

УДК 621.396.969.181.24

А.Л. Ковтунов, С.П. Лещенко, М.П. Батурицький, Л.В. Польшина

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

## МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ МАНЕВРА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ЦЕЛИ В ОБЗОРНЫХ РЛС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

*Предложен метод обнаружения маневра радиолокационной цели в обзорных РЛС по результатам оценки величин коэффициентов межобзорной корреляции дальностных портретов. Предложен метод сопровождения траектории цели, при интенсивном маневре, с обнаружителем маневра, применением сверхширокополосных сигналов и учете радиальной скорости цели. Проведен анализ качества фильтрации и экстраполяции параметров сопровождаемых траекторий, при использовании предложенного метода траекторного сопровождения и метода реализованного в ПБУ 9С470.*

**Ключевые слова:** вторичная обработка, обзорные РЛС, сверхширокополосные сигналы, корреляция сигналов, фильтрация, экстраполяция, радиальная скорость цели.

### Введение

**Постановка проблемы. Анализ литературы.** Модель траектории радиолокационной цели (РЛЦ), вместе с моделью процесса измерения образуют сложную модель объединенной динамической системы вторичной обработки радиолокационной информации. Маневрирование РЛЦ, относится к классу преднамеренных возмущений траектории РЛЦ, что приводит к смене состояния в динамической системе и может привести к ее неустойчивой работе. Поэтому в алгоритмах траекторной обработки должно быть предусмотрено обнаружение маневра РЛЦ. Обнаружение, оценка интенсивности маневра и воспроизведение траекторий маневрирующих целей по данным радиолокационной информации (РЛИ) является одной из сложнейших задач вторичной обработки РЛИ [1]. Как правило, обнаружение маневра РЛЦ производят по отклонению ее траектории от принятой модели движения по каждой из фильтруемых координат, что затруднительно в обзорных РЛС, в которых используется сферическая система координат. Это обусловлено тем, что кинематическое уравнение состояния модели траектории РЛЦ в этом случае описывается нелинейными функциями. В пункте боевого управления (ПБУ) ЗРК «БУК» 9С470 экстраполяция и сглаживание координат цели на участках маневра и прямолинейного полета производятся по различным соотношениям. Начало маневра считается определенным, если в течение двух обзоров подряд для всех трех или для двух координат одновременно выполняются условия:

$$\Delta X_{cy} \leq |X_1 - X_{эj}| \leq \Delta X_{ши}, \quad (1)$$

где  $X_1$  – измеренная координата 1-й отметки;

$X_{эj}$  – значение экстраполированной координаты

$j$ -й сопровождаемой цели к моменту появления вновь наблюдаемой 1-й отметки;

$\Delta X_{cy}$ ,  $\Delta X_{ши}$  – размеры узкого и широкого стробов.

Конец маневра считается выполненным, если в течение двух обзоров подряд выполняется условие:

$$|X_1 - X_{эj}| \leq \Delta X_{cy}. \quad (2)$$

При автосопровождении траекторий используются несколько стробов:

- узкий строб для сопровождения не маневрирующих или слабо маневрирующих целей при отсутствии пропусков отметок;

- средний строб для сопровождения маневрирующих целей при отсутствии пропусков отметок;

- несколько широких стробов для сопровождения не маневрирующих и маневрирующих целей при наличии пропусков отметок [2]. Необходимо отметить, что данная процедура обнаружения начала и конца маневра РЛЦ эффективна лишь в том случае, когда маневр цели интенсивный и продолжительный.

В [5] результатами моделирования показано, что применение сверхширокополосных (СШП) ЛЧМ сигналов с шириной спектра 150 МГц, которые обеспечивают разрешение элементов цели по дальности и получение дальностных портретов (ДП), улучшает траекторное сопровождение по данным обзорных РЛС.

Результаты натурных экспериментов и моделирования показывают, что форма ДП значительно зависит от ракурса цели.

Предлагается производить обнаружение маневра цели по результатам оценки величины коэффициентов межобзорной корреляции, усредненных ДП, полученных на смежных обзорах РЛС.

## Основная часть

В [4] предложен метод измерения дальности цели и получения усредненного ДП при использовании СШП сигналов путем анализа закона, зависимости величин коэффициентов взаимной ковариации отраженных сигналов в пределах обнаруженной пачки относительно центрального отраженного сигнала, который соответствует середине диаграммы

направленности антенны, и применение известного алгоритма «лог-масштабного» обнаружителя [8]. На рис. 1 представлены, полученные в результате моделирования, усредненные ДП обнаруженной цели (тактического истребителя F-15) на четырех обзорах РЛС. Представлены ДП для цели летящей прямолинейно, и цели, выполняющей разворот в горизонтальной плоскости (вираж).

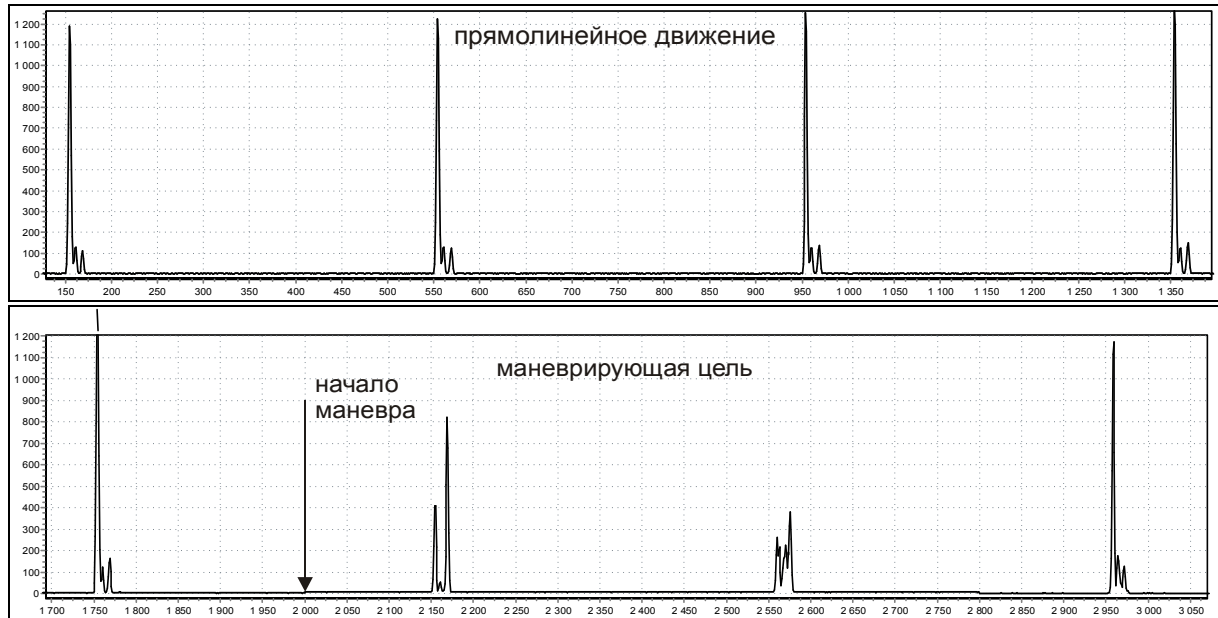


Рис. 1. Усредненные ДП обнаруженной цели (модели тактического истребителя F-15) на четырех обзорах РЛС

Заметно, что изменение ракурса цели приводит к изменению формы ДП. Применение СШП сигналов позволяет разрешать элементы конструкции РЛС, поэтому дальность рассчитывалась, как расстояние до максимума энергии обнаруженной пачки СШП сигналов.

За время оборота антенны РЛС  $T_0$  дальность до цели изменяется, поэтому при расчете коэффициентов межобзорной корреляции необходимо вводить задержку  $\tau_d$  усредненного ДП, полученного на текущем обзоре  $|\dot{A}_{k(n-\tau_d)}|$ , относительно ДП, полученного на предыдущем обзоре  $|\dot{A}_{(k-T_0)n}|$ .

При этом  $k$  – номер обзора РЛС, равный:  $k = t/T_0$ , где  $t$  – время работы РЛС,  $T_0$  – период обзора РЛС.

Выравнивание ДП, которые получены на смежных обзорах РЛС будем производить по номеру дискреты, соответствующей величине медианной мощности ДП. Оценку коэффициентов межобзорной корреляции, усредненных ДП, полученных на смежных обзорах РЛС можно получать по выражениям (3) – (8):

$$\Gamma_k = \frac{(K_{1k} - K_{4k} \cdot K_{5k} / N)}{\left[ (K_{2k} - K_{4k} / N)^2 \cdot (K_{3k} - K_{5k} / N)^2 \right]^{1/2}}; \quad (3)$$

$$K_{1k} = \sum_{n=1}^N \left| \dot{A}_{(k-T_0)n} \right| \cdot \left| \dot{A}_{k(n-\tau_d)} \right|; \quad (4)$$

$$K_{2k} = \sum_{n=1}^N \left| \dot{A}_{k(n-\tau_d)} \right| \cdot \left| \dot{A}_{k(n-\tau_d)} \right|; \quad (5)$$

$$K_{3k} = \sum_{n=1}^N \left| \dot{A}_{(k-T_0)n} \right| \cdot \left| \dot{A}_{(k-T_0)n} \right|; \quad (6)$$

$$K_{4k} = \sum_{n=1}^N \left| \dot{A}_{k(n-\tau_d)} \right|; \quad (7)$$

$$K_{5k} = \sum_{n=1}^N \left| \dot{A}_{(k-T_0)n} \right|. \quad (8)$$

где  $N$  – число дискрет, в рассматриваемом окне дальности.

Методом математического моделирования с использованием программного пакета по моделированию электродинамики вторичного излучения BSS (Back Scattering Simulation) [6] получены зависимости коэффициентов межобзорной корреляции от номера обзора РЛС.

Горизонтальна проекція траєкторії моделюваної цілі, виконуючої разворот в горизонтальній площині з перегрузкою 2, представлений на рис. 2.

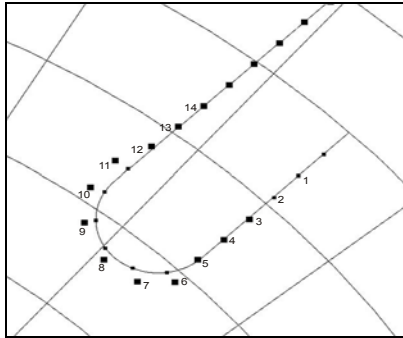


Рис. 2. Горизонтальна проекція траєкторії моделюваної цілі, точки і номер вимірювання і екстраполяції

Зависимость коэффициентов межобзорной корреляции ДП от номера обзора РЛС тактического истребителя F-15 при отношении сигнал-шум 30 и 15 дБ представлены на рис. 3.

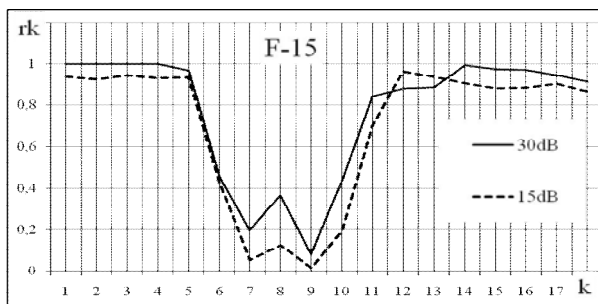


Рис. 3. Зависимость коэффициентов межобзорной корреляции ДП от номера обзора РЛС и отношения сигнал-шум

Моделирование показало, что значения коэффициентов межобзорной корреляции ДП больше зависят от ракурса цели, чем от отношения сигнал-шум. При прямолинейном движении ВЦ корреляция ДП изменяется незначительно при отношениях сигнал-шум более 15 дБ.

Зависимость коэффициентов межобзорной корреляции от отношения сигнал-шум для не маневрирующей цели представлена на рис. 4.

Ярко выраженная зависимость коэффициентов межобзорной корреляции от ракурса и стабильность по отношению к мощности принятого сигнала играют важную роль при выборе порога в обнаружителе маневра. Выбор величины порога в литературе рассмотрен недостаточно и на практике, как правило, вычисляется экспериментально [1]. Так в 9С470 величина порога зависит от среднеквадратических ошибок измерения координат и величины максимально возможной скорости цели в зависимости от ее высоты полета. Значение порога принятия решения про маневр цели может достигать от 5,3 до 8,3 км.

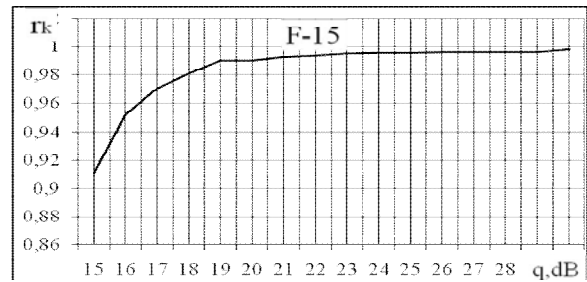


Рис. 4. Зависимость коэффициентов межобзорной корреляции от отношения сигнал-шум для не маневрирующей цели

Обнаружение маневра позволяет производить переключение сопровождения траектории на фильтр с большей полосой пропускания. В 9С470 это обеспечивается соответствующей перестройкой коэффициентов  $\alpha, \beta$ . Для автосопровождения не маневрирующей цели приняты:

$$\alpha_n = 0,6, \beta_n = 0,2 \text{ при } T_o = 4,5 \text{ с;}$$

$$\alpha_n = 0,833, \beta_n = 0,5 \text{ при } T_o > 4,5 \text{ с,}$$

для маневрирующей цели:

$$\alpha_m = 0,493, \beta_m = 1,2 \text{ при } T_o = 4,5;$$

$$\alpha_m = 0,403, \beta_m = 2,05 \text{ при } T_o > 4,5 \text{ с.}$$

Значения коэффициентов  $\alpha_m, \beta_m$  для маневрирующей цели удовлетворяют необходимым и достаточным условиям устойчивости  $\alpha, \beta$  фильтра:

$$\alpha_m > 0, \beta_m \geq 0; \quad 2\alpha_m + \beta_m > 4, \quad (9)$$

но не являются оптимальными, исходя из условий минимизации динамической ошибки экстраполяции координаты, обусловленной маневром цели при заданном ограничении на случайную ошибку фильтрации координаты, обусловленную ошибками измерениями:

$$\beta = \alpha^2 / (2 - \alpha) \quad (10)$$

В [7] показано что пара  $\alpha, \alpha^2 / (2 - \alpha)$  является оптимальной для  $\alpha, \beta$  фильтра, как при фильтрации координат, так и при фильтрации скорости их изменения. Несвоевременное обнаружение начала и конца маневра приводит к сильным переходным процессам, как на участке маневра, так и на участке прямолинейного движения. Моделировался полет тактического истребителя F-15, выполняющего маневр «вираж» с величиной нормальной перегрузки  $n=2$  и  $n=5$ . Моделировалась работа фильтров сопровождения 9С470 при величине строга  $\Delta X_{cy}$  равного 100 и 1000 метров. На рис. 5 представлены, полученные в результате моделирования, зависимости динамической ошибки экстраполяции дальности от номера измерения, величины порога и нормальной перегрузки.

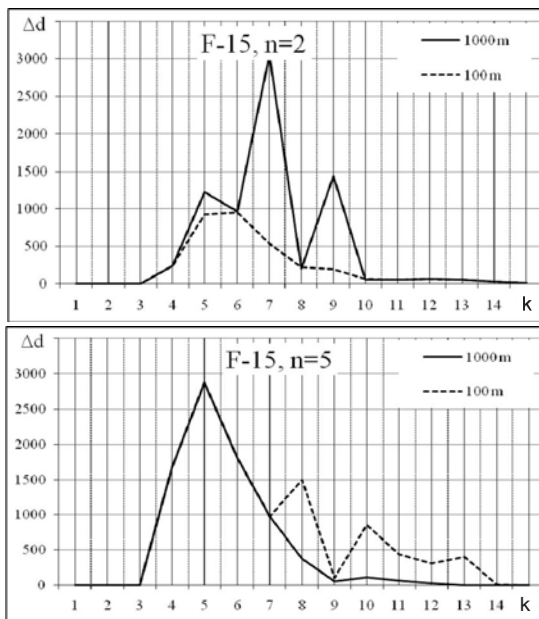


Рис. 5. Зависимости динамической ошибки экстраполяции дальности от номера измерения, величины порога и нормальной перегрузки

Моделирование указывает на противоречивые требования к выбору величины порога. Малый порог обеспечивает своевременное переключение фильтров при обнаружении маневров средней интенсивности, и ложное переключение при маневрах сильной интенсивности.

Повышение порога делает фильтр сопровождения не чувствительным к маневрам малой и средней интенсивности, и своевременное переключение при маневрах сильной интенсивности. Решением проблемы своевременного обнаружения интенсивных маневров цели может стать использование коэффициентов межобзорной корреляции, полученных при обработке СШП сигналов.

Коэффициент межобзорной корреляции представляет собой нормированную величину, зависящую только от формы сигналов, и от интенсивности маневра не зависит.

Зависимость коэффициентов межобзорной корреляции от номера измерения при маневре с нормальной перегрузкой равной 5 представлена на рис. 6.

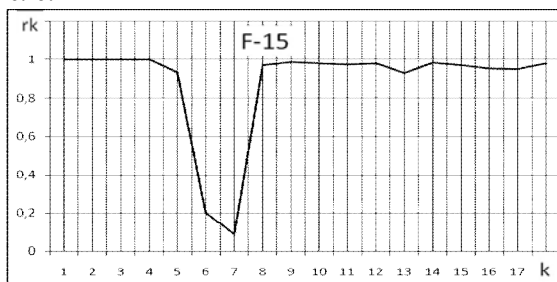


Рис. 6. Зависимость коэффициентов межобзорной корреляции от номера измерения при маневре с нормальной перегрузкой равной 5

Предлагается обнаружение маневра производить при первом значении коэффициента межобзорной корреляции меньше порогового значения:

$$r_k < r_{k,пр} \tag{11}$$

В радиолокации, как правило, принимают следующую степень связи сигналов по величине корреляции.

Таблица 1

Степень связи сигналов по величине корреляции

Сильная (тесная)	>0.7
Средняя	0.5 – 0.69
Умеренная	0.3 – 0.49
Слабая	0.2 – 0.29
Очень слабая	0.19

Исходя из выше изложенного алгоритм траекторного сопровождения целей, с использованием СШП сигналов состоит в следующем. На очередном шаге рассчитывается коэффициент межобзорной корреляции и проверяется неравенство (11) для оценки наличия маневра цели, которое определяет параметры  $\alpha, \beta$  фильтра. Проводится оценка возможности использования в алгоритмах экстраполяции информации о радиальной скорости цели, полученной при обработке обнаруженной пачки СШП сигналов [3], по выражениям:

$$(r_k - r_3^f)^2 \leq (r_k - r_3^{Vr})^2; \tag{12}$$

$$r_3^f = \sqrt{x_3^2 + y_3^2}; \quad r_3^{Vr} = \sqrt{x_{Vr}^2 + y_{Vr}^2},$$

где  $r_k$  – измеренное значение дальности;  $r_3^f$  – экстраполированное значение дальности по значению скорости, полученной по двум оценкам дальности;  $r_3^{Vr}$  – экстраполированное значение дальности по оценке радиальной скорости;  $x_3^2, y_3^2, x_{Vr}^2, y_{Vr}^2$  – экстраполированные значения прямоугольных координат, соответствующие экстраполированным значениям дальности. Использование алгоритма экстраполяции дальности с учетом оценки радиальной скорости цели и перестройки параметров  $\alpha, \beta$  фильтра позволяет значительно уменьшить динамические ошибки экстраполяции координат на участке маневра цели.

На рис. 7 представлены полученные в результате моделирования зависимости динамической ошибки дальности от номера измерения и величины нормальной перегрузки.

Моделировалась работа алгоритма сопровождения реализованного в 9С470 и предложенного алгоритма с использованием СШП сигналов. Анализ полученных результатов показывает значительное снижение динамической ошибки измерения дальности.

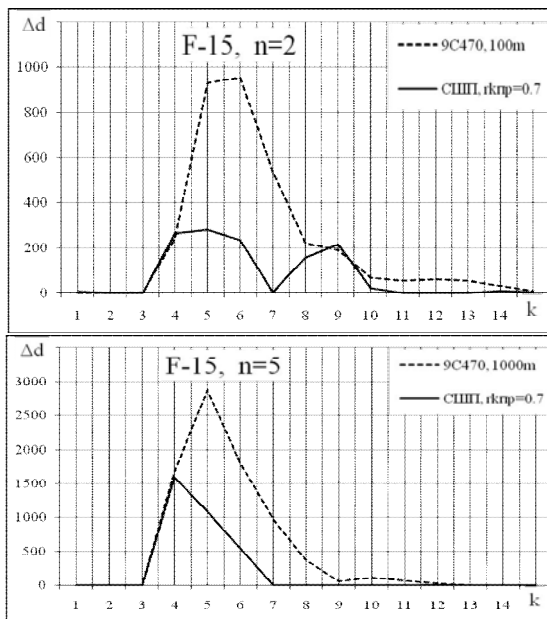


Рис. 7. Зависимости динамической ошибки дальности от номера измерения и величины нормальной перегрузки для соответствующих уровней порога

## Выводы

1. Применение коэффициентов межобзорной корреляции усредненных ДП, полученных в результате обработки обнаруженных пачек СШП сигналов, в качестве критерия обнаружения маневра позволяет определять порог обнаружения независимо от интенсивности маневра.

2. Метод сопровождения траектории РЛЦ с применением СШП сигналов, которые обеспечивают обнаружение маневра РЛЦ, своевременную перестройку параметров  $\alpha, \beta$  фильтра и учет радиальной скорости РЛЦ, позволяет значительно уменьшить динамические и флюктуационные ошибки экстраполяции координаты дальности.

## МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ МАНЕВРУ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ЦІЛІ В ОГЛЯДОВИХ РЛС ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ НАДШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ

А.Л. Ковтунов, С.П. Лещенко, М.П. Батуринський, Л.В. Польшина

Запропоновано метод виявлення маневру радіолокаційної цілі в оглядових РЛС за результатами оцінки величин коефіцієнтів міжоглядової кореляції дальностних портретів. Запропоновано метод супроводження траєкторії цілі, при інтенсивному маневрі, з виявленням маневру, застосуванням надширокопasmових сигналів і врахуванням радіальної швидкості цілі. Проведено аналіз якості фільтрації й екстраполяції параметрів супроводжуваних траєкторій, при використанні запропонованого методу траєкторного супроводження й методу реалізованого в ПБУ 9С470.

**Ключові слова:** вторинна обробка, оглядові РЛС, надширокопasmові сигнали, кореляція сигналів, фільтрація, екстраполяція, радіальна швидкість цілі.

## METHOD FOR DETECTION OF RADAR TARGET MANEUVER IN SURVEILLANCE RADARS USING UWB SIGNALS

A.L. Kovtunov, S.P. Leshchenko, M.P. Baturynskiy, L.V. Polshyna

Method for detecting radar target maneuver in surveillance radars by the estimation of the values of intersurveillance correlation coefficients of range portraits is proposed. Method for the target trajectory tracking, with intense maneuver, with the maneuver detector, with the use of ultra-wideband signals and taking into account the radial target velocity is proposed. The quality of filtration and extrapolation of tracked trajectories' parameters is analyzed using the proposed method of trajectory tracking and the method implemented in the combat control station 9C470.

**Keywords:** reprocessing, surveillance radars, UWB signals, signals correlation, filtration, extrapolation, radial target velocity.

3. Применение предложенного метода обнаружения маневра РЛЦ, с использованием СШП сигналов, не зависит от выбора системы координат.

## Список литературы

1. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С.З. Кузьмин. – К.: КВиЦ, 2000. – 428 с.
2. Хиль П.Я. Побудова, технічна експлуатація і бойове використання командного пункту ЗРК БУК-М1. Ч. II. Пункт бойового керування 9С470М1: навч. посіб. – Х.: ХУПС, 2005. – 75 с.
3. Ковтунов А.Л. Методи виявлення широкопasmових 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.
4. Ковтунов А.Л. Методи вимірювання координат повітряних цілей в оглядових РЛС з використанням надширокопasmових радіолокаційних сигналів / А.Л. Ковтунов, С.П. Лещенко // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2012. – Вип.7(105). – С. 91-94.
5. Методи вторинної обробки РЛІ в обзорних РЛС використовуючих полярну систему координат с применением СШП сигналов / А.Л. Ковтунов, С.П. Лещенко, З.З. Закиров, М.П. Батуринський // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2013. – Вип. 1(34). – С. 74-78.
6. 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.
7. Фарина А. Цифровая обработка радиолокационной информации Сопровождение целей: пер. с англ. / А. Фарина, Ф. Студер. – М., 1993. – С. 16-19.
8. 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.

Поступила в редколлегию 6.08.2013

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