

УДК 621.396.969

## ИЗМЕРЕНИЕ РАДИАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ДВИЖУЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА ПРИ НЕЛИНЕЙНОМ ИЗМЕНЕНИИ ДОПЛЕРОВСКОЙ ФАЗЫ

А. В. Щеколдин\*, И. В. Журавлёв

Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

Решена задача измерения радиальной скорости движущегося объекта при нелинейном изменении доплеровской фазы во времени. Приведён алгоритм измерения этой скорости с высокой точностью, который позволяет когерентно накапливать сигнал для улучшения его отношения к шуму. По сравнению с существующими аналогами разработанный алгоритм позволяет уменьшить количество вычислений.

### ВВЕДЕНИЕ

В ряде технических задач к радиолокационным станциям (РЛС) предъявляются высокие требования по точности измерения параметров траектории движущегося объекта. При этом доплеровская фаза отражённого от объекта сигнала нелинейно изменяется во времени из-за его ускорения. Например, такие задачи приходится решать при определении координат падения артиллерийских снарядов. Последние имеют малую эффективную площадь рассеяния, и для их обнаружения используются радиолокационные станции специального назначения, которые в автоматическом режиме сопровождают движущийся объект и измеряют параметры его траектории: радиальную скорость, дальность и азимутальное положение. Достижение необходимой точности измерения этих параметров осуществляется за счёт специальной обработки отражённых от снаряда сигналов. Радиолокационная станция сопровождает снаряд в течение заданного временного интервала, а дальше по измеренным параметрам траектории прогнозируются координаты точки его падения.

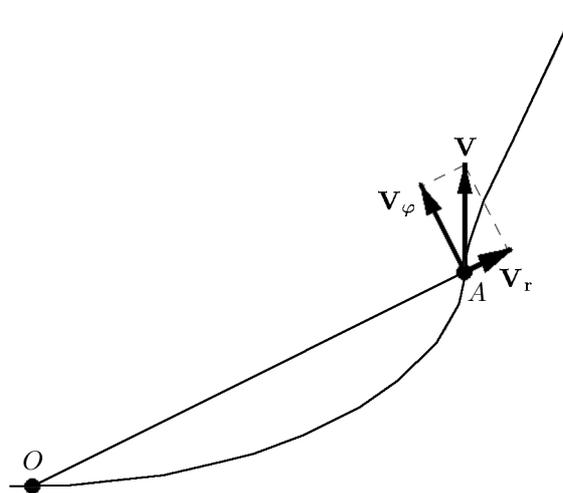


Рис. 1. Разложение скорости  $\mathbf{V}$  на радиальную ( $\mathbf{V}_r$ ) и поперечную ( $\mathbf{V}_\varphi$ ) компоненты. Траектория движения показана кривой  $OA$

### 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Для определения скорости движения объекта вводится понятие радиальной скорости, т. е. проекции скорости точки ( $A$  на рис. 1) на прямую ( $OA$ ), соединяющую её с выбранным началом координат ( $O$ ). Как известно, радиальную скорость объекта можно определить с помощью эффекта Доплера по формуле

$$V_r = \lambda F_D / 2, \quad (1)$$

\* cawa56@mail.ru

где  $F_D$  — частота Доплера,  $\lambda$  — длина волны. Для этого применяются фильтры быстрого преобразования Фурье (БПФ). Шаг между ними (по скорости) равен

$$dV_r = \frac{\lambda F_{\text{discr}}}{2N}, \quad (2)$$

где  $F_{\text{discr}}$  — частота дискретизации,  $N$  — размер (число дискретных элементов) БПФ.

Ошибка измерения радиальной скорости движущегося объекта определяется соотношением [1]

$$\sigma_{V_r} = \frac{dV_r}{\sqrt{2} q}, \quad (3)$$

где  $q$  — отношение сигнала к шуму (по амплитуде).

Из формулы (3) видно, что для увеличения точности измерения радиальной скорости необходимо либо уменьшать шаг между фильтрами БПФ, тем самым увеличивая размер БПФ, либо увеличивать отношение сигнала к шуму, что обеспечивается ростом времени накопления сигнала.

## 2. ВЛИЯНИЕ МЕЖПЕРИОДНОГО НАБЕГА ФАЗЫ НА ОТРАЖЁННЫЙ ОТ ДВИЖУЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА СИГНАЛ

Если исследуемый объект имеет малую эффективную площадь рассеяния, то для достижения требуемого отношения сигнала к шуму необходимо накопление сигнала. Как известно, оптимальным способом накопления полезного сигнала является когерентное накопление. Однако ускорение торможения исследуемого объекта не позволяет накопить отражённый сигнал в этом режиме. Так, например, при ускорении торможения порядка  $-50 \text{ м/с}^2$  скорость объекта за время накопления 0,1 с изменяется на 5 м/с. Если при этом шаг между фильтрами БПФ составляет 0,02 м/с, то спектр за 0,1 с окажется распределён по 250 фильтрам БПФ и накопить сигнал в одном фильтре не удастся. Таким образом, для решения данной задачи когерентное накопление в классическом виде не подходит из-за нелинейного изменения доплеровской фазы. Поэтому прежде чем осуществлять такое накопление сигналов, отражённых от движущегося объекта, необходимо скомпенсировать межпериодный набег фазы на интервале накопления. Таким образом, мы будем измерять мгновенную радиальную скорость в начале интервала накопления.

Фаза отражённого сигнала от движущегося объекта равна [2]

$$\varphi(t) = \frac{4\pi}{\lambda} D(t), \quad (4)$$

а дальность  $D$  меняется по закону

$$D(t) = V_r t + at^2/2, \quad (5)$$

где  $a$  — ускорение,  $t$  — время и полагается, что  $D(t=0) = 0$ .

Таким образом, фаза сигнала имеет вид

$$\varphi(t) = \frac{4\pi}{\lambda} V_r t + \frac{2\pi a t^2}{\lambda}. \quad (6)$$

В отечественной и зарубежной литературе описаны алгоритмы накопления сигнала с нелинейным изменением доплеровской фазы [3–7]. Они основаны на многоканальном обнаружении объекта, движущегося с ускорением. Многоканальность (по ускорению) обеспечивается умножением принятых отсчётов сигнала на фазовращающие множители с соответствующей настройкой на межпериодный набег фазы. Далее в каждом канале осуществляется БПФ и определяются

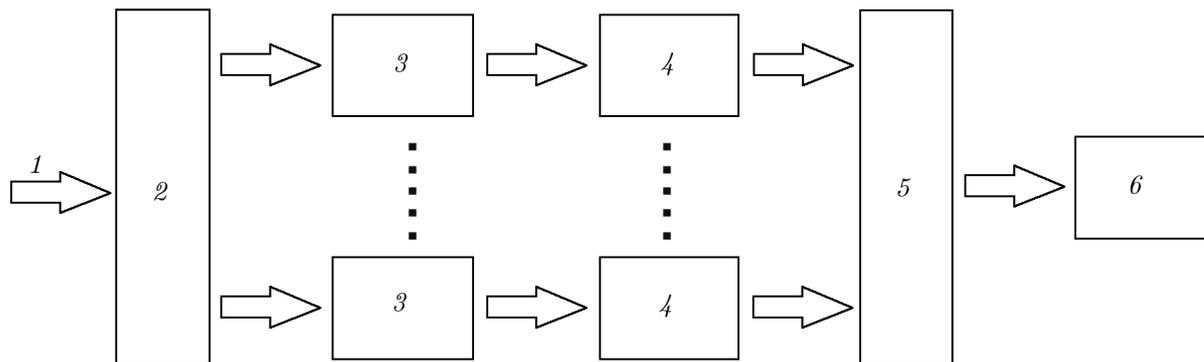


Рис. 2. Структурная схема многоканального алгоритма определения радиальной скорости одного объекта: 1 — вход (с аналого-цифрового преобразователя), 2 — буферный регистр, 3 — блок фазовращателей, 4 — фильтр БПФ, 5 — блок отбора максимального накопления сигнала, 6 — пороговое устройство

амплитуды сигналов в доплеровских фильтрах. Полученные значения амплитуд сигналов поступают на пороговые устройства, и при превышении порога выносятся решение о наличии объекта [8]. Общая структурная схема многоканального алгоритма определения радиальной скорости одного объекта приведена на рис. 2. Буферный регистр принимает данные и дублирует их на множество каналов по ускорению. Блок фазовращателей настраивается на множество ускорений и компенсирует межпериодный набег фазы. В том канале, где ускорение соответствует ускорению движущегося объекта, происходит максимальное накопление сигнала в одном фильтре БПФ. Этому фильтру соответствует радиальная скорость движения объекта. Недостатком данного алгоритма является большое число необходимых вычислительных операций, которое возрастает пропорционально числу используемых каналов ускорения.

Особенность рассматриваемого в данной работе метода заключается в том, что для каждого типа артиллерийского снаряда заранее вычисляется табличная (примерная) начальная скорость вылета и табличное (примерное) начальное ускорение торможения. Знание этого ускорения позволяет не использовать многоканальность по ускорению.

В описываемом в данной статье методе измерение радиальной скорости происходит в реальном времени. Для построения траектории движения исследуемого объекта рассчитывается радиальная скорость в текущей точке с помощью БПФ и уточнения внутри фильтра, которому соответствует максимум спектра сигнала. Измеренная радиальная скорость используется для расчёта ускорения в данной точке траектории. При компенсации межпериодного набега фазы в следующей точке берётся ускорение, полученное в предыдущей точке.

Однако при прочих равных условиях истинные начальная скорость и ускорение каждого снаряда отличаются от табличных из-за неодинаковой массы и различной температуры боевых зарядов и износа канала ствола. Поскольку в начале полёта отношение сигнала к шуму высокое (более 30 дБ), для обнаружения и «завязки» трассы снаряда, вылетевшего из ствола, вычисляется БПФ, размер которого обеспечивает накопление сигнала в одном фильтре. На этапе обнаружения уточнение радиальной скорости после БПФ осуществляется методом отношений. Данный метод обеспечивает достаточную точность оценки радиальной скорости, в пределах которой осуществляется когерентное накопление с учётом компенсации ускорения. Перед формированием полной траектории движения снаряда значения скорости, полученные на этапе его обнаружения, заменяются на радиальную скорость, предсказанную экспоненциальным методом экстраполяции. Последний позволяет обеспечить необходимую точность нахождения начальных скоростей движения снаряда, что было подтверждено сравнениями траекторий, полученных описываемой

РЛС и баллистической РЛС компании «Weibel» (Дания), и теоретической радиальной скорости. Последняя рассчитывается в баллистической модели, в которой учитывается множество воздействующих на снаряд факторов.

Существующие приборы позволяют измерить радиальную скорость движения артиллерийского снаряда с более низкой точностью. Например, у прибора «Regula 6002» заявленная точность измерения скорости не хуже 1,5% в диапазоне измеряемых скоростей  $30 \div 1\,000$  м/с, что соответствует ошибке  $0,45 \div 15$  м/с. У описываемой РЛС точность измерения скорости не хуже 0,05 м/с во всём диапазоне измеряемых скоростей  $50 \div 1\,400$  м/с.

### 3. АЛГОРИТМ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ДВИЖУЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА ПРИ НЕЛИНЕЙНОМ ИЗМЕНЕНИИ ДОПЛЕРОВСКОЙ ФАЗЫ

Предлагаемый метод измерения мгновенной радиальной скорости заключается в компенсации межпериодного набега фазы не во временной, а в частотной области, что позволяет уменьшить количество вычислений. Сначала применяется БПФ такого размера, чтобы когерентное накопление сигнала произошло только в одном фильтре без компенсации ускорения движущегося объекта. Далее рассматриваются несколько других фильтров рядом с фильтром, уровень сигнала в котором максимальный, чтобы проверить, не накопился ли в них больший сигнал, чем в основном фильтре с максимальным уровнем сигнала. Для обеспечения необходимого времени накопления требуется принимать сигнал определённое число тактов. Такт представляет собой набор периодов, число которых равно произведению числа периодов зондирования (размер БПФ) на скважность. К сигналу в каждом такте применяется БПФ и выбираются значения в фильтрах с теми же номерами, что и в первом такте.

Пусть необходимо накапливать сигнал в течение 0,1 с, время одного такта составляет 9 мс, т. е. требуемое число накоплений  $k = 12$ . Применим к сигналу в каждом такте БПФ с размером  $N = 512$ . Затем нужно выбрать  $i = 5$  фильтров с одинаковыми номерами в каждом такте, в которых спектр сигнала максимальный. В результате имеем  $ki = 60$  комплексных отсчётов, полученных после применения БПФ. Далее в каждом такте из  $k$  в частотной области происходит компенсация ускорения. Вычисленное ускорение в текущей точке траектории компенсирует ускорение в следующей точке. Прежде чем сделать когерентное накопление по  $k$  тактам в каждом фильтре из  $i$ , будем делать уточнение внутри каждого фильтра для достижения необходимой точности измерения радиальной скорости.

Уточнение радиальной скорости выполняется с помощью перебора внутри фильтра БПФ с шагом, отвечающим требуемой точности измерения. Перебор внутри фильтра по скорости записывается в виде

$$V_r = \Delta n - dV_r/2, \quad (7)$$

где  $n$  — номер уточнения,  $\Delta$  — точность определения радиальной скорости,  $dV_r$  — ширина фильтра.

После применения БПФ с размером  $N = 512$  при  $F_{\text{discr}} = 56$  кГц и  $\lambda = 0,1$  м определим радиальную скорость с точностью  $dV_r = 5,4$  м/с (см. (2)), т. е. для определения радиальной скорости с точностью  $\Delta = 0,02$  м/с необходимо провести  $n = dV_r/\Delta = 270$  уточнений внутри одного фильтра БПФ.

В таком случае фазу, компенсирующую ускорение движущегося объекта, с учётом уточнения можно записать в виде

$$\varphi_{kn} = \frac{4\pi}{\lambda} \left( \Delta n - \frac{dV_r}{2} \right) kt + \frac{2\pi at^2 k^2}{\lambda}, \quad (8)$$

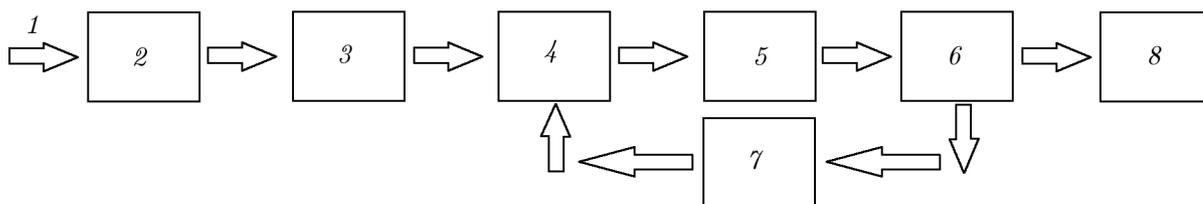


Рис. 3. Структурная схема предложенного алгоритма определения радиальной скорости движущегося объекта: 1 — вход (с аналого-цифрового преобразователя), 2 — БПФ, 3 — отбор  $i$  фильтров с максимумом сигнала, 4 — блок фазовращателей, 5 — уточнение внутри  $i$  фильтров БПФ, 6 — отбор максимального значения из  $in$ , 7 — расчёт ускорения, 8 — пороговое устройство

где  $k$  — число тактов, обеспечивающих необходимое время накопления,  $t$  — время такта.

Значение  $H_n$  спектра сигнала в одном фильтре уточнения с учётом когерентного накопления по  $k$  тактам определяется формулой

$$H_n = \sum_k C_k \exp(-j\varphi_{kn}), \quad (9)$$

где  $C_k$  — комплексное значение сигнала после БПФ (значение, соответствующее одному из  $i$  фильтров БПФ с максимальным сигналом). Слагаемые при фиксированном  $n$  когерентно складываются. В результате для одного фильтра БПФ получается 270 значений. Каждое значение соответствует накопленному за 0,1 с уточнению внутри одного фильтра БПФ. При  $i = 5$  фильтрах БПФ имеем  $in = 1350$  когерентно накопленных значений. Посчитав амплитуды для каждого из 1350 комплексных значений, находим максимальную амплитуду, которой соответствуют номера фильтра и уточнения. Таким образом определяется радиальная скорость с точностью 0,02 м/с. Структурная схема предложенного алгоритма нахождения радиальной скорости движущегося объекта приведена на рис. 3.

В рассматриваемой задаче предполагается, что табличная (примерная) начальная скорость и табличное (примерное) начальное ускорение торможения снаряда известны. Если это учесть в многоканальном методе, то эти два метода можно сравнить. Необходимо подсчитать число арифметических операций, затрачиваемых на измерение радиальной скорости с необходимой точностью (0,02 м/с) для одной и множества движущихся целей. Допустим, что начальная радиальная скорость вылета снаряда известна с точностью до ширины фильтра БПФ. Сначала рассмотрим многоканальный метод. Для обеспечения требуемой точности измерения радиальной скорости при отношении сигнала к шуму 20 дБ необходимо взять такой размер БПФ, чтобы шаг между фильтрами составлял  $dV_r = 0,283$  м/с (см. (3)). При этом максимальная начальная скорость исследуемого снаряда может достигать 1400 м/с. Радиолокационная станция работает в дециметровом диапазоне с длиной волны  $\lambda = 0,1$  м, т. е. частота Доплера составляет 28 кГц. Чтобы обеспечить однозначное определение радиальной скорости, частота дискретизации должна быть не меньше  $F_{\text{discr}} = 56$  кГц. Таким образом, чтобы обеспечить заданную точность измерения радиальной скорости многоканальным методом, требуется вычислить БПФ с размером  $N = \lambda F_{\text{discr}} / (2 dV_r) \approx 10^4$ . В силу того, что начальная скорость вылета снаряда известна с точностью до ширины фильтра, лучше использовать не БПФ большого размера, а общее дискретное преобразование Фурье (ДПФ). Последнее позволяет измерить скорость с точностью  $dV_r = 0,283$  м/с, заданная точность  $\Delta = 0,02$  м/с измерения скорости достигается с помощью метода отношений, поэтому требуются как минимум три фильтра ДПФ. Таким образом, в многоканальном методе будет необходимо выполнить  $10^4$  комплексных умножений, чтобы компенсировать набег фазы, связанный с ускорением торможения снаряда, и  $3 \cdot 10^4$  комплексных умножений и сложений

для 3-х фильтров ДПФ<sup>1</sup>. Метод отношений не требует большого числа арифметических операций, поэтому их числом можно пренебречь. Поскольку комплексное умножение выполняется за 6 арифметических операций, а комплексное сложение за 2 арифметические операции, потребуется выполнить  $6 \cdot 10^4 + 3 \cdot 6 \cdot 10^4 + 3 \cdot 2 \cdot 10^4 = 3 \cdot 10^5$  арифметических операций, чтобы определить радиальную скорость с заданной точностью для одного движущего снаряда. При условии серийной стрельбы ставится задача сопровождать 20 снарядов одновременно, при этом для каждого снаряда нужно использовать свои коэффициенты, компенсирующие набег фазы, и применять ДПФ в других фильтрах. Таким образом, для измерения радиальной скорости 20-ти снарядов многоканальным методом потребуется  $20 \cdot 3 \cdot 10^5 = 6 \cdot 10^6$  арифметических операций.

Рассмотрим число арифметических операций, необходимое в предлагаемом методе измерения радиальной скорости. Как известно, чтобы применить БПФ, нужно совершить  $N \log_2 N$  комплексных умножений и сложений. Таким образом, на применение БПФ при 12-ти тактах потребуется  $12 \cdot 512 \cdot \log_2 512 = 55\,296$  комплексных умножений и сложений. Для уточнения внутри одного фильтра и компенсации набега фазы будет необходимо  $270 \cdot 12 = 3\,240$  комплексных умножений и сложений. Таким образом, чтобы определить радиальную скорость для одного снаряда с точностью  $\Delta = 0,02$  м/с, потребуется  $58\,536$  комплексных умножений и сложений, т. е.  $58\,536 \cdot 6 + 58\,536 \cdot 2 = 468\,288$  арифметических операций. При условии серийной стрельбы и измерении скорости 20-ти снарядов одновременно будет необходимо выполнить только дополнительные комплексные умножения на коэффициенты, с помощью которых проводятся уточнение внутри одного фильтра и компенсация набега фазы для каждого снаряда, и когерентное сложение полученных значений. Таким образом, в предлагаемом методе для измерения радиальной скорости 20-ти объектов потребуется  $55\,296 + 19 \cdot 6 \cdot 3\,240 \approx 0,42 \cdot 10^6$  арифметических операций. В результате при сопровождении одного снаряда многоканальным методом будет необходимо в 1,5 раза меньше арифметических операций, чем в предлагаемом методе. Однако при серийной стрельбе и сопровождении 20-ти снарядов одновременно предлагаемый метод требует в 14,3 раз меньшего числа арифметических операций.

Описанный выше алгоритм измерения радиальной скорости использовался при испытании РЛС в виде фазированной антенной решётки с возможностью сканирования в угломестной плоскости. Радиолокационная станция состоит из двух разнесённых антенн (приёмной и приёмопередающей) и работает в импульсном режиме с длиной волны 0,1 м. Частота дискретизации составляет 56 кГц, скважность 7, длительность импульса  $1/(7 \cdot 56\,000)$  мкс  $\approx 2,55$  мкс. Таким образом, число импульсов, использованное при накоплении сигнала, соответствует размеру БПФ, умноженному на число принимаемых тактов для времени накопления около 0,1 с. Приёмная антенна всё время работает на приём. Приёмно-передающая антенна в момент излучения не влияет на приёмную антенну. Измерение радиальной скорости движения снаряда проводится по данным от приёмной антенны РЛС. В эксперименте были произведены три выстрела под одним углом места одним типом артиллерийского снаряда с табличной начальной скоростью 642 м/с. Измерялась мгновенная радиальная скорость в начале интервала накопления 0,1 с.

На рис. 4 показаны результаты радиолокационных измерений радиальной скорости снаряда для первого выстрела.

На рис. 5 даны временные зависимости отклонения измеренной радиальной скорости от эталонных (теоретических) значений для трёх выстрелов. В качестве эталонных использованы значения, полученные с помощью вычислительного баллистического модуля, который позволяет учесть множество воздействующих на снаряд факторов.

По результатам измерений для каждого выстрела были рассчитаны среднеквадратичные

<sup>1</sup> Под комплексными сложением и умножением понимаются операции сложения и умножения комплексных чисел соответственно.

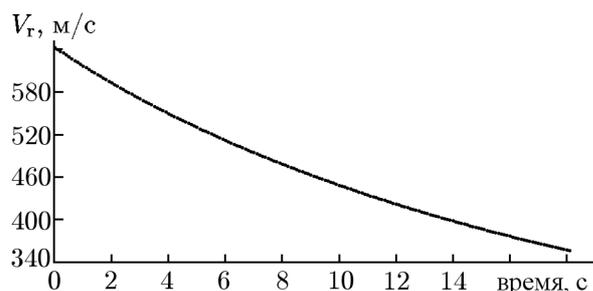
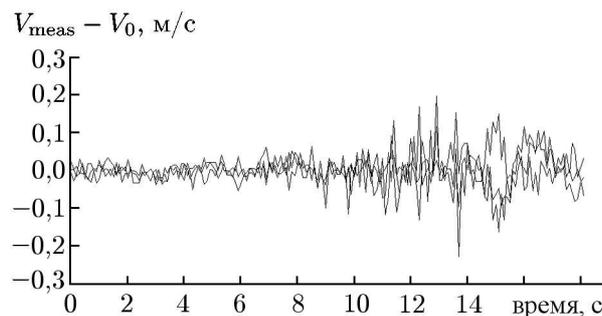


Рис. 4. Результаты радиолокационного измерения радиальной скорости

Рис. 5. Отклонение измеренных радиальных скоростей от эталонных ( $V_0$ )

ошибки измерений  $\sigma_{V_r}$  по формуле

$$\sigma_{V_r} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (V_{0i} - V_{\text{meas}i})^2}{M}}, \quad (10)$$

где  $V_{0i}$  — эталонное (теоретическое) значение радиальной скорости в  $i$ -й точке траектории,  $V_{\text{meas}i}$  — радиальная скорость в  $i$ -й точке траектории,  $M$  — число точек траектории.

Среднеквадратичное отклонение для первого выстрела составило 0,042 м/с, для второго 0,045 м/с и для третьего 0,035 м/с. Как следует из полученных результатов, усреднённое по трём выстрелам значение этого отклонения равняется 0,04 м/с.

Следует отметить, что испытания проводились также под другими углами места и с другими типами снарядов. Для всех выстрелов среднеквадратичное отклонение составляло менее 0,05 м/с, что удовлетворяет заданным требованиям.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный алгоритм позволяет добиться высокой точности измерения радиальной скорости движущегося объекта с помощью увеличения отношения сигнала к шуму за счёт роста времени когерентного накопления сигнала. Данному алгоритму требуется много времени на перебор уточнений внутри фильтра БПФ, но при этом он обеспечивает высокую точность вычисления радиальной скорости. По сравнению с существующими алгоритмами приведённый характеризуется меньшим количеством вычислений, что позволяет применять его при обработке в реальном времени.

Проведённые испытания РЛС подтвердили выполнение требований по точности измерения радиальной скорости. Среднеквадратичное отклонение разности измеренной и эталонной (теоретической) радиальной скорости составляет менее 0,05 м/с.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Финкельштейн М. И. Основы радиолокации: Учебное пособие для вузов. М.: Радио и связь, 1983. 536 с.
2. Гришин Ю. П., Ипатов В. П., Казаринов Ю. М. и др. Радиотехнические системы: Учебное пособие для вузов по специальности «Радиотехника». М.: Высшая школа, 1990. 496 с.
3. Пат. 5784026 США. G01S13/58, G01S13/524. Radar detection of accelerating airborne targets / Smith W. W., Eargle G. M. Заявл. 23.09.1996; Оpubл. 21.07.1998.

4. Пат. 2012006226 США. G01S7/292, G01S13/524. Processing radar return signals to detect targets / Smith W. W. Заявл. 01.07.2011; Оpubл. 12.01.2012.
5. Пат. 2268479 РФ. G01S13/60. Способ обнаружения радиоконтрастных объектов и измерения скорости и ускорения сближения летательного аппарата с ними / Алексеев Ю. Я., Винник Ю. Г., Герасимов А. А. и др. Заявл. 28.05.2004; Оpubл. 20.01.2006. Бюл. № 02. 13 с.
6. Белокуров В. А. Методы повышения эффективности обнаружения и измерения параметров эхо-сигналов сверхманевренных объектов: Дис. ... канд. тех. наук. Рязань: РГРУ, 2006. 135 с.
7. Алексеев Ю. Я., Герасимов А. А., Самарин О. Ф. и др. // Радиотехника. 2004. № 8. С. 80.
8. Кузменков Ю. В., Логинов В. М. // Радиотехника и электроника. 1997. Т. 42, № 12. С. 1465.

Поступила в редакцию 10 ноября 2015 г.; принята в печать 30 мая 2016 г.

## MEASUREMENT OF RADIAL SPEED OF A MOVING OBJECT UNDER NONLINEAR VARIATION IN THE DOPPLER PHASE

*A. V. Schekoldin and I. V. Zhuravlev*

We solve the problem of measuring the radial speed of a moving object under nonlinear variation in the Doppler phase with respect to time. The algorithm for measuring this speed with a high accuracy, which allows one to coherently accumulate the signal to improve its ratio to noise, is described. Compared with the existing analogs, the developed algorithm makes it possible to reduce the amount of calculations.