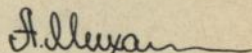


ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи



МИХАЙЛОВСКИЙ Андрей Игоревич

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УГЛОВ ПРИХОДА И МОДУЛЯЦИЯ
ИНТЕНСИВНОСТИ РАДИОВОЛН, РАССЕЯННЫХ ОТ ШЕРОХОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ

01.04.03 - радиофизика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Харьков - 1993

Работа выполнена в Радиоастрономическом институте АН Украины

Научный руководитель: - доктор физико-математических наук
профессор Фукс Исидор Моисеевич

Официальные оппоненты: - доктор технических наук
Разсказовский Вадим Борисович
(Институт радиофизики и электроники АН Украины)
- кандидат физико-математических наук
Яровой Александр Георгиевич
(Харьковский государственный университет)

Ведущая организация: - Авиационный институт, г. Харьков

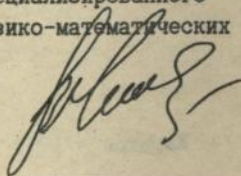
Защита состоится "5" ноября 1993 г. в 14⁰⁰ час.
на заседании специализированного совета Д053.06.04
Харьковского государственного университета /310077, г. Харьков,
пл. Свободы, 4, ауд. III-9/.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке ХГУ

Автореферат разослан "20" сентября 1993 г.

Ученый секретарь специализированного
совета, кандидат физико-математических
наук, доцент

В. И. Чеботарев



ЛННБ України ім. В. Стефаніка



00815262 (0)

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Рассеяние радиоволн на шероховатой поверхности - актуальная и традиционная задача современной радиофизики, т.к. реальная поверхность всегда шероховатая и описывается случайной функцией координат, а иногда и времени.

В работе многих радиолокационных устройств большую роль играют отражения от земной и беспокойной морской поверхности. С ними приходится встречаться, например, при обнаружении и сопровождении низколетящих, наземных или надводных движущихся объектов на фоне сильных маскирующих отражений. В этих случаях отражения от границы раздела выступают в качестве так называемого интерференционного шума (пассивных помех) подстилающей поверхности. При этом он может намного превосходить другие шумы радиолокационных устройств (внутренние шумы аппаратуры, тепловой шум антенны и т.д.) и требует создания специальных средств защиты.

Имеется также много радиотехнических средств, для которых отражение от земной или морской поверхности является не помехой, а источником полезной информации. Это устройства автономной радионавигации для летательных аппаратов, РЛС землеобзора (в том числе РЛС с синтезированной апертурой) и скатерометры, в которых отражение от подстилающей поверхности используют для извлечения информации о ее структуре и состоянии.

Для анализа характеристик интерференционного шума в настоящее время широкое распространение получила модель "блестящих точек", развитая в работах Делано, Островитянова, Чаевского, Разказовского и Кулемина, в которой поверхность представляется в виде набора дискретных отражателей. Однако вопрос о статисти-

ческих параметрах отдельных рассеивателей и связи их с физическими параметрами подстилающей поверхности при таком подходе оставался открытым. Кроме того, при скользящих углах, когда большинство зеркальных точек затенено, оставался вопрос о статистических характеристиках числа незатененных зеркальных точек.

Исходя из состояния исследований в рассматриваемой области сформулирована цель работы: развитие подхода, в котором путем анализа воздействия на радиотехническую систему отраженной от границы раздела волны, найденной методами статистической теории дифракции (Бреховских, Исакович, Басс, Фукс), находятся статистические характеристики интерференционного шума. Преимущество такого подхода заключается в том, что удастся непосредственно связать физические и статистические параметры подстилающей поверхности с характеристиками флуктуаций углов прихода и амплитуды за счет мешающих отражений.

- Научная новизна результатов диссертации заключается в
- аналитическом расчете методами статистической теории дифракции дисперсии и энергетических спектров флуктуаций амплитуды и углов прихода радиоволн при распространении над поверхностью суши и взволнованной поверхностью моря в зависимости от параметров подстилающей поверхности;
 - получении аналитического выражения для вероятности незатенения зеркальной точки на неоднородной взволнованной поверхности моря;
 - выводе аналитических выражений для первых статистических моментов числа незатененных зеркальных точек на случайной поверхности при малых углах скольжения;
 - получении аналитических выражений для добавок к удельной эфф-

эффективной поверхности рассеяния за счет наклонов рельефа и неоднородностей электродинамических параметров почвы.

Практическая ценность работы состоит в том, что полученные статистические параметры интерференционного шума необходимы при проектировании, а также оценке потенциальной точности и анализе работы систем автосопровождения низколетящих, наземных и надводных целей. В частности, полученные формы спектров флуктуаций параметров пеленгации (амплитуды, угла прихода радиоволн) имеют принципиальное значение для решения вопроса о выборе способа оптимальной обработки сигнала, а при заданном способе обработки - для определения его эффективности.

Показана возможность возникновения сильных замираний сигнала при пеленгации под скользящими углами за счет малого количества перестраивающихся центров на случайной поверхности. Это особенно важно при анализе срыва автосопровождения цели.

Данные о модуляции удельной эффективной поверхности рассеяния наклонами рельефа и неоднородностями диэлектрических параметров почвы рекомендуется использовать при анализе работы и проектировании РЛС землеобзора. В частности, для систем с высоким разрешением можно решать вопрос о построении карты рельефа по модуляции средней мощности сигнала или же анализировать аномальные неоднородности диэлектрической проницаемости подстилающей поверхности.

Положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Аналитические выражения, позволяющие определять характеристики интерференционного шума по статистическим и физическим параметрам границы раздела.

2. Модель поверхности моря, где высота и наклон - статистически зависимые величины, в рамках которой получена функция затенений, позволившая объяснить немонотонную экспериментальную зависимость ширины спектра флуктуаций пеленга от дистанции и появление в нем вторичных максимумов.

3. Результаты исследований статистики незатененных зеркальных точек при малых углах скольжения. Показано, что среднее и дисперсия числа незатененных зеркальных точек на стационарной поверхности совпадают, пропорциональны отношению высоты подъема корреспондирующих пунктов к СКО высот подстилающей поверхности и не зависят от дистанции.

4. Модель радиолокационного сигнала, учитывающая модуляцию его интенсивности наклонами рельефа и неоднородностями электродинамических параметров почвы, в которой рассчитаны:

- коэффициенты контраста по наклонам и по диэлектрической проницаемости для случая высокого пространственного разрешения;
- добавка к удельной эффективной поверхности рассеяния, пропорциональная дисперсии наклонов для случая низкого пространственного разрешения.

Обоснованность и достоверность результатов и выводов диссертации подтверждается согласованностью их с данными натуральных экспериментов и численного моделирования на ЭВМ.

Апробация. Результаты диссертационной работы докладывались на XVI Всесоюзной конференции по распространению радиоволн (Ст. Салтов, 1990), II и III областных конференциях молодых ученых и специалистов РИ АН УССР (Харьков 1989, 1990), II Крымской конференции "СВЧ-техника и спутниковый прием" (Севастополь 1992),

II конференции "Применение дистанционных радиофизических методов в исследованиях природной среды" (Муром 1992).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 4 статьи и 2 тезиса докладов.

Объем и структура работы. Основной текст диссертации состоит из введения, четырех глав, и заключения (128 страниц машинописного текста). Работа содержит 25 рисунков (22 стр.), включает приложение (16 стр.) и список литературы (96 библиографических наименований). Общий объем работы - 178 стр.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается краткий обзор состояния исследований и обосновывается актуальность выбора темы, сформулированы цели и задачи, краткое содержание работы, а также положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена исследованию статистических характеристик ошибок пеленга радиисточника, движущегося над неровной поверхностью. Полученные с помощью теории дифракции волн на статистически неровной границе раздела результаты сравниваются с экспериментом.

Напряженность поля в точке приема U представлялась в виде:

$$U = U_0 + u \quad (1)$$

где U_0 - напряженность поля прямого сигнала, u - сигнал, вызванный отражением от поверхности раздела, которая предполагалась достаточно крупномасштабной по сравнению с длиной волны λ ,

так что отражение от нее можно было рассчитать методом касательной плоскости. Считалось, что поверхность представляет собой реализацию нормального случайного поля с нулевым математическим ожиданием и дисперсиями высот и тангенсов наклонов σ_z^2 и γ_0^2 соответственно. Приемник и передатчик расположены на одинаковой высоте z , а горизонтальная дальность между ними равна D .

Для случая, когда параметр Рэлея Θ большой, т.е.:

$$\Theta \gg 1, \quad \Theta = k\sigma_z \sin\theta_s, \quad (2)$$

где $k = 2\pi/\lambda$, $\sin\theta_s \approx 2z/D = 2z/D$, получена средняя ошибка пеленга в вертикальной (угломестной) плоскости ψ :

$$\langle \Delta\alpha \rangle_\psi = 2\eta g(\theta_s) V_{\theta_s}(\theta_s) \cos(2k\eta z), \quad (3)$$

где $V_{\theta_s} \approx \exp(-\Theta^2)$, $g(\theta_s)$ - значение диаграммного множителя (по амплитуде) антенны пеленгатора в направлении на "зеркальную точку"

Дисперсия флуктуаций пеленга в угломестной плоскости $\langle \delta\alpha \rangle_\psi^2$ существенно зависит от ширины диаграммы направленности пеленгатора $\Theta_0 \approx \lambda/d$ (d - линейные размеры апертуры антенны пеленгатора). В зависимости от соотношения между величинами Θ_0 , γ_0 и η введены следующие три определения для антенны пеленгатора:

1). $\Theta_0 \gg \gamma_0$ - антенна пеленгатора изотропная. В этом случае дисперсия флуктуаций описывается формулой:

$$\langle \delta\alpha \rangle_\psi^2 \approx \sqrt{\frac{\pi}{2}} \eta \gamma_0 \left(1 + \frac{\eta}{\gamma_0}\right). \quad (4)$$

2). $\eta \ll \Theta_0 \approx \gamma_0$ - антенна пеленгатора слабонаправленная:

$$\langle \delta\alpha \rangle_\psi^2 \approx \frac{\Theta_0^3 \eta}{\gamma_0^2}. \quad (5)$$

3). $\Theta_0 \leq \eta$ - антенна пеленгатора остронаправленная:

$$\langle \delta\alpha \rangle_{\varphi}^2 \approx \frac{1}{4\sqrt{\epsilon}} (\Theta_0 g(\eta))^2. \quad (6)$$

Из сравнения (4) и (5) (изотропная и слабонаправленная антенны соответственно) видно, что при сохранении возрастания $\langle \delta\alpha \rangle_{\varphi}^2$ с ростом η , зависимость от шероховатости поверхности γ_0 различные. С увеличением γ_0 для слабонаправленной антенны дисперсия углов прихода уменьшается, а для ненаправленной ($\Theta_0 \gg \gamma_0$) - увеличивается. Это говорит о том, что в первом случае существенную роль играет область зеркального отражения, а во втором - область диффузного отражения, расположенная под передатчиком.

Отсутствие зависимости от γ_0 в (6) объясняется влиянием фактора затенений радиоволны подстилающей поверхностью. С одной стороны, чем больше γ_0 , тем больше радиояркость поверхности под пеленгуемым источником (область существенная для отражения при остронаправленной антенне); с другой стороны затенения вносят фактор обратно пропорциональный γ_0 .

Ошибки в азимутальной плоскости φ имеют флуктуационный характер с математическим ожиданием равным нулю. Связь между дисперсиями флуктуаций ошибок пеленга в азимутальной и угломестных плоскостях выражается соотношением:

$$\langle \delta\alpha \rangle_{\varphi}^2 = \gamma_0^2 \langle \delta\alpha \rangle_{\psi}^2 \quad (7)$$

При выводе выражений (4), (5), (6), (7) считалось, что рассмотрение ведется при скользких углах, для которых справедливо неравенство: $\eta/\gamma_0 \ll 1$ и выполняется условие (2).

Для случая, когда параметр Релея мал, т.е. $\Theta \ll 1$, средний пеленг в азимутальной плоскости равен нулю, а в угломестной носит периодический характер в зависимости от дистанции D , высоты

приемника и передатчика z , и заключен в пределах:

$$\langle \alpha \rangle_{\psi \min} \leq \langle \alpha \rangle_{\psi} \leq \langle \alpha \rangle_{\psi \max}, \quad (8)$$

где

$$\langle \alpha \rangle_{\psi \min} = -2\eta \frac{g(\theta_3) |V_{3\phi}|}{1 + g(\theta_3) |V_{3\phi}|},$$

$$\langle \alpha \rangle_{\psi \max} = 2\eta \frac{g(\theta_3) |V_{3\phi}|}{1 - g(\theta_3) |V_{3\phi}|}.$$

При $g(\theta_3) |V_{3\phi}| \cong 1$ (случай слабонаправленной антенны и малых параметров Рэлея), как видно из (8), $|\langle \alpha \rangle_{\psi \min}| \ll |\langle \alpha \rangle_{\psi \max}|$, т.е. ошибки пеленга с положительным знаком (превышение) существенно превосходят ошибки с отрицательным знаком (измеренная высота меньше истинной).

Спектр флуктуаций ошибок пеленга источника в угломестной плоскости, движущегося горизонтально от пеленгатора, с точностью до постоянных коэффициентов, равен:

$$S_{\psi}(F) \cong g^2(\theta) \left. \frac{D^2 R_z^2 \ddot{\sigma}_0}{R_1^3 (R_1 + R_2)} \right|_{x=x_F}, \quad (9)$$

где

$$\theta = \arccos(x/R_1); \quad R_1 = \sqrt{x^2 + z^2}; \quad R_2 = \sqrt{(D-x)^2 + z^2};$$

$$x_F = D - \frac{z(1-F)}{\sqrt{F(2-F)}}; \quad F = \frac{\nu}{k\nu};$$

где ν - частота флуктуаций, v - скорость источника, $\ddot{\sigma}_0$ - удельное двухпозиционное сечение рассеяния в плоскости падения ZOX , которое имеет вид:

$$\ddot{\sigma}_0 = \frac{|\vec{q}|^4}{kq_z^2} \omega(\gamma = -\frac{q_x}{q_z}) Q_{sh}(\eta, \gamma_0), \quad (10)$$

где $\vec{q} = (q_x, q_z) = -k \cdot \text{grad}(R_1 + R_2)$ - вектор рассеяния, координаты

которого равны:

$$q_x = k \left(\frac{D-x}{R_2} - \frac{x}{R_1} \right); \quad q_z = k \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right); \quad (11)$$

$\omega(\gamma_x = -\frac{q_x}{q_z})$ - значение плотности вероятностей тангенсов наклонов подстилающей поверхности, удовлетворяющих в точке $x=x_F$ условию зеркального отражения; $Q_{sh} = Q_{sh}(\eta, \gamma_0)$ - функция затенений, которая эквивалентна вероятности незатенения точки на поверхности при условии, что наклон удовлетворяет условию зеркального отражения. Для нормальной случайной поверхности и скользящих углов, функция затенений имеет вид:

$$Q_{sh} \approx \sqrt{2\pi} \frac{\eta}{\gamma_0} \left(1 + O\left(\frac{\eta}{\gamma_0}\right) \right). \quad (12)$$

Таким образом, каждой частоте флуктуаций ν можно поставить в соответствие точку на поверхности x_F , интенсивность отражений от которой определяет спектральную плотность на частоте ν , причем связь между частотой и координатой определяется эффектом Доплера.

Флуктуации ошибок пеленга в азимутальной плоскости φ в общем случае отличается от спектра флуктуаций в угломестной плоскости ψ . Однако, для оценки по порядку величины, приемлемо соотношение:

$$S_\varphi(\nu) \approx \gamma_0^2 S_\psi(\nu) \quad (13)$$

Отметим, что флуктуации азимута и угла места некоррелированы.

Были проведены исследования флуктуаций ошибок пеленгования с учетом деполяризации. Показано, что при скользящих углах этот механизм не вносит существенных изменений в форму спектра.

Сравнение теоретических и экспериментальных данных дало удовлетворительное совпадение.

Вторая глава посвящена изучению статистических характеристик интерференционного шума при пеленгации радиоисточника над взволнованной поверхностью моря. За счет того, что подстилающая поверхность изменяется во времени, сигнал в точке приема, состоящий из прямого и отраженного от границы раздела, тоже испытывает временные флуктуации (интерференционный шум). Рассматриваются энергетические спектры флуктуаций амплитуды и угла прихода радиоволн в вертикальной (угломестной) плоскости и горизонтальной (азимутальной). Задача состоит в том, чтобы по совокупности параметров морской поверхности определить спектр флуктуаций пеленгационного сигнала.

При рассмотрении рассеяния на движущейся поверхности, здесь так же, как при анализе ошибок пеленгации движущегося источника (глава 1), спектральная плотность на частоте флуктуаций ν определяется отражениями от участков поверхности, сигнал от которых сдвинут на эту же частоту ν по отношению к прямому сигналу за счет эффекта Доплера. Существенным различием между случаями движущегося передатчика и движущейся поверхности является учет совокупности направлений распространения плоских волн, формирующих морскую поверхность, а также дисперсионного соотношения.

Если рассматривается скользящее распространение волн, когда характерные углы скольжения малы, то даже для случая, когда отношение высоты неровностей к длине волны не мало, соответствующий параметр Рэля в области середины трассы (зеркальной точки) может быть мал (в силу малости угла скольжения). Тогда для вычисления рассеянного поля от этих участков поверхности

применим метод плавных возмущений (МПВ). При этом мы можем правильно описать только низкие частоты в спектре флуктуаций ошибок параметров пеленгации. Высокочастотные составляющие в спектре флуктуаций интерференционного шума можно описать, рассматривая отражения от морской поверхности в приближении Кирхгофа (от участков поверхности, расположенных под приемником и передатчиком, где параметр Рэлея велик).

Расчет в приближении МПВ показал, что наблюдающийся в экспериментах максимум в спектре флуктуаций $S(\nu)$ (ν -частота флуктуаций) углов прихода и амплитуды пеленгационного сигнала на частоте, соответствующей максимуму в спектре морского волнения $\mathcal{K}(\nu)$, является следствием резонансного рассеяния волн на морской поверхности, поэтому в области максимума спектральной плотности флуктуаций $S(\nu) \sim \mathcal{K}(\nu)$.

Предложена модель статистически неоднородной поверхности моря, в рамках которой получено выражение для вероятности незатенения зеркальных точек. При этом существенным является наличие статистической зависимости между высотой и наклоном в одной и той же точке. Корреляция между соседними гребнями морских волн учитывалась в односвязном марковском приближении. Показано, что с возрастанием корреляции вероятность незатенения возрастает. Зависимость от дистанции отсутствует, за исключением участков, прилегающих к приемнику и передатчику, где обнаружен рост, а затем резкий спад вероятности незатенения при малых коэффициентах корреляции между гребнями волн. Получены асимптотические выражения в предельных случаях сильной и слабой корреляции между высотами соседних гребней.

Расчет в приближении Кирхгофа (высокие частоты) показал, что учет функции затенений на пространственно неоднородной слу-

чайной поверхности позволяет объяснить немонотонную зависимость ширины спектра флуктуаций углов прихода от дистанции, а также наличие в нем максимумов на частотах значительно выше частоты максимума спектра морского волнения.

Третья глава посвящена исследованию статистических характеристик числа зеркальных точек на стационарной случайной поверхности при малых углах скольжения.

Теоретические исследования статистических моментов числа зеркальных точек на случайной поверхности были проведены исходя из следующих предположений: рассматривалась цилиндрическая нормальная поверхность, корреляционная функция которой задавалась в виде:

$$R_{\zeta}(\Delta x) = \sigma_{\zeta}^2 \exp\left(-\left(\frac{\Delta x}{l}\right)^2\right). \quad (14)$$

Диаграммы направленностей приемника и передатчика не учитывались, однако в случае необходимости, их влияние легко может быть оценено. При этом, используя аппарат теории выбросов случайных функций и учитывая вероятности затенений показано, что среднее число незатененных зеркальных точек равно:

$$M(n) = \sqrt{\frac{6}{\pi}} \frac{z}{\sigma_{\zeta}} \left(1 + O\left(\frac{\eta}{\gamma_0}\right)\right). \quad (15)$$

Отсутствие зависимости $M(n)$ от дистанции D объясняется следующим образом: при увеличении дистанции общее число зеркальных точек возрастает, так как его можно оценить как отношение D/l . Однако этот рост полностью компенсируется (с точностью до малой величины η/γ_0 при скользких углах и достаточно неровной поверхности) фактором затенений (см. (12)).

Для случая, когда высота приемника равна z_1 , а источника

z_2 , среднее число незатененных зеркальных точек равно:

$$M(n) \approx \sqrt{\frac{6}{\pi}} \frac{1}{\sigma_z} \frac{z_1 z_2}{z_2 - z_1} \ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right). \quad (16)$$

Дисперсия числа незатененных зеркальных точек стремится к своему математическому ожиданию, а именно $\lim_{n/\gamma \rightarrow 0} D(n) = M(n)$. Этот факт позволяет сделать предположение, что распределение числа незатененных зеркальных точек близко к Пуассоновскому.

В таблице 1 приводятся данные цифрового моделирования на ЭВМ. Ансамбль поверхностей моделировался реализациями гауссовского случайного процесса с корреляционной функцией (14) со следующими исходными данными: $l=3$, $\sigma_z^2=1$, интервал дискретизации $\Delta=0.1$. Высоты приемника и передатчика равны между собой и составляют $z=10$, дистанция между ними изменялась через 100, $D = 100 - 1000$. Усреднение производилось по 20-ти реализациям. \hat{M} и \hat{D} - оценка математического ожидания и дисперсии числа незатененных зеркальных точек соответственно.

Таблица 1. Результаты моделирования на ЭВМ.

D	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
\hat{M}	9.8	12.3	14.3	14.6	14.2	14.6	14.5	14.3	13.5	14.1
\hat{D}	4.5	5.2	12	15.2	7.54	6.63	8.85	11.7	14.8	11.2

Учитывая, что при данных исходных значениях, среднее число незатененных зеркальных точек по формуле (15): $M(n) \approx 13.8$, то, как видно из Таб. 1, результаты моделирования хорошо соответствуют теоретическим данным.

Интервал дискретизации поверхности при численном моделировании выбирался исходя из рассмотрения ошибок, связанных с конечностью величины P_z - вероятности "пропуска" узкого выброса

(длительностью меньше Δ). Показано, что для скользящих углов ($\eta/\gamma_0 \ll 1$):

$$P_{\text{Э}} \sim (\Delta/L)^2. \quad (17)$$

Четвертая глава посвящена исследованию вариаций удельной эффективной поверхности рассеяния (УЭПР) радиолокационного сигнала, отраженного от шероховатой поверхности с малыми неровностями, за счет изменения наклонов крупномасштабного рельефа и за счет неоднородностей диэлектрической проницаемости $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$. УЭПР $\sigma_{\text{п.а}}^0$ от горизонтального участка шероховатой поверхности однородной по ϵ можно рассчитать по методу малых возмущений:

$$\sigma_{\text{п.а}}^0 = 16\pi k^4 Q(\theta, \epsilon) S(2k \sin \theta) \quad (18)$$

где $k=2\pi/\lambda$, Q - множитель, зависящий только от ϵ , поляризации излучения и угла падения $\theta = -\arccos(\vec{n} \cdot \vec{\alpha})$ (между направлением облучения $\vec{\alpha}$ и нормалью \vec{n} к средней поверхности, вдоль которой направлена ось OZ декартовой системы координат, причем в качестве плоскости падения $(\vec{\alpha}, \vec{n})$ выбирается координатная плоскость XOZ), $S(\kappa)$ - пространственный энергетический спектр резонансно рассеивающих неровностей, который, существенно не ограничивая общности рассуждений, можно считать степенным: $S(\kappa) \approx \kappa^{-m}$. Модуляция наклонами $\vec{\gamma} = (\gamma_x, \gamma_y) = \vec{\nabla} Z(x, y)$ крупномасштабного рельефа, заданного уравнением $z=Z(x, y)$, приводит к изменению направления локальной нормали $\vec{n} \rightarrow \vec{N} = (\vec{n} - \vec{\gamma}) / (1 + \gamma^2)^{1/2}$ и, следовательно, к изменению угла падения $\theta \rightarrow \theta' = -\arccos(\vec{N} \cdot \vec{\alpha})$. Если линейные размеры d поверхностного элемента разрешения Σ намного меньше радиуса корреляции L функции $Z(x, y)$, то изменение наклона $\vec{\gamma}$ в пределах Σ можно пренебречь и вариации УЭПР σ^0 можно связать только с изменением в (18) направления локальной нормали \vec{N} . Аналогичным

образом обстоит дело и с изменением ε .

Предположим, что один из параметров $\bar{\Phi} = (\gamma_x, \gamma_y, \varepsilon', \varepsilon'')$ подстилающей поверхности отклоняется от своего среднего значения $\langle \bar{\Phi} \rangle$ на величину $\Delta \bar{\Phi}$. Тогда в первом приближении по $\Delta \bar{\Phi}$ модуляция УЭПР в (дБ) описывается формулой:

$$10 \lg[\sigma^0(\langle \bar{\Phi} \rangle + \Delta \bar{\Phi})] = 10 \lg[\sigma_{\text{пл}}^0(1 + K_{\bar{\Phi}} \Delta \bar{\Phi})] \cong 10 \lg \sigma_{\text{пл}}^0 + 4.34 K_{\bar{\Phi}} \Delta \bar{\Phi}, \quad (19)$$

где $K_{\bar{\Phi}} = (1/\sigma_{\text{пл}}^0) \left. \frac{d\sigma_{\text{пл}}^0}{d\bar{\Phi}} \right|_{\Delta \bar{\Phi}=0}$ - коэффициент контраста σ^0 по параметру $\bar{\Phi}$.

На горизонтальной поляризации коэффициент контраста по наклонам γ_x имеет вид:

$$K_{\gamma_x}^{\Gamma\Gamma} = 4 \lg \theta (1 - \text{Re} \xi) + m \text{ctg} \theta, \quad (20)$$

где $\xi = \cos \theta / (\varepsilon - 1)^{1/2}$, $|\varepsilon| \gg 1$. Минимум коэффициента $K_{\gamma_x}^{\Gamma\Gamma}(\theta)$ достигается при $\theta \cong \arcsin(m/(m+4))^{1/2}$. На вертикальной поляризации при крутых углах падения θ , для которых выполняется соотношение $\varepsilon \xi \gg 1$, коэффициент $K_{\gamma_x}^{\text{ВВ}}$ меньше, чем $K_{\gamma_x}^{\Gamma\Gamma}$, а для скользких углов, где $\varepsilon \xi \ll 1$, $K_{\gamma_x}^{\text{ВВ}} \rightarrow K_{\gamma_x}^{\Gamma\Gamma}$. Следует отметить, что если показатель спектра $m < 2$, то при крутых углах падения $K_{\gamma_x}^{\text{ВВ}}$ и $K_{\gamma_x}^{\Gamma\Gamma}$ имеют разные знаки.

Коэффициент контраста по наклонам γ_y (поперек плоскости падения) равен нулю как для вертикальной, так и для горизонтальной поляризации.

Коэффициенты контраста для горизонтальной поляризации по действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости имеют вид:

$$K_{(\varepsilon'')}^{\Gamma\Gamma} = 2 \left\{ \begin{array}{l} \text{Re} \\ -\text{Im} \end{array} \right\} \frac{\cos \theta}{(\varepsilon - 1)^{3/2}} (1 + O(\xi^2)). \quad (21)$$

$K_{\epsilon}^{\Gamma\Gamma}$ может быть как положительной, так и отрицательной величиной в зависимости от соотношения ϵ' и ϵ'' . Отметим, что если $\epsilon'' = \sqrt{3}(\epsilon' - 1)$, $K_{\epsilon}^{\Gamma\Gamma} \geq 0$.

Для вертикальной поляризации, $K_{\epsilon', \epsilon''}^{\text{ВВ}}(\theta)$ - возрастающие функции, причем

$$K_{\epsilon', \epsilon''}^{\text{ВВ}}(\beta=0) = K_{\epsilon', \epsilon''}^{\Gamma\Gamma}(\beta=0), \quad (22)$$

$$K_{\epsilon', \epsilon''}^{\text{ВВ}}(\theta=\pi/2) = 2 \left\{ \begin{matrix} \text{Re} \\ -\text{Im} \end{matrix} \right\} \frac{1}{\epsilon - 1}.$$

В случае низкого пространственного разрешения ($d \gg L$), влияние крупномасштабного рельефа сводится к усреднению $\sigma_{\text{пл}}^0(\theta')$ по случайным наклонам γ_x и γ_y с их плотностью распределения $w(\gamma_x, \gamma_y)$:

$$\sigma_{\text{пл}}^0(\theta) = \int_{-\infty}^{\infty} d\gamma_y \int_{-c \text{tg} \theta}^{\infty} \sigma_{\text{пл}}^0(\theta') (1 + \gamma_x \text{tg} \theta) w(\gamma_x, \gamma_y) d\gamma_x \quad (23)$$

Для достаточно пологого рельефа из (23) получены аналитические формулы с точностью до членов второго порядка по γ_x и γ_y и показано, что при возрастании дисперсии наклонов, УЭП на горизонтальной поляризации возрастает больше, чем на вертикальной; влияние трехмерности шероховатостей для нее также оказывается больше:

В заключении приведены основные результаты, полученные в диссертации.

В приложение вынесены выводы формул (дисперсия числа незатененных зеркальных точек, вероятность пропуска узкого выброса, добавка к УЭП в двухмасштабной модели при произвольной диэлектрической проницаемости подстилающей поверхности), сохранение которых в основном тексте диссертации было нецелесообразно ввиду их громоздкости.

Материалы диссертации изложены в работах:

1. Михайловский А.И., Фукс И.М. Статистические характеристики числа зеркальных точек на случайной поверхности при малых углах скольжения. // Радиотехника и электроника - 1993. - Т. 38. - №1. - С. 112 - 122.
2. Горбач Н.В., Михайловский А.И. Спектры угловых ошибок пеленгования источника, движущегося под малыми углами места над неровной поверхностью. // Изв. ВУЗов, Радиофизика - 1992. - Т. 35. - №3,4. - С. 264 - 274.
3. Михайловский А.И. Статистические моменты ошибок измерения пеленга источника над неровной подстилающей поверхностью. // Изв. ВУЗов, Радиоэлектроника - 1991. - №11. - С. 40 - 46.
4. Горбач Н.В., Михайловский А.И., Фукс И.М., Шарапов Л.И. Спектры угловых ошибок пеленгования источника КВЧ, движущегося над неровной границей раздела. В кн.: Сборник трудов научной конференции и выставки "СВЧ - техника и спутниковый прием". - Севастополь, 1992. - С. 337 - 342.
5. Михайловский А.И., Фукс И.М. Модуляция радиолокационного сигнала от шероховатой поверхности наклонами рельефа и неоднородностями электродинамических параметров почвы. В кн.: Тезисы докл. II научной конференции "Применение дистанционных радиофизических методов в исследованиях природной среды". - Муром, 1992. - С. 41 - 42.
6. Горбач Н.В., Михайловский А.И. Исследование флуктуаций параметров интерференционного шума, обусловленного рассеянием радиоволн на случайной неровной границе раздела. В кн.: Тезисы докл. XVI Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. - Харьков (Ст. Салтов), 1990. - С. 31.

Ав 27.944
Ав 27.944

Научное издание

Михайловский Андрей Игоревич

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УГЛОВ ПРИХОДА И МОДУЛЯЦИЯ
ИНТЕНСИВНОСТИ РАДИОВОЛН, РАССЕЯННЫХ ОТ
ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Автореферат

Подписано в печать 30.06.93 г.
Формат 60x84/16. Физ.печ.л. I
Тираж 100 экз. Заказ III

Ротапринт ИРЭ АН Украины
Харьков-85, ул.Ака.Проскури, 12