

## **Особенности статистических характеристик радиоволн трехмиллиметрового диапазона при распространении над взволнованной морской поверхностью**

Н. В. Горбач, Л. И. Шарапов, В. Г. Гутник

*Радиоастрономический институт НАН Украины  
Украина, 61002, г. Харьков, ул. Краснознаменная, 4  
E-mail: sharapov@rian.kharkov.ua*

*Статья поступила в редакцию 8 августа 2001 г.*

В работе представлены результаты экспериментальных исследований флуктуаций радиосигналов трехмиллиметрового диапазона длин волн при распространении над морской поверхностью. Проведен статистический анализ флуктуаций амплитуды и углов прихода прямого и отраженного сигналов. Анализируется соответствие экспериментальных распределений вероятности замираний амплитуды сигналов различным теоретическим законам. Изучены зависимости между некоторыми параметрами поверхности раздела и характером флуктуаций радиосигналов. Исследована корреляционная связь между сигналами в амплитудном и угловом каналах пеленгатора для случая точечной морской цели. Проанализированы результаты исследования спектров амплитудных и угловых флуктуаций на морских и сухопутных трассах. Приведены данные о средних и флуктуационных ошибках пеленгов.

У роботі подані результати експериментальних досліджень флуктуацій радіосигналів триміліметрового діапазону довжин хвиль при розповсюдженні над морською поверхнею. Проведено статистичний аналіз флуктуацій амплітуди і кутів приходу прямого і відбитого сигналів. Аналізується відповідність експериментальних розподілів імовірності завмирань амплітуди сигналів різним теоретичним законам. Вивчено залежності між деякими параметрами поверхні поділу і характером флуктуацій радіосигналів. Досліджено кореляційний зв'язок між сигналами в амплітудному і кутовому каналах пеленгатора для випадку точкової морської цілі. Проаналізовано результати дослідження спектрів амплітудних і кутових флуктуацій на морських і сухопутних трассах. Наведено дані про середні і флуктуаційні помилки пеленгів.

### **Введение**

Интенсивное развитие радиотехнических систем различного применения, работающих в миллиметровом диапазоне, вызвало необходимость проведения обстоятельных теоретических и экспериментальных исследований характеристик распространения и рассеяния радиоволн. Одним из направлений практического применения миллиметровых радиоволн является создание РЛС ближнего радиуса действия, эффективность работы которых зави-

сит от различных процессов в окружающей среде. Основной причиной, ограничивающей эффективность и надежность РЛС, работающих при малых углах скольжения, являются интерференционные шумы, связанные с переотражениями от поверхности раздела. Они значительно превышают флуктуации радиосигналов в тропосфере и внутренние шумы аппаратуры.

В литературе имеется целый ряд теоретических и экспериментальных работ, в частности [1-3], посвященных исследованию интерференционных шумов. Полученные результа-

ты позволяют определить основные факторы, ограничивающие эффективность и надежность работы радиоэлектронных систем вблизи поверхности раздела. Однако большинство представленных в литературе результатов исследований в основном относится к длинноволновым диапазонам, коротковолновая часть миллиметрового диапазона (КВЧ ММД) практически не исследована.

В длинноволновых диапазонах до сих пор недостаточно исследован целый ряд вопросов, в частности:

- связь параметров поверхности с параметрами рассеянного ею поля;

- характер корреляционной связи между сигналами в амплитудном и угловом каналах пеленгатора при пеленгации целей вблизи поверхности раздела;

- часть имеющихся экспериментальных результатов не может быть объяснена в рамках теории диффузного рассеяния радиоволн.

Для КВЧ ММД практически полностью отсутствует информация о спектральных характеристиках пеленгов точечного источника излучения, движущегося над шероховатой поверхностью раздела.

Целью настоящей работы является получение результатов, восполняющих недостаток информации о характеристиках флуктуаций параметров радиосигналов КВЧ ММД вблизи поверхности раздела. Такие результаты необходимы для разработки радиоэлектронных систем и уточнения теоретических моделей рассеяния электромагнитных волн подстилающей поверхностью.

### Результаты экспериментальных исследований

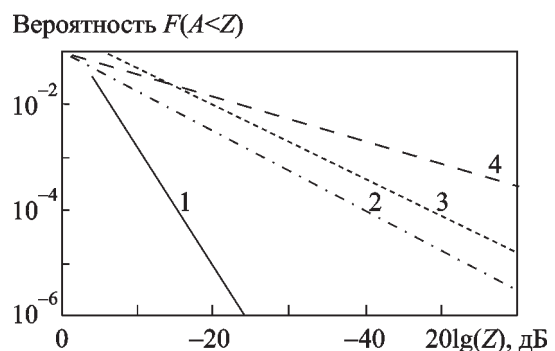
В работе проводится статистический анализ флуктуаций амплитуды и углов прихода отраженного и прямого сигналов при распространении над поверхностью моря в диапазоне углов скольжения от 1 до 10 мрад (волна 3 мм) и дальностях до 5 км. Во время экспериментов регистрировались параметры морского волнения.

#### Статистика амплитудных флуктуаций

Экспериментальные результаты, полученные на морских трассах при волнениях от 0 до 4 баллов, позволили провести анализ со-

ответствия распределений вероятности замирания амплитуд сигналов различным теоретическим законам (Релея, Райса, для двухлучевой модели, для нерелеевского замирающего сигнала с малым числом  $N$  сигналов помехи [1, 2]). При анализе экспериментальных данных была использована классификация интегральных законов распределений вероятности замираний амплитуды сигнала по виду степенной зависимости [3], описывающей наклон кривых таких распределений. Статистика включает вероятность  $F(A < Z)$  того, что амплитуда  $A$  замирающего сигнала будет меньше установленного уровня  $Z$ .

На рис. 1, взятом из работы [3], приведены примеры наиболее характерных распределений: 1 – распределение вида  $F(A < Z) \sim Z^4$  (для радиоканалов с малым уровнем многолучевых замираний); 2 –  $F(A < Z) \sim Z^2$  (квадратичный закон в области глубоких замираний имеют распределения Накагами, Райса и Релея); 3 – распределение Релея; 4 – распределение вида  $F(A < Z) \sim Z$  (надводный радиоканал прямой видимости с малым числом отражателей). Для большинства реальных ситуаций, несмотря на широкий диапазон изменений характеристик среды, в которой происходят замирания, и условий испытаний, характерными являются законы с показателями степени  $n = 2$ , т. е. близкие к закону Райса. Одна-



**Рис. 1.** Интегральные законы распределения флуктуаций амплитуды принятого сигнала:  
 1 – распределение вида  $F(A < Z) \sim Z^4$ ;  
 2 –  $F(A < Z) \sim Z^2$ ; 3 – распределение Релея;  
 4 –  $F(A < Z) \sim Z$  (малое количество отражателей на поверхности)

ко для некоторых тропосферных и надводных радиоканалов имеют место случаи, описываемые зависимостью с показателем  $n = 1$ . Такая ситуация отмечалась в работе [4], что было объяснено наличием малого числа отражателей ( $N \leq 5$ ).

В наших экспериментах характер волнения и углы скольжения изменялись в широких пределах. Поэтому можно ожидать проявления различных механизмов отражения от поверхности, и следовательно, разных законов распределения амплитуд.

Было показано, что большинство экспериментальных кривых, полученных при пеленгации точечных целей и источника прямого сигнала, могут быть аппроксимированы распределением Райса, что соответствует выводам целого ряда теоретических и экспериментальных работ по исследованию характеристик диффузно рассеянных сигналов. В этом случае поле в точке приема можно представить как результат интерференции большого числа элементарных отражений, суммарная амплитуда которых распределена по закону Релея (диффузная компонента), прямого сигнала (с амплитудой, значительно превышающей суммарную амплитуду диффузной компоненты) и, в случае слабошероховатых поверхностей, когерентной или зеркальной составляющей.

В ряде опытов были зарегистрированы флуктуации амплитуды, распределения которых отличаются от распределений, описываемых законом Райса. Нами было сделано предположение, что это связано с появлением на поверхности раздела ограниченного числа зеркально отражающих уклонов, амплитуда отражений от которых может быть сравнима с амплитудой прямого сигнала. Подобная ситуация, как отмечалось выше, наблюдалась в работе [4]. Ее авторы на трассе протяженностью 750 м на волнах  $\lambda = 2$  и 8 мм зарегистрировали флуктуации амплитуды с распределениями, которые более соответствуют закону Релея и закону для двухлучевой модели. Для этих законов характерно увеличение (по сравнению с законом Райса) вероятности глубоких интерференционных замираний. Во время наших опытов существовало волнение с

большим пространственным периодом, сравнимым с продольным размером первой зоны Френеля, что и привело к глубоким интерференционным замираниям.

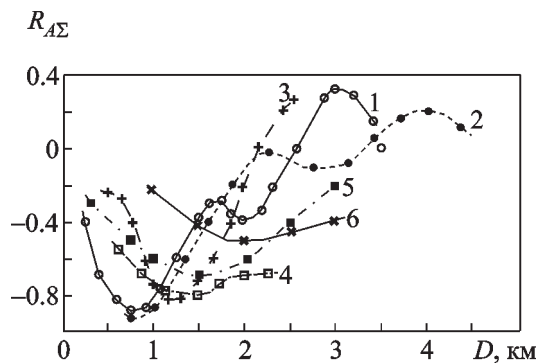
Однако глубокие интерференционные замирания являются не единственным признаком нарушения предположения о распределении амплитуды сигнала по закону Райса. Из работ, связанных с изучением вопросов радиолокации сложных целей [5], следует, что для диффузно рассеивающего объекта статистическая связь практически отсутствует, а при появлении в контуре цели ограниченного числа отражателей должно наблюдаться усиление корреляции между амплитудными и угловыми флуктуациями. В этих случаях эмпирические распределения могут быть аппроксимированы кривыми семейства законов для нерелеевского замирающего сигнала [2], который предполагает наличие на фоне диффузно рассеянной компоненты ограниченного числа интенсивных зеркальных отражений со случайной амплитудой и фазой. В области высоких значений вероятности нерелеевские законы совпадают с законом Райса, а для малых значений вероятностей кривые интегральных распределений этих законов отличаются практически только масштабными коэффициентами. Степень корреляции этих законов является хотя и косвенным, но достаточно информативным признаком, позволяющим сделать вывод об условиях формирования поля, рассеянного поверхностью раздела.

#### **Спектрально-корреляционные характеристики**

Исследования коэффициентов взаимной корреляции  $R_{A\Sigma}$  амплитуд и углов прихода показали, что их дистанционные зависимости имеют явно выраженный экстремум (в дальнейшем такой тип зависимости будем называть “резонансным”), положение которого связано с величиной периода морского волнения (рис. 2). Чем меньше пространственный период морского волнения, тем на меньших дальностях регистрировались максимальные значения модуля коэффициента взаимной корреляции  $R_{A\Sigma}$ . В случаях, когда

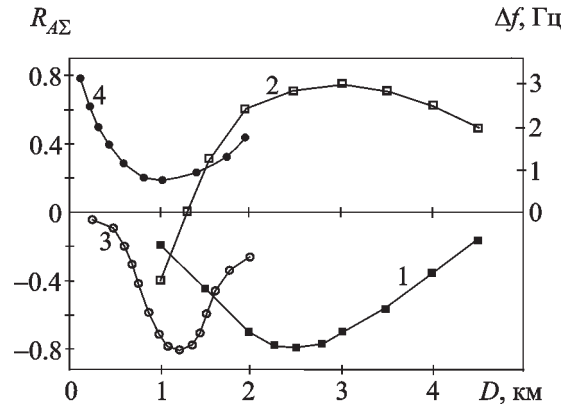
источник излучения находился на равносигнальном направлении, в основном наблюдалась отрицательная корреляция. Изменение ориентации диаграммы направленности (ДН) пеленгатора в вертикальной плоскости относительно линии визирования цели приводит к изменению характера дистанционных зависимостей. В этих случаях наблюдается расширение основного лепестка зависимостей, т. е. сильная корреляционная связь отмечается в большем диапазоне дальностей (рис. 3, кривые 1 и 2). При этом знак коэффициента корреляции зависит от ориентации ДН пеленгатора в вертикальной плоскости. При смещении ДН вверх он отрицательный (кривая 1), а при смещении вниз – положительный (кривая 2) (ДН смещалась на угол, равный ее полуширине по уровню половинной мощности). В ряде опытов было обнаружено, что “резонансную” форму имеют дистанционные зависимости ширины угловых и амплитудных спектров ( $\Delta f$ ). Наиболее узкие спектры совпадают с максимальными значениями модуля коэффициента взаимной корреляции  $R_{A\Sigma}$  (рис. 3).

Исследования спектров (волна 3 мм), полученных на морских и сухопутных трассах, показали, что для прямого сигнала основная энергия флуктуаций заключена в полосе от



**Рис. 2.** Дистанционные зависимости коэффициентов взаимной корреляции амплитуд и углов прихода для различных периодов морского волнения:

- 1 – для периода морского волнения  $T = 1 \div 1.2$  с;
- 2 –  $T = 1.4 \div 1.6$  с; 3 –  $T = 2.9$  с; 4 –  $T = 3.5$  с;
- 5 –  $T = 4$  с; 6 –  $T = 7$  с



**Рис. 3.** Дистанционные зависимости коэффициентов взаимной корреляции углов прихода и ширины спектра  $\Delta f$  амплитудных флуктуаций:

- 1, 2 –  $R_{A\Sigma}$  при смещении ДН вверх и вниз от источника соответственно; 3 – максимальные значения  $R_{A\Sigma}$ ; 4 –  $\Delta f$

0 до 5 Гц, а локационного – от 0 до 15 Гц. Амплитудные спектры были, как правило, уже угломестных и азимутальных. Кроме основного максимума спектральной плотности, отмечено наличие вторичных максимумов. Анализ спектров, полученных на морских трассах, показал, что в отличие от предложенной в работе [6] степенной функции вида  $\sim f^n$  спадающий участок спектральной плотности (от уровней ниже  $6 \div 8$  дБ) лучше аппроксимировать экспоненциальной зависимостью вида  $\exp(-ax)$ , где  $x = (f - f_0)/f_0$ ,  $f_0$  – частота, на которой производится нормировка спектральной плотности,  $f$  – текущая частота. Значения коэффициента  $\alpha$  и показателя степени  $n$  определяются характеристиками морского волнения, геометрией трассы распространения, параметрами ДН, отражательными характеристиками цели. На рис. 4 приведены графики, соответствующие спектрам флуктуаций пеленга в угломестной плоскости (римской цифрой I обозначены спектры прямого сигнала, а II – отраженного сигнала). Штриховыми линиями на этом рисунке нанесены аппроксимирующие степенные зависимости, сплошными линиями – аппроксимирующие экспоненциальные зависимости. Из рис. 4 видно, что экспериментальные



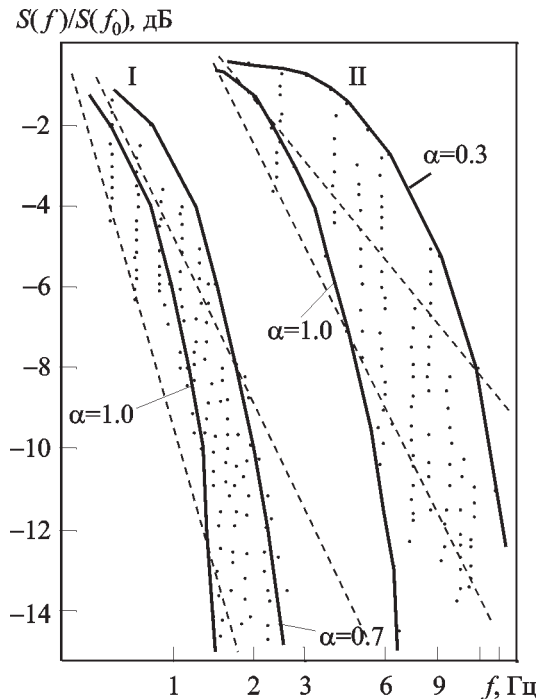


Рис. 4. Спектры флуктуаций углов прихода: I – прямого сигнала; II – локационного сигнала

точки находятся между двумя экспоненциальными кривыми со значениями  $\alpha = 1.0; 0,7$  для прямого сигнала и  $\alpha = 1.0; 0,3$  для отраженного сигнала. Пропорциональное расширение частотной полосы флуктуаций на волне 3 мм по сравнению с более длинноволновыми диапазонами не обнаружено. При увеличении дальности наблюдается общая тенденция к сужению спектров.

При анализе спектров интерференционных флуктуаций пеленгов движущегося точечного источника излучения, полученных на сухопутных трассах с использованием модельных расчетов [7], установлено, что ширина спектра, частота его основного максимума и значение спектральной плотности определяются не только степенью шероховатости поверхности, но и оказываются очень чувствительными к ширине и форме ДН пеленгатора и источника излучения. Ширина и форма ДН являются пространственными фильтрами, выделяющими при коротких трассах сравнительно небольшую

область пространственного спектра интерференционного шума.

### Заключение

При исследованиях амплитудных флуктуаций сигнала над морем установлены случаи отличия экспериментальных распределений от закона Райса. Показано, что это связано с появлением на поверхности раздела в пределах отражающей области ограниченного числа зеркально отражающих уклонов. Эти отличия могут проявляться как в усилении интерференционных замираний амплитуды, так и в усилении корреляционной связи между сигналами в амплитудном и в угловом каналах пеленгатора.

Было установлено, что дистанционные зависимости коэффициентов корреляции могут иметь экстремум, положение которого на оси дальности связано с величиной пространственного периода морского волнения. Подобный характер дистанционных зависимостей был обнаружен в ряде опытов и для ширины спектров амплитудных и угловых флуктуаций.

Для описания спадающего участка спектров (морские трассы) предложена аппроксимирующая зависимость экспоненциального вида. Показано, что параметры спектров (форма, ширина), полученных на сухопутных трассах, зависят от параметров ДН пеленгатора и источника излучения.

Исследования экспериментальных ошибок пеленгов показали, что при пеленгации морских целей при волнении от 0 до 4 баллов их величина в среднем превышает ошибки пеленгования для сухопутных целей на трассах той же протяженности.

### Литература

1. К. А. Нортон, Л. Е. Воглер, Д. С. Мансфилд. В сб.: Вопросы дальней связи на ультракоротких волнах. Под ред. В. И. Сидорова. Москва, Сов. Радио, 1957, с. 161-183.
2. J. K. Jao, M. Elbaum. Proc. IEEE. 1978, **66**, No. 7, pp. 781-789.

3. S. H. Lin. Bell System Technical Journal. 1971, **50**, No. 10, pp. 3211-3269.
4. М. Г. Балан, С. Б. Беспечный, Н. В. Горбач. Изв. вузов. Радиофизика. 1982, **25**, №11, с. 1260-1268.
5. В. Г. Солоненко. Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1968, **11**, №10, с. 1053-1058.
6. Г. П. Кулемин, В. Б. Разказовский. Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью Земли под малыми углами. Киев, Наукова думка, 1987, 230 с.
7. Н. В. Горбач, И. М. Фукс. Изв. вузов. Радиофизика. 1989, **32**, №12, с. 1485-1493.

**Specific Features  
of Statistical Characteristics  
of Three-Millimeter Wave-Band  
Propagation above the Sea Surface**

**N. V. Gorbach, L. I. Sharapov,  
V. G. Gutnik**

Results of experimental investigation of the three-millimeter band radio-signal fluctuations are presented, when propagating near the surface. Statistics of direct and echo signal angles of arrival is analyzed. Measured probability distributions of signal-amplitude fading are compared with various theoretical laws. Relationship between the boundary parameters and the nature of radio-signal fluctuations is investigated. Correlative relation between direction-finder signals of amplitude and angle channels is investigated for the point sea target. Results of investigation of amplitude and angle fluctuation spectra on the sea and terrestrial paths are analyzed, and data on the mean and fluctuation bearing errors are presented.