

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ МНОГОПУНКТОВЫХ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЯ

А.В. Захаров

Задача определения местоположения молниевых разрядов имеет огромный интерес, как для фундаментальной науки, так и для промышленности. В данных о грозовой активности заинтересованы метеорологические службы, авиакомпании, аэропорты, энергетические компании, операторы магистральных и местных электросетей, нефтяные и газовые компании, службы пожарной охраны лесных массивов, МЧС, страховые компании и космодромы.

Последние десятилетия основные разработки были направлены на отслеживание разрядов тип «облако-земля». Однако данный тип разрядов является лишь частью полной грозовой активности, которая включает в себя внутриоблачные и межоблачные разряды [1]. Отслеживание межоблачных и внутриоблачных молний необходимо по ряду причин. Во-

первых, количество межоблачных и внутриоблачных разрядов при типовой грозе от двух до десяти раз превосходит количество разрядов типа «облако-земля» [2]. Во-вторых, во время чрезвычайно сильных штормов частота внутриоблачных и межоблачных разрядов многократно превышает количество разрядов типа «облако-земля», в отдельных случаях разряды типа «облако-земля» не происходят вовсе [3, 4, 5]. Вследствие чего частота межоблачных и внутриоблачных молний является хорошим индикатором роста и силы грозы. Также исследования показали, что межоблачная грозовая активность наступает за 10 минут до первого разряда «облако-земля» [6], что дает возможность для раннего оповещения о грозовой опасности.

Существующие в настоящий момент на территории России разработки (Алвес, ВЕРЕЯ) способны отслеживать лишь разряды типа «облако-земля», поэтому разработка алгоритмов и методов для полного мониторинга грозовой активности в трехмерном пространстве является актуальной и перспективной.

Все современные системы пассивного определения местоположения гроз основаны на мониторинге электромагнитного поля Земли в сверхдлинноволновом или ультракоротковолновом (далее СДВ и УКВ соответственно) диапазонах. Основными методами определения положения грозовых разрядов являются разностно-дальномерный метод, пеленгационный и пеленгационно-дальномерный метод.

Разностно-дальномерный метод предполагает, что в каждом пункте наблюдения измеряется время регистрации сигнала от источника электромагнитного излучения [7].

Пусть в точке с координатами (x, y, z) в момент времени t произошло излучение, которое было зафиксировано в N пунктах наблюдения. При этом в точке наблюдения (x_i, y_i, z_i) время регистрации сигнала равно t_i .

Разность между моментом временем получения сигнала в i -м пункте наблюдения и моментом его излучения выражается следующим уравнением

$$t - t_i = \frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}}{c},$$

где c – скорость света.

Таким образом, измерения, зафиксированные в N пунктах наблюдения, образуют систему из N нелинейных уравнений с четырьмя неизвестными x, y, z, t . При $N=5$ система может быть приведена к линейному виду и решена аналитически, при $N=4$ решения может быть найдено численно.

Основной проблемой разностно-дальномерного метода является сложность идентификации и корреляции одного и того же импульса при обработке показаний от разных сенсоров. Стандартными средствами для борьбы с данной проблемой являются увеличение количества сенсоров и уменьшение расстояния между ними. Однако подобная избыточность увеличивает стоимость системы и требует дополнительных вычислительных

ресурсов. В связи, с чем актуальной задачей является разработка новых эффективных методов для идентификации и сопоставления импульсов.

Вторым наиболее распространенным способом определения положения разряда является интерферометрия [8].

Пусть два вибратора разнесены на расстояние D и расположены на одной высоте. Тогда разность фаз, между сигналами с вибраторов от волны длиной λ , будет равна:

$$\delta\varphi = 2\pi \frac{D}{\lambda} \sin \theta \cos \varphi.$$

Если установить вторую пару вибраторов ортогонально первой (азимут будет повернут на 90°), то по результатам можно составить систему уравнений следующего вида:

$$\begin{cases} \delta\varphi_1 = 2\pi \frac{D}{\lambda} \sin \theta \cos \varphi; \\ \delta\varphi_2 = 2\pi \frac{D}{\lambda} \cos \theta \cos \varphi. \end{cases}$$

Для определения пространственного положения будет достаточно двух пеленгаторов. Координаты разряда будут рассчитаны на основе триангуляции.

Основным преимуществом интерферометрии перед разностно-дальномерным методом является отсутствие необходимости в сопоставлении импульсов, так как ортогональные пары вибраторов находятся непосредственно рядом друг с другом. Однако вместе с тем, из-за близкого расположения данный метод можно применяться лишь в диапазоне УКВ, что накладывает высокие требования на область видимости.

В рамках проекта МНТЦ № 1822 А.В. Панюковым было предложено построить многопунктовую систему на основе автономных грозопеленгаторов (АГПД), которые позволяют определить значения обобщенных параметров молниевых разряда [7]. Предложенная методика получила название пеленгационно-дальномерный метод.

Пусть (x, y) – декартовы координаты молниевых разряда; (x_i, y_i) – декартовы координаты i -го пункта наблюдения, $i=1, 2, \dots, n$; (r_i, φ_i, u_i) – параметры молниевых разряда, измеренные в нем. Тогда имеет место система уравнений:

$$(x_i - x) \cos \varphi_i + (y_i - y) \sin \varphi_i = r_i u_i, i = 1, 2, \dots, n.$$

Если наблюдаемый диполь не является горизонтальным, то данная система уравнений имеет полный ранг и может быть решена методом наименьших квадратов.

Преимуществом пеленгационно-дальномерного метода является возможность оценки местоположения молниевых разряда на каждом пункте, что устраняет коллизии в идентификации соответствия зарегистрированных сигналов конкретным молниевым разрядам. Также в отличие от пеленгационного метода он работает в СДВ диапазоне, что снимает ограни-

чения, накладываемые на видимость. Однако имеющаяся на данный момент реализация уступает по точности существующим аналогам.

В силу отсутствия требований к зоне видимости наиболее перспективными для дальнейшего исследования являются разностно-дальномерный и пеленгационно-дальномерный метод работающие в СДВ диапазоне. В последующих работах планируется разработка новых эффективных методов для идентификации и сопоставления импульсов для разностно-дальномерного метода, совершенствование алгоритмов для повышения точности пеленгационно-дальномерного метода.

Библиографический список

1. Mazur, V., Shao, X.M., Krehbiel, P.R.: "Spider" lightning intracloud and positive cloud-to-ground flashes. *J. Geophys. Res.*, 103, p. 19811–19822, 1998.
2. Boccippio, D.J., Cummins, K.L., Christian, H.J., Goodman, S.J.: Combined satellite and surface-based estimation of the intracloud–cloud-to-ground lightning ratio over the continental United States. *Mon. Wea. Rev.* 129, p. 108–122, 2001.
3. MacGorman, D.R., Burgess, D.W., Mazur, V., Rust, W.D., Taylor, W.L., Johnson B.C.: Lightning rates relative to tornadic storm evolution on 22 May 1981. *J. Atmos. Sci.*, 46, p. 221–250, 1989.
4. Williams, E., Boldi, B., Matlin, A., Weber, M., Hodanish, S., Sharp, D., Goodman, S., Raghavan, R., Buechler, D.: The behavior of total lightning activity in severe Florida thunderstorms. *Atmos. Res.*, 51, p. 245–265, 1999.
5. Wiens, K.C., Rutledge, S.A., Tessendorf, S.A.: The 29 June 2000 supercell observed during STEPS. Part II: Lightning and charge structure. *J. Atmos. Sci.*, 62, p. 4151–4177, 2005.
6. MacGorman, D., Apostolakopoulos, I., Nierow, A., Murphy, M., Demetriades, N., Cramer, J., Krehbiel, P.: Improved timeliness of thunderstorm detection from mapping a larger fraction of lightning flashes. *Lightning Imaging Sensor Intl. Workshop*, 11–14 September, Huntsville, Ala., Univ. of Ala. Huntsville and National Space Science and Tech. Center, 2006.
7. Панюков, А.В. Системы пассивного мониторинга грозовой деятельности / А.В. Панюков, Д.В. Будуев, Д.Н. Малов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика, физика, химия». – 2003. – № 8(24). – С. 11–20.
8. Lojou, J.Y., M.J. Murphy, R.L. Holle, and N.W. Demetriades, "Nowcasting of Thunderstorms Using VHF Measurements", in: "Lightning: Principles, Instruments and Applications", Eds. H.-D. Betz, U. Schumann, and P. Laroche, ch. 11, Dordrecht (NL), Springer, p. 253–270, 2008.