
УДК 519.271

Обеспечение падения отработавших частей ракеты-носителя в заданные районы при пусках с новых стартовых площадок

В.Н.Арсеньев, А.С. Фадеев, Р.Р.Казаков

Аннотация

Рассматривается задача определения области, в пределах которой должна отделиться от ракеты-носителя отработавшая составная часть для падения в заданный район земной поверхности. Показано существование множества решений данной задачи. Предложен подход, позволяющий найти такую область разделения ракеты-носителя, которая гарантирует падение отделяющейся части в заданный район при минимальном снижении точности выведения космического аппарата на орбиту.

Ключевые слова

ракета-носитель; космический аппарат; отделяющаяся часть; новые стартовые площадки; возмущающие факторы; параметры атмосферы; область разделения; эллипс рассеивания; район падения; точность выведения

Введение

В настоящее время существует противоречие между двумя основными требованиями, предъявляемыми к пускам ракет-носителей (РН). С одной стороны, необходимо обеспечить требуемое качество решения целевой задачи РН – выведение космического аппарата (КА) в заданную область космического пространства, с другой стороны, гарантировать падение отделяющихся от РН частей в заданные районы земной поверхности. Существующие алгоритмы управления РН (они в дальнейшем называются оптимальными) обеспечивают решение этих задач с некоторой вероятностью, поскольку движение РН на активном участке

траектории и пассивное движение ОЧ после ее отделения от РН зависят от большого числа случайных факторов [1], [2], [3].

Возмущения, влияющие на РН при движении на активном участке траектории, приводят к разбросу параметров движения ракеты относительно расчетных значений и, в конечном счете, к разбросу начальных параметров движения отделяемой части (ОЧ) после ее отделения от РН. Область, в пределах которой находятся начальные параметры движения ОЧ, ограничена эллипсоидом. Эта область и эллипсоид также называются оптимальными, поскольку их параметры оцениваются при оптимальных алгоритмах управления. Центр эллипсоида определяется средним значением, а размеры и направления осей - ковариационной матрицей вектора фазовых координат РН в момент отделения ОЧ. От этих характеристик непосредственно зависят расположение и размеры области рассеивания точек падения ОЧ на земной поверхности.

Возмущающие факторы, действующие на ОЧ после отделения от РН (на пассивном участке траектории движения ОЧ), также приводят к изменению характеристик рассеивания точек падения ОЧ. На этом участке полета наиболее существенное влияние на рассеивание оказывают разброс параметров ОЧ относительно номинальных величин, отклонения термодинамических параметров атмосферы от расчетных значений, а также ветровые возмущения [4].

Отмеченное выше противоречие обостряется в связи со строительством новых стартовых площадок на космодроме «Восточный» из-за отсутствия данных о реальных пусках с космодрома. Возрастающие требования по безопасности населения и народно-хозяйственных объектов, экологической безопасности, ограничения политического характера и др. ведут к сокращению числа и уменьшению размеров районов, отводимых для падения отделяющихся от РН частей. В связи с этим для обеспечения гарантированного падения ОЧ в отведенные районы необходимо непосредственно перед пуском РН иметь оперативную информацию о состоянии атмосферы в этих районах. Если прогнозируемые значения координат точек падения ОЧ, полученные, например, с помощью имитационного моделирования, выходят за пределы районов падения, то необходимо принимать решение о пуске РН.

Существуют две альтернативы: перенести время пуска РН или произвести пуск с риском падения ОЧ за пределами отведенных районов. Оба решения сопровождаются в лучшем случае финансовыми потерями, а в худшем – гибелью населения, животных, политическими осложнениями и пр. В то же время высокий уровень развития вычислительной техники, методов и средств зондирования параметров атмосферы, теории автоматического управления и математического моделирования позволяют по-новому подойти к решению рассматриваемой задачи.

При ветровых возмущениях и отклонениях параметров атмосферы от расчетных значений область рассеивания точек падения ОЧ может не полностью, а лишь частично принадлежать заданному району. В этом случае обеспечить попадание ОЧ в отведенное место земной поверхности можно путем коррекции алгоритма управления РН непосредственно перед стартом. Для проведения коррекции первоначально необходимо определить область, в пределах которой должно произойти отделение ОЧ от РН.

Существует бесконечное множество областей, принадлежность к которым начальных параметров движения ОЧ гарантирует ее падение в заданном районе. Выбор той или иной области разделения влияет на качество решения целевой задачи РН - выведение КА на заданную орбиту. Минимального ухудшения качества можно добиться путем максимального приближения области, в которой должно произойти разделение, к оптимальной. Тогда, во-первых, траектория движения РН на активном участке будет незначительно отличаться от оптимальной, что потребует минимальной коррекции алгоритма управления РН. Во-вторых, начальные условия движения ОЧ обеспечат ее падение в заданный район.

Постановка задачи

Полагается, что имеется линейная модель связи отклонений координат точек падения ОЧ на земной поверхности от центра рассеивания с возмущениями, действующими на ОЧ при отделении от РН и в процессе пассивного полета,

$$\Delta \hat{\mathbf{R}} = \mathbf{A}_x \Delta \hat{\mathbf{X}}_0 + \mathbf{A}_c \hat{\Delta} \mathbf{c} + \mathbf{A}_p \hat{\delta} \mathbf{p} + \mathbf{A}_u \hat{\mathbf{u}} + \mathbf{A}_v \hat{\mathbf{v}}, \quad (1)$$

где $\Delta \hat{\mathbf{R}} = \begin{bmatrix} \Delta \hat{l} & \Delta \hat{b} \end{bmatrix}^T$ - двумерный вектор отклонений координат точек падения ОЧ от центра некоторой системы координат ЛЦВ, совпадающего с центром рассеивания (см. рисунки 1, 2); $\Delta \hat{\mathbf{X}}_0 \in \Lambda_0$ - вектор случайных отклонений параметров движения РН от номинальных (расчетных) значений в момент отделения ОЧ; $\hat{\Delta} \mathbf{c}$ - случайный вектор, элементами которого являются отклонения веса и коэффициента аэродинамического сопротивления ОЧ от расчетных значений; $\hat{\delta} \mathbf{p}$ - случайный вектор, характеризующий

вертикальный профиль относительного отклонения давления от стандартного (его размерность совпадает с числом узловых значений высоты в модели атмосферы); $\hat{\bar{u}}$ и $\hat{\bar{v}}$ - случайные векторы, описывающие вертикальные профили зональной и меридиональной составляющих скорости ветра (их размерности также равны числу узловых значений высоты); A_x, A_c, A_p, A_u, A_v - матрицы коэффициентов.

Параметры модели (1) - матрицы A_x, A_c, A_p, A_u, A_v - могут определяться по-разному. В частности, можно использовать подход, основанный на статистической линеаризации векторных многомерных нелинейностей [5].

Отклонения параметров движения РН от номинальных значений в момент отделения ОЧ связаны с работой системы управления (СУ) РН на активном участке траектории и обусловлены, в основном, погрешностями СУ. Оценки вероятностных характеристик вектора $\hat{\Delta\bar{X}}_0$ - математического ожидания $M_{\Delta\bar{X}_0}$ и ковариационной матрицы $K_{\Delta\bar{X}_0}$ - известны.

При нормальном законе распределения вектора $\hat{\Delta\bar{X}}_0$ область разброса начальных значений параметров движения ОЧ Λ_0 описывается эллипсоидом, размеры и положение которого полностью определяются величинами $M_{\Delta\bar{X}_0}$ и $K_{\Delta\bar{X}_0}$.

Оценки математических ожиданий и ковариационных матриц векторов $\hat{\Delta c}, \hat{\delta p}, \hat{\bar{u}}, \hat{\bar{v}}$ - $M_{\Delta c}, K_{\Delta c}, M_{\delta p}, K_{\delta p}, M_{\bar{u}}, K_{\bar{u}}, M_{\bar{v}}, K_{\bar{v}}$ также полагаются известными.

При стандартных параметрах атмосферы, которые использовались при построении модели (1), движение ОЧ, начавшееся в пределах области Λ_0 , завершится внутри отведенного района падения, причем центр области рассеивания точек падения совпадет с началом координат - точкой Ц.

При отклонениях параметров атмосферы от стандартных значений и (или) ветре центр эллипса рассеивания смещается относительно точки Ц и размеры его также могут измениться. Если имеется информация о состоянии атмосферы в районе падения ОЧ, полученная по результатам ее зондирования перед пуском РН и представленная оценками $\tilde{M}_{\delta p}, \tilde{K}_{\delta p}, \tilde{M}_{\bar{u}}, \tilde{K}_{\bar{u}}, \tilde{M}_{\bar{v}}, \tilde{K}_{\bar{v}}$ параметров атмосферы и ветра, то соответствующие этим

данным оценки $\tilde{M}_{\Delta \hat{R}}$ и $\tilde{K}_{\Delta \hat{R}}$ характеристик области рассеивания точек падения Ω_0 в соответствии с моделью (1) определяются по формулам

$$\tilde{M}_{\Delta \hat{R}} = \mathbf{A}_x M_{\Delta \hat{X}_0} + \mathbf{A}_c M_{\Delta c} + \mathbf{A}_p \tilde{M}_{\Delta p} + \mathbf{A}_u \tilde{M}_{\Delta u} + \mathbf{A}_v \tilde{M}_{\Delta v}; \quad (2)$$

$$\tilde{K}_{\Delta \hat{R}} = \mathbf{A}_x K_{\Delta \hat{X}_0} \mathbf{A}_x^T + \mathbf{A}_c K_{\Delta c} \mathbf{A}_c^T + \mathbf{A}_p \tilde{K}_{\Delta p} \mathbf{A}_p^T + \mathbf{A}_u \tilde{K}_{\Delta u} \mathbf{A}_u^T + \mathbf{A}_v \tilde{K}_{\Delta v} \mathbf{A}_v^T \quad (3)$$

Пусть область Ω_0 и район, отведенный для падения ОЧ, располагаются друг относительно друга, как показано на рисунках 1 и 2.

Обеспечить падение ОЧ в отведенном районе земной поверхности при реальных характеристиках атмосферных возмущений можно, как уже отмечалось, только путем изменения ее начальных условий движения. При изменении параметров эллипсоида, характеризующего начальные условия, положение и размеры эллипса рассеивания точек падения ОЧ также будут изменяться. В частности, можно найти такие характеристики начальных параметров движения ОЧ, которые обеспечат перемещение области рассеивания точек падения внутрь отведенного района земной поверхности.

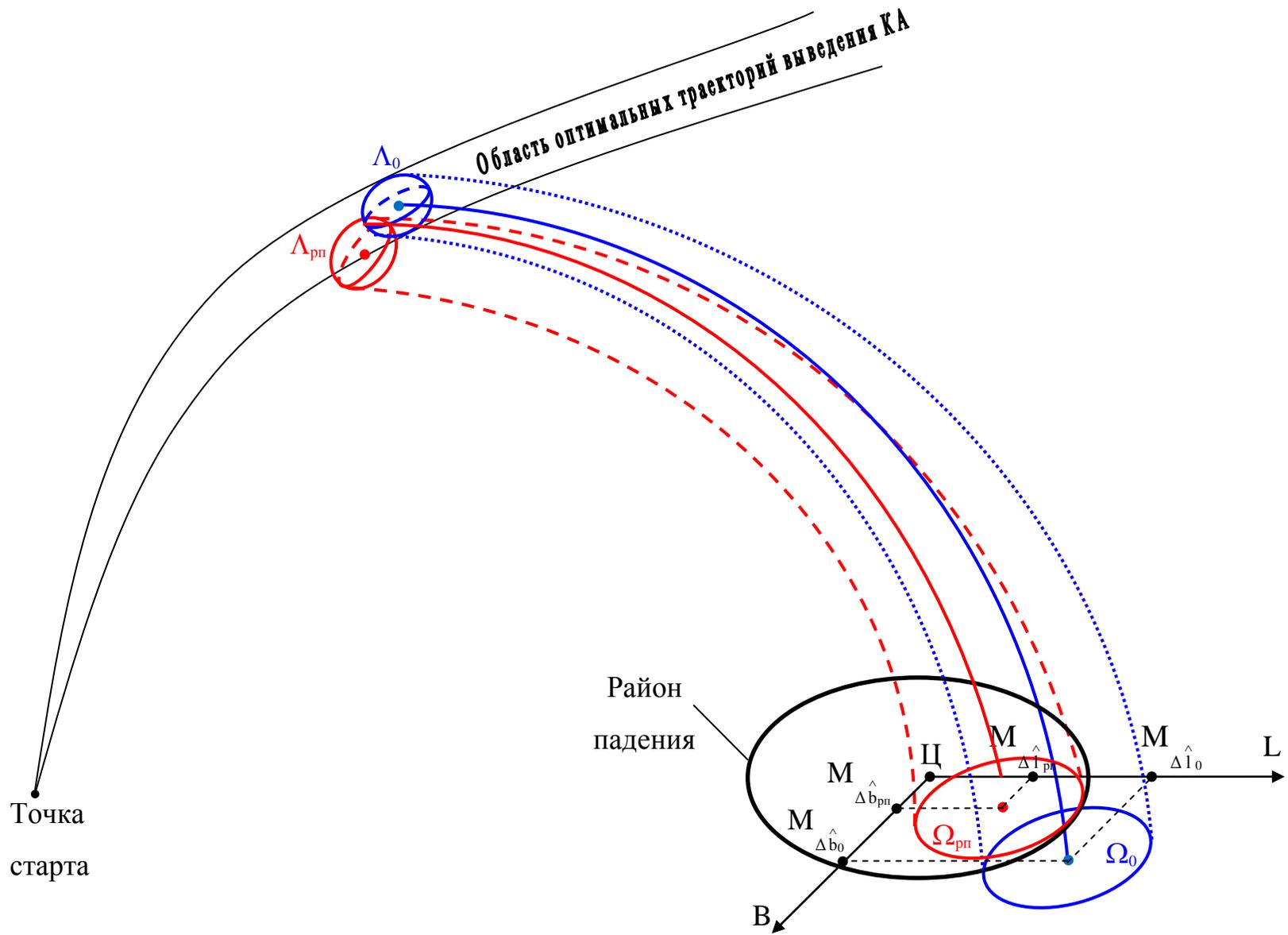


Рисунок 1 – Определение области разброса начальных параметров движения ОЧ

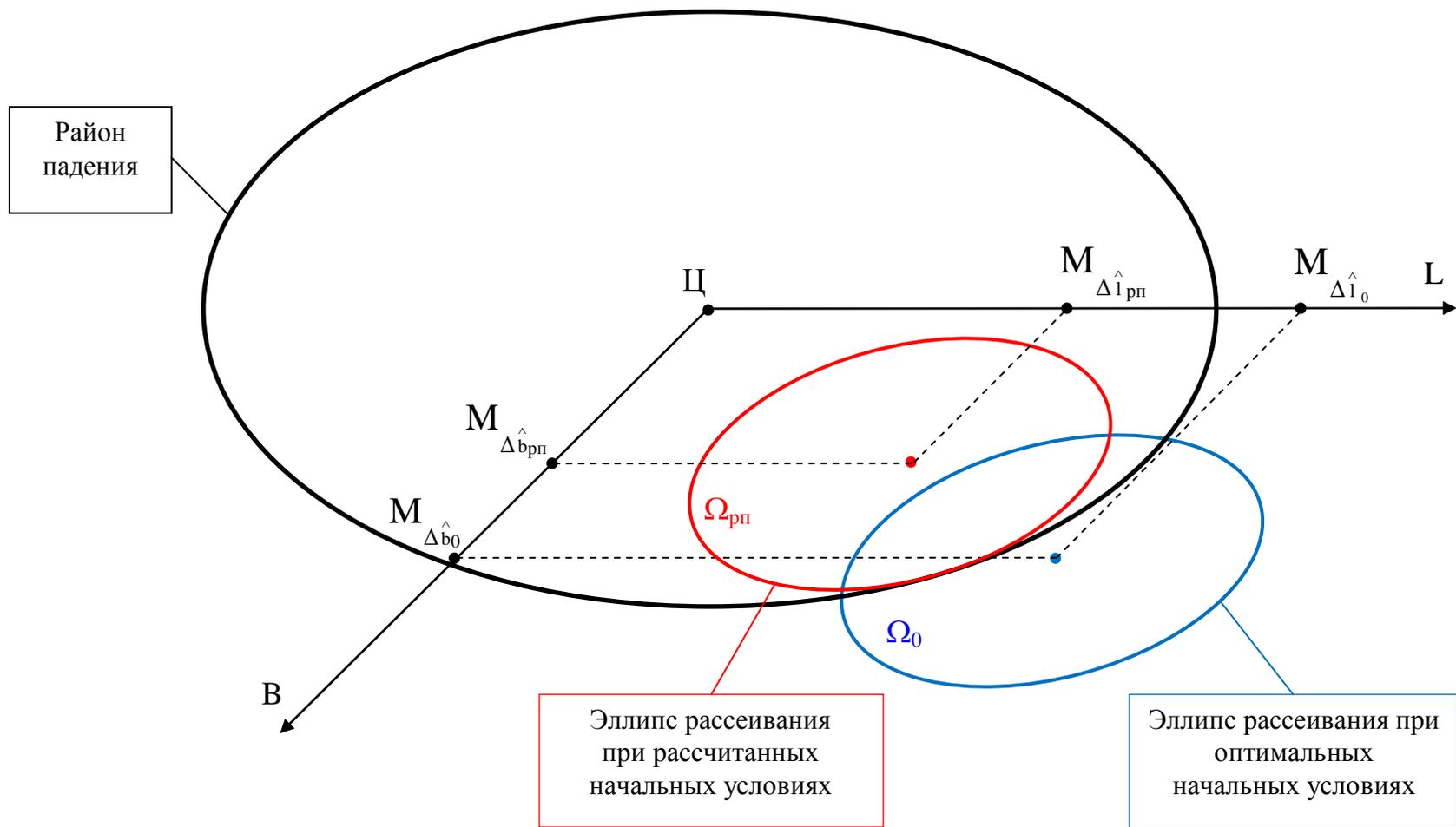


Рисунок 2 – Эллипсы рассеивания при оптимальных и скорректированных начальных условиях

При этом необходимо, чтобы эллипс, ограничивающий область рассеивания, лежал внутри и, как минимум, касался границы района падения. На рисунках 1 и 2 полученная таким образом область обозначена $\Omega_{\text{рп}}$. Ее центр и размеры характеризуются параметрами $M_{\Delta \hat{R}_{\text{рп}}}$, $K_{\Delta \hat{R}_{\text{рп}}}$.

Область начальных параметров движения ОЧ, обеспечивающая ее падение в пределах области $\Omega_{\text{рп}}$ с учетом реального состояния погодных условий, обозначена $\Lambda_{\text{рп}}$. Полагается, что $\Lambda_{\text{рп}}$ так же, как Λ_0 описывается эллипсоидом, размеры и положение которого в пространстве определяются математическим ожиданием $M_{\Delta \hat{X}_{\text{рп}}}$ и ковариационной матрицей $K_{\Delta \hat{X}_{\text{рп}}}$.

Найти параметры $M_{\Delta \hat{X}_{\text{рп}}}$ и $K_{\Delta \hat{X}_{\text{рп}}}$ области $\Lambda_{\text{рп}}$ можно на основе уравнений, аналогичных (2) и (3), путем решения обратной задачи, которая в математической постановке близка к известной задаче расчета допусков [6]-[9]. Поскольку размерность вектора $\Delta \hat{X}_0$, характеризующего отклонения начальных параметров движения ОЧ от расчетных, больше размерности вектора рассеивания координат точек падения ОЧ $\Delta \hat{R}$, то существует множество решений данной задачи. Для получения однозначного решения предлагается следующий подход к определению области $\Lambda_{\text{рп}}$, в пределах которой должно произойти отделение ОЧ от РН.

Определение области разброса начальных параметров движения ОЧ

Исходными данными для решения этой задачи являются характеристики ОЧ $M_{\Delta c}$, $K_{\Delta c}$, оценки параметров атмосферы и ветра $\tilde{M}_{\delta p}$, $\tilde{K}_{\delta p}$, $\tilde{M}_{\tilde{u}}$, $\tilde{K}_{\tilde{u}}$, $\tilde{M}_{\tilde{v}}$, $\tilde{K}_{\tilde{v}}$, полученные по результатам зондирования атмосферы перед пуском РН, характеристики $M_{\Delta \hat{X}_0}$, $K_{\Delta \hat{X}_0}$ оптимальной области разброса начальных параметров движения ОЧ Λ_0 , обусловленной работой СУ РН на активном участке траектории, а также параметры

$\mathbf{M}_{\Delta \hat{\mathbf{R}}_{\text{pp}}}$, $\mathbf{K}_{\Delta \hat{\mathbf{R}}_{\text{pp}}}$, характеризующие район земной поверхности Ω_{pp} , в который должна упасть ОЧ.

Предлагается в качестве параметров, определяющих область Λ_{pp} , взять значения $\mathbf{M}_{\Delta \hat{\mathbf{X}}_{\text{pp}}}$ и $\mathbf{K}_{\Delta \hat{\mathbf{X}}_{\text{pp}}}$, которые с одной стороны, удовлетворяют уравнениям (2), (3), а с другой, обеспечивают максимальную ее близость к оптимальной области разброса начальных параметров движения ОЧ Λ_0 . Удовлетворение первого из этих требований обеспечивает падение ОЧ в заданный район Ω_{pp} , а второго – гарантирует незначительное ухудшение качества решения целевой задачи.

Поскольку область Λ_{pp} характеризуется вектором $\mathbf{M}_{\Delta \hat{\mathbf{X}}_{\text{pp}}}$ и матрицей $\mathbf{K}_{\Delta \hat{\mathbf{X}}_{\text{pp}}}$, а область Λ_0 - вектором $\mathbf{M}_{\Delta \hat{\mathbf{X}}_0}$ и матрицей $\mathbf{K}_{\Delta \hat{\mathbf{X}}_0}$, то в качестве параметра $\mathbf{M}_{\Delta \hat{\mathbf{X}}_{\text{pp}}}$ следует взять

$$\mathbf{M}_{\Delta \hat{\mathbf{X}}_{\text{pp}}} = \arg \min_{\mathbf{M}_{\Delta \hat{\mathbf{X}}}} \left(\mathbf{M}_{\Delta \hat{\mathbf{X}}} - \mathbf{M}_{\Delta \hat{\mathbf{X}}_0} \right)^T W_M \left(\mathbf{M}_{\Delta \hat{\mathbf{X}}} - \mathbf{M}_{\Delta \hat{\mathbf{X}}_0} \right) \quad (4)$$

при условии

$$\mathbf{A}_x \mathbf{M}_{\Delta \hat{\mathbf{X}}_{\text{pp}}} + \mathbf{A}_c M_{\Delta \hat{c}} + \mathbf{A}_p \tilde{M}_{\Delta \hat{p}} + \mathbf{A}_u \tilde{M}_{\Delta \hat{u}} + \mathbf{A}_v \tilde{M}_{\Delta \hat{v}} = \mathbf{M}_{\Delta \hat{\mathbf{X}}_{\text{pp}}}, \quad (5)$$

где W_M - симметричная матрица весовых коэффициентов, позволяющая изменять вес слагаемых в квадратичной форме в формуле (4). В частном случае она может быть единичной.

Аналогично, в качестве матрицы $\mathbf{K}_{\Delta \hat{\mathbf{X}}_{\text{pp}}}$ берется

$$\mathbf{K}_{\Delta \hat{\mathbf{X}}_{\text{pp}}} = \arg \min_{\mathbf{K}_{\Delta \hat{\mathbf{X}}}} \text{tr} \left[\left(\mathbf{K}_{\Delta \hat{\mathbf{X}}} - \mathbf{K}_{\Delta \hat{\mathbf{X}}_0} \right)^T \left(\mathbf{K}_{\Delta \hat{\mathbf{X}}} - \mathbf{K}_{\Delta \hat{\mathbf{X}}_0} \right) \right] \quad (6)$$

при условии

$$\mathbf{A}_x \mathbf{K}_{\Delta \hat{\mathbf{X}}_{\text{pn}}} \mathbf{A}_x^T + \mathbf{A}_c \mathbf{K}_{\Delta \hat{\mathbf{c}}} \mathbf{A}_c^T + \mathbf{A}_p \tilde{\mathbf{K}}_{\Delta \hat{\delta p}} \mathbf{A}_p^T + \mathbf{A}_u \tilde{\mathbf{K}}_{\Delta \hat{\mathbf{u}}} \mathbf{A}_u^T + \mathbf{A}_v \tilde{\mathbf{K}}_{\Delta \hat{\mathbf{v}}} \mathbf{A}_v^T = \mathbf{K}_{\Delta \hat{\mathbf{R}}_{\text{pn}}}, \quad (7)$$

где $\text{tr}[\cdot]$ - обозначает функцию определения следа матрицы.

Решения этих задач, полученные методом неопределенных множителей Лагранжа [10], имеют вид

$$\mathbf{M}_{\Delta \hat{\mathbf{X}}_{\text{pn}}} = \mathbf{M}_{\Delta \hat{\mathbf{X}}_0} - W_M^{-1} \mathbf{A}_x^T (\mathbf{A}_x W_M^{-1} \mathbf{A}_x^T)^{-1} \left(\mathbf{A}_x \mathbf{M}_{\Delta \hat{\mathbf{X}}_0} + \mathbf{A}_c \mathbf{M}_{\Delta \hat{\mathbf{c}}} + \mathbf{A}_p \tilde{\mathbf{M}}_{\Delta \hat{\delta p}} + \mathbf{A}_u \tilde{\mathbf{M}}_{\Delta \hat{\mathbf{u}}} + \mathbf{A}_v \tilde{\mathbf{M}}_{\Delta \hat{\mathbf{v}}} - \mathbf{M}_{\Delta \hat{\mathbf{R}}_{\text{pn}}} \right) \quad (8)$$

$$\mathbf{K}_{\Delta \hat{\mathbf{X}}_{\text{pn}}} = \mathbf{K}_{\Delta \hat{\mathbf{X}}_0} - \mathbf{A}_x^T (\mathbf{A}_x \mathbf{A}_x^T)^{-1} \left(\mathbf{A}_x \mathbf{K}_{\Delta \hat{\mathbf{X}}_0} \mathbf{A}_x^T + \mathbf{A}_c \mathbf{K}_{\Delta \hat{\mathbf{c}}} \mathbf{A}_c^T + \mathbf{A}_p \tilde{\mathbf{K}}_{\Delta \hat{\delta p}} \mathbf{A}_p^T + \mathbf{A}_u \tilde{\mathbf{K}}_{\Delta \hat{\mathbf{u}}} \mathbf{A}_u^T + \mathbf{A}_v \tilde{\mathbf{K}}_{\Delta \hat{\mathbf{v}}} \mathbf{A}_v^T - \mathbf{K}_{\Delta \hat{\mathbf{R}}_{\text{pn}}} \right) (\mathbf{A}_x \mathbf{A}_x^T)^{-1} \mathbf{A}_x \quad (9)$$

Правильность полученных решений несложно проверить путем подстановки величин (8), (9) в уравнения (5) и (7) соответственно.

Заключение

Изменения параметров атмосферы и ветра в районе падения могут привести к смещению точек падения ОЧ за пределы отведенного района земной поверхности. Обеспечить падение ОЧ в заданный район можно путем коррекции ее начальных параметров движения. Предложенный выше подход позволил найти такую область отделения ОЧ от РН, которая максимально приближена к оптимальной и, как следствие, обеспечивает незначительное снижение качества решения целевой задачи РН – выведение КА на заданную траекторию. С другой стороны, пассивное движение ОЧ, начавшееся в пределах найденной области, гарантирует ее падение в заданный район.

Список использованных источников

1. Лебедев А.А., Герасюта Н.Ф. Баллистика ракет. – М.: Машиностроение, 1970. – 244 с.
2. Сихарулидзе Ю. Г. Баллистика летательных аппаратов. -М.: Наука, 1982. - 352

с.

3. Эльясберг П.Е. Определение движения по результатам измерений. - М.: Наука. 1976. - 415 с.
4. Школьный Е.П., Майборода Л.А. Атмосфера и управление движением летательных аппаратов. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 308 с.
5. Арсеньев В.Н. Методика обоснования требований к характеристикам разброса параметров системы управления летательного аппарата. – СПб.: ВИКУ им. А.Ф.Можайского, 2002. – 68 с.
6. Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М. Чувствительность систем управления. - М.: Наука, 1981. - 464 с.
7. Городецкий В.И., Захарин Ф.М., Пономарев В.М., Юсупов Р.М. Прямые и обратные задачи теории чувствительности // Изв.АН СССР.- Техн. кибернетика.- 1971. - № 5.
8. Абрамов О.В., Здор В.В., Супоня А.А. Допуски и номиналы систем управления. - М.: Наука, 1976.
9. Гехер К. Теория чувствительности и допусков электрических цепей. - М.: Сов.радио, 1973.
10. Бахвалов Н.С. Численные методы: часть 1.-М.: Наука, 1973. – 632 с.

Сведения об авторах

Арсеньев Владимир Николаевич, профессор кафедры «Автоматика и электроника» Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, д.т.н., профессор; ул. Гаврская, д.15, кв.147, г. С.-Петербург, 194017

тел. +7 (911) 262-02-22; e-mail: vladar56@mail.ru.

Фадеев Александр Сергеевич, генеральный директор ФГУП «Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры», к.т.н.;

ул. Щепкина, 42; г. Москва, 107996;

тел.: +7 (495) 631-82-89; e-mail: tsenki@roscosmos.ru.

Казаков Рафаэль Рамисович, аспирант кафедры «Автоматика и электроника» Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского; ул. Белоостровская, д.35, кв.29, г. С.-Петербург, 197342.

