

УДК 621.396.969.181.24

А.Л. Ковтунов, С.П. Лещенко, З.З. Закиров, М.П. Батурицкий

Харьковский университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, Харьков

МЕТОДЫ ВТОРИЧНОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ В ОБЗОРНЫХ РЛС, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ПОЛЯРНУЮ СИСТЕМУ КООРДИНАТ С ПРИМЕНЕНИЕМ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

Исследованы алгоритмы вторичной обработки радиолокационной информации в обзорных РЛС 19Ж6 и 55Ж6, на этапе сопровождения траектории цели в установившемся режиме. Проведен анализ качества фильтрации и экстраполяции параметров сопровождаемой траектории, при использовании имеющихся узкополосных и предлагаемых сверхширокополосных сигналов. Предложен метод сопровождения траектории цели, при интенсивном маневре, с применением сверхширокополосных сигналов и учета радиальной скорости цели. Показано уменьшения динамической и флуктуационной ошибки при использовании сверхширокополосных сигналов и учете радиальной скорости цели.

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

Введение

Постановка проблемы. В основу решения задач вторичной обработки радиолокационной информации (РЛИ) в обзорных РЛС, которые используют полярную систему координат, как правило, положена модель линейного изменения параметров движения воздушных объектов, а именно дальности и азимута формула (1),

$$\begin{aligned} r(t) &= r_0 + V_r \cdot t \\ \beta(t) &= \beta_0 + V_\beta \cdot t \end{aligned} \quad (1)$$

где r_0 , β_0 – координаты отправной точки сопровождения ВО; V_r , V_β – скорость изменения координат r и β . Для такой модели даже при прямолинейном и равномерном движении будут наблюдаться «кажущиеся» ускорения по дальности и азимуту, что будет приводить к постоянному присутствию динамических ошибок дальности и азимута. А такое «псевдо маневрирование» воздушной цели может привести даже к срыву сопровождения, вследствие резкого увеличения динамических ошибок. Поэтому, например, в РЛС 19Ж6 и 55Ж6 конфликтные ситуации вынужден решать оператор. Эффективность системы сопровождения повышается при снижении как динамических, так и флуктуационных ошибок. Для этого необходимо решать двухкритериальную задачу одновременной минимизации указанных ошибок. Компромиссным вариантом, удовлетворяющим противоречивым требованиям хорошего сглаживания ошибок измерения и способности мгновенного реагирования на маневр воздушной цели, может служить использование сверхширокополосных сигналов (СШП), которые обеспечивают разрешение элементов конструкции цели по дальности и получать дальностные портреты (ДП).

Анализ литературы. В [1, 2] результатами моделирования доказано, что применение СШП сигналов позволяет увеличить точность измерения дальности, а также азимута для всех типов целей при отношении сигнал-шум более 13-15 дБ. В [3] предложен метод измерения радиальной скорости при обработке одной пачки СШП сигналов, отраженных от цели. Метод получения оценки радиальной скорости цели реализуется на основе того, что временная задержка ДП в пачке имеет линейную связь с радиальной скоростью цели, а использование СШП сигналов позволяет эту задержку измерять. Это позволяет расширить вектор измеряемых параметров, учесть полученные оценки радиальной скорости в алгоритме экстраполяции дальности для уменьшения динамической ошибки дальности. Далее рассматриваются возможности улучшения алгоритмов вторичной обработки РЛИ при использовании СШП ЛЧМ сигналов с девиацией частоты внутри импульса $\Delta f = 150$ МГц в обзорных РЛС 19Ж6 и 55Ж6.

Основная часть

1. Алгоритмы сопровождения трасс целей, сопровождаемых по данным РЛС 19Ж6 и 55Ж6

В РЛС 19Ж6 сглаживание параметров трасс целей осуществляется экспоненциальным фильтром. Формулы для вычисления сглаженных значений приростов координат имеют вид:

$$\begin{aligned} \Delta r_n^3 &= \Delta r_{n-1}^3 + \alpha_2 (r_n^B - r_n^E); \\ \Delta \beta_n^3 &= \Delta \beta_{n-1}^3 + \alpha_2 (\beta_n^B - \beta_n^E). \end{aligned} \quad (2)$$

Экстраполированные на следующий шаг значения координат можно определить из соотношений:

$$\begin{aligned} r_{n+1}^e &= r_n^e + \alpha_1(r_n^B - r_n^e) + \Delta r_n^3; \\ \beta_{n+1}^e &= \beta_n^e + \alpha_1(\beta_n^B - \beta_n^e) + \Delta \beta_n^3, \end{aligned} \quad (3)$$

где $r_n^3, \beta_n^3, \Delta r_n^3, \Delta \beta_n^3$ – сглаженные значения координат и приростов координат на n-м шаге;

r_n^e, β_n^e – экстраполированные значения координат на n-й шаг;

$r_n^B, \beta_n^B, \Delta r_n^B, \Delta \beta_n^B$ – измеренные значения координат и приростов координат на n-поэтаму шагу;

α_1, α_2 – коэффициенты экспоненциального сглаживания координат и приростов координат соответственно. При использовании этих соотношений достаточно иметь текущие измерения координат r_n^B, β_n^B , а за предыдущий шаг сохранять лишь сглаженные значения приростов координат

$\Delta r_{n-1}^3, \Delta \beta_{n-1}^3$, и результат экстраполяции r_n^e, β_n^e . Коэффициенты сглаживания $\alpha_1=0,75$ ($0,75=1/2+1/4$) и $\alpha_2=1/2$ выбранные так, чтобы обеспечить эффективное сглаживание оценок координат и свести операцию умножения к простому сдвигу разрядов множимого [4]. Очевидно, что выбранная модель линейного изменения азимута и дальности цели не отвечает поведению реальных воздушных объектов, и все цели, которые двигаются в пространстве равномерно и прямолинейно для реализованного в РЛС 19Ж6 фильтра сглаживания маневрируют.

В РЛС 55Ж6 реализованы простейшие алгоритмы сопровождения воздушных объектов. Сглаживание координат отсутствует, т.е. в качестве сглаженной оценки значения координат берется результат измерений в каждом периоде обзора. Сглаживание скорости изменения дальности, азимута и угла места осуществляется путем усреднения в двухэлементном "скользящем окне", т.е. путем усреднения результатов двух последних измерений скорости:

$$\begin{aligned} \hat{V}_{Di} &= \frac{\tilde{V}_{Di} + V_{Di-1}}{2}; \\ \hat{V}_{\beta i} &= \frac{\tilde{V}_{\beta i} + V_{\beta i-1}}{2}; \end{aligned} \quad (4)$$

где знаки “^” и “~” означают сглаженное значение и результат измерения соответственно. Расчетные соотношения для экстраполированных значений координат имеют вид:

$$\begin{aligned} r_{i+1}^3 &= \frac{1}{2}(3\tilde{r}_i - \tilde{r}_{i-2}); \\ \beta_{i+1}^3 &= \frac{1}{2}(3\tilde{\beta}_i - \tilde{\beta}_{i-2}); \end{aligned} \quad (5)$$

Поскольку составляющие скорости нигде при обработке информации не используются, то для окончательных расчетов применяются только выражения (5), составляющие основу алгоритма экстраполяции [5].

2. Анализ флуктуационной ошибки экстраполяции дальности и азимута с использованием имеющегося узкополосного и предлагаемого СШП сигналов

Работа алгоритмов следящих измерений параметров трасс целей, в РЛС 19Ж6 и 55Ж6, при использовании существующих узкополосных и предлагаемых СШП сигналов, проверялась методом математического моделирования с использованием программного пакета по моделированию электродинамики вторичного излучения BSS (Back Scattering Simulation) [6].

Были получены оценки математических ожиданий и среднеквадратических ошибок экстраполяции азимута и дальности цели с использованием узкополосного и СШП сигналов. Моделирование проводилось для различных траекторий полета (рис. 1), учетом ракурсов целей, отношений сигнал-шум, при сопровождении типов целей различной протяженности: стратегического бомбардировщика B-52, тактического истребителя F-15 и крылатой ракеты ALCM.

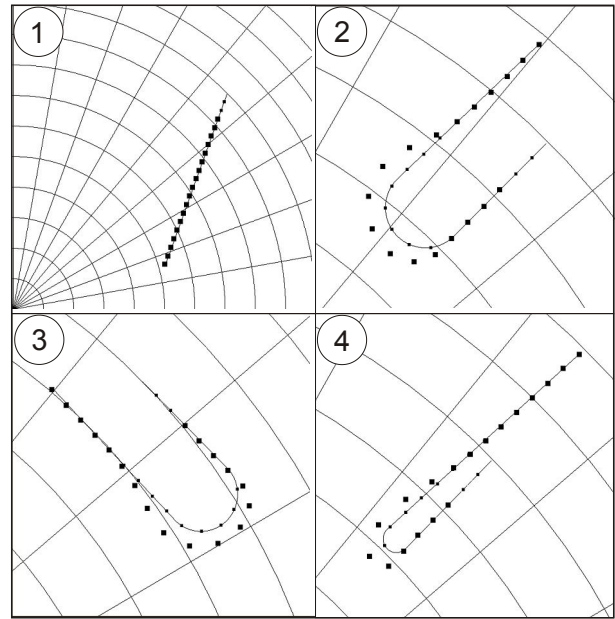


Рис. 1. Горизонтальные проекции траекторий движения моделируемой цели, а также точки оценок и точки экстраполяции координат на примере работы РЛС 19Ж6 при использовании узкополосного сигнала (цена деления сетки 10км-10°)

Для оценки флуктуационной ошибки использовалась модель цели, которая движется прямолинейно, равномерно (траектория №1 рис.1). На рис.2 представлены полученные зависимости СКО ошибок экстраполяции дальности от номера измерения с использованием узкополосного сигнала в РЛС 19Ж6, 55Ж6 и СШП сигнала, при отношении сигнал-шум 30дБ.

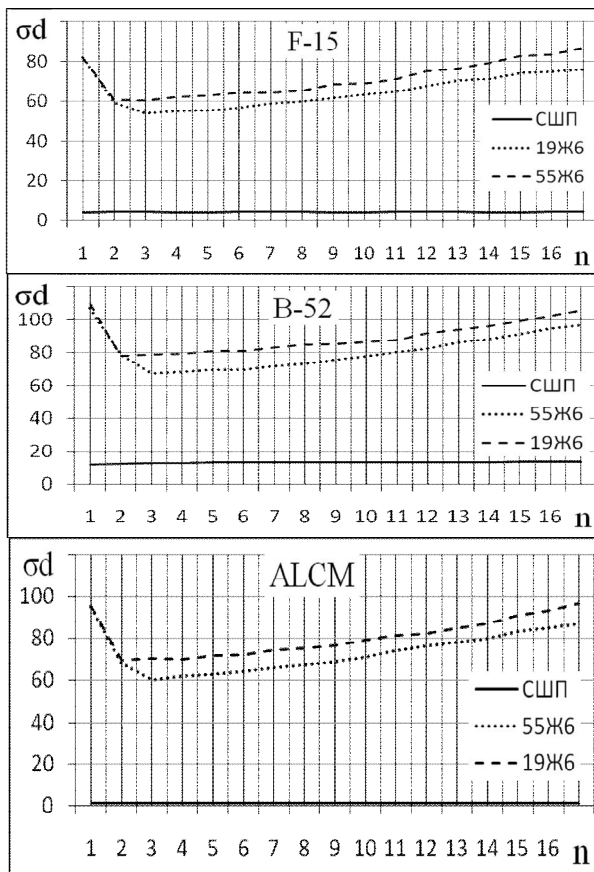


Рис. 2. Зависимости СКО ошибок экстраполяции дальности от номера измерения и типа цели

Анализ полученных зависимостей показывает значительное снижение флуктуационной ошибки экстраполяции дальности для всех типов целей. На рис. 3 представлен пример зависимостей оценок СКО следящих измерений азимута от номера измерения при отношении сигнал-шум 30дБ.

Анализ полученных результатов моделирования показал, что при отношениях сигнал-шум больших 13-14 дБ СШП сигналы имеют преимущество перед узкополосными сигналами по показателю СКО флуктуационной ошибки экстраполяции азимута для всех типов целей.

При отношениях сигнал-шум менее 13дБ угловые ошибки с применением СШП сигналов заметно возрастают.

Зависимость СКО ошибки экстраполяции азимута от отношения сигнал-шум для модели тактического истребителя F-15 с использованием узкополосного и СШП сигнала представлена на рис. 4.

3. Анализ динамической ошибки экстраполяции дальности с использованием имеющегося узкополосного и предлагаемого СШП сигналов

В [3] предложен метод измерения радиальной скорости при обработке одной пачки СШП сигналов, отраженных от цели.

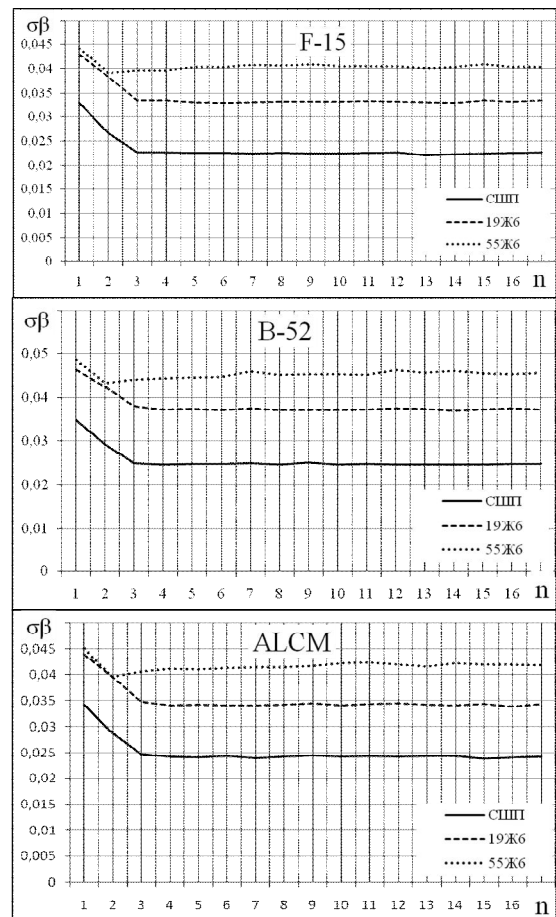


Рис.3. Зависимости СКО ошибок экстраполяции азимута от номера измерения и типа цели

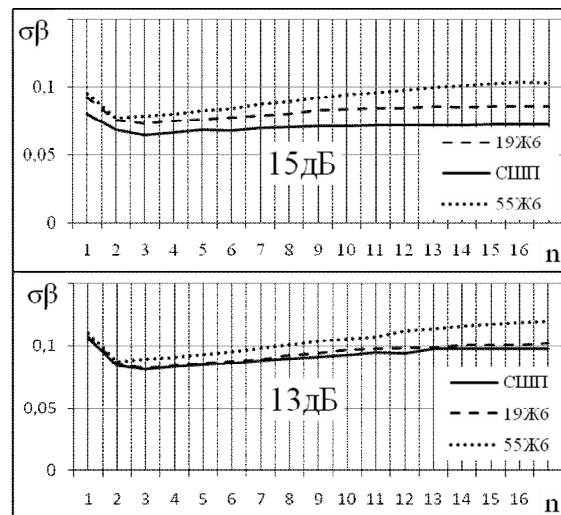


Рис. 4. Зависимости СКО ошибки экстраполяции азимута от номера измерения и отношения сигнал-шум, для тактического истребителя F-15

На рис. 5, 6 представлены зависимости математических ожиданий оценок радиальной скорости, полученной при обработке пачки СШП отраженного от цели сигнала, и скорости полученной по двум оценкам дальности за два оборота антенны от номера измерения.

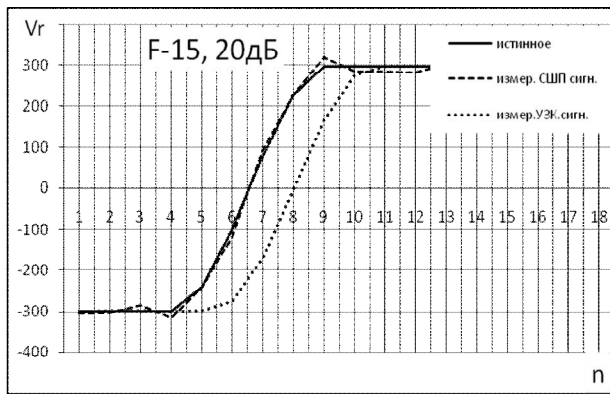


Рис. 5. Зависимости оценок радиальных скоростей от номера измерения маневрирующей цели (траектория № 2 рис. 1)

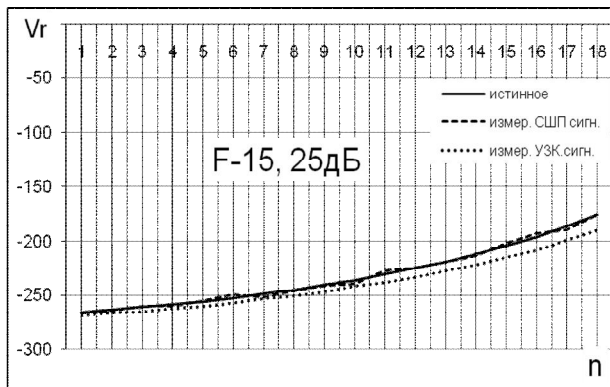


Рис.6. Зависимости оценок радиальных скоростей от номера измерения не маневрирующей цели (траектория № 1 рис. 1)

Из графика видно, что ошибка измерения радиальной скорости, которая связана со «старением» информации за период обзора РЛС, присутствует даже при линейном движении цели. Предлагается экстраполяцию координаты дальности производить с учетом оценок радиальной скорости, полученных при обработке каждой пачки СШП сигналов:

$$\hat{r}_{\text{э}}(k+1) = \hat{r}_k + \bar{V}_{r_k} T, \quad (6)$$

где \hat{r}_k - сглаженное значение оценки дальности на k -м шаге, $\hat{r}_{\text{э}}(k+1)$ - экстраполированное значение дальности, $\bar{V}_{r_k} T$ - радиальная скорость цели, полученная при обработке пачки СШП за период, T - период обзора РЛС.

Однако дисперсия ошибки измерения радиальной скорости указанным методом при снижении сигнал-шум становится больше дисперсии оценки скорости, получаемой на основе оценки дальности от обзора к обзору. Поэтому предлагается для переключения каналов фильтров производить сравнение квадратов ошибок экстраполяции дальности:

$$(r_{\text{изм}} - r^{\hat{r}}_{\text{э}})^2 \ll (r_{\text{изм}} - r^{Vr}_{\text{э}})^2, \quad (7)$$

где $r_{\text{изм}}$ - измеренное значение дальности на текущем шаге;

$r^{\hat{r}}_{\text{э}}$ - экстраполированное значение дальности на текущий шаг по данным скорости полученной по двум оценкам дальности \hat{r} ;

$r^{Vr}_{\text{э}}$ - экстраполированное значение дальности на текущий шаг по данным радиальной скорости полученной при обработке пачки отраженного СШП сигнала \bar{V}_{r_k} .

Величина $(r_{\text{изм}} - r^{\hat{r}}_{\text{э}})$ представляет собой ошибку экстраполяции, которая зависит от дисперсий ошибки измерения дальности, радиального ускорения, вызванного маневром цели, «кажущимся» ускорением, обусловленными выбором полярной системы координат. Моделировалось движение целей, которые выполняют разворот на 180° в горизонтальной плоскости с нормальной перегрузкой 2. На рис.7-8 представлены графики зависимости динамической ошибки экстраполяции дальности от номера измерения и особенностей работы алгоритмов сопровождения, реализованных в РЛС 19Ж6, 55Ж6, а также алгоритма с учетом оценки радиальной скорости, полученной при обработке каждой пачки СШП сигнала.

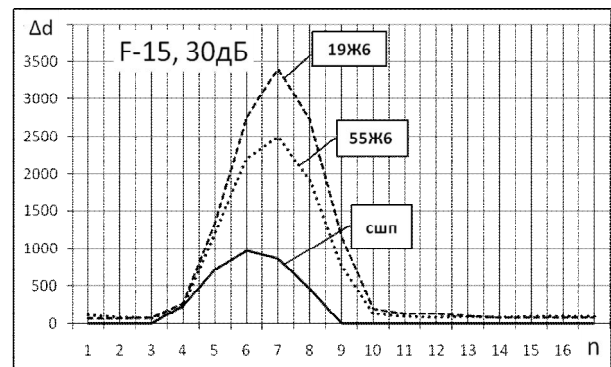


Рис.7. Зависимость динамической ошибки экстраполяции оценки дальности от номера измерения с учетом и без учета оценок радиальной скорости на встречном ракурсе (траектория № 2 рис. 1)

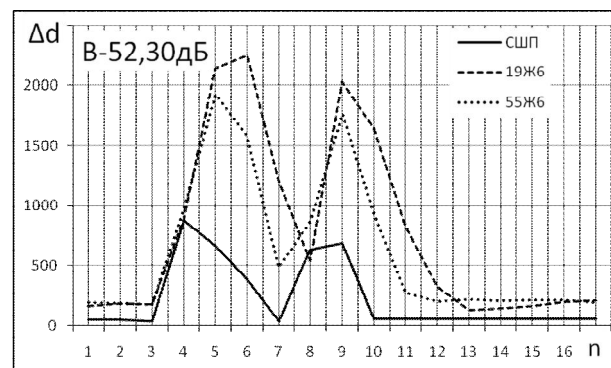


Рис.8. Зависимость динамической ошибки экстраполяции оценки дальности от номера измерения с учетом и без учета оценок радиальной скорости боковом ракурсе (траектория № 3 рис. 1)

Зависимость динамической ошибки экстраполяции оценки дальности от номера измерения с учетом и без учета оценок радиальной скорости в РЛС 19Ж6 на встречном ракурсе для различных значений нормальной перегрузки представлена на рис. 9.

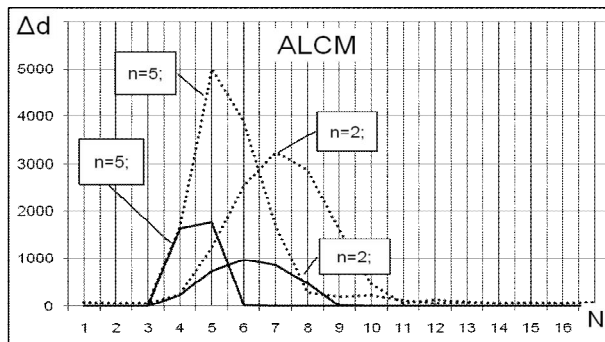


Рис. 9. Зависимость динамической ошибки экстраполяции оценки дальности от номера измерения с учетом и без учета оценок радиальной скорости в РЛС 19Ж6 на встречном ракурсе (траектория № 2 и № 4 рис. 1)

Выводы

1. Применение СШП сигналов в РЛС 19Ж6 и 55Ж6 при статистической обработке сопровождаемых трасс с отношением сигнал-шум больших 13-15дБ приводит к значительному снижению флуктуационных ошибок оценок дальности и азимута для всех типов целей.

2. Алгоритм экстраполяции, с учетом оценок радиальной скорости цели полученной при обработке СШП сигналов позволяет значительно уменьшить динамическую ошибку экстраполяции дальности, вызванную интенсивным маневром и наличием «кажущихся» ускорений, при несущественном увеличении флуктуационной ошибки независимо от величины полного вектора скорости.

МЕТОДИ ВТОРИННОЇ ОБРОБКИ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ІНФОРМАЦІЇ В ОГЛЯДОВИХ РЛС, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ ПОЛЯРНУ СИСТЕМУ КООРДИНАТ ІЗ ЗАСТСУВАННЯМ НАДШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ

А.Л. Ковтунов, С.П. Лещенко, З.З. Закиров, М.П. Батуринський

Досліджено алгоритми вторинної обробки радіолокаційних сигналів в оглядовій РЛС 19Ж6 і 55Ж6 на етапі супроводу траєкторії цілі в сталому режимі. Проведено аналіз якості фільтрації й екстраполяції параметрів траєкторії при використанні наявних вузькосмугових і пропонованих надширокосмугових сигналів. Запропоновано метод супроводу траєкторії цілі, при інтенсивному маневрі, із застосуванням надширокосмугових сигналів і врахуванням радіальної швидкості цілі. Показано зменшення динамічної і флуктуаційної помилки при використанні надширокосмугових сигналів і врахуванні радіальної швидкості цілі.

Ключові слова: вторинна обробка, оглядові РЛС, надширокосмугові сигнали, фільтрація, екстраполяція, радіальна швидкість цілі.

METHODS OF RADAR DATA REPROCESSING IN SURVEILLANCE RADARS USING POLAR COORDINATE SYSTEM USING UWB SIGNALS

A.L. Kovtunov, S.P. Leshenko, Z.Z. Zakirov, M.P. Baturinskiy

The algorithms of radar signals reprocessing in surveillance radars 19Ж6 and 55Ж6 in the phase of target trajectory tracking at constant duty are studied. The analysis of filtration and extrapolation quality of trajectory parameters using the given narrowband and proposed UWB signals is performed. The method of target trajectory tracking with intense maneuver using UWB signals and accounting the radial target velocity is proposed. Decrease of dynamic error while using UWB signals and accounting the radial target velocity is shown.

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

Список литературы

1. Лещенко С.П. Возможности широкополосных РЛС по измерению координат и сопровождению воздушных целей / С.П. Лещенко // Збірник наукових праць ХВУ. – Х.: ХВУ, 2002. – Вип. 1 (39). – С. 90-92.
2. Ковтунов А.Л. Методи вимірювання координат повітряних цілей в оглядових РЛС з використанням надширокосмугових радіолокаційних сигналів / А.Л. Ковтунов, С.П. Лещенко // Системи обробки інформації. – Х. ХУПС, 2012. – Вип. 7 (105). – С. 91 – 94.
3. Ковтунов А.Л. Методи виявлення широкосмугових сигналів та виміру радіальної швидкості цілі в оглядових РЛС / А.Л.Ковтунов, С.П. Лещенко // Збірник наукових праць ХУПС. – Х.: ХУПС, 2012 – Вип. 4 (33). – С. 78 – 81.
4. Гриб Д.А. Озброєння та військова техніка РТВ. Побудова РЛС 19Ж6 / Д.А. Гриб, В.И. Климченко, В.М. Купрій, І.В. Невмержицький – Х.: ХУПС, 2006 – 60 с.
5. Климченко В.И. Вооружение и военная техника радиотехнических войск. Трехкоординатная радиолокационная станция 55Ж6 / В.И. Климченко. – Х.: ВИРТА, 1990. – 269 с.
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. Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации / С.З. Кузьмин. – М.: Радио и связь, 1986. – 351 с.
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.
9. Виявлення повітряних цілей радіолокаторами з широкосмуговими зондуючими сигналами // Зб. наукових праць ЦНДІ ЗСУ. Вип. 10. 2001. С. 93 – 102.

Поступила в редколлегию 26.12.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.И. Сухаревский, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.