

УДК 621.396.963.8

О.С. Маляренко, С.В. Кукобко

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ВПІЗНАВАННЯ ЦІЛЕЙ НАЗЕМНИМИ ЗАПИТУВАЧАМИ СИСТЕМИ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО ВПІЗНАВАННЯ НА ОСНОВІ ЗМІНИ ПРИНЦИПІВ МІЖПЕРІОДНОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ВІДПОВІДІ

Досліджено можливість підвищення надійності впізнавання повітряних цілей наземними запитувачами радіолокаційного впізнавання в умовах внутрішньосистемних завад та імітації шляхом застосування методу ковзного вікна при обробці пачок сигналів відповіді. Проведені розрахунки ймовірностей виявлення пачок сигналів відповіді за існуючими алгоритмами аналізу сигналів та при застосуванні аналізу сигналів у ковзному вікні (для різних значень критеріїв k/n). Показано, що в запитувачах оглядових радіолокаційних станцій є доцільним використання критеріїв, адаптивних до умов запиту.

Ключові слова: радіолокаційне впізнавання, міжперіодна обробка, виявлення сигналів відповіді.

Вступ

Постановка проблеми і аналіз літератури. Запитувачі системи радіолокаційного впізнавання (РЛВ) є важливим джерелом інформації про повітряні об'єкти в Повітряних Силах [1]. На теперішній час в Україні використовуються наземні запитувачі системи РЛВ (НРЗ-П) розробки 70-х років, що створені на застарілій елементній базі, мають низьку пропускну здатність й реалізують неефективні алгоритми обробки сигналів, що суттєво знижує ефективність застосування системи РЛВ у складній сигнально-завадовій обстановці [2, 3]. Обробка сигналів РЛВ має специфіку, яка пов'язана з необхідністю забезпечувати імітостійкість впізнавання, що не є притаманним цивільним запитувачам, та функціонувати в умовах навмисних завад. Тому потрібний аналіз існуючих принципів та алгоритмів обробки сигналів в умовах навмисних та внутрішньосистемних завад, пошук нових ефективних методів обробки.

Мета статті – дослідження можливості підвищення якості впізнавання цілей наземними запитувачами шляхом зміни принципів міжперіодної обробки сигналів відповіді.

Основний матеріал

Аналіз якості обробки сигналів відповіді НРЗ-П в умовах імітації та впливу несинхронних завад. У НРЗ-П пристрій аналізу сигналів відповіді здійснює міжперіодну обробку (аналіз) сигналів після дешифратору, забезпечуючи:

- зниження імовірності імітації, тобто прийняття рішення "свій" по імітованих сигналах;
- придушення несинхронних сигналів (внутрішньосистемних завад);
- підвищення імовірності правильного впізнавання своїх об'єктів завдяки бінарному накопичуванню сигналів.

Алгоритми міжперіодної обробки полягають у наступному [2]. Декодовані сигнали загального впізнавання (ЗВ) у II режимі надходять на аналізатор па-

чок сигналів відповіді (АПСВ), де за критерієм k/n виявляється пачка сигналів відповіді та формується сигнал гарантованого впізнавання (ГВ). Перший з пачки сигнал ЗВ вмикає в роботу вільний канал аналізу у АПСВ, кількість яких обмежена. Оскільки перший сигнал ЗВ лише вмикає канал, подальша обробка здійснюється за критерієм $(k-1)/(n-1)$. Для зменшення часу зайнятості каналу несинхронними сигналами ЗВ спочатку перевіряється правильність увімкнення каналу за критерієм $k_{II}/n_{II} = 1/2$ і подальший аналіз здійснюється лише у випадку виконання цього критерію, у протилежному випадку здійснюється скид обробки у цьому каналі. Якщо всі канали АПСВ зайняті – решта сигналів проходить на вихід без обробки, що знижує імітостійкість впізнавання.

У НРЗ-П реалізовані три загальні критерії k/n : 4/9, 6/18 та 10/32. Вибір критерію здійснюється за командою з радіолокаційної станції (РЛС) у залежності від частоти запуску запитувача та швидкості обертання антени. Неімітостійкі сигнали ЗВ (I режиму) спочатку потрапляють на пристрій придушення несинхронних завад (ПНЗ) за критерієм 2/2. Потім здійснюється аналіз аналогічно II режиму за винятком того, що перевірка правильності увімкнення каналу здійснюється за більш м'яким критерієм $k_{II}/n_{II} = 1/3$ і не формується сигнал ГВ. Результуючий критерій з урахуванням пристрою ПНЗ виглядає як $2/2 \cdot 1/3 (k-1)/(n-1)$.

Знайдемо імовірність виявлення пачок сигналів за умови аналізу однієї пачки розміром n , виходячи з існуючого алгоритму аналізу. Відповідно до цього алгоритму пачка сигналів ЗВ є виявленою, якщо відбулись чотири події: H_1 – сигнал ЗВ увімкнув строб зони очікування ПНЗ (тільки в I режимі); H_2 – стробований сигнал ЗВ увімкнув канал АПСВ; H_3 – відбулась перевірка правильності увімкнення каналу за критерієм $1/m$; H_4 – виявлена пачка сигналів ЗВ за критерієм k/n (при цьому в k враховані сигнали ЗВ, а в n враховані періоди запиту подій H_2 та H_3).

Можливі комбінації подій при обробці пачки сигналів відповіді, що передують виконанню критерію k/n , показані на рис. 1.

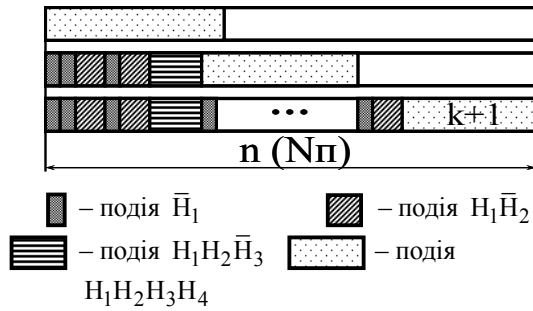


Рис. 1. Виявлення сигналів відповідно до критерію прийняття рішення "свій". Звідси результуючий вираз для визначення імовірності прийняття рішення "свій" P_B за умови аналізу однієї пачки розміром n має вигляд:

$$P_B = \sum_{b=0}^{b_{\max}} \sum_{a=0}^{a_{\max}} \sum_{d=0}^{d_{\max}} \frac{(b+a+d)!}{b! \cdot a! \cdot d!} \cdot \bar{P}_1^d \cdot (P_1 \cdot \bar{P}_2)^a \times (P_1 P_2 \bar{P}_3)^b \cdot (P_1 P_2 P_3 P_4), \quad (1)$$

де $P_1 = P[H_1] = P_{(1)}$; $P_2 = P[H_2] = P_{(1)}$;

$$\bar{P}_3 = P[\bar{H}_3] = (1 - P_{(1)})^m; \quad P_3 = \sum_{j=1}^m C_m^j P_{(1)}^j (1 - P_{(1)})^{m-j};$$

$$P_4 = P[H_4] = \sum_{i=k-1-j}^{g-2-m} C_{g-2-m}^i P_{(1)}^i (1 - P_{(1)})^{g-2-m-i} \quad \text{при} \quad g \geq m+k,$$

$$P_1 P_2 P_3 P_4 = P_{(1)}^{k+1} \quad \text{при} \quad g < m+k; \quad C_m^j = \frac{m!}{j!(m-j)!} \quad \text{при}$$

$g = n - 2a - b(2+m)$; $P_{(1)}$ – імовірність виявлення сигналу відповіді в одному періоді (в усіх n періодах $P_{(1)}$ однакова); d, a, b , – кількість подій $\bar{H}_1, H_1 \cdot \bar{H}_2$ та $H_1 \cdot H_2 \cdot \bar{H}_3$ відповідно; $b_{\max} = (n - (k+1)) / (2+m)$;

$$a_{\max} = n - (k+1) - b(2+m);$$

$$d_{\max} = n - (k+1) - b(2+m) - 2a.$$

У II режимі перебір по d не виконується.

Класичний вираз для визначення імовірності виявлення бінарного виявлювача за критерієм k/n має наступний вигляд:

$$P_B = \sum_{i=k}^n C_n^i P_{(1)}^i (1 - P_{(1)})^{n-i}. \quad (2)$$

Результати розрахунків ймовірностей виявлення пачок (прийняття рішення "свій" та формування сигналу ГВ) у залежності від $P_{(1)}$ через несинхронні сигнали, імітовані сигнали та сигнали від своїх об'єктів для випадку обробки однієї пачки при критеріях 4/9, 6/18, що використовуються в НРЗ-П РЛС РТВ, наведені на рис. 2, 3 відповідно.

Аналіз результатів розрахунків (рис. 2, 3) дозволяє зробити висновок, що в межах однієї пачки розміром n при існуючих алгоритмах обробки забезпечуються як достатня імовірність правильного виявлення "своїх", так і достатня імітостійкість при імітації "навмання". Однак на практиці у НРЗ-П оглядових РЛС розміри пачок $N_{\Pi} > n$ і може здійсню-

ватись обробка декількох субпачок розміром n у межах тривалості контакту з ціллю. При цьому в (1) $g = N_{\Pi} - 2a - b(2+m)$, а за умови $g \geq n$

$$P_4 = \sum_{i=k-1-j}^{n-1-m} C_{n-1-m}^i P_{(1)}^i (1 - P_{(1)})^{n-1-m-i}. \quad (3)$$

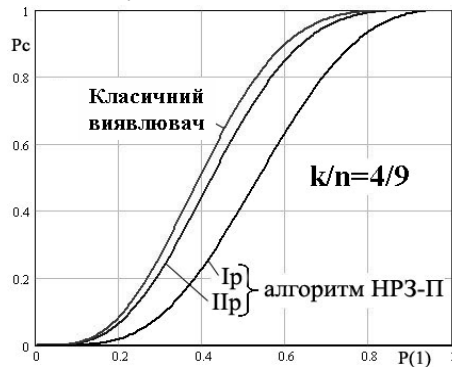


Рис. 2. Імовірності виявлення однієї пачки сигналу відповіді при критерії 4/9 у вікні розміром n

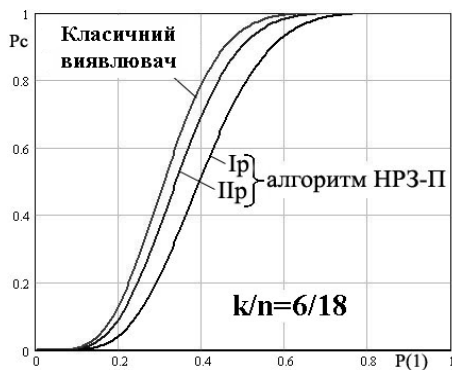


Рис. 3. Імовірності виявлення однієї пачки сигналу відповіді при критерії 6/18 у вікні розміром n

Міжперіодна обробка пачок сигналів відповіді розміром N_{Π} у ковзному вікні, тобто кумулятивне бінарне накопичування [4], підвищує імовірність виявлення пачок сигналів

$$P_{B_N} = 1 - (1 - P_B)^{N_{\Pi} - n + 1}, \quad (4)$$

однак потребує перевірки ймовірності імітації.

Для проведення розрахунків визначено параметр N_{Π} для конкретних типів РЛС (радіолокаційних комплексів (РЛК)) та НРЗ, виходячи з наступних їх параметрів:

- а) 1 варіант (РЛК 5Н87, НРЗ-2П);
 - 1) частота повторення імпульсу запуску 365 Гц;
 - 2) швидкість обертання антенної системи 3 об/хв., 6 об/хв.;
 - 3) ширина головної пелюстки діаграми спрямованості 3°;
- б) 2 варіант (РЛС 5Н84А, НРЗ-2П);
 - 1) частота повторення імпульсу запуску 200 Гц;
 - 2) швидкість обертання антенної системи 2 об/хв., 6 об/хв.;
 - 3) ширина головної пелюстки діаграми спрямованості – 3°;

- в) 3 варіант (РЛС 35Д6, НРЗ-6П);
- 1) частота повторення імпульсу запуску 250 Гц, 500 Гц;
- 2) швидкість обертання антенної системи 6 об/хв., 12 об/хв.;
- 3) ширина головної пелюстки діаграми спрямованості – 5°.

Таким чином, маємо наступні значення N_{Π} та відповідні їм критерії:

- а) для першого варіанту:
 - 1) при 3 об/хв. $N_{\Pi} = 61$, критерій 6/18;
 - 2) при 6 об/хв. $N_{\Pi} = 30$, критерій 4/9;
- б) для другого варіанту:
 - 1) при 2 об/хв. $N_{\Pi} = 50$, критерій 6/18;
 - 2) при 6 об/хв. $N_{\Pi} = 17$, критерій 4/9;
- в) для третього варіанту:
 - 1) при 6 об/хв. та частоті повторення імпульсу запуску 250 Гц і при 12 об/хв. та частоті повторення імпульсу запуску 500 Гц $N_{\Pi} = 35$, критерій 4/9;
 - 2) при 6 об/хв. та частоті повторення імпульсу запуску 500 Гц $N_{\Pi} = 69$, критерій 6/18;
 - 3) при 12 об/хв. та частоті повторення імпульсу запуску 250 Гц $N_{\Pi} = 17$, критерій 4/9.

Результати розрахунків ймовірностей виявлення сигналів відповіді в пачці при застосуванні існуючого алгоритму НРЗ-П та аналізу сигналів у ковзному вікні для знайдених N_{Π} наведені на рис. 4, розрахунків в області імовірності імітації "навмання" $P_{i(1)}=1/16$ – на рис. 5.

Порівняльний аналіз результатів розрахунків ймовірностей виявлення пачок сигналів відповіді різними типами НРЗ-П в складі різних типів РЛС дозволяє зробити наступний висновок: імовірності правильного виявлення пачки сигналів відповіді у ковзному вікні більша у порівнянні з ймовірностями виявлення пачки сигналів існуючим алгоритмом. Зокрема, в області ймовірностей правильного виявлення "своїх" об'єктів вже при імовірності виявлення сигналу відповіді в одному періоді $P_{(1)} \approx 0,2 \dots 0,4$ досягається потрібна імовірність правильного впізнання 0,98, в той час, як при існуючому алгоритмі – при рівнях $P_{(1)} \approx 0,6 \dots 0,7$. Однак при цьому імовірність імітації "навмання" зростає на порядок. Таким чином, з метою збільшення ймовірності виявлення сигналів відповіді (за умови збільшення "каналності", тобто пропускної здатності приймача), що автоматично призводить до покращення завадозахищеності, є доцільним застосовувати при обробці пачок сигналів відповіді метод ковзного вікна, однак необхідним є пошук параметрів критеріїв k/n для забезпечення імітостійкості.

Вибір критерію виявлення пачок сигналів відповіді. Для випадку кумулятивного бінарного накопичування оптимальним є співвідношення [4]

$$k_{\text{опт}} = 1,5\sqrt{n}, \quad (5)$$

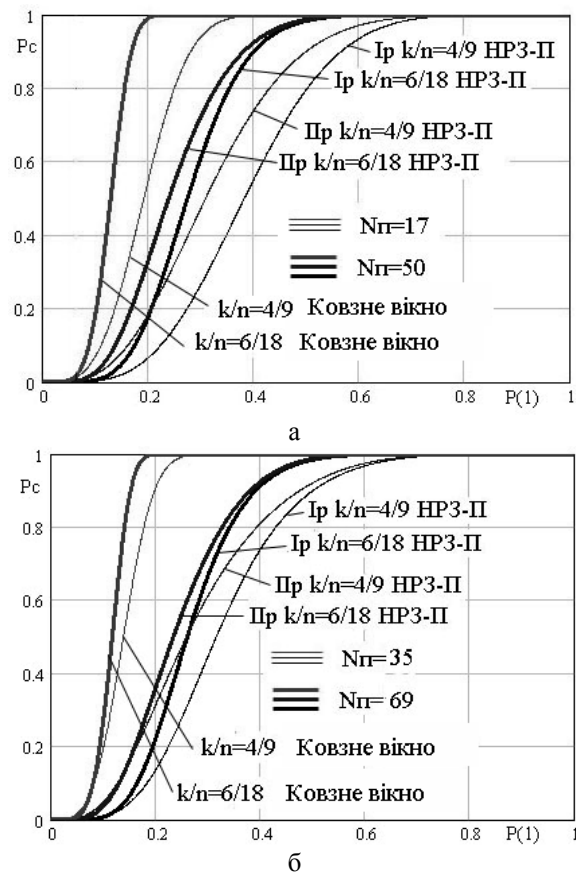


Рис. 4. Імовірності виявлення сигналу відповіді НРЗ-П при обробці у ковзному вікні: а – короткі пачки; б – довгі пачки

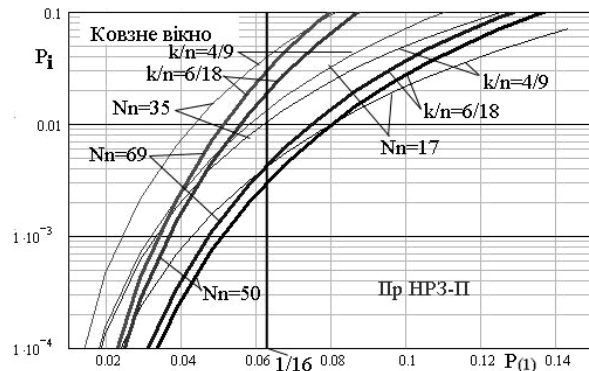


Рис. 5. Імовірності імітації при обробці за алгоритмом НРЗ-П та у ковзному вікні (існуючі k/n)

однак, запитувачі радіолокаційного впізнання мають забезпечувати ймовірність імітації, що не перевищує задану. Тому параметри критерію можуть відрізнатись від оптимальних k/n , що забезпечують максимум імовірності виявлення.

Розрахунки ймовірностей імітації методом "навмання" P_i (прийняття рішення "свій" та формування сигналу гарантованого впізнання) у залежності від $P_{(1)}$, результати яких наведені на рис. 6, показали можливість знаходження модифікованих параметрів, за яких забезпечується $P_i < 0,01$. Імовірності правильного впізнання "своїх" при цьому змінились незначно і тому не показані окремо.

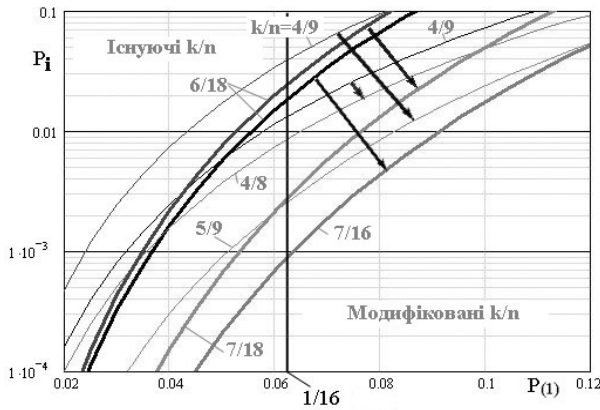


Рис. 6. Імовірності імітації при обробці у ковзному вікні за існуючими та модифікованими k/n

З метою оцінки впливу несинхронних завад знайдені ймовірності потрапляння несинхронного сигналу відповіді у вікно аналізу за дальністю тривалістю τ_A для середньої та високої щільності потоків завад $\lambda_{НЗ} = 10^3 \dots 10^4$.

$$P_{(1)НЗ} = 1 - e^{-\lambda_{НЗ}\tau_A} \quad (6)$$

Ймовірності хибного виявлення пачки сигналів відповіді для критеріїв рис. 6 наведені на рис. 7. На рисунку вертикальні лінії показують значення $P_{(1)}$ для несинхронних завад різної щільності. Розрахунки $P_{(1)НЗ}$ виконані для $\tau_A = 6$ мкс, що відповідає стробу аналізу НРЗ-П і гіршим умовам селекції несинхронних відповідей відповідно до вимог [5].

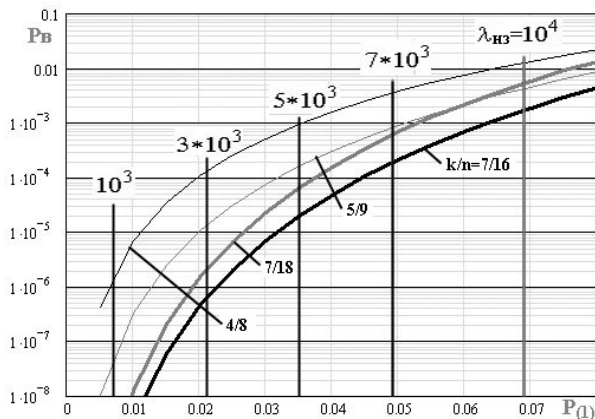


Рис. 7. Імовірності хибного виявлення пачок сигналів відповіді через несинхронні завади

Результати розрахунків дозволяють зробити висновок, що в II режимі знайдені параметри критеріїв k/n задовольняють і захисту від несинхронних завад. Додаткові заходи придушення несинхронних

завад можуть не застосовуватись, оскільки щільність потоку сигналів відповіді на виході дешифратора НРЗ-П стає в 16 разів меншою ніж на вході запитувача. В I режимі параметри k/n мають враховувати очікувану сигнально-завадову обстановку і бути більш жорсткими.

Висновок

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити наступні висновки. Кумулятивне бінарне накопичування пачок сигналів загального впізнання значно підвищує ймовірність правильного впізнання, однак для реалізації у НРЗ-П потребує правильного підбору параметрів критерію виявлення k/n. У імітостійкому режимі обмежувальним фактором є необхідність забезпечення імітостійкості в умовах імітації методом "навмання", в неімітостійких режимах – забезпечення рівню хибного виявлення в умовах внутрісистемних несинхронних завад.

Доцільно також гнучко обирати критерії в залежності від режимів роботи радіолокатору, з яким спряжений НРЗ (швидкість обертання, частота запуску), та еквівалентної ширини діаграми направленості НРЗ, що в сукупності визначає об'єм пачки сигналів відповіді.

Список літератури

1. Малярєнко А.С. Системи вторичної радіолокації для управління повітряним рухом і державного радіолокаційного опознання: справочн. / А.С. Малярєнко. – Х.: ХУВС, 2007. – 78 с.
2. Озброєння радіотехнічних підрозділів і частин ППО. Наземний радіолокаційний запитувач НРЗ-П: навч. посіб. / О.С. Малярєнко, П.В. Овсянников та інші. – Х.: ХВУ, 2002. – 96 с.
3. Малярєнко О.С. Методи міжперіодної обробки сигналів відповіді в оглядових запитувачах і оцінка якості радіолокаційного впізнання, що досягається / О.С.Малярєнко, С.В. Кукобко // Шоста наук. конф. ХУПС «Новітні технології – для захисту повітряного простору», 14 – 15 квітня 2010 року: тези доповідей. – Х.: ХУПС, 2010. – 320 с.
4. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория: справочн. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Я.Д. Ширман, С.Т. Багдасарян, А.С. Малярєнко и др.; под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
5. STANAG 4193 Technical Characteristics of IFF Mk-XA and Mk-XII Interrogators and Transponders.- Part I: General Description of the System.- Bruxelles: Military Agency For Standardization, 1990. – 155 p.

Надійшла до редколегії 13.01.2011

Рецензент: д-р техн. наук, с.н.с. В.О. Василець, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОПОЗНАВАНИЯ ЦЕЛЕЙ НАЗЕМНЫМИ ЗАПРОСЧИКАМИ СИСТЕМЫ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ОПОЗНАВАНИЯ НА ОСНОВЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИНЦИПОВ МЕЖПЕРИОДНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ОТВЕТА

А.С. Малярєнко, С.В. Кукобко

Исследована возможность повышения надежности опознания воздушных целей наземными запросчиками радиолокационного опознания в условиях внутрисистемных помех и имитации путем применения метода скользящего окна при обработке пачек сигналов ответа. Проведены расчеты вероятностей обнаружения пачек сигналов ответа по существующим алгоритмам анализа сигналов и при использовании анализа сигналов в скользящем окне (для разных зна-

чений критериев k/n). Показано, что в запросчиках обзорных радиолокационных станций целесообразно использовать критерии, адаптивные к условиям запроса.

Ключевые слова: радиолокационное опознавание, межпериодная обработка, обнаружение сигналов ответа.

QUALITY IMPROVEMENT OF THE IDENTIFICATION RELIABILITY BY GROUND INTERROGATORS OF FRIEND OR FOE SYSTEM ON BASIS OF CHANGE REPLY SIGNALS INTERPERIOD PROCESSING PRINCIPLE

A.S. Malyarenko, S.V. Kukobko

The ability of air targets identification reliability by ground interrogators provided of intersystem interferences and imitation by using of running window method at processing of reply signal packet was investigated. Reply signals detection probability in packet with using of existent signal analysis algorithm, and using of analysis at running window (for different values of criterion k/n) were calculated. Achieved, that in interrogators of surveillance radars expedient to use criterions, which are adaptive to conditions of interrogation.

Keywords: identification Friend or Foe, interperiod processin, detection of reply signals.