

УДК 621.371

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧАСТОТНО-РАЗНЕСЕННЫХ РАДИОВОЛН САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ НАД МОРЕМ*

Л. М. Лобкова, А. И. Надобенко, Н. И. Мишарева

Представлены результаты экспериментального исследования частотно-временных и пространственно-частотных корреляционных зависимостей для сигналов трехсантиметрового диапазона на морской трассе протяженностью 9,6 км. Полученные оценки радиусов частотной и пространственной корреляции сравниваются с результатами для сухопутных трасс.

При построении систем связи два вопроса представляют значительный интерес: частотные свойства канала связи и возможность применения пространственно-частотных методов разнесения сигналов. Основные результаты в области указанных исследований обобщены и отражены в монографиях [1-7].

Модельные представления морских каналов связи обычно строятся либо с учетом свойств только приводного слоя, либо с учетом только статистически неровной рассеивающей поверхности [8]. Построение обобщенной модели морского канала сопряжено со сложными математическими представлениями, которые нет возможности использовать для практических применений. В связи со сказанным экспериментальное исследование статистических свойств сигналов на морских трассах является особенно важным. Анализ существующих публикаций [9-12], посвященных данным вопросам, показал, что в литературе отсутствуют экспериментальные данные по изучению пространственно-частотных характеристик сигнала на морских трассах. В данной работе авторами предпринята попытка восполнить существующий пробел.

Для проведения экспериментальных исследований в сантиметровом диапазоне (СМД) длин волн был разработан специальный радиоизмерительный комплекс. Передатчик обеспечивал в диапазоне 3,2 см излучение двух непрерывных сигналов, разнесенных по частоте. В качестве передающих антенн использовались рупоры с шириной диаграммы направленности по уровню половинной мощности 13° в обеих плоскостях. Перестройка частоты обеспечивалась в диапазоне 300 МГц. Нестабильность частоты не превышала величины $3 \cdot 10^{-5}$. При работе на фиксированной частоте максимальное изменение мощности передатчика в течение часа составляло $\pm 0,20$ дБ. При перестройке частоты мощность передатчика изменялась от 3,5 до 10 Вт.

Выбор в качестве приемной антенны усеченного параболоида с диаметром раскрыва 0,35 м позволял пренебречь усредняющим действием апертуры. Супергетеродинный приемник, собранный по двухканальной схеме, был охвачен системой АПЧ с коэффициентом автоподстройки порядка 30. Среднеквадратичная ошибка (СКО) измерения

* Основные результаты статьи доложены на XIV Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. — Ленинград, 1984.

амплитуды сигнала составляла 5%, а СКО измерения неравномерности АЧХ при динамическом диапазоне входного сигнала 42 дБ — 7%.

Экспериментальные исследования частотно-временных и пространственно-частотных корреляционных зависимостей проводились на трассе протяженностью 9,6 км в районе г. Севастополя. Минимальное удаление трассы от берега составляло 200 м, центральная часть трассы располагалась на расстоянии 1200 м от береговой черты. Высота расположения передающего пункта составляла 4,5 м над уровнем моря, приемного пункта — 24 м.

Выбор геометрии трассы позволял проводить эксперименты как в условиях гладкой подстилающей поверхности (согласно критерию Рэля поверхность моря можно отнести к этому классу для исследованного диапазона при высоте морских волн менее 0,8 м), так и при неровной подстилающей поверхности.

Метеорологические параметры контролировались на береговых пунктах трассы; температура и влажность воздуха измерялись аспирационными психрометрами на 5 горизонтах в районе приемного пункта (0; 3; 6; 11; 23; 25 м) и на четырех горизонтах в районе передающего пункта (0; 4,5; 7,5; 11,5 м). Атмосферное давление измерялось барометром-анероидом типа БАММ; скорость и направление ветра — с помощью стандартной метеостанции типа М-49. Данные о высоте морских волн получали на метеостанции, расположенной вблизи передающего пункта; среднеквадратичная ошибка измерения высоты волны составляла порядка 0,1 м.

Приведенный показатель преломления воздуха определялся по известному соотношению Абсолютная погрешность измерения не превышала 0,5 N-ед.

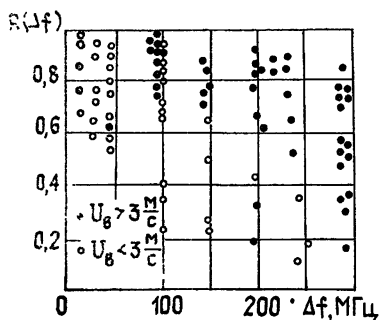


Рис. 1.

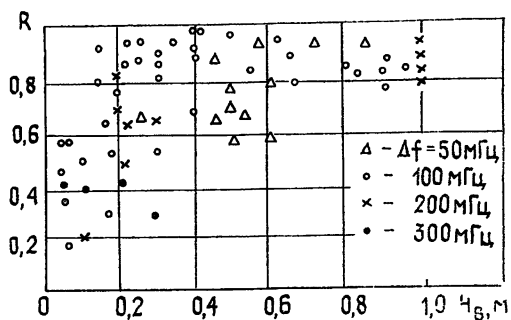


Рис. 2.

Эксперименты проводились в августе—октябре 1980 г. как в условиях ясной погоды, так и при наличии тумана и дождя на трассе. В период экспериментов скорость ветра изменялась от 1 до 11 м/с, высота морских волн — от 0,2 до 1 м. При исследовании частотно-корреляционных зависимостей сигнала СМД передатчики устанавливались в положение, соответствующее минимуму интерференционной структуры поля. Антенны обоих передатчиков, работавших на различных частотах, были размещены на минимально возможном расстоянии порядка 0,2 м. В течение каждого цикла измерений производилась регистрация 7—10 реализаций процессов флуктуаций частотно-разнесенных компонент сигнала при фиксированных разносах частот, изменявшихся в диапазоне от 25 до 300 МГц. Выбор длительности реализаций в интервале от 20 с до 3 мин обеспечивал возможность анализа исследуемого процесса как кусочно-стационарного с достаточной точностью измерения частотного коэффициента корреляции. При исследовании

пространственных корреляционных зависимостей сигнала база разнесения изменялась в направлении, перпендикулярном трассе, в пределах от 0,2 м до 10 м по горизонтали (с шагом от 1,0 до 2,0 м) и от 0,15 до 3 м по вертикали (с шагом 0,25—0,75 м). Продолжительность реализаций в пределах цикла составляла также 20 с — 3 мин.

Результаты измерений получены на основании анализа 107 реализаций с частотным разнесением и 580 реализаций с пространственно-частотным разнесением.

Проанализируем основные результаты экспериментального исследования пространственно-частотных корреляционных зависимостей сигнала в следующем порядке. Оценим радиусы частотной корреляции флуктуаций сигнала, радиусы пространственной корреляции при разнесении антенн в горизонтальном и вертикальном направлениях и корреляционные характеристики при пространственно-частотном разнесении.

Результаты измерений частотного коэффициента корреляции R , полученных в различных метеорологических условиях, приведены на рис. 1, 2. Условия штилевой погоды (при скоростях ветра V_B меньше 3 м/с — рис. 1 и высоте морских волн H_B не более 0,3 м — рис. 2) характеризовались сменой направления ветра и неустойчивой структурой высотного профиля показателя преломления. При скоростях ветра больше 3 м/с, как правило, наблюдалось развитое морское волнение и устойчивое распределение показателя преломления по высоте.

Как следует из рис. 1, 2, радиусы частотной корреляции минимальны в условиях штилевой погоды и составляют величину порядка 150 МГц. В этих же условиях наблюдается наибольший разброс коэффициентов частотной корреляции R .

Исследования корреляционной связи сигналов на волнах длиной 3,2 см и 8,6 мм, выполненные на описанной трассе при различных метеоусловиях, показали, что флуктуации амплитуд сигналов названных диапазонов не коррелированы. Условия экспериментов и соответствующие коэффициенты корреляции приведены в табл. 1. Пространственный разнос антенн двух диапазонов составлял 0,2 м.

Сравнение приведенных данных с результатами работ [9, 10], выполненных на чисто тропосферных трассах, указывает на то, что корреляция частотно-разнесенных сигналов на морской трассе разрушается быстрее, чем на сухопутных. Так, при исследовании на тропосферной трассе коэффициент частотной корреляции амплитудных флуктуаций на краях полосы 9,55—33,3 ГГц, как показано в работе [9], в зависимости от времени суток изменялся в пределах 0,5—0,7.

На рис. 3 представлены экспериментальные значения радиусов пространственной корреляции r_B сигналов в вертикальной плоскости при различных сдвигах частоты. Разброс точек вызван разнообразием метеорологических условий на трассе. При минимальном сдвиге частот (10 МГц), пренебрегая влиянием частотного разнесения, из рис. 3 можно определить значение радиуса корреляции r_B в вертикальной плоскости для чисто пространственного разнесения: r_B изменяется в пределах от 50 до 100 λ. Полученные величины r_B совпадают с результатами работы [11], выполненной на морской трассе, и несколько превышают

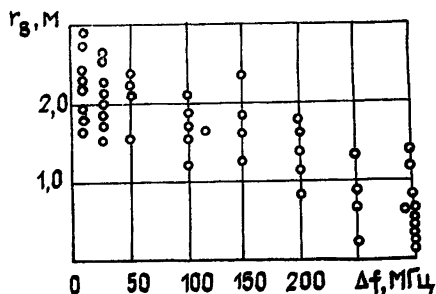


Рис. 3.

оценки для чисто тропосферной трассы [12]. В отличие от последней, где радиусы корреляции в горизонтальной плоскости имеют тот же порядок, что и в вертикальной плоскости, пространственный радиус корреляции в горизонтальной плоскости на морской трассе оказывается значительно больше, чем в вертикальной. Этот вывод, полученный ранее (например, в работе [12]), подтверждается и нашими измерениями, результаты которых иллюстрируют рис. 4а и 4б. Здесь l_v — величина пространственного разнесения приемных антенн в вертикальной плоскости, а l_r — в горизонтальной плоскости. Кривая 1 на рис. 4а и кривые 1, 2 на рис. 4б получены при скоростях ветра 0,5—1 м/с, кривая 2 (рис. 4а) и кривые 3, 4 (рис. 4б) — при скоростях 5—6 м/с. Во всех случаях рис. 4а и 4б сдвиг частот сигналов составлял 100 МГц.

Таблица 1

№	Время суток	Высота передатчиков, м	Скорость ветра, м/с	Направление ветра	Высота морской волны, м	Коэффициент корреляции
1	17.03 — 17.08	4,5	2 — 3	Ю-З	0,2 — 0,3	0,21
2	18.30 — 18.35	4,5	3	Ю-З	0,3	-0,32
3	14.10 — 14.13	5,4	0,5 — 1	Ю-В	0,1 — 0,2	0,09
4	20.25 — 20.30	5,4	3 — 3,5	СВ-В	0,3 — 0,4	0,38
5	11.43 — 11.48	7,0	7 — 9	С	1	-0,11
6	14.22 — 14.27	7,0	6 — 8	СЗ	0,7 — 0,8	0,40

С возрастанием скорости ветра радиусы пространственной корреляции как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях уменьшаются (см. рис. 4а и 4б). Для радиуса частотной корреляции наблюдается противоположная тенденция (см. рис. 1).

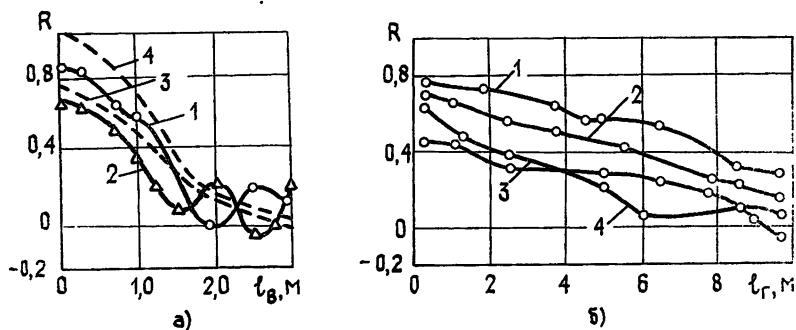


Рис. 4.

Зависимость коэффициента корреляции от величины пространственно-частотного разнесения может быть аппроксимирована соотношением

$$R = \exp \left[- \left(\frac{l^2}{a^2} + \frac{\Delta f^2}{b^2} \right) \right], \quad (1)$$

где l — величина пространственного разнесения, Δf — величина частотного разнесения, a , b — коэффициенты, зависящие от условий эксперимента.

Данное положение подтверждается достаточно хорошим соответствием кривой 3 (рис. 4а), построенной по соотношению (1) при $a=1,5$ м и $b=1,9 \cdot 10^4$ Гц^{1/2}, экспериментальным зависимостям (кривые 1, 2 рис. 4а). Выражение (1) является модификацией соотношения, предложенного

для случая чисто пространственного разнесения на тропосферной трассе в работе [2]; с использованием названного соотношения из [2] построена кривая 4 на рис. 4а. Из анализа данных на рис. 3, рис. 4а, б можно заключить, что применение пространственного разнесения в сочетании с частотным приводит к значительному ослаблению корреляционной связи сигналов СМД.

На основании выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Радиусы частотной корреляции сигналов СМД на морской трассе меньше соответствующих величин, измеренных на сухопутных трассах. Минимальное значение радиуса частотной корреляции в диапазоне 3 см составило 150 МГц. Установлена некоррелированность флуктуаций амплитуды сигналов восьмимиллиметрового и трехсантиметрового диапазонов.

2. Радиусы пространственной корреляции при разнесении антенн в горизонтальном направлении в 2—4 раза превышают соответствующие значения при разнесении антенн в вертикальном направлении. Это соотношение сохраняется и при пространственно-частотном разнесении сигналов.

3. Получено соотношение, позволяющее рассчитывать коэффициент корреляции флуктуаций амплитуды сигналов СМД в зависимости от величины частотного и пространственного разнесения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Татарский В. И. Распространение радиоволн в турбулентной атмосфере. — М.: Наука, 1967.
2. Семенов А. А., Арсеньян Т. И. Флуктуации электромагнитных волн на приземных трассах. — М.: Наука, 1978.
3. Распространение ультракоротких радиоволн: Пер. с англ. / Под ред. Б. А. Шиллера. — М.: Сов. радио, 1954.
4. Дальнее тропосферное распространение УКВ. / Под ред. Б. А. Введенского, М. А. Колосова, А. И. Калинина. — М.: Сов. радио, 1965.
5. Beckman P., Spizzichino A. The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surface. — Oxford: Pergamon Press, 1963.
6. Колосов М. А., Арманд Н. А., Яковлев О. И. Распространение радиоволн при космической связи. — М.: Связь, 1969.
7. Троицкий В. Н. Распространение ультракоротких волн в горах. — М.: Связь, 1968.
8. Басс Ф. Г., Фукс И. М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. — М.: Наука, 1967.
9. Thompson M. C., Wood Lockett E., Janes H. B., Smith Dean. — IEEE Trans. Antennas Propagation, 1975, 23, № 6, p. 792.
10. Harris B. Janes and others. — IEEE Trans. Antennas Propagation, 1970, 18, № 4, p. 447.
11. Vignali J. A. — IEEE Trans. Antennas Propagation, 1970, 18, № 4, p. 463.
12. Балан М. Г., Беспечный С. Б., Горбач Н. В. и др. Препринт ИРЭ АН УССР № 132. — Харьков, 1979.

Севастопольский приборостроительный институт

Поступила в редакцию
10 ноября 1984 г.

SPACE-TEMPORARY CHARACTERISTICS OF FREQUENCY SEPARATED RADIOWAVES IN CENTIMETRE BAND WHEN PROPAGATING OVER SEA

L. M. Lobkova, A. I. Nadobenko, N. I. Mishareva

There are presented the results of the experimental research of frequency-temporary and space-frequency correlation relationships for 3-centimetre band signals on 9.6 km sea path. The received estimates of frequency and space correlation radii are compared with the results for land routes.