

Розвиток, бойове застосування та озброєння радіотехнічних військ

УДК 53.088

DOI: 10.30748/nitps.2018.32.05

В.Д. Карлов¹, В.Л. Місайлов¹, А.М. Артеменко²

¹ Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

² Головне управління персоналу Генерального штабу Збройних Сил України, Київ

ВИМОГИ ЩОДО КОНТРОЛЮ РЕФРАКЦІЇ У ПОГРАНИЧНОМУ ШАРІ АТМОСФЕРИ З УРАХУВАННЯМ ЇЇ ВПЛИВУ НА РОЗРАХУНКОВУ ДАЛЬНІСТЬ ВИЯВЛЕННЯ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ НА ГРАНИЧНО МАЛИХ ВИСОТАХ

Дальність дії радіолокаційних станцій залежить від умов поширення радіохвиль. У приземному шарі атмосфери, особливо у нижній його частині, відбуваються достатньо швидкі і сильні зміни властивостей повітря, що суттєво впливає на умови поширення радіохвиль. Внаслідок чого дальність дії РЛС взагалі є змінною величиною і повинна підлягати контролю. Запропонований статистичний підхід до виявлення умов поширення радіохвиль, при яких дальність виявлення повітряних об'єктів на гранично малих висотах наземними радіолокаційними станціями змінюється більше ніж на припустиму величину. Обґрунтовані вимоги до часової і просторової дискретності вимірювань параметрів пограничного шару атмосфери. Обґрунтовані припустимі похибки визначення індексу заломлення повітря, вимірювання його температури і вологості та атмосферного тиску.

Ключові слова: дальність дії радіолокаційної станції, гранично мала висота, пограничний шар атмосфери, рефракція, індекс заломлення, похибка вимірювання, вимоги.

Вступ

Постановка проблеми. Для радіолокаційних станцій (РЛС) однією із важливіших тактико-технічних характеристик є їх дальність дії (ДД) (дальність виявлення об'єкту певного типу) R_B [1–2]. Відомо, що дальність виявлення повітряних об'єктів (ПО) наземними РЛС визначається не лише їх енергетичним потенціалом, але й умовами поширення радіохвиль (ПРХ) [2–3], внаслідок чого R_B є, взагалі, змінною величиною і повинна підлягати контролю. Серед основних чинників, що впливають на ПРХ у пограничному шарі атмосфери (ПША) (до висот порядку 1000 м), є поточні метеорологічні умови, які визначають рефрактивні властивості атмосферного повітря на малих і гранично малих висотах [4]. Тому виникає питання – як часто із якою припустимою похибкою необхідно отримувати інформацію про рефрактивні властивості повітря у ПША для контролю ДД РЛС на гранично малих висотах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Природно, найкращим способом контролю ДД РЛС є її практичне вимірювання. За наявності регулярних польотів ПО зазвичай так і робиться [5–6]. При цьому перевіряється технічний стан основних систем РЛС та враховується поточна атмосферна ре-

фракція. Для оцінки рефрактивних властивостей повітря визначають залежність індексу заломлення атмосфери від висоти ($N(h)$ -профілі). Припустима похибка визначення $N(h)$ -профілю залежить від застосування цієї інформації [7–11] і дуже часто обирається довільно.

Мета статті – обґрунтувати та визначити вимоги до припустимої похибки визначення вертикального профілю індексу заломлення атмосфери при контролі дальності виявлення повітряних об'єктів на гранично малих висотах.

Виклад основного матеріалу

Відомо [4; 12–13], що дальність виявлення ПО наземними РЛС R_B обмежена дальністю прямої видимості (ДПВ) $D_{пв}$, яка, визначається як:

$$D_{пв} = \sqrt{2a_e} \left(\sqrt{h_{РЛС}} + \sqrt{h_{ПО}} \right), \quad (1)$$

де $a_e = \frac{a_3}{1 + a_3 g_N \cdot 10^{-6}}$ – еквівалентний радіус Землі,

тис. км;

$a_3 = 6,37$ тис. км – дійсний радіус Землі;

g_N – вертикальний градієнт індексу заломлення повітря (за стандартної рефракції $g_{Nст} = -0,04$ N-од./м);

$h_{РЛС}$, $h_{ПО}$ – висота підйому фазового центру антени РЛС та польоту ПО відповідно, м.

Як відомо, [4;12], g_N визначається як:

$$g_N = \frac{\partial N}{\partial h}, \quad (2)$$

де N – індекс заломлення повітря, N-од.;

h – висота, м.

В свою чергу індекс заломлення повітря залежить від поточних метеорологічних умов наступним чином:

$$N = \frac{77,6}{T_n} \left(p_n + \frac{4810e_n}{T_n} \right), \quad (3)$$

де T_n – температура повітря, К;

p_n – атмосферний тиск, мб;

e_n – тиск водяної пари, мб.

Таким чином поточна можлива дальність виявлення ПО на визначеній висоті залежатиме від поточних метеорологічних умов.

Для визначення впливу поточного g_N на розрахункову дальність прямої видимості знайдемо її відносну зміну:

$$\delta D_{пв} = \frac{D_{пв}|_{g_N}}{D_{пв}|_{g_{Nст}}} = \sqrt{\frac{1 + a_3 g_{Nст} \cdot 10^{-6}}{1 + a_3 \frac{1}{h} \int_0^h g_N dh \cdot 10^{-6}}}. \quad (4)$$

Засоби вимірювання радіофізичних (метеорологічних) параметрів повітря у приземному шарі атмосфери повинні здійснювати виміри за певний час, у певних просторових межах і з певним розділенням та похибками.

Час здійснення вимірів визначається як мінімум двома чинниками – вимогами споживача і швидкістю зміни стану вимірюваного об'єкту.

Для РЛС існують наступні фундаментальні часові інтервали:

– час тривалості імпульсу τ_i (одиниці мкс);

– час тривалості пачки імпульсів $\tau_{пач}$ (десятки мкс);

– час опромінення цілі $\tau_{опр}$ (десятки мс);

– час поновлення інформації $\tau_{ПІ}$ (секунди).

Атмосфера є безперервним випадковим нестаціонарним середовищем, тому при здійсненні вимірів додержуються певних інтервалів вимірювань і усереднення отриманих даних для забезпечення їх репрезентативності [14–15].

Відповідно до [14–16], при здійсненні вимірювань параметрів атмосфери існують наступні фундаментальні часові інтервали:

– постійна часу вимірювального приладу $\tau_{ВП}$ (від 0,1 с до десятків секунд);

– час усереднення результатів $\tau_{ур}$ (від одиниць до сотень секунд).

З викладеного вище можна вважати, що часовий інтервал здійснення вимірів повинен бути не більше за 10 с. Це є компроміс між часом поновлення інформації від РЛС та часом, за який технічно можливо здійснити дистанційними засобами зондування атмосфери [17] декілька вимірів у діапазоні висот до 200 м для отримання результатів із задовільними похибками.

Природно, що максимальною висотою здійснення вимірів h_{max} , повинна бути не меншою за верхню межу гранично малих висот, тобто $h_{max} \geq 200$ м, а мінімальною здійснення вимірів буде висота встановлення приладів $h_{min} \leq 2$ м [16].

Враховуючи, що хід вертикального профілю індексу заломлення у ПША є апіорі невідомим, і конкретні його реалізації можуть значно відрізнятися від будь-яких уявлень [18], то питання необхідної просторової дискретності вимірювань не має тривіальної відповіді. Із загальних міркувань можна вважати, що на інтервалі від 0 м до 200 м мінімальна ціла кількість повних коливань вертикального профілю індексу заломлення є 1. Тоді, відповідно до теореми Котельникова, крок здійснення вимірів повинен бути не менш ніж у 2 рази частіший. Звідси отримуємо, що роздільна здатність за висотою Δh повинна бути ≤ 25 м. У подальшому, за наявності статистичних даних із такою дискретністю за висотою та покращенням роздільної здатності приладів та їх здешевленням, вимоги щодо просторового розрізнення можуть бути переглянуті в той, чи інший бік.

Для визначення припустимої середньоквадратичної похибки визначення градієнту індексу заломлення σ_{g_N} скористаємось методикою, викладеною у [8].

В [19] вказано, що припустима різниця між розрахунком і експериментом при визначенні дальньої границі зони виявлення РЛС не повинна перебільшувати 20%. Якщо вважати, що вся ця похибка обумовлена зміною рефрактивних властивостей повітря, то для $\delta D_{пв} = 20\%$ із (4) знаходимо, що при цьому критичне значення градієнту індексу заломлення $g_{Nкр} = -0,059$ або $-0,011$.

Зробимо наступні попередні припущення:

– нехай весь діапазон висот $H = h_{max} - h_{min}$, на яких проводяться вимірювання індексу заломлення, розділений на m інтервалів. Величина кожного інтервалу дорівнює $\Delta h_i = h_{i+1} - h_i$, причому

$$\sum_{i=0}^m \Delta h_i = H, \quad (5)$$

де i – номер інтервалу.

По результатах, наприклад підйому зонду, проведеного один раз, набуті значення індексу заломлення N_i на кожному i -му висотному рівні. Всього таких значень $m+1$. Величина N_0 відповідає початковому значенню індексу заломлення на висоті h_{\min} . Різниця значень індексу заломлення ΔN на сусідніх i -му і $i+1$ -му рівнях дорівнює:

$$\Delta N_{i,i+1} = N_{i+1} - N_i. \quad (6)$$

Градієнт індексу заломлення на i -му інтервалі знаходимо як:

$$g_{Ni} = \frac{N_{i+1} - N_i}{h_{i+1} - h_i} = \frac{\Delta N_{i,i+1}}{\Delta h_i}. \quad (7)$$

Хай похибка визначення градієнту індексу заломлення σ_{gN} розподілена за нормальним законом з нульовим математичним сподіванням. Тоді завдання виявлення факту зміни ДПВ на величину, більшу за припустиму, зводиться до завдання перевірки статистичних гіпотез.

Висуємо нульову гіпотезу H_0 , яка полягає в тому, що $g_{Ni} = g_{Nct}$. Альтернативною є гіпотеза H_1 , яка полягає в тому, що $g_{Ni} \leq g_{Nkp}$ і ДПВ збільшилась більше ніж на 20%.

При перевірці гіпотези про збільшення ДПВ можливі наступні ситуації:

- прийняття гіпотези, що перевіряється, коли насправді вона вірна. Називатимемо таку ситуацію правильним виявленням, а імовірність ухвалення такого рішення будемо позначати D ;

- неприйняття гіпотези, що перевіряється, коли насправді вона вірна. Таку помилку називають помилкою першого роду. Імовірність її здійснення позначають через α ($\alpha = 1 - D$) і називають рівнем значущості критерію;

- прийняття гіпотези, що перевіряється, коли насправді вона невірна. Таку помилку називають помилкою другого роду або помилковою тривоگوю. Імовірність її здійснення позначають β ;

- неприйняття гіпотези, що перевіряється, коли насправді вона невірна. Імовірність ухвалення такого рішення називають потужністю критерію і позначають $1 - \beta$.

Як показано у [8], імовірність помилкової тривоги та правильного виявлення знаходяться як:

$$\beta = 0,5 + \Phi\left(\frac{g_{Nпор} - g_{Nct}}{\sigma_{gN}}\right), \quad (8)$$

$$D = 0,5 + \Phi\left(\frac{g_{Nпор} - g_{Nct} + g_{Nkp} - g_{Ni}}{\sigma_{gN}}\right), \quad (9)$$

де $\Phi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^U e^{-t^2/2} dt$ – функція помилок;

$g_{Nпор}$ – порогове значення градієнту, за якого приймається рішення.

За аналогією із радіолокацією вважатимемо, що за час одного зондування повинно виникати не більше 1 помилкової тривоги. При мінімальній роздільній здатності за висотою у 25 м, для інтервалу зондування у 200 м отримуємо $\beta \leq 0,125$.

Вирішуючи рівняння (8) відносно σ_{gN} при $\beta \leq 0,125$ та $g_{Nпор} = g_{Nkp}$ (-0,059 N-од./м та -0,011 N-од./м) отримуємо для виявлення підвищеної рефракції припустимою є $\sigma_{gN} \leq 0,017$ N-од./м, для виявлення зниженої рефракції - $\sigma_{gN} \leq 0,025$ N-од./м. Для загального випадку необхідно обирати менше значення σ_{gN} із наведених.

Тепер визначимо припустиму похибку визначення індексу заломлення σ_{Ni} . Хай похибки вимірювання індексу заломлення σ_{Ni} і висоти підйому зонда σ_{hi} не залежать від висоти проведення вимірювань ($\sigma_{Ni} = \sigma_N$, $\sigma_{hi} = \sigma_h$), тоді, як показано у [8], для (7) отримуємо:

$$\sigma_{gN} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_N}{\Delta h}\right)^2 + \left(\frac{\Delta N \sigma_h}{\Delta h^2}\right)^2}. \quad (10)$$

Якщо в (10) можна нехтувати другим доданком під коренем (слід обережно застосовувати для зондових вимірювань), то

$$\sigma_{gN} = \frac{\sigma_N}{\Delta h}. \quad (11)$$

Звідки:

$$\sigma_N = \sigma_{gN} \cdot \Delta h, \quad (12)$$

та, із урахуванням проведених нами раніше розрахунків, отримуємо:

$$\sigma_N = 0,017 \cdot 25 = 0,43 \text{ N-од.} \quad (13)$$

Як показано у [20], для виразу (3) за нормальних умов:

$$\sigma_N = \sqrt{(-1,27\sigma_{Tn})^2 + (4,50\sigma_{en})^2 + (0,27\sigma_{pn})^2}, \quad (14)$$

де σ_{Tn} , σ_{en} , σ_{pn} – похибки визначення T_n , e_n та p_n відповідно.

Нехтуючи у (14) по черзі двома доданками під коренем і з урахуванням (13) оцінимо припустимі значення похибок визначення метеорологічних параметрів у ПША. Виконавши розрахунки, отримуємо, що оцінка $\sigma_{Tn} = 0,33$ К, $\sigma_{en} = 0,10$ мб, $\sigma_{pn} = 1,59$ мб. Похибки сучасних метеорологічних

приладів [16; 21] задовольняють наведеним вимогам по точності вимірювання температури і тиску повітря, а для досягнення необхідної точності вимірювання вологості необхідно виконувати серії вимірювань.

Висновки

Враховуючи, що дальність виявлення наземних РЛС повітряних об'єктів на гранично малих висотах суттєво залежить від стану приземного шару атмосфери, необхідно виконувати вимірювання індексу заломлення повітря у ПША.

Часовий інтервал здійснення вимірів повинен бути не більше за 10 с. Це є компроміс між часом поновлення інформації від РЛС та часом, за який технічно можливо здійснити дистанційними засобами зондування атмосфери декілька вимірів у діапа-

зоні висот до 200 м для отримання результатів із задовільними похибками.

Роздільна здатність вимірювань за висотою повинна бути $\Delta h \leq 25$ м, а припустима похибка визначення індексу заломлення $\sigma_N \leq 0,43$ N-од.

Якщо значення індексу заломлення відновлюються за результатами метеорологічних спостережень, то похибки вимірювання температури, тиску та вологості повітря повинні бути менше за наступні - $\sigma_{T_{п}} < 0,33$ К, $\sigma_{e_{п}} < 0,10$ мб, $\sigma_{p_{п}} < 1,59$ мб. Похибки сучасних метеорологічних приладів задовольняють наведеним вимогам щодо вимірювання температури і тиску повітря. Для досягнення необхідної точності вимірювання вологості необхідно застосовувати високоточні методи і прилади або збільшувати кількість вимірів.

Список літератури

1. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник / Я.Д. Ширман, С.Т. Багдасарян, С.А. Маляренко и др.; под ред. Я.Д. Ширмана. [2-е изд.]. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
2. Skolnik M.I. Radar Handbook: 3d ed. [Текст] / M.I. Skolnik. – McGraw-Hill Companies Inc., 2008. – 1352 p.
3. Голев К.В. Расчет дальности действия радиолокационных станций [Текст] / К.В. Голев. – М.: Сов. радио, 1962. – 204 с.
4. Распространение ультракоротких радиоволн: пер. с англ. [Текст] / Под ред. Б.А. Шиллерова. – М.: Сов. радио, 1954. – 564 с.
5. Белавін О.В. Експериментально-розрахунковий метод оцінки параметрів зон виявлення первинних та вторинних РЛС / О.В. Белавін, Г.Г. Камалтинов, О.С. Маляренко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2012. – № 3. – С. 69-73.
6. Fusco M. Radar system on field-performance check [Текст] / M. Fusco, R. Vertucci // Proc. 2016 IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace), 21-23 June 2016, Florence, Italy. – P. 71-74. <https://doi.org/10.1109/MetroAeroSpace.2016.7573188>.
7. Красюк И.П. Исследование влияния точности определения параметров М-профиля на расчетные значения ослабления электромагнитного поля в атмосферном волноводе [Текст] / И.П. Красюк, Л.А. Крестников, Л.Я. Родос // Расчет, конструирование и технология производства устройств СВЧ. – 1977. – № 111. – С. 104-108.
8. Місайлов В.Л. Вплив точності визначення вертикального градієнта індексу заломлення тропосфери на виявлення тропосферного хвилеводу / В.Л. Місайлов, М.М. Петрушенко, Ю.М. Рябуха // Системи озброєння і військова техніка. – 2008. – № 3. – С. 137-142.
9. Holá Miroslava. Contribution of the Refractive Index Fluctuations to the Length Noise in Displacement Interferometry [Електронний ресурс] / Miroslava Holá, Jan Hrabina, Martin Sarbort, Jindrich Oulehla, Ondrej Cip, Josef Lazar // Measurement Science Review. – 2015. – Volume 15. – №5. – P. 263-267. Режим доступу: <http://www.measurement.sk/2015/Hola.pdf>.
10. Murariu Gabriel. Study on the Influence of Atmospheric Parameters on the Accuracy of the Geodetic Measurements / Gabriel Murariu, Valentin Hahuie, Lucian Georgescu, Maxim Arseni, Catalina Iticescu, Adrian Gabriel Murariu, Florin Buhociu, Nicusor Nistor // AIP Conference Proceedings. – 2017. – Vol. 1796, 040009. <https://doi.org/10.1063/1.4972387>.
11. Corstanje Arthur. The influence of the atmospheric refractive index on radio Xmax measurements of air showers / Arthur Corstanje, Stijn Buitink, Antonio Bonardi, Heino Falcke, Jörg R. Hörandel, Pragati Mitra, Katie Mulrey, Anna Nelles, Jörg Paul Rachen, Laura Rossetto, Pim Schellart, Olaf Scholten, Satyendra Thoudam, Gia Trinh, Sander ter Veen, Tobias Winchen // EPJ Web of Conferences ARENA 2016 135, 01012 (2017). <https://doi.org/10.1051/epjconf/201713501012>.
12. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн [Текст] / Ф.Б. Черный – М.: Сов. радио, 1972. – 463 с.
13. Красюк Н.П. Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС [Текст] / Н.П. Красюк, В.Л. Коблов, В.Н. Красюк. – М.: Радио и связь, 1988. – 216 с.
14. Бызова Н.Л. Турбулентность в пограничном слое атмосферы [Текст] / Н.Л. Бызова, В.Н. Иванов, Е.К. Гаргер. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 263 с.
15. Казаков Л.Я. Неоднородности коэффициента преломления воздуха в тропосфере [Текст] / Л.Я. Казаков, А.Н. Ломакин. – М.: Наука, 1976. – 165 с.
16. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation WMO-No. 8. 2014 edition. Updated in 2017. [Текст]. – Geneva: World Meteorological Organization, 2014. – 1177 p.
17. World Meteorological Organization. Instruments And Observing Methods. Report №89. Kadygrov E.N. Operational aspects of different ground-based remote sensing observing techniques for vertical profiling of temperature, wind, humidity and cloud structure. A review. [Електронний ресурс] / E.N. Kadygrov. – Режим доступу до ресурсу: http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-89_RemoteSensing/IOM-89_Remote-Sensing.pdf.

18. Balsley B. Ben Extreme Gradients in the Nocturnal Boundary Layer: Structure, Evolution, and Potential Causes [Текст] / Ben B. Balsley, Rod G. Frehlich, Michael L. Jensen, and Yannick Meillier // *Journal Of The Atmospheric Sciences*. – 2003. – Vol. 60. – P. 2496-2508.
19. Инструкция по облету наземных радиолокационных станций, развернутых на боевых позициях [Текст] – М.: МО СССР, 1971. – 76 с.
20. Bean B.R. Radio meteorology [Текст] / B.R. Bean, E.J. Dutton. – New York: Dover Publications, 1968. – 435 p.
21. Мисайлов В.Л. Оперативное измерение индекса преломления для диагностики тропосферных волноводов / В.Л. Мисайлов, Ю.Н. Улянов // *Системи обробки інформації*. – 2005. – № 6. – С. 82-109.

References

1. Shirman, Ya.D., Bagdasaryan, S.T. and Malyarenko, S.A. (2007), “Radioelektronnyie sistemyi: Osnovyi postroeniya i teoriya. Spravochnik” [Radioelectronic Systems: Fundamentals of Construction and Theory. Directory], Radiotekhnika, Moscow, 512 p.
2. Skolnik, M.I. (2008), *Radar Handbook*, McGraw-Hill Companies Inc., New York, 1352 p.
3. Golev, K.V. (1962), “Raschet dalnosti deistviia radiolokatsionnykh stantsii” [The radar range calculation], Soviet radio, Moscow, 204 p.
4. Shillerov, B.A. (1954), “Rasprostranenie ultrakortkikh radiovoln” [Propagation of ultrashort radio waves], Soviet radio, Moscow, 564 p.
5. Bielavin, O.V., Kamaltynov, H.H. and Maliarenko, O.S. (2012), “Eksperymentalno-rozrakhunkovyi metod otsinky parametriv zon vyavleniia pervynykh ta vtorynykh RLS” [Experimentally-calculation method of estimation of parameters of areas of discovery primary and second radar], *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No. 3(9), pp. 69-73.
6. Fusco, M. and Vertucci, R. (2016), Radar system on field-performance check, *Proc. 2016 IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace)*, Florence, Italy, pp. 71-74. <https://doi.org/10.1109/MetroAeroSpace.2016.7573188>.
7. Krasiuk, I.P., Krestnikov, L.A. and Rodos, L.Ya. (1977), “Issledovanie vliianiia tochnosti opredeleniia parametrov M-profilia na raschetny`e znacheniia oslableniia e`lektromagnitnogo polia v atmosferom volnovode” [Investigation of the accuracy influence of the parameters determining of the M-profile on the calculated values of the electromagnetic field attenuation in the atmospheric waveguide], *Calculation, design and manufacturing technology of microwave devices*, No. 111, pp. 104-108.
8. Misaylov, V.L., Petrusenko, N.N. and Ryabukha, Yu.N. (2008), “Vpliv tochnosti viznachenniia vertikalnogo gradienta indeksu zalomleniia troposferi na viavleniia troposferного khvilevodu” [The influence of determination exactness of vertical gradient of troposphere index refraction on finding out a troposphere waveguide], *Systems of Arms and Military Equipment*, No. 3, pp. 137-142.
9. Holá, M., Hrabina, J., Sarbort, M., Oulehla, J., Cip, O. and Lazar, J. (2015), Contribution of the Refractive Index Fluctuations to the Length Noise in Displacement Interferometry, *Measurement Science Review*, Vol. 15, No. 5, pp. 263-267, www.measurement.sk/2015/Hola.pdf (Accessed 5 May 2018).
10. Murariu, Gabriel, Hahuie, Valentin, Georgescu, Lucian, Arseni, Maxim, Iticescu, Catalina, Murariu, Adrian Gabriel, Buhociu, Florin and Nistor, Nicusor (2017), Study on the Influence of Atmospheric Parameters on the Accuracy of the Geodetic Measurements, *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1796, 040009, <https://doi.org/10.1063/1.4972387>.
11. Corstanje, Arthur, Buitink, Stijn, Bonardi, Antonio, Falcke, Heino, Hörandel, Jörg R., Mitra, Pragati, Mulrey, Katie, Nelles, Anna, Rachen, Jörg Paul, Rossetto, Laura, Schellart, Pim, Scholten, Olaf, Thoudam, Satyendra, Trinh, Gia, Veen, Sander ter and Winchen, Tobias (2017), The influence of the atmospheric refractive index on radio Xmax measurements of air showers, *EPJ Web of Conferences ARENA 2016*, Vol. 135, 01012. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201713501012>.
12. Chernyi, F.B. (1972), “Rasprostranenie radiovoln” [Radio waves propagation], Soviet radio, Moscow, 463 p.
13. Krasiuk, N.P., Koblov, V.L. and Krasiuk, V.N. (1988), “Vliianie troposfery i podstilaishchei poverkhnosti na rabotu RLS” [Influence of the troposphere and the underlying surface on the radar operation], Radio and communication, Moscow, 216 p.
14. Byzova, N.L., Ivanov, V.N. and Garger, E.K. (1989), “Turbulentnost v pograničnom sloe atmosfery” [Turbulence in the boundary layer of the atmosphere], Gidrometeoizdat, Leningrad, 263 p.
15. Kazakov, L.Ya. and Lomakin, A.N. (1976), “Neodnorodnosti koeffitienta prelomleniia vozduha v troposfere” [Inhomogeneities of the air refraction index in the troposphere], Science, Moscow, 165 p.
16. World Meteorological Organization (2014), *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation WMO* No. 8, Geneva, 1177 p.
17. Kadygrov, E.N. *World Meteorological Organization. Instruments And Observing Methods. Report №89. Operational aspects of different ground-based remote sensing observing techniques for vertical profiling of temperature, wind, humidity and cloud structure*, www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-89_RemoteSensing/IOM-89_Remote-Sensing.pdf (accessed 05 May 2018).
18. Balsley, Ben B., Frehlich, Rod G., Jensen, Michael, L. and Yannick, Meillier (2003), Extreme Gradients in the Nocturnal Boundary Layer: Structure, Evolution, and Potential Causes, *Journal Of The Atmospheric Sciences*, Vol. 60, pp. 2496-2508.
19. Ministry of Defense of the USSR (1971), “Instrukciia po obletu nazemnykh radiolokatsionnykh stantsii, razvernutykh na boevykh pozitsiiaxh” [Instruction on the flyover of ground-based radars deployed on combat positions], Moscow, 76 p.
20. Bean, B.R. and Dutton, E.J. (1968), *Radio meteorology*, Dover Publications, New York, 435 p.
21. Misailov, V.L. and Ulianov, Yu.N. (2005), “Operativnoe izmerenie indeksa prelomleniia dlia diagnostiki troposfernykh volnovodov” [Operative measurement of the refractive index for the diagnosis of tropospheric waveguides], *Information Processing Systems*, No. 6(46), pp. 82-109.

Надійшла до редколегії 20.07.2018

Схвалена до друку 21.08.2018

Відомості про авторів:

Карлов Володимир Дмитрович

доктор технічних наук професор
завідувач кафедри
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-1043-684X>

Місайлов Віталій Леонідович

кандидат технічних наук старший науковий співробітник
провідний науковий співробітник Харківського
національного університету Повітряних Сил
ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-5307-5474>

Артеменко Артур Миколайович

кандидат технічних наук
начальник Головного управління персоналу – заступник
начальника Генерального штабу Збройних Сил України,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-7716-0406>

Information about the authors:

Volodymyr Karlov

Doctor of Technical Sciences Professor
Head of Department of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-1043-684X>

Vitalii Misailov

Candidate of Technical Sciences Senior Researcher
Lead Researcher of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-5307-5474>

Artur Artemenko

Candidate of Technical Sciences
Chief of the Main Department of Personnel – Deputy Chief
of the General Staff of the Armed Forces of Ukraine,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-7716-0406>

**ТРЕБОВАНИЯ К КОНТРОЛЮ РЕФРАКЦИИ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ
С УЧЕТОМ ЕЕ ВЛИЯНИЯ НА РАСЧЕТНУЮ ДАЛЬНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ
ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ПРЕДЕЛЬНО МАЛЫХ ВЫСОТАХ**

В.Д. Карлов, В.Л. Мисайлов, А.Н. Артеменко

Дальность действия радиолокационных станций зависит от условий распространения радиоволн. В приземном слое атмосферы, особенно в нижней его части, происходят достаточно быстрые и сильные изменения свойств воздуха, что существенно влияет на условия распространения радиоволн. Вследствие чего дальность действия РЛС вообще является переменной величиной и должна контролироваться. Предложен статистический подход к определению условий распространения радиоволн, при которых дальность обнаружения воздушных объектов на предельно малых высотах наземными радиолокационными станциями меняется более чем на допустимую величину. Обоснованы требования к временной и пространственной дискретности измерений параметров пограничного слоя атмосферы. Обоснованы допустимые погрешности определения индекса преломления воздуха, измерения его температуры и влажности, а также атмосферного давления.

Ключевые слова: дальность действия РЛС, предельно малая высота, пограничный слой атмосферы, рефракция, индекс преломления, погрешность измерения, требования.

**REQUIREMENTS FOR REFRACTION CONTROL IN THE BORDER LAYER OF THE ATMOSPHERE,
IN ACCORDANCE WITH ITS IMPACT ON THE CALCULATION OF THE DETERMINATION
OF AIR OBJECTS ON LIMITED SMALL HEIGHTS**

V. Karlov, V. Misailov, A. Artemenko

The range of surface radars depends on the radio waves propagation conditions. Enough speed and strong changes of air properties occur in the atmospheric boundary layer, especially in its underbody, which substantially influences on the radio waves propagation conditions. Due to what the radar range is inconstant value and must be controlled. The purpose of the article is an argumentation of requirements to the error limit of determination of vertical profile of atmosphere refraction index at control of radar detection range of air objects on extremely low heights. The air refraction index depends on current meteorological conditions, so the measuring facilities of air radiophysics (meteorological) parameters in the atmospheric ground layer must carry out measuring for finite time, in defined spatial portions and with spatial resolution and inaccuracies. On existent norms possible difference between a calculation and experiment at determination of radar detection range must not exceed 20%. This value is taken for initial one. Utilizing the statistical going near determination of the radio waves propagation conditions at which the ground-based radar detection range of air objects on extremely low heights changes more than on a possible value, the permissible inaccuracies of determination of air refractive index, measuring of air temperature and humidity, and also atmospheric pressure are argumentated. Requirements are determined to time and spatial resolutions of atmospheric boundary layer parameters measuring. Time of determination of air refractive index vertical profile must not exceed 10 seconds, and vertical resolution must be up to 25 meters. In lower 200 meter layer for false alarm ratio providing no more than 1 for 1 measuring mean square error of determination of air refractive index gradient must not exceed 0.017 N-unit/meter for the superstandard refraction detecting and 0.025 N-unit/meter for the substandard refraction detection.

Keywords: radar range, extremely low height, atmospheric boundary layer, refraction, refractive index, inaccuracy of measurements, requirements.