

РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН, РАДИОЛОКАЦИЯ И ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ

УДК 621.371.029

И. М. Мыценко, Д. Д. Халамейда

АКТИВНО-ПАССИВНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДНОСТИ ГИДРОМЕТЕООБРАЗОВАНИЙ ПО РАДИОСИГНАЛАМ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ И ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: khalameyda@ire.kharkov.ua*

Описан комплексированный метод (активно-пассивный) для определения средней водности в гидрометеорообразованиях, где ослабление сигнала измеряется по радиосигналам геостационарных искусственных спутников Земли, а его размеры и местоположение – с помощью радиолокационных станций. Проведено теоретическое обоснование метода и результаты его экспериментальной проверки. Этот метод представляет интерес особенно при определении водности в мощных ливневых образованиях, которые дают большое ослабление сигналов и опасны для человека. Ил. 3. Табл. 1. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: геостационарный спутник, гидрометеор, водность, облако.

В настоящее время развитие радиолокационных систем идет по пути применения комплексированных методов, которые позволяют получить новые положительные качества радиолокационных систем [1].

Широкое применение спутникового телевидения и связи, доступность аппаратуры, используемые частотные диапазоны и экологическая безопасность дали возможность использовать сигналы геостационарных искусственных спутников Земли (ИСЗ) для определения параметров гидрометеорообразований [2, 3]. Анализ полученных экспериментальных результатов показал возможность использования сигналов геостационарных ИСЗ для определения параметров гидрометеорообразований и турбулентных движений [4]. Кроме этого фиксировалась зависимость ослабления сигнала от погодных условий. К недостаткам этой системы следует отнести трудность определения местоположения метеорообразования и его размеров. Для оценки размеров и местоположения зон, занятых гидрометеорообразованиями, применяются метеорологические радиолокационные станции (РЛС) [5–7].

Измерение ослабления гидрометеорообразованиями с помощью радиолокаторов имеет ограничения в связи с сильным ослаблением сигналов при двухстороннем распространении в сильных дождях и больших площадях [6]. Эту площадь можно значительно увеличить, измеряя ослабление сигнала при одностороннем распространении. Для этого необходимо иметь разнесенные по трассе передающее и приемное устройства, что существенно усложнит измерительную систему и увеличит ее стоимость. Также, возможно проведение измерений ослабления с помощью радиолокатора и отражателя с известной эффективной площадью рассеяния (ЭПР) на другом конце трассы. Ограничения применения этого метода очевидны.

Таким образом, исследование комплексированного метода для определения водности, когда размеры и местоположение гидрометеорообразования определяется с помощью РЛС, а ослабление сигнала, прошедшего это же гидрометеорообразование в одном направлении, – с помощью сигналов геостационарного ИСЗ, является актуальным и целесообразным.

Электромагнитная волна теряет энергию как при поглощении, так и при рассеянии. Следовательно, потеря мощности будет пропорциональна сумме $\sigma_a + \sigma_s$, где σ_a – эффективная площадь поглощения, σ_s – ЭПР, а изменение плотности потока мощности падающего излучения $\Delta\Pi_{\text{изл}}$ в волне, распространяющейся через некоторый объем ΔV на небольшое расстояние Δr , будет равно [6]

$$\Delta\Pi_{\text{изл}} = -\frac{\Delta r}{\Delta V} \sum_{n=1}^N (\sigma_{an} + \sigma_{sn}) \Pi_{\text{изл}}, \quad (1)$$

где суммирование распространяется на N капель внутри ΔV , а σ_{an} , σ_{sn} – эффективные площади поглощения и полного рассеяния на n -й частице соответственно. Тогда скорость изменения плотности потока мощности опишем выражением

$$\lim\left(\frac{\Delta\Pi_{\text{изл}}}{\Delta r}\right) = \frac{-1}{\Delta V} \sum_{n=1}^N (\sigma_{an} + \sigma_{sn}) \Pi_{\text{изл}}. \quad (2)$$

При $\Delta r \rightarrow 0$ плотность потока мощности в пределе может считаться постоянной внутри объема ΔV и выноситься за знак суммы. На любом удалении r плотность потока мощности определяется интегралом от (2)

$$\Pi_{\text{изл}}(r_1) = \Pi_{\text{изл}}(r_2) = \exp\left(-\int_{r_1}^{r_2} k dr\right), \quad (3)$$

$$\text{где } k = \frac{\sum_n (\sigma_{an} + \sigma_{sn})}{\Delta V}.$$

При переходе к логарифмическим единицам (дБ/км) выражение для коэффициента ослабления имеет вид

$$K \left[\frac{\text{дБ}}{\text{км}} \right] = \frac{d}{dr_2} \left[10 \lg \frac{\Pi_{\text{изл}}(r_1)}{\Pi_{\text{изл}}(r_2)} \right] = 4,34 \cdot 10^3 k, \quad (4)$$

где k выражено в м^{-1} .

Наибольший интерес представляет ослабление, вносимое облаком, и его связь с водностью, так как это открывает возможность для ее оценки и диагностики опасности для человека. Если размеры капли $D \ll \lambda/16$, то обусловленные поглощением потери будут пропорциональны водности M ($\text{г}/\text{м}^3$) на трассе распространения радиоволн, т. е. вносимое облаком ослабление K_c будет равно

$$K_c \cong 10^{-8} M / \lambda^2, \quad (5)$$

где K_c выражено в м^{-1} , а λ – в метрах.

Для перехода к логарифмическим единицам (дБ/км) необходимо значение (5) умножить на $4,34 \cdot 10^3$ (4):

$$K_c = 0,434 \frac{M}{\lambda^2} \left[\frac{\text{дБ}}{\text{км}} \right]. \quad (6)$$

Ослабление радиоволн на трассе протяженностью L будет равно [8]

$$L K_c = 10 \lg \frac{P_0}{P}, \quad (7)$$

где $P_0 = \frac{P_{\text{изл}} G_1 G_2 \lambda^2}{(4\pi R)^2}$ – мощность сигнала на входе

приемника в свободном пространстве в ясную погоду; $P_{\text{изл}}$ – излучаемая мощность передатчика на спутнике; G_1 – коэффициент усиления антенны на спутнике; G_2 – коэффициент усиления приемной антенны на земле; λ – длина волны; R – расстояние от ИСЗ до точки размещения приемной станции (наклонная плоскость); P – мощность реально принимаемого сигнала, ослабленного в тропосфере гидрометеорообразованиями.

РЛС определяет вертикальный (или толщину) $h_1 = CB$ (рис. 1) размер гидрометеорообразования.

Тогда размер трассы распространения спутникового сигнала в гидрометеорообразовании L будет равен

$$L \approx \frac{h_1}{\sin \beta}, \quad (8)$$

а коэффициент затухания

$$K_c = \frac{V}{L} \text{ [дБ/км]}, \quad (9)$$

где V , дБ – экспериментально определенное ослабление спутникового сигнала в гидрометеорообразовании относительно сигнала при ясном небе.

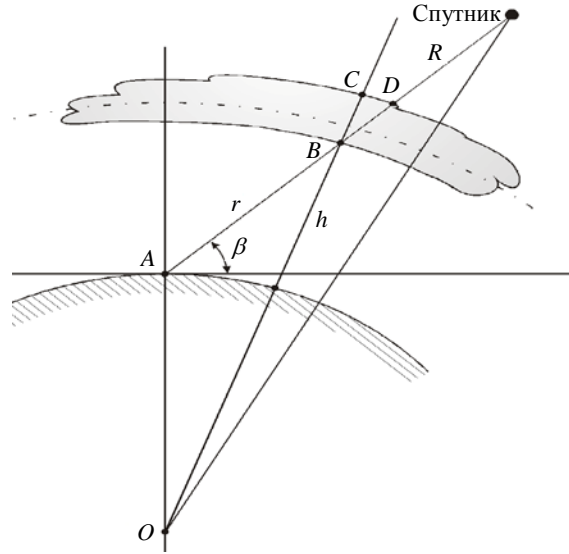


Рис. 1. Трасса распространения

Подставив коэффициент затухания в выражение (1), получим значение водности c

$$M \left[\frac{\text{г}}{\text{м}^3} \right] = \frac{\lambda^2 [\text{см}] V [\text{дБ}]}{0,434 L [\text{км}]}. \quad (10)$$

Для неоднородной среды, когда $K_c(l)$ является функцией расстояния l вдоль направления распространения, ослабление радиоволн на пути L представляет собой усредненный коэффициент затухания

$$\alpha = \frac{1}{L} \int \alpha(l) dl. \quad (11)$$

Известно, что вертикальная мощность ливневых облаков (протяженность по вертикали от нижней до верхней границы) достигает 8,4 км, максимальная повторяемость вертикальной мощности до облаков, не дающих гроз, приходится на 3,6 км, а для грозовых облаков – на 5,5 км.

Вертикальная мощность облаков непосредственно связана с типом выпадающих из них осадков. По данным самолетных зондирований облаков, морось выпадает при средней мощности облаков 850 м, дождь с моросью – при 1 400 м, дождь – при 2 150 м. Измерения водности в облаках показали, что водность сигнала растет с высотой, достигает максимума, а в верхней части облака убывает из-за испарения. При увеличении высоты от основания облака и до 1 000 м средняя водность может изменяться от 0,08 до 0,97 $\text{г}/\text{м}^3$. В мощных ливневых образованиях водность может достигать нескольких грамм на кубический метр. В других типах кучево-дождевых облаков водность может находиться в пределах от сотен до десятых долей грамма на кубический метр [9]. Таким образом, в рассматриваемом методе водность в облаке, как и коэффициент затухания,

является функцией расстояния вдоль направления распространения, а ее значение является усредненной величиной.

Структурная схема аппаратуры приведена на рис. 2.

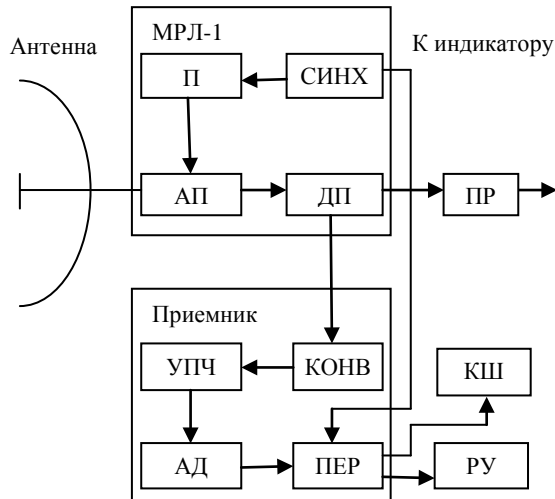


Рис. 2. Структурная схема аппаратуры

В состав аппаратного комплекса входит метеорологическая некогерентная импульсная РЛС «МРЛ-1» и приемник спутниковых сигналов. Антенная система РЛС служит для излучения сигналов передатчика П и приема сигналов, отраженных от гидрометеорооборудования. Переключение осуществляется с помощью антенного переключателя (разрядника) АП, который подключает антенну к передатчику П в момент излучения и к приемнику Пр во время паузы между зондирующими импульсами. Передатчик П состоит из генератора СВЧ-энергии (магнетрон) и модулятора. Приемник РЛС Пр выполнен по супергетеродинной схеме. Синхронизатор СИНХ создает требуемую частоту повторения импульсов и осуществляет синхронизацию работы РЛС. Он состоит из кварцевого генератора и формирующих каскадов.

Одновременно антенная система РЛС используется и для приема спутниковых сигналов: она наводится на геостационарный ИСЗ. Спутниковые сигналы принимаются одновременно с отраженными от гидрометеорооборудования радиолокационными сигналами во время паузы между зондирующими импульсами, затем с помощью разделительного фильтра ДП (диплексора) отделяются от них и подаются на вход приемника (преобразователя частоты) спутниковых сигналов. Для работы разделительного фильтра необходимо, чтобы частоты радиолокационного и спутниковых сигналов отличались, а фильтр имел достаточное ослабление для исключения влияния их друг на друга. Преобразователь частоты спут-

никовых сигналов КОНВ состоит из малошумящего усилителя, смесителя, гетеродина и предварительного усилителя. В качестве преобразователя частоты используется стандартный конвертор для приема спутниковых сигналов. Далее сигнал с выхода преобразователя частоты после дополнительного усиления (УПЧ) поступает на вход квадратичного амплитудного детектора АД, где детектируется и подается на блок записи во время паузы между зондирующими сигналами. В момент излучения, когда антенна подключена к передатчику, сигнал на входе приемника спутниковых сигналов отсутствует. В этом случае выходным сигналом спутникового приемника являются собственные шумы. С помощью коммутатора ПЕР сигнал собственных шумов подается на блок контроля уровня собственных шумов КШ. Стабильность этого уровня говорит о стабильности коэффициента передачи всего приемного тракта.

Перейдем к рассмотрению экспериментальных результатов. На рис. 3 показаны временные зависимости напряжения на выходе квадратичного амплитудного детектора $U_{\text{вых}}(t)$.

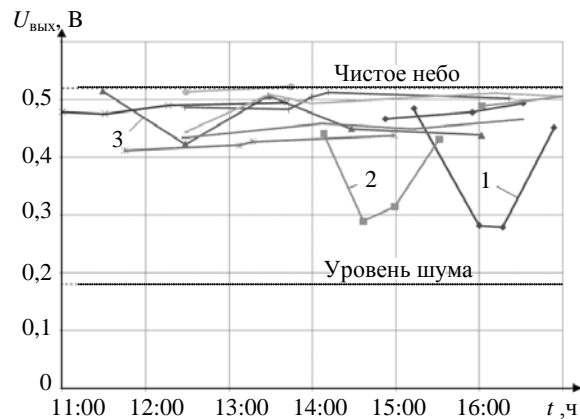


Рис. 3. Временные зависимости напряжения на выходе квадратичного детектора

Эти зависимости получены с помощью стандартного приемника спутникового сигнала, состоящего из антенны и конвертора K_u диапазона. К выходу конвертора был подключен широкополосный усилитель с коэффициентом усиления 20 дБ и квадратичный амплитудный детектор. Сигнал принимался с геостационарного спутника «Hot bird» (13° в.д.). Угол места направления на спутник $\beta \approx 20^\circ$. Как видно из рис. 3, в период проведения экспериментов имели место два случая (15.05.2010 и 6.06.2010) когда мощные ливневые образования оказывались на пути распространения сигналов геостационарного ИСЗ. Им соответствуют кривые 1 и 2. Ослабление спутникового сигнала относительно ясного неба для этих случаев было приблизительно одинаково и составляло $\sim 2,8$ дБ. Другие случаи появления на трассе распространения спутниковых сигналов

гидрометеорообразований (менее мощных ливневых облаков) представлены зависимостями 3, для них ослабление составило ~0,9 дБ. Слоисто-кучевые облака давали еще меньшее ослабление ~0,3 дБ. Для оценки водности в исследованных гидрометеорообразованиях с помощью эмпирического соотношения (5) необходимо знать длину трассы распространения спутникового сигнала L , который можно определить, зная размеры и месторасположения гидрометеорообразования (см. рис. 1).

Для определения размеров гидрометеорообразований использовалась метеорологическая РЛС «МРЛ-1» ($\lambda = 3,2$ см) [7] и атлас облаков [10]. Результаты экспериментов и расчета водности (5) приведены в таблице.

Результаты экспериментов

№ п/п	Ослабление V , дБ	Длина трассы L , км	Водность M , г/м ³
1	2,8	15	4,7
2	0,9	17	1,4
3	0,3	18	0,42

Выводы. Применение комплексированного метода для определения водности гидрометеорообразований, когда размеры и местоположение гидрометеорообразования определяются с помощью РЛС, а ослабление сигнала, прошедшего это же гидрометеорообразование в одном направлении, – с помощью сигналов геостационарного ИСЗ, позволяет оценить усредненную по трассе распространения радиоволны водность гидрометеорообразований. Этот метод представляет интерес особенно при определении водности в мощных ливневых образованиях, которые опасны для человека и дают большое ослабление спутниковых сигналов в K_u диапазоне [11].

Для определения тонкой структуры распределения водности и турбулентных процессов в гидрометеорообразованиях необходимо изучать радиолокационную отражаемость и спектры сигналов, отраженных от гидрометеорообразования и прошедших через него, что будет нами рассмотрено в следующих работах.

1. Особенности развития радиолокационных систем / Р. П. Быстров, Ю. В. Гуляев, В. А. Черепашин, А. В. Соколов // Радиотехника. – 2010. – № 9. – С. 71–90.
2. Мыценко И. М. Использование сигналов геостационарных ИСЗ для определения параметров гидрометеорообразований / И. М. Мыценко, Д. Д. Халамейда, С. И. Хоменко // Радиопизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиопизики и электрон. НАН Укрании. – Х., 2007. – 12, № 1. – С. 195–199.
3. Mytsenko I. M. Use of geostationary Satellite Radio Signals for Determining of Hydrometeor Parameters / I. M. Mytsenko, D. D. Khalameyda, S. I. Khomenko // Telecommunications and Radio Engineering. – 2008. – 67, N 1. – P. 87–95.
4. Мыценко И. М. Бистатистическая радиолокационная система с использованием радиосигналов геостационарных ИСЗ для определения параметров гидрометеорообразований /

- И. М. Мыценко, Д. Д. Халамейда // 19th Intern. Crimean Conf. «Microwave & Telecommunication Technology» (CrMiCo-2009): proc. – Sevastopol, 2009. – P. 328.
5. Бин Б. Р. Радиометеорология / Б. Р. Бин, Е. Дж. Даттон; пер. с англ. под ред. А. А. Семенова. – Л.: Гидрометеороиздат, 1971. – 362 с.
6. Давиак Р. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения / Р. Давиак, Д. Зрич; пер. с англ. под ред. А. А. Черникова. – Л.: Гидрометеороиздат, 1988. – 512 с.
7. Аппаратурно-программный комплекс для исследования радиолокационных отражений от метеорообразований / Е. Н. Белов, Т. А. Макулина, Г. А. Руднев и др. // Радиопизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиопизики и электрон. НАН Укрании. – Х., 2009. – 14, № 1. – С. 57–63.
8. Космические траекторные измерения. Радиотехнические методы измерений и математическая обработка данных / П. А. Агаджанов, Н. М. Барабанов, Н. И. Буренин и др. – М.: Сов. радио, 1969. – 504 с.
9. Красюк Н. П. Корабельная радиолокация и метеорология / Н. П. Красюк, В. Н. Розенберг. – Л.: Судостроение, 1970. – 328 с.
10. Атлас облаков. – Л.: Гидрометеороиздат, 1957. – 131 с.
11. Mytsenko I. Using of Radar and Geostationary Satellites Signals for Determination of Hydrometeors Water Content / I. Mytsenko, D. Khalameyda // 8th European Radar Conf.: proc. – Manchester, 2011. – P. 1024.

Рукопись поступила 07.07.2011.

I. M. Mytsenko, D. D. Khalameyda

USING OF RADAR AND GEOSTATIONARY SATELLITES SIGNALS FOR DETERMINATION OF HYDROMETEORS WATER CONTENT

A complex method for hydrometeors water content detecting is studied. The method uses data of size and location of hydrometeors given by radar and signal attenuation obtained by proposed apparatus which receives signals of a geostationary satellite. Theoretical grounds of the method and experimental results are presented. The method is effective for determination of water content of hazardous cumulonimbus clouds and powerful torrential rain clouds.

Key words: geostationary satellite, hydrometeor, water content, cloud.

I. М. Миценко, Д. Д. Халамейда

АКТИВНО-ПАСИВНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ВОДНОСТІ ГІДРОМЕТЕОУТВОРЕНЬ ПО РАДІОСИГНАЛАМ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ І ГЕОСТАЦІОНАРНИХ ШТУЧНИХ СУПУТНИКІВ ЗЕМЛІ

Розглянуто комплексований метод (активно-пассивний) для визначення середньої водності в гідрометео-утвореннях, де послаблення сигналу визначають за радіосигналами геостационарних штучних супутників Землі, а його розміри і місцезнаходження – за допомогою радіолокаційних станцій. Проведено теоретичне обґрунтування методу і результати його експериментальної перевірки. Цей метод особливо цікавий для визначення водності в потужних зливових утвореннях, які дають суттєве послаблення сигналів і небезпечні для людини.

Ключові слова: геостационарний супутник, гідрометеор, водність, хмара.