



КВАДРАТИЧНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ УСКОРЕНИЯ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ И СОПРОВОЖДЕНИИ МАНЕВРИРУЮЩЕГО ОБЪЕКТА В РАДАРАХ КВАЗИНЕПРЕРЫВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В. Н. Коврегин, Г. М. Коврегина

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Представлен нетрадиционный метод измерения/оценивания ускорения сближения или удаления интенсивно маневрирующего воздушного объекта при решении задач «захвата» и сопровождения его траектории в радарх с квазинепрерывным излучением. Приведены аналитические оценки и результаты экспериментов, подтверждающие работоспособность и эффективность применения предлагаемого метода.

Ключевые слова: авиационный радар; квазинепрерывное излучение; линейная частотная модуляция, маневрирующая воздушная цель, захват и сопровождение траектории.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект № 22-19-00058.

Для цитирования:

Коврегин, В. Н. Квадратичный метод измерения ускорения при наблюдении и сопровождении маневрирующего объекта в радарх квазинепрерывного излучения / В. Н. Коврегин, Г. М. Коврегина // Системный анализ и логистика. – 2024. – № 3(41). – с. 39-47. DOI: 10.31799/2077-5687-2024-3-39-47.

QUADRATIC METHOD FOR MEASURING ACCELERATION WHEN OBSERVING AND TRACKING A MANEUVERING OBJECT IN RADARS WITH QUASICONTINUOUS RADIATION

V. N. Kovregin, G. M. Kovregina

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

An unconventional method is presented for measuring/estimating the acceleration of approach or removal of an intensively maneuvering air object when solving problems of “capturing” and tracking its trajectory in radars with quasi-continuous radiation. Analytical estimates and experimental results are presented that confirm the performance and effectiveness of the proposed method.

Keywords: aviation radar; quasi-continuous radiation; linear frequency modulation, maneuvering air target, acquisition and trajectory tracking.

The research was carried out with financial support from the Russian Science Foundation, project No. 22-19-00058.

For citation:

Kovregin, V. N. Quadratic method for measuring acceleration when observing and tracking a maneuvering object in radars with quasicontinuous radiation / V. N. Kovregin, G. M. Kovregina // System analysis and logistics. – 2024. – № 3(41). – p. 39-47. DOI: 10.31799/2077-5687-2024-2-39-47.

Введение

Отмечается устойчивая тенденция к расширению маневренных возможностей объектов, являющихся типовыми радиолокационными (РЛ) воздушными объектами (ВО) для радаров (РЛС) различного базирования, функционирующих в режимах квазинепрерывного излучения (КНИ) с высокой или высокой средней частотой повторения импульсов (ЧПИ). В сравнении с равномерным движением ВО, интенсивная эволюция ее относительной траектории приводит к фазовым искажениям сигнала ВО, дополнительным линейным и нелинейным модуляциям, деформациям и смещениями спектра и, как следствие, к усложнению обнаружения и существенному снижению точности первичных РЛ измерений траекторных параметров ВО. Кроме того, при маневре и относительно редких «опросах» ВО в процессе ее сопровождения существенно снижается точность экстраполяции траектории ВО при традиционном составе РЛ измерений, включающего дальность, скорость сближения и угловые координаты. При этом значительно ухудшается точность оценок траекторных параметров в следящих фильтрах,



возникают аномальные оценки, возрастает вероятность «срыва» сопровождения. В целом, в условиях высокой маневренности ВО существует объективная необходимость в расширении информативности выполняемых РЛС непосредственных измерений, включая не только угловые и пространственные координаты и их первые производные, но и производные более высокого порядка, отражающие сложные эволюции относительной траектории ВО.

В рамках статьи: *объект исследования* – типовая авиационная РЛС КНИ; *предмет исследования* – методы измерения/оценивания радиального ускорения a_R при сближении или удалении ВО относительно РЛС, реализуемые на этапах «захвата» и сопровождения траектории ВО в режиме КНИ РЛС, включая режимы КНИ с линейной частотной модуляцией несущего колебания (ЛЧМ) в пачках зондирующих импульсов (ПЗИ), обычно используемые для однозначного определения дальности ВО [1-3], а также в известных методах адаптивно-робастного «всескоростного» дальнего наблюдения/сопровождения ВО [4-9 и др.].

Традиционно [1-3] ускорение a_R вычисляется путем численного дифференцирования на основе двух и более последовательных РЛ измерений радиальной скорости V_R . Начало маневра ВО и присутствие ускорения обнаруживают, например, на основе анализа обновляющей последовательности [10] при вторичной обработке информации в наборе низкочастотных фильтров, настроенных на маневр ВО определенного типа. Известен ряд способов, например, представленных в патентах [RU 2282873, RU 2542347, RU 2154837 и др.], предполагающих обнаружение маневра ВО непосредственно на этапе первичной обработки сигналов. Обычно предлагается введение многоканальности по ускорению с определением каналов, в наибольшей степени соответствующих принимаемым сигналам ВО, путем взаимного сравнения и выбора максимальных сигналов на выходах этих каналов. Например, осуществляется панорамная развертка сигнала по частоте и по производной частоты с последующим накоплением в матричном фильтре. В другом способе [RU 2154837] осуществляется разбиение сигнальной выборки на ряд коротких выборок, вычисление корреляционных сумм в узлах сетки гексагонального типа. К недостаткам вышеуказанных способов, связанных с определением радиального ускорения при первичной обработке сигнала, относятся:

- необходимость существенной модификации систем первичной обработки сигналов для их реализации в РЛС и дополнительных вычислительных затрат;
- трудность реализации в реальном масштабе времени при широких диапазонах измеряемых частот, производных частоты (ввиду увеличения требуемых каналов обработки сигналов);
- относительно низкая точность определения ускорения при малых отношениях «сигнал/шум» и малой длительности радиоконтакта.

Указанные выше методы не применяются в режимах КНИ с ЛЧМ. В таких режимах могут использоваться следующие методы измерения ускорения: ■ фазоразностный, который рассмотрен только для режима с низкой ЧПИ и в ряде случаев не обеспечивает требуемой точности измерений: ■ метод [8], основанный на: выявлении асимметрии («перекоса») измерений двух дальностно-доплеровских частот (ДДЧ) относительно принятого базового измерения ДДЧ при наличии радиального ускорения и обусловленной им дополнительной ЛЧМ сигнала ВО; оценивании значения крутизны дополнительной ЛЧМ, вызванной ускорением, и значения этого ускорения. Указанный метод [8] (далее по тексту – «метод асимметрий») требует: частотно-временных измерений по сигналам для трех ПЗИ, что может быть критично по временным затратам на радиоконтакт; специальной комбинации задаваемых значений крутизны ЛЧМ. Метод также может быть критичен по точности оценок ускорения – при малой длительности ПЗИ и интервалов между их излучением, малых отношениях «сигнал/шум». *Цель данной статьи* – представление нетрадиционного метода измерения ускорения ВО, универсального для применения в режимах типового КНИ и КНИ с ЛЧМ (при произвольном назначении крутизны ЛЧМ), реализуемого на основе частотно-временных измерений по двум ПЗИ, излучаемых РЛС для решения задач



наблюдения/сопровождения ВО. *Прагматическая цель*: повышение точности, сокращение временных затрат (количества пачек) для определения ускорения ВО и, как следствие, повышение устойчивости наблюдения/сопровождения ВО в условиях интенсивного маневрирования и снижения допустимой частоты «опросов» ВО.

Основная часть

1. Квадратичный метод определения ускорения.

Рассмотрим типичные процедуры излучения/приема/обработки ЛЧМ-сингала при КНИ.

Зондирующий когерентно-импульсный сигнал $C_3(t)$ при внесенной линейной частотной модуляции несущей частоты f_0 с заданным значением K скорости изменения этой частоты:

$$C_3(t) = C_0 \exp(j2\pi f_0 t) \exp(j\pi K t^2), \quad (1)$$

где t – время; C_0 – амплитуда сигнала; $\exp(j2\pi f_0 t)$ – высокочастотная составляющая; $\exp(j\pi K t^2)$ – ЛЧМ зондирующего сигнала при скорости изменения несущей частоты K .

Эхосигнал ВО на входе приемника $C_{нрм}(t)$

$$C_{нрм}(t) = U(t) \exp\{j2\pi f_0 t\} \exp\{j\pi K t^2\} \exp\{j2\pi \frac{2f_0}{c} V_R t\} \exp\{j\pi \frac{2f_0}{c} a_R t^2\} + \xi(t), \quad (2)$$

где: $U(t) = C_0 A_m(t, P, \lambda, G(t), \sigma_{ВО}(t))$; A_m – амплитуда сигнала; P – импульсная мощность; λ – длина волны; c – скорость радиоволн; $\sigma_{ВО}(t)$ – эффективная площадь рассеяния (ЭПР) ВО; V_R и a_R – скорость и ускорение сближения/удаления ВО и фазового центра антенны радара; $\xi(t)$ – шум в приемном канале.

После типичной цифровой обработки узкополосного сигнала вида (2), традиционно включающей перенесение спектра в область видеочастот, компенсацию заданной ЛЧМ в зондирующих импульсах вида (1) излучаемой пачки и быстрое преобразованием Фурье (БПФ), осуществляется определение глобального максимума амплитуды («пика») принимаемого сигнала ВО (ГМА) в одном из дискретов неоднозначной задержки сигнала (НЗС)/дальности в «рабочей зоне» периода повторения импульсов (ППИ). Номер дискрета НЗС с ГМА определяет измерение/оценку НЗС цели τ . Номер фильтра, соответствующий ГМА, дает измерение/оценку дальностно-доплеровской частоты F_{RD} ЛЧМ-сигнала:

$$F_{RD} = F_D - (K + K_a) \frac{2}{c} R, \quad (3)$$

$$\text{где } F_D = \frac{2}{\lambda} V_R \quad (4)$$

– доплеровский сдвиг частоты принимаемого сигнала относительно f_0 (далее по тексту – «доплеровская частота» (ДЧ)) из-за скорости V_R сближения/удаления ВО и РЛС; K – заданная при излучении скорость изменения несущей частоты, причем $K > 0$ (увеличение частоты, положительная модуляция) ведет к снижению ДДЧ относительно ДЧ; K_a – априори неизвестная скорость изменения частоты при ЛЧМ из-за радиального ускорения ВО a_R , т. е.

$$K_a = \frac{2}{\lambda} a_R ; \quad (5)$$

$$\text{дальность до ВО: } R = \frac{c}{2} T_{оз} = \frac{c}{2} [rT_r + \tau] \quad (6)$$

$$\text{–}, \quad \text{где } T_{оз} = rT_r + \tau \quad (7)$$



– однозначная задержка сигнала ВО; T_r и r – ППИ и индекс (номер) ППИ.

Далее в работе используются обозначения крутизны ЛЧМ $S = (-K)$ и $S_a = (-K_a)$, для которых положительные значения приводят к превышению ДДЧ относительно ДЧ и наоборот.

Рассмотрим выражение для ДДЧ, полученных по ПЗИ, излученным в $(i-1)$ -ый и i -й моменты времени, с интервалом между моментами излучения Δt .

$$F_{RD_{i-1}} = F_{D_{i-1}} + (S_{i-1} + S_a) \frac{2}{c} R_{i-1}; \quad (8)$$

$$F_{RD_i} = F_{D_i} + (S_i + S_a) \frac{2}{c} R_i = F_{D_i} + (S_i + S_a) \frac{2}{c} (R_{i-1} - \Delta R_{i-1}). \quad (9)$$

$$\text{Учтем, что } a_R = \frac{\lambda}{2} S_a; \Delta R_{i-1} = V_{R_{i-1}} \Delta t + a_R \frac{\Delta t^2}{2} = V_{R_{i-1}} \Delta t + \frac{\lambda}{2} S_a \frac{\Delta t^2}{2}; F_{D_i} = F_{D_{i-1}} + S_a \Delta t. \quad (10)$$

Тогда при подстановках в (8) и (9) получаем имеем выражения

$$\begin{aligned} F_{RD_i} &= F_{D_{i-1}} + S_a \Delta t + (S_i + S_a) \frac{2}{c} R_{i-1} - (S_i + S_a) \frac{2}{c} \left(V_{R_{i-1}} \Delta t + \frac{\lambda}{2} S_a \frac{\Delta t^2}{2} \right) = \\ &= F_{D_{i-1}} + S_a \Delta t + S_i \frac{2}{c} R_{i-1} + S_a \frac{2}{c} R_{i-1} - S_i \frac{2}{c} V_{R_{i-1}} \Delta t - S_i \frac{\lambda}{c} S_a \frac{\Delta t^2}{2} - S_a \frac{2}{c} V_{R_{i-1}} \Delta t - S_a \frac{\lambda}{c} S_a \frac{\Delta t^2}{2} = \\ &= F_{D_{i-1}} + S_a \left(\Delta t + \frac{2}{c} R_{i-1} - S_i \frac{\lambda}{c} \frac{\Delta t^2}{2} - \frac{2}{c} V_{R_{i-1}} \Delta t \right) - S_a^2 \frac{\lambda}{c} \frac{\Delta t^2}{2} + S_i \frac{2}{c} R_{i-1} - S_i \frac{2}{c} V_{R_{i-1}} \Delta t. \end{aligned}$$

Рассмотрим разность ДДЧ

$$\Delta F_{RD_{i/i-1}} = F_{RD_i} - F_{RD_{i-1}} = S_a \left(\Delta t - S_i \frac{\lambda}{c} \frac{\Delta t^2}{2} - \frac{2}{c} V_{R_{i-1}} \Delta t \right) - S_a^2 \frac{\lambda}{c} \frac{\Delta t^2}{2} + (S_i - S_{i-1}) \frac{2}{c} R_{i-1} - S_i \frac{2}{c} V_{R_{i-1}} \Delta t,$$

откуда

$$S_a^2 \frac{\lambda}{c} \frac{\Delta t^2}{2} - S_a \left(\Delta t - S_i \frac{\lambda}{c} \frac{\Delta t^2}{2} - \frac{2}{c} V_{R_{i-1}} \Delta t \right) - (S_i - S_{i-1}) \frac{2}{c} R_{i-1} + S_i \frac{2}{c} V_{R_{i-1}} \Delta t + \Delta F_{RD_{i/i-1}} = 0. \quad (11)$$

С учетом (10) можно из (11) получить выражение непосредственно для ускорения

$$a_R^2 \left(\frac{2}{\lambda} \right)^2 \frac{\lambda}{c} \frac{\Delta t^2}{2} - a_R \frac{2}{\lambda} \left(\Delta t - S_i \frac{\lambda}{c} \frac{\Delta t^2}{2} - \frac{2}{c} V_{R_{i-1}} \Delta t \right) - (S_i - S_{i-1}) \frac{2}{c} R_{i-1} + S_i \frac{2}{c} V_{R_{i-1}} \Delta t + \Delta F_{RD_{i/i-1}} = 0; \quad (12)$$

или

$$a_R^2 \left[\left(\frac{4}{c\lambda} \right) \frac{\Delta t^2}{2} \right] + a_R \left[-\frac{2}{\lambda} \left(\Delta t - S_i \frac{\lambda}{c} \frac{\Delta t^2}{2} - \frac{2}{c} V_{R_{i-1}} \Delta t \right) \right] + \left[S_i \frac{2}{c} V_{R_{i-1}} \Delta t - (S_i - S_{i-1}) \frac{2}{c} R_{i-1} + \Delta F_{RD_{i/i-1}} \right] = 0. \quad (13)$$

Учитывая (6), (7), (10) выражение (11) можно представить в виде

$$S_a^2 \frac{1}{f_0} \left(\frac{\Delta t^2}{2} + \frac{c}{2} T_{\text{осци-1}} \Delta t \right) - S_a \left[\left(\Delta t - S_i \frac{1}{f_0} \frac{\Delta t^2}{2} - \frac{1}{f_0} (F_{RD_{i-1}} - S_{i-1} T_{\text{осци-1}}) \Delta t \right) - S_i \frac{1}{f_0} T_{\text{осци-1}} \Delta t \right] - \quad (14)$$

$$- (S_i - S_{i-1}) T_{\text{осци-1}} + S_i \frac{1}{f_0} (F_{RD_{i-1}} - S_{i-1} T_{\text{осци-1}}) \Delta t + \Delta F_{RD_{i/i-1}} = 0$$



или как квадратное уравнение

$$A_s S_a^2 + B_s S_a + C_s = 0, \quad (15)$$

где

$$A_s = \frac{1}{f_0} \left(\frac{\Delta t^2}{2} + \frac{c}{2} T_{\text{оз } i-1} \Delta t \right); \quad (16)$$

$$B_s = \Delta t \left(1 - \frac{1}{f_0} \left[S_i \frac{\Delta t}{2} - F_{RD i-1} - (S_i - S_{i-1}) T_{\text{оз } i-1} \right] \right); \quad (17)$$

$$C_s = -(S_i - S_{i-1}) T_{\text{оз } i-1} + S_i \frac{1}{f_0} (F_{RD i-1} - S_{i-1} T_{\text{оз } i-1}) \Delta t + \Delta F_{RD i-1}. \quad (18)$$

Отметим, что величины $F_{RD i-1}$, $\Delta F_{RD i-1}$, $T_{\text{оз } i-1}$ измеряются, значения крутизны ЛЧМ, несущей частоты и интервала между моментами излучением ПЗИ известны.

Следовательно, значение крутизны S_a находится из решения квадратного уравнения вида (15) и далее по выражению вида (10) определяется радиальное относительное ускорение ВО.

2. Моделирование

Моделируется типичная траектория движения ВО, предполагающая участки с малым и интенсивным ускорением при траектории типа «змейка» (см. рис. 1).

На рис. 2 и рис. 3 соответственно показаны погрешности измерения/оценивания ускорения традиционным методом асимметрий (МА) [5] по трем ПЗИ (с крутизной ЛЧМ 14, 16 и 12 кГц/мс) и предложенным квадратичным методом (КМ) по двум ПЗИ (при крутизне ЛЧМ 14 и 16 кГц/мс) за все время сопровождения ВО при интервале между излучениями ПЗИ в 2 с.

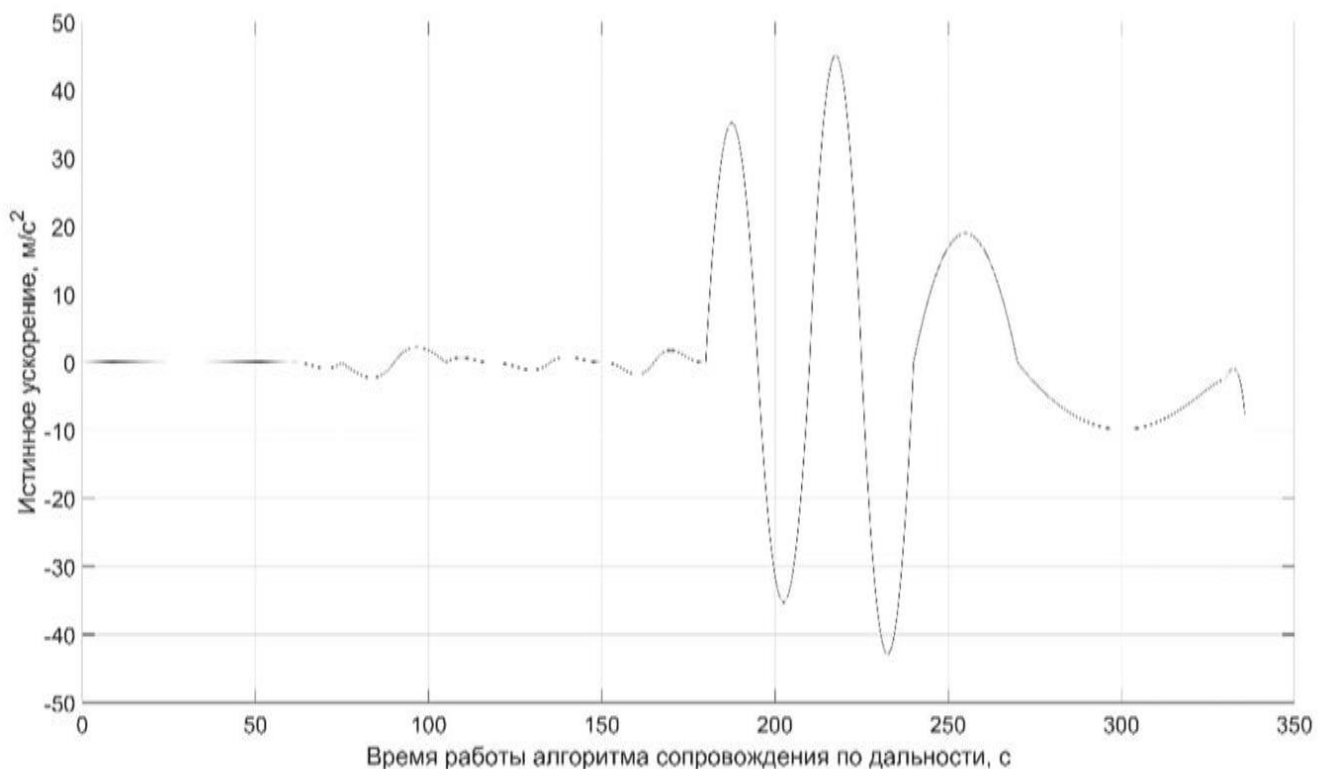


Рис. 1. Моделируемое «истинное» ускорение в процессе ее автосопровождения (АС) РЛС

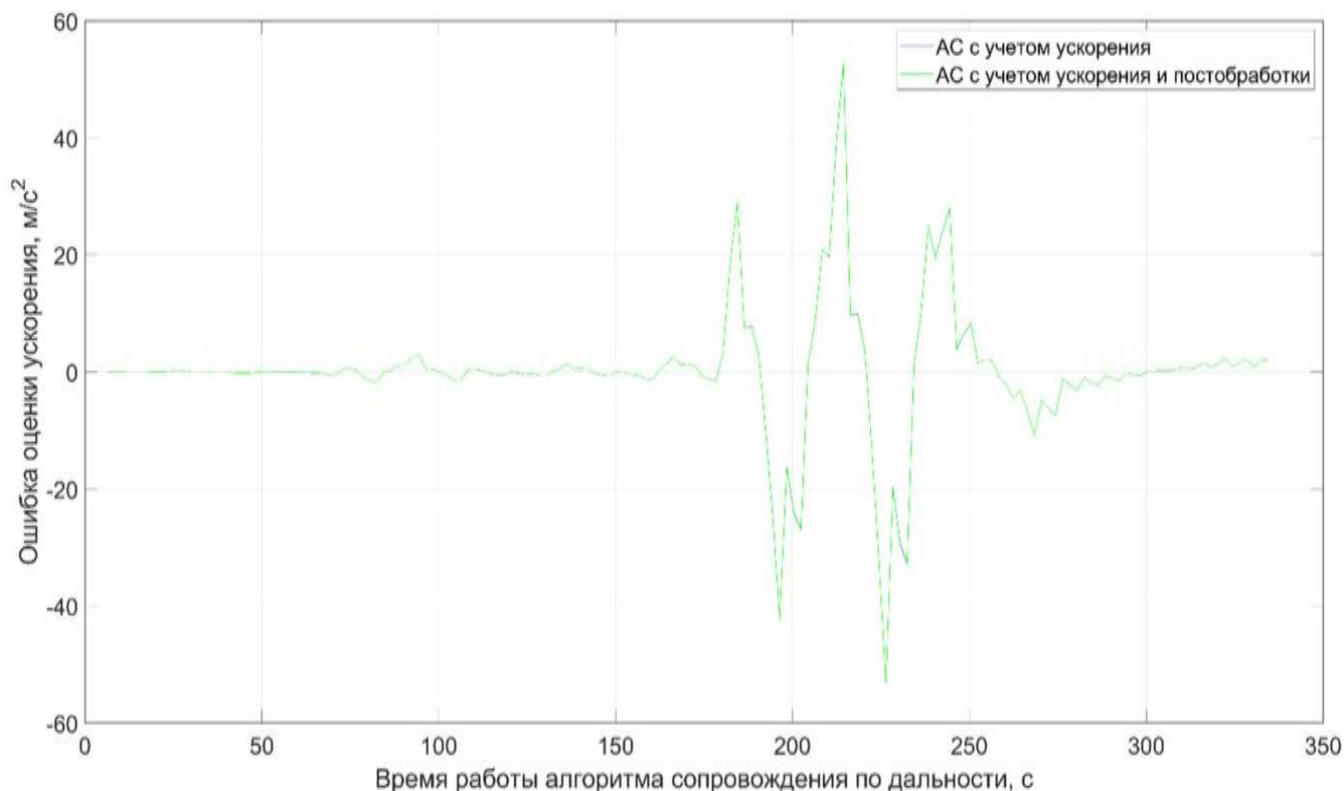


Рис. 2. Ошибки определения ускорения традиционным методом асимметрий (МА).

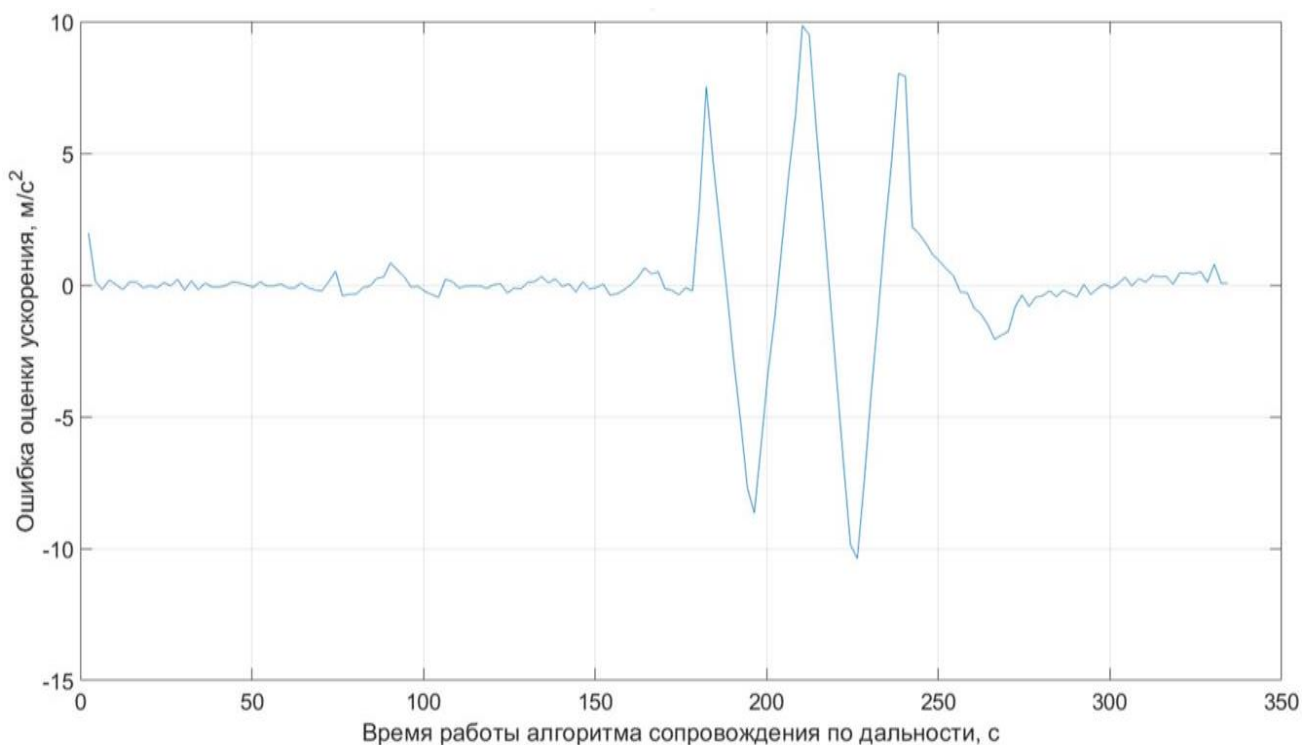


Рис. 3. Ошибки определения ускорения квадратичным методом (КМ)

Сопоставление рис. 2 и рис. 3 показывает, что МА- и КМ – измерения/оценки ускорения ВО при относительно длительных интервалах между моментами излучения ПЗИ и при интенсивном маневре характеризуются значительными динамическими ошибками



(«ошибками запаздывания»), но при этом максимальные динамические ошибки при КМ \approx в 5 раз ниже, чем при МА.

Временные затраты (количество ПЗИ) составляет $2/3$ в сравнении с МА. В целом, за время АС среднее значение ошибок ускорения составило $\approx 0,003 \text{ м/с}^2$ при среднеквадратическом отклонении (СКО) $\approx 2,26 \text{ м/с}^2$.

На рис. 4-6 показаны погрешности КМ-определения ускорения при меньших интервалах между излучением ПЗИ – соответственно, 1 с, 0,5 с и 0,25 с. При этом средние значения ошибок и СКО соответственно составили $\approx (-0,006 \text{ м/с}^2$ и $1,34 \text{ м/с}^2)$, $\approx (-0,004 \text{ м/с}^2$ и $0,85 \text{ м/с}^2$ и $\approx (-0,002 \text{ м/с}^2$ и $1 \text{ м/с}^2)$.

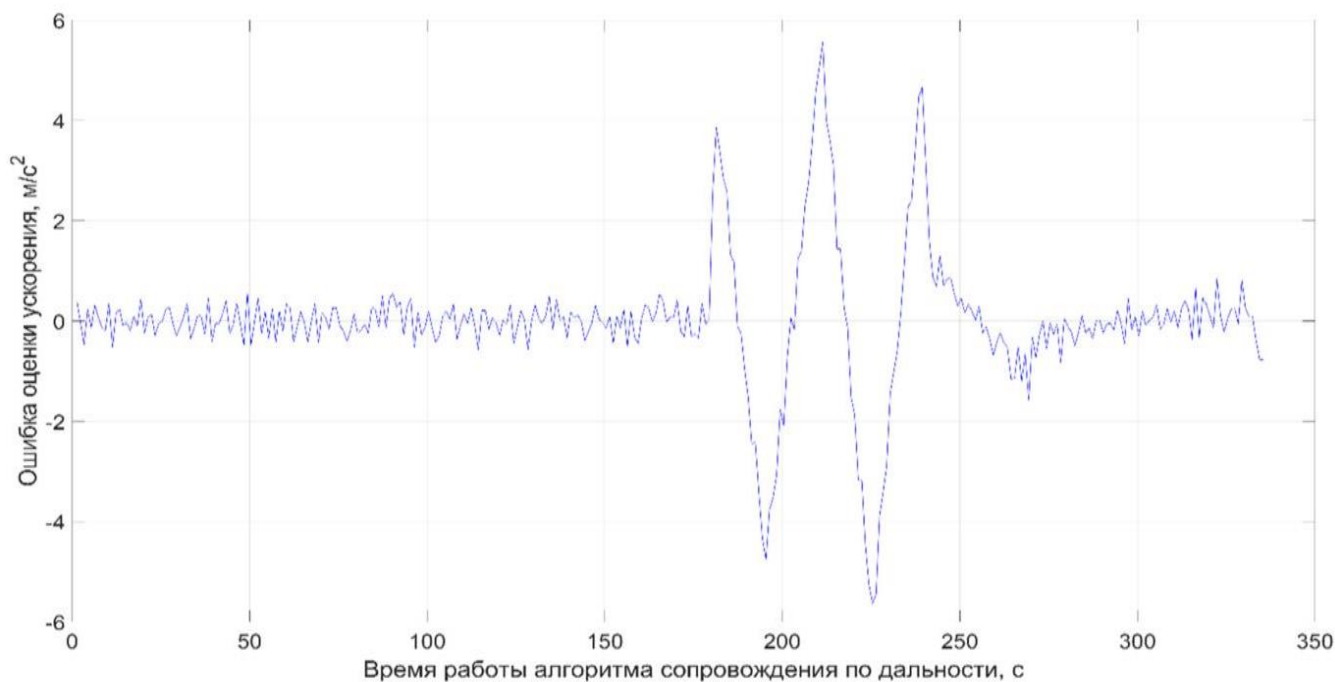


Рис. 4. Ошибки КМ определения ускорения при интервале 1 с

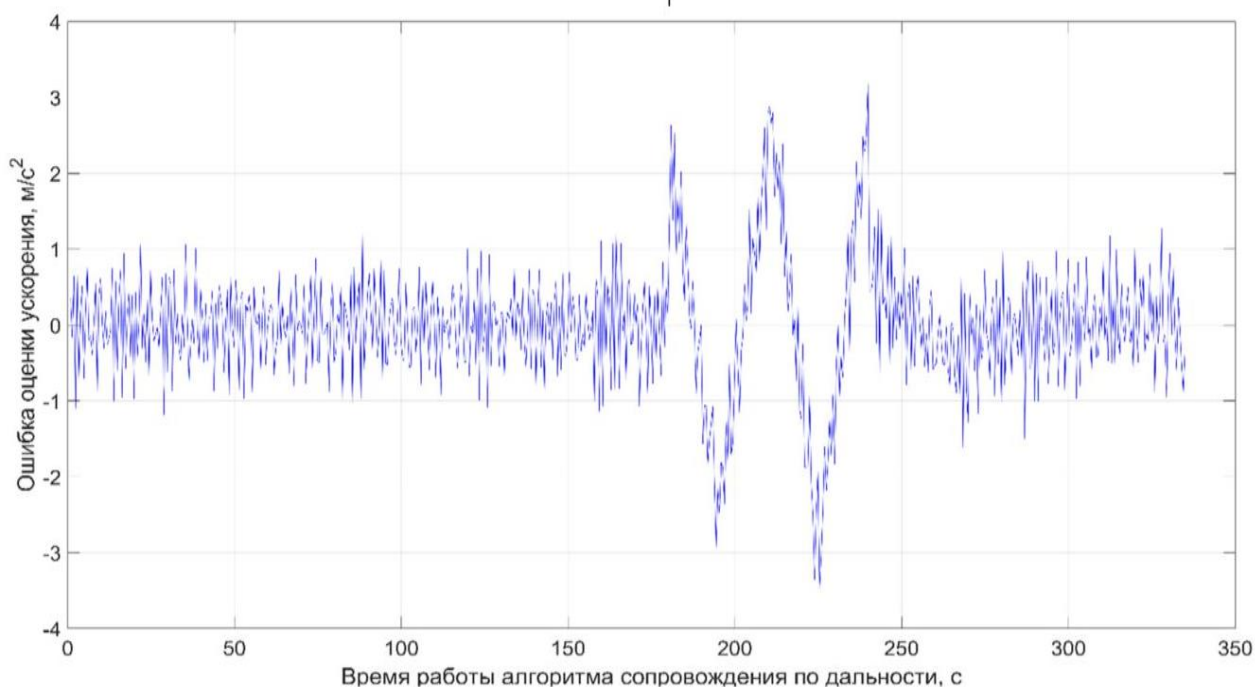


Рис. 5. Ошибки КМ определения ускорения при интервале 0,5 с

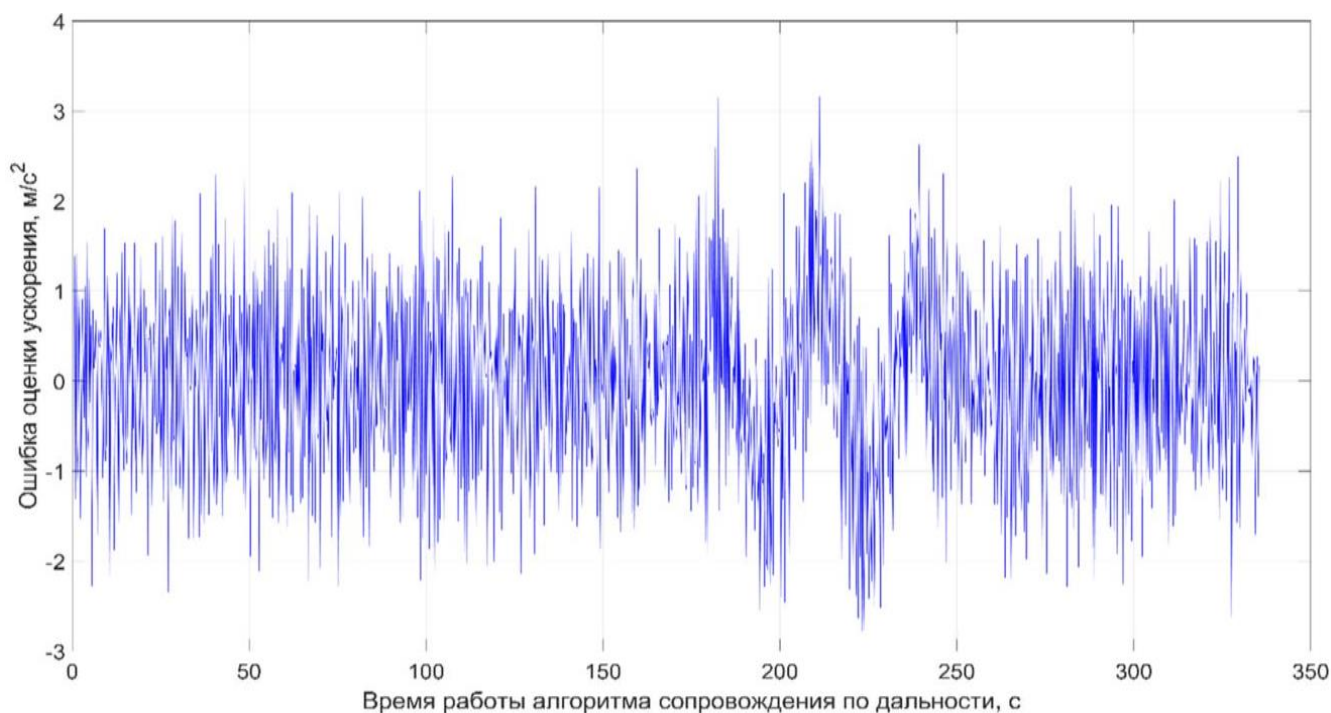


Рис. 6. Ошибки КМ определения ускорения при интервале 0,25 с

Заключение

Разработан и исследован нетрадиционный метод измерения/оценивания радиального ускорения ВО, основанный на решении квадратного уравнения и обладающий в сравнении с типовыми методами повышенной точностью, оперативностью и устойчивостью к влиянию нелинейных модуляций сигнала при сложных эволюциях траектории ВО. Результаты имитационного моделирования подтвердили работоспособность и эффективность применения разработанного «квадратичного метода» определения ускорения на фоне решения РЛС задач наблюдения/сопровождения ВО в режимах квазинепрерывного излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сколник, М. И. Справочник по радиолокации: Справочник по радиолокации: в 2 т.; / М. И. Сколник – Москва: Техносфера, 2015. – 1 т. – 672 с.
2. Сколник, М. И. Справочник по радиолокации: Справочник по радиолокации: в 2 т.; / М. И. Сколник – Москва: Техносфера, 2015. – 2 т. – 680 с.
3. Дудник, П. И. Авиационные радиолокационные комплексы и системы / П. И. Дудник, Г. С. Кондратенков, Б. Г. Татарский, А. А. Герасимов – Москва: Изд. ВВИА им. проф. В. И. Жуковского, 2006. – 1112 с.
4. Kovregin, V. N. Method for observing a hovering object against the background of the earth in radars with quasi-continuous chirp radiation / V. N. Kovregin, G. M. Kovregina; – Issue 1. – Saint Petersburg: Concern CSRI Elektropribor, 2023. – p. 1-4. DOI: 10.23919/ICINS51816.2023.10168478.
5. Коврегин В. Н. Адаптивно-робастное всеракурсное наблюдение разнотипных объектов в главном луче радара с квазинепрерывным ЛЧМ-излучением / В. Н. Коврегин, Г. М. Коврегина, А. С. Мурзаев // Радиотехника. – 2023. – № 87. – с. 69-78. DOI: 10.18127/j00338486-202301-00.
6. Kovregin, V. N. Adaptive-robust methods for detecting, capturing and tracking hovering, low- and high-speed objects in integrated radar-inertial systems with quasi-continuous radiation / V. N. Kovregin, G. M. Kovregina – Saint Petersburg: Concern CSRI Elektropribor, 2021. – p. 1-4. DOI: 10.23919/ICINS43216.2021.9470845.



7. Пат. 26975092 Российская Федерация, МПК2017118191/1 G01S 13/08 (2006/02). Способ обнаружения, измерения дальности и скорости низколетящей малоскоростной цели в импульсно-доплеровских радиолокационных станциях при высокой частоте повторения и инвертируемой линейной частотной модуляции / Коврегин В.Н.; – № 2017118191/1; заявл. 2017-05-25; опубл. 2024-05-05, ФИПС. – 14 с.
8. Пат. 26929121 Российская Федерация, МПК2017143611/1 G01S 13/00 (2006/01). Способ одновременного измерения дальности, скорости и ускорения малоскоростной маневрирующей воздушной цели в импульсно-доплеровских радиолокационных станциях при высокой частоте повторения импульсов и линейной частотной модуляции / Коврегин В.Н.; – № 2017143611/1; заявл. 2018-02-13; опубл. 2019-07-01, ФИПС. – 17 с.
9. Фарина А. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей. // А. Фарина, Ф. Студер – М.: Радио и связь, 1993. – с. 223-224
10. Рязанцев, Л. Б. Фазоразностный способ определения ускорения сближения истребителя с воздушной целью / Л. Б. Рязанцев, В. П. Лихачев, Р. Р. Шатовкин // Труды МАИ. – 2015. – № 84. – 13 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Коврегин Валерий Николаевич

доцент, кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А
E-mail: kovregin@mail.ru

Коврегина Галина Михайловна

доцент, кандидат технических наук
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А
e-mail: g_kovregin@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kovregin Valery Nikolaevich

Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia
E-mail: kovregin@mail.ru

Kovregina Galina Mikhailovna

Associate Professor, Candidate of Technical Sciences
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia
E-mail: g_kovregin@mail.ru