

# Теоретичні основи розробки та експлуатації систем озброєння

УДК 621.396.96

О.В. Белавін

Командування Повітряних Сил Збройних Сил України, Вінниця

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛІТИЧНИЙ СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ВЕРХНЬОЇ МЕЖІ ЗОНИ ВИЯВЛЕННЯ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ РАДІОЛОКАЦІЙНИМИ СТАНЦІЯМИ В ПРОЦЕСІ ЇХНЬОГО ВИПРОБУВАННЯ

*Серед низки завдань щодо визначення форми та розмірів зони виявлення ПО оглядовими РЛС найбільш складним є визначення конфігурації її верхньої межі через неможливість здійснення польотів на висотах в кілька десятків кілометрів. Відомі аналітичні методи розрахунку зон виявлення повітряних об'єктів оглядовими РЛС визначають більшою мірою лише потенційні можливості РЛС і самостійно в практиці застосування не знаходять через неможливість врахування великої кількості випадкових чинників, які в той чи інший спосіб впливають на результати розрахунків.*

*Більш прийнятним варіантом є поєднання аналітично-розрахункових методів визначення зон виявлення ПО з обмеженим обсягом експериментальних перевірок, які здійснюються через обліт спеціальними літальними апаратами або ж через побіжне використання польотів рейсових ПО. Завдяки такому поєднанню, верхня межа зони може бути розрахована за експериментальними даними, отриманими через обліт на одній заданій висоті, і спеціально виділеним літаком або ж за даними супроводження рейсових літаків, висота польоту яких завчасно відома.*

*Визначення верхньої межі зони виявлення цілей здійснюється через аналіз амплітуди прийнятих ехо-сигналів в процесі супроводження спеціальних літальних апаратів або рейсових літаків.*

**Ключові слова:** оглядові радіолокаційні станції, зона виявлення повітряних об'єктів, обліт, випробування.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Реалізація випробувань РЛС з використанням льотних перевірок є надзвичайно витратною і вимагає залучення значних коштів та матеріальних засобів. З урахуванням обмежених можливостей полігонної бази України [1] такі випробування можуть бути проведені лише частково. Брак експериментальних перевірок має бути компенсованим розробкою альтернативних методів оцінювання основних тактико-технічних характеристик РЛС, і перш за все параметрів зони виявлення. Враховуючи сучасні можливості з навігації та обробки радіолокаційної інформації, контроль необхідних параметрів зони виявлення цілей може бути здійснений без проведення обльотів або при суттєвому зменшенні їхньої кількості.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанням поєднання аналітично-розрахункових методів визначення зон виявлення ПО з обмеженим обсягом експериментальних перевірок за останні роки присвячено чимало публікацій. Актуальність такого підходу зумовлена бурхливим розвитком радіолокаційної техніки і її масовими випробуваннями, вартість яких щороку зростає. Для України з її обмеженими фінансовими можливостями та відсутністю належної полі-

гонної бази такий підхід набуває особливої ваги. В [2] розглядаються методи визначення зон виявлення цілей в умовах завад через використання імітаторів активних завад, встановлених на межі дальньої зони. В [3] аналізується метод ітераційного визначення дальності виявлення повітряних об'єктів (ПО) на різних висотах за наявності обмежених експериментальних даних разових обльотів на певній висоті. В [4] здійснюється аналіз реальних можливостей використання випромінювання Сонця для визначення ДНА та форми зони виявлення ПО. Методика з визначення окремих параметрів зони виявлення ПО за польотами рейсових літаків викладена в документі [5].

**Метою цієї статті** є розробка одного із різновидів експериментально-аналітичного способу визначення верхньої крайки зони виявлення ПО радіолокаційними станціями через накопичення і статистичну обробку даних щодо амплітуди ехо-сигналів від цілей в процесі їхнього супроводження.

### Викладення основного матеріалу

Зона виявлення цілей будь-якої оглядової РЛС являє собою досить складну просторову фігуру, форма якої залежить від багатьох детермінованих і випадкових чинників. Повну характеристику зони

виявлення цілей оглядової РЛС містить набір вертикальних перерізів, здійснених в азимутальних напрямках  $\beta_i$  з дискретністю, не більшою ніж ширина ДНА в азимутальній площині. Кожен з перерізів описується в сферичній системі координат таким співвідношенням:

$$r(\varepsilon, \beta_i) = r_0 \cdot F_0(\varepsilon) \cdot \Phi_3(\varepsilon, \beta_i), \quad (1)$$

де  $r_0$  – максимальна дальність виявлення цілей у вільному просторі, яка визначається енергетичним потенціалом РЛС, типом цілі та умовами поширення хвиль і для оглядового радіолокатора може бути подана так [6]:

$$r_0 = \sqrt[4]{\frac{P_{cp} T_0 G_e A_{ef} \sigma_{ц}}{(4\pi)^2 \cdot v_{пор} \cdot L_{РЛС} \cdot k \cdot T \cdot \Pi \cdot L_3}} = \sqrt[4]{E \frac{\sigma_{ц}}{L_3}}, \quad (2)$$

де  $P_{cp}$  – середня потужність передавача;

$T_0$  – період огляду простору;

$G_e$  – направленість зони огляду простору без урахування впливу поверхні Землі (для РЛС кругового

$$\text{огляду } G_e = \frac{2}{\int_0^{\pi/2} F_0^2(\varepsilon) \cdot \cos \varepsilon \cdot d\varepsilon});$$

$A_{ef}$  – ефективна площа антени;

$\sigma_{ц}$  – ефективна відбиваюча поверхня цілі;

$v_{пор}$  – поріг виявлення оброблених ехо-сигналів;

$L_{РЛС}$  – сумарні втрати сигналів в фідерних трактах та при обробці;

$k=1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/град – стала Больцмана;

$T \approx 300^\circ$  – приведена шумова температура;

$\Pi$  – коефіцієнт шуму приймального пристрою;

$L_3$  – затухання електромагнітних коливань при поширенні в атмосфері;

$E$  – енергетичний потенціал РЛС;

$F_0(\varepsilon)$  – діаграма направленості антени за кутом місця у вільному просторі;

$\Phi_3(\varepsilon, \beta_i)$  – множник Землі на  $i$ -тому азимутальному напрямку.

Але за реальних умов користуватись співвідношеннями (1) та (2), для розрахунку зон виявлення цілей не можна з кількох причин.

По-перше, через невизначеність інтерференційного множника Землі  $\Phi_3(\varepsilon, \beta_i)$ , а по-друге через наближеність розрахунків значення  $r_0$  за співвідношенням (2).

Інтерференційний множник Землі  $\Phi_3(\varepsilon, \beta_i)$  залежить від характеру і стану підстильної поверхні, діапазону хвиль та інших багатьох факторів. Теоретично за ідеальних умов інтерференційний множник в залежності від кута місця  $\varepsilon$  може приймати значення [7] від 0 до 2, що означає можливість появи під одними кутами місця нульових провалів в зоні виявлення цілей а під іншими – збільшення дальності

стві виявлення цілей вдвічі. Практично ж ні перше, ні друге не відбувається через те, що коефіцієнт віддзеркалення електромагнітних коливань від поверхні землі завжди менший за одиницю і залежить не тільки від характеру та стану підстильної поверхні, а й від кута падіння  $\varepsilon$  електромагнітних коливань. Більше того, в сантиметровому та дециметровому діапазонах хвиль інтерференційним множником  $\Phi_3(\varepsilon, \beta_i)$ , як правило, нехтують. Це пояснюється тим, що в сантиметровому та дециметровому діапазонах хвиль підстильна поверхня перестає бути дзеркальною, а необхідні розміри площадки, яка є суттєвою для віддзеркалення при типових значеннях висоти піднімання фазового центру антени РЛС, зростають до кількох кілометрів [7], чого важко досягти навіть для рівнинної місцевості. На рис. 1, а, б наведені вертикальні перерізи зон виявлення цілей типових трикоординатних РЛС сантиметрового та дециметрового діапазонів за умови розташування їх на ідеальних позиціях і коефіцієнті відбиття підстильної поверхні 0,5. Навіть за таких умов вплив підстильної поверхні позначається незначною мірою лише на нижній крайці першого променя. На реальних же позиціях інтерференція буде ще меншою. Крім того, навіть через незначну зміну рельєфу на різних азимутах характер інтерференції постійно змінюється так, що нижня крайка сукупної ДНА  $F_0(\varepsilon) \cdot \Phi_3(\varepsilon, \beta)$  буде носити флуктуаційний характер відносно  $F_0(\varepsilon)$ . Означені особливості і дають підставу не враховувати в РЛС сантиметрового та дециметрового діапазонів інтерференційний множник  $\Phi_3(\varepsilon, \beta)$ , тобто вважати, що  $\Phi_3(\varepsilon, \beta) = 1$ .

Для двокоординатних РЛС метрового діапазону хвиль вплив інтерференційного множника Землі на формування сукупної ДНА на відміну від РЛС сантиметрового та дециметрового діапазонів є визначальним (рис. 1, в). Але точний розрахунок сукупної ДНА також залишається неможливим через велику кількість випадкових чинників, якими характеризується стан підстильної поверхні та рельєф місцевості, де розгорнута РЛС. Реальні ДНА сильно розходяться з розрахунковими, особливо під великими кутами місця.

Спільною рисою зон виявлення цілей усіма оглядовими РЛС контролю повітряного простору незалежно від діапазону хвиль є складний характер зміни верхньої крайки, який розраховується лише теоретично, оскільки визначити його об'ємом практично неможливо через необхідність здійснення польотів на висотах в кілька десятків кілометрів.

Частковим вирішенням означеної проблеми є штучне стиснення зони виявлення цілей через введення в приймальний тракт РЛС каліброваного затухання. Наприклад, при ослабленні прийнятих ехо-сигналів на 12 дБ зона стискається рівно вдвічі (крива  $F_{ст}(\varepsilon)$  на

рис. 1, в). В цьому випадку виникає можливість визначення верхньої крайки через обльоти на досяжних висотах від 10 до 18 км. Такий спосіб визначення верхньої крайки зони виявлення цілей мав застосування при випробуванні таких РЛС великих та середніх висот, як 5Н84А, 5Н87 та ін. Як різновид означеного способу може використовуватися обліт на фіксованій висоті за різних значень послаблення ехо-сигналів (рис. 2).

Але при такому штучному стисненні зони виявлення цілей методика обльоту залишається незмінною і передбачає багаторазові польоти літаків або на різних висотах, або на фіксованій висоті.

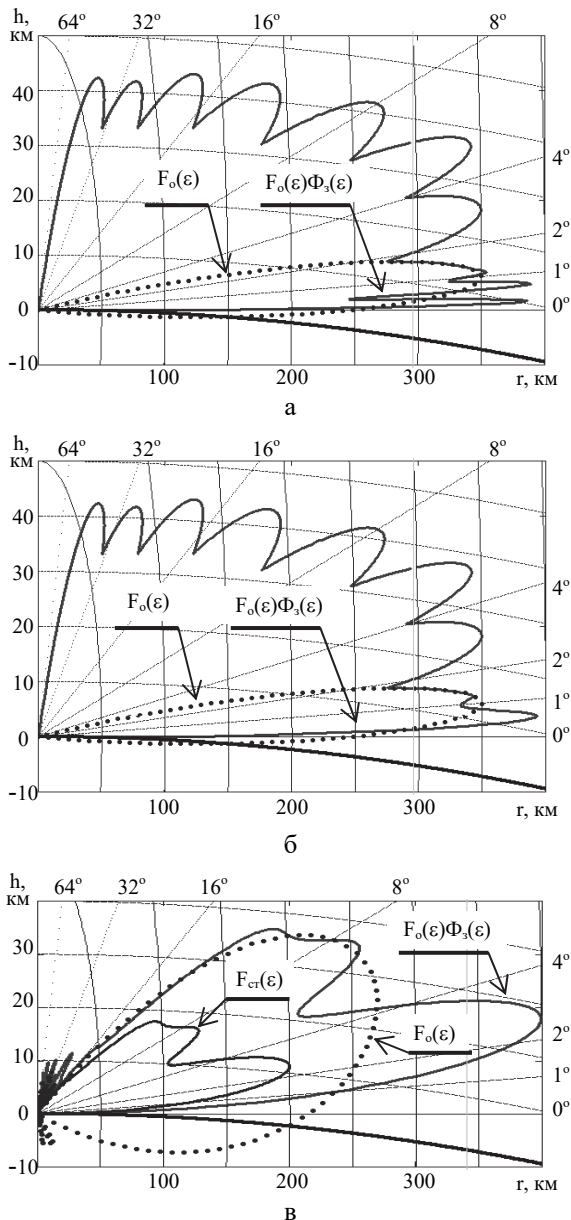


Рис. 1. Вплив поверхні Землі на формування зон виявлення цілей в РЛС різних діапазонів хвиль:

- а – сантиметрового:  $\lambda=0,1$  м,  $h_a=6$  м;
- б – дециметрового:  $\lambda=0,23$  м,  $h_a=6$  м;
- в – метрового  $\lambda=1,7$  м,  $h_a=10$  м

В сучасних РЛС з розвинутою системою документування сигналів та інформації доступною є процедура запису амплітуди прийнятих від цілі ехо-сигналів в процесі її супроводження. Це докорінно змінює можливості з оперативної оцінки зони виявлення цілей такими РЛС.

Дійсно, в момент входження цілі в зону виявлення (рис. 3, а) амплітуда сигналу  $U_c$  досягає порогового значення  $U_n$ , тобто відношення "сигнал/порог"

$$q = \frac{U_c}{U_n} = 1; \quad (3, a)$$

або за логарифмічною шкалою

$$q_1 = 20 \cdot \lg \frac{U_c}{U_n} = 0 \text{ дБ}. \quad (3, б)$$

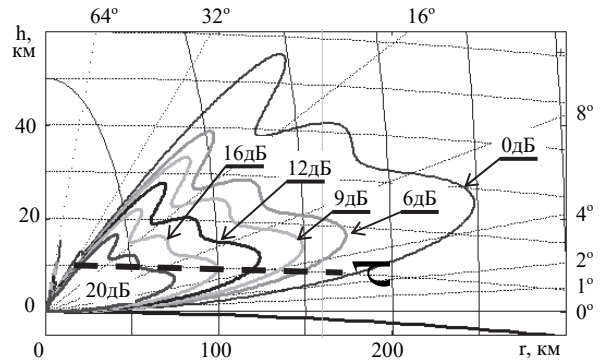


Рис. 2. Зміна розмірів зони виявлення цілей РЛС при введенні ослаблення в тракт обробки сигналів

Якби ціль з моменту її виявлення летіла зі зниженням так, щоб її траєкторія польоту точно збігалась з нижньою крайкою зони то відношення (3) залишалися б незмінними.

Якщо ж ціль здійснює політ на постійній висоті (рис. 3, а), то вона входить всередину зони, і у міру наближення цілі до точки стояння РЛС амплітуда сигналу буде зростати пропорційно відношенню

$\left(\frac{r_b}{r_n}\right)^2$ , тобто

$$U_c = U_n \left(\frac{r_b}{r_n}\right)^2, \quad (4)$$

де  $r_n$  – поточна похила дальність до супроводжуваної цілі, а  $r_b$  – дальність виявлення цілі під тим кутом місця, під яким на даний момент перебуває супроводжувана ціль. Підставляючи (4) в (3, а; 3, б), отримаємо закон зміни відношення "сигнал/порог" в процесі перетинання ціллю зони виявлення:

$$q(r_n) = \frac{\left(\frac{r_b}{r_n}\right)^2 U_n}{U_n} = \left(\frac{r_b}{r_n}\right)^2; \quad (5, a)$$

$$q_1(r_n) = 20 \cdot \lg \frac{\left(\frac{r_B}{r}\right)^2 U_n}{U_n} = 40 \cdot \lg \left(\frac{r_B}{r_n}\right). \quad (5, б)$$

На рис. 3, б наведена залежність величини відношення "сигнал/поріг" від похилої дальності до цілі, яка перетинає зону виявлення цілей типової оглядової РЛС (рис. 3, а) на висоті 10 км.

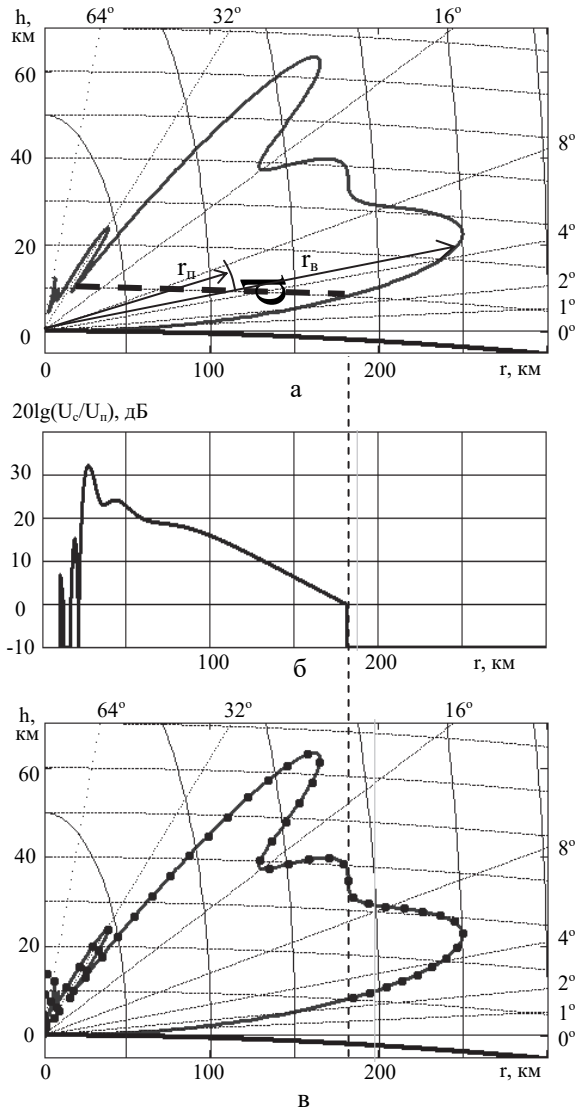


Рис. 3. Визначення верхньої крайки зони виявлення цілей РЛС:  
 а – вертикальний перетин реальної зони виявлення;  
 б – характер вимірної залежності відношення "сигнал/поріг" від дальності при супроводженні цілі, що ввійшла в зону і здійснює політ на висоті 10 км;  
 в – розрахована за даними вимірювань верхня крайка зони виявлення (жирні крапки)

Щоб визначити перетин зони виявлення по лінії траєкторії польоту цілі, достатньо для кожної точки траси цілі розрахувати кут місця  $\varepsilon$  за співвідношенням

$$\varepsilon(r_n) = \arcsin\left(\frac{h_{ц}}{r_n} - \frac{r_n}{2R_{зе}}\right), \quad (6)$$

де  $h_{ц}$  – висота польоту цілі, а  $R_{зе}$  – еквівалентний радіус Землі, і визначити дальність виявлення цілі під цими кутами місця за співвідношенням.

$$r_B = r_n \sqrt{q(r_n)} \quad (7, а)$$

або

$$r_B = r_n 10^{\frac{q_1(r_n)}{20}}. \quad (7, б)$$

Отримана сукупність розрахункових даних являє собою перетин зони виявлення по трасі польоту цілі в сферичній системі координат (рис. 3, в).

Можна не обчислювати кути місця  $\varepsilon$ , а розрахувати перетин зони виявлення в декартовій системі координат за співвідношеннями:

$$\begin{cases} x_B(r_n) = r_n \cdot \sqrt{q(r_n)} \cos \left[ \arcsin \left( \frac{h_{ц}}{r_n} - \frac{r_n}{2R_{зе}} \right) \right]; \\ y_B(r_n) = r_n \cdot \sqrt{q(r_n)} \left( \frac{h_{ц}}{r_n} - \frac{r_n}{2R_{зе}} \right); \end{cases} \quad (8, а)$$

$$\begin{cases} x_B(r_n) = r_n \cdot 10^{\frac{q_1(r_n)}{20}} \cos \left[ \arcsin \left( \frac{h_{ц}}{r_n} - \frac{r_n}{2R_{зе}} \right) \right]; \\ y_B(r_n) = r_n \cdot 10^{\frac{q_1(r_n)}{20}} \left( \frac{h_{ц}}{r_n} - \frac{r_n}{2R_{зе}} \right). \end{cases} \quad (8, б)$$

В обох випадках розрахунок зони виявлення здійснюється лише в області існування запису  $q(r_n)$  чи  $q_1(r_n)$ , тобто в секторі кутів місця вищому за той кут місця, під яким була виявлена цілі (рис. 3).

### Висновки

1. Проведення випробувань РЛС з використанням традиційних об'єктів вимагає залучення значних коштів та матеріальних засобів і є неприйнятним за умов обмеженого фінансування Збройних Сил України. Крім того, за умов відсутності належної полігонної бази України такі випробування можуть бути проведені лише частково.

2. Багаторазові спроби суто теоретичних розрахунків зон виявлення повітряних об'єктів оглядовими РЛС довели їх практичну непридатність через неможливість врахування великої кількості випадкових чинників, які так чи інакше впливають на результати розрахунків.

3. Компромісним варіантом є застосування експериментально-розрахункових методів, які поєднують обмежений обсяг експериментальних даних з аналітичними розрахунками зон виявлення ПО.

4. В сучасних та перспективних РЛС, які мають розвинену систему документування, контроль необхідних параметрів зони виявлення цілей може бути

здійснений без проведення обльотів спеціальними літальними апаратами або ж через побіжне використання польотів рейсових ПО.

5. Визначення верхньої межі зони виявлення цілей може бути здійснене через використання практично отриманого запису рівня відбитого від цілі ехо-сигналу в процесі її супроводження для перерахунку кожної точки траси супроводження в точку верхньої крайки зони виявлення.

## Список літератури

1. Камалтинов Г.Г. Аналіз існуючої експериментально-випробувальної бази України з випробувань наземних радіолокаційних засобів / Г.Г. Камалтинов, А.А. Курило // IX наукова конференція Харківського університету Повітряних Сил: тези доповіді. – Х.: ХУПС, 2013. – С. 149.

2. Зюкин В.Ф. Требования к удалению имитаторов активных помех при полигонных испытаниях РЛС / В.Ф. Зюкин, Д.Ю. Свистунов, А.В. Белавин // Системы обработки информации. – Х.: ХУПС, 2013. – №1(108). – С. 56-60.

3. Белавин О.В. Экспериментально-розрахунковий метод оцінки параметрів зон виявлення первинних та вторинних РЛС / О.В. Белавин, Г.Г. Камалтинов, О.С. Малярченко // Наука і техніка Повітряних Сил Зброй-

них Сил України: наук.-техн. ж. – Х.: ХУПС, 2012. – № 3(9). – С. 69-73.

4. Климченко В.Й. Аналіз можливостей використання радіовипромінювання Сонця для зняття діаграм направленості антен сучасних РЛС розвідки повітряних цілей / В.Й. Климченко, Г.Г. Камалтинов, О.В. Белавин // Системи озброєння і військова техніка: наук. ж. – Х.: ХУПС. – 2012. – № 3(31). – С. 63-68.

5. Doc. 8071, Том III, ІКАО, 1998. “Руководство по испытаниям радионавигационных средств. Испытания обзорных радиолокационных систем”; Manual on Testing of Radio Navigation Aids Volume III - Testing of Surveillance Radar Systems (Doc 8071).

6. Основы построения РЛС РТВ / В.П. Блохин, Б.Ф. Бондаренко, В.Т. Неснов, В.Е. Угольников; под ред. Б.Ф. Бондаренко. – К.: КВИРТУ ПВО, 1987. – 368 с.

7. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн / Ф.Б. Черный. Изд. 2-е, доп. и переработ. – М.: Соврадио, 1972. – 464 с.

Надійшла до редколегії 13.10.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.П. Лещенко, Харківський університет Повітряних Сил, Харків.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ ЗОНЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ РАДИОЛОКАЦИОННЫМИ СТАНЦИЯМИ В ПРОЦЕССЕ ИХ ИСПЫТАНИЯ

А.В. Белавин

Среди ряда задач относительно определения формы и размеров зоны обнаружения ВО обзорными РЛС наиболее сложным является определение конфигурации ее верхней границы из-за невозможности осуществления полетов на высотах в несколько десятков километров. Известные аналитические методы расчета зон обнаружения воздушных объектов обзорными РЛС определяют в большей степени лишь потенциальные возможности РЛС и самостоятельно в практике применения не находят из-за невозможности учета большого количества случайных факторов, которые так или иначе влияют на результаты расчетов.

Более приемлемым вариантом является сочетание аналитических расчетных методов определения зон обнаружения ВО с ограниченным объемом экспериментальных проверок, которые осуществляются путем облета специальными летательными аппаратами или же путем полетного использования полетов рейсовых ВО. Благодаря такому сочетанию, верхняя граница зоны может быть рассчитана по экспериментальным данным, полученным путем облета на одной заданной высоте, специально выделенным самолетом или же по данным сопровождения рейсовых самолетов, высота полета которых заблаговременно известна.

Определение верхней границы зоны обнаружения целей осуществляется путем анализа амплитуды принятых эхо-сигналов в процессе сопровождения специальных летательных аппаратов или рейсовых самолетов.

**Ключевые слова:** обзорные радиолокационные станции, зона обнаружения воздушных объектов, облет, испытание.

## EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL METHOD FOR DETERMINING THE UPPER LIMIT OF THE DETECTION AREA OF AIR OBJECTS BY RADARS IN THE PROCESS OF TESTING

O.V. Bielavin

Among a number of tasks in determining the shape and size of the detection area of air objects by surveillance radars most complicated is determining the configuration of the upper border because of the impossibility of the flight at an altitude of several tens of kilometers. Known analytical methods for calculating the detection areas of air objects by surveillance radars determine mostly potential possibilities of radars and independently in application practice is not used because of the impossibility of keeping a large number of random factors that affect the results of the calculations.

A more affordable option is a combination of the analytical calculation methods for determining the detection areas of air objects with a limited number of experimental tests which are carried out by overflight special aircrafts or scheduled airplanes. Thanks to this combination upper-bound of the area can be calculated from the experimental data obtained by the flight at a predetermined height by dedicated aircraft or according to data obtained by tracking scheduled airplanes where the altitude is previously known.

Determining the upper limit of the detection area of air objects is carried out by analyzing the amplitude of the received echo-signals in the process of tracking specific aircrafts or scheduled airplanes.

**Keywords:** surveillance radars, detection area of air objects, flight, test.