

УДК: 531.55, 629.7

DOI: 10.53816/20753608_2022_2_44

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛУЧАЙНЫХ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ
В ЗАДАЧАХ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ БОЕВОГО ПРИМЕНЕНИЯ
АВИАЦИОННЫХ СРЕДСТВ ПОРАЖЕНИЯ**

**INCREASE IN AIRCRAFT UNGUIDED WEAPON ACCURACY AS THE RESULT
OF AIRBORNE COMPUTER BALLISTIC ALGORITHMS
AIR-LAUNCHED WEAPONS**

Чл.-корр. РАРАН А.Б. Бельский, А.Г. Постников

АО «Национальный центр вертолетостроения им. М.Л. Миля и Н.И. Камова»

A.B. Belsky, A.G. Postnikov

В задачах, связанных с баллистическим обеспечением применения неуправляемых авиационных средств поражения (НАСП), важное место занимает проблема прогнозирования состояния атмосферы во времени и в пространстве. В статье представлен математический аппарат для стохастического моделирования распределения по времени, дальности и высоте метеорологических величин, используемых в задачах баллистического обеспечения применения авиационных средств поражения (АСП) с боевых авиационных комплексов (самолеты штурмовой и истребительной авиации, вертолеты армейской авиации). Данное предложение позволяет строить экономичные, в вычислительном плане, программные модули для моделирующих систем.

Ключевые слова: авиационный комплекс, авиационные средства поражения, летные испытания, баллистическое обеспечение, моделирование, атмосфера, стохастическое распределение.

The problem of forecasting the state of the atmosphere in time and space occupies an important place in the tasks related to the ballistic support of the use of unguided aviation weapons of destruction. The article presents mathematical tools for stochastic modeling of the distribution of meteorological quantities in time, range and altitude used in the tasks of ballistic support for the use of aviation weapons from combat aviation complexes (assault and fighter aircraft, army aviation helicopters). This proposal makes it possible to build computationally economical software modules for modeling systems.

Keywords: aviation suite, aircraft armament, flight trial, ballistic support, simulation, atmosphere, stochastic allocation.

Для повышения эффективности применения неуправляемых авиационных средств поражения в различных метеоусловиях эксплуатации боевых авиационных комплексов (АК), помимо параметров от бортовых датчиков систем объективного контроля, характеризующих процесс полета, данных от бортового радиоэлектронного оборудования АК и данных о типе АСП, необхо-

дима также максимально полная (достоверная) объективная информация о параметрах внешней среды (атмосферы), что позволит более точно рассчитывать траектории НАСП в процессе планирования, включая решение задач прицеливания и боевого применения АСП, также обработки результатов пусков АСП по программам летных испытаний АК. Роль достоверного прогноза

состояния атмосферы возрастает при применении неуправляемых авиационных ракет (НАР), обладающих более высокой дальностью применения по сравнению с другими видами НАСП (авиационными бомбами и снарядами стрелково-пушечного оружия), а особенно — при применении НАР с кабрирования. Это связано со значительной протяжённостью траектории НАР и нарастающим влиянием погрешностей в исходных данных на результаты расчетов. Задача программно-аппаратного учета и прогнозирования состояния атмосферы, при применении НАР и реализации с учетом требуемых вычислительных ресурсов, является актуальной [11–15].

Для решения баллистических задач с учётом прогноза состояния атмосферы в условиях ее постоянной изменчивости в настоящее время используются достаточно сложные математические модели, основанные или на численном моделировании атмосферных процессов [6] или на добротных статистических данных [2]. Такие подходы важны, например, для обеспечения задачи прицеливания, где нужно каким-то образом рассчитать наиболее вероятные значения основных метеорологических величин (МВ) вдоль предполагаемой траектории АСП. В то же время для решения ряда прикладных задач в интересах разработки комплексов авиационного вооружения, например таких, как имитационное моделирование боевого применения, баллистические испытания средств поражения, нет необходимости в достоверном прогнозе состояния атмосферы — необходимо и достаточно располагать некоторой стохастической выборкой возможных реализаций пространственно-временного распределения параметров атмосферы. В настоящей работе изложен подход к разработке упрощенной стохастической модели состояния атмосферы для получения её максимально полных вероятностных характеристик в задачах баллистического обеспечения применения НАСП с боевыми АК [7, 8].

Для учета атмосферных факторов в задачах баллистического обеспечения применения АСП будем рассматривать следующие основные метеорологические величины [1, 5]: давление воздуха p ; меридиональную и зональную составляющие U_x , U_z вектора скорости ветра; абсолютную температуру воздуха T .

Значения плотности воздуха и скорости звука могут быть определены по полученным

реализациям T и p в соответствии с формулами газовой динамики.

Будем также считать, что в силу действия целого комплекса атмосферных факторов значение некоторой МВ- μ в данной точке пространства и в данный момент времени принимает случайное значение, следовательно, можно будет рассчитывать случайное поле $\mu(x, y, z, t)$ координат точки пространства и времени.

Исходя из существенно различного характера изменения МВ в вертикальном и горизонтальном направлениях, можно выделить следующие две основные задачи моделирования изменчивости атмосферы:

- моделирование реализации вертикального разреза параметра по ее известному значению на некоторой исходной высоте — задача первого рода, которая реально возникает при оценке точности решения баллистической задачи бортовым вычислителем АК, в условиях наличия данных о МВ только на высоте полета. Такие текущие данные всегда имеются в системе воздушных сигналов АК;

- моделирование реализации вертикального разреза МВ спустя заданное время и на заданном расстоянии от места, где получен вертикальный разрез МВ, — задача второго рода, которая возникает при оценке точности идентификации баллистических моделей, когда измерения МВ проведены с некоторым интервалом по времени проведения летных испытаний и на некотором удалении от места проведения испытаний.

Анализируя различные обработанные данные метеонаблюдений, можно констатировать, что вертикальные разрезы параметров атмосферы определяются их вероятностными характеристиками на нескольких узловых уровнях h_i , $i = 0, 1, \dots, n$ [5]. При этом вариации параметров относительно средних значений на различных узловых уровнях не являются независимыми, а связаны более или менее сильной корреляционной зависимостью. Количество узловых уровней и их высоты зависят от региона, времени года, вида моделируемого МВ и некоторых других факторов. Корреляционные связи между остальными уровнями являются незначительными, что дает основание соответствующие коэффициенты корреляции принимать равными нулю. Так, для скорости ветра главными

узловыми являются уровни h_1 и h_3 (рис. 1), а для температуры и давления в качестве главных — уровни h_1 , h_2 и h_3 .

Рассмотрим сначала решение основных задач моделирования изменчивости независимых параметров U_x , U_z и T .

Решение задачи первого ряда.

Обозначим $\bar{\mu}_i$ — математическое ожидание, σ_i^μ — СКО некоторого параметра μ на уровне h_i , $(k_{ij}^\mu)_h = M[\Delta\mu_i \Delta\mu_j]$ — коэффициент высотной корреляции случайных вариаций $\Delta\mu = \mu - \bar{\mu}$ на уровнях h_i , h_j .

Поскольку для всех параметров уровень h_1 не имеет главного уровня, вариация $\Delta\mu_1$ может рассматриваться как независимая случайная величина:

$$\Delta\mu_1 = \sigma_1^\mu \beta, \quad (1)$$

где β — стандартное нормальное случайное число с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией.

Вариации $\Delta\mu_j$ для всех остальных уровней h_j , $j \neq 1$, рассчитываются затем последовательно по линейной регрессии:

$$\Delta\mu_j = (k_{jm}^\mu)_h \frac{\sigma_j^\mu}{\sigma_m^\mu} \Delta\mu_m + \sigma_j^\mu \beta_j \sqrt{1 - (k_{jm}^\mu)_h^2}, \quad (2)$$

где m — номер уровня, главного для j -го.

Тем самым формулы (1) и (2) дают общее решение задачи первого рода.

Решение задачи второго рода.

Рассмотрим решение этой задачи моделирования на примере случая, когда требуется определить вертикальный разрез параметра μ на рас-

стоянии L от места с известным разрезом этого параметра $\hat{\mu}_j$, $j = 0, 1, \dots, n$ (рис. 2).

Пространственную изменчивость рассматриваемого параметра характеризует коэффициент корреляции $(k_j^\mu)_L = k_j^\mu(L)$ вариаций для заданного и искомого профилей. Реализация вариаций этого параметра на 1-м узловом уровне определяется аналогично (2) по формуле

$$\Delta\mu_1 = (k_1^\mu)_L \Delta\hat{\mu}_1 + \sigma_1^\mu \beta_1 \sqrt{1 - (k_1^\mu)_L^2}. \quad (3)$$

Далее вариации на уровнях h_j , $j > 1$, последовательно определяются в соответствии с уравнением множественной линейной регрессии:

$$\begin{aligned} \Delta\mu_j = & \frac{(k_j^\mu)_L - (k_{jm}^\mu)_h^2}{1 - (k_{jm}^\mu)_h^2} \Delta\mu_j + \\ & + \frac{\sigma_j^\mu (k_{jm}^\mu)_h [1 - (k_j^\mu)_L]}{\sigma_m^\mu (1 - (k_{jm}^\mu)_h^2)} \Delta\mu_m + \\ & + \sigma_j^\mu \beta_j \sqrt{\frac{1 + 2(k_j^\mu)_L (k_{jm}^\mu)_h^2 - (k_j^\mu)_L^2 - 2(k_{jm}^\mu)_h^2}{1 - (k_{jm}^\mu)_h^2}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где m — номер уровня, главного для j -го.

Если искомый профиль отстоит от заданного на интервал времени τ , то его расчет выполняется также по формулам (3), (4), где вместо $(k_j^\mu)_L$ следует брать коэффициент корреляции $(k_j^\mu)_\tau = k_j^\mu(\tau)$, характеризующий временную изменчивость параметра атмосферы.

Наконец, при отстоянии искомого профиля от исходного во времени и в пространстве сначала следует смоделировать профиль μ на заданном пространственном удалении, а затем,

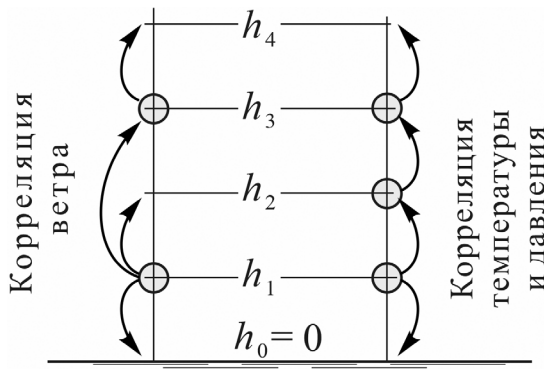


Рис. 1. Схема корреляции метеовеличин

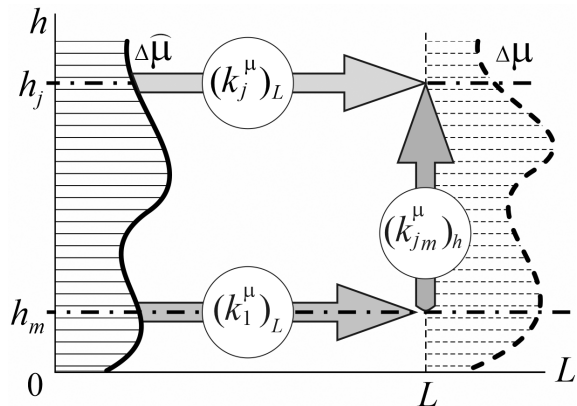


Рис. 2. Схема расчета реализации параметров атмосферы

взяв полученный профиль за исходный, построить реализацию профиля μ спустя заданное время.

Как уже отмечалось, реализация профиля давления рассчитывается после получения профиля температуры в данном месте, в данный момент времени. Вариация давления на высоте h складывается из общего для всех высот изменения давления у Земли и индивидуальной вариации $\Delta p_h(h)$ [9, 10]:

$$\Delta p(h) = \Delta p_0 + \Delta p_h(h), \Delta p_h(h_0) = 0,$$

причём составляющие Δp_0 и $\Delta p_h(h)$ независимы, а вариации $\Delta p_h(h)$ коррелированы с вариациями температуры ΔT_m на соответствующих главных узловых уровнях с известными коэффициентами корреляции $(k_{jm}^{pr})_h$.

В соответствии с этим формулы для расчёта вариаций Δp_0 и $\Delta p_h(h_j)$ аналогичны формулам (1)–(4), и имеют следующий вид:

– для задачи первого рода

$$\begin{aligned} \Delta p_0 &= \sigma_0^p \beta_0; \\ \Delta p_h(h_j) &= (k_{jm}^{pr})_h \frac{\sigma_j^p}{\sigma_m^p} \Delta T_m + \sigma_j^p \beta_j \sqrt{1 - (k_{jm}^{pr})_h^2}, \\ j &= 1, \dots, n; \end{aligned}$$

– для задачи второго рода

$$\begin{aligned} \Delta p_0 &= (k_0^p)_L \Delta \hat{p}_0 + \sigma_0^p \beta_0 \sqrt{1 - (k_0^p)_L^2}; \\ \Delta p_h(h_1) &= (k_1^p)_L \Delta \hat{p}_h(h_1) + \sigma_1^p \beta_1 \sqrt{1 - (k_1^p)_L^2}; \\ \Delta p_h(h_j) &= \frac{(k_j^p)_L - (k_{jm}^{pr})_h^2}{1 - (k_{jm}^{pr})_h^2} \Delta \hat{p}_h(h_j) + \\ &+ \frac{\sigma_j^p (k_{jm}^{pr})_h [1 - (k_j^p)_L]}{\sigma_m^p [1 - (k_{jm}^{pr})_h^2]} \Delta T_m + \\ &+ \sigma_j^p \beta_j \sqrt{\frac{1 + 2(k_j^p)_L (k_{jm}^{pr})_h^2 - (k_j^p)_L^2 - 2(k_{jm}^{pr})_h^2}{1 - (k_{jm}^{pr})_h^2}}; \\ j &= 1, \dots, n. \end{aligned}$$

Здесь, как и в формулах (3), (4), «крышкой» обозначена принадлежность вариации параметра исходному профилю.

Окончательно вариации давления на узловых уровнях вычисляются по формулам

$$\Delta p(h_0) = \Delta p_0; \Delta p(h_j) = \Delta p_0 + \Delta p_h(h_j),$$

$$j = 1, \dots, n.$$

Что касается значений коэффициентов пространственно-временной корреляции параметров атмосферы, то коэффициент корреляции составляющих ветра независимо от номера уровня может быть взят следующими функциями расстояния или промежутка времени [3, 6]:

$$(k_j^u)_L = k^u(L) = 1 - L / 1450, \text{ при } L \leq 1450 \text{ км};$$

$$(k_j^u)_\tau = k^u(\tau) = 1 - 0,02\tau, \text{ при } \tau \leq 24 \text{ час.}$$

Для коэффициентов корреляции полей температуры и давления до расстояний $L \leq 1000$ км можно пользоваться формулами [3]:

$$\begin{aligned} (k_j^r)_L &= 1 - \frac{0,0128L}{(\sigma_j^r)^2}; \\ (k_j^p)_L &= 1 - \frac{L(1 - 0,00065L)}{2(\sigma_j^p)^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Коэффициенты корреляции, характеризующие временную изменчивость полей температуры и давления, могут быть получены в предположении, что эти изменения определяются в основном переносом тепла, заменой в (5) L на $U_{срj}\tau$, где $U_{срj}$ — средняя скорость ветра на высоте h_j .

Решение задачи третьего рода.

Это касается моделирования атмосферной турбулентности, где имеют место хаотические изменения температуры, давления и плотности воздуха в области турбулентности, то они незначительны и практически не оказывают возмущающего воздействия на полет авиационной бомбы (АБ), НАР или снаряда. При этом из всех составляющих турбулентности с точки зрения исследования баллистического рассеивания заслуживает внимания только собственно перемещение частиц воздуха в турбулентной зоне, составляющее так называемый турбулентный ветер, который может быть охарактеризован вектором местной скорости $\vec{u}$. В совокупности с крупномасштабным ветром турбулентный ветер

определяет полную скорость перемещения частиц воздуха $\vec{U}_n = \vec{U} + \vec{u}$. Исходя из опытных данных скорость турбулентного ветра принято рассматривать как векторную гауссовскую случайную функцию координат точки пространства и времени $\vec{u} = \vec{u}(x, y, z, t)$. Относительно характера ее распределения принимают следующие допущения:

– поле скоростей $\vec{u} = \vec{u}(x, y, z, t)$ в определенных областях атмосферы, называемых локальными турбулентными зонами (ЛТЗ), является однородным и изотропным;

– для снаряда, совершающего движение в ЛТЗ, поле скоростей является «замороженным», то есть статистически неизменным в течение всего времени движения в пределах данной ЛТЗ.

В силу изотропности турбулентное поле скоростей в некоторый фиксированный момент времени полностью описывается двумя корреляционными функциями для проекции вектора $\vec{u}$ на два направления: продольное $\vec{r}^0$, совпадающее с направлением вектора $\vec{r}$ между двумя последовательными точками траектории снаряда, и ортогональное к нему поперечное $\vec{n}^0$, то есть функциями

$$\begin{aligned} k_r^u(r) &= M[u_r(0)u_r(\vec{r})]; \\ k_n^u(r) &= M[u_n(0)u_n(\vec{r})], \end{aligned} \quad (6)$$

где 0 — первая из рассматриваемых точек.

Известно несколько эмпирических аппроксимаций для корреляционных функций (6). В частности, достаточно точное приближение статистических свойств реальных ЛТЗ обеспечивают корреляционные функции Драйдена:

$$\begin{aligned} k_r^u(r) &= \sigma_u^2 \exp\left(-\frac{r}{L_r}\right); \\ k_n^u(r) &= \sigma_u^2 \left(1 - \frac{r}{2L_n}\right) \exp\left(-\frac{r}{L_n}\right), \end{aligned} \quad (7)$$

где σ_u^2 — дисперсия составляющих вектора $\vec{u}$; L_r, L_n — масштабы турбулентности, характеризующие продольный и поперечный размеры области ЛТЗ, в которой составляющие u_r и u_n коррелированы.

Как показывает практика, с достаточной степенью достоверности можно положить $L_r = 2L_n$,

при этом поперечный масштаб турбулентности составляет ориентировочно 200...300 м, а СКО скорости σ_u составляет 2...3 м/с для ясной погоды, 8...12 м/с — для кучевых облаков и 18...25 м/с — для грозowych метеоусловий.

Необходимо отметить, что общее решение данной задачи не может быть получено в конечных выражениях. Поэтому при численном моделировании следует применять разного рода рекуррентные алгоритмы, позволяющие получать реализации величин в последовательные дискретные моменты времени, соответствующие шагам интегрирования уравнений движения АСП. Например, в [4] описан рекуррентный алгоритм, основанный на формулах (6), (7), который, как показали многочисленные апробации, в совокупности с формулами (1)–(5) позволяет просто и эффективно решать основные задачи имитационного моделирования боевого применения авиационного вооружения.

Выводы

Авторами предложен математический алгоритм для моделирования стохастического распределения по времени, дальности и высоте метеорологических величин, используемых в задачах баллистического обеспечения применения АСП с боевых АК.

Алгоритм учета (прогноза) метеопараметров базируется на известных значениях характеристик стохастической атмосферы и не требует экспериментального определения каких-то дополнительных параметров.

Применение предложенного алгоритма прогноза метеопараметров позволит более точно получать и учитывать результаты моделирования характеристик индивидуального и группового рассеивания при применении АСП с боевых АК для различных метеоусловий.

Литература

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 (83). С. 60–69.

2. Бельский А.Б. Решение задачи алгоритмического определения параметров движения цели на основе теории фильтрации Калмана-Бьюси // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2019. № 3 (108). С. 103–110.
3. Бельский А.Б., Сахаров Н.А. Решение задачи определения скорости и ускорения цели при маневрировании летательного аппарата и цели // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2020. № 2 (112). С. 52–58.
4. Елисейкин С.А., Подрезов В.А. Моделирование и учет параметров атмосферы при применении неуправляемых авиационных изделий: учебно-справочное издание: монография. — Королев: ВНИИГМИ-МИД, 2020. 180 с.
5. Молоканов Г.Ф. Точность и надежность навигации летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1967. 215 с.
6. Краснов А.М., Донгаев Г.А., Пермьяков Е.М. и др. Авиационные прицельно-навигационные системы. Учебник для слушателей и курсантов ВУЗов ВВС. Под ред. Краснова А.М. — М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2006. 623 с.
7. Краснов А.М. Основы анализа и синтеза авиационных прицельно-навигационных систем. — М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2009. 319 с.
8. Постников А.Г. Внешняя баллистика авиационных неуправляемых снарядов. — М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2002. 379 с.
9. ОСТ 1 00276-78 Модель атмосферы Северного полушария для статистической оценки характеристик летательных аппаратов и бортового оборудования. — М.: НИИ АС, 1978. 23 с.
10. Характеристики атмосферы Земли для расчёта возмущённого движения летательных аппаратов (по материалам иностранной печати). Обзор ЦАГИ. 1968. № 243.
11. Татаренко Д.С., Шутов П.В., Ефанов В.В., Роговенко О.Н. Способ определения баллистических характеристик неуправляемых объектов // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 3. С. 77–83.
12. Подрезов В.А., Елисейкин С.А. Совершенствование методов учета параметров атмосферы при применении неуправляемых авиационных средств поражения // Военная мысль. 2021. № 4. С. 119–127.
13. Королев С.А. Решение задач внешне баллистического проектирования на основе математического и компьютерного моделирования / С.А. Королев, В.Г. Суфиянов // Интеллектуальные системы в производстве. 2019. Т.17. № 3. С. 80–88.
14. Моделирование возмущающих факторов, влияющих на точность стрельбы с подвижного носителя / И.Г. Русяк, С.А. Королев, В.А. Тененев, А.В. Вагин, М.Н. Белобородов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Проблемы специального машиностроения. 2018. № 12–3. С. 231–239.
15. Русяк И.Г. Исследование путей повышения дальности стрельбы за счет внешне баллистических факторов / И.Г. Русяк, С.А. Королев // Фундаментальные основы баллистического проектирования: сборник трудов. Сер. Библиотека журнала «ВОЕНМЕХ. Вестник БГТУ». 2017. С. 37–45.