по высоте при двух наклонах передающей антенны, отличавшихся на ширину диаграммы направленности (около 2°). Еще раз заметим, что при этом сохраняется однозначность пеленга, т. е. каждому положению передатчика соответствует единственное значение его пеленга по углу места.

Ошибки измерения угла места на трассах со сложным рельефом существенно отличались от рассмотренных выше. Во-первых, на всех волнах отсутствовала упорядоченная структура изменения ошибок с высотой в освещенной области пространства. Во-вторых, величина ошибок была значительно меньшей,

чем на равнинных трассах: во многих опытах ошибки не превышали инструментальных. Эти особенности хорошо видны из приведенных на рис. 10 примеров высотных зависимостей ошибок на открытой трассе (а, б) и на трассе с дифракционным механизмом формирования поля (в, г). Графики на рис. 10, а, в, г соответствуют волне 8 мм, а график на рис. 10, б – волне 4 мм. Видно, что на волне 8 мм размах осцилляций измеренной высоты не превышает 4 м, причем такие осцилляции наблюдаются в небольших интервалах высот. На волне 4 мм размах осцилляций редко превышает 1 м, а во многих опытах ошибки меньше

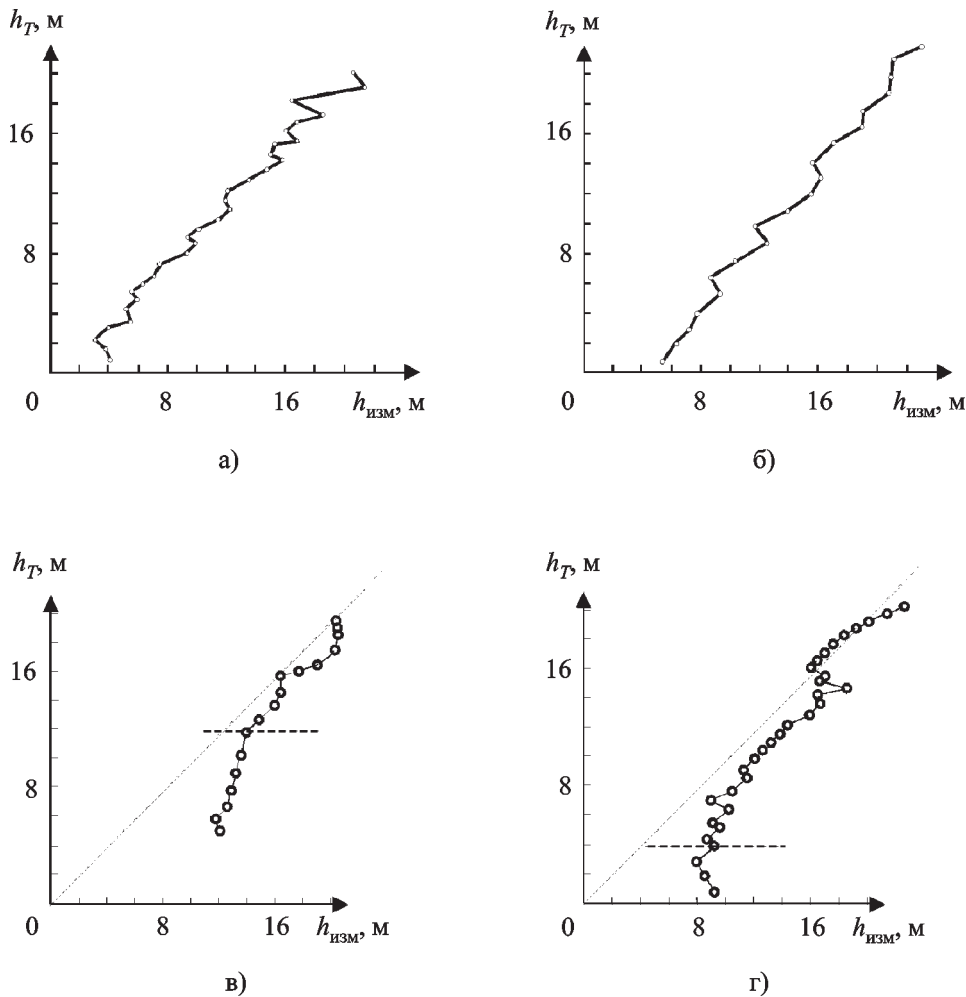


Рис. 10. Экспериментальные результаты измерения высоты источника по угломестному пеленгу. Трассы со сложным рельефом

инструментальных. Это согласуется с результатами анализа высотных разрезов амплитуд поля, указывающими на незначительную роль зеркальной компоненты в формировании вторичного поля на трассах данного типа.

Для графиков на рис. 10, в, г вблизи границы тени и ниже ее характерно существование таких же высотных зависимостей ошибок, как и на равнинных трассах.

Несмотря на малую по сравнению с равнинными трассами величину ошибок измерения угла места, на многих высотных разрезах наблюдается рассмотренная ранее множественность равносигнальных зон, хотя ширина занимаемого ими высотного коридора значительно уже и количество зон, как правило, не выше трех.

В ряде опытов основной либо существенной составляющей ошибок являлись флуктуации измеренного угла места. Как правило, они возникали при наличии на линии визирования или в непосредственной близости от нее (в пределах первой зоны Френеля) либо сильно изрезанной кромки леса, либо “полупрозрачной” для миллиметровых волн лесополосы. Последний случай был наиболее неблагоприятным: ошибки достигали десятков угловых минут, либо результат пеленгования становился неопределенным, когда интенсивность прошедшего через кроны сигнала была достаточно высокой.

Ошибки измерения азимута

В отличие от ошибок измерения угла места, главной причиной которых является зеркальная компонента вторичного поля, ошибки измерения азимута обусловлены влиянием диффузной компоненты. Для однородных, в среднем плоских трасс распределение мощности диффузной компоненты по углам прихода в горизонтальной плоскости должно быть симметричным относительно направления на передатчик и, следовательно, ошибки также с равной вероятностью должны принимать как отрицательные, так и положительные значения. Исходя из предположения, что ошибки измерения и угол места источника излучения малы по сравнению с шириной диаграммы направленности антенны, в работе [8] получено

следующее выражение для среднеквадратического значения ошибок σ_α измерения азимута:

$$\sigma_\alpha = \frac{\theta_T \sigma_\eta \rho_d}{\sqrt{2G_{SR}n}}, \quad (4)$$

где θ_T – угол места источника излучения; σ_η – среднеквадратическое значение наклонов неровностей поверхности; ρ_d – коэффициент диффузного рассеяния; n – количество независимых отсчетов, по которым производится измерение (предполагается, что либо вследствие изменения формы поверхности, как это имеет место при работе над морем, либо вследствие движения передатчика значения ошибок меняются во времени). Параметр G_{SR} является отношением усиления антенны по мощности в направлении на источник излучения к среднему усилению по области углов, из которой приходит диффузно рассеянный сигнал.

Можно указать на два недостатка зависимости (4), ставящие под сомнение ее пригодность для очень малых углов места. Во-первых, в ее основу положено предположение, что угловая среднеквадратическая ширина области, переизлучающей диффузную компоненту, пропорциональна углу скольжения. Однако это утверждение справедливо, согласно [7, 9, 12], только в области сравнительно больших углов скольжения при полном разрушении зеркального отражения. Как показано в [13], при меньших углах скольжения диффузное рассеяние убывает медленнее, не исчезая даже при $\gamma = 0$, и угловая ширина переизлучающей области при этом также не обращается в нуль, сохраняя некоторое конечное значение.

Во-вторых, в (4) не учитывается влияние поля зеркальной компоненты, которое, интерферируя с полем свободного пространства, изменяет отношение детерминированной и случайной составляющих сигнала на входе угломерного устройства.

В работе [14] получены статистические законы распределения ошибок измерения углов прихода в наиболее общем случае, когда присутствуют как случайная, так и детерминированная компоненты сигнала. Воспользовавшись методикой и математическим аппа-

ратом этой работы, можно получить следующее выражение для дисперсии ошибок измерения азимута σ_α :

$$\sigma_\alpha^2 \approx \frac{m_\alpha^2}{2P_0}, \quad (5)$$

где параметр m_α является эффективной шириной распределения по азимутальному углу принятой мощности случайной компоненты поля, переизлученной шероховатой поверхностью раздела; а параметр P_0 – отношением в принятом сигнале мощностей когерентной P_c и случайной P_r компонент:

$$P_0 = \frac{P_c}{P_r}. \quad (6)$$

Остановимся подробнее на зависимостях входящих в (5) и (6) величин от условий пеленгования.

При малых углах скольжения γ , $\gamma < \sigma_\eta$, и нормальном законе распределения наклонов неровностей, используя результаты работы [2], получим:

$$m_\alpha^2 \approx 2\sigma_\eta^4 + \frac{\sigma_\eta h_T^2}{4r^2}. \quad (7)$$

где h_T – высота излучателя, r – расстояние между пеленгатором и излучателем. Здесь первое слагаемое соответствует вкладу в переизлучение ближнего к пеленгатору участка поверхности трассы, а второе – вкладу дальнего участка, который начинается примерно на расстоянии $h_T(2\sigma_\eta)^{-1}$ от передатчика. Если антенна пеленгатора подавляет прием из ближней зоны поверхности, то

$$m_\alpha^2 \approx \frac{\sigma_\eta^2 h_T^2}{4r_{TR}^2} \quad (8)$$

и высотная зависимость ошибок совпадает с (4). При широкой по углу места диаграмме направленности даже в случае $h_T \rightarrow 0$ параметр m_α отличен от нуля и равен

$$m_\alpha^2 \approx 2\sigma_\eta^4, \quad (9)$$

т. е. ошибки измерения азимута даже в рамках используемого приближения геометрической оптики имеют некоторую конечную величину, зависящую от наклонов неровностей. Как показано в [13, 15], при очень малых угловых высотах, когда нельзя пользоваться приближением геометрической оптики, представление вторичного поля как продукта дифракции Кирхгофа на полуплоскости также приводит к конечному значению ширины углового спектра переизлученного поля в точке приема.

Присутствие в знаменателе (5) отношения мощностей детерминированной и случайной компонент означает, что зеркальная компонента, не являясь причиной возникновения азимутальных ошибок, все же влияет на их величину. Как известно из теоретических и экспериментальных работ [1-9], при распространении радиоволн над неровной, в среднем плоской поверхностью раздела мощность когерентной компоненты принятого сигнала P_c пропорциональна квадрату интерференционного множителя ослабления

$$V^2 \approx 1 + \rho^2 \left(\frac{\sigma_h \sin \gamma}{\lambda} \right) + 2\rho \left(\frac{\sigma_h \sin \gamma}{\lambda} \right) \cos \left(\frac{4\pi h_r h_T}{\lambda r} + \varphi \right), \quad (10)$$

где $\rho \left(\frac{\sigma_h \sin \gamma}{\lambda} \right)$ – коэффициент отражения зеркальной компоненты поля, являющийся функцией параметра Релея; φ – фаза коэффициента отражения (при малых углах скольжения обычно полагают $\varphi = \pi$).

Мощность случайной компоненты принятого сигнала P_r , в свою очередь, пропорциональна квадрату коэффициента диффузного рассеяния

$$\rho_d^2 \left(\frac{\sigma_h \sin \gamma}{\lambda} \right), \quad \text{который также является функ-}$$

цией параметра Релея. В противоположность коэффициенту отражения, который убывает с ростом этого параметра, коэффициент диффузного рассеяния при этом возрастает, достигая насыщения при значениях параметра Релея $0.5 \div 1$. Таким образом, дисперсия азимутальных ошибок пропорциональна отношению

$$\sigma_{\alpha}^2 \approx m_{\alpha}^2 \frac{\rho_d^2}{V^2}. \quad (11)$$

Отсюда следует, что дисперсия ошибок растет в интерференционных минимумах множителя ослабления. Это явление хорошо известно из экспериментальных работ по распространению радиоволн над морем, где четко наблюдалось резкое возрастание флуктуационных ошибок измерения азимута в интерференционных минимумах поля [5, 16, 17]. Количественное представление о влиянии этого фактора дает рис. 11, на котором показаны зависимости параметра P_0 от высоты источника излучения и дисперсии ошибок σ_{α}^2 , нормированной на произведение $\sigma_{\eta}^4 \rho_d^2$. Расчет произведен для морской поверхности с использованием эмпирической зависимости $\rho_d(\gamma)$, полученной в работе [18] при $\lambda = 10^{-2}$ м, $h_R = 2$ м, $r_{TR} = 2000$ м и среднеквадратической высоте неровностей $\sigma_h = 0.2$ м. Из графиков видно, что при сильном влиянии зеркальной компоненты в интерференционных минимумах дисперсия азимутальных ошибок может в несколько раз превосходить ее значения без учета интерференционных явлений.

Сама зеркальная компонента вторичного поля может стать причиной появления ошибки измерения азимута, если значительная часть трассы имеет наклон в направлении, перпендикулярном линии визирования [8].

При дифракции на препятствии с достаточно протяженной, в среднем горизонтальной кромкой, перпендикулярной трассе распространения, для оценки ошибок можно воспользоваться формулой (5). Подставляя в нее эффективную угловую ширину спектра дифрагированных волн $2\alpha_{0.5}$ из работы [13] и считая $m_{\alpha} \approx \alpha_{0.5}$, получим:

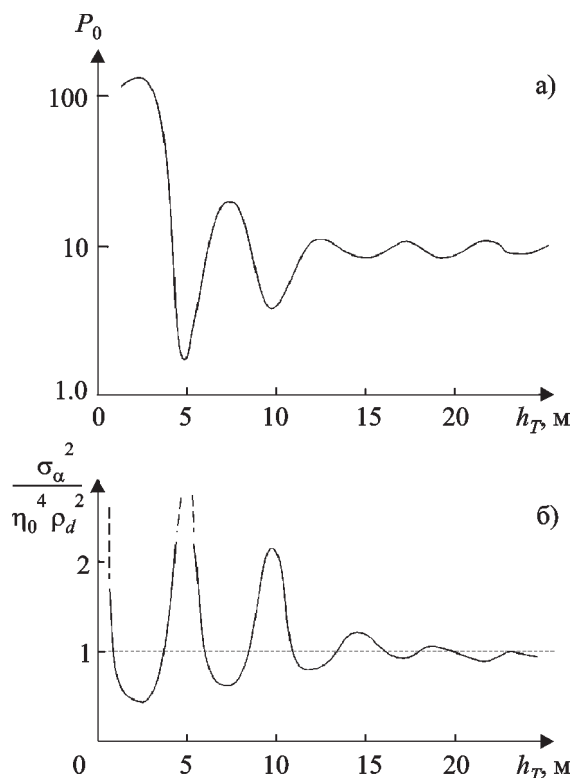


Рис. 11. Влияние зеркальной компоненты отражения на азимутальные ошибки:

а – изменение когерентной составляющей сигнала в функции высоты над поверхностью относительного уровня P_0 ; *б* – изменение нормированной дисперсии азимутальных ошибок

$$\sigma_{\alpha} \approx \frac{\lambda r_T}{2\pi l_0 (r_T + r_R)}. \quad (12)$$

Здесь r_T, r_R – расстояния до препятствия от источника излучения и от приемника соответственно; l_0 – пространственный радиус корреляции неровностей края препятствия.

Рассмотрим далее результаты экспериментального изучения ошибок измерения азимута. На рис. 12-15 показаны данные, полученные в точках 2 и 8 на равнинных трассах (рис. 3, а, б) со снежным покровом. На рис. 12, 14 приведены зависимости для волны 8 мм, а на рис. 13, 15 – для волны 4 мм. На каждом рисунке слева – график изменения азимутальных ошибок, измеренных разностно-фазовым пеленгатором, а справа – высотный разрез амплитуды поля во время проведения измере-

ний. $\Delta\varphi$ – разность фаз сигналов, принятых разнесенными антеннами; $\Delta\alpha$ – рассчитанная по разности фаз ошибка пеленгования; P/P_{max} – мощность принятого сигнала, отнесенная к максимальному ее значению в пределах высотного разреза. Если на волне 8 мм в точке 2 (рис. 12) количество экстремумов графика ошибок примерно совпадает с количеством интерференционных лепестков, то для остальных опытов такое соответствие не наблюдается. Это особенно хорошо видно из данных в точке 8 (рис. 14, 15), где в высотном разрезе поля на волне 8 мм прослеживается лишь один интерференционный лепесток, а на волне 4 мм – два лепестка, в то же время осцилляций азимутальных ошибок значительно больше. Как правило, средний период осцилляций на волне 4 мм меньше, чем на волне 8 мм, что особенно заметно на трассах протяженностью 1.6 и 1.8 км. Сложный характер зависимости угловых ошибок от высоты на равнинных трассах не позволяет использовать стандартные статистические характеристики для их описания. Оценка их максимальных значений показала, что ошибки на обеих волнах в среднем не превышают $2 \div 3'$, хотя и отмечаются отдельные пики, достигающие $5 \div 8'$. На волне 8 мм в зимнее время при наличии снега не отмеча-

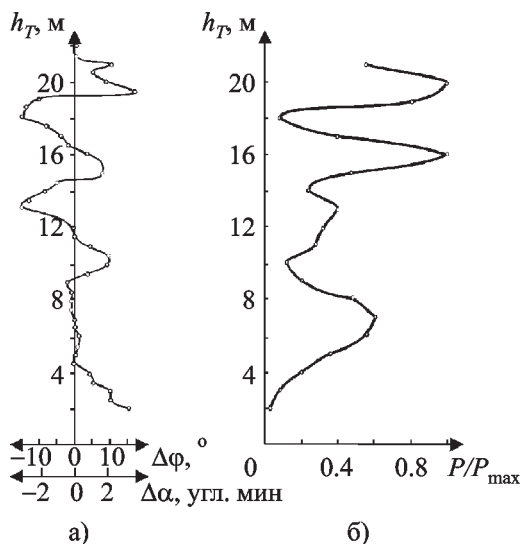


Рис. 12. Высотные зависимости ошибки пеленгования по азимуту и мощности принятого сигнала на волне 8 мм. Равнинная трасса (рис. 3, б), точка 2

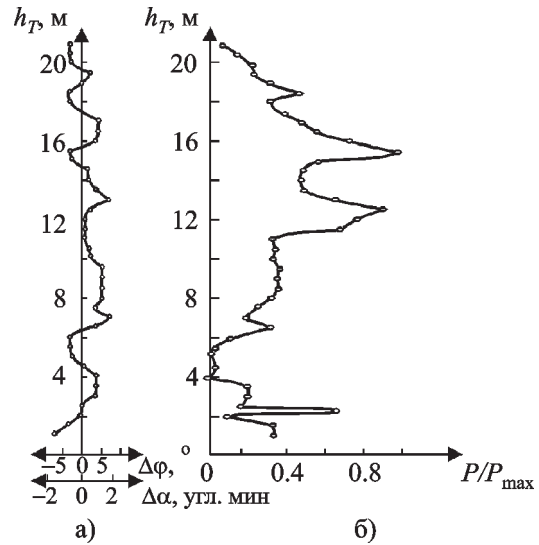


Рис. 13. Ошибки пеленгования по азимуту (а) и высотный разрез поля (б) на волне 4 мм. Равнинная трасса, точка 2

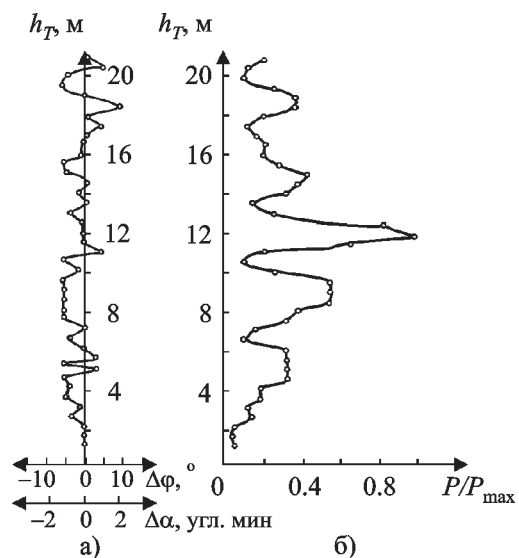


Рис. 14. Ошибки пеленгования по азимуту (а) и высотный разрез поля (б) на волне 8 мм. Равнинная трасса, точка 8

лось заметного возрастания ошибок, а на волне 4 мм они были в $1.3 \div 1.5$ раза больше летних значений.

На трассах со сложным рельефом стабильные во времени ошибки измерения ази-

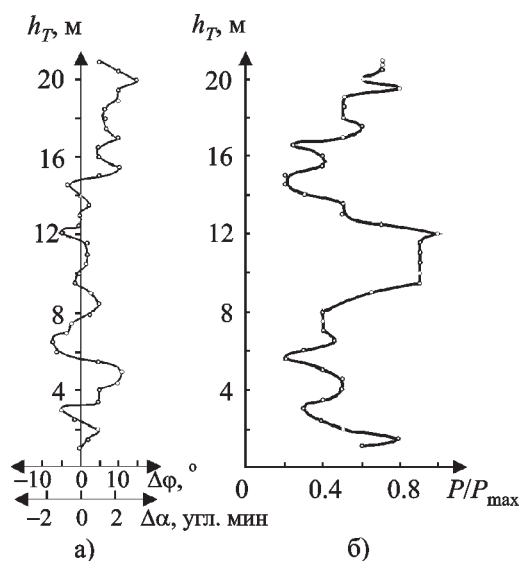


Рис. 15. Ошибки пеленгования по азимуту (а) и высотный разрез поля (б) на волне 4 мм. Равнинная трасса, точка 8

мута существовали только при условии, что в формировании поля участвовали детали рельефа без высокого растительного покрова. Такие условия реализовывались преимущественно на холмистой трассе (рис. 3, в) и в некоторых точках холмистой трассы с лесными массивами (рис. 3, г). На трассе, где вторичное поле формировалось, как правило, кромкой лесных массивов (рис. 3, д), и в ряде точек трассы, где линия визирования проходила над лесом, а близкое к зеркальному отражение происходило от заболоченных участков с кустарником (рис. 3, г), преобладала флуктуационная составляющая ошибок пеленгования по азимуту. Причем это могло иметь место даже в тех точках, где в высотной структуре поля и ошибках измерения угла места доминировала стабильная компонента.

Примеры высотных зависимостей стабильных во времени ошибок пеленгования приведены на рис. 16 (трасса, изображенная на рис. 3, в, точка 2) для волны 8 мм (левый график) и для волны 4 мм (правый график). Следует заметить, что на рассматриваемых трассах существенные изменения величины, а иногда и смена знака ошибок часто наблюдались уже при изменении высоты на 0.5 м.

В связи с этим соединение линиями точек – данных отдельных замеров – является чисто условным и не характеризует пространственного спектра ошибок. Возможно, в частности, по этой причине не удается наблюдать характерного для равнинных трасс уменьшения средних периодов осцилляций ошибок с укорочением длины волны.

Для опытов, проведенных в разных точках, дисперсии ошибок пеленгования на каж-

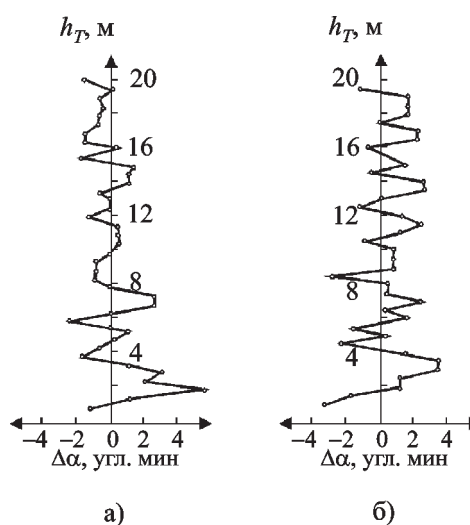


Рис. 16. Высотные зависимости ошибок $\Delta\alpha$ пеленгования по азимуту на волне 8 мм (а) и на волне 4 мм (б). Трасса со сложным рельефом

дой из волн мало отличались и практически не зависели от высоты. Закон распределения по всем опытам оказался близок к нормальному со среднеквадратическим значением ошибки около $1.9'$ на волне 8 мм и около $1.7'$ на волне 4 мм. Слабая зависимость ошибок от длины волны на трассах этой группы согласуется с выводом о практически полном разрушении зеркального отражения даже на наиболее длинной волне.

Сравнение высотных разрезов ошибок в пяти позициях, смещенных друг относительно друга на 0.5 м перпендикулярно линии визирования, проведенное в точке 2 равнинной трассы (рис. 3, б) ($r=1700$ м), показало отсутствие корреляции во всех соседних парах раз-

резов на обеих волнах. Средние по всем пяти парам соседних разрезов значения коэффициентов взаимной корреляции составили 0.08 на волне 8 мм и 0.01 на волне 4 мм при максимальных значениях этих коэффициентов на тех же волнах 0.3 и 0.2 соответственно.

Флуктуационные ошибки определялись путем математической обработки сигнала ошибки и амплитуд принятых сигналов по записям светолучевого осциллографа при обоих (левом и правом) положениях диаграммы направленности пеленгационной антенны. Характер зависимости среднеквадратических значений ошибок от высоты передатчика определялся особенностями трассы. Так, когда на некоторой высоте линия визирования пересекала границу вершин леса, наблюдалась четко выраженная высотная зависимость ошибок, пример которой приведен на рис. 17 (трасса, изображенная на рис. 3, д, точка 3). Если же линия визирования лишь приближалась к кромке вершин, то возрастание ошибок отмечалось, только когда просвет становился порядка радиуса первой зоны Френеля; если же линия визирования оставалась

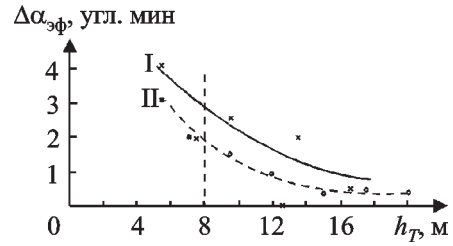


Рис. 17. Высотные зависимости флуктуационных ошибок пеленгования по азимуту на волнах 8 мм (кривая I) и 4 мм (кривая II). Трасса, показанная на рис. 3, д, точка 3

все время достаточно далеко от вершин, то изменение ошибок в функции высоты отсутствовало. В последнем случае значения ошибок на волнах 8 и 4 мм почти не отличались. Протяженность трассы практически не влияла на величину ошибок, если просвет между линией визирования и затеняющими объектами более чем в 2÷3 раза превышал радиус первой зоны Френеля. Данные, характеризующие зависимость флуктуационных ошибок пеленгования по азимуту от длины трассы, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Среднеквадратические значения флуктуационных ошибок (угловые минуты)

Длина волны, мм	Дистанция, км								
	1.3	1.7	3.0	3.9	4.8	5.3	5.5	5.9	
8	2.7	2.5	1.0	1.5	1.4	1.2	1.3	1.5	
4	1.5	1.5	0.4	0.8	1.1	1.1	1.8	—	

Как видно из таблицы, ошибки на волне 4 мм в основном в 1.3 ÷ 2 раза ниже, чем на волне 8 мм.

В ряде случаев пеленгование должно осуществляться в условиях, когда вблизи линии визирования находятся отдельные местные предметы (строения, деревья, транспортные средства и т. д.) либо выступы земной поверхности искусственного или естественного про-

исхождения (насыпи, курганы и т. д.). При этом ошибки пеленгования могут существенно отличаться от наблюдаемых над однородной в среднем поверхностью.

Из теоретического анализа с использованием результатов работ [19-21] и экспериментальных исследований следует, что влияние препятствия как на амплитуду поля в точке наблюде-

ния, так и на ошибки пеленгования оказывается существенным только тогда, когда расстояние между линией визирования и ближайшей к ней границей препятствия становится меньше двух-трех радиусов первой зоны Френеля в месте расположения препятствия. В случае, когда линейные размеры проекции препятствия на плоскость, перпендикулярную линии визирования, (т. е. “тени” препятствия) существенно превышают размеры первой зоны Френеля, явления в первом приближении описываются результатом дифракции Френеля на кромке, ближайшей к линии визирования. Так, в опытах с препятствием в виде искусственного холма при приближении линии визирования к одному из его склонов отмечались осцилляции пеленга, а при опускании передатчика ниже границы тени, пока амплитуда дифрагированного поля не очень мала, пеленги соответствовали направлению на точку кромки склона, ближайшую к линии визирования. Напомним, что ранее этот эффект уже отмечался при пеленговании по углу места на трассах с затенениями, обусловленными рельефом местности или вершинами лесных массивов.

При дальнейшем опускании линии визирования уровень дифрагированного на кромке

препятствия поля оказывается ниже, чем уровень поля, переизлученного незатененными участками поверхности трассы или расположенными на ней местными предметами. Если такие вторичные излучатели удалены от пеленгатора на угловые расстояния, меньшие ширины ДН его антенны, то возникают большие, обычно нестабильные во времени, ошибки пеленгования, сравнимые по величине с полушириной ДН пеленгатора. При угловых расстояниях, превышающих ширину ДН, они пеленгуются как самостоятельные объекты. В этом случае по сути дела ситуация соответствует двухпозиционной радиолокации.

Наглядной иллюстрацией к сказанному являются результаты опыта на лесной просеке (подробнее см. [22]); схема его проведения показана на рис. 18, а ошибки пеленгования по азимуту – на рис. 19. Благодаря малой протяженности трассы, пеленгование на волнах 8 мм (рис. 19, а) и 4 мм (рис. 19, б) было возможным при опускании передатчика ниже границы тени примерно на 7 м. В верхней части высотного разреза величина ошибок практически не отличается от наблюдавшихся на других трассах, а по мере приближения к

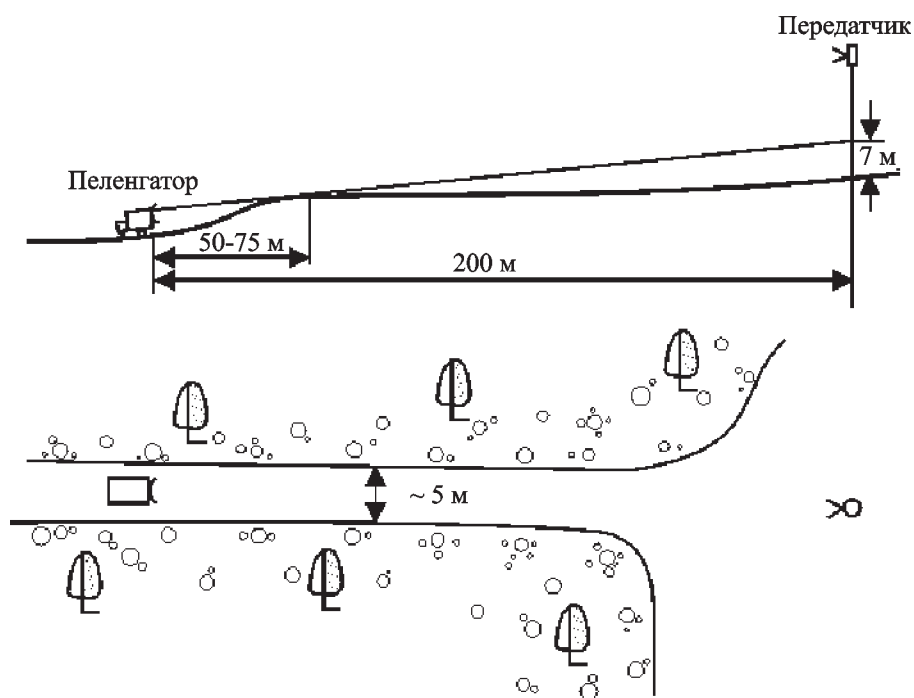


Рис. 18. Схема опыта на лесной просеке

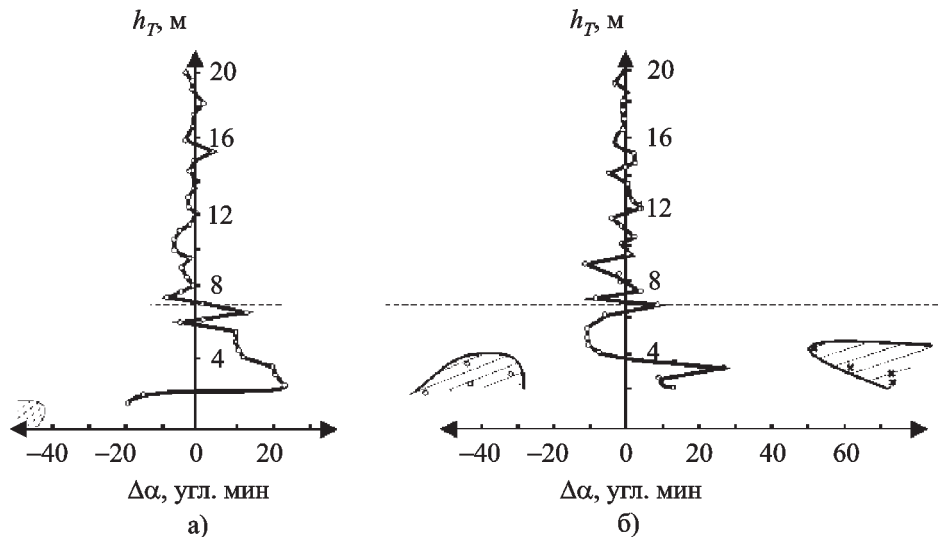


Рис. 19. Высотная зависимость ошибок пеленгования по азимуту на лесной просеке на волнах 8 мм (левый график) и 4 мм (правый график). Горизонтальными штриховыми линиями показана высота геометрической границы тени. Заштрихованные области обозначают зоны ложных пеленгов, их границы условны

границе тени ($h_T \approx 7$ м) и в окрестностях последней они достигают $10 \div 15'$. Ниже границы тени отмечается резкое, до $20 \div 30'$, возрастание ошибки определения направления на передатчик, кроме того, появляются неустойчивые “плавающие” пеленги в направлениях на ограничивающие просеку деревья. Эти области ложных пеленгов, отмеченные штриховкой, отстоят от основного на угол порядка ширины диаграммы направленности антенны и наиболее четко проявляются на волне 4 мм.

Препятствия с линейными размерами “тени”, малыми по сравнению с радиусом первой зоны Френеля, практически не вызывают существенного возрастания ошибок пеленгования по углу места. В азимутальной плоскости их присутствие проявляется в возрастании ошибок только тогда, когда площадь “тени” составляет достаточно большую часть площади первой зоны Френеля, но и в этом случае дополнительная составляющая ошибки имеет примерно такую же величину, как и в отсутствие препятствия. В большинстве случаев ее появление может быть зафиксировано только по колебаниям сигнала ошибки при пересечении препятствием линии визирования.

Особо следует отметить случаи, когда на линии визирования или на расстоянии менее

радиуса первой зоны Френеля от нее находится “полупрозрачная” для радиоволн крона одиночного дерева, лесополоса или роща. Из-за движения листьев и ветвей под действием ветра происходит смена участков прозрачности и непрозрачности крон, что сопровождается глубокими флуктуациями амплитуды прошедшего сигнала и пеленгов. При угловых размерах такой полупрозрачной области порядка ширины ДН пеленгатора отмечается возможность одновременного существования нескольких пеленгов, которые могут перемещаться, исчезать и возникать в новых местах. В зависимости от силы ветра и состояния крон деревьев характерные времена флуктуаций и “жизни” пеленгов составляют от десятых долей секунды до единиц секунд. Это явление может приводить к нарушению работы систем автоматического сопровождения.

Анализ экспериментальных результатов

Проведенное экспериментальное изучение ошибок пеленгования при работе на реальных сухопутных трассах, кроме получения применимых к практическим случаям количественных характеристик, позволяет уточнить модельные

представления, необходимые для расчетов. Как и можно было ожидать, модели, рассмотренной в работах [2-4], наиболее близко соответствуют равнинные трассы, где в отсутствие одиночных препятствий переизлученное поверхностью раздела поле может быть представлено как сумма зеркальной и диффузной компонент. Однако по топографическим данным не удастся определить с достаточной надежностью положение точки зеркального отражения, действующие высоты антенны, углы скольжения, характеристики неровностей поверхности и другие исходные данные, необходимые для расчета высотных зависимостей поля и ошибок пеленгования. Более того, эти величины могут существенно изменяться даже при незначительной, в единицы метров, смене высот любого из корреспондирующих пунктов. Особенно проблематичны возможности прогноза характеристик диффузной компоненты, в частности, распределения ее интенсивности по углам прихода в точку приема. Причиной этого являются как влияние растительного покрова, рассеивающего и поглощающего радиоволны, так и многомасштабность неровностей поверхности реальной почвы, в частности, наличие на грунте структурных шероховатостей высотой в миллиметры, а иногда и в сантиметры (например, при агротехнической обработке). Оценка влияния этих структурных шероховатостей, выполненная в [23], показала, что они вызывают существенное снижение переизлучения из концевых участков трассы, являющихся, согласно [5, 6], наиболее “яркими” областями.

К сожалению, имеющиеся экспериментальные данные не позволяют получить достаточно точные оценки количественных характеристик диффузной компоненты даже на равнинных трассах. Во-первых, в отличие от опытов над морем [18], отсутствуют признаки, которые позволяли бы отличить ее вклад в изменение структуры поля от влияния изменения параметров зеркальной компоненты при смене точки отражения; во-вторых, на реальных трассах практически невозможно четко выделить области, формирующие диффузное переизлучение. Заметим, что для высот корреспондирующих пунктов в описываемых опытах вряд ли применима и методика работы [10], так как запазды-

вание сигнала зеркальной компоненты на равнинных трассах как правило не превышало 0.2 нс, а основная энергия диффузной компоненты, судя по периодам обусловленных ею осцилляций поля, имеет запаздывания не более 1 нс.

Косвенно оценить вклад диффузной компоненты в ошибки измерения угла места на равнинных трассах позволяют результаты работы [24]. Приведенный в ней анализ дистанционных зависимостей ошибок пеленгования по азимуту показал, что пространственные радиусы корреляции ошибок при радиальном разнесении точек излучения в основном не превышают 1 ÷ 2 м, лишь в отдельных опытах достигая 3 ÷ 4 м.

Эти значения можно рассматривать как оценку пространственной корреляции поля диффузной компоненты при разнесении пунктов вдоль луча. Напомним, что по данным, полученным на трассах со сложным рельефом, смена позиции вдоль луча на 2 м также приводила к изменениям вида хаотической составляющей высотных разрезов поля (см. [9]).

При работе над трассами со сложным рельефом и разнообразием растительного покрова лишь в редких случаях и, как правило, в ограниченном интервале высот удается идентифицировать механизм формирования поля: интерференция с зеркальной компонентой, дифракция на препятствии. Значительный процент высотных зависимостей амплитуды поля и ошибок составляют структуры, формирующиеся в результате одновременного действия либо нескольких механизмов, либо одного, например, дифракционного, но при соизмеримом вкладе нескольких переизлучателей.

Поскольку в рассмотренных опытах значения ошибок пеленгования оказываются выше, чем требуется для решения многих практических задач, разработка методов уменьшения ошибок является одной из актуальных проблем. Первый очевидный путь – повышение разрешающей способности по всем параметрам сигнала, позволяющее снизить относительный уровень помеховых сигналов. Что касается сужения ширины диаграмм направленности, являющегося наиболее эффективным путем решения этой проблемы [8], то здесь все огра-

ничивается допустимыми габаритами антенн и возможностями укорочения длины волны с учетом технических возможностей и возрастания влияния метеорологических факторов. На наиболее неблагоприятных равнинных трассах существенное повышение точности измерения угла места будет наблюдаться при ширине диаграммы направленности

$$2\theta_{0,5} < 2\arctg \frac{2h_{T\min}}{r_{\max}},$$

где $h_{T\min}$ – минимальная требуемая высота пеленгуемого объекта; r_{\max} – максимальная дальность до него.

Например, при $h_{T\min} = 2$ м и $r_{\max} = 2000$ м получаем ширину $2\theta_{0,5} < 7'$, для достижения которой даже на волне 3.3 мм необходима апертура диаметром около 1.6 м.

Использование очень коротких импульсов или других видов широкополосных сигналов может позволить подавить зеркальную компоненту поля при условии, что разрешающая способность сигнала по дальности будет

$$\Delta r < \frac{2h_T h_R}{r_{TR}}.$$

Например, при $h_T = 10$ м, $h_R = 2$ м и $r_{TR} = 2 \cdot 10^3$ м разрешающая способность $\Delta r \leq 2$ см, или по времени запаздывания сигнала примерно 0.07 нс. На трассах со сложным рельефом и большим перепадом высот можно ожидать частичного подавления сигналов, переизлученных объектами, которые находятся вблизи краев диаграммы направленности, уже при длительностях импульса около 1 нс, что видно, в частности, из результатов работы [10]. Это означает, что на таких трассах использование широкополосных сигналов может привести к уменьшению случайной составляющей ошибок пеленгования, обусловленных влиянием диффузной компоненты.

В качестве основного итога рассмотренных выше исследований может быть сделан вывод о том, что укорочение длины волны, если ему не препятствуют другие факторы, является достаточно эффективным средством

повышения точности измерения угловых координат. Это происходит вследствие резкого снижения коэффициентов отражения от большей части реальных поверхностей сухопутных трасс, которые в коротковолновой части миллиметрового диапазона лишь в редких случаях превышают значения $0.1 \div 0.2$, причем главная причина больших ошибок измерения угла места – зеркальная компонента – оказывается полностью разрушенной влиянием неровностей поверхности, даже мелкоструктурных, и растительного покрова. Дополнительными факторами, способствующими преодолению проблемы ошибок измерения координат маловысотных объектов на миллиметровых волнах, являются возможность их эффективного усреднения следящими системами благодаря малым пространственным радиусам корреляции [23, 24] и использование сигналов с высоким разрешением по времени.

Заключение

В работе основной акцент сделан на описании и анализе экспериментальных результатов изучения ошибок пеленгования в миллиметровом диапазоне над сушей. Такой выбор автора обусловлен следующими соображениями.

Во-первых, именно результаты экспериментов в реальных условиях работы радиосистем наименее освещены в отечественной и зарубежной литературе.

Во-вторых, над сушей при малых высотах корреспондирующих пунктов наиболее проблематична применимость модельных представлений, развитых в значительном числе исследований для более длинных волн и больших высот. Поэтому не имело смысла углубляться в анализ, заранее понимая их непригодность для рассматриваемого случая. И именно экспериментальные данные могут послужить отправным пунктом для разработки моделей многолучевого распространения радиоволн, адекватных рассматриваемым условиям.

Приводимые в статье экспериментальные данные являются результатом продолжительной творческой работы большого коллектива сотрудников Института радиофизи-

ки и электроники Национальной Академии Наук Украины. Приношу свою благодарность всем, участвовавшим в подготовке, обеспечении и проведении этих исследований. Особо хочу подчеркнуть роль академика С. Я. Брауде, явившегося инициатором проведения работ в этом направлении и их организатором на наиболее ответственном начальном этапе.

Литература

1. D. R. Kerr, ed. Propagation of Short Radio Waves, vol. 13 of MIT Radiation Laboratory Series, McGraw-Hill, 1951.
2. P. Beckman, A. Spizzichino. The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces. London, Pergamon Press, 1963, 503 pp.
3. D. Barton. Low-angle radar tracking. Proc. IEEE. 1974, **62**, No. 6, pp. 687-704.
4. D. Barton. Low-altitude tracking over rough surfaces. 1. Theoretical prediction. – "EASCON'79". October 9 – 11, Arlington, VA, Conf. Proc. **2**, pp. 224-234.
5. Г. П. Кулемин, В. Б. Разказовский. Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью Земли под малыми углами. Киев, Наукова думка, 1987, 232 с.
6. А. Л. Аренберг. Распространение дециметровых и сантиметровых волн. Москва, Сов. радио, 1957, 303 с.
7. Ф. Г. Басс, И. М. Фукс. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. Москва, Наука, 1972, 424 с.
8. Д. Бартон, Г. Вард. Справочник по радиолокационным измерениям. Пер. с англ. под ред. Вейсбейна. Москва, Сов. радио, 1976, 392 с.
9. В. Б. Разказовский. Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 2000, № 3, с. 3-34.
10. P. E. Cornwell, G. Lancaster. Low altitude tracking over rough surfaces. II. Experimental and model comparisons. "EASCON'79", October 9 – 11, 1979, Arlington, VA, Conf. Proc., **2**, pp. 235-248.
11. H. B. Wallace. 140 GHz multipath measurements over varied ground covers. "EASCON'79" October 9 – 11, 1979, Arlington, VA, Conf. Proc., **2**, pp. 256-260.
12. Ю. Ф. Логвинов, Ю. А. Педенко, В. Б. Разказовский. Изв. вузов. Радиофизика. 1996, **39**, №5, с. 547-558.
13. В. Б. Разказовский. Изв. вузов. Радиофизика. 1997, **40**, №8, с. 965-979.
14. Е. В. Чаевский. Укр. физ. журнал. 1968, **13**, №4, с. 670-678.
15. Ю. Ф. Логвинов, Ю. А. Педенко, В. Б. Разказовский. Препринт N 96-4 ИРЭ НАН Украины, Харьков, 1996, 37 с.
16. В. Б. Разказовский, Ю. А. Педенко. Зарубежная радиоэлектроника. 1996, №7, с. 29-39.
17. V. B. Razskazovsky, Yu. A. Pedenko, Yu. F. Logvinov. Telecommunication and Radio Eng. 1997, **51**, No. 2-3, pp. 46-63.
18. C. J. Beard. IRE Trans. Antennas and Propag. 1961, **9**, No. 5, pp. 470-483.
19. H. T. Dougherty, L. J. Maloney. Radio Science J. of Research NBS. 1964, **68D**, No. 2, pp. 239-250.
20. П. Я. Уфимцев. Метод краевых волн в физической теории дифракции. Москва, Сов. радио, 1962, 243 с.
21. П. Н. Дагуров, А. С. Заяханов, Н. Б. Чимитдоржиев. Радиотехника и электроника. 1994, **39**, №2, с. 199-207.
22. В. Б. Разказовский. Труды 7-й Международной Крымской Микроволновой конференции. "Кры-МиКо'97", 15 – 18 сентября 1997 г. Севастополь, 1997, с. 693-694.
23. В. Б. Разказовский, Т. И. Лексикова. Препринт №382 ИРЭ НАН Украины. Харьков, 1989, 30 с.
24. В. Б. Разказовский, А. Ф. Величко. Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1999, **42**, №4, с. 25-34.

Errors in Bearing Low-Altitude Millimeter-Wave Sources over Terrene

V. B. Razskazovsky

The results of the experimental study and the methods of the theoretical description of the errors in measuring the elevation and the azimuth bearing angle for the millimeter-wave sources (in the Ka and V bands) over the terrene are examined. The altitudes of the transmitter antenna above the surface were up to tens meter and the distances to the receiver were 5÷6 km. The examples of the errors versus transmitter height are presented for the different types of terrain. The effects of the multipath propagation and diffraction by the details of relief and the obstacles of the different nature were analyzed. The essential distinction in the propagation of the millimeter and centimeter wave over terrene is ascertained.