

При  $\mu \gg 1$  выражения для  $n$  и  $N_0$  дают ответ, отличающийся от формул (11) только заменой знака перед вторым слагаемым в выражении для  $n$ .

При  $\mu \gg 1$  из формул (5) и (7) получаем

$$n = \frac{3\sqrt{\pi}}{2W_m} \exp(W_m^2)(1/\xi_m), \quad N_0 = 2(c/\omega_0)N_c\xi_m. \quad (12)$$

Очевидно, что такое равновесное состояние характеризуется высокой плотностью плазмы и относительно малой толщиной слоя ( $\xi_m < 2$ ).

На рис. 2 качественно показана структура поля (пунктир) и распределение плотности (сплошная линия) в слое плазмы для четырех рассмотренных выше случаев.

На рис. 3 представлены графики зависимости  $n(W_m)$  для двух значений  $\xi_m = 2$ ; 3,07, рассчитанные по формуле (5). Видно, что при каждом значении  $\xi_m$  имеются две кривые равновесия, соответствующие симметричным и антисимметричным конфигурациям поля. Из рисунка также видно, что эти два типа кривых разделены линией равновесия для полубесконечной плазмы ( $\xi_m = \infty$ ). Именно этот случай рассматривался в работах [4, 5].

4. Удержание плазмы в резонаторах изучалось экспериментально во многих работах, обзор которых приведен в [2, 4]. Обратим внимание на работу [6], в которой было обнаружено, что изменение частоты генератора на 10% приводит к увеличению числа удерживаемых частиц в десять раз. Можно думать, что этот эффект связан с зависимостью равновесного состояния от частоты (в основном через параметр  $\xi_m$ ).

В заключение отметим, что мы ограничились рассмотрением только простейших равновесных состояний с одним минимумом функции  $W^2$ . Очевидно, что можно представить состояния и с более сложной структурой поля.

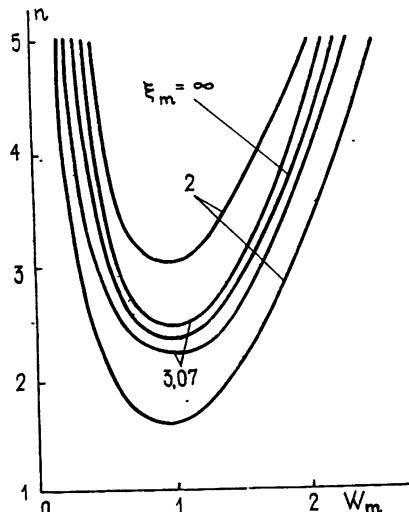


Рис. 3.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Сагдеев Р. З. Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций — М.: АН СССР, 1958, Т. 3, с. 346.
- Геккер И. Р. Взаимодействие сильных электромагнитных полей с плазмой. — М.: Атомиздат, 1978.
- Волков Т. Ф. Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций — М.: АН СССР, 1958, Т. 3, с. 336.
- Motz M., Watson C. J. H. — Adv. in electronics and electron physics, 1967, 23, p. 153.
- Горбунов Л. М., Градов О. М., Зюндер Д., Рамазашвили Р. Р — ЖЭТФ, 1981, 80, с. 1383.
- Hatch A. J., Halverson S. L., Froehlich A. E. 2-é Colloque Intern. sur les Interaction entre les champs Oscillants et les plasmas, Sacley, 1968, v. 1, p 66.

Физический институт им. П. Н. Лебедева  
АН СССР

Поступила в редакцию  
16 марта 1983 г.

УДК 621.371:537.874.7

#### РАССЕЯНИЕ РАДИОВОЛН ДЛИНОВОЛНОВОЙ ЧАСТИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА В СНЕГЕ

А. С. Захаров, А. Г. Клейн, В. П. Фролов

На работу различных радиотехнических систем миллиметрового диапазона радиоволны существенное влияние оказывают осадки в виде дождя и снега. Результаты экспериментальных исследований ослабления и рассеяния в дождях удовлетворительно согласуются с расчетами [1]. При теоретическом анализе распространения в снеге

возникают значительные трудности, связанные с невозможностью точного математического описания многообразных форм спекинок и их ориентации в пространстве, поэтому важную роль играют экспериментальные исследования. Известные авторам немногочисленные работы посвящены изучению ослабления миллиметрового излучения [2]. Данные о характеристиках рассеяния миллиметровых волн в литературе отсутствуют.

В настоящей работе приводятся результаты измерений удельной эффективной площади обратного рассеяния (ЭПР) снега, а также необходимые для ее определения коэффициенты погонного ослабления на частоте 35 ГГц. Эксперименты проводились в декабре 1981 года на базе метеорадиолокационной станции МРЛ-1 [3], аппаратура которой была конструктивно дополнена системой временной селекции (помехоустойчивости), позволяющей выделять сигнал, рассеянный исследуемым объемом гидрометеообразований [6].

Методика измерений коэффициента погонного ослабления заключалась в сравнении сигналов, принятых от двух известных объемов осадков, разнесенных на определенное расстояние (0,5—1,0 км) вдоль произвольной призенной трассы [4]. Для определения абсолютного уровня этих сигналов  $P_{\text{пр}}$  в СВЧ тракте приемника был установлен калиброванный аттенюатор. При известных значениях излучаемой и минимально обнаруживаемой локатором мощности (составлявшей — 112 дБ) значение  $P_{\text{пр}}$  позволяет определить удельную эффективную площадь обратного рассеяния гидрометеоров.

Интенсивность снега определялась по высоте слоя, выпавшего за определенный (продолжительностью 30—60 мин) промежуток времени, что не позволяло судить о кратковременных вариациях скорости его выпадения. Поэтому результаты измерений удельной ЭПР снега для  $\lambda=8,6 \text{ мм}$  при температуре воздуха  $t=-1^{\circ}\text{C}$  представлены в виде зависимости значений  $\eta_V (\text{м}^{-1})$  от погонного ослабления  $\gamma (\text{дБ}/\text{км})$ . Относительное содержание воды по объему составляло  $\beta=0,077$  и  $\beta=0,088$ , что соответствует мокрому снегу [2]. Для этих данных по методу наименьших квадратов построены линии линейной регрессии (1 — сплошная, 2 — пунктирная).

Для сравнения на рисунке приведена также зависимость  $\eta_V (\gamma)$  для дождя (штрихпунктир), полученная на частоте 35 ГГц [5], и указаны значения его интенсивностей, при которых наблюдаются соответствующие величины погонного ослабления. Как видно, измеренные значения  $\gamma$  численно равны ослаблению в дождях с  $I=2,5 \div 8 \text{ мм}/\text{ч}$ , тогда как результаты, приводимые в настоящей работе, были получены в снеге со средней интенсивностью 1—2  $\text{мм}/\text{ч}$ .

Таким образом, ослабление электромагнитного излучения с частотой 35 ГГц в мокром снеге в  $k=2,5 \div 4$  раза превышает ослабление в дожде с той же скоростью выпадения, что согласуется с данными работами [1] ( $k=3,5 \div 6,5$ ) и несколько выше результатов работы [2] ( $k=2$ ).

Из сопоставления приведенных на рисунке результатов следует, что прямые, относящиеся к снегу с  $\beta=0,088$  и дожду, практически параллельны, тогда как обратное рассеяние более сухого снега ( $\beta=0,077$ ) растет быстрее с увеличением  $\gamma$ .

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что для наблюдавшихся в эксперименте снегопадов значения  $\eta_V$  изменялись от  $10^{-8} \text{ м}^{-1}$  до  $10^{-3} \text{ м}^{-1}$  при ослаблении от 0,2 дБ/км до 4 дБ/км. Следует отметить, что для мокрого снега интенсивностью 1—2  $\text{мм}/\text{ч}$  (шедшего большую часть времени проведения измерений, составившего около 25 часов) удельная ЭПР заключена в интервале  $5 \cdot 10^{-7} \div 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$ .

К сожалению, аналогичных данных в других работах нет. Однако можно заметить, что указанные величины совпадают по порядку со значениями  $\eta_V$  для дождя с интенсивностью до  $2 \div 5 \text{ мм}/\text{ч}$  [5].

Рис. 1.

Для более полного анализа радиолокационных характеристик снежных осадков необходимо проведение измерений рассеяния и ослабления в снеге с одновременной регистрацией скорости его выпадения во время измерения. Необходимая для этого чувствительность осадкометров должна составлять десятые доли  $мм/ч$ .

Авторы благодарят Е. В. Сухонина за обсуждение результатов.

## ЛИТЕРАТУРА

- Соколов А. В. Распространение миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн в атмосфере Земли. — М.: ВИНИТИ, 1974 (Итоги науки и техники. Радиотехника, вып. 5, с. 5).
- SHF and EHF propagation in snowy districts, Monograph series of the Research Institute of Applied Electricity, № 19 (1971), Sapporo, Japan, Hokkaido Univ., 1971.
- Руководство по производству наблюдений и применения информации с радиолокатором МРЛ-1 и МРЛ-2. — Л.: Гидрометеоиздат, 1974.
- Захаров А. С., Клейн А. Г., Фролов В. П. — Изв. вузов — Радиофизика, 1982, 25, № 5, с. 507.
- Dyer F. B., Currie N. C., Applegate M. S. — Radar-77, International Conference. — London, 1977, p. 559.
- Захаров А. С., Фролов В. П. Статья депонирована в ВИНИТИ, рег. № 3628-82. Деп. от 8 июля 1982 г.

Ярославский государственный  
университет

Поступила в редакцию  
22 декабря 1982 г.,  
после переработки  
17 июня 1983 г.

УДК 535.81:535.8

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА КУМУЛЯНТНЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПЯТНИСТЫХ КАРТИН

Ю. В. Коблянский, В. Н. Курашов

Большинство исследований статистических свойств пятнистых картин выполнено в приближении случайного фазового рассеивающего экрана [1-3], описываемого гауссовым пространственно-однородным полем фазовых сдвигов  $\Psi(\rho)$ . Однако имеющихся в настоящее время экспериментальных данных недостаточно для проверки истинного закона распределения  $\Psi(\rho)$ , а кроме того, известны примеры и негауссовых экранов [4]. Ввиду этого необходимо построение более общей статистической теории пятнистых картин, которое логически последовательно может быть выполнено на основе метода кумулянтных функций [5]. Действительно, моменты интенсивности рассеянного поля в плоскости наблюдения связаны линейными преобразованиями с характеристическими функциями  $\chi_\Psi(s_1, \dots, s_m; \rho_1, \dots, \rho_m)$  случайных фазовых сдвигов [6]:

$$\langle I(r_1) \dots I(r_m) \rangle = \int \dots \int \chi_\Psi(s_1, \dots, s_{2m}; \rho_1, \dots, \rho_{2m}) G_E(\rho_1, \dots, \rho_{2m}) \times \\ \times \prod_{k=1}^m h(r_k, \rho_k) h^*(r_k, \rho_{k+m}) \prod_{k=1}^{2m} w(\rho_k) d^2 \rho_k, \quad (1)$$

где  $h(r, \rho)$  — импульсный отклик оптической системы,  $w(\rho)$  — апертурная функция освещдающего пучка,  $G_E(\rho_1, \dots, \rho_{2m})$  — его многоточечная корреляционная функция, а параметры  $s_i$  принимают значения  $s_i = 1$ ,  $1 < i \leq m$ ,  $s_i = -1$ ,  $m+1 < i \leq 2m$ . При произвольной статистике  $\Psi(\rho)$  справедливо разложение по кумулянтным функциям:

$$\chi_\Psi(s_1, \dots, s_m; \rho_1, \dots, \rho_m) = \exp \left[ \sum_{n_1=0}^{\infty} \dots \sum_{n_m=0}^{\infty} \frac{x_{n_1 \dots n_m}^{\Psi_1 \dots \Psi_m}}{n_1! \dots n_m!} (is_1)^{n_1} \dots (is_m)^{n_m} \right], \quad (2)$$

где  $x_{n_1 \dots n_m}^{\Psi_1 \dots \Psi_m} \equiv x_{n_1 \dots n_m}(\rho_1, \dots, \rho_m)$  — функция порядка  $n = \sum_{k=1}^m n_k$ . В простейшем случае

гауссова поля  $x_{n_1 \dots n_m}^{\Psi_1 \dots \Psi_m} = 0$  при  $n \geq 3$ , а произвольный негауссов экран описывается бесконечным набором  $x_{n_1 \dots n_m}^{\Psi_1 \dots \Psi_m}$  (теорема Марцинкевича [7]). Теперь последовательное изучение рассеивающих экранов можно свести к вычислению или измерению кумулянтных функций различных порядков. Такая задача является в то же время и есте-