

ДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ РЕФРАКЦИИ С ПОМОЩЬЮ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ТАХЕОМЕТРОВ

Д.В. Дементьев (Группа компаний «Геодезия и Строительство»)

В 1995 г. окончил геодезический факультет МИИГАиК по специальности «инженер-геодезист». В настоящее время — генеральный директор группы компаний «Геодезия и Строительство».

И.М. Жуков («Бизнес Телеком-Импорт»)

В настоящее время — инженер компании «Бизнес Телеком-Импорт».

Как показывают исследования [1], наиболее известный классический метод учета вертикальной рефракции основан на выборе времени измерений, соответствующего весьма короткому периоду спокойных изображений визирных целей, при котором имеет место неустойчивая температурная стратификация атмосферы. Отмечается, что в инструкциях к современным геодезическим приборам рекомендуется вводить поправку за рефракцию с учетом коэффициента рефракции $k = 0,13-0,20$. В действительности, в приземном слое атмосферы коэффициент рефракции может иметь значения от -6 до 6 и более [2]. Реально в приземном слое атмосферы (до высоты визирного луча $10-20$ м) днем, как правило, наблюдаются в основном отрицательные, а не положительные коэффициенты рефракции, которые быстро и случайным образом изменяются в широких пределах [3, 4]. Поэтому, как зарубежные, так и российские исследователи в ряде случаев предлагают не вводить поправку за рефракцию, так как это может только ухудшить результаты измерений. Используя результаты многочисленных исследований методов опреде-

ления вертикальной рефракции, можно прийти к заключению, что классические методы не позволяют с высокой степенью достоверности определять рефракцию [1]. Исключение составляет метод наблюдений при безразличной температурной стратификации атмосферы, когда влияние рефракции близко к 0. Но он имеет существенные недостатки, основным из которых является сложность определения временных границ, когда рекомендуется выполнять измерения, т. е. границ периода времени, когда наблюдается безразличная температурная стратификация атмосферы.

Для повышения точности определения рефракции в работе [1] предлагается направить усилия на разработку динамических методов, в основе которых лежит положение о том, что атмосфера, как всякая реальная среда, неоднородна и все время находится в турбулентном состоянии. Рефракция может быть представлена только случайным процессом, который меняется во времени и пространстве, и поэтому ее необходимо определять в режиме реального времени, что дает возможность выполнять измерения в любое время суток с высокой точностью [3].

В настоящее время в ГК «Геодезия и Строительство» ведется теоретическая разработка, и интенсивно выполняются экспериментальные исследования динамического метода определения рефракции, основанного на измерениях искажений световой волны в режиме реального времени, с целью его внедрения в практику геодезических работ [5]. Как показывает опыт, этот метод достаточно точен и оперативен. Он может быть легко реализован с помощью высокоточных электронных тахеометров с автоматическим наведением на визирную цель. Чтобы определить величину угла вертикальной рефракции на определенную визирную цель, достаточно выполнять измерения зенитного расстояния в следящем режиме с максимально допустимой частотой измерений, набрав порядка 100 отсчетов (желательно не меньше 25) в течение $2-10$ минут, и затем обработать их по разработанному в ГК «Геодезия и Строительство» алгоритму. Угол вертикальной рефракции r'' предлагается определить, измеряя статистические характеристики Ψ оптического излучения, прошедшего слой турбулентной атмосферы, а также температуру

Т и давление P на трассе, выполнив следующую последовательность преобразований [3]:

$$\Psi \rightarrow C_n \rightarrow C_t \rightarrow dT/dh \rightarrow \frac{dn}{dh} \rightarrow r$$

↑
P; T.

Экспериментальная проверка определения рефракции динамическим методом была проведена на полигоне ГК «Геодезия и Строительство» и на одном из производственных объектов в Европейской части РФ.

Для наглядности данные определений угла рефракции динамическим методом r_d и значения угла рефракции, полученные по результатам тригонометрического и геометрического нивелирования (истинное значение угла вертикальной рефракции r), выполнены на полигоне ГК «Геодезия и Строительство», представлены в виде графиков на рис. 1. С учетом инструментальных погрешностей прибора, ошибок измерения высоты измерения инструмента и визирной цели (отражателя) можно принять, что средняя квадратическая ошибка определения истинного значения угла вертикальной рефракции составляет порядка 2".

На приведенном графике видно, что ход рефракции r_d , полученный динамическим методом, несколько отличается от истинного хода рефракции r , так как меньше по модулю на 1,5–2" в точках отсчета. Из полученных данных можно заключить, что максимальное значения угла рефракции r_d , вычисленное по искажениям световой волны для первого цикла наблюдений на трассе длиной $L = 625$ м, имеет наибольшую величину (по модулю) –23,4", а для более короткой трассы длиной $L = 564$ м максимальное по модулю значение угла вертикальной рефракции достигает –13,5".

Как видно из графиков, угол вертикальной рефракции меняется случайным образом с высокой скоростью (в течение нескольких секунд) и весьма

значительно, что свидетельствует о невозможности использования постоянных коэффициентов рефракции, полученных ранее даже на этой же трассе. Это подтверждает вывод, сделанный в работе [4], о том, что «трудности учета рефракции связаны с ее быстрыми изменениями во времени и пространстве». Эффект быстрого хаотического изменения величины рефракции наиболее сильно проявляется для более протяженных трасс при отсутствии облачности и слабом ветре. Следовательно, большую часть дневного времени суток, т. е. в периоды неустойчивой температурной стратификации, измерение вертикальных направлений с использованием традиционных оптических приборов с визуальным наведением на визирные цели не обеспечивает высокую точность измерений, так как положение визирной цели измеряемого направления быстро и хаотически меняется. Это обстоятельство наглядно подтверждают графики флуктуаций угла рефракции, представленные на рис. 1.

При использовании визуальных методов наблюдений процесс визирования на точку занимает определенный момент времени и, как правило, угол рефракции за время визирова-

ния претерпевает значительные случайные изменения (см. рис. 1), что не позволяет точно выполнять измерения направлений.

Как видно из сравнения представленных результатов, значения угла рефракции, принятые за истинные и полученные динамическим методом, практически совпадают и характеризуются средней квадратической ошибкой порядка 2". Таким образом, выполненный эксперимент подтверждает высокую точность определения рефракции в момент измерений динамическим методом, которая практически немного уступает инструментальной точности ~1", заявленной в паспорте использованного прибора, — роботизированного тахеометра Trimble S9 [5].

Кроме того, осенью 2018 г. были выполнены исследования рефракции при более благоприятных условиях наблюдений, которые практически соответствовали температурной стратификации атмосферы, близкой к безразличной (см. рис. 2).

Наблюдения на производственном объекте выполнялись роботизированным тахеометром Trimble S8 на трассе с ровной горизонтальной поверхностью протяженностью 741,422 м. Инструментальная точность ис-

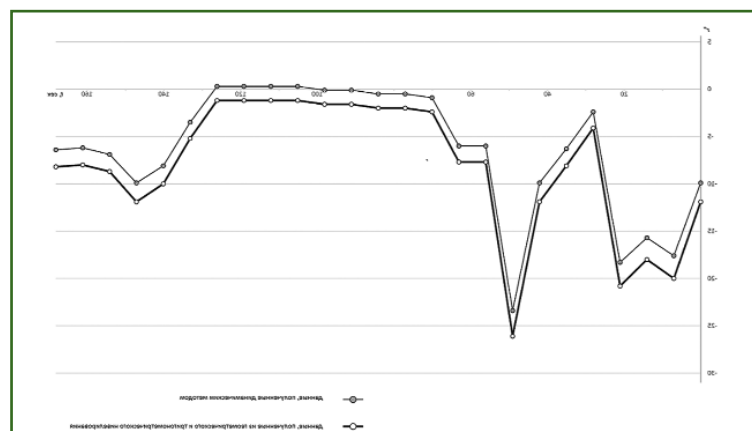


Рис. 1

Дневной ход угла вертикальной рефракции 13 августа 2018 г. Начало наблюдений в 15 ч 06 мин. Продолжительность наблюдений ~2 мин.

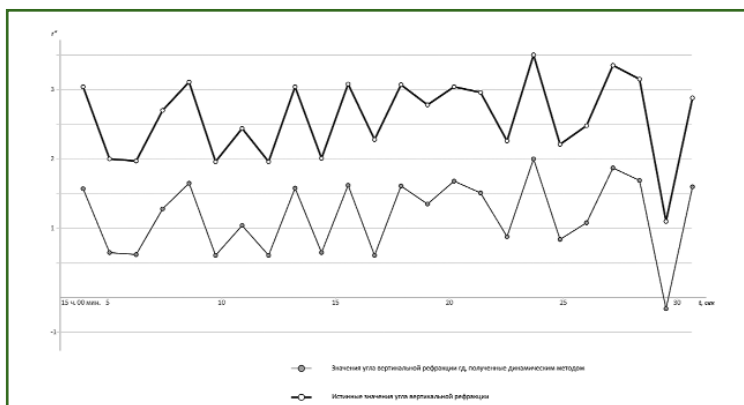


Рис. 2

Графики временного хода угла вертикальной рефракции за период с 15 ч 04 мин до 15 ч 30 мин. 1 ноября 2018 г.

пользованного прибора составляет 1". Температура воздуха составляла -10°C , скорость ветра — 0,5 м/с, давление — 1025,8 мбар. В момент наблюдений угол вертикальной рефракции имел положительное значение и определялся классическим методом — путем оценки истинного значения рефракции, полученного с учетом геометрического нивелирования II класса. На рис. 2. одновременно показан ход угла вертикальной рефракции r_d за этот же период, полученный на основании измерений динамическим методом.

Из сравнения значений углов рефракции, полученных двумя методами, можно заключить, что отклонение значений угла рефракции от истинного составляет не более 1,5". Так как истинные значения угла рефракции определены с точностью порядка 2", о чем было сказано выше, то можно сделать предварительный вывод о том, что и в данном случае точность определения рефракции динамическим методом примерно соответствует инструментальной точности использованного роботизированного тахеометра.

Таким образом, выполненные эксперименты с использованием роботизированных тахеометров Trimble S8 и Trimble S9 в различные времена года и на различных трассах, включая производственный объект, подтвер-

ждают возможность применения динамического метода определения рефракции, который разрабатывается в настоящее время в ГК «Геодезия и Строительство». Полученная точность определения угла рефракции ($\sim 2''$) практически соответствует инструментальной точности использованных приборов, а систематическая ошибка рефракции, вероятнее всего, вызвана недостаточно точным определением высоты отражателя и инструмента, что сказалось на определении истинного значения угла вертикальной рефракции.

Реализация предлагаемого метода не вызывает каких-либо затруднений. Основная проблема, по мнению авторов, заключается в высокой стоимости электронных тахеометров с автоматическим наведением на визирную цель и, в связи с этим, ограниченной доступности таких приборов для большинства пользователей в РФ.

Результаты эксперимента подтверждают, что угол рефракции быстро и значительно меняется случайным образом. В течение нескольких секунд угол вертикальной рефракции может измениться на десятки угловых секунд (см. рис. 1). Поэтому визуальные методы наблюдений не могут обеспечить высокую точность результатов в периоды температурной стратификации

атмосферы, отличающиеся от безразличной, т. е. большую часть времени суток условия работы не благоприятны для выполнения высокоточных визуальных наблюдений.

Для повышения точности необходимо вычислять рефракцию для конкретного момента наблюдений [3] и для конкретной трассы. В противном случае полученные поправки не будут соответствовать действительности из-за их быстрого и случайного изменения в значительном диапазоне.

Для дальнейшего широкого внедрения динамического метода определения угла вертикальной рефракции с использованием электронных тахеометров с автоматическим наведением на визирную цель требуется проведение обширных экспериментальных исследований в различных условиях.

Принципиально данный метод может быть полностью автоматизирован для определения рефракции в момент выполнения наблюдений. Для этого необходимо использовать алгоритм обработки измеренных искажений световой волны, прошедшей приземный слой турбулентной атмосферы [5].

▼ Список литературы

1. Дементьев Д.В. Анализ классических методов учета и определения рефракции в приземном слое атмосферы // Геодезия и картография. — 2019. — Т. 80. — № 5. — С. 2–11.
2. Angus-Leppan P.V. (1969) Surface effects on refraction in precise leveling. Conference on Refraction Effects in Geodesy & Conference on Electronic Distance Measurement 5–8 Nov. 1968, New South Wales (Australia), Univ. of N. S. W. — P. 74–89.
3. Дементьев В.Е. Рефракция и миражи. — М.: Галлея-Принт, 2009. — 391 с.
4. Островский А.Л., Джуман Б.М., Заблоцкий Ф.Д., Кравцов Н.И. Учет атмосферных влияний на астрономо-геодезические измерения. — М.: Недра, 1990. — 235 с.
5. ГК «Геодезия и Строительство». — <https://gis2000.ru>.