

Форма дождевых капель и ее влияние на рассеяние оптического и микроволнового излучения

В.В.Стерлядкин, К. В. Куликовский

Московский Государственный Университет Приборостроения и Информатики 107996, г. Москва, ул. Стромынка, д.20, e-mail: sterlyadkin@mail.ru

Представлены результаты оригинальных натурных исследований формы и вибрации дождевых капель во время гравитационного падения в атмосфере. Представлены расчеты влияния деформации капель на рассеяние оптического и микроволнового излучения. Рассмотрены возможности решения обратной задачи – восстановления микроструктуры дождей по оптическим измерениям и измерениям в микроволновом диапазоне длин волн.

The results of field measurements of raindrop form and raindrop oscillations when falling in the atmosphere are considered. The calculations of influence of drop deformation on light and microwave scattering are presented. Different ways of solving of inverse problem – reconstruction of rain microstructure from optic and microwave measurements are discussed.

Если внимательно присмотреться к фотографиям дождевых радуг, которые наблюдаются после дождя, то можно отметить интересную особенность. Яркость и четкость радуги тем выше, чем ближе к горизонту наблюдается радуга, рис.1. Нередко в верхней части дуги радуга сильно размыта и практически не наблюдается.



Рис.1. Нижняя часть радуги всегда ярче, чем ее верхняя часть. Причина этого лежит в деформации дождевых капель и их вибрации во время гравитационного падения, а также в особенности формирования радуг.

Известно, что дождевые капли во время падения сплющиваются и, кроме того, периодически меняют свою форму – вибрируют [1-3]. Это свойство, очевидно, должно проявляться в рассеивающих свойствах дождей как в видимом, так и в микроволновом

диапазоне. Особенно важен учет формы капель при поляризационных измерениях в радарной метеорологии [4]. В настоящем докладе мы рассмотрим результаты натуральных исследований как самих капель во время их падения, так и результаты расчетов влияния деформации частиц на рассеивающие свойства дождей.

В более ранних работах при лабораторных исследованиях резонансных свойств капель воды нам удалось возбудить основные типы колебаний капель, подвешенных на колечке. [1] При измерении индикатрис рассеяния вибрирующих капель был обнаружен эффект, которые мы назвали аномально высокой модуляцией рассеянного света [2,4]. Эффект был таким мощным, что деформацию капель в 4 мкм, которую трудно увидеть даже в микроскоп, нам удалось регистрировать с расстояния 4 метра [2,4]! Использование этого эффекта в натуральных условиях позволило отработать методику измерений средней формы падающих капель, регистрировать моду и амплитуду колебаний каждой зарегистрированной капли. Методика основана на фотографировании дождевых капель при подсветке их снизу вверх белым стабилизированным светом и регистрации света, рассеянного в окрестности радуги первого порядка [2]. На рис. 2 представлена типичная фотография, полученная при открывании затвора фотоаппарата на 0.5 секунды.

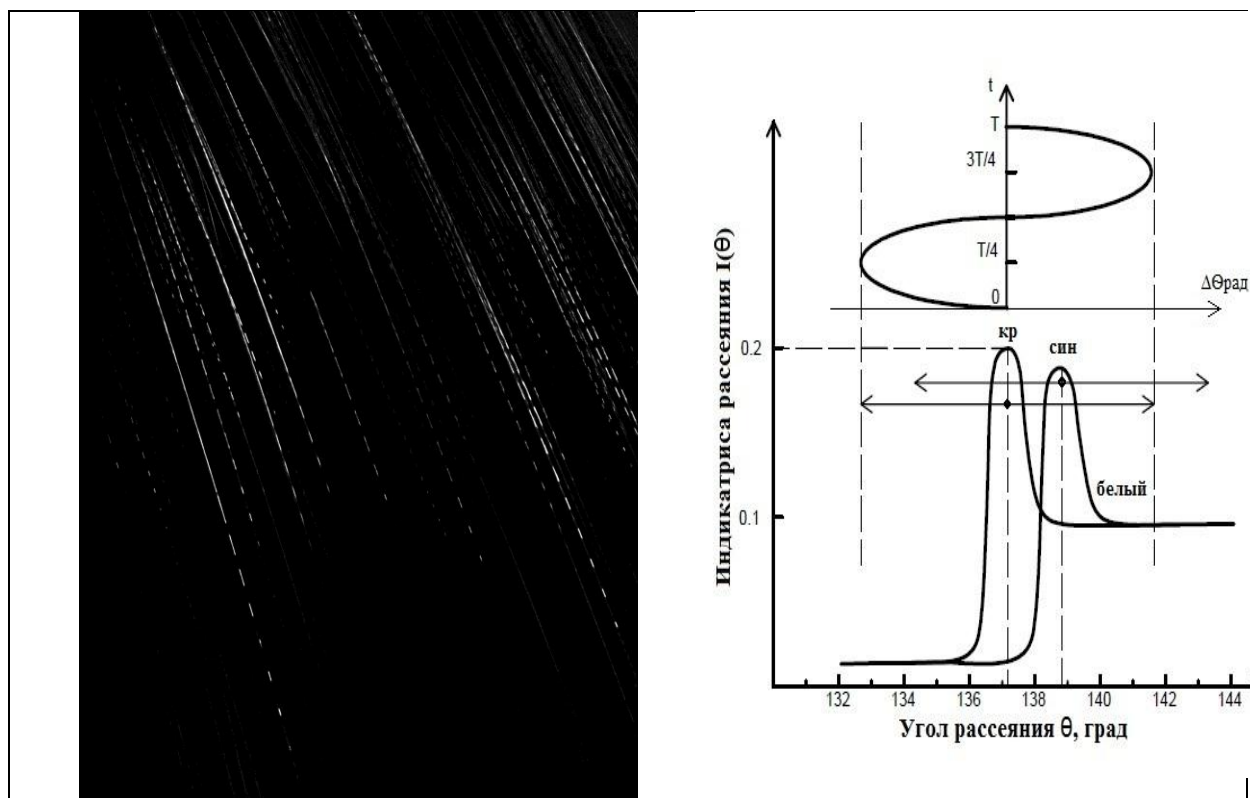


Рис. 2. Фотография треков аномально высокой модуляции света, рассеянного падающими дождевыми каплями. По угловому положению и пространственному периоду всплеск модуляции можно получать информацию о размере каждой капли, средней деформации во время падения, об амплитуде и моде колебаний.

Рис.3. Колебания капли приводят к периодическому смещению максимумов радуги, и появлению всплеск при различных углах наблюдения.

За время открытого затвора капли успевают пролететь около 3 метров, оставляя треки на фотографии. Чем ниже положение точки трека, тем меньше угол наблюдения (на фотографии он изменяется от 142° в верхней части до 130° в нижней части фотогра-

фии). На соседнем рисунке представлено объяснение формы треков и их изменение во время падения. Насколько яркими по интенсивности являются радуги первого порядка можно представить из рисунка 3, на котором показана интенсивность рассеянного света в зависимости от угла рассеяния (индикатриса) [5]. Например, красный луч при угле рассеяния 137° примерно в 30 раз ярче, чем свет, приходящий от капли при углах меньших 136° . Рис. 3 объясняет, почему красный свет в радуге самый яркий, - он почти не смешивается с зеленым и синим светом. А вот к зеленому и синему максимумам добавляются другие цвета, поэтому они не так ярко выражены в радуге. Из графика 3 можно понять, что будет видеть наблюдатель, если будет смотреть на такую каплю при различных углах рассеяния. Если угол наблюдения находится внизу, ниже 132° , (см. рис.3) то даже при максимальном отклонении радуги вниз она не достигает этого угла, капля остается темной. При угле наблюдения 133° , только начало красной радуги при отклонении на всю амплитуду вниз достигает этого угла, и наблюдатель увидит короткие красные вспышки. (На фотографии треков, рис 2, это соответствует самой нижней части трека). При небольшом увеличении угла наблюдений до 133.5° уже весь красный максимум достигнет угла наблюдения и красная вспышка будет иметь максимальную амплитуду. При дальнейшем увеличении угла наблюдений уже все максимумы радуги достигают наблюдателя и формируются яркий отрезок трека, края которого окрашены в цвета радуги, а средняя часть в белый цвет. Чем выше угол наблюдения, тем длиннее яркий отрезок, а при угле выше 140° яркие отрезки сливаются, образуя сплошную линию, которая становится белой. Именно такую картину мы последовательно видим на фотографии 2, где нижняя часть треков представляет собой короткие красные вспышки, а по мере увеличения высоты и угла наблюдений вспышки удлиняются, и сливаются вместе в верхней части треков. Отметим, что на эту картину накладывается некоторое смещение радуги за счет средней деформации капли во время падения.

В первом приближении, по данным наших натурных измерений, средняя форма капли и амплитуды колебаний могут быть приближены аналитическими выражениями:

$$\Delta\gamma_0(D) = 1 - 0.7D^2 - 0.16D \quad (1)$$

$$\Delta\gamma_a(D) = 0.6D^2 + 0.03D$$

где форма капли определяется коэффициентом формы $\gamma = c/a$, c - вертикальная, а a - горизонтальная полуоси капли, $\Delta\gamma_0 = \gamma_{cp} - 1$ – средняя деформация капли, $\Delta\gamma_a$ – амплитуда колебаний, диаметр капель D выражен в сантиметрах.

Учитывая сказанное, становится понятным причина изменения четкости радуг с приближением к горизонту, рис.1. Дело в том, что верхняя часть радуги формируется в вертикальном сечении капли, которое в наибольшей степени отклоняется от окружности при деформации и вибрации капли, а это приводит к размыванию радуги. Чем ближе радуга к горизонту, тем ближе к окружности становится сечение капель, даже при наличии деформаций, (так как все деформации, как правило, имеют осесимметричный характер) и тем меньше смещение и размытие радуг. Использование этого свойства, в принципе, позволяет проводить решение обратной задачи – оценивать микроструктуру дождя по цветности радуг. Если к фотографиям добавить измерение переменной составляющей рассеянного света, то точность решения обратной задачи резко повысится, так как частота колебаний капель сильно уменьшается с ростом их размеров. Поэтому по частотному спектру рассеянного излучения можно проводить восстановление микроструктуры дождя.

Перейдем к оценке влияния деформации и вибрации дождевых капель на рассеяние микроволнового излучения. В работе [4] рассмотрены рассеивающие свойства несферической и вибрирующей капли в дипольном приближении в предположении, что форма капли близка к эллипсоиду вращения, ось вращения которого ориентирована

вертикально. В случае горизонтального зондирования (угол места $\beta = 0$), если на каплю падает линейно-поляризованное излучение, с амплитудой E_0 , плоскость поляризации которого составляет угол δ с вертикалью, для параллельной E_{\parallel} и ортогональной E_{\perp} , то компонент рассеянного в обратном направлении поля можно получить соотношения:

$$E_{\parallel} = E^{c\Phi} [1 + A(\delta)q\Delta\gamma_0 + A(\delta)q\Delta\gamma_a \cos(\Omega t + \varphi)] \quad (2)$$

$$E_{\perp} = E^{c\Phi} [B(\delta)q\Delta\gamma_0 + B(\delta)q\Delta\gamma_a \cos(\Omega t + \varphi)] \quad (3)$$

где величина $E^{c\Phi} = 0.125D^3 [(\varepsilon - 1)/(\varepsilon + 2)]E_0 \cos[\omega_0 t + 2kr(t)]$ соответствует полю, рассеянному сферической каплей равного объема, D – диаметр сферической капли равного объема, ε – диэлектрическая проницаемость воды, $q = 0.4(\varepsilon - 1)/(\varepsilon + 2)$, $\Delta\gamma = \gamma - 1$ – отклонение от сферичности, $\Delta\gamma_0 = \gamma_{cp} - 1$ – средняя деформация капли, $\Delta\gamma_a$ – амплитуда колебаний, $\omega_0 = 2\pi f_0$ – круговая частота падающего на каплю излучения, $\Omega = 2\pi F$ – частота вибрации, $A(\delta) = 1 - 3\cos^2 \delta$, $B(\delta) = 1.5 \sin 2\delta$.

Соотношения (2) и (3) позволяют получить наглядное представление о вкладе несферичности и вибрации в поле, рассеянное одиночной каплей. Как и следовало ожидать, ортогональная компонента существует лишь при отклонении формы капли от сферы и при направлении поляризации δ , отличном от 0 и 90°. Деформация или вибрация капли приводят к появлению деполаризационной компоненты, амплитуда которой пропорциональна коэффициенту $B(\delta) = 1.5 \sin 2\delta$.

Выражение (2) представляет особый интерес. Во-первых, из него следует, что существует угол поляризации δ^* , при котором удается полностью исключить влияние, как вибрации капель, так и их средней несферичности на параллельную компоненту регистрируемого сигнала, т. е. получить радиоэхо, в точности равное сигналу от идеально сферической капли равного объема. Очевидно, что δ^* определяется уравнением

$$A(\delta^*) = 1 - 3\cos^2 \delta^* = 0 \quad (4)$$

откуда следует, что Во-вторых, влияние вибрации и несферичности капель при вертикальной поляризации зондирующего излучения вдвое превышает вклад этих факторов в случае горизонтальной поляризации. В общем случае, при зондировании под произвольным углом места β , поляризационные коэффициенты $A(\delta)$ и $B(\delta)$ в формулах (2) и (3) имеют вид:

$$A(\delta, \beta) = 1 - 3\cos^2 \delta \cos^2 \beta \quad (5)$$

$$B(\delta, \beta) = 3/2 \cos^2 \beta \sin 2\delta \quad (6)$$

Характер зависимости коэффициента B от угла δ при этом не изменяется, а лишь уменьшается в $\cos^2 \beta$ раз. Зависимость $A(\delta)$ может измениться качественно. В частности, угол δ^* , при котором исчезает вклад вибрации и несферичности капель, несколько изменяется:

$$\delta^* = \arccos\left(\frac{1}{\sqrt{3} \cos \beta}\right) \quad (6)$$

и, очевидно, существует лишь при $\cos \beta > 1/\sqrt{3}$, т. е. при $\beta \leq 54,7^\circ$. При вертикальном зондировании, $\beta = 90$, зависимость от угла δ отсутствует, $A = 1$.

Остановимся несколько подробнее на относительном вкладе вибрации и несферичности капель в спектр флуктуации сигнала в радиолокационных методах зондирования. Для крупнокапельной фракции дождя ($D=4.5$ мм) типичные значения $\Delta\gamma_0$ составляют 0,3, а $\Delta\gamma_a = 0,2$. При этом в случае фазового детектирования для параллельной компо-

ненты сигнала мощность на основной доплеровской частоте отличается от случая сферической капли на $2Aq\Delta\gamma_0 + A^2q^2\Delta\gamma_0^2$. В случае горизонтальном зондировании ($\beta = 0^\circ$) и вертикальной поляризации ($\delta = 0^\circ$) поляризационный коэффициент A равен -2 , что приводит к уменьшению сигнала на 42%, т. е. почти вдвое. При горизонтальной поляризации ($\delta = 90^\circ$, $A = 1$), происходит увеличение сигнала на 25%. Суммарная относительная мощность боковых вибрационных полос для параллельной компоненты сигнала невелика и при $\beta = 0^\circ$, $\delta = 0^\circ$ составляет 1,3%. А вот для ортогональной компоненты относительная мощность полос вибрации для крупнокапельной фракции может превышать 20% от основного сигнала.

Аналогичные оценки можно провести и для случая квадратичного детектирования. Например, при приеме деполяризационной компоненты относительная мощность вибрационных полос на частотах $\omega_{ij} \pm \Omega$ по сравнению с основным сигналом на нулевой частоте при $\Delta\gamma_0 = 0,3$ и $\Delta\gamma_0 = 0,2$ достигает 40%.

Заметим, что представленные оценки были проведены в предположении эллипсоидальной формы дождевых капель. Небольшие капли диаметром до 2 мм можно описывать эллипсоидом с неплохой точностью, однако форма более крупных капель начинает отличаться от эллипсоидальной. Однако в дипольном приближении, при условии, что длина волны много больше размеров частиц, основным фактором влияния оказывается коэффициент формы γ , равный отношению вертикальной полуоси к горизонтальной.

Отмеченные поляризационные свойства гидрометеоров следует учитывать при проведении поляризационных измерений в радарной метеорологии. Их можно использовать и для решения обратной задачи - восстановления микроструктуры дождей по спектрам рассеянного излучения [6]. При регистрации параллельной компоненты рассеянного поля и угле поляризации $\delta = \delta^*$, коэффициент $A(\delta^*, \beta)$ становится равным нулю, и спектр будет иметь такой вид, какой сформировали бы эти же капли при условии их сферической формы. Проводя сравнения трех видов спектров, полученных при $\delta=0$, $\delta = \delta^*$ и $\delta = 90^\circ$ можно разделить вклады в спектр, связанные с вибрацией капель. Предложенная методика представляется перспективной для дистанционного определения микроструктуры осадков по тонкой поляризационной структуре радиоэха. Вероятно, эта методика позволит повысить точность дистанционного определения интенсивности выпадающих дождей.

Литература

1. Стерлядкин В.В. Измерение резонансных свойств вибрирующей капли. Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1982. №1. с. 98-101.
2. Стерлядкин В.В. Натурные измерения колебаний капель осадков. Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1988. т. 24. №6. с. 613-621.
3. Beard K.V., Bringi V.N., Thurai M. A new Understanding of Raindrop Shape // Atmospheric Research. 2010. V.97. №4. P.396—415.
4. Горелик А.Г., Стерлядкин В.В. Влияние вибрации дождевых капель на поляризационные характеристики радиоэха. Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1989. т. 25. № 9. с. 960-968.
5. Стерлядкина Е.А., Стерлядкин В.В. Рассеивающие свойства вибрирующих капель. Оптика и спектроскопия. 1988. Т.64. вып.3. с.685-688.
6. Козлов А.И., Горелик А.Г., Стерлядкин В.В. Рассеяние радиоволн на несферических и осциллирующих дождевых каплях. Научный вестник МГТУ ГА. Сер Радиотехника.. 2012. № 176. с. 25-30.
7. Стерлядкин В.В. Радужный танец дождевых капель. Природа. 2012. №5. В печати.