

УДК 528.8.044.6; 528.856; 528.021.7

Расчет координат объекта лидарного зондирования и его картографическое отображение

Ш. Чжан[✉], А.В. Климкин, Г.П. Коханенко,
Т.Е. Кураева, К.Ю. Осипов*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 21.04.2023 г.;
после доработки 19.06.2023 г.;
принята к печати 21.06.2023 г.

Лидар как важное средство исследования атмосферного аэрозоля широко используется при изучении распространения атмосферных аэрозольных загрязнений. При проведении экологического мониторинга и тем более при использовании для этой цели мобильного лидара важно иметь информацию не только о наличии загрязнений, но и о динамике их распространения, о пространственных координатах их источника. Предложен метод расчета координат объекта исследования исходя из координат лидара, направления зондирования и расстояния до объекта. Представлены программный модуль расчета координат и пример его применения при разработке вспомогательных лидарных систем.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, лидар, расчет координат, картирование; remote sensing, lidar, calculation of coordinates, mapping.

Введение

С ускорением урбанизации и индустриализации все большее значение приобретает проблема нарушения экологического баланса в окружающей среде. В частности, загрязнение атмосферы серьезно сказывается на повседневной жизни и физическом здоровье людей [1, 2], что делает наблюдение и исследование атмосферных загрязнений одной из актуальных задач.

Для контроля распространения промышленных аэрозольных загрязнений необходимо знать такие параметры, как пространственные (трехмерные) координаты их источника, направление и скорость их распространения. При проведении метеорологических измерений с использованием лидарных комплексов или при дистанционном оптическом мониторинге потенциально опасных объектов может возникнуть необходимость постоянного контроля ситуации. Для обеспечения такого контроля лидарными методами целесообразно протоколировать результаты измерений с сохранением данных, в том числе о координатах места проведения измерений, направлении зондирования и расстоянии до исследуемого объекта, что позволяет впоследствии или в режиме реального времени картировать метеоданные или распространение загрязнений.

С необходимостью наложения результатов измерений на карты местности исследователи, использующие в работе лидарные методы, сталкиваются со дня возникновения этих методов, но и на момент написания настоящей статьи авторам не известны системы автоматической обработки данных, позволяющие в режиме реального времени накладывать результаты лидарных измерений атмосферных загрязнений на карту местности или создавать их трехмерную модель. Для этого (см., например, [3–10]) проводится цикл лидарных измерений со сканированием по направлению зондирования; по результатам зондирования строится цветовая карта; с помощью графического редактора изображение цветовой карты трансформируется в соответствии с углами сектора сканирования и накладывается на карту местности. Такие методы картирования приводят к задержке в обработке данных, особенно если речь идет о построении трехмерных моделей, что снижает эффективность, увеличивает объем работы, а это критично при проведении измерений с использованием мобильных лидарных комплексов.

Основная цель работы — разработка метода автоматического картографического отображения и результатов лидарных измерений в режиме реального времени и создание программных решений для реализации этого метода.

1. Расчет координат

Для решения задачи автоматизации протоколирования лидарных измерений авторами разработана

*Шо Чжан (shuo9403@qq.com); Антон Владимирович Климкин (anton@iao.ru); Григорий Павлович Коханенко (kokh@iao.ru); Татьяна Еремеевна Кураева (kte@iao.ru); Константин Юрьевич Осипов (osipov@iao.ru).

система обработки данных, включающая в себя следующие функции: 1) сбор данных лидарного зондирования и данных позиционирования (координаты точки расположения лидара, азимутов и углов возвышения трассы зондирования) в реальном времени; 2) интеграция данных позиционирования и зондирования (время задержки лидарного сигнала) и получение координат зондируемого объекта; 3) картирование и визуализация данных о пространственном распределении аэрозоля и динамике его распространения.

Одной из функций системы является определение координат объекта зондирования. Координаты могут быть рассчитаны из полученных от датчиков лидара координат его места положения, азимута и угла возвышения направления его зондирования, а также расстояния до объекта. Абстрагируясь от конкретной задачи, в декартовой системе координат координаты целевой точки можно получить простым вычислением из имеющихся двух углов и расстояния до объекта. Но в действительности Земля как огромный геоид (экваториальный радиус как большая полуось и полярный радиус как малая полуось) является трехмерной структурой и при многокилометровых дистанциях зондирования ее нельзя рассматривать как плоскость. Так, при горизонтальном зондировании на 50 км ошибка в координатах составит более 80 м и с увеличением расстояния будет примерно квадратично нарастать.

Для корректного пересчета координат объекта может быть применен метод Винченци [11], который является высокоточным итерационным алгоритмом. В нем используется классическое решение Лежандра, Бесселя и Хельмерта на основе вспомогательной сферы. А.-М. Лежандр показал, что эллипс в геодезии можно точно соотносить с большим кругом на вспомогательной сфере, сопоставив географическую широту с широтой на сфере. При этом долгота и расстояние на эллипсоиде переводятся через долготу на сфере и длину дуги с помощью интегралов. Ф. Бессель и Ф. Хельмерт определили быстро сходящиеся ряды для этих интегралов, что позволяет рассчитать геодезические координаты с необходимой точностью.

Кратко метод заключается в следующем. Имея начальную точку (φ_1, λ_1) (φ_1 – широта расположения лидара, λ_1 – его долгота), начальный азимут α_1 и расстояние S до объекта, необходимо найти конечную точку (φ_2, λ_2) (координаты объекта) и пересчитать азимут α_2 в проекции на плоскость карты.

Координаты (φ_2, λ_2) вычисляем по формулам

$$\varphi_2 = \arctan\left(\frac{\sin U_1 \cos \sigma + \cos U_1 \sin \sigma \cos \alpha_1}{(1-f)\sqrt{\sin^2 \alpha + (\sin U_1 \sin \sigma - \cos U_1 \cos \sigma \cos \alpha_1)^2}}\right), \quad (1)$$

где U_1 и U_2 – широты на вспомогательной сфере начального положения точки и положения точки

после пересчета; σ – угловое расстояние между точками; $f = (a - b)/a$ – сплюснутость земли; α – прямой геодезический азимут на экваторе; и

$$\lambda_2 = \lambda_1 + L \quad (2)$$

где

$$L = M - (1 - C)f \sin \alpha \times \left\{ \sigma + C \sin \sigma \left[\cos 2\sigma_m + C \cos \sigma (2 \cos^2 2\sigma_m - 1) \right] \right\}$$

– разница долгот двух точек, σ_m – угловое расстояние между срединной линией и экватором,

$$M = \arctan\left(\frac{\sin \sigma \sin \alpha_1}{\cos U_1 \cos \sigma - \sin U_1 \sin \sigma \sin \alpha_1}\right)$$

– расстояние на вспомогательной сфере между начальным положением точки и положением точки после пересчета,

$$C = \frac{f}{16} \cos^2 \alpha \left[f(4 - 3 \cos^2 \alpha) + 4 \right].$$

Пересчет прямого азимута проводится по формуле

$$\alpha_2 = \arctan\left(\frac{-\sin \alpha}{\sin U_1 \sin \sigma - \cos U_1 \cos \sigma \cos \alpha_1}\right). \quad (3)$$

«Прямой азимут» (forward azimuth) – это азимут от начальной точки P_1 до конечной точки P_2 ; «обратный азимут» (reverse azimuth) – от конечной точки P_2 до начальной точки P_1 . На плоскости возможны четыре случая отношения прямого α и обратного β азимутов (рис. 1, цв. вкладка), которое в общем случае описывается отношением

$$|\alpha - \beta| = 180^\circ \quad (\alpha, \beta \in [0^\circ; 360^\circ]).$$

По умолчанию метод Винченци обеспечивает расчет координат в соответствии с международной системой геодезических параметров Земли WGS-84 [12, 13]. В ходе работы над программой картографического отображения лидарных данных нами реализована подпрограмма на языке Python, обеспечивающая расчет по данному методу. Для получения координат объекта в автоматическом или ручном режиме вводятся координаты GPS начальной точки, прямой азимут и расстояние до объекта. В результате подпрограмма выдает данные в виде географических координат конечной точки.

2. Картирование

Задача реконструкции объемных моделей из лидарных данных при зондировании поверхностей уже успешно решалась [14, 15] и была связана с расчетами для единственной точки для каждого направления зондирования. При лидарном зондировании атмосферы для каждого направления зондирования при сканировании необходимо регистрировать сигналы по всей трассе, что на порядки

увеличивает объем хранимых, обрабатываемых и представляемых пользователю в режиме реального времени данных. При расчете положения пространственного распределенного объекта, такого как шлейф дыма заводской трубы или облако, мы получаем массив координат, называемый облаком точек, с шагом, равным пространственному разрешению лидара и шагу сканатора лидара при горизонтальном сканировании. Так, при сканировании сектора в 90° с шагом $0,5'$ и пространственным разрешением 6 м на дистанции от 1500 до 15000 м от лидара будет получен массив из данных о более чем $1,5 \times 10^6$ точках.

На основе полученного массива координат точек может быть создан картографический слой с помощью, например, открытого программного обеспечения Geoserver [16] или специально разработанного программного обеспечения с целью последующего отображения слоя. Для визуализации могут использоваться как настольные приложения, такие как QGIS [17], так и веб-клиенты ГИС, например OpenLayers [18], или специально разработанные программы. В качестве картографической основы для визуализации используются стандартные карты Google Maps, Bing или Open Street Map.

В рамках настоящей работы для этой цели разработана подпрограмма на языке программирования Python. В качестве картографической основы использованы карты Open Street Map (OSM). В подпрограмме наложение нового картографического слоя реализуется через библиотеку Folium (рис. 2), которая предназначена для визуализации географической информации в JavaScript и Python. Выполняет ряд последовательных действий: из SM «вызывается» основа – базовая карта; создается новый слой – сначала в виде точек с определенными координатами, затем поочередно каждой точке присваивается определенное свойство, например цветовой код, в результате чего создается цифровой аналог цветовой карты лидарных данных; в завершении слой накладывается на базовую карту.

Цветовой шкале соответствует регистрируемая фотоприемником лидара интенсивность сигнала обратного рассеяния. Разработанная подпрограмма обеспечивает перерасчет десятичного значения интенсивности, получаемого от АЦП, в шестнадцатеричный цветовой код.

Пример работы программы для лидарных данных аэрозольного рассеяния показан на рис. 3 (цветовая вкладка).

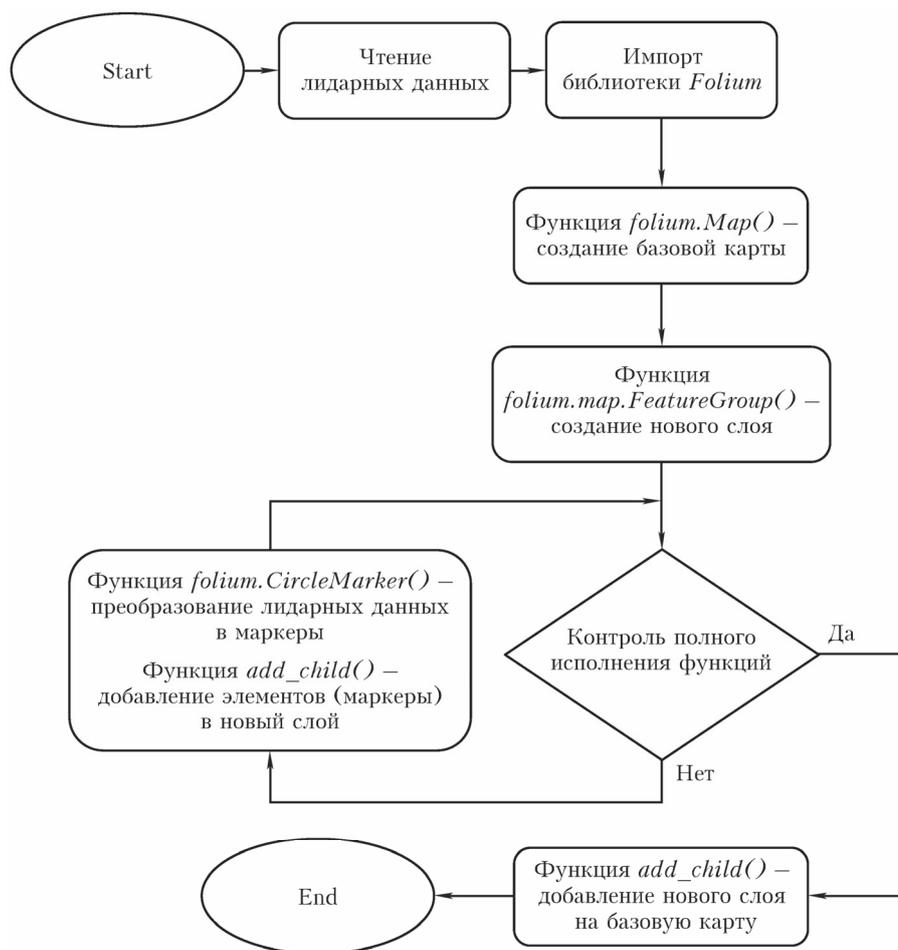


Рис. 2. Схема работы подпрограммы картирования лидарных данных

Заключение

В настоящей статье представлен метод расчета координат точек дискретизации на пути зондирования сканирующего лидара и метод визуализации данных. Метод расчета координат основан на геодезическом методе — методе формулы Винченци: с помощью GPS-приемника и электронного компаса определяются широта, долгота лидара и направление зондирования и с учетом расстояния между точкой дискретизации и лидаром можно рассчитать координаты точки. На этапе визуализации через вызов библиотеки Folium вводится информация о координатах и зависящий от интенсивности лидарного эхосигнала цвет точек дискретизации. Таким образом создается новый картографический слой, который накладывается на базовую карту, что позволяет визуализировать получаемые лидарные данные. Разработанные подпрограммы совместно с датчиками позиционирования и углов наклона позволяют создать аппаратно-программный модуль, включаемый в лидарные системы, для картирования данных и представления результатов измерений в реальном времени с использованием дружественного пользовательского интерфейса.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания ИОА СО РАН (проект № 121031500340-6 в части разработки алгоритма расчета координат и разработки алгоритма использования online карт и проект № 121031500342-0 в части получения лидарных данных).

Список литературы

1. Wang Yingjian, Hu Shunxing, Zhou Jun, Hu Linghuan. Measurement of Atmospheric Parameters by Lidar. Beijing: Science Press, 2014. 400 p.
2. Northend C.A., Honey R.C., Evans W.E. Laser radar (Lidar) for meteorological observations // Rev. Sci. Instrum. 1966. V. 37, N 4. P. 393–400.
3. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей // под ред. В.Е. Зуев, Б.В. Кауль, И.В. Самохвалов. Новосибирск: Наука, 1986. 188 с.
4. Kokhanenko G.P., Balin Y.S., Klemasheva M.G., Nasonov S.V., Novoselov M.M., Penner I.E., Samoilo-va S.V., Nasonov S.V., Novoselov M.M., Penner I.E., Samoilo-va S.V. Scanning polarization lidar LOSA-M3: Opportunity for research of crystalline particle orientation in the ice clouds // Atmos. Meas. Technol. 2020. V. 13, N 3. P. 1113–1127.
5. Stoyanov D., Nedkov I., Groudeva V., Cherkezova-Zheleva Z., Grigorov I., Kolarov G., Iliev M., Ilieva R., Paneva D., Ghelev C. Long-distance LIDAR mapping schematic for fast monitoring of bioaerosol pollution over large city areas // Atmos. Air Pollut. Monit. 2019. DOI: 10.5772/intechopen.87031.
6. Scollo S., Boselli A., Coltelli M., Leto G., Pisani G., Spinelli N., Wang X. Monitoring Etna volcanic plumes using a scanning LiDAR // Bull. Volcanol. 2012. V. 74. P. 2383–2395.
7. Innocenti F., Robinson R., Gardiner T., Finlayson A., Connor A. Differential absorption lidar (DIAL) measurements of landfill methane emissions // Remote Sens. 2017. V. 9, N 9. P. 953.
8. Lv Lihui, Liu Wenqing, Zhang Tianshu, Dong Yunshu, Chen Zhenyi, Fan Guangyang, Liu Yang, Xiang Yan. Characteristics of boundary layer height in Jing-Jin-Ji area based on lidar // Laser Optoelectron. Progress. 2017. V. 54, N 1. P. 50–56.
9. Liu Zhi. Studies on the Air Pollution Detection by Employing a Scanning Scheimpflug Lidar. Dalian: Dalian University of Technology, 2020. 51 p.
10. Kokhanenko G.P., Balin Y.S., Klimkin A.V., Novoselov M.M., Zhang Shuo. Mapping aerosol pollution over the city using a scanning lidar // Proc. SPIE. 2021. V. 11916. P. 839–842.
11. Vincenty T. Direct and inverse solutions of geodesics on the ellipsoid with application of nested equations // Surv. Rev. 1975. V. 23, N 176. P. 88–93.
12. Slater J.A., Malys S. WGS 84 — past, present, and future // Advances in Positioning and Reference Frames: IAG Scientific Assembly Rio de Janeiro, Brazil, September 3–9, 1997. Berlin, Heidelberg: Springer, 1998. P. 1–7.
13. Malys S., Wong R., True S.A. The WGS 84 terrestrial reference frame in 2016 // Eleventh Meeting of the International Committee on GNSS (ICG-11), 2016. P. 6–11.
14. Блог компании IT-центр МАИ. Осваиваем анализ лидарных данных и измеряем дорожные знаки. URL: <https://habr.com/ru/company/itmai/blog/549716/> (дата обращения: 28.02.2023).
15. Remondino F. From point cloud to surface: The modeling and visualization problem // ISPRS Archives. 2003. DOI: 10.3929/ethz-a-004655782.
16. Картографический сервис Geoserver [Б. м.], 2023. URL: <https://geoserver.org/> (дата обращения: 28.02.2023).
17. Географическая информационная система QGIS [Б. м.], 2023. URL: <https://www.qgis.org/> (дата обращения: 28.02.2023).
18. Географическая информационная система OpenLayers [Б. м.], 2023. URL: <https://openlayers.org/> (дата обращения: 28.02.2023).

S. Zhang, A.V. Klimkin, G.P. Kokhanenko, T.E. Kuraeva, K.Y. Osipov. **Calculation of the coordinates of a lidar sensing object and its mapping.**

Lidar is an important tool for studying atmospheric aerosol; it is widely used in studying the propagation of aerosol pollution in the atmosphere. During environmental monitoring, especially with a mobile lidar, it is important not only to detect a pollutant, but also to determine the spatial coordinates of its source and the propagation dynamics. In the work, we suggest a technique for calculating the coordinates of an object under study from the lidar coordinates, sensing direction, and the distance between the lidar and the object. The software implementation of the technique and an example of its application in the design of an auxiliary lidar system are described.

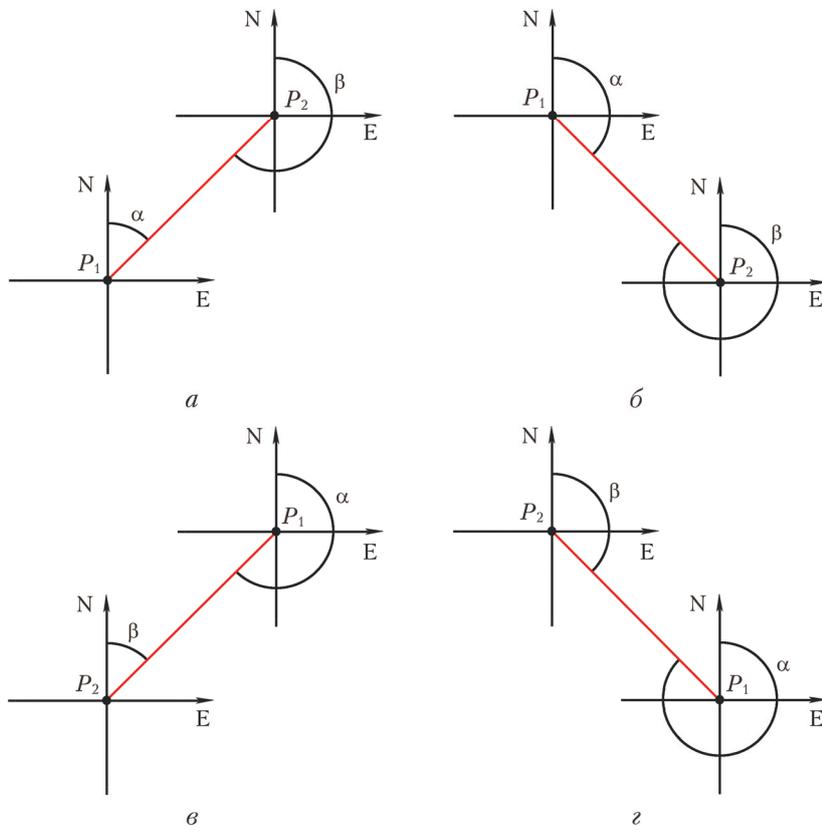


Рис. 1. Различные случаи определения азимута: P_1 – начальная точка; P_2 – конечная точка; α – прямой азимут; β – обратный азимут: $a - 0 < \alpha \leq 90^\circ$; $б - 90 < \alpha \leq 180^\circ$; $в - 180 < \alpha \leq 270^\circ$; $г - 270 < \alpha \leq 360^\circ$

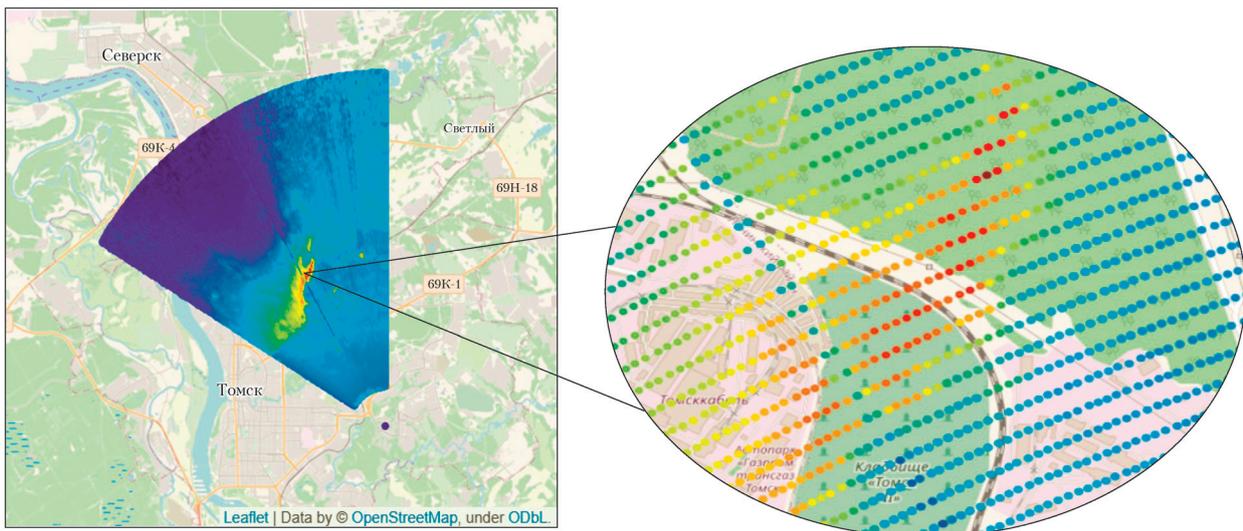


Рис. 3. Результат наложения лидарных данных на карту ГИС системы Open Street Map