

# Зв'язок, радіотехніка, радіолокація, акустика та навігація

УДК 621.396.969.181.24

А.Л. Ковтунов, С.П. Лещенко, В.В. Чалий, І.В. Помогаєв

*Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків*

## МОЖЛИВОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ПОВІТРЯНИХ ЦІЛЕЙ І ВИМІРУ АЗИМУТУ ОГЛЯДОВИМИ РАДІОЛОКАТОРАМИ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ

*Проведено аналіз методів виявлення радіолокаційної цілі та виміру її азимуту при використанні вузькосмугових і широкосмугових сигналів. Запропоновано вдосконалення методу виявлення пачки широкосмугових сигналів на основі розрахунку коефіцієнтів взаємної коваріації суміжних у пачці дальнісних портретів.*

**Ключові слова:** виявлення сигналів, оглядові РЛС, широкосмугові сигнали, кореляція сигналів, азимут радіолокаційної цілі.

### Вступ

В оглядових РЛС, які призначені для локації повітряних цілей застосовуються зондувальні сигнали із шириною спектра 0,1...5 МГц. Такі сигнали забезпечують розрізняльну здатність по дальності 30...1500 м. У цьому випадку повітряні цілі, які мають розмір 10...50 м, як правило, перебувають у межах одного елементу розрізнення по дальності. У даній роботі такі сигнали вважаються вузькосмуговими.

Сигнали із шириною спектра 150...300 МГц забезпечують розрізняльну здатність 0,5...1 м. У цьому випадку, у межах геометричного розміру цілі перебуває кілька елементів дозволу по дальності. Відбитий від цілі відгук представляє дальнісний портрет цілі (у закордонній літературі *range profile*). У роботі такі сигнали вважаються широкосмуговими. Зазвичай такі сигнали пропонувалося використовувати для рішення завдання радіолокаційного розпізнавання повітряних цілей. При цьому рішення "традиційних" завдань радіолокаційного виявлення, виміру координат і супроводу цілей, пропонувалося здійснювати за допомогою вузькосмугових сигналів.

В [1] показано, що широкосмугові сигнали можуть використовуватися в інтересах виявлення цілей без переходу до зондування вузькосмугових сигналами. У режимі виявлення такі сигнали можуть не тільки не уступати вузькосмуговим сигналам, але й перевершувати їх, особливо при більших відносинах сигнал-шум.

Відсутність апріорної інформації про форму та довжину прийнятого широкосмугового сигналу

не дозволяє застосовувати для його виявлення відомі методи.

Відомі квазіоптимальні методи виявлення таких сигналів: енергетичний виявлювач, що робить квадратичне підсумовування сигналів у всіх елементах розрізнення стробу спостереження та порівняння отриманої суми з порогом; виявлювач «по крапках», що послідовно порівнює з порогом сигнали в кожному елементі розрізнення та логічно об'єднуючого рішення за схемою "АБО"; ранговий виявлювач, що здійснюють відбір заданого числа максимальних амплітуд сигналу у стробі спостереження з наступним їхнім підсумовуванням та інші методи [2, 3].

Однак всі ці виявлювачі дають більші втрати в порівнянні з оптимальною обробкою сигналів. У роботі [4] запропонований алгоритм виявлення широкосмугових сигналів на основі черезперіодної кореляційної обробки, а також запропоноване рішення проблеми оптимального виявлення цілі при її зсуві по дальності. Недоліком алгоритму черезперіодної кореляційної обробки є те, що він не здійснює накопичення енергії пачки відбитих від цілі широкосмугових сигналів з урахуванням форми діаграми спрямованості антени. У [5] пропонується метод виявлення цілі при обробці пачки відбитих широкосмугових сигналів оглядовими РЛС шляхом аналізу та накопичення значень коефіцієнтів взаємної коваріації суміжних дальнісних портретів у пачці відбитих сигналів.

Існуючі оглядові РЛС, як правило, для оцінки азимута застосовують евристичні алгоритми без урахування форми діаграми спрямованості антени. Оцінка азимуту обчислюється як середнє значення

між азимутами початку й кінця виявленої пачки. Ці алгоритми більше прості в реалізації, але приводять до втрат у точності 25..30 % [6]. Помилки виміру азимуту помітно зростають при перекручуванні форми огинаючої виявленої пачки, при використанні як існуючих вузькосмугових, так і пропонувананих широкосмугових сигналів.

Метою статті є вдосконалення методів виявлення повітряних цілей і виміру їхнього азимуту при використанні в РЛС широкосмугових сигналів. Приклад пачок дальнісних портретів від сигналів двох типів, які летять відносно РЛС із радіальними швидкостями  $V_r=800$  м/с показаний на рис. 1.

Дальнісні портрети отримані шляхом моделювання опромінення цілей ЛЧМ зондувальними імпульсами із шириною спектра 150 МГц. Вісь D – дальність, вісь T – час.

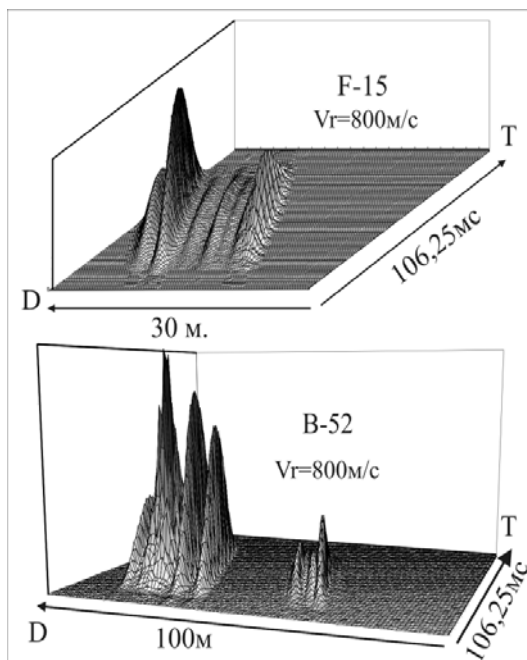


Рис. 1. Пачки дальнісних портретів від сигналів двох типів

## Основна частина

При обробці радіолокаційних сигналів пачку відбитих від цілі широкосмугових сигналів можна представити у вигляді матриці комплексних відліків напруг:

$$D \begin{pmatrix} \dot{A}_{11} & \dots & \dot{A}_{1M} \\ \dots & \dots & \dots \\ \dot{A}_{N1} & \dots & \dot{A}_{NM} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де  $N$  – кількість дискретних відліків по дальності;

$M$  – кількість імпульсів у пачці за рівнем половинної потужності діаграми спрямованості антени;

$\dot{A}$  – комплексна напруга сигналу на виході узгодженого фільтру.

Стовпець матриці являє собою вибірку дискретів по дальності за один період випромінювання або дальнісний портрет цілі.

Для накопичення енергії пачки широкосмугових сигналів в [5], по аналогії з [10] було запропоновано розраховувати та накопичувати максимальні значення взаємно кореляційних функцій суміжних дальнісних портретів, де опорним є сигнал, отриманий на попереднім зондуванні, що затриманий на період повторення:

$$K_m = \max_i \sum_{i=-L}^{+L} \sum_{n=1}^N |\dot{A}_{mn}| \cdot |\dot{A}_{(m+1)(n+i)}|, \quad (2)$$

де  $L$  – максимальна величина кількості дискретів, на які зміщається прийнятий сигнал, щодо опорного.

Величина  $L$  залежить від максимальної радіальної швидкості цілі, періоду повторення зондувальних імпульсів  $T_0$  і тривалості дискрет дальності  $\Delta_d$  з урахуванням вимог теореми відліків (Котельникова):

$$L = (V_{pmax} \cdot T_0) / \Delta_d. \quad (3)$$

Формула (2) описує стандартну процедуру кореляційної згортки двох дискретних сигналів, що широко застосовується в радіолокації. Кореляційна функція сигналу, кінцевого по енергії, є кількісною інтегральною характеристикою форми сигналу, визначення характеру та параметрів взаємного часового зв'язку відліків, а також інтервалу та ступеню залежності значень відліків. У теорії імовірності характеристикою системи випадкових величин, що описує ступінь зв'язку й розсіювання, є коваріація (коваріаційний момент, кореляційний момент).

Застосування цифрової обробки радіолокаційних сигналів, а також значне збільшення частоти дискретизації дозволяє розглядати суміжні дальнісні портрети, виявленої пачки широкосмугових сигналів, як вибірки дискретних випадкових величин. Тоді коефіцієнт коваріації можна розраховувати по формулі:

$$K_m = \max_{-L \leq i \leq L} \left( \frac{1}{W(i)} \sum_{n=N1(i)}^{N2(i)} |\dot{A}_{mn}| \cdot |\dot{A}_{(m+1)(n+i)}| - \frac{1}{W^2(i)} \sum_{n=N1(i)}^{N2(i)} |\dot{A}_{mn}| \cdot \sum_{n=N1(i)}^{N2(i)} |\dot{A}_{(m+1)(n+i)}| \right), \quad (4)$$

де  $\dot{A}_{mn}$  – ДП, які представлені у вигляді дискретної послідовності комплексних відліків, в яких  $m=\overline{1, M}$ ,  $n=\overline{1, N}$ ;

$N$  – кількість дискретів у вікні по дальності, що розглядається;

$M$  – число імпульсів у пачці;

$\frac{1}{W(i)} \sum_{n=N1(i)}^{N2(i)} |\dot{A}_{mn}| \cdot |\dot{A}_{(m+1)(n+i)}|$  – математичне очікування

добутку дискретних відліків модулів напруг сигналів у суміжних вікнах дальності;

$$\frac{1}{W^2(i)} \sum_{n=N_1(i)}^{N_2(i)} |\dot{A}_{mn}| \cdot \sum_{n=N_1(i)}^{N_2(i)} |\dot{A}_{(m+1)(n+1)}| - \text{добуток математичних очікувань дискретних відліків сигналів у суміжних вікнах дальності};$$

Розраховані величини  $K_m$  накопичуються з урахуванням форми діаграми спрямованості антени у "ковзному" вікні рівному числу імпульсів у пачці  $M$ :

$$W(i) = N_2(i) - N_1(i),$$

$$N_1(i) = \max \{1, 1 - i\}, N_2(i) = \max \{N, N - i\}.$$

Розраховані величини  $K_m$  накопичуються з урахуванням форми діаграми спрямованості антени у "ковзному" вікні рівному числу імпульсів у пачці  $M$ :

$$K^* = \sum_{m=1}^{M-1} |\dot{U}_m| \cdot K_m, \quad (5)$$

де  $K_m = |K_{m-1} \dots K_{M-m-2}|$   $m=1, 2, 3, \dots$  – вектор значень коефіцієнтів коваріації у "ковзному" вікні по азимуту;

$\dot{U}_m[m]$  – нормувальні коефіцієнти, які відповідають формі діаграми спрямованості антени.

Розраховується величина  $K^*$ , що рівняється із пороговим значенням.

Величина порога вибирається в результаті статистичних випробувань для забезпечення припустимої ймовірності хибної тривоги (для розрахунків приймалася  $F = 10^{-3}$ ). При першому перевищенні значення величини порога приймається рішення про виявлення початку пачки й проводиться запам'ятовування ДП. Рішення про кінець пачки приймається по першому значенню менше порога. Рішення про виявлення пачки приймається при перевищенні не менш 3-х значень. Тобто критерій виявлення початку пачки 3/3, кінця пачки 1/1.

Оцінка якості запропонованих методів виявлення пачки ширококутних сигналів, проводилася шляхом імітаційного моделювання із застосуванням програмного пакету по моделюванню електродина-

міки вторинного випромінювання BSS (Back Scattering Simulation) [7, 8], у якому основою для рішення завдань електродинаміки використовується метод найпростіших компонентів. Пакет дозволяє враховувати ефект роторної (турбінної) модуляції відбитого сигналу, обумовленої обертанням лопатей, гвинтів та лопаток турбокомпресорів. При цьому забезпечується розрахунок відбитих сигналів для різних типів цілей, їх орієнтації у просторі, різних спектрів частот і поляризації зондувальних сигналів, значно краще, ніж при використанні абстрактних статистичних моделей сигналів.

Проводився порівняльний аналіз якості виявлення пачки ширококутних і вузькокутних сигналів відбитих від цілей на фоні власних шумів, при заданому відношенні сигнал-шум. Швидкість руху цілей, що моделюються, приймалася рівної 300 м/с.

Для оцінки виявлення пачки вузькокутних сигналів моделювався метод некогерентного накопичення сигналів. Для оцінки якості виявлення пачки ширококутних сигналів моделювався метод виявлення, запропонований в [5], в основу якого покладена процедура кореляційної згортки дискретних сигналів.

Також моделювався метод виявлення пачки ширококутних сигналів, на основі математичного розрахунку коефіцієнтів коваріації (3).

В [9] показано, що зміна ракурсу цілі великого розміру на  $0,1^\circ$ , цілі середнього розміру на  $0,5^\circ$  і цілі малого розміру на  $2,5^\circ$  помітно міняє вид дальностного портрету. Виходячи із цього, дискретність зміни ракурсу цілі при моделюванні становила  $0,2^\circ$ .

На рис. 2 представлені, отримані в результаті моделювання, усереднені по ракурсу залежності ймовірності виявлення пачки ширококутних і вузькокутних сигналів від відношення сигнал-шум для тактичного винищувача F-15.

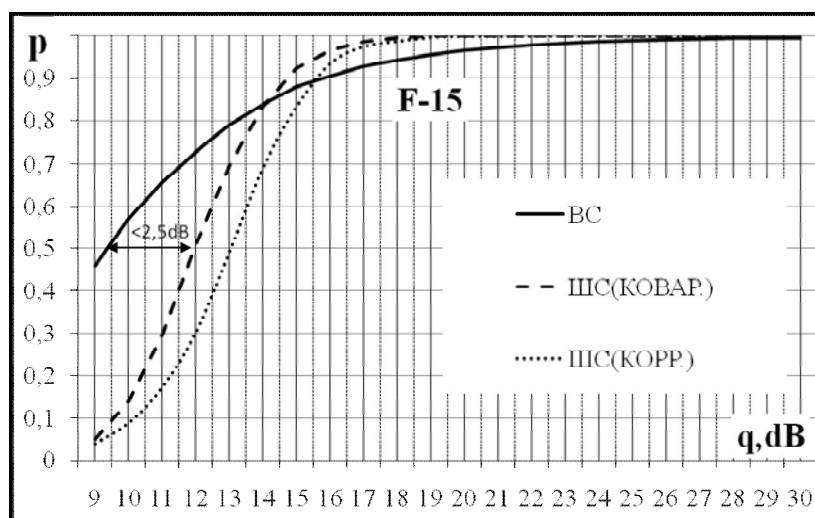


Рис. 2. Ймовірності виявлення пачки ширококутних і вузькокутних сигналів від відношення сигнал-шум для тактичного винищувача F-15

Метод виявлення пачки ширококугових сигналів, на основі розрахунку коефіцієнтів коваріації має незначна перевага перед стандартною процедурою кореляційною згортки сигналів, що особливо стає помітним в умовах, коли амплітуди дальніших портретів пачки близькі рівню шумів. Запропонований метод забезпечує компенсацію випадкових шумових сигналів у розглянутих вікнах дальності. При відношенні сигнал-шум 14 дБ і вище виявлення запропонованим методом великорозмірних цілей, для яких на певних ракурсах знижується взаємна кореляція суміжних у пачці ширококугових сигналів, трохи уступає процедурі кореляційній згортки сигналів. У цьому випадку при використанні розрахунку коефіцієнтів коваріації (3) відбувається компенсація випадкових корисних сигналів пачки, що виявляється. При автоматичному виявленні цілі необхідно забезпечувати ймовірність правильного виявлення 0,9.

Результати моделювання показують, що виявлення пачки ширококугових сигналів, запропонованим методом з ймовірністю 0,9 має перевагу перед методом некогерентного виявлення пачки вузькокугових сигналів. Виявлення пачки ширококугових сигналів з ймовірністю 0,9 можливо при відношенні сигнал-шум від 15 дБ для тактичних винищувачів, 17 дБ для важких бомбардувальників та для 16 дБ для крилатих ракет.

Необхідно відзначити, що використання запропонованого методу виявлення пачок ширококугових сигналів забезпечує краще виявлення малорозмірних цілей на фоні шумів.

Методом математичного моделювання отримані залежності середньоквадратичного відхилення помилок виміру азимута, відношення сигнал-шум і типів цілей різної протяжності. Порівнювалися помилки виміру азимута цілі, отримані методом виміру, реалізованим в існуючих оглядових РЛС із використанням вузькокугових сигналів, що застосовуються та пропонувані ширококугових сигналів. Тобто, оцінка азимута обчислювалася за формулою:

$$\hat{\beta} = \frac{\beta_k + \beta_n}{2}, \quad (6)$$

де  $\beta_k$ ,  $\beta_n$  – відповідно азимут початку та кінця виявленої пачки сигналів. У цьому випадку оцінка азимута цілі, отримана при обробці пачки ширококугових сигналів залежить від форми залежності величин  $K^*$  від  $m$ .

Результати моделювання показали, що використання методу виявлення, на основі математичного розрахунку коефіцієнтів коваріації дозволяє одержати більш згладжені залежності  $K^*$  від  $m$ , чим застосування методу, в основу якого покладена процедура кореляційної згортки дискретних сигналів, запропонована в [5].

Аналіз отриманих результатів моделювання показав, що при відносинах сигнал-шум більших 13...15 дБ застосування ширококугових сигналів має перевагу перед вузькокуговими сигналами по показнику середньоквадратичної помилки виміру азимута для всіх типів цілей. Застосування ширококугових сигналів забезпечує розрізнення по дальності флукуаційних, слабо корельованих складових виявленої пачки, які приводять до помилок методу виміру азимута. А використання методу виявлення, на основі розрахунку коефіцієнтів коваріації (3) забезпечує згладжування флукуацій і зменшення помилок методу виміру азимута.

Результати моделювання вказують на зростання середньоквадратичних відхилень помилок виміру азимута на ракурсах, де знижується взаємна кореляція суміжних дальніших портретів виявленої пачки ширококугових сигналів, внаслідок турбінної модуляції дальніших портретів.

На рис. 3 представлені, отримані в результаті моделювання, усереднені по ракурсі, залежності середньоквадратичного відхилення помилки виміру азимута цілі, від відношення сигнал-шум для тактичного винищувача F-15, отримані з використанням вузькокугового сигналу, ширококугових сигналів, запропонованим в [5], і запропонованим методом.

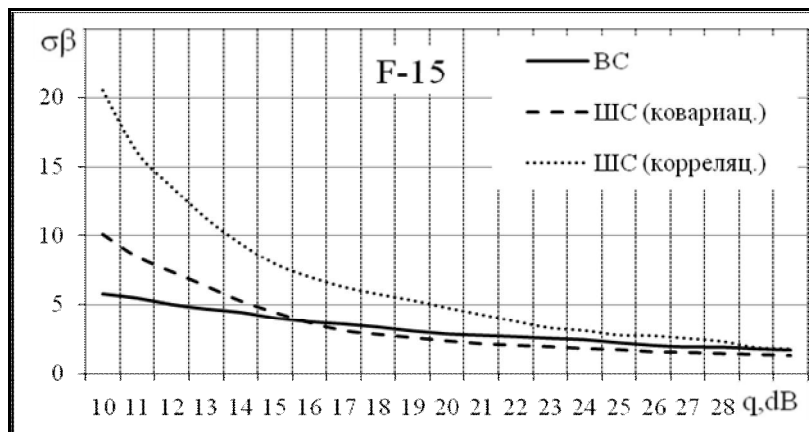


Рис. 3. Залежності середньоквадратичного відхилення помилки виміру азимута цілі, від відношення сигнал-шум для тактичного винищувача F-15

## Висновок

Удосконалено метод виявлення радіолокаційної цілі в межах однієї пачки відбитих ширококутних сигналів в оглядових РЛС із імпульсним випромінюванням.

Запропонований метод виявлення пачки ширококутних сигналів, на основі розрахунку коефіцієнтів взаємної коваріації суміжних дальностних портретів забезпечує більшу ймовірність правильного виявлення, чим метод виявлення, запропонований в [5], при відносинах сигнал-шум менш 13...17дБ залежно від типу цілі.

Шляхом моделювання показано, що застосування ширококутних сигналів в інтересах виявлення радіолокаційних цілей має перевагу перед використанням вузькосмугових сигналів при підвищених вимогах до ймовірності правильного виявлення  $D > 0,9$ , тобто для забезпечення вимог якісного виявлення й виміру.

Запропонований метод забезпечує компенсацію випадкових шумових сигналів у розглянутих вікнах дальності, що приводить до згладжування виявленої пачки, що обгинає, ширококутних сигналів і приводить до зменшення помилок виміру азимута мети.

Застосування ширококутних сигналів і запропонованого методу їхнього виявлення й виміру азимута мети, що розраховується, як середнє значення азимутів початку й кінця виявленої пачки, має перевагу перед вузькосмуговими сигналами при відносинах сигнал-шум більше 15...17дБ для всіх типів цілей і ракурсів.

## Список літератури

1. Орленко В.М. Особенности обнаружения радиолокационных целей при широкой полосе частот зондирующих сигналов / В.М. Орленко // Прикладная радиоэлектроника. – Х.: АНПРЭ, 2006. – № 4. – С. 528-535.

2. Иммореев И.Я. Сверхширокополосная (СШП) локация: основные особенности и отличия от традиционной радиолокации / И.Я. Иммореев // Электромагнитные волны и электронные системы. – 1997. – Т. 2, № 1.

3. Introduction to Ultra-Wideband Radar Systems. Edited by James D. Taylor. – CRC Press. Boca Raton, Ann Arbor, London, Tokyo, 1995.

4. Иммореев И.Я. Оптимальная обработка радиолокационных сигналов с неизвестными параметрами / И.Я. Иммореев, Д.В. Федотов. – М.: Радиотехника, 1998. – № 10. – С. 84-88.

5. Ковтунов А.Л. Методы выявления ширококутних сигналів та виміру радіальної швидкості цілі в оглядових РЛС / А.Л. Ковтунов, С.П. Лещенко // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2012. – Вип. 4(33). – С. 78-81.

6. Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации / С.З. Кузьмин. – М.: Радио и связь, 1986. – 351 с.

7. Radar Target Backscattering Simulation Software and User's Manual / S.A. Gorshkov, S.P. Leshchenko, V.M. Orlenko, S.Yu. Sedyshev, Y.D. Shirman. – Boston-London: Artech House, 2002. – 71 p.

8. Shirman Ya.D. (ed.), Gorshkov S.A., Leshchenko S.P., Orlenko V.M., Sedyshev S.Yu., Sukharevsky O.I. Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering, Recognition, Detection and Tracking, Norwood, MA: Artech House, 2002.

9. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование / Я.Д. Ширман, С.А. Горшков, С.П. Лещенко, Г.Д. Братченко, В.М. Орленко // Радиолокация и радиометрия. – М.: Радиотехника, 2000. – № 2 – С. 5-65.

10. Слюсар В.И. Автокорреляционные методы формирования скользящих окон в задачах импульсной дальнометрии / В.И. Слюсар // Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника. – 1998. – Том 41, № 9. – С. 61-68.

Надійшла до редколегії 18.02.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.І. Сухаревський, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## ВОЗМОЖНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЦЕЛЕЙ И ИЗМЕРЕНИЯ АЗИМУТА ОБЗОРНЫМИ РАДИОЛОКАТОРАМИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

А.Л. Ковтунов, С.П. Лещенко, В.В. Чалий, І.В. Помогаєв

Проведен анализ методов обнаружения и измерения азимута радиолокационной цели при использовании применяемых узкополосных и предлагаемых широкополосных сигналов. Предложено усовершенствование метода обнаружения пачки широкополосных сигналов на основе расчета коэффициентов взаимной ковариации смежных в пачке дальностных портретов.

**Ключевые слова:** обнаружение сигналов, обзорные РЛС, широкополосные сигналы, корреляция сигналов, азимут радиолокационной цели.

## THE ABILITY TO DETECT AND MEASURING AZIMUTH AIR TARGETS IN SURVEILLANCE RADAR USING BROADBAND SIGNALS

A.L. Kovtunov, S.P. Leshenko, V.V. Chaliy, I.V. Pomogaev

The analysis methods for detection and measurement of azimuth radar target using applied narrowband and wideband signals offered. The improved method of detecting the stack broadband signals based on the calculation of the coefficients of mutual covariance related to the rang profile pack.

**Keywords:** signals detection, surveillance radar, broadband signal, correlation signals, azimuth of a radar target.