

УДК 528.061:522

Исследования возможности определения вертикальной рефракции турбулентным методом

Д.В. Дементьев^{1, 2*}

¹Группа Компаний «Геодезия и Строительство»
125363, г. Москва, проезд Строительный, 1

²Московский государственный университет геодезии и картографии
105064, г. Москва, пер. Гороховский, 4, корп. 1

Поступила в редакцию 20.09.2019 г.

В настоящее время только один классический метод учета рефракции в периоды спокойных изображений позволяет в значительной степени компенсировать ее влияние на результаты геодезических измерений. Однако период спокойных изображений очень мал, и его временные границы крайне сложно оценить. Поэтому, несмотря на многолетние усилия, проблема учета рефракции в геодезических измерениях до сих пор не решена. Благодаря проведенным исследованиям турбулентного метода получена точность определения рефракции, соответствующая инструментальной точности используемого прибора, даже в условиях неустойчивой температурной стратификации атмосферы, когда наблюдаются значительные флуктуации угла прихода пучка лазерного излучения.

Исследования выполнены группой компаний «Геодезия и Строительство» совместно с кафедрой геодезии МИИГАиК.

Ключевые слова: рефракция, турбулентные методы, флуктуации угла прихода, искажения световой волны, температурная стратификация атмосферы; *refraction, turbulent methods, arrival angle fluctuations, light wave distortions, temperature stratification of the atmosphere.*

Введение

Проблеме определения рефракции в приземном слое атмосферы посвящено много работ [1–9], однако до настоящего времени не создано ни одного эффективного метода определения вертикальной рефракции в приземном слое атмосферы. Сложилось устойчивое мнение, что «...несмотря на многолетние усилия, проблема учета рефракции в геодезических измерениях не получила даже удовлетворительного практического решения» [10]. Например, в [11] отмечается: «Можно также восхищаться, с какой настойчивостью геодезисты изыскивали методы учета рефракции. Предложенных формул не меньше, чем формул поправок на рефракцию. Однако задача учета рефракции не нашла окончательного разрешения».

Постановка задачи исследований.

Основы турбулентного метода определения рефракции

Практически все современные методы определения угла вертикальной рефракции основаны на теории, созданной Ньютоном. Однако формулы Ньютона выведены для статически устойчивой атмосферы,

поэтому все классические методы определения рефракции не совсем корректны. На это обратил внимание А.А. Изотов еще в 1975 г. [12]. Он отмечал, что «полное освобождение геодезических наблюдений от влияния турбулентных и флуктуационных процессов в атмосфере возможно только путем непосредственного измерения угла рефракции в момент наблюдений».

Несколько раньше были предложены методы определения рефракции на основе измерения искажений световой волны, прошедшей трассу [13, 14]. В этих работах представлена теория определения вертикальной рефракции, принципиально отличающаяся от классической и основанная на измерении статистических характеристик электромагнитной волны Ψ , а также температуры T и давления P на трассе при выполнении наблюдений.

Как показали исследования [14, 15], основным параметром, определяющим величину угла рефракции в момент измерений, является структурная характеристика показателя преломления воздуха C_n . Значительный вклад в изучение распространения электромагнитных и звуковых волн и разработку эффективных методов определения C_n внесли исследования, выполненные в Институте физики атмосферы АН СССР и в Институте оптики атмосферы СО АН СССР [16–19]. Эти работы – основополагающие для определения C_n при исследованиях рефракции турбулентным методом.

* Дмитрий Викторович Дементьев (dementiev@yandex.ru).

Методы определения C_n в атмосфере можно разделить на две группы: метеорологические и дистанционные. Дистанционные (оптические) методы оперативнее, точнее и проще, чем метеорологические [20].

Согласно [14, 15] при определении рефракции целесообразно использовать дистанционный метод определения C_n , основанный на измерении флуктуаций угла прихода пучка лазерного излучения. Сложность широкого внедрения этого метода в практику геодезических работ заключается в первую очередь в том, что геодезические приборы с автоматическим наведением на визирную цель начали серийно выпускаться только в XXI в.; они очень дорогие, в РФ не производятся и приобретены лишь несколькими фирмами. Дальность действия таких приборов – 800 м.

Необходимо отметить, что в России и за рубежом большое внимание уделялось исследованию визуальных турбулентных методов определения рефракции по амплитуде колебаний визирной цели и размытию изображения регулярной миры. Эти методы подкупают своей простотой и отсутствием необходимости привлекать дополнительную аппаратуру, хотя исследования их точности продолжают с конца 1970-х гг. по настоящее время [21]. Например, метод определения рефракции по амплитуде колебаний цели, по мнению некоторых авторов, «является наиболее точным из всех существующих и к тому же перспективным» [21–24]. Однако его серьезный недостаток в том, что «определение рефракции по колебаниям визирных целей носит субъективный характер из-за целого ряда причин: опытность наблюдателя, не одновременность затухания колебаний по всем направлениям и т.п.» [25]. Это в значительной степени затрудняет использование указанного метода. То же самое можно сказать и о методе определения рефракции по размытию изображения миры, который интенсивно разрабатывался в Нижегородском инженерно-строительном институте [3].

Основной причиной сложности внедрения упомянутых методов является проблема обеспечения высокой точности визуального отсчитывания амплитуды колебаний визирной цели и оценки размытия миры. С созданием высокоточных электронных тахеометров с автоматическим наведением на визирную цель outlook [20] появилась возможность определения рефракции по флуктуациям угла прихода. Например, электронный тахеометр Trimble S9 1.0" Robotic, DR HP, Long Range Fine Lock [20] обеспечивает инструментальную точность измерения вертикальных углов 1" с частотой 2,5 Гц, а также практически исключает субъективные ошибки наведения на визирную цель, так как поиск цели и наведение выполняются автоматически.

Исследование турбулентного метода определения рефракции

Для исследования вертикальной рефракции на полигоне фирмы «Геодезия и Строительство» (ГиС)

в Москве в районе Северное Тушино была выбрана горизонтальная трасса длиной $L = 625,2$ м, проходящая вдоль Сходненского канала над однородной (травянистой) подстилающей поверхностью [20]. Высота визирного луча составляла $\sim 1,70$ м. Наблюдения выполнялись днем 13 августа 2018 г. последовательно на двух трассах: сначала измерялись зенитные углы на длинной трассе ($L = 625,2$ м), затем – на более короткой, $L = 564,0$ м, которая располагалась практически в одном створе с первой. Во время наблюдений температура воздуха колебалась от 18 до 22 °С, давление было 1001 мбар, ветер северо-западный со скоростью 5 м/с. Отметки точек трасс, полученные из геометрического и тригонометрического нивелирования, использовались для классического определения «истинного» значения рефракции. Углы вертикальной рефракции для каждой трассы определялись по разности между «истинным» зенитным расстоянием z_0 и измеренным с помощью роботизированного тахеометра зенитным расстоянием z_n ; z_0 вычислялись на основе данных геометрического нивелирования II класса точек полигона, на которые устанавливались электронный тахеометр и отражатель.

Для вычисления угла вертикальной рефракции r_d турбулентным (динамическим) методом измерялись флуктуации угла прихода излучения Δ , по которым рассчитывалась усредненная структурная характеристика показателя преломления воздуха \bar{C}_n (см $^{-1/3}$) согласно формуле [16, 18]:

$$\bar{C}_n^2 = 0,088\Delta_{(OTP)}^2 \varphi(\alpha_R)^{-1} L^{-1} (2R)^{1/3}, \quad (1)$$

где $\Delta_{(OTP)}$ – угол прихода отраженной световой волны; R – радиус объектива приемника; $\varphi(\alpha_R)$ – числовая функция, позволяющая определить дисперсию дрожания с учетом усредняющего действия приемного объектива и зависящая от длины трассы [16].

Все параметры, входящие в формулу (1), практически постоянны в момент измерений на конкретной трассе, кроме $\Delta_{(OTP)}$, непрерывно изменяющегося вследствие флуктуаций показателя преломления воздуха в турбулентной атмосфере. Когда для определения величины рефракции по флуктуациям угла прихода излучения используется электронный тахеометр с автоматическим наведением на визирную цель, выпускаемый, например, фирмой Trimble Navigation, можно брать отсчеты с частотой 4 Гц. За 0,25 с – интервал скважности – угол рефракции может измениться незначительно. Следовательно, точность определения \bar{C}_n зависит практически только от точности измерения $\Delta_{(OTP)}$.

Для вычисления угла рефракции r_d , который учитывает влияние турбулентной атмосферы в текущий момент времени, использовалась формула

$$r_d = 8,13L \left(0,000244 \frac{P}{T^2} \pm \frac{B(\lambda)\bar{C}_n}{h^{2/3}a(Ri)} \right), \quad (2)$$

где T – усредненные значения температуры, К; P – усредненные значения давления, мбар; $B(\lambda)$ – величина, характеризующая зависимость показателя

преломления воздуха от длины волны λ [15], температуры и давления, мбар/град; h — эквивалентная высота луча, см; $a(Ri)$ — универсальная безразмерная функция, которая может быть выбрана в зависимости от температурной стратификации атмосферы [16].

Среднюю квадратическую ошибку определения отметки точки трассы можно принять равной 3 мм, что соответствует угловой ошибке $\sim 1,4''$ на расстоянии 625,2 м. Следовательно, средняя квадратическая ошибка «истинного» значения угла вертикальной рефракции характеризуется величиной порядка $2''$.

На рис. 1 для трассы 625,2 м в виде графика представлены значения угла рефракции r_d , полученные турбулентным методом, и истинные значения r , полученные классическим способом [8].

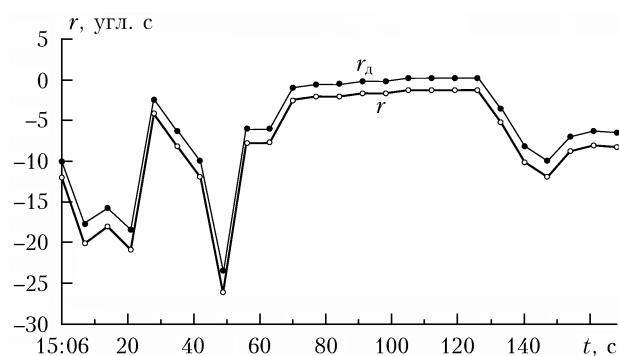


Рис. 1. Дневной ход рефракции 13 августа 2008 г. на полигоне «ГиС» на горизонтальной трассе протяженностью 625,2 м; высота инструмента $\sim 1,7$ м

Видно, что ход r_d несколько отличается от r , так как он меньше по модулю на $1,5$ – $2''$ в точках отсчета, т.е. $|r_d| < |r|$. Согласно графикам угол вертикальной рефракции меняется случайным образом, с высокой скоростью (в течение нескольких секунд) и весьма значительно, что говорит о невозможности использования постоянных коэффициентов рефракции, которые могли бы быть получены ранее на этой же трассе любым классическим методом. Это подтверждает сделанный Д.И. Масличем еще в 1969 г. вывод о том, что «трудности учета рефракции связаны с ее быстрыми изменениями во времени и пространстве» [26]. Как известно, эффект быстрого хаотического изменения рефракции наиболее сильно проявляется для более длинных трасс при отсутствии облачности и слабом ветре, особенно в аридной зоне [14, 23].

Значения рефракции, принятые за «истинные», и значения, полученные динамическим методом, практически совпадают и характеризуются среднеквадратическим отклонением порядка 2 – $3''$. Таким образом, проведенный эксперимент подтверждает высокую точность определения рефракции в момент измерений динамическим методом по флуктуациям угла прихода, которая лишь немного меньше инструментальной точности используемого высокоточного роботизированного тахеометра, заявленной в паспорте прибора.

Аналогичные данные получены и для более короткой трассы, где наблюдения проводились в этот же день, 13 августа 2008 г., но несколько позднее — в 15:47. Ход рефракции в этом случае имеет меньший размах, что объясняется меньшей длиной трассы.

Кроме того, осенью 2018 г. рефракция исследовалась при более благоприятных условиях наблюдений, которые соответствовали безразличной температурной стратификации атмосферы на трассе протяженностью 741,4 м на производственном объекте. Трасса проходила над ровной горизонтальной (травянистой) поверхностью, температура воздуха составляла -10 °С, скорость ветра 0,5 м/с, давление 1025,8 мбар. На рис. 2 показан один из фрагментов типичного хода рефракции на этой трассе, полученный одновременно классическим и турбулентным методами.

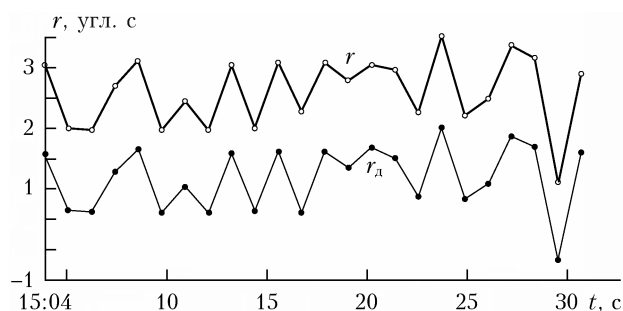


Рис. 2. Временной ход рефракции с 15:04 по 15:30 1 ноября 2018 г. на трассе протяженностью 741,2 м; высота инструмента $\sim 2,2$ м

Из сравнения углов рефракции, полученных двумя различными методами, можно заключить, что отклонение значений рефракции от истинного составляет не более $1,5''$. Аналогичные результаты были получены и на других объектах при различных условиях наблюдений. Следовательно, точность турбулентного метода определения рефракции по флуктуациям угла прихода примерно соответствует инструментальной точности используемого роботизированного тахеометра.

Заключение

Результаты эксперимента подтверждают вывод многих исследователей, что угол рефракции быстро и значительно меняется случайным образом: в течение нескольких секунд он может измениться на десятки угловых секунд (рис. 1). По этой причине визуальные методы наведения, которые в основном сейчас используются в геодезии, не обеспечивают требуемую точность.

Точность определения рефракции предлагаемым турбулентным методом по флуктуациям угла прихода высокая и соответствует инструментальной точности применяемого прибора. Метод не требует использования какой-либо дополнительной аппаратуры, кроме электронного тахеометра с автоматическим наведением на визирную цель.

Для дальнейшего более широкого внедрения турбулентного метода определения рефракции потребуются более обширные экспериментальные исследования в различных условиях наблюдений.

1. *Алексеев А.В., Кабанов М.В., Куштин И.Ф.* Оптическая рефракция в атмосфере (наклонные трассы). Новосибирск: Наука, 1988. 227 с.
2. *Алексеев А.В., Кабанов М.В., Куштин М.Ф.* Оптическая рефракция в земной атмосфере (горизонтальные трассы). Новосибирск: Наука, 1985. 225 с.
3. *Виноградов В.В.* Влияние атмосферы на геодезические измерения. М.: Недра, 1992. 252 с.
4. *Изотов А.А., Пеллинен Л.П.* Исследование земной рефракции и методов геодезического нивелирования // Тр. ЦНИИГАиК. М.: Геодиздат, 1955. Вып. 102. С. 176.
5. *Островский А.Л., Джуман Б.М., Заблоцкий Ф.Д., Крайцов Н.И.* Учет атмосферных влияний на астрономо-геодезические измерения. М.: Недра, 1990. 235 с.
6. *Лышко А.М., Русак В.М., Чадович Д.В.* Анализ точности ходов тригонометрического нивелирования при создании съемочного обоснования // Инженерные изыскания. 2010. № 3. С. 60–63.
7. *Brunner F.K.* Geodetic Refraction. Berlin: Shringер, 1984. P. 216.
8. *Дементьев Д.В.* Анализ классических методов учета и определения рефракции в приземном слое атмосферы // Геодезия и картография. 2019. Т. 80, № 5. С. 2–11.
9. *Юношев Л.С.* Боковая рефракция света при измерении углов. М.: Недра, 1969. 96 с.
10. *Мозжухин О.А.* Рефракция в нивелировании и способ ее учета / Деп. в ВИНТИ 5.06.86. № 4124-В. 186 с.
11. *Островская С.А.* Учет вертикальной рефракции на основании взаимных наблюдений и эквивалентных высот луча // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. Львов, 1984. № 3. С. 51–60.
12. *Изотов А.А.* Соображения об исследованиях в области атмосферной рефракции // Геодезия и картография. 1975. № 1. С. 12–16.
13. *Дементьев В.Е.* Об определении вертикальной рефракции // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1973. № 5. С. 29–31.
14. *Дементьев В.Е.* Рефракция и миражи. М.: Галлея-Принт, 2009. 391 с.
15. *Дементьев В.Е., Дементьев Д.В., Парамонов А.Г.* Современная геодезическая техника и ее применение. Орел: Картуш, 2019. 500 с.
16. *Гурвич А.С., Кон А.С., Миронов В.И., Хмелевцов С.С.* Лазерное излучение в турбулентной атмосфере / под ред. В.И. Татарского. М.: Наука, 1976. 275 с.
17. *Зуев В.В.* Распространение лазерного излучения в атмосфере. М.: Радио и связь, 1981. 288 с.
18. *Зуев В.Е., Банах В.А., Покасов В.В.* Оптика турбулентной атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 270 с.
19. *Татарский В.И.* Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
20. URL: [www//gis2000.ru](http://gis2000.ru) (last access: 20.08.2019).
21. *Учет атмосферных влияний на астрономо-геодезические измерения / под ред. А.Л. Островского.* М.: Недра, 1990. С. 235.
22. *Островский А.Л.* Достижения и задачи рефрактометрии // Геопрофи. 2008. № 1. С. 6–15.
23. *Островский А.Л., Тлустяк Б.Т., Суюнов А.С.* Об учете вертикальной рефракции в условиях Средней Азии // Геодезия и картография. 1987. № 5. С. 19–21.
24. *Островский А.Л., Суюнов А.С.* Турбулентный метод учета вертикальной рефракции в условиях Средней Азии // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. Львов, 1989. Вып. 49. С. 112–120.
25. *Тартачинский Р.М.* Об определении моментов минимальных рефракционных искажений углов в сетях триангуляции // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. Львов, 1985. Вып. 41. С. 108–114.
26. *Маслич Д.И.* Некоторые общие закономерности влияния вертикальной рефракции на точность геодезического нивелирования // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. Львов: Изд-во Львовского ун-та, 1969. Вып. 9. С. 33–41.

D.V. Dementiev. Studies of the possibility of determining vertical refraction by the turbulent method.

At present, only one classical technique accounting refraction during periods of undisturbed images allows one to largely compensate the influence of refraction on the results of geodetic measurements. However, these periods are very short, and their limits are extremely difficult to estimate. Therefore, despite many years of effort, the problem of accounting for refraction in geodetic measurements has not received a satisfactory practical solution. According to the studies of the turbulent method, the accuracy of the refraction determination corresponds to the instrumental accuracy of the device used, even in conditions of unstable temperature stratification of the atmosphere, when significant fluctuations of the angle of arrival are observed.