

СЛОЖНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
И ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ КОМПЛЕКСЫ

УДК 681.746.3

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА
УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКОЙ БЕСПИЛОТНОГО
ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА¹

© 2022 г. О. В. Ермолин^а, С. М. Мужичек^а, В. И. Павлов^{б,*},
Г. Г. Себряков^а, А. А. Скрынников^{а,2}

^аГосударственный научно-исследовательский ин-т авиационных систем, Москва, Россия

^бТамбовский государственный технический ун-т, Тамбов, Россия

^сЦНИИ ВВС Минобороны России, Москва, Россия

²МАИ (национальный исследовательский ун-т), Москва, Россия

*e-mail: vpavl@mail.ru

Поступила в редакцию 29.12.2021 г.

После доработки 19.01.2022 г.

Принята к публикации 31.01.2022 г.

Указаны особенности управления полезной нагрузкой на примере беспилотного летательного аппарата, оборудованного бортовой радиолокационной станцией, при его непосредственном сближении с малоразмерным высокоскоростным и маневрирующим воздушным объектом. Разработаны алгоритмы, используемые при управлении полезной нагрузкой, применение которых позволяет определить положение воздушного объекта и его ракурс, а также величину промаха беспилотного летательного аппарата. Приведен алгоритм определения величины времени задержки на срабатывание полезной нагрузки беспилотного летательного аппарата.

DOI: 10.31857/S0002338822030052

Введение. Важной частью практических задач, решаемых современными беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), является своевременная доставка полезной нагрузки (элементов полезной нагрузки) на воздушные (ВО) и иные объекты. В зависимости от метода управления и решаемых задач современные БПЛА оснащаются для этого различными типами информационно-измерительных систем (ИИС) – телевизионными, радиолокационными, инфракрасными и др. [1]. При этом для ряда ВО доставка полезной нагрузки в настоящее время затруднительна из-за их малых размеров, высокой скорости движения, маневрирования на траектории.

Для эффективной доставки полезной нагрузки на малоразмерные и высокоскоростные ВО ИИС БПЛА должна обеспечивать возможность определения на траектории его движения, наряду с традиционными, ряд дополнительных параметров, а именно:

положение выбранного объекта по отношению к БПЛА, в том числе при минимальных расстояниях между ними, а также в момент ослепления ИИС БПЛА;

величину промаха БПЛА относительно ВО на траектории, а также в момент ослепления ИИС БПЛА;

величину ракурса ВО на траектории, а также в момент ослепления ИИС БПЛА.

Знание вышеуказанных параметров позволяет определять величину параметра управления полезной нагрузкой БПЛА – времени задержки на срабатывание.

Далее рассмотрим, каким образом ИИС БПЛА может определять положение выбранного объекта по отношению к БПЛА, величину промаха БПЛА относительно ВО, а также величину ракурса ВО.

1. Постановка задачи. Пусть БПЛА представляет собой летательный аппарат, ИИС которого состоит из: навигационной системы; измерителей положения БПЛА относительно центра

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 20-08-00091 а; 19-08-00487 а; 19-08-00502 а; 19-29-06077 мк).

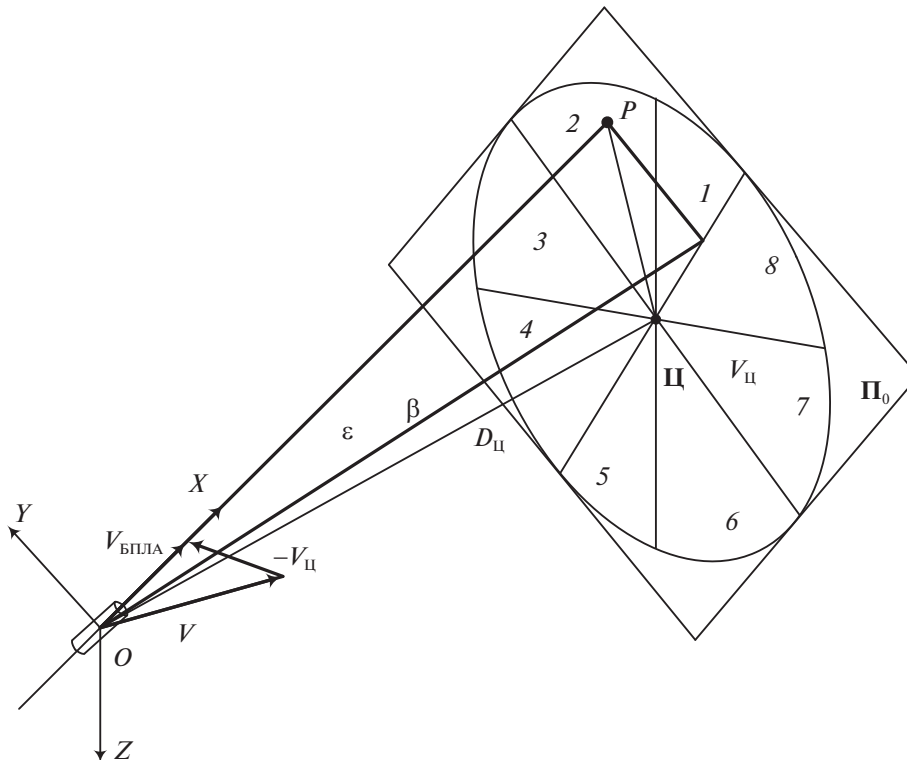


Рис. 1. Схема относительного положения БПЛА и ВО в момент t_0 ослепления БРЛС

массы; бортовой радиолокационной станции (БРЛС), реализующей активный вид радиолокации с пассивным ответом; бортовой цифровой электронно-вычислительной машины (БЦВМ) [1]. БПЛА в процессе самонаведения сближается с маневрирующим ВО по методу пропорциональной навигации. В БЦВМ формируются оценки фазовых координат, необходимых для реализации самонаведения БПЛА. Схема относительного положения БПЛА и ВО (цели) в момент t_0 ослепления БРЛС показана на рис. 1 [2]. На рисунке обозначено: $O, Ц$ – соответственно центры масс БПЛА и ВО; $OXYZ$ – связанная система координат БПЛА; $V_{\text{БПЛА}}, V_{\text{Ц}}, V$ – скорости соответственно БПЛА, ВО и взаимного сближения; $D_{\text{Ц}}$ – дальность до ВО; β, ϵ – соответственно азимут и угол места ВО; Π_0 – картинная плоскость ВО; P – точка промаха; $1-8$ – номера секторов.

Пусть в момент времени t_0 БПЛА и ВО движутся со скоростями $V_{\text{БПЛА}}$ и $V_{\text{Ц}}$ соответственно, V – взаимная скорость сближения, $D_{\text{Ц}}$ – дальность до объекта. БРЛС в составе ИИС БПЛА реализует измерения вектора фазовых координат относительного положения объекта до момента t_0 по варианту $X = [\beta \ \epsilon \ \omega \ D_{\text{Ц}} \ V \ \gamma \ \psi \ \theta]^T$, где β, ϵ – азимут и угол места цели; ω – угловая скорость линии визирования; $D_{\text{Ц}}, V$ – дальность и скорость сближения с ВО; γ, ψ, θ – углы крена, рыскания и тангажа. БПЛА стабилизирован по крену.

В связи с тем, что определение промаха выполняется в интересах полезной нагрузки, которая, как правило, конструктивно ориентирована по продольной оси БПЛА, картинная плоскость ВО Π_0 (см. рис. 1) принята перпендикулярной оси OX , их пересечение обозначено через P . В плоскости Π_0 формируется круг с центром в точке $Ц$ – пересечение картинной плоскости линией визирования ВО БРЛС. Радиус круга принят равным максимально допустимому промаху БПЛА мимо объекта наведения (на рис. 1 не обозначен). Круг разбит на L одинаковых секторов, количество которых является удовлетворительным для определения радиального направления на ВО. На борту БПЛА требуется найти радиальное направление на объект, величину промаха в текущий момент времени, величину ракурса объекта в текущий момент времени.

2. Алгоритм определения радиального направления на ВО. В [2] предложен метод нахождения радиального направления на ВО, сущность которого заключается в вычислении вероятностей нахождения точки промаха P в текущий момент времени в каждом из секторов картинной плос-

кости объекта. Данные вероятности вычисляются на основании измерений вектора фазовых координат БПЛА, а также относительного положения ВО и БПЛА. Соответствующий предложенному методу алгоритм вычисления вероятностей нахождения точки промаха P в каждом из секторов картинной плоскости объекта имеет следующий вид:

$$\hat{p}_k(l) = \frac{\tilde{p}_k(l) \exp[-0.5h_k(\hat{x}_i)]}{\sum_{l=1}^L \tilde{p}_k(l) \exp[-0.5h_k(\hat{x}_i)]}, \quad i = \overline{1, I}, \quad (2.1)$$

$$\tilde{p}_k(l) = \sum_{l_{k-1}=1}^L q(l_k | l_{k-1}) \hat{p}_{k-1}(l_{k-1}), \quad k = \overline{1, K}, \quad (2.2)$$

$$h_k(\hat{x}_i) = \sum_{i=1}^L h_i^{(l)}(\hat{x}_i), \quad (2.3)$$

$$h_i^{(l)}(\hat{x}_i) = \frac{(\hat{x}_i - m_i(l))^2}{\hat{D}_{xi}}, \quad i = \overline{1, I}. \quad (2.4)$$

Здесь $\hat{p}_k(l)$, $\tilde{p}_k(l)$ – соответственно апостериорная и прогнозируемая вероятности нахождения точки промаха в l -м секторе в k -й момент времени; $q(l_k | l_{k-1})$ – коэффициент прогнозирования изменения положения точки промаха при наличии дополнительной информации о последовательности смены секторов; \hat{x}_i – оценка измеренного значения i -й фазовой координаты относительного положения БПЛА и ВО в текущий момент времени; $m_i(l)$ – математическое ожидание (“центр тяжести”) l -го сектора по i -й фазовой координате; \hat{D}_{xi} – оценка дисперсии измерений i -й фазовой координаты; I – количество измеряемых фазовых координат, используемых при определении радиального направления на ВО; функции $h_i^{(l)}(\hat{x}_i)$, $h_k(\hat{x}_i)$ характеризуют соответственно величину отклонения оценки i -й фазовой координаты и общее отклонение линии визирования БРЛС по показаниям применяемых измерителей от центра тяжести l -го сектора.

Номер сектора, где в текущий момент времени находится точка промаха P , задается по критерию максимума апостериорной вероятности

$$\hat{l}_k = \arg \max_{l=1, L} \hat{p}_k(l). \quad (2.5)$$

В [3] приведен вариант детализации картинной плоскости ВО при реализации разработанного метода определения радиального направления на объект, найдены взаимосвязи фазовых координат, используемых в алгоритме вычисления вероятностей нахождения точки промаха в каждом из секторов картинной плоскости объекта. Посредством имитационного моделирования показана пригодность разработанного алгоритма (2.1)–(2.5) для оперативного определения направления на объект в интересах полезной нагрузки БПЛА.

3. Алгоритм определение величины промаха. За основу процедуры определения величины промаха – отрезка ЦР на рис. 1 примем метод, описанный в [4]:

$$pr = \frac{D_{\Pi}^2}{V} \omega, \quad (3.1)$$

где pr – величина промаха; $V = -\dot{D}_{\Pi}$, а угловая скорость ω линии визирования определяется из решения векторного уравнения $\vec{\omega} = \vec{\beta} + \vec{\varepsilon}$; $\omega = |\vec{\omega}|$ ($\vec{\omega}$, $\vec{\beta}$, $\vec{\varepsilon}$ – векторы угловой скорости линии визирования, азимута и угла места цели).

Текущий, т.е. определяемый в текущий момент времени, промах является случайной величиной, так как зависит от случайных возмущений, действующих на БПЛА и его систему управления в процессе полета к ВО. Учитывая то, что БПЛА стабилизирован по крену и рассеивание в картинной плоскости ВО можно считать круговым, оценку текущего промаха достаточно получить для одного канала. Определение величины промаха в БЦВМ БПЛА можно рассматривать на примере одной плоскости – азимутальной. Полученные результаты легко обобщаются на пространственный случай путем векторного сложения с результатами для угломестной плоскости.

В БЦВМ современных БПЛА, наводимых по методу пропорциональной навигации, оценки фазовых координат, входящих в формулу (3.1), формируются на выходах соответствующих фильтров, синтезированных для ожидаемых усредненных условий применения. Данные оценки принципиально могут быть использованы для определения величины промаха по формуле (3.1).

Несоответствие моделей состояния и измерения реальным условиям, складывающимся при сближении БПЛА с объектом, приводит к понижению точности оценивания фазовых координат и соответственно к понижению точности определения величины промаха. При этом на борту БПЛА в интересах полезной нагрузки необходимо учитывать ряд особенностей при сближении БПЛА и ВО на малые дальности. В [4, 5] получены приближенные аналитические формулы и подробно исследована точность пропорционального наведения БПЛА в различных тактических ситуациях. Показано, что точность самонаведения сильно зависит от условий применения, маневренных характеристик объектов и помех. В [6, 7] разработаны методики для приближенного анализа динамической и флуктуационной составляющих промаха БПЛА с радиолокационной головкой самонаведения. Формулы соответственно для динамической pr_d и флуктуационной pr_ϕ составляющих промаха в момент окончания самонаведения имеют вид

$$pr_d = \frac{j_{\text{ц}} D_{\text{ц}}^2}{V^2 (K_{\text{ИВС}} K_{\text{СР}} - 2)}, \quad (3.2)$$

$$D_{pr} = \frac{G_{\omega} K_1^2 N_0^2 K_V^2 K_{\text{СР}}^2 D_{\text{ц}}^4 \Delta F_{\text{эф}}}{V^2 (K_1 N_0 K_V K_{\omega} K_{\text{СР}} - 2)^2}, \quad (3.3)$$

где D_{pr} – дисперсия промаха pr_ϕ ; $j_{\text{ц}}$ – ускорение ВО; $K_{\text{ИВС}}$, $K_{\text{СР}}$, K_1 , K_V , K_{ω} – соответственно коэффициенты передачи информационно-вычислительной системы (ИВС) БПЛА, системы “система управления БПЛА – БПЛА”, системы формирования сигнала рассогласования в соответствии с методом наведения, измерителя скорости сближения, угломера при оценивании угловой скорости линии визирования. Здесь также G_{ω} – спектральная плотность шума оценки угловой скорости линии визирования; $\Delta F_{\text{эф}}$ – эффективная полоса пропускания системы самонаведения по угловому шуму; N_0 – навигационный параметр метода наведения. Формулы (3.2) и (3.3) демонстрируют весьма сложную зависимость характеристик промаха БПЛА как от параметров системы самонаведения, так и от условий применения. В случае если БЦВМ БПЛА обладает достаточным ресурсом, то может быть реализован один из возможных вариантов повышения точности определения величины промаха.

Повышение точности определения величины промаха БПЛА. Вариант. Особенностью функционирования БРЛС БПЛА является ее “ослепление” при сближении с ВО на некоторую относительно малую дальность D_k и неспособность выполнять свои функции по назначению в процессе дальнейшего сближения. Основная причина “ослепления” БРЛС с моноимпульсным угломером – так называемый угловой шум [8]. При малых расстояниях, когда угловые размеры ВО соизмеримы с шириной диаграммы направленности антенны БРЛС, угловой шум может привести к ошибкам пеленгации и достаточно большим ошибкам оценивания угловой скорости линии визирования. Также к значительным ошибкам оценивания угловой скорости линии визирования по мере уменьшения дальности до ВО приводит преломление волн в обтекателе антенны БРЛС. При изменении угловой скорости антенны относительно продольной оси БПЛА возникает так называемая скоростная ошибка обтекателя, увеличивающаяся по мере увеличения угловой скорости антенны.

В [7] приведены алгоритмы фильтрации для получения оценок фазовых координат относительного положения БПЛА и ВО, используемых при реализации метода самонаведения. Указаны особенности получения оценок, в том числе тех фазовых координат, которые могут быть применены в БЦВМ БПЛА для определения величины промаха по формуле (3.1). Оценки дальности и скорости сближения с целью в [7] предлагается находить посредством фильтрации по алгоритмам стохастической теории оптимального управления (СТОУ) [9, 10] выходных сигналов многоконтурного измерителя дальности и ее производных с независимым оцениванием скорости сближения. Оценку угловой скорости линии визирования ВО предложено формировать по алгоритмам СТОУ на основании выходных сигналов квазиоптимального угломера интенсивно маневрирующих объектов. Точность оценок дальности, скорости сближения и угловой скорости линии визирования ВО в большой степени зависит от соответствия моделей состояния реально складывающейся тактической ситуации.

Таблица 1

| Тип цели | Поперечная перегрузка цели j , ед. | Ожидаемые выходные сигналы измерителей $m_i(s)$ в s -й ситуации | | | | Номер ситуации |
|----------|--------------------------------------|---|----------------|-----|-----------|----------------|
| | | β | ω | ... | D | |
| М | $j = 1$ | β_{M1} | ω_{M1} | ... | D_{M1} | 1 |
| | $j = 2$ | β_{M2} | ω_{M2} | ... | D_{M2} | 2 |
| | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| | $j = 10$ | β_{M10} | ω_{M10} | ... | D_{M10} | ... |
| С | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| Б | ... | ... | ... | ... | ... | S |

Учитывая особенности функционирования БРЛС БПЛА на малых дальностях по мере сближения с ВО, а также неизбежные методические ошибки при оценивании фазовых координат, используемых в формуле (3.1), можно сделать вывод о нецелесообразности точечной оценки величины промаха, т.е. оценки текущего промаха в интересах полезной нагрузки в конечный момент самонаведения БПЛА. Альтернативой может быть интегральная оценка величины промаха, определяемая в БЦВМ БПЛА на основании имеющихся оценок фазовых координат, используемых при реализации метода самонаведения. Предлагаемая процедура интегральной оценки величины промаха состоит из трех этапов и заключается в следующем. На первом этапе осуществляется распознавание тактической ситуации, т.е. идентификация моделей состояния для повышения точности оценок фазовых координат, применяемых в формуле (3.1). На втором этапе формируется выборка из значений текущих промахов по формуле (3.1). На третьем этапе на основании выборки формируются оценки математического ожидания и дисперсии величины промаха БПЛА, в том числе с учетом прогнозируемых оценок фазовых координат. Ориентировочные усредненные значения дальностей до цели $D_{ЦЭ}$ и длительности $t_{Э}$ указанных этапов, когда в качестве БПЛА выступает ракета класса “воздух-воздух” с активной БРЛС, находятся в следующих диапазонах: этап 1 – $D_{ЦЭ1} = 3000–1500$ м, $t_{Э1} = 4.5–2$ с; этап 2 – $D_{ЦЭ2} = 1500–500$ м, $t_{Э2} = 2–0.7$ с; этап 3 – $D_{ЦЭ3} = 500–0$ м, $t_{Э3} = 0.7$ с. Очевидно, что длительность этапов будет зависеть от назначаемых дальностей $D_{ЦЭ}$ и скорости сближения БПЛА с целью, т.е. от собственных скоростей БПЛА и ВО и ракурса ВО. Назначаемые дальности $D_{ЦЭ}$ в свою очередь будут зависеть от типа ВО. На этапе 3, который может являться этапом после “ослепления” БРЛС и который целесообразно “назначать” при достижении определенной дальности в зависимости от типа ВО или определять, например, по заранее установленному пороговому значению при изменении величины сигнала в суммарном канале БРЛС, формирование оценки промаха осуществляется по результатам прогноза фазовых координат. Именно этап 3 предлагаемой процедуры подлежит дальнейшему тщательному исследованию.

Распознавание тактической ситуации. Распознавание тактической ситуации на этапе 1 процедуры определения величины промаха на борту БПЛА целесообразно как с точки зрения повышения точности оценивания фазовых координат за счет коррекции моделей состояния и наблюдения, так и при обосновании значений $D_{ЦЭ2}$ и $D_{ЦЭ3}$. Под тактической ситуацией в наиболее простом случае рассматривается конкретное сочетание типа ВО и выполняемого ВО маневра (поперечной перегрузке ВО). Возможный вариант распознаваемых тактических ситуаций показан в виде таблицы, в которой обозначены: М, С, Б – соответственно малый, средний и большой ВО; ... – условный знак “по аналогии”; S – количество распознаваемых тактических ситуаций.

Каждой ситуации ставятся в соответствие заранее определенные модели состояния и наблюдения с заданными интенсивностями шумов состояния и наблюдения (в данной статье не рассматриваются), а также значения $D_{ЦЭ2}$ и $D_{ЦЭ3}$. Алгоритм распознавания тактической ситуации на основании байесовского подхода по аналогии с (2.1)–(2.5) для данного случая будет:

$$\hat{p}_k(s) = \frac{\tilde{p}_k(s) \exp[-0.5h_k(z_i)]}{\sum_{s=1}^S \tilde{p}_k(s) \exp[-0.5h_k(z_i)]}, \quad i = \overline{1, I}, \quad (3.4)$$

$$\tilde{p}_k(s) = \hat{p}_{k-1}(s_{k-1}), \quad k = \overline{1, K}, \quad (3.5)$$

$$h_k(z_i) = \sum_{s=1}^S h_i^{(s)}(z_i), \quad (3.6)$$

$$h_i^{(s)}(z_i) = \frac{(z_i - m_i(s))^2}{\hat{D}_i}, \quad i = \overline{1, I}, \quad (3.7)$$

$$\hat{s}_k = \arg \max_{s=1, S} \hat{p}_k(s). \quad (3.8)$$

Здесь z_i, \hat{D}_i — соответственно сигнал и оценка его дисперсии на выходе i -го измерителя; $m_i(s)$ — математическое ожидание сигнала i -го измерителя в s -й тактической ситуации; I — количество измерителей, задействованных в распознавании s -й ситуации; K — длительность серии, которая может ограничиваться из-за действия организованных помех.

Алгоритм (3.4)-(3.8) обладает высоким быстродействием. Так, время распознавания ситуации аналогично [3] составляет сотые доли секунды.

Формирование выборки из значений текущих промахов. При формировании выборки из значений текущих промахов в формуле (3.1) используются оценки соответствующих фазовых координат. При этом в моделях состояния и измерения для алгоритмов фильтрации $\omega, D_{Ц}, V$ в зависимости от текущего значения s используются заранее определенные значения спектральных плотностей шумов. Ожидается, что данная процедура за счет высокого быстродействия распознавания тактической ситуации будет способствовать повышению точности оценивания именно данных фазовых координат без влияния на основные алгоритмы фильтрации всех фазовых координат, связанных многочисленными перекрестными связями, которые используются при управлении БПЛА.

Выборку из значений промахов целесообразно формировать как простую случайную выборку с тем расчетом, чтобы к моменту применения полезной нагрузки БПЛА статистическая ошибка оценивания промаха не превышала 5% с доверительной вероятностью 0.95. Это достигается назначением дальности $D_{ЦЭ2}$ начала этапа 2 и назначением такого интервала съема данных, который обеспечивает выборку объемом более 400 единиц. На этапе 3 при достижении $D_{ЦЭ3}$ в алгоритмах фильтрации $\omega, D_{Ц}, V$ измеряемые значения фазовых координат заменяются прогнозируемыми по правилам, описанным в [6], с продолжением формирования выборки. Оценки математического ожидания и среднеквадратического отклонения промаха формируются по мере получения выборочных значений по широко известным правилам [11].

4. Алгоритм определения ракурса ВО. Для корректного определения величины времени срабатывания полезной нагрузки БПЛА нужно знать величину ракурса ВО [12]. Поэтому необходимо разработать алгоритм определения ракурса ВО, реализуемый в ИИС БПЛА с радиолокационной головкой самонаведения (РГС) на основании информации только от имеющихся в составе ИИС измерителей и имеющейся в составе ИИС базы данных (т.е. без привлечения какой-либо дополнительной информации из вне). Рассмотрим возможный алгоритм определения ракурса при сближении БПЛА с ВО в задней и передней полусферах.

Задняя полусфера. Исходные данные и допущения.

1. БПЛА наводится на ВО по методу пропорционального наведения.
2. В качестве сигнала подсвета объекта (СПЦ) применяется квазинепрерывный сигнал. Радиотехнические измерители ИИС БПЛА позволяют измерять: φ — бортовой пеленг объекта (угол между продольной осью БПЛА и равносигнальным направлением следящего пеленгатора); ω — угловую скорость линии визирования; D — дальность до ВО; $V_{сб}$ — скорость сближения БПЛА с ВО.
3. Из нерадиотехнических измерителей в процедуре используются акселерометры как в плоскостях управления БПЛА, так и по продольной оси БПЛА, которые измеряют: $j_{1,2}$ — поперечное ускорение БПЛА в соответствующих плоскостях; $j_{пр}$ — продольное ускорение БПЛА.
4. В алгоритме применяются оценки измерений по п. 2 и 3, определяемые в ИИС БПЛА. Методика оценивания и фильтры описаны в [1] для формирования параметров управления.
5. В алгоритме используется собственная скорость БПЛА. Можно считать, что особенности той части атмосферы, в которой происходит сближение БПЛА с ВО, одинаковы для БПЛА и ВО.

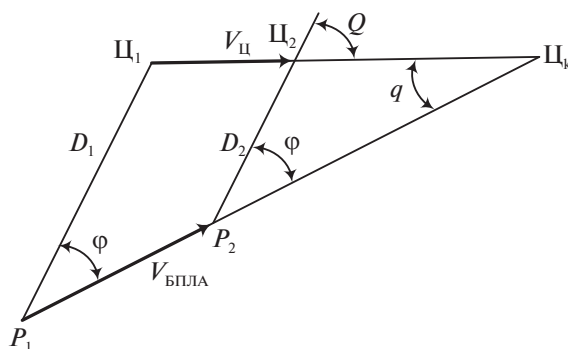


Рис. 2

Возможны два варианта для оценки собственной скорости БПЛА. Первый – по информации от производителя БПЛА. В базу данных ИИС БПЛА должны быть занесены следующие характеристики: разгонные, скоростные с учетом условий пуска, высоты полета, углы наклона траекторий. Второй – по информации в момент пуска из самолетной информационно-вычислительной системы и данным $j_{пр}$ – продольного ускорения БПЛА.

Схема сближения БПЛА (P) с ВО (Ψ) в горизонтальной плоскости при пуске в заднюю полу-сферу (условно “догон”) показана на рис. 2.

Рисунок 2 соответствует случаю, когда переходные процессы после пуска БПЛА завершены, ВО летит прямолинейно и равномерно (правомерность данного допущения будет далее обоснована с помощью особенностей решения главной задачи (определения ракурса) и особенностей разрабатываемой процедуры), БПЛА наводится по методу пропорционального наведения и его траектория практически прямолинейна [1]. На рис. 2 обозначено: P_1, Ψ_1 – положение БПЛА и ВО в произвольный (первый) момент времени; P_2, Ψ_2 – положение БПЛА и объекта в произвольный (второй) момент времени; Ψ_k – точка “встречи”; D_1, D_2 – дальности до объекта в первый и второй моменты времени соответственно; φ – бортовой пеленг ВО (принимается неизменным в соответствии с последующим обоснованием); q – угол между вектором скорости БПЛА и вектором скорости ВО, что практически совпадает с углом между продольной осью БПЛА и продольной осью ВО; Q – курсовой угол визирования объекта (его синус – это ракурс объекта в координаторе БПЛА).

Алгоритм определения угла q включает в себя операции.

1. В произвольный момент времени, например первый, по имеющимся значениям D_1 и $V_{сб1}$ определяем время до “встречи” t_{k1}

$$t_{k1} = \frac{D_1}{V_{сб1}}. \quad (4.1)$$

2. На основании скорости $V_{БПЛА}$ именно для данного (он условно назван первым) момента времени и t_{k1} определяем длину отрезка $P_1\Psi_k$:

$$P_1\Psi_k = V_{БПЛА}t_{k1}. \quad (4.2)$$

3. Решаем произвольный треугольник $P_1\Psi_1\Psi_k$, в котором известны две стороны $P_1\Psi_1 = D_1$, $P_1\Psi_k = V_{БПЛА}t_{k1}$ и угол между ними φ . По теореме косинусов находим длину отрезка $\Psi_1\Psi_k$:

$$\Psi_1\Psi_k = \sqrt{D_1^2 + (V_{БПЛА}t_{k1})^2 - 2D_1V_{БПЛА}t_{k1} \cos \varphi}. \quad (4.3)$$

Далее по теореме синусов находим синусы (и соответственно сами углы) углов q и угла $P_1\Psi_1\Psi_k$. Ракурс объекта будет

$$\sin q = \frac{D_1 \sin \varphi}{\Psi_1\Psi_k}. \quad (4.4)$$

Решение треугольника $P_1\Psi_1\Psi_k$ позволяет дополнительно оценить на борту БПЛА.

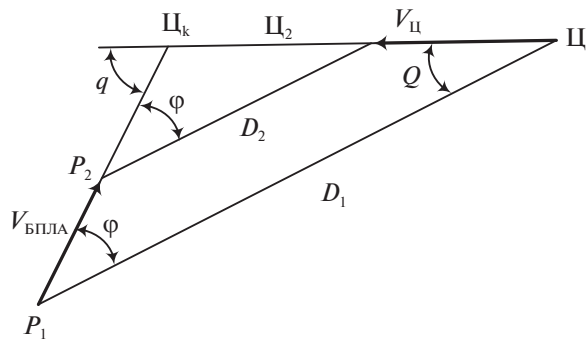


Рис. 3

4. Модуль скорости ВО

$$V_{BO} = \frac{\Pi_1 \Pi_k}{t_{k1}} \tag{4.5}$$

5. Ракурс ВО в координаторе БПЛА

$$\sin Q = \sin \varphi \cos q + \cos \varphi \sin q. \tag{4.6}$$

Передняя полусфера. Схема сближения БПЛА с ВО в горизонтальной плоскости при пуске в переднюю полусферу (условно “перехват”) показана на рис. 3 (обозначения такие же, как и на рис. 2).

Далее все формулы алгоритма “работают” аналогично случаю задней полусферы. Ракурс ВО по отношению к вектору скорости БПЛА (или его продольной оси) так же, как и ранее, вычисляется по формуле (4.4). Это следует из формулы для синуса разности двух углов, так как $q = \pi - \angle P_1 \Pi_k \Pi_1$.

Аналогично случаю с промахом выборку из значений ракурсов ВО формируем как простую случайную выборку с тем расчетом, чтобы к моменту применения полезной нагрузки БПЛА статистическая ошибка оценивания ракурса не превышала 5% с доверительной вероятностью 0.95. Оценки математического ожидания и среднеквадратического отклонения ракурса также формируем по мере получения выборочных значений [11].

5. Алгоритм определения величины времени задержки на срабатывание полезной нагрузки БПЛА.

Величина времени задержки T_3 , обеспечивающая оптимальное для условий сближения БПЛА с объектом $(pr, V_{сб})$ положение точки срабатывания полезной нагрузки БПЛА определяется в соответствии с выражением:

$$T_3 = pr \left(\frac{\text{ctg} \varphi_0 - \text{ctg} \bar{\varphi}'}{V_{сб}} - \frac{1}{V_0 \sin \bar{\varphi}} \right) + \frac{L \sin \varphi}{2V_{сб}}, \tag{5.1}$$

где pr – величина промаха БПЛА относительно объекта, $\bar{\varphi}'$ – среднее направление разлета элементов полезной нагрузки в динамике, φ_0 – угол наклона диаграммы направленности радиолокационной головки самонаведения БПЛА, V_0 – начальная скорость разлета элементов, $V_{сб}$ – относительная скорость сближения БПЛА с ВО, L – продольный размер ВО.

Среднее направление разлета элементов в динамике определяется в соответствии с выражением:

$$\bar{\varphi}' = \arctg \frac{\sin \bar{\varphi}}{(V_{сб}/V_0) + \cos \bar{\varphi}}, \tag{5.2}$$

где $\bar{\varphi}$ – среднее направление разлета элементов в статике.

Величина времени задержки на срабатывание, которое должна обработать ИИС БПЛА, определяется как

$$T_{3.c} = T_3 - t_n, \tag{5.3}$$

где t_n – средняя величина времени инерционности инициирующих элементов полезной нагрузки.

Заключение. Предложены алгоритмы функционирования ИИС управления полезной нагрузкой БПЛА, а именно: определение радиального направления на ВО, определение величины промаха, определение ракурса ВО, определение величины времени задержки на срабатывание полезной нагрузки БПЛА. Способы, реализующие предложенные в статье алгоритмы, защищены патентами Российской Федерации на изобретения. Использование предложенных алгоритмов позволит обеспечить своевременную доставку элементов полезной нагрузки БПЛА на малоразмерные, высокоскоростные и маневрирующие ВО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Себряков Г.Г., Красильщиков М.Н. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов. М.: Физматлит, 2009. 556 с.
2. Себряков Г.Г., Мужичек С.М., Скрынников А.А., Павлов В.И., Ермолин О.В. Определение радиального направления на объект в системе наведения беспилотного летательного аппарата // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. № 12. С. 24–28.
3. Себряков Г.Г., Мужичек С.М., Скрынников А.А., Павлов В.И., Ермолин О.В. Определение мгновенного положения точки промаха беспилотного летательного аппарата по информации угломерного канала // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2017. № 5. С. 23–27.
4. Казаков И.Е., Гладков Д.И., Криксунов Л.З., Харитонов А.П. Системы управления и динамика наведения ракет / Под ред. И.Е. Казакова. М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1973. 498 с.
5. Бухалёв В.А. Обработка информации и управление ракетами в условиях противодействия. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, 2009. 146 с.
6. Авиационные системы радиоуправления. Т. 1. Принципы построения систем управления. Основы синтеза и анализа / Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. М.: Радиотехника, 2003. 192 с.
7. Авиационные системы радиоуправления. Т. 2. Радиоэлектронные системы самонаведения / Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. М.: Радиотехника, 2003. 390 с.
8. Леонов А.И., Фомичев К.И. Моноимпульсная радиолокация. М.: Радио и связь, 1984. 312 с.
9. Афанасьев В.Н., Колмановский В.В., Носов В.Р. Математическая теория конструирования систем управления. М.: Высш. шк., 2003. 615 с.
10. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. М.: Радио и связь, 1991. 608 с.
11. Вероятность и математическая статистика: энциклопедия. М.: Большая Российская энциклопедия, 1999. 911 с.
12. Мужичек С.М., Обросов К.В., Ким В.Я., Лисицын В.М. Определение направления полета по сигналам оптико-электронной системы переднего обзора. Вестник компьютерных и информационных технологий. 2013. № 5 (107). С. 8–13.