

вая спектральный состав излучаемых колебаний при кодовом и при частотном разделении каналов дальности в РЛС с ПОС, можно сделать вывод о более высокой скрытности второго варианта, по-

скольку как при отсутствии целей в зоне обзора, так и на начальном этапе возникновения автоколебаний энергия сигнала распределена в более широкой полосе частот.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морская радиолокация / В. А. Генкин, В. И. Винокуров, С. П. Калениченко и др.; под ред. В. И. Винокурова. Л.: Судостроение, 1986. 256 с.

2. Попов В. Н., Щербак В. И. Линейный этап установления автоколебаний в генераторе с запаздыванием // Изв. ЛЭТИ. 1977. Вып. 215. С. 22–24.

3. Яковлев В. Н. Генераторы с многопетлевой обратной связью. М.: Связь, 1973. 278 с.

4. Пат. RU 113018 U1 МПК G01S7/28 (2006.01). Радиолокационная станция с положительной обратной связью через цель / С. П. Калениченко, В. А. Сокольников. Опубл. 27.01.2012. Бюл. № 3.

5. Кутузов В. М. Применение авторегрессионных моделей в РЛС с положительной обратной связью // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". Сер. Радиоэлектроника и телекоммуникации. 2005. Вып. 1. С. 37–41.

V. M. Kutuzov

Saint-Petersburg state electrotechnical university "LETI"

### A multiband self-oscillation mode in radar with a positive feedback

*A multiband self-oscillation mode in radar with a positive space and target feedback (PFB) is suggested and analyzed. It does not degrade characteristics of emission security in case of parallel space range surveillance. The suggested design of radar with PFB is compared with the known one on the basis of code division of the receive chains. The advantages of radar with PFB are shown.*

Radar with spatial feedback, active oscillator with a delay, multichannel mode, frequency division of channels, power emission security

Статья поступила в редакцию 21 января 2015 г.

УДК 621.396.667

Г. С. Нахмансон, Д. В. Бучнев, А. В. Суслин

Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина  
(Воронеж)

## Атмосферные искажения траекторий распространения излучения в каналах глиссады радиотехнических систем посадки воздушных судов

*Рассмотрены искажения траекторий распространения излучения антенн радиотехнических систем, обеспечивающих каналы глиссады для посадки воздушных судов, обусловленные атмосферной рефракцией. Получены аналитические выражения для построения траекторий распространения излучения. По данным температурно-ветрового зондирования атмосферы рассчитаны траектории распространения излучения и плотности распределения вероятностей их угловых отклонений от номинального угла глиссады на различных дальностях. Определены интервалы углового разброса траекторий относительно линии глиссады для фиксированных достоверных вероятностей.*

### Показатель преломления, глиссада, радиотехническая система посадки, траектория распространения излучения, рефракционная ошибка

При совершении посадки воздушных судов (ВС) траектория их снижения (глиссада) к взлетно-посадочной полосе определяется углом наклона излучения антенны канала глиссады радиотехниче-

ской системы посадки (РТСП). Так как угол наклона излучения антенн каналов глиссады относительно земной поверхности невелик ( $2^{\circ}40' \dots 3^{\circ}15'$ ), на траекторию распространения излучения в атмосфере

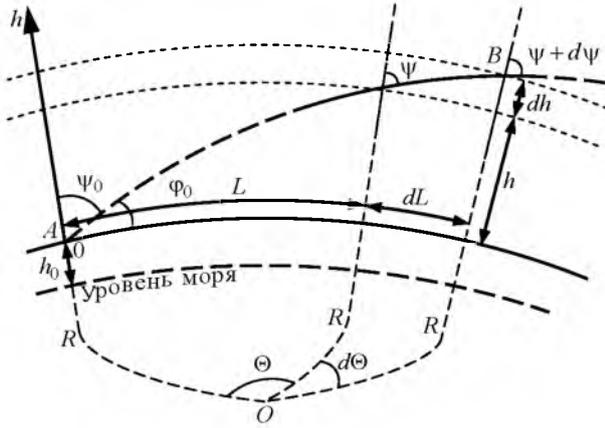


Рис. 1

может влиять изменение показателя преломления с высотой (его вертикальный профиль).

Целью настоящей статьи является оценка влияния изменения показателя преломления в приземном слое атмосферы с высотой на траектории распространения излучения в канале глассады РТСП воздушных судов.

Будем считать земную поверхность сферической (рис. 1), а вертикальную ось  $h$ , проходящую через центр Земли  $O$  с началом на поверхности земли в точке  $A$ , направленной вверх перпендикулярно плоскости, касательной к земной поверхности. Атмосферу будем рассматривать в виде совокупности тонких сферических слоев с постоянным в пределах каждого слоя показателем преломления, зависимость которого от высоты определяется функцией  $n(h)$ . В этом случае при размещении РТСП в точке  $A$  на поверхности Земли на высоте  $h_0$  над уровнем моря излучение радиоволн происходит под углом  $\varphi_0$  к плоскости, перпендикулярной в точке  $A$  радиусу-вектору, проведенному из точки  $O$ . Тогда угол между касательной к траектории распространения излучаемых радиоволн и перпендикуляром к земной поверхности в точке  $A$  составляет  $\psi_0 = \pi/2 - \varphi_0$ .

Показатель преломления атмосферы для электромагнитных волн радиодиапазона определяется выражением [1], [2]:

$$n = 1 + 10^{-6} N = 1 + 10^{-6} (77.6/T)(p + 4810e/T), \quad (1)$$

где  $N$  – показатель преломления в  $N$ -единицах;  $T$  – абсолютная температура, К;  $p$  – атмосферное давление, гПа;  $e$  – парциальное давление водяного пара, гПа.

Изменение атмосферного показателя преломления с высотой  $h$  вызывает изменение угла  $\psi$  между касательной к траектории распространения из-

лучения и направлением радиуса-вектора, проведенного из центра Земли  $O$ , во всех точках траектории распространения. Связь изменения угла  $\psi$  с высотой  $h$  и показателем преломления в этом случае описывается соотношением закона преломления для сферически-слоистых сред [3]–[5]:

$$n_0 (R + h_0) \sin \psi_0 = n(h) (R + h_0 + h) \sin \psi, \quad (2)$$

где  $n_0 = n(0)$  – показатель преломления у земной поверхности;  $R$  – радиус Земли.

Выбрав в качестве независимой переменной центральный угол  $\Theta$  относительно центра Земли между радиальными направлениями на точку нахождения РТСП и на рассматриваемую точку  $B$  траектории распространения радиоволн и дифференцируя (2) по  $\Theta$ , получим

$$-\frac{d\psi}{d\Theta} = \left[ \frac{dn(h)}{d\Theta} \frac{1}{n(h)} + \frac{1}{R + h_0 + h} \frac{dh}{d\Theta} \right] \operatorname{tg} \psi. \quad (3)$$

Из рис. 1 следует, что в любой точке траектории  $dh \cdot \operatorname{tg} \psi = (R + h_0 + h) d\Theta$  и выражение (3) можно представить в виде

$$-\frac{d\psi}{d\Theta} = 1 + \frac{R + h_0 + h}{n(h)} \frac{dn(h)}{dh}. \quad (4)$$

На основании (4) с учетом (2) запишем выражения, определяющие зависимости угла  $\psi$  и проекции траектории распространения излучения через слой атмосферы на земную поверхность  $L$  от высоты  $h$ :

$$\begin{aligned} \psi(h) &= \psi_0 - \sin \psi_0 \times \\ &\times \int_0^h \frac{dh}{(R + h_0 + h) \sqrt{\left[ \frac{n(h)}{n_0} \frac{R + h_0 + h}{R + h_0} \right]^2 - \sin^2 \psi_0}} - \\ &- \sin \psi_0 \int_0^h \frac{[dn(h)/dh] dh}{n(h) \sqrt{\left[ \frac{n(h)}{n_0} \frac{R + h_0 + h}{R + h_0} \right]^2 - \sin^2 \psi_0}}; \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L(h) &= (R + h_0) \sin \psi_0 \times \\ &\times \int_0^h \frac{dh}{(R + h_0 + h) \sqrt{\left[ \frac{n(h)}{n_0} \frac{R + h_0 + h}{R + h_0} \right]^2 - \sin^2 \psi_0}}. \quad (6) \end{aligned}$$

Следует заметить, что выражение для угла рефракции  $\psi(h)$  (5) совпадает с известными соотношениями, полученными в [3], [6].

При использовании кусочно-линейной модели изменения атмосферного показателя преломления с высотой его основной характеристикой является вертикальный градиент  $\gamma$  [2], [7]. В пределах  $i$ -го слоя с верхней и нижней границами  $h_i$  и  $h_{i-1}$  и градиентом

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

( $n_i = n(h_i)$  и  $n_{i-1} = n(h_{i-1})$  – значения показателя преломления атмосферы на верхней и нижней границах этого слоя) зависимость атмосферного показателя преломления от высоты может быть представлена в виде  $n(h) = n_{i-1} + \gamma_{i-1}(h - h_{i-1})$ ,  $h_{i-1} < h < h_i$ . Тогда выражения (5), (6) для угла  $\psi$  и расстояния  $L$  вдоль земной поверхности от РТСП до проекции точки траектории распространения излучения на поверхность Земли принимают вид:

$$\begin{aligned} \psi_{i-1} &= \psi_{i-2} - \sin \psi_{i-2} \times \\ &\times \int_0^{y_{i-2}} \frac{dx}{(1+x) \sqrt{\left(1+x \frac{z_{i-2}}{y_{i-2}}\right)^2 (1+x)^2 - \sin^2 \psi_{i-2}}} - \\ &\quad - \sin \psi_{i-2} \times \\ &\times \int_0^{y_{i-2}} \frac{dx}{\left(\frac{y_{i-2}}{z_{i-2}} + x\right) \sqrt{\left(1+x \frac{z_{i-2}}{y_{i-2}}\right)^2 (1+x)^2 - \sin^2 \psi_{i-2}}}; \quad (7) \\ L &= \sum_{i=1}^k L_{i \text{ тек}} = \sum_{i=1}^k (R + h_0) \sin \psi_{i-1} \times \\ &\times \int_0^{y_{i-1}} \frac{dx}{(1+x) \sqrt{\left(1+x \frac{z_{i-1}}{y_{i-1}}\right)^2 (1+x)^2 - \sin^2 \psi_{i-1}}}, \quad (8) \end{aligned}$$

где  $\psi_{i-1}$  – угол между касательной к траектории распространения излучения и радиусом-вектором, проведенным из центра Земли  $O$  в точку траектории на нижней границе  $i$ -го слоя;  $L_{i \text{ тек}}$  – проекция участка траектории распространения излучения через  $i$ -й слой атмосферы на земную поверхность. В (7), (8)

$$\begin{aligned} y_{i-1} &= (h_i - h_{i-1}) / (R + h_0 + h_{i-1}); \\ z_{i-1} &= (n_i - n_{i-1}) / n_{i-1}. \end{aligned}$$

Так как  $y_{i-1} \ll 1$ , выражения (7), (8) можно представить в виде рядов по степеням этой величины:

$$\begin{aligned} \psi_{i-1} &= \psi_{i-2} - \\ &- \operatorname{tg} \psi_{i-2} \left[ y_{i-2} + z_{i-2} - \frac{(y_{i-2}^2 + z_{i-2}^2)}{2} \times \right. \\ &\times \left. \left( 1 + \frac{1}{\cos^2 \psi_{i-2}} \right) - \frac{y_{i-2} z_{i-2}}{\cos^2 \psi_{i-2}} \right] + 0(y_{i-2}^3); \quad (9) \\ L &= \sum_{i=1}^k L_{i \text{ тек}} = \\ &= \sum_{i=1}^k \left\{ (R + h_0) y_{i-1} \operatorname{tg} \psi_{i-1} \left[ 1 - \frac{y_{i-1}}{2} \times \right. \right. \\ &\times \left. \left. \left( 1 + \frac{1}{\cos^2 \psi_{i-1}} \right) - \frac{z_{i-1}}{2 \cos^2 \psi_{i-1}} \right] + 0(y_{i-1}^3) \right\}. \quad (10) \end{aligned}$$

Соотношения (9), (10) позволяют рассчитать траекторию распространения излучения с учетом атмосферной рефракции по данным температурно-ветрового зондирования атмосферы.

При построении траекторий распространения излучения необходимо учитывать погрешности измерения данных температурно-ветрового зондирования. Как показано в [8], можно считать, что ошибки вычисления показателя преломления по данным измерений атмосферных параметров составляют  $\Delta n = 0.5 N$ -единиц зимой и  $1.5 N$ -единиц летом независимо от высоты, а погрешности измерения высоты нахождения радиозонда в момент измерения  $\Delta h = 10$  м на высотах  $h \leq 60$  м и  $20$  м при  $h > 60$  м (для радиозонда Vaisala RS92-SGP). На основании теории ошибок [9] и соотношений (9), (10) выражения для ошибок определения  $\psi_{i-1}$  и  $L_{i \text{ тек}}$  в точках измерения параметров атмосферы определяются как

$$\begin{aligned} \Delta \psi_{i-1} &= \Delta \psi_{i-2} \left| 1 - \frac{y_{i-2} + z_{i-2}}{\cos^2 \psi_{i-2}} + \right. \\ &+ \left. \frac{(y_{i-2} + z_{i-2})^2}{\cos^4 \psi_{i-2}} (1 + \sin^2 \psi_{i-2}) \right| + \\ &+ 2 \Delta h \frac{\operatorname{tg} \psi_{i-2}}{R + h_0} \left| 1 - y_{i-2} - \frac{y_{i-2} + z_{i-2}}{\cos^2 \psi_{i-2}} \right| + \\ &+ 2 \Delta n \frac{\operatorname{tg} \psi_{i-2}}{n_{i-2}} \left| 1 - z_{i-2} - \frac{y_{i-2} + z_{i-2}}{\cos^2 \psi_{i-2}} \right|; \quad (11) \end{aligned}$$

$$\Delta L_{i \text{ тек}} = \Delta h \operatorname{tg} \psi_{i-1} \left| 2 - 2y_{i-1} - \frac{2y_{i-1} + z_{i-1}}{\cos^2 \psi_{i-1}} \right| + \Delta n \frac{\operatorname{tg} \psi_{i-1} (h_i - h_{i-1})}{n_{i-1} \cos^2 \psi_{i-1}} + \Delta \psi_{i-1} \frac{h_i - h_{i-1}}{\cos^2 \psi_{i-1}} \times \left| 1 - \frac{y_{i-1}}{2} - \frac{y_{i-1} + z_{i-1}}{2 \cos^2 \psi_{i-1}} (1 + 2 \sin^2 \psi_{i-1}) \right|. \quad (12)$$

На рис. 2 представлены кусочно-линейные аппроксимации зависимостей температуры  $t$  и парциального давления водяного пара  $e$ , построенные по результатам измерений (отмечены маркерами) при температурно-ветровом зондировании приземного слоя атмосферы в Воронеже 15.07.2012 и восстановленной по ним в соответствии с выражением (1) зависимости показателя преломления от высоты.

Расчеты возможных траекторий распространения излучения антенн в канале глissады с учетом ошибок измерения высоты и вычисления показателя преломления атмосферы в зависимости от дальности проекции точки траектории на поверхность Земли относительно местоположения РТСП вдоль земной поверхности приведены на рис. 3. Кривые 1, 2, 3 соответствуют номинальному углу глissады относительно земной поверхности в точке нахождения РТСП  $3^\circ 15'$ , а кривые 1', 2', 3' – углу  $2^\circ 40'$ . Кривые 1, 1' рассчитывались по формулам (9), а кривые 2, 2' и 3, 3' – по формулам (9) и (11) с учетом положи-

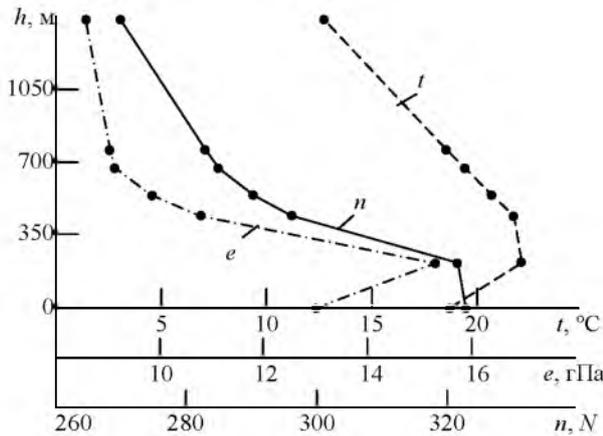


Рис. 2

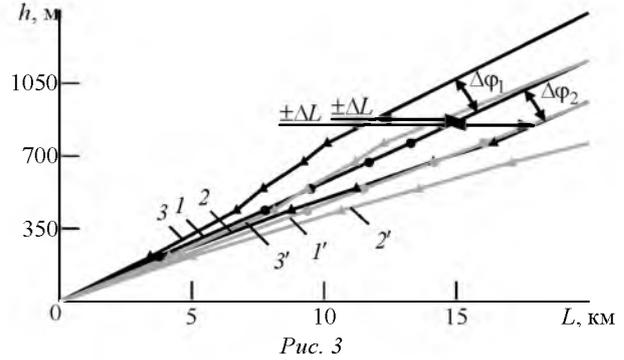


Рис. 3

тельных и отрицательных ошибок  $\Delta L_{i \text{ тек}}$  соответственно, т. е. заменой в (9)  $L_{i \text{ тек}}$  на  $L_{i \text{ тек}} + |\Delta L_{i \text{ тек}}|$  и  $L_{i \text{ тек}} - |\Delta L_{i \text{ тек}}|$ .

Угловые отклонения  $\Delta \varphi_1$  траекторий распространения излучения в вертикальной плоскости (кривые 3, 3'), превышающих по высоте траектории, рассчитанные без учета погрешностей измерений параметров атмосферы (кривые 1, 1'), в дальнейшем считаются положительными. Угловые отклонения  $\Delta \varphi_2$  траекторий распространения излучения, соответствующих кривым 2, 2', лежащим ниже кривых 1, 1', считаются отрицательными. Отклонения по дальности в горизонтальной плоскости относительно точек траекторий распространения, соответствующих кривым 1, 1', обозначены как  $\pm \Delta L$ . Значения указанных параметров для траекторий, приведенных на рис. 3, на дальностях 4, 10, 15, 20 км приведены в табл. 1.

Из поведения кривых на рис. 3 и данных табл. 1 следует, что возможный интервал пересечений фиксированной высоты наблюдения по дальности в горизонтальной плоскости увеличивается с уменьшением угла наклона антенны к земной поверхности (номинального угла глissады). Действительно, с уменьшением этого угла увеличивается длина траектории распространения излучения до фиксированной высоты наблюдения и увеличивается интервал точек пересечения траекториями этой высоты по дальности за счет усиления влияния рефракции.

Таблица 1

| Угол глissады                          | Отклонение                      | $L, \text{ км}$ |         |         |         |
|--|---------------------------------|-----------------|---------|---------|---------|
|  |                                 | 4               | 10      | 15      | 20      |
| $\varphi_0 = 2^\circ 40' = 2.67^\circ$ | $\pm \Delta L, \text{ м}$       | 365.30          | 1535.80 | 3358.20 | 4103.00 |
|  | $\Delta \varphi_1, \dots^\circ$ | 0.27            | 0.66    | 0.75    | 0.63    |
|  | $\Delta \varphi_2, \dots^\circ$ | -0.22           | -0.32   | -0.45   | -0.53   |
| $\varphi_0 = 3^\circ 15' = 3.25^\circ$ | $\pm \Delta L, \text{ м}$       | 384.00          | 1925.50 | 3265.80 | 3621.90 |
|  | $\Delta \varphi_1, \dots^\circ$ | 0.38            | 1.02    | 0.79    | 0.67    |
|  | $\Delta \varphi_2, \dots^\circ$ | -0.27           | -0.46   | -0.60   | -0.56   |

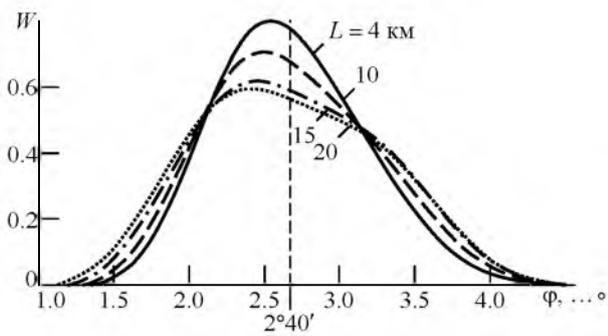


Рис. 4

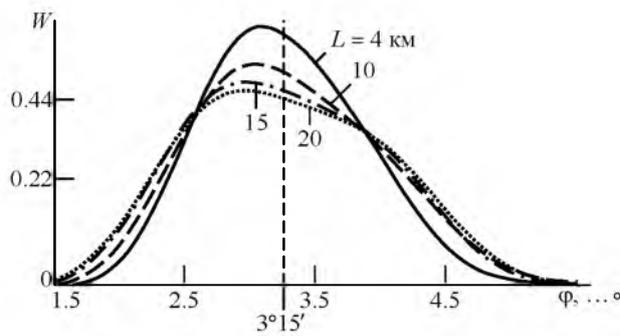


Рис. 5

Увеличение номинального угла глissады приводит к возрастанию угловых отклонений траекторий распространения излучения относительно расчетной линии глissады. Указанные угловые отклонения могут значительно превышать общепринятые допустимые отклонения  $\pm 0.5^\circ$  относительно линии глissады. В связи с тем, что на изменение показателя преломления в приземном слое атмосферы влияют протекающие в нем метеорологические процессы, зависимость  $n(h)$  случайна. Для нахождения среднегодовых статистических характеристик угловых отклонений траекторий распространения излучения от линии глissады сформирована архивная выборка данных температурно-ветрового зондирования атмосферы за 2012 г. в г. Воронеже с базой  $n=120$ . На основании сформированной выборки рассчитаны траектории распространения излучения, их отклонения относительно линии глissады и вычислены статистические характеристики угловых отклонений (среднее значение  $m_\varphi$ , дисперсия  $\sigma_\varphi^2$ , коэффициенты асимметрии  $\gamma_1$  и эксцесса  $\gamma_2$ ) для точек траекторий на дальностях проекций этих точек относительно местоположения РТСП вдоль земной поверхности 4, 10, 15, 20 км.

На рис. 4 и 5 представлены зависимости плотностей распределения вероятностей угловых отклонений траекторий распространения излу-

чения в каналах глissады для номинальных углов глissады  $2^\circ 40'$  и  $3^\circ 15'$  соответственно, рассчитанные по формулам Эджворта [10] для дальностей  $L = 4, 10, 15$  и  $20$  км:

$$W(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\varphi} e^{-\frac{(\varphi-m_\varphi)^2}{2\sigma_\varphi^2}} \left[ 1 + \frac{\gamma_1}{6} H_3\left(\frac{\varphi-m_\varphi}{\sigma_\varphi}\right) + \frac{\gamma_2}{24} H_4\left(\frac{\varphi-m_\varphi}{\sigma_\varphi}\right) + \frac{\gamma_1^2}{72} H_6\left(\frac{\varphi-m_\varphi}{\sigma_\varphi}\right) \right], \quad (13)$$

где

$$H_3(x) = x^3 - 3x; \quad H_4(x) = x^4 - 6x^2 + 3;$$

$$H_6(x) = x^6 - 15x^4 + 45x^2 - 15; \quad m_\varphi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta\varphi_i;$$

$$\sigma_\varphi^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta\varphi_i - m_\varphi)^2; \quad \gamma_1 = \frac{1}{\sigma_\varphi^3} \sum_{i=1}^n (\Delta\varphi_i - m_\varphi)^3;$$

$$\gamma_2 = \frac{1}{\sigma_\varphi^4} \sum_{i=1}^n (\Delta\varphi_i - m_\varphi)^4 - 3.$$

В табл. 2 приведены результаты расчетов доверительных интервалов, которым соответствуют углы траекторий распространения излучения при номинальных углах глissады  $2^\circ 40'$  и  $3^\circ 15'$  с вероят-

Таблица 2

| Угол глissады  | $L, \text{ км}$ | $m_\varphi, \dots^\circ$ | $\sigma_\varphi, \dots^\circ$ | $\gamma_1$ | $\gamma_2$ | Доверительная вероятность ( $P_{\text{дов}}$ ) |              |            |              |            |              |
|--|-----------------|--------------------------|-------------------------------|------------|------------|--|--------------|------------|--------------|------------|--------------|
|  |                 |                          |                               |            |            | 0.683  |              | 0.954      |              | 0.997      |              |
|  |                 |                          |                               |            |            | Распределение                                  |              |            |              |            |              |
|  |                 |                          |                               |            |            | Нормальное                                     | Ряд Эджворта | Нормальное | Ряд Эджворта | Нормальное | Ряд Эджворта |
| Ширина доверительного интервала ( $\Delta\varphi$ ), $\dots^\circ$ |                 |                          |                               |            |            |  |              |            |              |            |              |
| $\varphi_0 = 2^\circ 40' = 2.67^\circ$                             | 4               | 2.71                     | 0.51                          | 0.43       | -0.37      | 1.02   | 1.05         | 2.04       | 1.85         | 3.06       | 2.37         |
|  | 10              | 2.72                     | 0.54                          | 0.45       | -0.92      | 1.09   | 1.17         | 2.18       | 2.07         | 3.26       | 2.55         |
|  | 15              | 2.74                     | 0.60                          | 0.32       | -1.43      | 1.20   | 1.33         | 2.39       | 2.27         | 3.59       | 2.72         |
|  | 20              | 2.71                     | 0.61                          | 0.31       | -1.45      | 1.21   | 1.35         | 2.43       | 2.31         | 3.64       | 2.76         |
| $\varphi_0 = 3^\circ 15' = 3.25^\circ$                             | 4               | 3.29                     | 0.62                          | 0.44       | -0.49      | 1.23   | 1.29         | 2.47       | 2.37         | 3.70       | 3.08         |
|  | 10              | 3.36                     | 0.70                          | 0.39       | -1.21      | 1.40   | 1.54         | 2.81       | 2.67         | 4.21       | 3.23         |
|  | 15              | 3.31                     | 0.72                          | 0.31       | -1.46      | 1.43   | 1.59         | 2.87       | 2.72         | 4.30       | 3.26         |
|  | 20              | 3.33                     | 0.75                          | 0.26       | -1.62      | 1.49   | 1.67         | 2.98       | 2.83         | 4.47       | 3.36         |

стями  $P_{\text{дов}} = 0.683, 0.954$  и  $0.997$  на дальностях  $L = 4, 10, 15$  и  $20$  км, при аппроксимации плотностей распределения вероятностей угловых отклонений распределениями (13) и нормальными распределениями (которые определяются первым слагаемым в (13)). Следует заметить, что приведенные вероятности соответствуют критериям нахождения углов траекторий распространения излучения в пределах  $\pm\sigma_{\varphi}, \pm 2\sigma_{\varphi}$  и  $\pm 3\sigma_{\varphi}$  относительно  $m_{\varphi}$  для нормальных распределений. Из хода кривых на рис. 4, 5 и данных табл. 2 видно, что смещения средних значений угловых отклонений траекторий распространения излучения от номинальных углов глссиды на дальностях  $4...20$  км не превышают  $0.04...0.11^{\circ}$ , т. е. не выходят за рамки требований [1]. В отличие от средних значений ширина доверительных интервалов угловых отклонений траекторий распространения излучения от номинальных углов глссиды для указанных выше доверительных вероятностей при аппроксимации плотности распределения вероятностей отклонений нормальным законом превышает значения допустимых отклонений в 3–4 раза.

Ширина доверительных интервалов угловых отклонений траекторий при фиксированных доверительных вероятностях уменьшается по мере приближения точки наблюдения к местоположению РТСП и при уменьшении номинального угла глссиды. Действительно, на дальностях  $4...20$  км для доверительной вероятности  $P_{\text{дов}} = 0.683$  (область нормальных ошибок) при  $\varphi_0 = 2^{\circ}40'$  ширина искомого доверительного интервала меняется в пределах  $\Delta_{\varphi} = 1.02...1.21^{\circ}$ , при  $\varphi_0 = 3^{\circ}15'$  –  $\Delta_{\varphi} = 1.23...1.49^{\circ}$ , а для  $P_{\text{дов}} = 0.997$  (область до-

пустимых ошибок) при  $\varphi_0 = 2^{\circ}40'$  –  $\Delta_{\varphi} = 3.06...3.64^{\circ}$ , при  $\varphi_0 = 3^{\circ}15'$  –  $\Delta_{\varphi} = 3.70...4.47^{\circ}$ . Кроме того, сравнительный анализ результатов расчетов, приведенных в табл. 2, показывает, что в области нормальных ошибок ( $P_{\text{дов}} = 0.683$ ) доверительные интервалы при описании плотностей распределения вероятностей угловых отклонений траекторий распространения по формулам Эджворта превышают интервалы  $2\sigma_{\varphi}$  на дальностях  $4...20$  км при  $\varphi_0 = 2^{\circ}40'$  на  $0.03...0.14^{\circ}$ , а при  $\varphi_0 = 3^{\circ}15'$  – на  $0.06...0.18^{\circ}$ , т. е. вблизи номинального угла глссиды плотности распределения вероятностей, рассчитанные на основании выражений (13), имеют более пологие вершины, чем нормальные плотности распределений. Это подтверждается также отрицательными коэффициентами эксцесса. В области допустимых ошибок ( $P_{\text{дов}} = 0.997$ ) ширина доверительных интервалов для плотностей распределения вероятностей (13) меньше ширины доверительного интервала для нормального распределения  $6\sigma_{\varphi}$  при  $\varphi_0 = 2^{\circ}40'$  на  $0.69...0.88^{\circ}$ , а при  $\varphi_0 = 3^{\circ}15'$  – на  $0.62...1.11^{\circ}$ . Следовательно, ветви распределения (13) при  $|\varphi - m_{\varphi}| > \sigma_{\varphi}$  стремятся к нулю с ростом  $|\varphi - m_{\varphi}|$  быстрее, чем у нормального распределения.

Таким образом, полученные результаты показывают, что приземный слой атмосферы может приводить к отклонениям траекторий распространения излучения относительно номинального угла глссиды, превышающим пределы требуемых допустимых ошибок  $\pm 0.5^{\circ}$  в 2–3 раза.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиотехнические системы / под ред. Ю. М. Казаринова. М.: Издательский центр "Академия", 2008. 592 с.
2. Казаков Л. Я., Ломакин А. Н. Неоднородности коэффициента преломления воздуха в тропосфере. М.: Наука, 1976. 165 с.
3. Колосов М. А., Арманд Н. А., Яковлев О. И. Распространение радиоволн при космической связи. М.: Связь, 1969. 155 с.
4. Durand J. C., Granier P. Radar coverage assessment in nonstandard and ducting conditions: a geometrical optics approach // IEE proc. radar and signal processing. 1990. Vol. 137, № 2. P. 95–101.
5. Thews E. R. Timely prediction of low-altitude radar performance in operational environments using in situ atmospheric refractivity data // IEE Proc. radar and signal processing. 1990. Vol. 137, № 2. P. 89–94.
6. Яковлев. О. И. Космическая радиофизика. М.: Науч. книга, 1998. 432 с.
7. Нахмансон Г. С., Карпюк Д. А. Рефракционные ошибки визуального определения местонахождения наземных объектов с борта воздушного судна // Оптика атмосферы и океана. 2004. Т. 17, № 9. С. 1–4.
8. Паршуков В. А. Оценка точности вычисления рефракции в атмосфере по данным высотных метеоизмерений // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, № 2. С. 172–176.
9. Зайдель А. Н. Погрешности измерений физических величин. Л.: Наука, 1985. 112 с.
10. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1968. 720 с.

G. S. Nakhmanson, D. V. Buchnev, A. V. Suslin  
*Air force academy n. a. prof. N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin (Voronezh)*

**The glideslope axes radiation propagation paths atmospheric distortion for the ground controlled approach systems**

*The glideslope axes radiation propagation paths distortion for the ground controlled approach systems is considered. The radiation propagation tracing analytical expressions are derived. Radiation propagation paths and probability distribution densities of their angular deviations from the rated glideslope angles for different distances are calculated on the radiosonde measurements data. The confidence intervals of the propagation paths angular deviations with respect to the glideslope line for specific confidence probabilities are evaluated.*

Refraction index, glide path, ground controlled approach system, radiation propagation path, refraction error

Статья поступила в редакцию 30 декабря 2014 г.