

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ НЕУПРАВЛЯЕМЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ

Татаренко Д.С.^{1*}, Ефанов В.В.^{1**}, Лобанов К.Н.^{2***}

¹ Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина,
ул. Старых Большевиков, 54а, Воронеж, 394064, Россия

² 929-й Государственный лётно-испытательный центр Министерства обороны им. В.П. Чкалова,
929 ГЛИЦ ВВС, Ахтубинск, Астраханская область, 416500, Россия

* e-mail: denpeas@mail.ru

** e-mail: efanov55@mail.ru

*** e-mail: Kostyan_3d@rambler.ru

Актуальность данной работы обусловлена необходимостью повышения точности применения неуправляемых объектов (НО) с летательного аппарата (ЛА) для решения таких задач, как тушение лесных пожаров, десантирование крупногабаритных грузов и т.д. Современные прицельные системы не в полной мере обеспечивают эффективность применения НО, так как бортовой баллистический алгоритм (ББА) строится на формулах, аппроксимирующих готовые решения баллистической задачи. Для повышения точности ББА предлагается использовать полную баллистическую модель движения НО, начальные условия для которой могут быть получены в результате вторичной обработки радиолокационного сигнала. Основным параметром, характеризующим движение НО относительно центра масс, является угол нутации δ , который зависит от сочетания условий вылета, таких, как угол бросания λ_0 , скорость отделения, возмущения окружающей среды, вибрация пусковой установки и износ пускового устройства.

Ключевые слова: алгоритм определения параметров движения, бортовой баллистический алгоритм, начальные условия, радиолокационный сигнал, преобразование Фурье.

Состояние вопроса

Решение задачи баллистики на борту ЛА, имеющего бортовую цифровую вычислительную систему (БЦВС), как правило, возлагается на отдельный программный модуль, реализующий специализированный ББА. К настоящему времени все летательные аппараты для обеспечения пуска (сброса) НО используют ББА, которые строятся на формулах, аппроксимирующих рассчитанные заранее готовые решения баллистической задачи, например данные баллистических таблиц или результаты решений, полученных на стационарных ЭВМ. Аппроксимационные формулы подбирают исходя из требований простоты их реализации в той или иной БЦВС с учетом разумного уровня точности, поэтому, как правило, они слабо связаны с физической сущностью явлений баллистики. Достоинством таких алгоритмов является высокое быстродействие, достигаемое благодаря достаточно простым конечным формулам. При этом они обладают серьезными недостатками:

— трудно получить высокую точность в широком диапазоне входных параметров;

— нельзя учесть полную совокупность факторов, влияющих на траекторию неуправляемых объектов, что обусловлено чрезвычайно большой сложностью реализации многопараметрических функций — в существующих ББА число параметров доходит до 30 [1].

До недавнего времени низкое быстродействие вычислительной техники не позволяло получать решение дифференциальных уравнений движения неуправляемых объектов непосредственно на борту летательных аппаратов в процессе прицеливания. При современном уровне развития БЦВС этот недостаток не является помехой. Так, например, каноническая модель движения неуправляемых объектов реализована в вычислителях всех современных самолетов и частично вертолетов для решения задач сбрасывания неуправляемых авиационных объектов большой массы. Однако в настоящее время реализация на борту ЛА полной баллистичес-

кой модели невозможна из-за отсутствия необходимых для решения начальных условий элементов движения НО. При этом следует понимать, что для интегрирования системы дифференциальных уравнений должны быть известны начальные значения всех интегралов системы, и в первую очередь начальные условия движения неуправляемых объектов относительно центра масс [2].

В работе [3] показано, что основным параметром, характеризующим движение неуправляемых объектов относительно центра масс, является угол нутации δ , начальное значение которого может быть критическим (порядка $\delta_0 = 30^\circ$) и зависит от сочетания условий вылета НО, таких, как угол бросания λ_0 , скорость отделения, возмущения окружающей среды, вибрация пусковой установки и т.п. Кроме того, научный задел в области исследования движения неуправляемых объектов позволяет добавить в этот список параметр, ранее не определявшийся, однако имеющий большую практическую ценность и позволяющий определять степень термопластического износа пусковой установки. Этот параметр — угловая скорость вращения неуправляемого объекта относительно продольной оси.

Алгоритм определения параметров движения неуправляемого объекта на основе вторичной обработки радиолокационного сигнала

Для разработки алгоритма неоднократно моделировался отраженный сигнал, при этом варьировались параметры самого НО, начальные условия пуска, а также параметры радиолокационной модели. В результате были выявлены характерные особенности в отраженном сигнале, что позволило разработать алгоритм для определения скорости НО, его угловой скорости вращения вокруг продольной оси и изменения максимального угла нутации на траектории.

Практически во всех радиолокаторах, использующих эффект Доплера, основой алгоритма изменения скорости является дискретное преобразование Фурье (ДПФ), аналитически выражаемое следующим образом:

$$\dot{S}_n = \sum_{k=0}^{N-1} y_k \exp\left(-j \frac{2\pi nk}{N}\right), \quad n=0, \dots, N-1, \quad (1)$$

где $y_k = y(k/F_d)$ — оцифрованный аналого-цифровым преобразователем (АЦП) входной сигнал $y(t)$; F_d — частота дискретизации исходного сиг-

нала; N — число отсчетов ДПФ; \dot{S}_n — комплексная амплитуда n -й спектральной гармоники, частоту которой можно определить как

$$f_n = \frac{n}{N} F_d. \quad (2)$$

С помощью ДПФ оцифрованный отраженный сигнал представляется в частотной области (зависимость $|\dot{S}_n|$ от f_n), где происходит его выделение на фоне различных помех и вычисляется его частота. При регистрации высокоскоростных объектов вычисление ДПФ в реальном времени невозможно из-за малого времени наблюдения процесса движения. В этом случае применяется следующий алгоритм:

Во-первых, отраженный сигнал сначала оцифровывается $y_k = y(k/F_d)$ и записывается в блок памяти, а затем производится его обработка с помощью оконного дискретного преобразования Фурье (ОДПФ), суть которого заключается в пошаговом вычислении ДПФ на участках сигнала, выбранных через некоторые равные промежутки времени $\Delta t_{\text{сдвига}}$. Параметр $\Delta t_{\text{сдвига}}$ определяет частоту дискретизации результирующей зависимости частоты Доплера от времени и, как правило, выбирается в пределах $(0.1, \dots, 0.4)\Delta t_{\text{окна}}$, где $\Delta t_{\text{окна}}$ — ширина участка (окна) ДПФ. Аналитическое выражение для ОДПФ можно получить, добавив в него параметры сдвига окна:

$$\dot{S}_{n,m} = \sum_{k=0}^{N-1} y_{k+\Delta m} \exp\left(-j \frac{2\pi nk}{N}\right), \quad (3)$$

$$n=0, \dots, N-1; m=0, \dots, M-1,$$

где $\Delta m = \lfloor \Delta t_{\text{сдвига}} \cdot F_d \rfloor$ — смещение окна ДПФ в отсчетах входного дискретного сигнала y_k ; $\lfloor \cdot \rfloor$ — операция округления до наименьшего целого числа; $\dot{S}_{n,m}$ — матрица спектральных портретов входного сигнала, или спектрограмма (спектрограмма — зависимость $|\dot{S}_{n,m}|$ от f_n и t_m), размера $N \times M$, $M = \lfloor T / \Delta t_{\text{сдвига}} \rfloor$, где m — номер столбца — номер спектра сигнала для участка времени

$\Delta m \cdot m / F_d \dots (\Delta m \cdot m + N) / F_d$; n — номер спектральной гармоники для m -го спектра; T — длительность записанного входного сигнала $y(t)$.

Временной параметр m -го спектра определяется соотношением

$$t_m = \frac{2\Delta m \cdot m + N}{2F_d}. \quad (4)$$

Кроме того, расчет ДПФ непосредственно по приведенной формуле приводит к значительным вычислительным затратам, и на практике обычно используется алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ), обязательным условием которого является число отсчетов N , равное степени 2. В свою очередь, увеличение числа отсчетов N влечет за собой увеличение $\Delta t_{\text{окна}}$, а это может привести к нарушению условия когерентной обработки сигнала и «расползанию» сигнала по фильтрам ДПФ. Обязательное условие когерентной обработки в данном случае можно определить так: частота на выбранном для анализа участке сигнала (в окне) не должна изменяться больше чем на ширину единичного фильтра ДПФ Δf . Аналитически это требование можно выразить так:

$$\Delta f_d \leq \frac{F_d}{N} \quad \text{или} \quad N \leq \frac{F_d}{\Delta f_d}, \quad (5)$$

где Δf_d — изменение частоты Доплера на выбранном участке принимаемого сигнала.

Таким образом, для соблюдения условия когерентности обработки сигнала предлагается использовать простой и хорошо зарекомендовавший себя способ — дополнение нулями [4], суть которого заключается в дополнении выбранного участка сигнала нулями справа. В этом случае окно ДПФ заполняется полезным сигналом в диапазоне $(0 \dots N_{\text{окна}})$ отсчетов, остальной же диапазон $(N_{\text{окна}} \dots N)$ заполняется нулями, причем $0 < N_{\text{окна}} < N$. Параметр $N_{\text{окна}}$ в этом случае будет определяться выражением $N_{\text{окна}} = \lfloor T / \Delta t_{\text{сдвига}} \rfloor$, а условие когерентности будет записано в виде

$$N_{\text{окна}} \leq \frac{F_d}{\Delta f_d}. \quad (6)$$

Погрешность алгоритма ДПФ, как и прежде, определяется шириной единичного фильтра ДПФ $\Delta f = F_d / N$. При этом выражение ОДПФ можно записать в виде

$$\dot{S}_{n,m} = \sum_{k=0}^{N_{\text{окна}}-1} y_{k+\Delta m \cdot m} \exp\left(-j \frac{2\pi nk}{N}\right), \quad (7)$$

$$n = 0, \dots, N-1; \quad m = 0, \dots, M-1.$$

Формула определения частоты n -й гармоники не изменяется, а формула для определения временного параметра m -го спектра представляется в виде

$$t_m = \frac{2\Delta m \cdot m + N_{\text{окна}}}{2F_d}. \quad (8)$$

В результате ДПФ, дополнение нулями позволяет получить интерполированное преобразование более сглаженной формы, и становится возможным более точно определить положение максимума центрального пика.

С целью уменьшения амплитуды боковых лепестков в формулу ДПФ вводится весовая (оконная) функция W :

$$\dot{S}_{n,m} = \sum_{k=0}^{N_{\text{окна}}-1} W_k y_{k+\Delta m \cdot m} \exp\left(-j \frac{2\pi nk}{N}\right), \quad (9)$$

$$n = 0, \dots, N-1, \quad m = 0, \dots, M-1.$$

Оконная функция W является дискретной функцией с максимумом в точке $N_{\text{окна}} / 2$ и областью определения $[0, N_{\text{окна}} - 1]$. В радиолокационных вычислениях наибольшее распространение получили оконные функции Гаусса и Хэмминга, имеющие следующий вид:

для окна Гаусса

$$W_k = \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\alpha_W \frac{k - N_{\text{окна}}/2}{N_{\text{окна}}/2}\right)^2\right], \quad (10)$$

где $\alpha_W = 2.5$ — коэффициент окна;

для окна Хэмминга

$$W_k = 0.54 - 0.46 \cos\left(2\pi \frac{k}{N_{\text{окна}}}\right). \quad (11)$$

Значение уровня боковых лепестков для обеих функций примерно одинаковое (у окна Гаусса несколько ниже), однако в данной работе выбор был

сделан в пользу окна Хэмминга, так как в этом случае требуется меньшее количество операций для вычисления и, следовательно, меньшее время работы алгоритма с его использованием.

Во-вторых, для исключения ложных максимумов, образуемых шумами, используется пороговая обработка, основанная на критерии Неймана—Пирсона. Выбор порога на основе данного критерия обеспечивает максимизацию вероятности правильного обнаружения при заданной вероятности ложных тревог. Известно, что после ДПФ входного сигнала шумовые составляющие принимаемого сигнала будут распределены по закону Рэлея:

$$W(\rho) = \frac{\rho}{\sigma_{\text{ш}}^2} \cdot \exp\left(-\frac{\rho^2}{2 \cdot \sigma_{\text{ш}}^2}\right), \quad \rho \geq 0, \quad (12)$$

где $\sigma_{\text{ш}}^2$ — дисперсия шума.

При этом правило установки порога имеет вид

$$S_{\text{пор}} = \sqrt{-2 \cdot \sigma_{\text{ш}}^2 \cdot \ln(P_{\text{лт}})}, \quad (13)$$

где $P_{\text{лт}}$ — вероятность ложной тревоги, которая на практике обычно принимается равной 10^{-5} ; значение $\sigma_{\text{ш}}^2$ можно вычислить, проверив ДПФ выходного сигнала радиолокатора при отсутствии движущихся объектов в его зоне видимости на соответствие закону распределения Рэлея.

В простейшем случае достаточно ввести поиск номера фильтра $n_{\text{иск}}$, в котором значение $|\dot{S}_{n,m}|$ достигает максимума для каждого m в пределах $n_{\text{min}} \leq n \leq n_{\text{max}}$:

$$(n_{\text{иск}})_m = \arg \max_{n \in [n_{\text{min}}, n_{\text{max}}]} (|\dot{S}_{n,m}|) \text{ для } |\dot{S}_{n,m}| > S_{\text{пор}}, \quad (14)$$

где параметры n_{min} и n_{max} можно определить через априорно заданные значения ожидаемых доплеровских частот отраженного сигнала:

$$n_{\text{min}} = \frac{f_{\text{дmin}}}{F_d} N, \quad n_{\text{max}} = \frac{f_{\text{дmax}}}{F_d} N, \quad (15)$$

где $f_{\text{дmin}}$ и $f_{\text{дmax}}$ — значения ожидаемых доплеровских частот отраженного сигнала, в пределах которых должна оказаться частота сигнала, отраженного от доньшка или носика снаряда, и которые, исходя из определения эффекта Доплера, можно рассчитать через ожидаемые скорости НО.

Тогда $f_{\text{дmin}}$ можно определить как

$$f_{\text{дmin}} = \frac{2(V_0 - \Delta V_0)}{\lambda_{\text{рл}}}, \quad (16)$$

$f_{\text{дmax}}$ определяется аналогично, а значения параметров n_{min} и n_{max} с учетом этого

$$n_{\text{min}} = \frac{2(V_0 - \Delta V_0)}{\lambda_{\text{рл}} F_d} N; \quad n_{\text{max}} = \frac{2(V_0 + \Delta V_0)}{\lambda_{\text{рл}} F_d} N. \quad (17)$$

Соответственно, после первого обнаружения максимума в m -м спектре параметры n_{min} и n_{max} для следующего спектра $m+1$ должны быть скорректированы с учетом номера фильтра, в котором был обнаружен максимум, причем границы поиска могут быть сужены:

$$\begin{aligned} (n_{\text{min}})_{m+1} &= (1 - k_{\text{п}})(n_{\text{иск}})_m; \\ (n_{\text{max}})_{m+1} &= (1 + k_{\text{п}})(n_{\text{иск}})_m, \end{aligned} \quad (18)$$

где $k_{\text{п}}$ — коэффициент, определяющий ширину окна поиска в процентном соотношении от $n_{\text{иск}}$.

Таким образом, на данном этапе мы получаем зависимость номера фильтра $n_{\text{иск}}$ от номера спектра m . С целью увеличения точности значение номера фильтра $n_{\text{иск}}$ может быть скорректировано, при этом это значение становится дробным. Эта функция достаточно точно аппроксимируется полиномом второй степени в пределах $x \in [-\pi/2, \pi/2]$:

$$S(f) = a_0 + a_1 f + a_2 f^2. \quad (19)$$

Используя это свойство, аппроксимировав спектр сигнала в окрестности $n_{\text{иск}}$ полиномом второй степени, можно найти более точное расположение максимума гармоника исходного сигнала. Для этого вычисляются коэффициенты полинома a_0, a_1, a_2 для диапазона отсчетов спектра

$$n \in [n_{\text{иск}} - [N/N_{\text{окна}}], n_{\text{иск}} + [N/N_{\text{окна}}]]$$

(при условии что $N \neq N_{\text{окна}}$), а затем вычисляется уточненное значение $\hat{n}_{\text{иск}}$:

$$\hat{n}_{\text{иск}} = -\frac{a_1}{2a_2}. \quad (20)$$

Уточненное значение $\hat{n}_{иск}$ далее используется в формулах для получения зависимости частоты Доплера сигнала, отраженного блестящей точкой (БТ) донца или носика метаемого объекта, от времени:

$$f_{dm}(t_m).$$

На заключительном этапе обработки из рассчитанной зависимости частоты Доплера получают оценку скорости НО.

Как следует из определения частоты Доплера, скорость объекта, от которого был отражен сигнал, можно рассчитать так:

$$V_{рл}^{бт} = \frac{f_d \lambda_{рл}}{2}, \tag{21}$$

где $V_{рл}^{бт}$ — проекция скорости БТ на линию визирования радиолокатора.

Таким образом, на данном этапе возникает важный вопрос: полученная оценка проекции скорости БТ на линию визирования этой точки отличается от собственно интересующей нас скорости самого метаемого объекта, особенно при движении метаемого объекта вблизи радиолокатора.

Так как проекция скорости БТ на линию визирования радиолокатора по своей сути первая производная закона изменения дальности визирования БТ, то определение скорости метаемого объекта (модуля вектора скорости центра масс) — задача, изначально невыполнимая без введения допущений, так как для ее решения требуется знание углов ориентации метаемого объекта и его вектора скорости в стартовой системе координат (ССК), координат центра масс метаемого объекта, которые получить с помощью доплеровского радиолокатора невозможно. В этом случае, жертвуя точностью

измерения, необходимо принять следующие допущения: движение метаемого объекта прямолинейно на измеряемом участке, а размеры объекта пренебрежимо малы. Данные допущения математически выражаются так:

$$\begin{aligned} \dot{x} = V, \quad y = y_{бт} = 0, \quad \phi = 0, \quad \delta = 0, \quad \alpha = 0, \\ x = x_{бт}, \quad z = z_{бт} = 0, \quad \lambda = 0, \quad \nu = 0, \quad \beta = 0, \end{aligned} \tag{22}$$

где $x_{бт}, y_{бт}, z_{бт}$ — координаты БТ метаемого объекта.

Таким образом, для получения оценки скорости НО \hat{V} предлагается решение уравнения в следующем виде:

$$\hat{V} = FX(V_{рл}^{бт}, x), \tag{23}$$

$$\text{где } FX(V_{рл}^{бт}, x) = V_{рл}^{бт} \frac{\sqrt{(x - x_{рл})^2 + y_{рл}^2 + z_{рл}^2}}{x - x_{рл}};$$

\hat{V} — полученная оценка скорости центра масс метаемого объекта.

Несмотря на свою простоту, описанный выше способ компенсации влияния взаимного расположения радиолокатора и НО имеет один существенный недостаток: этот способ дифференциальный и требует точного знания начальных условий, а конкретно начального времени — момента выхода НО из пускового устройства. В качестве примера на рис. 1 представлены графики зависимости оценки скорости НО \hat{V} от его координаты x при различных значениях Δt_0 — ошибки определения момента выхода снаряда из канала ствола, при следующих условиях:

$x_{рл} = -4$ м, $y_{рл} = 1$ м, $z_{рл} = 1$ м, $V_0 = 860$ м/с, нутация и прецессия отсутствуют.

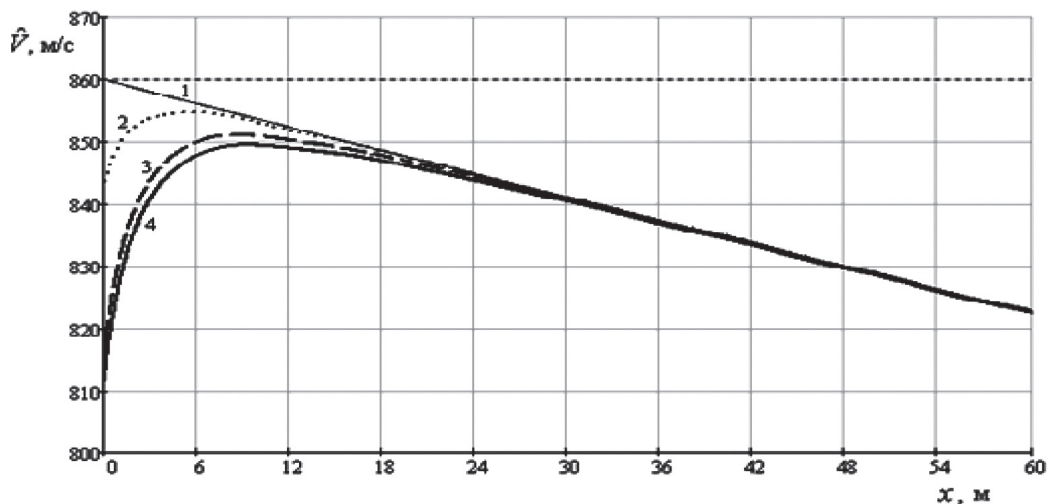


Рис. 1. Графики оценки скорости метаемого объекта при различных погрешностях определения момента вылета:

1 — $\Delta t_0 = 0, x = 0, \hat{V} \approx V$; 2 — $\Delta t_0 = 1$ мс, $x = 1$ м; 3 — $\Delta t_0 = 12$ мс, $x = 10$ м; 4 — $\Delta t_0 > 20$ мс, $x > 20$ м, $\hat{V} \approx V_{рл}^{бт}$

В дополнение к вышесказанному следует отметить, что регистрация сигнала радиолокатором начинается с момента выхода НО из пускового устройства, и для аппроксимации необходимо исключить этап промежуточной баллистики, так как на этом этапе метаемый объект все еще может набирать скорость.

При разработке алгоритма упоминалось, что в оцененной скорости \hat{V} присутствовали небольшие колебания, вызванные движением БТ из-за нутации и прецессии НО, которые устранялись аппроксимацией экспоненциальной зависимостью. Определение изменения максимального угла нутации НО как раз, наоборот, основано на выделении этих колебаний и определении их параметров.

За исходный сигнал определения изменения максимального угла нутации НО принимается промежуточный сигнал $V_{рл}^{бт}$, подвергшийся компенсации углового положения. Для примера на рис. 2 приведен график рассчитанного значения $V_{рл}^{бт}$ в зависимости от времени движения НО калибра 30 мм. Как видно из графика, колебание скорости БТ происходит с непостоянной амплитудой. Вызвано это тем, что на образование этих колебаний влияет не только относительно высокочастотное (сотни герц) движение НО относительно центра масс, но и низкочастотное (единицы, десятки герц) движение самого центра масс. Учитывая, что движение центра масс характеризуется на порядок меньшими значениями углов перехода между системами координат λ и φ , влиянием этого движения на скорость $V_{рл}^{бт}$ на начальном этапе можно пренебречь и устранить его уже в конце алгоритма.

Для учета этих составляющих необходимо обратное решение математической модели отражен-

ного радиолокационного сигнала и баллистической модели НО. Ввиду сложности этих моделей без упрощений решить эту задачу невозможно. Таким образом, принимается ряд допущений, качественно не влияющих на окончательное решение, и в результате мы получаем выражение для определения максимального угла нутации НО на траектории:

$$\delta_{\max} = \sqrt{\Delta V \left(\frac{c_x^{\delta^2} V^2}{4\pi f_{\delta}} \frac{\rho S}{2m} + \frac{1}{2} |x_1| \pi f_{\delta} \right)^{-1}}, \quad (24)$$

где ΔV , f_{δ} — амплитуда и частота колебаний скорости, которые предварительно выделяются с помощью алгоритма удаления тренда на основе сглаживания функцией Гаусса из оценки скорости НО V , полученной из измерения скорости; $c_x^{\delta^2}$ — дополнительный аэродинамический коэффициент НО; S — характерная площадь НО; ρ — плотность воздуха; x_1 — координата основной блестящей точки НО в связанной системе координат.

Моделирование сигнала, отраженного от НО, и обработка результатов реальных опытов показали, что в спектре отраженного сигнала на дальностях до 200 м вполне различимы гармоники вторичной модуляции первого и второго порядка (рис. 3), при условии длительного когерентного накопления сигнала.

Для обнаружения и определения частот гармоник вторичной модуляции, так же как и для вычисления скорости снаряда, применяется алгоритм ОДФ (7), однако дополнение нулями здесь использовать нельзя, так как боковые лепестки в интерполированном преобразовании попросту перекроют сигналы интересующих нас гармоник. Час-

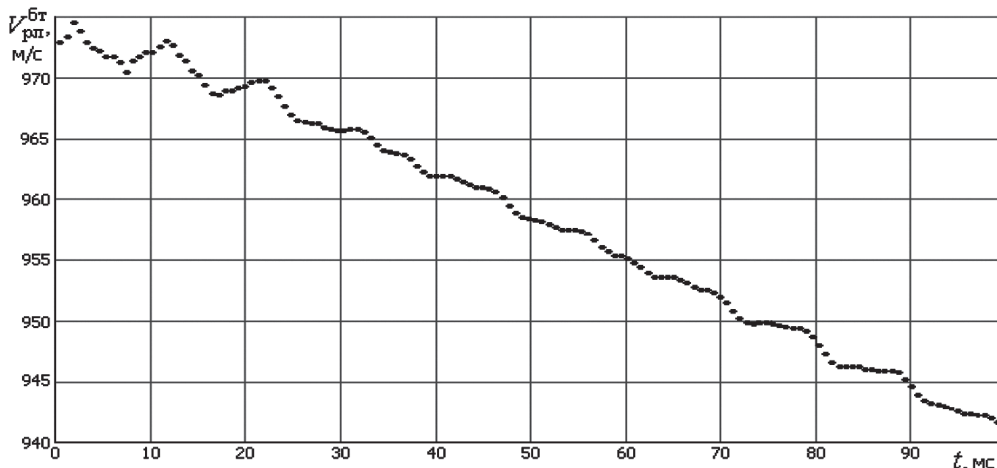


Рис. 2. Оценка скорости основной БТ неуправляемого объекта

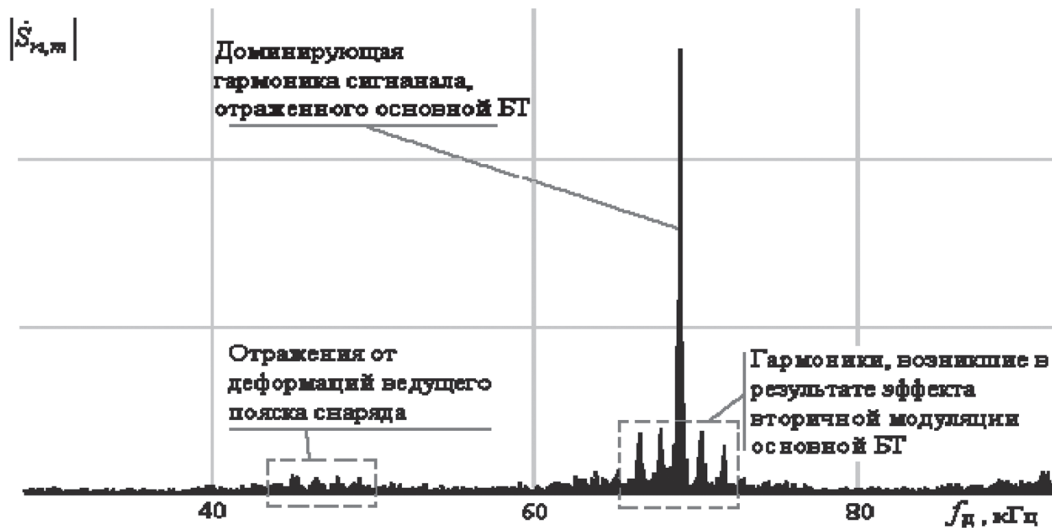


Рис. 3. Спектральный портрет сигнала, отраженного от снаряда на дальности 80 м

тоты гармоник вторичной модуляции определяются следующими выражениями:

$$f_{г.вм} = f_{д} \pm k_{г} \cdot \Delta f_{вр}, \quad \Delta f_{вр} = \frac{\dot{\gamma}}{2\pi}, \quad (25)$$

где $f_{г.вм}$ — частоты гармоник вторичной модуляции; $f_{д}$ — частота Доплера основной гармоники; $\Delta f_{вр}$ — частота вращения БТ; $k_{г} = 1, 2$ — порядок гармоники вторичной модуляции.

Так, для обнаружения маломощных гармоник увеличивается время накопления сигнала, а для того чтобы выполнялось условие когерентности, применяется компенсация фазовой модуляции корректирующей функцией, полученной из сигнала спектральной составляющей, доминирующей по амплитуде над другими гармониками и шумом.

С целью повышения точности алгоритма, после обнаружения гармоник вторичной модуляции, их частоты уточняются аппроксимацией гармоник полиномами второй степени по трем точкам, а затем определяются частоты вершин полиномов. Угловая скорость вращения вычисляется по формуле

$$\dot{\gamma} = 2\pi \Delta f_{вр}, \quad (26)$$

где $\Delta f_{вр}$ — средняя разностная частота между частотами вершин полиномов.

На рис. 4 представлен алгоритм определения параметров движения НО на основе вторичной обработке радиолокационного сигнала.

Выводы

Повышение точности применения с борта ЛА НО, используемых для решения различных задач:

тушения лесных пожаров, десантирования крупногабаритного груза и т.д. — обеспечивается реализацией полной баллистической модели движения НО. Основным условием реализации данной модели является определение начальных условий пуска (сброса) НО и параметров траектории. На основе обработки отраженного от НО сигнала обеспечивается определение углов пуска (сброса) НО, положение относительно центра масс, скорость и траектории движения.

Библиографический список

1. Бельский А.Б., Постников А.Г. Повышение точности применения неуправляемых авиационных средств поражения за счет совершенствования баллистических алгоритмов бортовых вычислительных систем летательных аппаратов // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2014. № 3. С. 60-69.
2. Дмитриевский А.А., Лысенко Л.Н. Внешняя баллистика: учебник для студентов вузов. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 2005. — 608 с.
3. Татаренко Д.С., Шутков П.В., Ефанов В.В., Роговенко О.Н. Способ определения баллистических характеристик // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 3. С. 77-83.
4. Гольдберг Л.М., Матюшкин Б.Д., Поляк М.Н. Цифровая обработка сигналов: Справочник. — М.: Радио и связь, 1985. — 312 с.
5. Шутков П.В., Ефанов В.В. Методика автоматизации процесса испытаний авиационных боеприпасов // Труды МАИ. 2014. № 75. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=49684>
6. Должиков В.И., Николаев А.В. Определение аэродинамических характеристик вращающегося летательного аппарата при неуправляемом полёте с помощью систем инженерного анализа // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 3. С. 47-53.

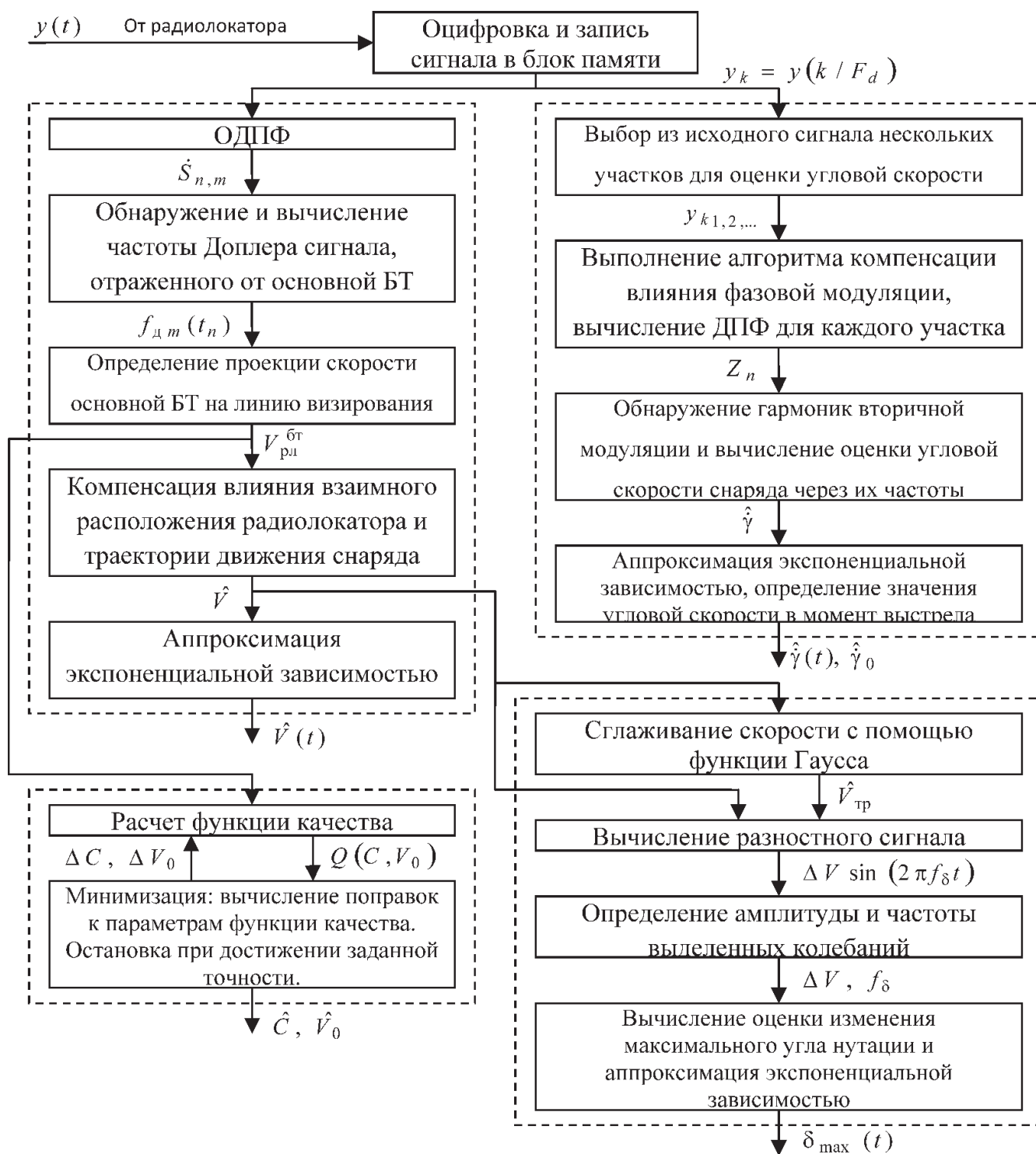


Рис. 4. Структурная схема алгоритма определения параметров движения НО на основе вторичной обработки радиолокационного сигнала

7. Вытришко Ф.М., Гультяев Н.Н. Совершенствование канонической баллистической модели движения неуправляемой ракеты с целью учета движения ее вокруг центра масс // Труды МАИ. 2013. № 71. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=46808>

UNCONTROLLED OBJECT MOTION PARAMETERS ALGORITHM BASED ON RADAR DATA REPROCESSING

Tatarenko D.S.^{1*}, Efanov V.V.^{1**}, Lobanov K.N.^{2***}

¹ Air force academy named after professor N.E. Zhukovskii and Yu.A. Gagarin, 54a, Starykh Bol'shevikov str., Voronezh, 394064, Russia

² 929th State flight-test center of the defence Ministry named after V.P. Chkalov, Akhtubinsk, Astrakhan region, 416500, Russia

* e-mail: denpeas@mail.ru

** e-mail: efanov55@mail.ru

*** e-mail: Kostyan_3d@rambler.ru

Abstract

This work relevance is stipulated by the necessity of airborne uncontrolled object implementation accuracy to fulfill such tasks as forest fire extinguishing, large cargoes airlift delivery, etc. At present, conventional aiming systems do not provide uncontrolled object implementation effectiveness in full measure, since the onboard ballistic algorithm employs approximating equations and demonstrates low accuracy.

The authors suggest employ uncontrolled object motion complete ballistic model to improve onboard ballistic algorithm accuracy. The initial conditions can be obtained by determining uncontrolled object motion parameters based on radar signal reprocessing. These parameters determination can be realized with the algorithm, which description and structure are presented in this paper.

The paper presents computation results of the signal reflected from an uncontrolled object. These signals reveal that at the distances of up to 200 m secondary modulation harmonics of the first and second order are quite observable in the reflected signal spectrum, under condition of long-continued coherent integration of the signal.

The main advantage of this algorithm consists in the procedure of obtaining the unmanaged missile accurate initial conditions, based on the interpretation of the Doppler's effect together with complex application of known mathematical methods of signal processing. The reflected signal from uncontrolled object processing allows obtaining uncontrolled object launching (drop) angle, relative to the center of mass position, velocity and motion trajectory.

Keywords: movement parameters algorithm, onboard ballistic algorithm, initial conditions, radar signal, Fourier transform.

References

1. Bel'skii A.B., Postnikov A.G. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Raketnykh i Artilleriiskikh Nauk*, 2014, no. 3, pp. 60-69.
2. Dmitrievskii A.A., Lysenko L.N. *Vneshnyaya ballistika* (External ballistics), Moscow, Mashinostroenie, 2005, 608 p.
3. Tatarenko D.S., Shutov P.V., Efanov V.V., Rogovenko O.N. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 3, pp. 77-83.
4. Gol'dberg L.M., Matyushkin B.D., Polyak M.N. *Tsifrovaya obrabotka signalov* (Digital signal processing), Moscow, Radio i svyaz', 1985, 312 p.
5. Shutov P.V., Efanov V.V. *Trudy MAI*, 2014, no. 75, available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/eng/published.php?ID=49684>
6. Dolzhikov V.I., Nikolaev A.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2015, vol. 22, no. 3, pp. 47-53.
7. Vytrishko F.M., Gul'tyaev N.N. *Trudy MAI*, 2013, no. 71, available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/eng/published.php?ID=46808>