

Подход к решению задачи поиска минимального числа датчиков молний и мест их расположения для обеспечения заданных требований вероятности обнаружения молниевых разрядов в целевой зоне

М.В. Пострыбайло

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.67
E-mail: m.postrybaylo@yandex.ru

Представлен подход к задаче поиска минимального числа пассивных радиотехнических датчиков молний и их оптимального расположения, обеспечивающего заданные требования к вероятности обнаружения молниевых разрядов в целевой зоне системы мониторинга грозовой активности. В основе подхода лежит расчёт максимального расстояния, на котором датчик фиксирует разряд с требуемой вероятностью, и последующее формирование регулярных геометрических решёток (треугольной или квадратной) в зависимости от используемого метода определения координат (пеленгационный или разностно-дальномерный). Для минимизации числа датчиков применяется метод глобальной оптимизации (имитация отжига), позволяющий подобрать параметры сдвига и поворота решётки относительно целевой зоны. Приведены результаты моделирования для целевых зон в виде прямоугольника и овала Кассини. Показано, что предложенный подход позволяет существенно сократить количество датчиков по сравнению с тривиальным покрытием, сохраняя требуемую вероятность обнаружения.

Ключевые слова: системы мониторинга грозовой активности, многопунктовые датчики молний, вероятность обнаружения, молниевые разряды, оптимальное размещение датчиков, геометрические решётки, метод имитации отжига, пеленгационный метод, разностно-дальномерный метод.

An approach to solving the problem of finding the minimum number of lightning sensors and their locations to meet the specified requirements for the probability of detecting lightning discharges in the target area

M.V. Postrybaylo

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67, Bolshaya Morskaya street, Saint-Petersburg, 190000
E-mail: m.postrybaylo@yandex.ru

An approach is presented to the problem of finding the minimum number of passive radio-technical lightning sensors and their optimal location, providing specified requirements for the probability of detecting lightning discharges in the target area of the lightning activity monitoring system. The approach is based on the calculation of the maximum distance at which the sensor detects a discharge with the required probability, and the subsequent formation of regular geometric grids (triangular or square), depending on the coordinate determination method used (direction finding or difference-rangefinder). To minimize the number of sensors, the global optimization method (simulated annealing) is used, which allows you to select the parameters of the lattice shift and rotation relative to the target zone. The simulation results for target zones in the form of a rectangle and an oval Cassini are presented. It is shown that the proposed approach makes it possible to significantly reduce the number of sensors compared to a trivial coating, while maintaining the required detection probability.

Keywords: lightning activity monitoring systems, multipoint lightning sensors, probability of detection, lightning discharges, optimal placement of sensors, geometric grids, simulated annealing method, direction finding method, difference-rangefinder method.

Введение

Грозовая активность является одним из опасных природных явлений, которое может нанести вред жизнедеятельности человека, объектам инфраструктуры и природной среде, а также сопровождаться другими опасными природными явлениями, например, штормами и ливнями [1-4].

Для получения своевременной и достоверной информации о грозовых разрядах наиболее часто используются пассивные радиотехнические датчики молний (ДМ), которые регистрируют электромагнитное излучение молниевых разрядов (МР) и позволяют определить направление, время регистрации удара молнии и другие параметры, необходимые в основном для получения координат, тока в канале молнии, определения типа разрядов [5]. Датчики молний могут реализовывать однопунктовое либо многопунктовое определение координат МР. Для реализации многопунктовых методов ДМ объединяются в систему.

Системы мониторинга грозовой активности (СМГА) состоят из датчиков и пункта сбора и обработки данных [6]. Информация, получаемая такими системами, используется для оповещения населения о надвигающемся опасном природном явлении, или принятия своевременных мер обеспечения безопасности объектов инфраструктуры и природной среды.

Для систем мониторинга грозовой активности ключевыми параметрами являются вероятность обнаружения (ВО) и точность местоопределения (ТМ) МР. При проектировании СМГА предъявляются требования ВО и ТМ для территории, на которой планируется реализовать мониторинг [6]. Одной из задач проектирования СМГА является поиск оптимального числа и мест расположения ДМ с целью обеспечения требуемых значений ВО и ТМ.

В данной работе предлагается подход к решению задачи поиска минимального числа датчиков и мест их расположения для обеспечения заданных требований вероятности обнаружения молниевых разрядов в целевой зоне СМГА.

Предлагаемый подход

Подход основывается на модели [7] оценки вероятности обнаружения молниевых разрядов, на вход которой передается функция плотности распределения вероятности приведенных оценок напряженности электрического поля, чувствительности ДМ и расстояния до МР.

В первую очередь, необходимо получить расстояние R , на котором ДМ фиксирует МР с заданной вероятностью. На основе R формируется окружность, внутри которой удовлетворяются требования ВО, где центром окружности является местоположение датчика, а радиусом является вычисленное расстояние. В случае применения предлагаемого подхода для однопунктовых систем, задача относится к области покрытия целевой зоны окружностями с равным радиусом и в данной работе не обсуждается.

Известно [6], что значение ВО для многопунктовых систем соответствует значению ВО датчика с наименьшим значением в локационной группе. Под локационной группой здесь понимается совокупность датчиков, измерения которых используются при определении координат МР. Следовательно, все ДМ должны обеспечить значение ВО в зоне мониторинга не ниже требуемого. Также необходимо учитывать периметр фигуры, углами которой являются места расположения датчиков, для формирования рабочих зон [6], т.к. внутри этого периметра локационные группы имеют повышенную ТМ координат МР, что также является важным параметром при проектировании СМГА.

Минимально-избыточное число датчиков в локационных группах зависит от используемого метода оценки координат молниевых разрядов и для пеленгационного

метода равно трем, а для разностно-дальномерного метода равно четырем [7]. Выпуклая гладкая фигура с наибольшим периметром – круг, поэтому чем ближе датчики к периметру окружности, тем больше потенциальная площадь зоны электромагнитной доступности (ЗЭД) локационной группы. В случае использования пеленгационного метода оценки координат молний датчики будут расположены в углах равностороннего треугольника с стороной равной рассчитанному радиусу R , а для разностно-дальномерного – в углах квадрата, со стороной равной $\frac{R}{\sqrt{2}}$, т.к. максимальное расстояние между датчиками должно соответствовать R .

На рис. 1 приведены зоны электромагнитной доступности локационных групп в составе трех, четырех и шести датчиков. Красными точками обозначены датчики молний, зеленая область – ЗЭД локационной группы, красная область – уникальная ЗЭД локационной группы, расположенной в центре, т.е. без пересечений с ЗЭД соседних локационных групп. Численные значения параметров ЗЭД приведены в таблице 1.

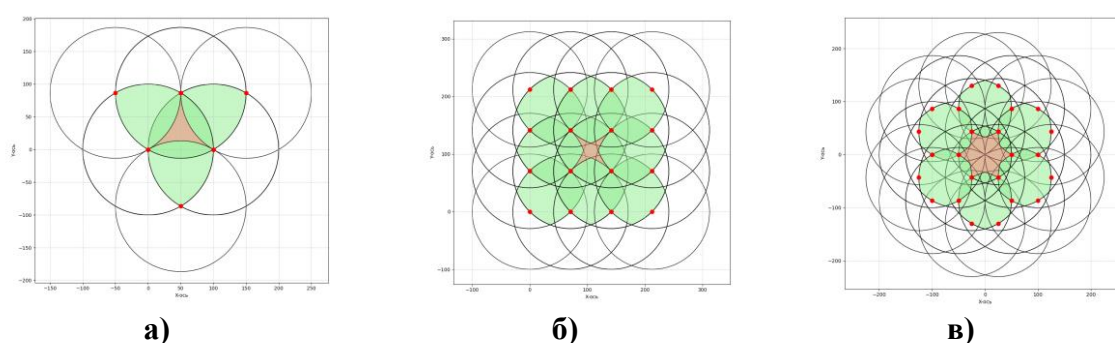


Рис. 1. Зоны электромагнитной доступности локационных групп в составе: а) – трех датчиков, б) – четырех датчиков, в) – шести датчиков

Таблица 1. Параметры ЗЭД при $R = 100$.

Тип решетки	Треугольная решетка	Квадратная решетка	Шестиугольная решетка
Площадь ЗЭД	7022.489	8705.764	8200.548
Площадь уникальной ЗЭД	1637.713	1294.236	4789.726

Датчики располагаются в узлах геометрической решетки треугольной, квадратной и шестиугольной формы таким образом, что максимальное расстояние между датчиками одной ячейки в решетке не превышает R . Несмотря на то, что у шестиугольной формы расположения датчиков получается наибольшая область без пересечений с зонами электромагнитной доступности соседних локационных групп плотность датчиков выше в два либо полтора раза в сравнении с треугольным и квадратным расположением датчиков. Это позволяет сделать вывод, что оптимальным при формировании решетки, является использование минимально-избыточного числа датчиков в локационных группах в соответствии с методом определения координат.

При отсутствии ограничений на места расположения датчиков одним из возможных решений может быть применение геометрических решеток, т.е. предлагается формировать решетки с шагом R для треугольных и с шагом $\frac{R}{\sqrt{2}}$ для квадратных локационных групп, размещая целевую зону внутри решетки.

Расположение целевой зоны внутри решетки не гарантирует минимальное число датчиков в связи с неоптимальным сдвигом и смещением решетки. Для поиска решения

необходимо перебрать возможные смещения с учетом периодичности решетки, задача является NP-трудной, поэтому в подходе предлагается использовать методы оптимизации, используемые в аналогичных задачах [8]. При применении методов глобальной оптимизации необходимо учитывать пересечение целевой зоны с зонами наблюдения локационных групп, что позволит найти оптимальное решение.

В данной работе применен метод имитации отжига. Исходные параметры сдвига и поворота решетки заданы случайно по равномерному распределению с учетом периодичности решетки. Целевая функция подсчитывает число используемых датчиков на основе пересечений целевой зоны с уникальными ЗЭД локационных групп. Функция генерации новых параметров сдвига и поворота решетки является адаптивной, таким образом, что изменяется либо один, либо все параметры сразу.

Таким образом, предлагается рассчитать расстояние, на котором датчик обеспечивает заданное значение вероятности обнаружения R , выбрать пеленгационный или разностно-дальномерный метод оценки координат молниевых разрядов, сформировать треугольную или квадратную решетку с шагом в соответствии с выбранным методом, расположить целевую зону в пределах сформированной решетки и применить метод глобальной оптимизации, для получения параметров сдвига и поворота решетки обеспечивающих заданную вероятность обнаружения в целевой зоне минимальным числом датчиков.

В данной работе подход реализован с использованием программы на языке программирования python, библиотеки для управления и анализа геометрических объектов в декартовой системе координат shapely, а также собственной реализации функций генерации геометрических решеток, метода имитации отжига, классов локационных групп для формирования ЗЭД и датчиков молний, хранящих данные о месте расположения и расстоянии чувствительности R . Исходными данными программы являются метод определения координат системой мониторинга грозовой активности, количество узлов решетки по вертикали и горизонтали, а также расстояние R и параметры целевой зоны. На основе выбранного метода определения координат и расстояния R , выбирается тип решетки и вычисляется шаг между её узлами. Полученные данные передаются на вход функции генерации решетки, в результате выполнения которой возвращаются координаты каждого узла решетки. Каждая ячейка созданной решетки образует локационную группу из трех или четырех датчиков в зависимости от выбранного метода определения координат, затем формируются уникальные ЗЭД каждой локационной группы в формате полигонов. Целевая функция метода имитации отжига определяет какие уникальные ЗЭД пересекаются с полигоном целевой зоны, на основе чего подсчитывает количество датчиков.

Результаты моделирования

Моделирование осуществлялось на плоскости, использовались два типа целевых зон, в виде прямоугольника (длина – 500 км, высота – 350 км) и овала Кассини (половина расстояния между фокусами $b = 250$ км, корень из константы произведения расстояний $a = b * 0.95$), расстояние обнаружения молниевых разрядов равно 50 км, результаты моделирования представлены на рис. 2 и рис. 3. Синими зонами обозначены используемые локационные группы, участвующие в подсчете числа датчиков молний, красной областью обозначена целевая зона, зелеными областями обозначены уникальные ЗЭД локационных групп, полученных после формирования решетки. Вычисленные параметры сдвига и поворота решеток приведены в таблице 2.

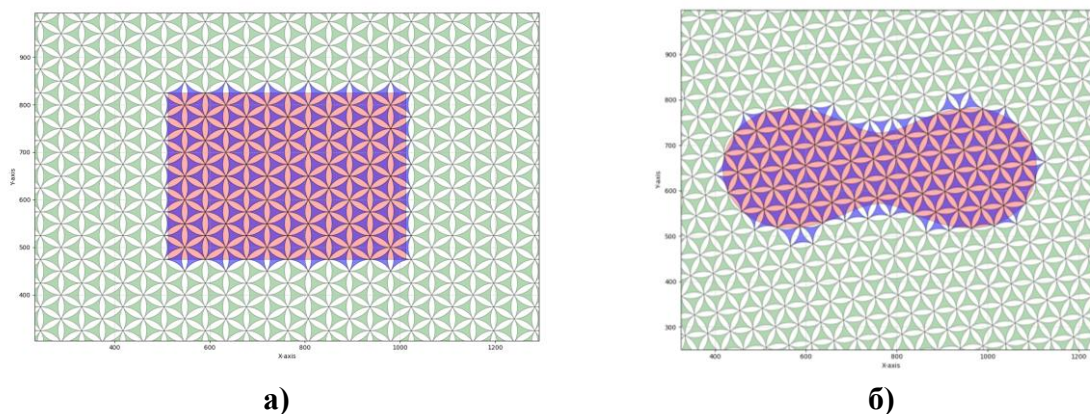


Рис. 2. Результат работы программы с треугольной решеткой датчиков для целевой зоны: а) - прямоугольной формы, б) – формы овала Кассини

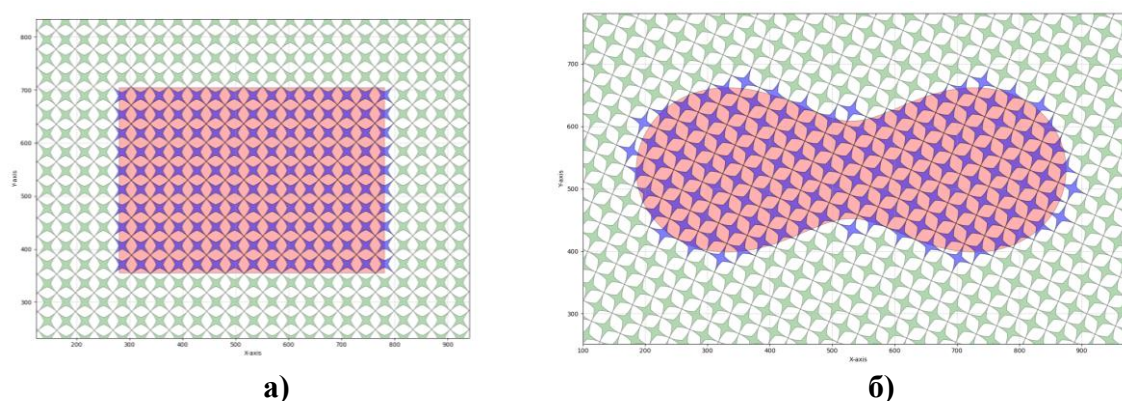


Рис. 3. Результат работы программы с квадратной решеткой датчиков для целевой зоны: а) - прямоугольной формы, б) – формы овала Кассини

Таблица 2. Вычисленные параметры сдвига и поворота решеток.

Тип решетки	Треугольная решетка		Квадратная решетка	
Форма целевой зоны	Прямоугольник	Овал Кассини	Прямоугольник	Овал Кассини
Лучший угол, °	30.00	5.62	0.15	21.72
Лучший сдвиг X, км	33.6125	23.0005	20.5055	4.2661
Лучший сдвиг Y, км	43.7337	24.0563	35.6427	39.4477
Минимальное кол-во датчиков	110	98	176	170
Кол-во датчиков при случайных параметрах	130	114	214	192
Уменьшение числа датчиков, %	15.38	14.04	17.76	11.46

Выводы

Предложен подход к решению задачи поиска минимального числа датчиков и мест их расположения для обеспечения заданных требований вероятности обнаружения молниевых разрядов в целевой зоне СМГА. Подход основывается на использовании геометрической решетки, в узлах которой располагаются ДМ, и применения метода глобальной оптимизации для поиска оптимального решения. Результатом применения

подхода являются параметры сдвига и поворота геометрической решетки, а также количество датчиков используемых для удовлетворения требований ВО в целевой зоне.

Использование предлагаемого подхода при проектировании СМГА позволяет снизить число датчиков в среднем на 14.7%.

Литература

1. Холопцев А.В., Седов Д.В. Климатические нормы повторяемости гроз над городами Сибири для месяцев пожароопасного сезона при современном потеплении климата // Сибирский пожарно-спасательный вестник. - 2024. - № 1 (32). - С. 169-182.
2. Гайворонский А. Актуальные проблемы молниезащиты ВЛ110-500 кВ // Новости электротехники. 2019. №1(115). С. 18-23
3. Иванова Г.А., Иванов В.А., Мусохранова А.В., Онучин А.А. Лесные пожары и причины их возникновения на территории Средней Сибири // Сибирский лесной журнал. 2023. № 6. С. 6-16.
4. Закирова Л.З. Влияние экстремальных метеорологических условий на полет вертолета // Вестник Академии гражданской авиации. 2021. № 3 (22). С. 38-45.
5. Готюр И.А., Коровин Е.А., Чернышев С.В., Щукин Г.Г., Юсупов И.Е. Экспериментальная сеть датчиков мониторинга грозовой активности. Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2022. № S685. С. 66-74.
6. Пострыбайло М.В. Метод моделирования систем мониторинга грозовой активности / М.В. Пострыбайло, Т.М. Татарникова // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2024. – Т. 18, № 11. – С. 14-21.
7. Пострыбайло, М.В. Модельные оценки параметров пассивных радиотехнических систем мониторинга грозовой активности / М.В. Пострыбайло, Т.М. Татарникова // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2024. – Т. 67, № 4. – С. 368-374.
8. Лебедев, П.Д. Алгоритмы построения субоптимальных покрытий плоских фигур кругами в классах регулярных решеток / П.Д. Лебедев, О.А. Кувшинов // Известия Института математики и информатики Удмуртского государственного университета. – 2023. – Т. 61. – С. 76-93.