

Г.С. Нахмансон, Д.А. Карпюк

Рефракционные ошибки визуального определения местоположения наземных объектов с борта воздушного судна

Воронежский военный авиационный инженерный институт

Поступила в редакцию 3.09.2003 г.

Анализируется влияние вертикального распределения коэффициента преломления, зависящего от метеорологических условий, в приземном слое атмосферы на траекторию визуального наблюдения наземных объектов с борта воздушного судна и отличие ее от прямолинейной. Найдены аналитические соотношения, по которым проведены расчеты рефракционных ошибок визуального определения дальности наблюдаемых объектов относительно местоположения воздушного судна вдоль земной поверхности. Показана необходимость учета кривизны земной поверхности при расчетах.

При визуальном определении местоположения наземных объектов с борта воздушного судна (ВС) существенное влияние на визуальный контакт экипажа ВС с наблюдаемыми объектами может оказывать состояние приземного слоя атмосферы [1, 2]. Изменение метеорологических условий и, следовательно, вертикальных профилей температуры, влажности воздуха и атмосферного давления вызывает изменение вертикального распределения показателя преломления атмосферы и приводит к рефракционным ошибкам при наблюдении наземных объектов. В [3] рассматривались ошибки визуального определения горизонтальной дальности взлетно-посадочной полосы с борта ВС, обусловленные наличием в вертикальном распределении температуры в приземном слое атмосферы инверсионных участков, в предположении плоской земной поверхности, что не всегда является справедливым.

Цель нашей работы заключается в оценке величины рефракционных ошибок определения дальности наземных объектов с борта ВС, относительно его местоположения вдоль земной поверхности, по данным температурно-ветрового зондирования с учетом кривизны земной поверхности.

При нахождении ВС в момент наблюдения наземного объекта в точке A на высоте h_0 от земной поверхности (рис. 1) «горизонтальная» дальность наземного объекта определяется проекцией траектории наблюдения последнего из точки A на земную поверхность, т.е. линией пересечения BD земной поверхности плоскостью, проходящей через точку наблюдения, траекторию наблюдения AD и центр земли O . Начало вертикальной оси совпадает с точкой A , а сама ось направлена вниз, перпендикулярно земной поверхности. Наблюдение наземного объекта производится под углом φ_0 к плоскости, перпендикулярной вертикальной оси в точке A . При этом угол между касательной к траектории наблюдения и перпендикуляром, опущенным на

земную поверхность из точки A , $\psi_0 = (\pi/2) - \varphi_0$. Изменение атмосферного коэффициента преломления с высотой $n(h)$ вызывает изменение угла ψ между касательной к траектории наблюдения и перпендикуляром к земной поверхности и длины проекции траектории наблюдения на земную поверхность $L_{\text{тек}}$.

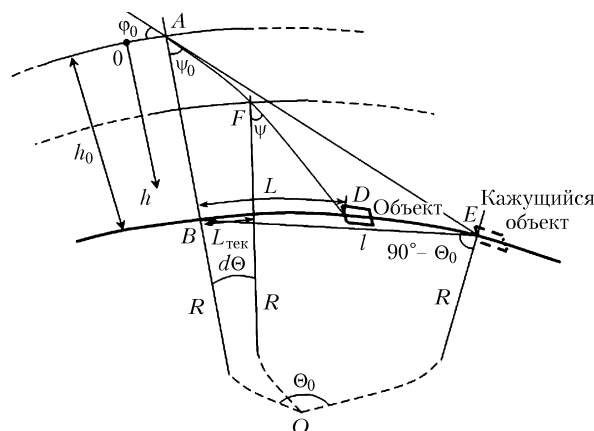


Рис. 1. Реальное и кажущееся местоположение наблюдаемого объекта на земной поверхности с борта воздушного судна

Предполагая, что земную поверхность можно считать сферической и атмосферу рассматривать в виде совокупности тонких слоев с постоянными в пределах каждого слоя коэффициентами преломления, а величина коэффициента преломления слоя, в котором находится точка наблюдения A , $n(0) = n_0$, нетрудно показать по аналогии с [3, 4], что

$$\psi = \psi_0 + \sin \psi_0 \times \int_0^h \frac{\left[n(h) - (R + h_0 - h) \frac{dn(h)}{dh} \right] dh}{n(h)(R + h_0 - h) \sqrt{\left(\frac{n(h)}{n_0} \frac{R + h_0 - h}{R + h_0} \right)^2 - \sin^2 \psi_0}};$$

$$L_{\text{рек}} = R \sin \psi_0 \times \int_0^h \frac{dh}{(R + h_0 - h) \sqrt{\left(\frac{n(h)}{n_0} \frac{R + h_0 - h}{R + h_0}\right)^2 - \sin^2 \psi_0}}. \quad (1)$$

При $h = h_0$ соотношения (1) определяют угол касательной к траектории наблюдения в точке касания земной поверхности и дальность наблюдаемого объекта от местоположения ВС вдоль земной поверхности.

При восстановлении высотного профиля атмосферного коэффициента преломления по данным температурно-ветрового зондирования зависимость $n(h)$ в пределах $h_{i-1} < h < h_i$ (h_{i-1} и h_i — верхняя и нижняя границы i -го слоя, соответствующие соседним точкам на высоте снятия данных температурно-ветрового зондирования) может быть представлена как

$$n(h) = n_{i-1} + \gamma_{i-1}(h - h_{i-1}),$$

где

$$n_{i-1} = n(h_{i-1}) \text{ и } n_i = n(h_i)$$

— величины коэффициента преломления на границах рассматриваемого слоя;

$$\gamma_{i-1} = (n_i - n_{i-1}) / (h_i - h_{i-1})$$

— градиент вертикального изменения коэффициента преломления в зависимости от высоты внутри рассматриваемого слоя. Тогда, вводя параметры

$$R_i = R + h_0 - h_i, \quad y_{i-1} = (h_i - h_{i-1}) / R_{i-1}, \quad \mu_i = \frac{\gamma_i R_i}{n_i}$$

и учитывая, что $y_{i-1} \ll 1$, выражения для дальности наблюдаемого объекта вдоль земной поверхности относительно местоположения ВС, определяемой как сумма проекций на земную поверхность участков траектории наблюдения объекта через число слоев (k) атмосферы между земной поверхностью и ВС, и угла между касательной к траектории наблюдения и перпендикуляром к земной поверхности на границе i -го слоя можно представить как

$$L = \sum_{i=1}^k L_{\text{рек}} = \sum_{i=1}^k R \sin \psi_{i-1} \times \int_0^{y_{i-1}} \frac{dx}{(1-x) \sqrt{(1+\mu_{i-1}x)^2 (1-x)^2 - \sin^2 \psi_{i-1}}} = \sum_{i=1}^k R y_{i-1} \text{tg} \psi_{i-1} \left[1 + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1-\mu_{i-1}}{\cos^2 \psi_{i-1}} \right) y_{i-1} \right] + o(y_{i-1}); \quad (2)$$

$$\psi_{i-1} = \psi_{i-2} + \sin \psi_{i-2} \times$$

$$\times \int_0^{y_{i-2}} \frac{[1 + \mu_{i-2}(2x-1)] dx}{(1-x)(1+\mu_{i-2}x) \sqrt{(1-x)^2 (1+\mu_{i-2}x)^2 - \sin^2 \psi_{i-2}}} = \psi_{i-2} + y_{i-2} \text{tg} \psi_{i-2} \times \left\{ 1 - \mu_{i-2} + \frac{1}{2} \left[1 + \mu_{i-2}^2 + \frac{(1-\mu_{i-2})^2}{\cos^2 \psi_{i-2}} \right] y_{i-2} \right\} + o(y_{i-2}).$$

Выражение для ошибки при визуальном определении дальности наблюдаемых объектов вдоль земной поверхности можно записать как $\Delta L = L_{\text{каж}} - L$, где $L_{\text{каж}} = R\theta_0$ — дальность до наблюдаемого объекта вдоль поверхности Земли при прямолинейной траектории наблюдения. Из рассмотрения треугольников OBE и ABE на рис. 1 нетрудно определить центральный угол θ_0 , под которым видна $L_{\text{каж}}$ из центра Земли O и показать, что

$$L_{\text{каж}} = -R\psi_0 + R \arcsin \left[\left(1 + \frac{h_0}{R} \right) \sin \psi_0 \right] = h_0 \text{tg} \psi_0 \times \left[1 - \frac{1}{2} \frac{h_0}{R} \text{tg}^2 \psi_0 + \frac{1}{6} \frac{h_0^2}{R^2} \text{tg}^2 \psi_0 (1 + 3 \text{tg}^2 \psi_0) + o\left(\frac{h_0^2}{R^2}\right) \right]. \quad (3)$$

При $R \rightarrow \infty$ (2) и (3) совпадают с соотношениями, полученными в [3].

Проведем, используя соотношения (2) и (3), оценку рефракционных ошибок определения дальности наземных объектов при визуальном наблюдении с борта ВС на основе представленных на рис. 2 вертикальных профилей температуры и абсолютной влажности по данным ночного и утреннего температурно-ветрового зондирования атмосферы и восстановленных по ним профилей показателя преломления для 21 апреля 1990 г. в г. Воронеже.

Из хода кривых на рис. 2 видно наличие характерных для ночного зондирования приземных, а для утреннего зондирования приподнятых инверсионных распределений температуры, влияющих на распределение показателя преломления по высоте. При этом, судя по графикам, мощность инверсионного слоя за 6 ч между моментами ночного и утреннего зондирования уменьшилась на высоте в пределах с 500 до 400 м. Результаты расчетов величин рефракционных ошибок при визуальном определении дальности наземных объектов с борта ВС для вертикальных профилей коэффициента преломления, представленных на рис. 2, в зависимости от высоты ВС приведены на рис. 3. Расчеты проводились, как и в [3], для углов наблюдения относительно плоскости, параллельной земной поверхности в точке нахождения воздушного судна: $2^\circ 40'$ (кривые 1) и $3^\circ 15'$ (кривые 2).

Для оценки учета влияния кривизны земной поверхности на величину рассматриваемых рефракционных ошибок на рис. 3 приведены результаты расчетов аналогичных ошибок на основании

соотношений, полученных в [3], в предположении плоской земной поверхности ($2^{\circ}40'$ – кривые 3, $3^{\circ}15'$ – кривые 4).

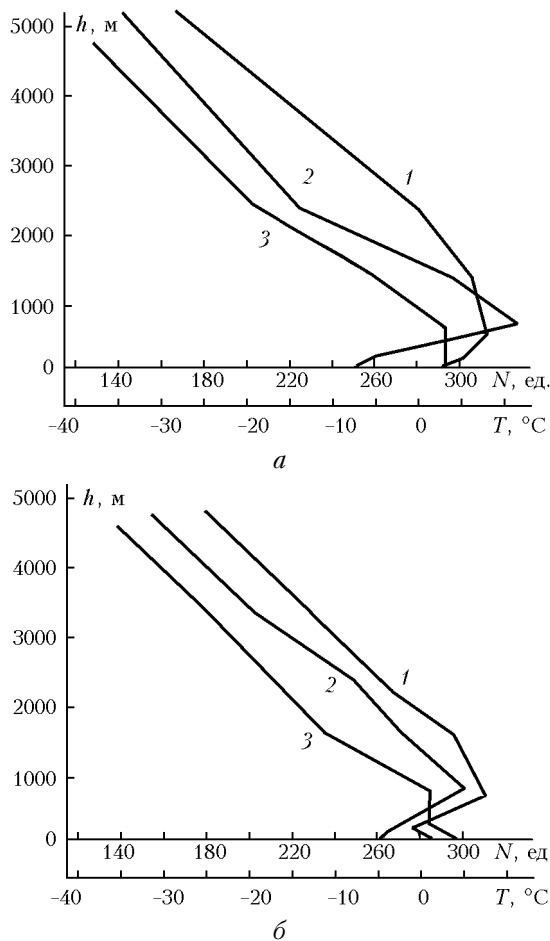


Рис. 2. Вертикальные профили температуры (1), влажности (2) и восстановленные профили коэффициента преломления атмосферы (3) по данным температурно-ветрового зондирования атмосферы: *a* – ночное зондирование (3 ч); *б* – утреннее зондирование (9 ч)

Из рис. 3 видно, что, как и в [3], при наличии в приземном слое атмосферы участков с инверсионным распределением температуры рефракционные ошибки при визуальном определении дальности наземных объектов вдоль земной поверхности относительно местоположения ВС возрастают с увеличением высоты и уменьшением угла наблюдения. Так, ошибка при визуальном определении дальности наземных объектов, наблюдаемых под углом $2^{\circ}40'$ с борта ВС, находящегося на высоте 250 м, при наличии приземного инверсионного слоя (3 ч) составляет 100 м, а при приподнятом инверсионном слое (9 ч) 120 м. При наблюдении объектов под углом $3^{\circ}15'$ указанные ошибки, как следует из поведения кривых 2, уменьшаются соответственно до 50 и 60 м.

Из приведенных результатов расчета рефракционных ошибок при визуальном определении местоположения наземных объектов на основе соот-

ношений, полученных в [3] (кривые 3, 4), при прочих равных условиях, видно, что на высоте наблюдения 250 м ошибки не превышают 10–15 м. Следовательно, неучет кривизны земной поверхности в рассматриваемом случае приводит к занижению рефракционных ошибок определения дальности наземных объектов практически в 10 раз.

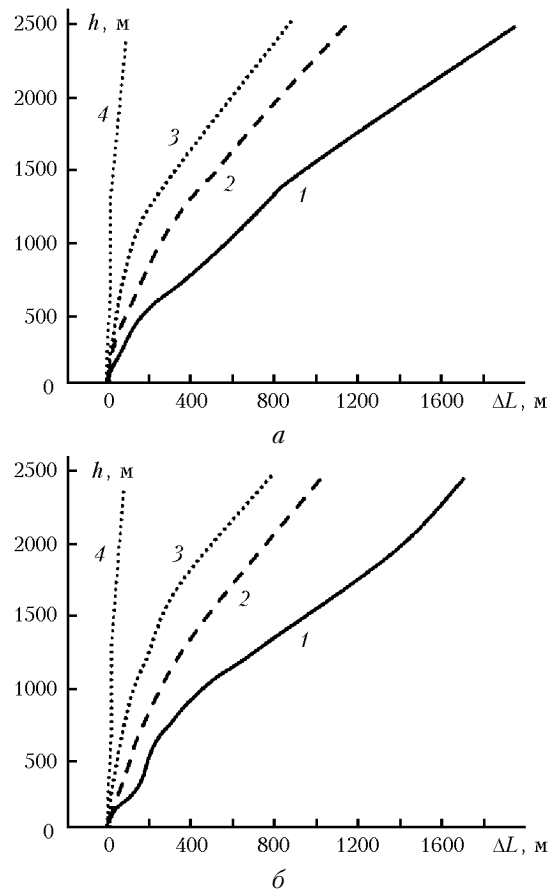


Рис. 3. Ошибки визуального определения дальности наблюдаемого объекта вдоль земной поверхности по данным температурно-ветрового зондирования: *a* – ночное зондирование (3 ч); *б* – утреннее зондирование (9 ч). Кривые 1, 2 – с учетом кривизны земной поверхности для углов наблюдения $2^{\circ}40'$ и $3^{\circ}15'$; кривые 3, 4 – без учета кривизны земной поверхности для углов наблюдения $2^{\circ}40'$ и $3^{\circ}15'$

При дальнейшем увеличении высоты наблюдения, например для $h > 500$ м при наличии приземного инверсионного слоя (рис. 3, *a*) и для $h > 800$ м при наличии приподнятого инверсионного слоя (рис. 3, *б*), рефракционные ошибки определения дальности наземных объектов растут, также значительно превышая аналогичные расчетные данные, полученные в [3].

Таким образом, неучет кривизны земной поверхности при расчетах рефракционных ошибок определения дальности наземных объектов по данным температурно-ветрового зондирования приводит к существенному занижению указанных ошибок, возрастающему с увеличением высоты наблюдения.

1. Зубов В.Е., Кабанов М.В. Оптика атмосферного аэрозоля. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 254 с.
2. Казаков Л.Я., Ломакин А.Н. Неоднородности коэффициента преломления воздуха в тропосфере. М.: Наука, 1975. 165 с.
3. Бобров В.Н., Нахмансон Г.С. Влияние вертикального распределения показателя преломления атмосферы на визуальное определение местоположения взлетно-посадочной полосы с борта воздушного судна // Метеорол. и гидрол. 2003. № 1. С. 58–63.
4. Колосов М.А., Арманд Н.А., Яковлев О.Н. Распространение радиоволн при космической связи. М.: Связь, 1969. 155 с.

G.S. Nakhmanson, D.A. Karpyuk. The refraction errors in visual determination of the surface object location from aircraft.

The effect of the vertical distribution of the refractive index, depending on the weather conditions, in the surface atmospheric layer on the trajectory of visual observation of surface objects from aboard aircraft, as well as the difference from the straight-line observation geometry, are analyzed. Analytical equations are derived and used to calculate refraction errors in visual determination of the distance to the objects observed relative to the aircraft location. It is shown that the curvature of the earth's surface should necessarily be taken into account.