

ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И РАССЕЙЯНИЯ САНТИМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН НА РАДИОЗАТМЕННЫХ ТРАССАХ СПУТНИК- СПУТНИК ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ ГИДРОМЕТЕОРНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

Е.В. Сухонин

Фрязинский филиал Учреждения Российской академии наук
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
e-mail: efimov@ms.ire.rssi.ru

Выполнены оценки ослабления A и деполяризации XPD радиоизлучения на волне 2 см при его прохождении по радиозатменной трассе спутник-спутник с гидрометеорами при заходе одного из спутников в область радиотени Земли с целью изучения возможности идентификации дождей. Результаты расчетов ослабления радиоволн в дожде сравнивались с экспериментальными данными, полученными на радиозатменных трассах аппарат МИР-геостационарный спутник. Показано, что в качестве критерия идентификации можно использовать характерный вид зависимости ослабления A от высоты лучевой линии в тропосфере H . Провал на кривой $A(H)$ может служить признаком существования либо обложного дождя с зоной таяния осадков, либо слоистых протяженных облаков. Различать эти гидрометеорные образования можно по поведению сигнала при $H \rightarrow 0$ км. Получено соотношение, связывающее между собой A и XPD в дождях на волне 2 см, позволяющее идентифицировать их более надежно. Установлено, что поляризационный метод дает возможность обнаруживать в атмосфере грозовые разряды.

В связи с появлением систем глобального позиционирования и низкоорбитальных спутников начинают развиваться работы по мониторингу метеопараметров атмосферы с помощью радиозатменного метода [1,2]. Хотя этот метод уступает по точности наземным методам, он является глобальным.

Из анализа [3,4] опубликованных работ и приведенной в них библиографии следует, что радиозатменный метод может применяться для определения и мониторинга содержания в атмосфере водяного пара и влажности облаков по поглощению сантиметровых радиоволн на трассах спутник-спутник при заходе одного из спутников в область радиотени Земли. Что касается дождей, то в ряде случаев их идентификация и определение их интенсивности по ослаблению волн затруднительны, поскольку ослабление сантиметровых волн в дождях и мощных облаках часто бывает одинаковым. Поэтому требуются соответствующие теоретически обоснованные обработка и интерпретация экспериментальных данных по ослаблению в дождях радиоволн на спутниковых радиозатменных трассах, а также правильный выбор моделей дождя и методов анализа расчетов, чтобы можно было разделить вклады дождя и облаков без дождя в ослабление радиоволн.

Целью работы являлось изучение возможности идентификации дождей и получения их отличительного признака при сравнении с облаками на основе исследований теоретических расчётных зависимостей ослабления A и деполяризации XPD сантиметровых волн в дождях разного типа на затменных трассах спутник-спутник от расстояния H между земной поверхностью и трассой распространения радиоволн. Предварительные оценки показывают, что эти зависимости могут иметь "характерный" вид для дождей разного типа и по этой причине могут использоваться для их идентификации. В [5] было показано, как можно идентифицировать облака и оценивать поглощение в них радиоволн, однако вопрос об идентификации дождей остался открытым.

В работе анализировались результаты расчетов зависимостей $A(H)$ и XPD(H) в дождях на волне 2 см. При расчетах ослабления A капли дождя рассматривались как сферические, а при расчетах деполяризации XPD как сфероиды, наклоненные по отношению к линии горизонта [6,7]. При расчетах использовались три модели структуры дождя (M1, M2 и M3) [8,9], при этом только одни водные дождевые капли в чистом виде существуют в самом нижнем слое ат-

мосферы толщиной 4 км, верхняя граница которого соответствует уровню замерзания воды 0°C.

В случае всех трёх моделей над нижним слоем, состоящим из одних дождевых капель, находится слой облаков толщиной 2 км с содержанием воды 500 г/м². В модели М2, в отличие от М1, слой облаков включает также дождевые ледяные капли. Модели М1 и М2 соответствуют обложным дождям. Модель М3, которая более всего соответствует сильным ливням конвективного происхождения ("глубокое дождевое облако с гидрометеорами в смешанной фазе" [9]), включает в себя ещё два более высоких слоя – один с ледяными кристаллами, замёрзшими каплями дождя и жидкими каплями дождя, и другой, самый высокий слой, только с ледяными кристаллами. Кроме того, слой облаков в модели М3 включает также жидкие и замёрзшие капли дождя.

В случае моделей М1 и М2 обложные дожди представляют собой однородные образования с интенсивностью дождя $R = 0.5 \dots 1$ мм/ч, ограниченные сверху уровнем нулевой изотермы атмосферы и занимающие в пространстве десятки и даже сотни километров. Ещё одна особенность таких дождей (модель М2) – это существование в них зоны таяния осадков, находящейся ниже уровня нулевой изотермы атмосферы и достигающей по размеру нескольких сотен метров. Зона таяния осадков представляет собой мокрый снег и снег с дождём, ослабление в которых в два-три раза больше, чем в дожде с такой же интенсивностью [7].

Результаты расчета представляют собой имитацию радиопросвечивания дождей на волне 2 см при изменении минимальной высоты лучевой линии над земной поверхностью H от H_z до $H=0$ км. Результаты подробного анализа зависимости $A(H)$ для всех трех моделей дождя М1, М2 и М3 приведены в [10].

Судя по $A(H)$ на радиозатменных трассах в [5], характерный вид экспериментальной кривой $A(H)$ свидетельствует о наличии на радиозатменной трассе ливневого дождя, описываемого моделью дождя М3. Следовательно, такая характерная особенность $A(H)$ может служить одним из критериев идентификации ливневых дождей.

Зависимость $A(H)$ для обложных дождей (модель М2) с провалом кривой $A(H)$ при $H \approx 4$ км обусловлена зоной таяния осадков. В модели М1 зависимость $A(H)$ полностью совпадает с $A(H)$ для модели М2 при $H \leq 3.5$ км, при этом провал в кривой $A(H)$ при $H > 3.5$ км отсутствует, т.к. в этом случае зона таяния осадков не существует. Расчёты зависимости $A(H)$ проводились в предположении, что длина трассы распространения радиоволн в обложном дожде равна 150 км, дождь является однородным с $R = 1$ мм/ч, толщина зоны таяния осадков 500 м, а коэффициент ослабления в ней СМ радиоволн втрое превышает коэффициент ослабления в дожде.

Зависимость $A(H)$ с провалом можно рассматривать как характерную особенность ослабления в слабых обложных дождях. Однако использовать её в качестве единственного критерия для идентификации обложных дождей типа М2, строго говоря, нельзя, поскольку аналогичные зависимости $A(H)$ с провалом могут существовать и в случае слоистых протяжённых облаков [5].

С целью повышения надёжности идентификации дождей на радиозатменных трассах следует одновременно с A измерять деполяризацию XPD, учитывая, что величины XPD могут заметно превышать величины ослабления A , если преобладают гидрометеоры в виде ледяных кристаллов. Анализ экспериментальных и теоретических результатов [11] показал, что между A и XPD существует функциональная связь, не зависящая от интенсивности дождя и длины трассы распространения радиоволн.

С учетом того, что в рассматриваемом нами случае $f=15$ ГГц ($\lambda=2$ см), угол поляризации волны 45°, угол возвышения трассы 0°, то в соответствии с рекомендациями МККР [12]

$$XPD = 35.3 - A. \quad (1)$$

В случае другой частоты и поляризации величина первого члена в правой части (1) изменится. Равенства типа (1) можно использовать для идентификации дождя на радиозатменных трассах. При одновременных измерениях ослабления A и деполяризации XPD волн возможны три случая: (а) левая и правая части в (1) равны друг другу, (б) левая часть больше правой и (в) правая часть больше левой. Первый случай означает, что на затменной трассе идет дождь, в котором деполяризация радиоволн обусловлена только каплями дождя. Во втором и третьем слу-

чаях на величину XPD в дожде влияет слой ледяных кристаллов, вызывая, в частности, дополнительный рост деполяризации при малой величине ослабления A .

По резкому изменению XPD во время грозových разрядов можно также определять области атмосферы с грозowymi разрядами. Проведенные исследования показали, что измеряемые ослабление и деполяризация сантиметровых радиоволн на радиозатменных трассах в гидрометеорных образованиях позволяют идентифицировать дожди разных типов, облака и ледяные кристаллы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kursinski E.R., Ward D., Otavola R., Herman B. et al. // Abstr. 3rd International workshop OPAC. September 20, 2007, Graz, Austria. P. 14.
2. Hoeg P., Kirchengast G. // Proposal to ESA on atmosphere and climate explorer. Graz: University of Graz. 2002. P. 33.
3. Яковлев О.И. Космическая радиофизика. М.: РФФИ, 1998.
4. Яковлев О.И., Павельев А.Г., Матюгов С.С. // Усп. совр. радиоэлектроники. 2002. № 9. С. 8.
5. Яковлев О.И., Матюгов С.С. // РЭ. 2005. Т.50. №3. С.277.
6. Соколов А.В., Сухонин Е.В. // Итоги науки и техники. Сер. Радиотехника. М: ВИНТИ, 1980. Т. 20. С. 107.
7. Сухонин Е.В. // Итоги науки и техники. Сер. Радиотехника. М: ВИНТИ, 1990. Т. 41. С. 3.
8. Liu G., Curry J.A. // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. № D9. P. 9959.
9. Wu R., Weinman J.A. // J. Geophys. Res. 1984. V. 89. № 8. P. 7170.
10. Сухонин Е.В. // РЭ. 2008. Т.53. № 9. С. 1128.
11. Nowland W.L., Olsen R.L., Shkarovsky I.P. // Electron. Lett. 1977. V. 13. № 22. P. 676.
12. CCIR. V. Rep. 564-1. Section 12.4. Geneva: CCIR, 1978.