

**ВЫБОР МЕТОДА НАВЕДЕНИЯ ДЛЯ ПЕРЕХВАТА
МАНЕВРЕННЫХ И ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЦЕЛЕЙ**

**SELECTION OF THE GUIDANCE METHOD
FOR INTERCEPTING A MANEUVERABLE AND HIGH-SPEED TARGETS**

По представлению чл.-корр. РАРАН В.Б. Дементьева

И.А. Соловатов, Н.В. Митюков

Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова

I.A. Solovатов, N.V. Mitiukov

Проведенное имитационное моделирование показало, что для поражения низкоскоростной маневрирующей цели наилучшим образом подходят методы половинного и пропорционального сближения. Для поражения высокоскоростной прямолетящей цели методы трех точек и половинного спрямления непригодны. Таким образом, единственным методом, подходящим для перехвата двух целей, стал метод параллельного сближения. Он сочетает в себе минимальное подлетное время до цели и способность перехватывать цели, имеющие скорость, превышающую предельную скорость полета зенитной ракеты в несколько раз.

Ключевые слова: зенитно-ракетный комплекс, зенитная ракета, метод наведения, маневренная цель, высокоскоростная цель.

The conducted simulation modeling showed that the methods of half and proportional approach are best suited for hitting a low-speed maneuvering target. To hit a high-speed straight-flying target, the three-point and half-straightening methods are not suitable. Thus, the only method suitable for intercepting two targets was the parallel approach method. It combines the minimum flight time to the target and the ability to intercept targets with a speed exceeding the maximum speed of an anti-aircraft missile by several times.

Keywords: anti-aircraft missile system, anti-aircraft missile, guidance method, maneuverable target, high-speed target.

Введение

Для перехвата воздушной цели важнейшим является выбор метода наведения зенитной управляемой ракеты (ЗУР) на цель. От выбранного метода напрямую зависит боевая эффективность зенитно-ракетного комплекса (ЗРК).

В работе О.Л. Арапова и Ю.С. Зуева исследуется возможность совершения целью эффективного противоракетного маневра. Но при

этом авторы признают, что выбор метода наведения является «отдельной и весьма трудоемкой задачей, требующей детального изучения» [1]. В связи с этим, остается лишь догадываться, чем обоснован выбор метода наведения в их задаче. В статье В.Э. Маркевича и В.В. Легкоступа исследуется возможность перехвата маневренной цели в условиях ограниченного сектора наведения ракеты. При этом они констатируют, что «большинство современных алгоритмов

управления ракетами (зенитными, авиационными, противоракетными, противоспутниковыми, противокорабельными и др.), предназначенных для поражения различного класса целей, базируются на различных вариантах метода пропорциональной навигации» [2]. В связи с этим остальные методы наведения остались за рамками их работы. А.А. Анциферов с коллегами исследовал возможности перехвата ЗУР с активной радиолокационной головкой самонаведения групповой маневренной цели [3]. Судя по результатам моделирования, ими также был использован метод пропорционального сближения, к сожалению, без указания почему был выбран именно он.

В.Н. Акимов и В.Н. Ильичёв, оценивая дальность перехвата цели ЗУР, пришли к выводу, что наиболее оптимально использовать систему с комбинированными методами наведения [4]. Но вопросы выбора методов снова оказались за рамками рассмотрения. Интересна также работа В.Я. Мизрохи, которая посвящена коррекции алгоритмов управления ракетой с активной радиолокационной головкой с учетом помех, создающихся на подстилающей морской поверхности [5]. К сожалению, автор в своей работе не указал какой метод наведения он рассматривал.

Таким образом, следует отметить, что обычно авторы предпочитают использовать лишь один метод наведения, не рассматривая альтернативные варианты [1–5].

Методы наведения

Наведение ракеты на цель заключается в непрерывном измерении и устранении рассогласования положения ракеты относительно кинематической траектории, определяемой методами наведения. Известно, что управление ракетой, как правило, осуществляется по направлению, т.е. в двух взаимно перпендикулярных плоскостях стрельбы: по азимуту и углу места. Азимут цели — угловое положение проекции наблюдаемого объекта на горизонтальную плоскость, угол места цели — угловое положение наблюдаемого объекта в вертикальной плоскости. Каждый метод наведения вырабатывает для ЗУР свои численные значения азимута и тангажа для наведения в точку встречи ЗУР с целью. Для дальнейшего моделирования были сформулированы математические модели полета ракет с учетом

этих методов наведения, после чего они реализовывались в среде Pascal ABC.

Существует четыре основных трехточечных метода наведения ЗУР ЗРК.

При наведении по методу трех точек ракета, двигаясь по криволинейной траектории, все время удерживается на линии визирования «ЗРК — Цель». Это самый простой для аппаратной реализации метод наведения, инструментальные погрешности аппаратуры и флуктуация сигналов цели и ракеты вызывают меньшие ошибки наведения, чем в методе половинного спрямления. К недостаткам метода трех точек относятся большая кривизна кинематической траектории и высокие управляющие поперечные перегрузки ракеты.

Метод половинного спрямления представляет собой усовершенствованный метод трех точек, где движение ракеты в каждый момент времени направлено в упрежденную точку встречи ракеты с целью. Суть метода заключается в том, что текущие углы визирования и азимута цели определяются с учетом поправки на упреждение, рассчитываемой через угловую скорость цели относительно ЗРК, скорость сближения ЗУР с целью и расстояние между ЗУР и целью.

Азимут для стрельбы с упреждением по методу половинного спрямления:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{ц} + \Delta\varepsilon,$$

где $\varepsilon_{ц}$ — азимут визирования цели;

$\Delta\varepsilon = m \left(\frac{\dot{\Delta r}}{\Delta r} \right) \dot{\varepsilon}_{ц}$ — поправка для стрельбы на упреждение ($m = 0,5$ — поправочный коэффициент половинного спрямления);

$\frac{\dot{\Delta r}}{\Delta r}$ — время, оставшееся до поражения цели;

$\dot{\varepsilon}_{ц}$ — угловая скорость азимутальной линии визирования цели.

Угол места для стрельбы с упреждением по методу половинного спрямления:

$$\beta_p = \beta_{ц} + \Delta\beta,$$

где $\beta_{ц}$ — угол места визирования цели;

$\Delta\beta = m \left(\frac{\dot{\Delta r}}{\Delta r} \right) \dot{\beta}_{ц}$ — поправка для стрельбы на упреждение;

$\dot{\beta}_{ц}$ — угловая скорость азимутальной линии визирования цели.

При выработке углов упреждения $\Delta\alpha$ и $\Delta\beta$ в методе половинного спрямления учитывается скорость сближения ракеты с целью и расстояние между ними, а также угловая скорость вращения линии визирования цели. Через скорость сближения ракеты с целью рассчитывается время, спустя которое произойдет встреча с целью. Умножив это время на угловую скорость линии визирования цели относительно установки ЗРК, и поделив полученное значение пополам, получим угловую поправку для стрельбы с упреждением. Прибавляя полученные поправки к азимуту и углу места цели соответственно, получаем углы наведения для метода половинного спрямления.

В результате, при наведении методом половинного спрямления траектория полета становится более пологой и потребные поперечные перегрузки на всей траектории и в точке встречи (рандеву) значительно меньше (рис. 1).

Если цель низколетящая (угол места цели меньше 3°), то в вертикальной угломестной плоскости ракета наводится на цель методом трех точек в режиме низколетящей цели (НЛЦ), а в горизонтальной плоскости либо методом трех точек, либо методом половинного спрямления.

Метод трех точек в режиме НЛЦ обеспечивает полет ракеты на высоте, исключаяющей воз-

можность «пересечения» ракеты с земной поверхностью и ложного срабатывания взрывателя от отраженных от складок местности сигналов. Методы наведения, например применяемые на ЗРК 9А331 «Тор-М2», позволяют вести стрельбу с хода, что делает данные методы очень простыми для прикрытия автобронетанковых колонн на марше при внезапной атаке с воздуха. При этом они относительно просты в аппаратной реализации, что делает три этих метода одними из самых распространенных, особенно на старых ЗРК.

Метод параллельного сближения применяется, если в течение всего полета ракеты до встречи с целью угол линии визирования «ЗУР — Цель» не меняет своего численного значения (рис. 2).

Достоинством метода является то, что он идеально подходит для перехвата высокоскоростных целей на встречных курсах, где скорость цели может в несколько раз превышать скорость ЗУР. Недостатки метода заключаются в более сложной практической аппаратной реализации. Метод предъявляет высокие требования к вычислению пространственных и скоростных кинематических характеристик цели. Даже небольшая погрешность в их измерении ведет к промаху. Также этот метод требует крайне высоких требований к взрывателю ЗУР. Он должен

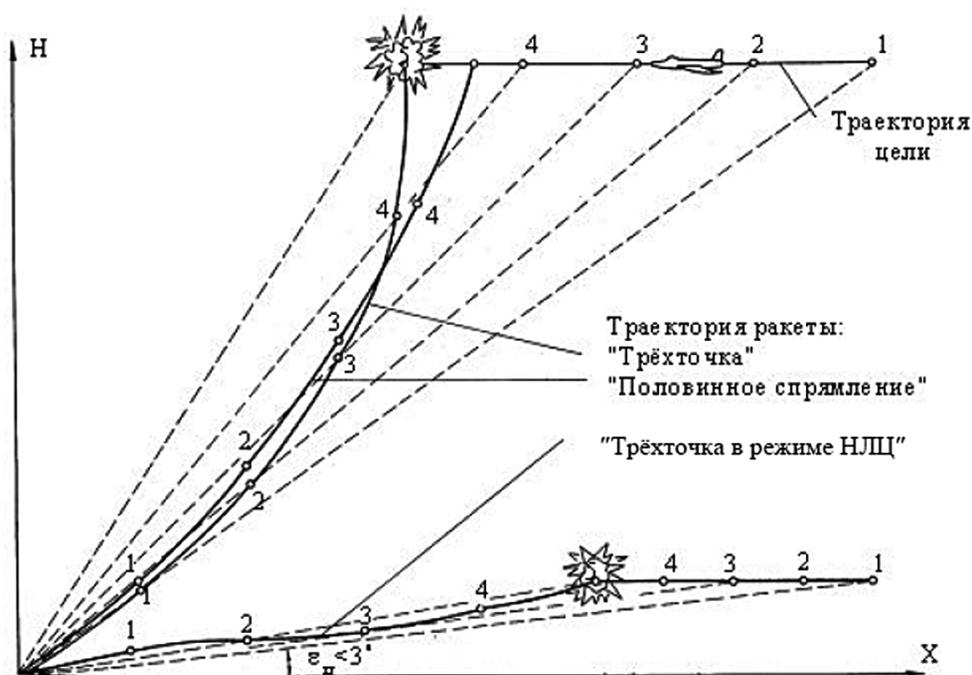


Рис. 1. Траектории полета ЗУР при различных методах наведения

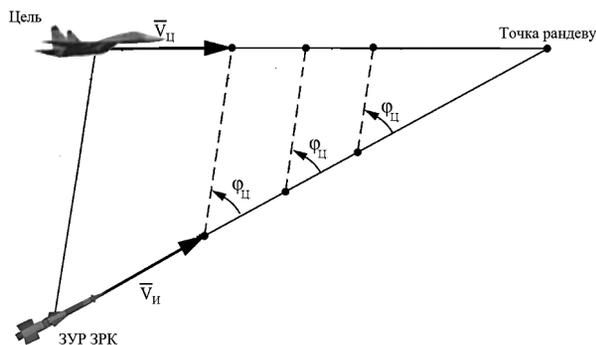


Рис. 2. Метод параллельного сближения

обеспечить подрыв боевой части за максимально короткое время, чтобы создать фронт ударной волны и облако осколков перед летящей целью. Например, в случае перехвата на перпендикулярных курсах критической является погрешность в 0,01 с.

При методе пропорционального сближения в течение всего времени полета ракеты к цели угловая скорость поворота вектора скорости ракеты остается пропорциональной угловой скорости линии визирования «Ракета — Цель» (рис. 3).

Расчет траектории по методу пропорционального сближения:

$$\dot{\theta} = k\dot{\phi},$$

где $\dot{\theta}$ — угловая скорость поворота вектора скорости ракеты; $\dot{\phi}$ — угловая скорость поворота линии визирования «ЗУР — Цель»; k — коэффициент пропорциональности угловых скоростей.

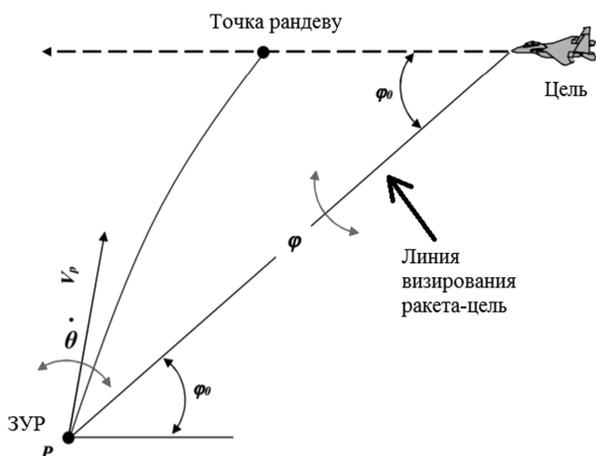


Рис. 3. Метод пропорционального сближения

Для реализации метода пропорционального сближения необходимо в каждый момент времени измерять угловую скорость линии визирования «ЗУР — Цель» и сравнивать ее с угловой скоростью вращения вектора скорости ракеты. Система управления должна содержать два типа измерителей: следящий визир цели и измеритель угловой скорости вращения вектора скорости ЗУР. В качестве последнего могут быть использованы инерциальные измерители угловых положений ЗУР. Метод пропорционального сближения идеально подходит для аппаратной реализации метода параллельного сближения. Именно таким образом он реализован на ЗРК 9К35 «Стрела-10».

Программная реализация методов

Интегрирование дифференциальных уравнений при реализации методов наведения производилось методом Эйлера с шагом интегрирования 0,0001 с. В качестве входных данных программа использует координаты ЗРК, координаты ЗУР (в начале программы равны координатам ЗРК), координаты цели, скорость цели, курс цели, угол тангажа цели.

В начале вычислительного цикла перехвата по методу трех точек и половинного спрямления (рис. 4), исходя из местоположения ЗУР и цели, вычисляется азимут и угол места линии визирования «ЗУР — Цель».

Если в качестве метода наведения был выбран метод половинного спрямления, то исходя из азимутальной и угломестной угловых скоростей линии визирования «ЗРК — Цель», а также исходя из отношения расстояния «ЗУР — Цель» и скорости сближения «ЗУР — Цель», рассчитывается азимутальная и угломестная поправка.

Если для наведения ЗУР был выбран метод трех точек, то линия наведения ЗУР лежит на линии визирования «ЗРК — Цель». Если выбран метод половинного спрямления, то для вычисления азимута и угла места линии наведения ЗУР к азимуту и углу места линии визирования «ЗРК — Цель» добавляется, соответственно, азимутальная и угломестная поправка.

Далее, исходя из азимута и угла места линии прицеливания ЗУР, а также азимута и угла места линии визирования «ЗРК — ЗУР», вычисляются вычитанием азимутальное и угломестное

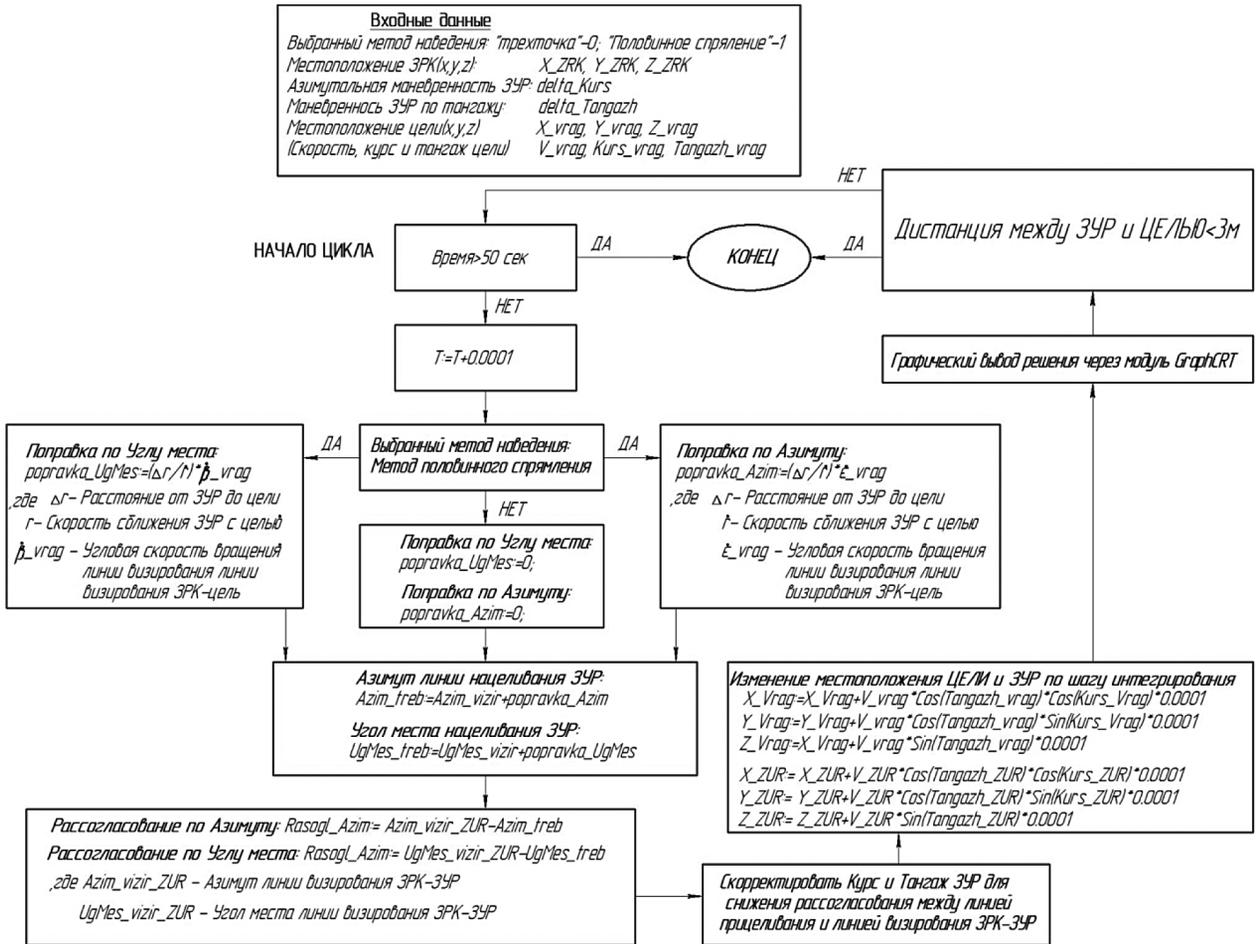


Рис. 4. Блок-схема программной реализации методов трех точек и половинного спрямления

рассогласования. Если азимутальное рассогласование больше нуля, то ЗУР меняет курс в положительную сторону, если меньше нуля — то в отрицательную. Если угломестное рассогласование больше нуля, то ЗУР меняет угол тангажа в положительную сторону, если меньше, то в отрицательную.

Далее через систему уравнений вычисляются новые координаты местоположения цели и ракеты ЗУР:

$$X_vrag = X_vrag + V_vrag \cdot \cos(\text{Tangazh_vrag}) \times \cos(\text{Kurs_vrag}) 0,0001;$$

$$Y_vrag = Y_vrag + V_vrag \cdot \cos(\text{Tangazh_vrag}) \times \sin(\text{Kurs_vrag}) 0,0001;$$

$$Z_vrag = Z_vrag + V_vrag \times \sin(\text{Tangazh_vrag}) 0,0001;$$

$$X_ZUR = X_ZUR + V_ZUR \cos(\text{Tangazh_ZUR}) \times \cos(\text{Kurs_ZUR}) 0,0001;$$

$$Y_ZUR = Y_ZUR + V_ZUR \cos(\text{Tangazh_ZUR}) \times \sin(\text{Kurs_ZUR}) 0,0001;$$

$$Z_ZUR = Z_ZUR + V_ZUR \times \sin(\text{Tangazh_ZUR}) 0,0001,$$

где X_vrag, Y_vrag, Z_vrag — координаты цели (x, y, z) ; $V_vrag, \text{Tangazh_vrag}, \text{Kurs_vrag}$ — скорость, угол тангажа и курс цели соответственно; X_ZUR, Y_ZUR, Z_ZUR — координаты ЗУР (x, y, z) ; $V_ZUR, \text{Tangazh_ZUR}, \text{Kurs_ZUR}$ — скорость, угол тангажа и курс ЗУР соответственно.

Если расстояние между целью и ЗУР сократится до 3 м, цель будет считаться уничтоженной, программа завершает расчет и выходит сообщение о перехвате цели.

Главный принцип метода параллельного сближения основан на том, что нужно при известном векторе скорости и координатах цели, а также при известных координатах ЗУР и численному значению ее скорости найти такой курс и угол тангажа, которые обеспечили бы самое короткое подлетное время до цели в точке встречи (рандеву) (рис. 5). Для этого необходимо вычислить координаты точки встречи. Вычислить их можно, исходя из того, что отношение расстояния от ЗУР до точки встречи и расстояния от цели до точки встречи обратно пропорционально отношению скоростей ЗУР и цели. ЗУР и цель должны долететь до точки встречи за одинаковое время (рис. 6).

Таким образом, время встречи t является корнем уравнения:

$$\begin{aligned} & [(x_1 - x_2) + V_1 \cos \beta_{ц} \cos \varepsilon_{ц} \cdot t]^2 + \\ & + [(y_1 - y_2) + V_1 \cos \beta_{ц} \sin \varepsilon_{ц} \cdot t]^2 + \\ & + [(z_1 - z_2) + V_1 \sin \beta_{ц} \cdot t]^2 - V_2^2 t^2 = 0, \end{aligned}$$

где x_1, y_1, z_1 — координаты цели; $V_1, \beta_{ц}, \varepsilon_{ц}$ — скорость, угол тангажа и курс цели соответственно; x_2, y_2, z_2 — координаты ЗУР; V_2 — скорость ЗУР.

При $t = 0$ осуществляется метод прямого наведения, при котором вектор скорости ЗУР всегда направлен на цель. Корни этого уравнения находятся в области мнимых значений (дискриминант меньше нуля) только в тех случаях, когда ракета летит вдогон и имеет скорость меньшую, чем цель при разгоне.

Через вычисленное общее время полета до точки встречи t вычисляются координаты точки встречи:

$$X_Randezvous = X_vrag + V_vrag \times \cos(\text{Tangazh_vrag}) \cos(\text{Kurs_vrag}) t;$$

$$Y_Randezvous = Y_vrag + V_vrag \times \cos(\text{Tangazh_vrag}) \sin(\text{Kurs_vrag}) t;$$

$$Z_Randezvous = Z_vrag + V_vrag \times \sin(\text{Tangazh_vrag}) t,$$

где X_vrag, Y_vrag, Z_vrag — координаты цели (x, y, z) соответственно; $V_vrag, \text{Tangazh_vrag}, \text{Kurs_vrag}$ — скорость, угол тангажа и курс цели соответственно.

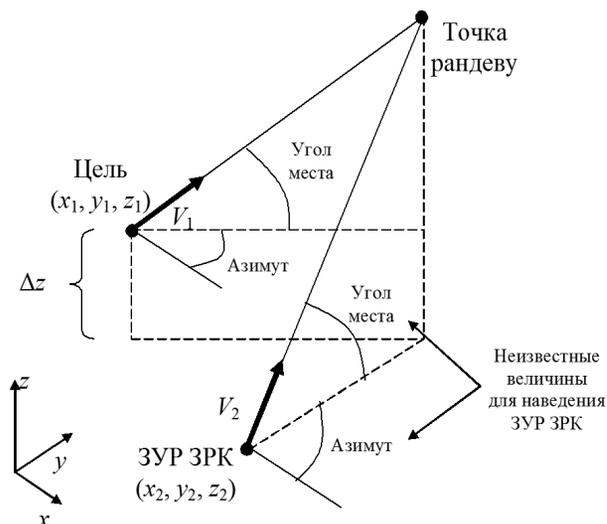


Рис. 5. Нахождение азимута и угла места точки встречи

По найденным координатам можно найти необходимые для наведения ЗУР курс и угол тангажа:

$$\varepsilon_{\text{требуемый}} = \arctg \frac{Y_Randezvous - y_2}{X_Randezvous - x_2};$$

$$\beta_{\text{требуемый}} = \arctg \frac{Z_Randezvous - z_2}{X_Randezvous - x_2}.$$

Далее вычисляется численное значение углового рассогласования вектора скорости и линии визирования ЗУР — точка рандеву. Автопилот ЗУР стремится сократить эти рассогласования в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Управление направлением вектора скорости производится при помощи нормальных аэродинамических ускорений, вызываемых рулями и хвостовым оперением.

Выбор оптимального метода наведения ЗУР ЗРК

Для выбора оптимального метода наведения было проведено имитационное моделирование по перехвату разных целей. Оптимальный метод наведения должен обеспечить следующие требования:

- минимальное время подлета к цели;
- минимальную кривизну траектории на всех участках, а особенно в районе встречи;

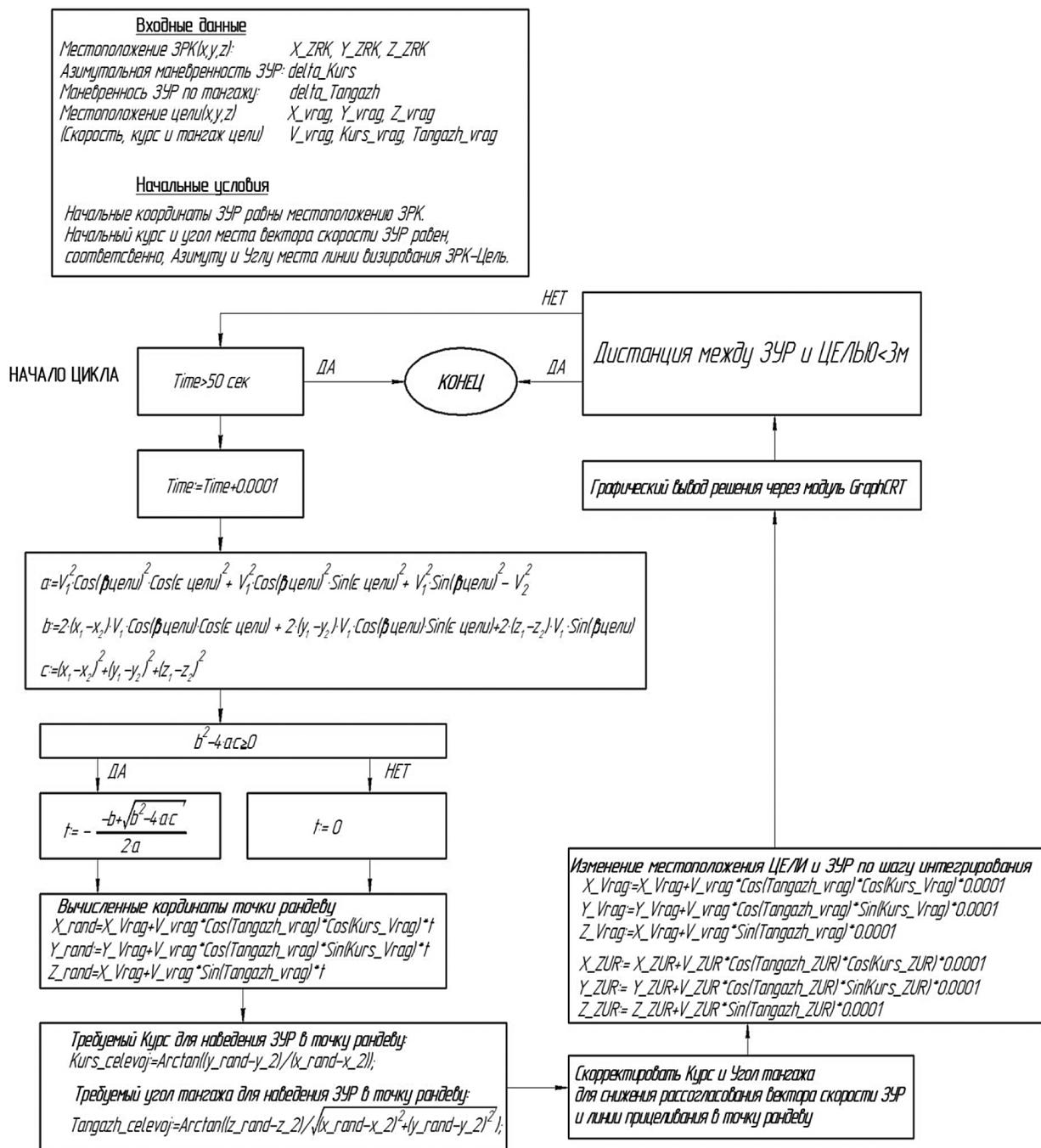


Рис. 6. Блок-схема программной реализации метода параллельного сближения

– надежно осуществлять перехват маневрирующих целей с высокими угловыми скоростями линии визирования «ЗРК — Цель»;

– быть эффективным против целей с более высокими скоростями, чем скорость ЗУР (бой на встречных и перпендикулярных курсах);

– быть простым в аппаратной реализации.

Имитационное моделирование проводилось путем сравнения возможности перехвата целей

с одинаковыми начальными условиями по алгоритмам наведения по разным методам. В качестве цели выступала маневрирующая по курсу цель с высокой угловой скоростью линии визирования «ЗРК — Цель». Критерием эффективности выступало время перехвата цели (рис. 7, 8).

Вторым испытанием для методов наведения была проверка их способности сбивать высокоскоростные цели. На рис. 9, 10 приведены ре-

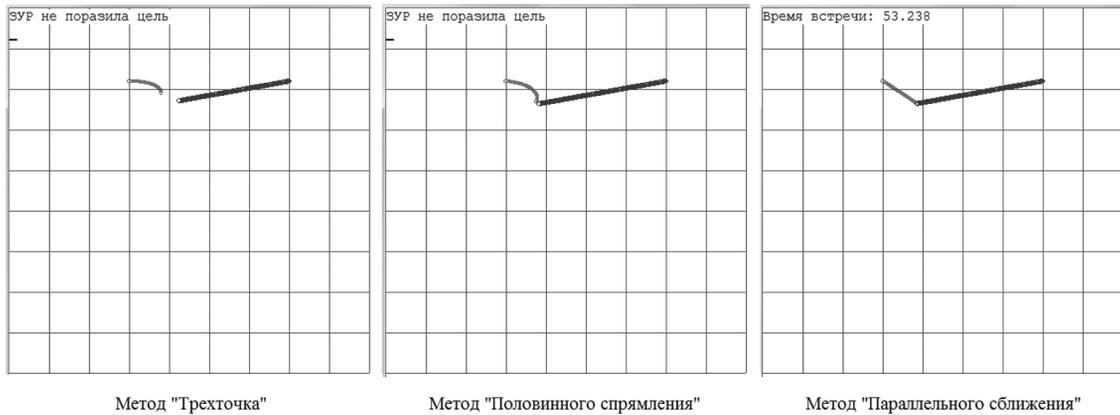


Рис. 7. Задача перехвата маневрирующей цели



Рис. 8. Результаты моделирования



Рис. 9. Задача перехвата высокоскоростной цели на встречных курсах

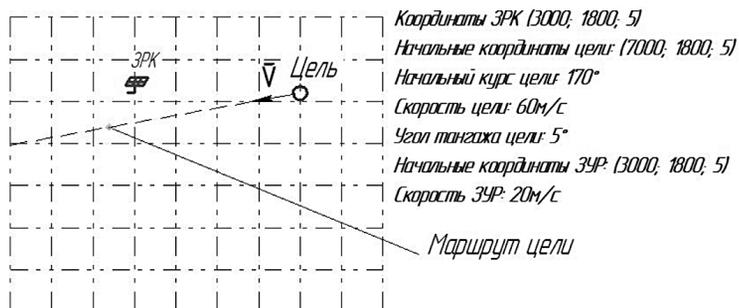


Рис. 10. Результаты моделирования

зультаты перехвата цели, скорость которой в три раза превышает скорость ракеты ЗРК. Здесь так же как и в первой задаче, критерием эффективности выступало время перехвата цели.

Выводы

Моделирование боя ЗУР с маневрирующей целью показало, что хуже всех с задачей перехвата справляется метод трех точек. Более высокую эффективность по времени показал метод половинного спрямления. С небольшим отрывом от него лучший результат показал метод параллельного сближения. Это означает, что для перехвата маневрирующих целей хорошо подходят оба метода.

Моделирование боя ЗУР с высокоскоростной прямолетящей целью показало, что методы трех точек и половинного спрямления вообще не справляются с поставленной задачей. Работа программы прерывалась триггером, когда азимутальная угловая скорость линии визирования «ЗРК — Цель» принимала более высокое численное значение, чем максимально возможная азимутальная угловая скорость линии визирования «ЗРК — ЗУР».

Результаты имитационного моделирования показали, что метод параллельного сближения является идеальным вариантом для стрельбы на упреждение, так как он сочетает в себе минимальное подлетное время до цели и способность перехватывать цели, имеющие скорость, превышающую предельную скорость полета ЗУР в не-

сколько раз. Он также позволяет перехватывать цели с высокой угловой скоростью линии визирования «ЗРК — Цель».

Литература

1. Арапов О.Л., Зуев Ю.С. К вопросу о противоракетном маневре // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. 2015. № 1 (100). С. 34–46.
2. Маркевич В.Э., Легкоступ В.В. Модифицированный метод пропорциональной навигации для перехвата аэробаллистической цели при ограниченном секторе наведения ракеты // Системный анализ и прикладная информатика. 2018. № 4. С. 28–50.
3. Анциферов А.А., Бедрицкий А.И., Богданов А.В. и др. Пути повышения эффективности поражения групповых воздушных целей в противоздушном бою // Журнал СибФУ. Серия: Техника и технологии. 2021. Т. 14. № 7. С. 763–775.
4. Акимов В.Н., Ильичёв В.Н. Аналитическая оценка дальности перехвата цели ЗУР с комбинированными системами управления // Труды ГосНИИАС. Серия: Вопросы авионики. 2007. № 1 (17). С. 18–26.
5. Мизрохи В.Я. Построение алгоритмов управления зенитной ракеты с активной радиолокационной головкой самонаведения при наведении на низколетящие цели на фоне подстилающей морской поверхности // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2015. № 10. С. 15–19.