

УДК 621.371 : 551

ФЛУКТУАЦИИ ПУЧКА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН НА ТРАССЕ С ОБРАТНЫМ ОТРАЖЕНИЕМ

Г. А. Андреев, А. С. Захаров, А. Г. Клейн

Приводятся результаты экспериментального исследования флуктуаций миллиметровых волн на частоте 36,2 ГГц на трассе с обратным отражением протяженностью 34 км. Анализируется зависимость статистических характеристик флуктуаций от времени суток и года. Для сравнения приведены результаты, полученные одновременно на частоте 9,4 ГГц

Достижения техники миллиметровых волн (ММВ) [1] и их преимущества по сравнению с радиоволнами других диапазонов при использовании в системах связи, дистанционного зондирования и др. [2] стимулировали исследование распространения ММВ в турбулентной тропосфере Земли. Результаты теоретического анализа с учетом особенностей ММВ (влияние влажности, применение узконаправленных антенн и т. п.) изложены в [3-6]. Экспериментальные исследования распространения ММВ в турбулентной тропосфере на трассах прямой видимости были выполнены в [7-14]. В задачах дистанционного зондирования окружающей среды представляют интерес характеристики волны, отраженной от поверхностей различных типов и тем самым прошедшей среду дважды. Теоретические расчеты, выполненные в [12-14, 20, 21], указывают на эффект усиления флуктуаций амплитуды. Первые экспериментальные данные, подтверждающие эффект усиления флуктуаций, были сообщены в [15]. Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование амплитудных флуктуаций пучка ММВ на трассе с обратным отражением при различных метеоусловиях.

1. Аппаратура и методика измерений. Эксперименты по распространению ММВ на трассе с обратным отражением проводились по локационной схеме. Одновременно исследовались флуктуации амплитуды сигнала и в сантиметровом диапазоне длин волн (СМВ). Трасса проходила над слабопересеченной местностью (рис. 1). На расстоянии 17 км на вышке высотой 46 м находился уголкового отражателя с эффективной площадью рассеяния (ЭПР) $\sigma_0 = 3700 \text{ м}^2$ в диапазоне 36,2 ГГц.

В качестве источника и приемника излучения ММВ и СМВ использовалась импульсная метеорадиолокационная станция МРЛ-1 [16]. Основные характеристики приемно-передающей аппаратуры МРЛ-1 представлены в табл. 1.

Антенная система состояла из параболического зеркала диаметром 3 м и двухдиапазонного рупорного облучателя. Пространственный разнос между передающим и приемным каналом отсутствовал.

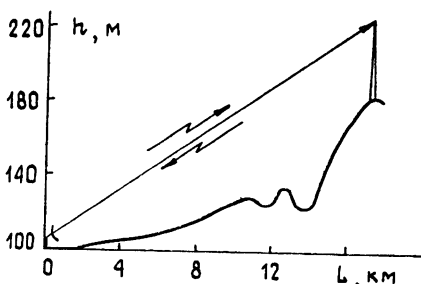


Рис. 1.

Приемники МРЛ-1 собраны по супергетеродинной схеме. При проведении экспериментов для защиты приемных устройств от перегрузок усилители промежуточной частоты (УПЧ) работали в режиме с логарифмической зависимостью между входным и выходным сигналами. Контроль за режимом работы МРЛ-1 осуществлялся путем использования реперного отражателя, расположенного на расстоянии 2 км.

Т а б л и ц а 1

Частота	$f = 36,2 \text{ ГГц}$ ($\lambda = 8,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$)	$f = 9,4 \text{ ГГц}$ ($\lambda = 3,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$)
Диаграмма направленности по уровню 0,5 (по мощности), угол мин	13'	45'
Коэффициент усиления	$6 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^4$
Мощность передатчика, кВт	60	250
Длительность импульса τ , мкс	0,45	1
Частота следования, Гц	600	600
Чувствительность приемника	- 116 дБ/Вт	- 126 дБ/Вт

Полезный сигнал от уголкового отражателя выделялся из принятого сигнала методом временной селекции по дальности, детектировался и регистрировался магнитографом НО-46 и самопишущим потенциометром Н-327/5.

Для статистической обработки результатов измерений на ЭВМ предварительно проводилась дискретизация экспериментальных данных аналого-цифровым преобразователем. В зависимости от характера флуктуаций сигнала частота выборок изменялась от 1 до 16 в секунду.

2. Результаты измерений. Для исследования сезонных и суточных вариаций флуктуаций амплитуды в течение 1980—1981 гг. были проведены серии экспериментов в наиболее характерных для каждого времени года метеорологических условиях. Данные, характеризующие состояние приземной атмосферы (температура, влажность, давление, направление и скорость ветра), в момент проведения радиоизмерений записывались на метеостанции, расположенной рядом с приемно-передающим пунктом. В весенне-летний период во всех сеансах наблюдалась зависимость глубины хаотической модуляции (ГХМ, $m_A = \sigma_{\ln A} / \langle \ln A \rangle$) принимаемого сигнала от времени суток. Причем, если в пасмурные дни изменения ГХМ были незначительны, то в теплую погоду эта зависимость проявлялась наиболее заметно.

На рис. 2 представлены примеры записей исследуемого сигнала. В дневные часы в условиях развитой турбулентности, обусловленной трением масс воздуха о земную поверхность и конвективными потоками, наблюдались «быстрые» ($f > 0,05 \text{ Гц}$) флуктуации амплитуды с постоянным средним значением (рис. 2а, б) и ГХМ $\sim 20\text{—}30\%$. Однако при анализе записей некоторых сеансов были обнаружены флуктуации сигнала с частотой $f < 0,05 \text{ Гц}$, которые вызваны, по-видимому, переносом неоднородностей показателя преломления с размерами, превышающими внешний масштаб турбулентности L_0 . Поэтому при статистической обработке предварительно проводилась цифровая фильтрация экспериментальных данных по методу Хемминга [17]. В ночные часы были зарегистрированы два типа вариаций сигнала. К первому, преобладающему типу относились уже известные «быстрые» флуктуации с ГХМ $< 15\%$ (рис. 2г), а ко второму — записи, полученные в теплую безветренную погоду (скорость ветра меньше 1 м/с) (рис. 2в). В таких условиях в результате появления инверсий температуры и перепадов влажности в приземной атмосфере могут возникать слои с повышенными градиентами показателя преломления. Это приводит к многолучевому рас-

пространению сигнала и к глубоким (до -30 дБ) замираниям в месте приема [18]. Для реализаций этого типа характерно присутствие в спектре мощных низкочастотных компонент ($f < 0,03$ Гц) и уменьшение амплитуды «быстрых» флуктуаций. Замирания начинались через 1—2 часа после захода солнца, наиболее глубокие достигали -16 дБ и переходили в флуктуации 1-го типа в 3—4 часа утра. На частоте $9,4$ ГГц глубокие замирания (< -4 дБ) не наблюдались.

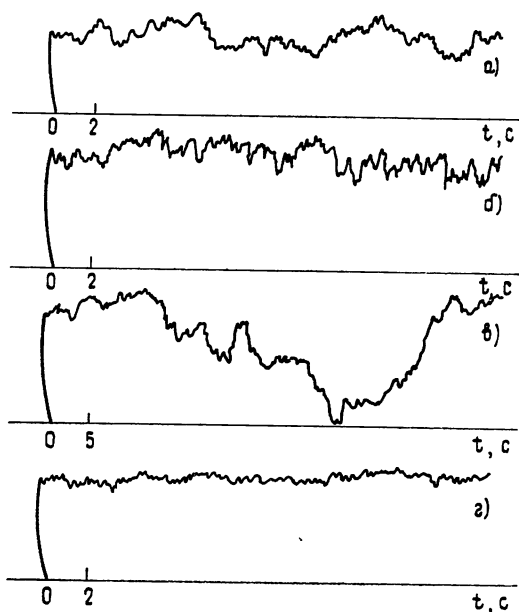


Рис. 2.

В холодное время года было проведено 11 сеансов измерений, в том числе три суточных, и во всех зарегистрированы «быстрые» неглубокие вариации сигнала с ГХМ $< 12\%$. Зависимости величины флуктуаций от времени суток и температуры воздуха отмечено не было.

Во время проведения экспериментов в светлое время дня осуществлялся контроль за состоянием турбулентной атмосферы оптическим методом путем фотографирования радиальной миры, установленной на расстоянии 900 м. По известной методике [19] определялась структурная характеристика показателя преломления C_n , обусловленная температурными флуктуациями. Максимальные значения C_n были зарегистрированы в жаркую погоду ($t_B = 34 \div 35^\circ\text{C}$) и достигли величины $0,87 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1/3}$. В это же время наблюдались и наиболее глубокие «быстрые» флуктуации сигнала (на $f = 36,2$ ГГц $m_A = 27 \div 32\%$, на $f = 9,4$ ГГц $m_A = 9 \div 11\%$). Однако их величина зависит также и от пульсаций влажности. В [4] показано, что, используя функциональную зависимость

$$C_n^2 = \left(\frac{\partial n}{\partial T}\right)^2 C_T^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial q}\right)^2 C_q^2,$$

где C_q — структурная характеристика флуктуаций удельной влажности q , можно найти C_n в миллиметровом диапазоне волн и оценить вклад в нее флуктуаций влажности. При $P = 750$ мм рт. ст., $T = 302$ К, $e = 6,75$ мбар, $C_T = 0,2 \text{ К} \cdot \text{см}^{-1/3}$ и $C_q \approx 0,9 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1/3}$ получаем значение $C_n = 0,215 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1/3}$. Учет влажностной составляющей показателя

преломления привел к увеличению C_n на 20%. При большей влажности воздуха вклад ее в C_n может заметно возрасти.

В результате статистической обработки экспериментальных данных для каждого сеанса, кроме ГХМ, определены распределение вероятностей, временной коэффициент корреляции флуктуаций, а также их спектр.

Распределение вероятностей флуктуаций логарифма амплитуды волны во всех сеансах измерений было близко к нормальному (рис. 3, сплошная кривая, крестики — экспериментальные значения). Из анализа временных коэффициентов автокорреляции $R(\tau)$ было установлено, что на частоте 36,2 ГГц интервал корреляции τ_{e36} , определяемый по уменьшению в e раз $R(\tau)$, принимал значения от 0,6 до 8 с, причем минимальные τ_{e36} были зарегистрированы при перпендикулярных к трассе составляющих скорости переноса $V_{\perp} \sim 6 \div 7$ м/с. Отметим, что измерения проводились в условиях, когда скорость ветра не превышала 7—8 м/с, так как при больших V_{\perp} наблюдалось дрожание антенной системы, приводившее к дополнительным искажениям принимаемого сигнала. Интервал корреляции τ_{e9} флуктуаций на частоте $f=9,4$ ГГц почти во всех измерениях был больше τ_{e36} в 1,5—1,8 раза. На рис. 4 приведены экспериментальные коэффициенты автокорреляции $R(\tau_*)$, где $\tau_* = \tau/\tau_e$, полученные усреднением по 5 (кривая 1) и 3 (кривая 2) коэффициентам $R(\tau_*)$ для реализаций длительностью 300 с каждая. На этом же рисунке представлен коэффициент корреляции флуктуаций уровня $R_{\chi}(\tau_*)$, вычисленный в первом приближении метода плавных возмущений (МПВ) на трассе с отражением. При расчете были учтены расходимость пучка, внешний масштаб турбулентности и флуктуации скорости переноса V_{\perp} . Для сравнения на рис. 4 приведен также теоретический $R_{\chi}(\tau_*)$, вычисленный без учета флуктуаций V_{\perp} (кривая 4).

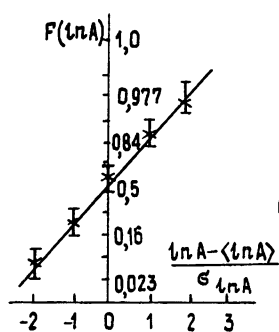


Рис. 3.

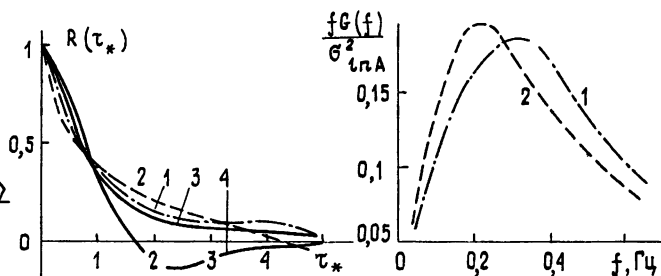


Рис. 4.

Рис. 4. Кривая 1 — $f=36,2$ ГГц, 2 — $f=9,4$ ГГц, 3 — $R_{\chi}(\tau_*)$ при $L_0 = 10$ м, $m_V = 0,6$, где $m_V = \sigma_{\perp}/V_{\perp}$, 4 — $R_{\chi}(\tau_*)$ при $L_0 = 10$ м, $m_V = 0$.

Рис. 5. Кривая 1 — $f=36,2$ ГГц, 2 — $f=9,4$ ГГц.

Рис. 5.

Спектры флуктуаций сигнала вычислялись по экспериментальным коэффициентам автокорреляции с использованием формул Винера—Хинчина. Нормированные спектры, соответствующие $R(\tau_*)$ (кривые 1 и 2, рис. 4) представлены на рис. 5. Преобладание флуктуаций с частотами $f=0,05 \div 0,8$ Гц наблюдалось во всех экспериментах, а максимум нормированного спектра лежал в интервале от 0,1 до 0,4 Гц. Ввиду непродолжительности записей флуктуаций второго типа сделать статистически достоверные выводы о характере замираний не представлялось возможным.

Анализ результатов экспериментальных исследований амплитудных флуктуаций пучка ММВ на трассе протяженностью 17 км с обратным отражением (34 км) показал:

— максимальная ГХМ логарифма амплитуды волны достигает 30%. Появление инверсных слоев в ночное время приводит к глубоким замираниям в СВЧ диапазоне;

— интегральное распределение флуктуаций логарифма амплитуды близко к нормальному, отношение временного интервала корреляции $\tau_{\text{езб}} (0,6 \div 8 \text{ с})$ к $\tau_{\text{ез}} (0,9 \div 13 \text{ с})$ равно примерно 0,6;

— при теоретическом описании флуктуаций амплитуды ММВ в приближении МПВ необходимо учитывать флуктуации скорости переноса и внешний масштаб турбулентности.

В заключение авторы благодарят Кочегарову М. Н. за проведение расчетов на ЭВМ, Лататуева А. Н. за помощь при обработке экспериментальных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тезисы докладов III Всесоюзного симпозиума по миллиметровым и субмиллиметровым волнам.— Горький, 1980.
2. Андреев Г. А.— Зарубежная радиоэлектроника, 1980, № 9, с. 3; 1982, № 12, с. 3.
3. Кравцов Ю. А., Рытов С. М., Татарский В. И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2.— М.: Наука, 1978.
4. Андреев Г. А., Черная А. Ф.— Радиотехника, 1978, 33, № 1, с. 16.
5. Фэнте Р.— ТИИЭР, 1980, 68, № 11, с. 75.
6. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т. 2.— М.: Мир, 1981.
7. Lees M. L.— IEEE Trans., 1972, AP-20, № 2, p. 176.
8. Thompson M. C. e. a.— IEEE Trans., 1975, AP-23, № 6, p. 792.
9. Cole R. S., Ho K. L., Mavroukoukoulakis N. D.— IEEE Trans., 1978, AP-26, № 5, p. 712.
10. Andreev G. A. e. a. Fifth International Wroclaw Symposium on electromagnetic compatibility.— Wroclaw: 1980.
11. Аблязов В. С. и др. Тезисы докладов XIII Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. Ч. 2.— Горький: 1981, с. 93.
12. Денисов Н. Г., Ерухимов Л. М.— Геомагнетизм и аэрономия, 1966, 6, № 4, с. 695.
13. Патрушев Г. Я.— Квантовая электроника, 1978, 5, № 11, с. 2342.
14. Коваль С. С., Патрушев Г. Я., Петров А. И., Покасов В. В.— Изв. вузов— Радиофизика, 1980, 33, № 3, с. 326.
15. Андреев Г. А. и др. Тезисы докладов XIII Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. Ч. 2.— Горький: 1981, с. 91.
16. Руководство по производству наблюдений и применению информации с радиолокаторов МРЛ-1 и МРЛ-2.— Л.: Гидрометеоздат, 1974.
17. Хемминг Р. Численные методы.— М.: Наука, 1972.
18. Синицкий В. Б.— Изв. вузов— Радиофизика, 1976, 19, № 9, с. 1286.
19. Андреев Г. А., Кузнецов В. М., Цейтлин В. Э.— Изв. АН СССР Сер. Физика атмосферы и океана, 1971, 7, № 9, с. 987.
20. Кравцов Ю. А., Саичев А. И.— УФН, 1982, 137, вып. 3, с. 501.
21. Андреев Г. А. и др. Тезисы докладов VI Всесоюзного совещания по радиометеорологии.— Таллин: 1982, с. 81.

Ярославский государственный
университет

Поступила в редакцию
29 декабря 1981 г.

MILLIMETER WAVE BEAM FLUCTUATIONS ON A TRACE WITH BACK REFLECTION

G. A. Andreev, A. S. Zakharov, A. G. Klein

The experimental results are given on millimeter wave fluctuations at the frequency of 36.2 GHz on the trace with back scattering of 34 km length. Statistical characteristic dependence of fluctuations is analysed as a function of day time and year. For comparison the results are given with are simultaneously obtained at the frequency of 9.4 GHz.