

УДК:621.396

В.В. Літвінов, В.Ф. Зюкін, В.Й. Климченко

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ І ПАРАМЕТРІВ ЗОНИ ВИЯВЛЕННЯ МАЛОВИСОТНИХ РЛС Х-ДІАПАЗОНУ

Для розвідки маловисотних цілей, контролю польотів малої авіації, захисту об'єктів від тероризму пропонується створити суцільне маловисотне радіолокаційне поле на основі мережі постів радіотехнічних військ, основу яких складають уніфіковані РЛС Х-діапазону (8 – 12,5 ГГц), що розміщуються на стаціонарних вежах. Збір (для подальшої обробки і відображення в радіотехнічних центрах) радіолокаційних сигналів і інформації, що отримується радіолокаційними постами, може здійснюватися в автоматичному режимі за допомогою радіоканалів зв'язку між вежами. Обговорюється технічна зовнішність, параметри зони виявлення і переваги таких РЛС. Їх прототипом можуть служити штатні бортові метеонавігаційні РЛС літаків цивільної авіації типу "Гроза", "Буран".

**Ключові слова:** маловисотне радіолокаційне поле, РЛС Х-діапазону, зона виявлення, енергетичний потенціал РЛС.

### Вступ

Створення і підтримка ефективного суцільного радіолокаційного (РЛ) поля (РЛП) на малих висотах (до 3 км з нижньою крайкою 50 – 100 м) завжди було найважливішим завданням радіотехнічних військ (РТВ) Протиповітряної оборони [1, 2].

З часом гострота проблеми маловисотного (МВ) радіолокаційного поля для розвинених країн не зменшується, а зростає, в т.ч. і для України – не дивлячись на зниження рівня військових загроз і її позаблоковий статус. Це пов'язане з бурхливим розвитком малої – в основному приватної – авіації, зростанням терористичних загроз і різного роду спроб незаконного використання повітряного простору.

Світова тенденція – інтеграція військових і цивільних (ОПР) систем радіолокаційного контролю повітряного простору в системи єдиного радіолокаційного поля [1, 2]. Проте стратегія ІКАО в цілому стимулює зниження ролі первинної радіолокації (Концепція CNS/ATM), що чітко спостерігається і в Україні [1]. Взаємодія ОПР з РТВ має місце лише в трасовому польотному просторі, тобто на середніх і великих висотах. Отже, РТВ повинні будувати власну достатньо густу мережу радіолокаційних станцій маловисотного поля.

При підйомі антен на 30...50 м для покриття всієї території України необхідно близько до 120 позицій маловисотних радіолокаційних постів. При оптимізації пунктів розміщення постів з урахуванням рельєфу місцевості можна вирішити завдання формування суцільного радіолокаційного поля і функціонування системи зв'язку між пунктами при меншому числі позицій (близько до 100), з радіусом зони відповідальності поста – 50 км (просторовий крок постів – 80...100 км) і нижньою крайкою суцільного радіолокаційного поля – до 50 м.

Така мережа традиційних маловисотних радіо-

локаційних рот економічно і організаційно абсолютно неприйнятна. До того ж вітчизняні номінально маловисотні РЛС фактично є радіолокаторами малих і середніх висот; для класу маловисотних вони дуже важкі, громіздкі, енергоємні і дорогі. Через це необхідно переходити до системи радіолокаційних постів за принципом: один пост – один постійно працюючий радіолокаційний комплект максимальної надійності і мінімальної складності і вартості. Для маловисотних радіолокаційних постів потрібно і можна створювати спеціалізовані РЛС з невеликою дальністю і верхньою межею зони. Природно використовувати короткохвильову частину сантиметрового (Х-band) діапазону хвиль: 8..12,5 ГГц.

### Основна частина

#### Принципи побудови і ТТХ РЛС Х-діапазону

1. Укорочення довжини хвилі при зменшенні розмірів зони огляду – поширена практика [1], наприклад, при переході від трасових РЛС великих і середніх висот (радіус зони огляду  $r_m \approx 200 \text{ км} \approx 370 \text{ км}$ , довжина хвилі  $\lambda \approx 23 \text{ см}$ ) до аеродромних або «МВ» ( $r_m \approx 100 \text{ км} \approx 180 \text{ км}$ ,  $\lambda \approx 10 \text{ см}$ ). Подальше зменшення зони по дальності – до  $r_m \approx 50 \text{ км} \approx 90 \text{ км}$  веде в Х-діапазон:  $\lambda \approx 2,3...5 \text{ см}$ .

2. Маловисотні РЛС нового покоління доцільно виконувати як масштабовані «копії» 3-координатних імпульсних оглядових РЛС S-діапазону хвиль ( $\lambda \approx 10 \text{ см}$ ). Рекомендується вибір  $\lambda \approx 2,3...3 \text{ см}$ , що дозволить обмежити розміри антен до  $2 \text{ м} \times 2 \text{ м}$  (рис. 1). Коефіцієнт масштабування антен – близько до 3. При цьому зберігаються одностороннє вимірювання і високе розрізнення по дальності, багатопроменева побудова «косекансної» зони виявлення, мала ширина променів діаграми спрямованості антени – близько до  $1,5^\circ$ .

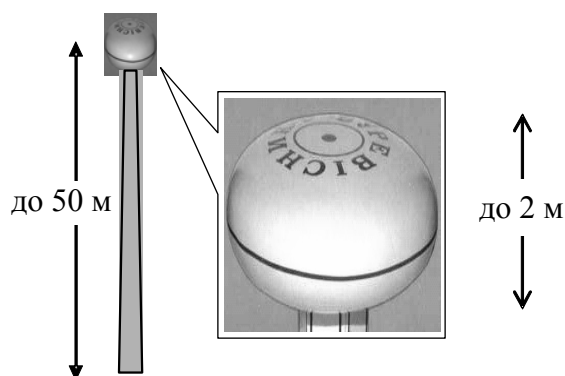


Рис. 1. Схематичне представлення РЛС Х – діапазону (під обтічником) на вишці

3. Частота посилок імпульсів – до 1000 Гц. Радіоімпульси – прості, тривалістю до 1 мкс, розрізнення по дальності – менше 150 м.

Низька частота посилок усуває небезпеку накладки пасивних завад другого такту (від гір і метеоутворень), особливо небезпечних для слабких сигналів на межі зони виявлення.

При цьому гарантуються [1] високоефективна адаптивна селекція рухомих цілей (практично без ефекту «сліпих» швидкостей) і забезпечується доплерівсько-спектральна ідентифікація (класифікація) об'єктів локації, включаючи ототожнення відміток в трасах і розділення літальних апаратів і наземного транспорту.

Для розпізнавання «спектральний портрет» є значно зручнішим, інформативнішим і простішим, ніж "дальністний портрет" [1].

4. Основний період кругового огляду  $T_0 = 10$  с (6 об/хв). Підвищений темп огляду – 12 об/хв ( $T_0 = 5$  с) можливий, але в суцільному МВ полі практично непотрібний і навіть шкідливий (підвищена витрата потужності і ресурсу приводу обертання антени).

5. За конструктивну основу маловисотних РЛС доцільно прийняти бортові РЛС типу «Буран», «Гроза» (Україна), «Контур-10Ц» (РФ, рис. 2): робоча довжина хвилі – 3 см, ефективна площа розкриву антени  $A_{\text{еф}}$  – до  $1 \text{ м}^2$ , середня потужність випромінювання передавача  $P_{\text{ср}}$  до 50 Вт при споживаній потужності до 500 Вт, маса менше ніж 100 кг. Радіолокаційні станції компонуються у вигляді функціональних блоків та хвилевідно-кабельних з'єднань. Переваги: блочна модульність, простота захисту від метеофакторів, малі габарити і маса блоків та комплекту в цілому, мале енергоспоживання, простота ремонту та обслуговування. Можуть використовуватися на працюванні й інших українських виробників наземних (берегових) і корабельних РЛС Х-діапазону (НВО «Квант» та його «спадкоємці»).

6. Необхідна дальність радіогоризонту досягається установкою РЛС на вежах (щоглах) заввишки до 50 м (рис. 3), захист від метеофакторів і мале

споживання приводу обертання – розміщенням РЛС під радіопрозорим обтічником (рис. 1) і застосуванням економічних і надійних безредукторних приводів обертання (відповідний вітчизняний досвід, зокрема на НВО «Квант», є).

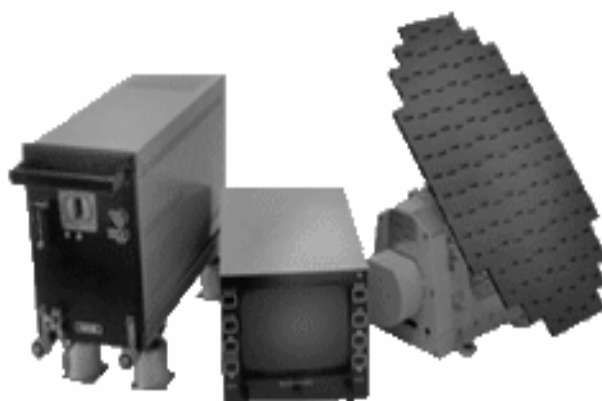


Рис. 2. Метеонавігаційна бортова РЛС «Контур-10Ц» ( $\lambda=3,2$  см,  $A_{\text{еф}}$  – до  $0,15 \text{ м}^2$ ,  $P_{\text{ср}}$  – до 10 Вт,  $r_m \approx 30$  км в реж. «Метео», маса 12 кг): а) антенний блок (щілинна антенна решітка); б) багатофункціональний індикатор; в) приймально-передавальний блок



Рис. 3. Вишка (висота 30...50 м) з антеною бістатичної РЛС «Струна» (ОАО НИТЕЛ, РФ)

7. Безвідмовність досягається повним дублюванням функціональних модулів.

Щільність маловисотних радіолокаційних постів дозволяє використовувати «безлюдні» технології за рахунок трансляції в радіотехнічні центри по

радіолініях X-діапазону радіолокаційної інформації і навіть луна-сигналів для подальшої обробки (аналогічно кореляційно-базовому багатопозиційному комплексу РЛ 5Д37 «База»).

Професійні кадри при цьому на МВ РЛ постах не потрібні. Обслуговування постів буде зводиться до поповнення запасів пального і заміни відмовивших модулів РЛС та елементів каналів зв'язку; охорона може здійснюватись найма-ним персоналом.

### Розрахунок енергетичних показників і параметрів зони виявлення РЛС X-діапазону

Розрахунок енергетичних показників і параметрів зони виявлення радіолокаційних станцій мало-висотного поля доцільно здійснювати в такій послі-довності.

1. Вибір форми вертикального перетину зони виявлення цілей. Оскільки основним класом цілей для таких радіолокаційних станцій є легкомоторні літаки з ефективною поверхнею розсіяння  $\sigma=1 \text{ м}^2$ , то рекомендується косекансна форма зони вияв-лення з верхньою межею  $h_m \approx 3 \text{ км}$  і радіусом зони огляду  $r_m \approx 80 \text{ км}$ .

2. Для аналізу енергетичних співвідношень і характеристик зони виявлення РЛС представимо вертикальний перетин зони в декартовій системі координат: кут місця  $\varepsilon$  – дальність  $r$  (рис. 4).

Шкала дальності  $r$  (на лівій вертикальній осі) відображена в логарифмічному масштабі. Узгодже-на з нею допоміжна лінійна шкала  $N$  (справа) слу-жить для розрахунку відносних приростів енерге-тичного потенціалу  $\Pi$  (у децибелах) при відповід-ній зміні дальності дії РЛС  $r_m$ . Враховуючи, що  $\Pi \equiv r_{m4}$ , запишемо:

$$N = 10 \lg \frac{\Pi_1}{\Pi_2} = 40 \lg \frac{r_{m1}}{r_{m2}}, \text{ [дБ]}. \quad (1)$$

Числові значення дБ на шкалі  $N$  відповідають початковій дальності  $r = r_{m1} = 100 \text{ км}$ , тому точкам  $r_{m2} = 50; 25; 12,5 \text{ км}$  відповідають значення

$$N = -12; -24; -36 \text{ дБ},$$

тобто при кожному зменшенні дальності дії в 2 рази потрібний потенціал РЛС знижується на 12 дБ.

3. На графіці рис. 4 показані залежності даль-ності до цілі  $r_{ц}$  від її кута місця  $\varepsilon_{ц}$  при польоті на висоті  $h_{ц}$  (криві 1...7).

Розрахунок  $r_{ц}$  проводився виходячи з того, що в умовах стандартної рефракції оцінка висоти цілі в РЛС проводиться за формулою:

$$h_{ц} = r_{ц} \sin \varepsilon_{ц} + \frac{r_{ц}^2}{2R_{зе}}, \quad (2)$$

де  $R_{зе} \approx 8470 \text{ км}$  – еквівалентний радіус Землі.

Звідси

$$r_{ц} = r_{ц}(\varepsilon_{ц}) = R_{зе} \left( \sqrt{\sin^2 \varepsilon_{ц} + \frac{2h_{ц}}{R_{зе}}} - \sin \varepsilon_{ц} \right). \quad (3)$$

Криві 1, 2, 3 (штрихові лінії) відповідають висотам  $h_{ц}=100; 200; 500 \text{ м}$ , а криві 4-7 (суцільні лінії) – висотам  $h_{ц}=1; 2; 3; 4 \text{ км}$ .

Крива 6 (виділена товщиною) для  $h_{ц}=h_m=3 \text{ км}$  визначає (в межах дальностей  $r = 27...80 \text{ км}$ ) верхню (ізовисотну) крайку вертикального перетину необ-хідної косекансної зони виявлення. Лінія рівних дальностей  $r = r_m = 80 \text{ км}$  (також виділена товщи-ною) в межах кутів місця  $\varepsilon = 0...20$  описує ізодаль-ністну крайку цієї зони.

4. Основний етап розрахунків пов'язаний з ра-ціональним розміщенням парціальних променів в межах вертикального перетину необхідної косекан-сної зони виявлення (побудова і аналіз фактичної зони виявлення).

Подібно до маловисотної РЛС 19Ж6, для фор-мування фактичної косекансної зони використовує-мо 4 парціальних промені з шириною кожного по куту місця (по рівню половинної потужності)  $\varepsilon_{п}=1,5^\circ$ , перекриваючи діапазон  $\varepsilon$  від  $\varepsilon_{\min} = 0$  до  $\varepsilon_{\max} = 6^\circ$ .

Згідно з узагальненим рівнянням радіолокації, в режимі регулярного кругового огляду по азимуту  $\beta$ , при використанні однієї приймально-переда-вальної антени, межі зони виявлення визначаються тілом обертання:

$$r_m(\beta, \varepsilon) = r_m \cdot F(\varepsilon) = 4 \sqrt{\frac{P_{ср} T_0 G_e A_{эф} Y}{4p^2 N_0}} \cdot F(\varepsilon), \quad (4)$$

де  $\nu$  – сумарний коефіцієнт розрізнюваності, що включає також всі втрати енергії сигналу (для су-часних РЛС  $\nu \approx 23 \text{ дБ}$ );

$N_0$  – спектральна щільність потужності шуму ( $\approx 2 \cdot 10^{-20} \approx \text{Дж}$ );

$F(\varepsilon)$  – нормована діаграма спрямованості анте-ни по куту місця;

$$G_e = \frac{2}{F^2(\varepsilon) \cdot \cos \varepsilon d\varepsilon} - \text{еквівалентний коефіціє-}$$

єнт підсилення (коефіцієнт форми зони виявлення).

Для необхідної косекансної форми зони вияв-лення

$$G_e = \frac{2}{\sin\left(\frac{h_m}{r_m}\right) \left[ 2 - \frac{\sin\left(\frac{h_m}{r_m}\right)}{\sin\left(\frac{r_{е\max}}{180}\right)} \right]} = 30,5.$$

Для парціального променя дзвонової форми, виходячи з умови

$$F^2(\varepsilon_l/2) = 0,5,$$

вибрана функція

$$F(\varepsilon) = e^{-p \frac{(0,94\varepsilon_{0, \Pi})^2}{2}}$$

тому  $G_e = 0,94 \cdot 360 / \pi l = 72$ .

Таким чином, форма променя в координатах  $\varepsilon$ - $r$  визначається формою функції  $F(\varepsilon)$ .

З урахуванням цього, на рис. 4 представлено раціональне заповнення кутомісцевого перетину необхідної зони виявлення променями А, Б, В і Г дзвонової форми («дзвонова» функція зазвичай прийнятно описує головну пелюстку «голчатої» діаграми спрямованості антени).

Розміщення парціальних променів по дальності  $r$  і куту місця  $\varepsilon$  вибрано так, щоб, з урахуванням сумісної обробки сигналів суміжних кутомісцевих каналів, «нарощена» результуюча зона виявлення (області приросту зони – ділянки Д – відмічені жирними штриховими лініями) охоплювала необхідну косекансну зону з параметрами  $r_m = 80$  км,  $h_m = 3$  км,  $\varepsilon_{\max} = 6^\circ$ .

Як видно (з використанням шкали N), потрібний потенціал променів Б, В і Г є нижчим за потенціал променя А на 1,85; 10,6; і 16 дБ відповідно. Це означає, що, крім енергетичних витрат на формування променя А, потрібно збільшити потенціал РЛС (для заповнення ізвисотної частини зони виявлення трьома променями) в 1,76 раз, тобто на 2,5 дБ.

5. Проведемо розрахунок енергетичного потенціалу, необхідного для формування фактичної зони виявлення за допомогою чотирьох променів А, Б, В і Г.

Вважаючи, що при розмірах антени МВ РЛС до  $2 \text{ м} \times 2 \text{ м}$  неважко отримати  $A_{\text{эф}} = 2 \text{ м}^2$ , можна знайти, з використанням (4), потрібну (для максимальної дальності дії  $r_m = 90$  км) середню потужність випромінювання променя А ( $G_e = 72$ ):

$$P_{\text{ср}} = 29 \text{ Вт.}$$

Тоді (при формуванні фактичної зони виявлення) сумарна середня потужність випромінювання маловисотних РЛС

$$P_{\text{ср фак}} = P_{\text{ср}} \cdot 1,76 = 51 \text{ Вт.}$$

Якщо провести розрахунок необхідної середньої потужності випромінювання при точному формуванні необхідної косекансної зони виявлення одним (гіпотетичним) променем ( $r_m = 80$  км,  $G_e = 30,5$ ), то отримаємо

$$P_{\text{ср тр}} = 42,5 \text{ Вт.}$$

Незначне перевищення середньої потужності  $P_{\text{ср фак}}$  над  $P_{\text{ср тр}}$  (на 20%) обумовлене тим, що фактична зона виявлення охоплює потрібну з деяким надлишком, тому необхідний додатковий енергетичний потенціал (в межах 0,8 дБ).

Відношення середніх потужностей випромінювання  $P_{\text{ср тр}} / P_{\text{ср фак}} \leq 1$  може служити критерієм якості «розкладки» парціальних променів.

Таким чином, для енергетичного забезпечення сформованої фактичної зони виявлення в маловисотних РЛС Х-діапазону достатня середня потужність випромінювання

$$P_{\text{ср фак}} \approx 50 \text{ Вт.}$$

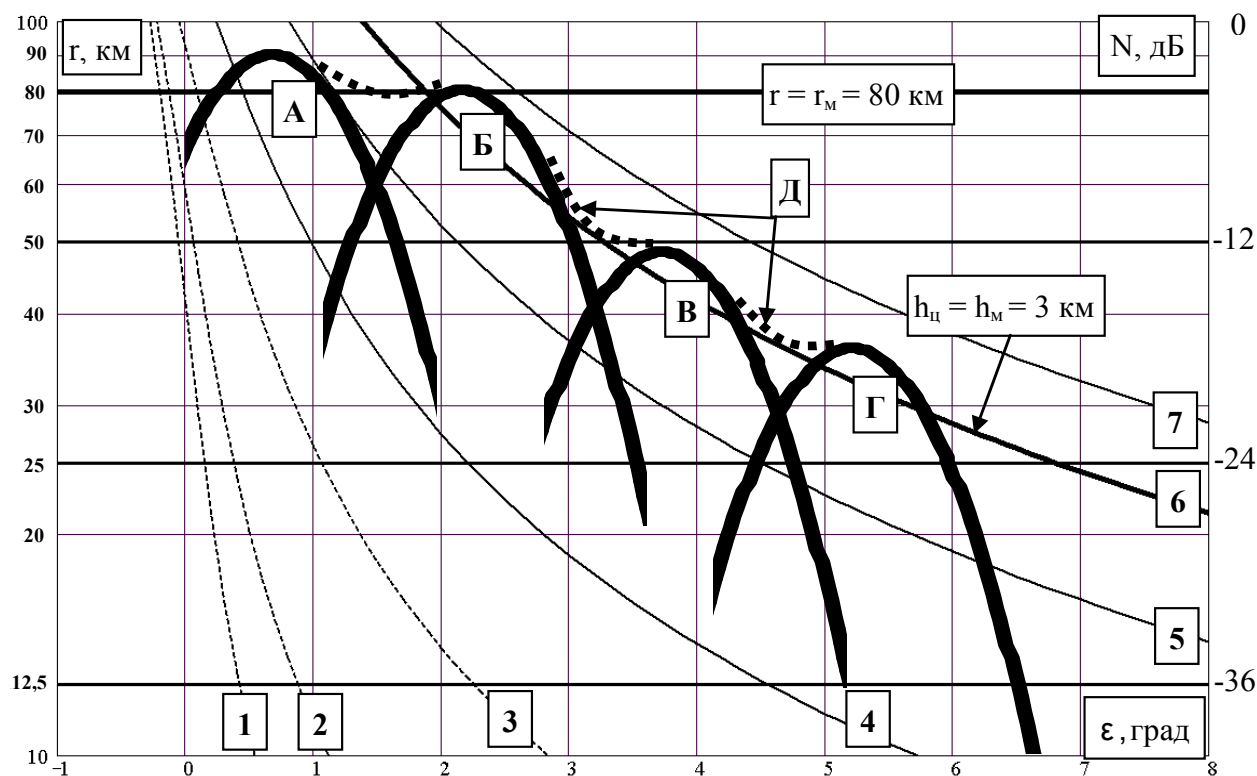


Рис. 4. Вертикальний перетин зони виявлення РЛС в прямокутних координатах  $\varepsilon$ - $r$

Якщо збільшити ефективну площу розкриття антени  $A_{\text{эф}}$  до  $3 \text{ м}^2$ , то, відповідно, середня потужність випромінювання маловисотних РЛС знизиться приблизно до 30 Вт.

6. Використання графічних побудов, що подібні розглянутим (рис. 4), дозволяє визначати і коректувати різні параметри зони виявлення, погоджуючи їх з характеристиками РЛС. При цьому, для точнішого опису нижньої крайки зони з урахуванням інтерференційного спотворення променів, до співмножника  $F(\epsilon)$  в (4) можна додати інтерференційний множник Землі.

### Висновки

1. При площі антени РЛС Х-діапазону  $A_{\text{эф}} = 2 \dots 4 \text{ м}^2$  середня потужність випромінювання  $P_{\text{ср}}$  не перевищує 50 Вт (можливо 20...30 Вт). Потрібний для цих РЛС енергопотенціал, відносно РЛС 19Ж6, є нижчим приблизно на 27 дБ.

Сумарні витрати електроенергії при функціонуванні маловисотних РЛС всіх позицій стаціонарної мережі не перевищать 50 кВт, що приблизно на порядок менше, ніж при створенні нижнього ярусу радіолокаційного поля традиційними методами.

2. Рекомендовані маловисотні радіолокаційні пости можуть застосовуватися автономно або в комплексі з існуючими РЛС для нарощування зони виявлення у відповідальних напрямках, при створенні локального (осередкового) радіолокаційного поля для прикриття важливих об'єктів.

3. Вартість (на світовому ринку) берегових, боєвих (корабельних, авіаційних) РЛС Х-діапазону в типовій комплектації зазвичай не перевищує \$10 тис. В сукупності з вежею (аналогічній вежі мобільного зв'язку, рис. 3) облаштування маловисотного радіолокаційного поста коштуватиме приблизно на 2 порядки менше, ніж відповідне облаштування позиції з РЛС типу 19Ж6.

4. Зважаючи на високу просторову спрямованість і низький рівень випромінювань МВ РЛ поста, ступінь його дії на навколишнє середовище буде не більшим, ніж веж мобільного зв'язку, що дозволить уникнути конфліктів з місцевим населенням, обумовлених екологічними міркуваннями.

### Список літератури

1. Літвінов В.В. Радіолокатори систем контролю повітряного простору: ретроспектива і сучасні проблеми інтеграції і уніфікації / В.В. Літвінов // Прикладна радіоелектроніка. – 2004. – Том 3, № 4. – С. 61-74.

2. Літвінов В.В. Шляхи розвитку системи і засобів радіолокаційного контролю повітряного простору / Літвінов В.В., Зюкін В.Ф., Малярєнко А.С. // Наука і оборона. – 1994. – № 3. – С. 10-16.

Надійшла до редколегії 29.09.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Д. Карлов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

### РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И ПАРАМЕТРОВ ЗОНЫ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОВЫСОТНЫХ РЛС X-ДИАПАЗОНА

В.В. Литвинов, В.Ф. Зюкин, В.И. Клименко

Для разведки маловысотных целей, контроля полетов малой авиации, защиты объектов от терроризма предлагается создать сплошное маловысотное радиолокационное поле на основе сети постов радиотехнических войск, на базе необслуживаемых унифицированных РЛС X – диапазона (8 – 12,5 ГГц), размещаемых на стационарных вышках. Сбор (для дальнейшей обработки и отображения в радиотехнических центрах) радиолокационных сигналов и информации, получаемой РЛС, может осуществляться в автоматическом режиме с помощью радиоканалов связи между вышками. Обсуждается технический облик, параметры зоны обнаружения и преимущества таких РЛС. Их прототипом могут служить штатные бортовые метеонавигационные РЛС самолетов гражданской авиации типа "Гроза", "Буран".

**Ключевые слова:** маловысотное радиолокационное поле, РЛС X – диапазона, зона обнаружения, энергетический потенциал РЛС.

### CALCULATION OF POWER INDEXES AND LOW-ALTITUDE RADAR STATIONS X-RANGE DETECTION ZONE PARAMETERS

V.V. Litvinov, V.F. Zyukin, V.I. Klimchenko

It is proposed to create gapless low altitude radiolocation area based on radio-engineering troops post-net with unified X-range radar stations (8-12.5 GHz), located on stationary towers for the low altitude targets reconnaissance, small-size aviation flight control, object protection against terrorism acts. Collection of radar signals and information received by radio-posts can be conducted in automatic mode with help of radio-channels between towers. It considered technical appearance, detection zone parameters and advantages of such radar stations. Their prototypes can be standard civil aviation on-board weather-navigation radar station "Groza", "Buran".

**Keywords:** low-altitude the radio-location area, X-range radar station, radar station power potential.