

УДК 519.21

Об одном подходе к вероятностной оценке безопасности посадки гражданского самолета

Семаков С.Л.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

e-mail: slsemakov@yandex.ru

Аннотация

Рассматривается задача вероятностной оценки безопасности посадки гражданского самолета. Предложена схема, позволяющая по расшифровке записи МСРП конкретной реализации посадки апостериори оценить качество уже совершенной посадки с точки зрения ее безопасности.

Ключевые слова: случайный процесс, вероятность, посадка самолета, безопасность.

1. Введение

Одной из важнейших задач гражданской авиации (ГА) является обеспечение безопасности полета и, в частности, приземления самолета. Под безопасным приземлением будем понимать событие, заключающееся в том, что начальное касание самолетом посадочной поверхности происходит на заданном участке и в момент этого касания оказываются выполненными заданные ограничения на вертикальную скорость, углы тангажа, крена и другие важные – с точки зрения безопасности приземления – фазовые координаты самолета. Оценка вероятности

безопасного приземления сопряжена с преодолением двух основных трудностей. Первая – традиционная и связана с нелинейностью дифференциальных уравнений, описывающих движение самолета. Однако при исследовании процесса посадки, когда случайные возмущения движению малы, правомерным и общепринятым является путь преодоления этой трудности, состоящий в линеаризации уравнений движения относительно заданной номинальной траектории посадки, по которой двигался бы самолет при отсутствии возмущений. Вторая трудность никак не связана с первой, является принципиальной, имеет место независимо от того, считается ли процесс посадки описываемым решением нелинейной системы уравнений движения или решением линейной системы, полученной в результате линеаризации исходной нелинейной. Эта трудность заключается в том, что при описании случайного процесса посадки не удастся выбрать независимую переменную так, чтобы в момент приземления она принимала одно и то же значение для всех реализаций посадки. Единственной переменной, удовлетворяющей этому условию, является высота полета: в момент приземления она обращается в нуль. Однако возможность немонотонного изменения высоты не позволяет принять ее за независимую переменную. Это приводит к тому, что даже в том случае, когда при каждом значении независимой переменной (например, времени) известна плотность совместного распределения компонентов случайного процесса, описывающего движение самолета при посадке, нельзя ничего сказать о распределении этих компонентов в момент приземления самолета, ибо момент приземления при разных реализациях процесса соответствует разным значениям независимой переменной.

2. Постановка задачи

Как известно [1], на воздушных судах ГА устанавливаются многоканальные средства регистрации параметров (МСРП) полета, а в наземной службе авиакомпании есть подразделение, занимающееся расшифровкой записей МСРП. При необходимости может быть расшифрован весь полет, но, как правило, расшифровываются только наиболее важные и ответственные участки полета, к числу которых относится и посадка. Ставится следующая задача: после реального полета, опираясь на записи МСРП, проанализировать имевшую место реализацию случайного процесса посадки и по ней охарактеризовать качество и, в частности, степень безопасности данной конкретной посадки рассматриваемого воздушного судна. Как правило, по данным МСРП оценивают отклонения параметров полета от их номинальных значений в заданные моменты движения, например, момент пролета торца посадочной полосы. Однако нередко выход за рамки отдельных ограничений, установленных в Руководстве по летной эксплуатации воздушного судна, не только не создает предпосылок к авиационному происшествию, но и – с учетом всей обстановки в целом – может уменьшить вероятность какого-либо нежелательного события. Поэтому бóльшую важность представляют собой не отдельные отклонения, а какой-либо интегральный показатель процесса посадки, например, вероятность безопасного приземления, по которой можно объективно судить о качестве пилотирования (ручного или автоматического) и степени безопасности посадки в целом. Это утверждение поддерживают и пилоты [2].

В настоящей работе ставится задача по данным МСРП предложить схему апостериорной оценки (т.е. той оценки, которая делается уже после приземления

воздушного судна) вероятности безопасного приземления как одного из важных интегральных показателей степени безопасности посадки.

3. Схема оценки

Пусть движение самолета при посадке описывается n -мерным случайным процессом $Y(x) = \{Y_1(x), \dots, Y_n(x)\}^T$, где T – символ транспонирования, x – дальность полета, отсчитываемая с момента рассмотрения процесса посадки от некоторой фиксированной точки x_0 посадочной поверхности (или ее продолжения), $Y_1(x)$ – случайный процесс изменения высоты полета, $Y_2(x)$ – случайный процесс изменения вертикальной скорости. Факт безопасного приземления означает, что компонент $Y_1(x)$ первый раз достигает нулевого уровня (уровня посадочной поверхности) в какой-либо момент x^* из заданного промежутка (x', x'') , $x_0 < x' < x''$, и в этот момент x^* оказывается выполненным условие $(Y_2(x^*), \dots, Y_n(x^*)) \in D$, где D – заданное подмножество из R^{n-1} . Пусть событие Z_D означает факт успешного приземления, так что

$$Z_D = \{ \exists x^* \in (x', x'') \quad \forall x < x^* \quad Y_1(x) > 0, \quad Y_1(x^*) = 0, \quad (Y_2(x^*), \dots, Y_n(x^*)) \in D \}.$$

В работе [3] были предложены оценки для вероятности $P\{Z_D\}$. Было показано, что вероятность $P\{Z_D\}$ можно оценивать числом

$$\hat{P} = - \int_{t'}^{t''} dt \iiint_D u_2 \rho_t(0, u_2, \dots, u_n) du_2 \dots du_n, \quad (1)$$

а максимально возможная погрешность этой оценки не превосходит числа

$$\Delta P = \int_{t_0}^{t''} dt \int_0^{\infty} u_2 \rho_t(0, u_u) du_2, \quad (2)$$

где $\rho_t(u_1, u_2, \dots, u_n)$ – плотность совместного распределения случайных величин $Y_1(t), Y_2(t) \equiv Y_1(t)/dt, \dots, Y_n(t)$; $\rho_t(u_1, u_2)$ – плотность совместного распределения случайных величин $Y_1(t)$ и $Y_2(t)$; t_0, t', t'' соответствуют моментам прохождения точек x_0, x', x'' при движении самолета, описываемом математическим ожиданием процесса $Y(t)$.

Будем считать, что при заходе на посадку система управления самолетом (ручная или автоматическая) в целях обеспечения требуемого уровня безопасности полета стремится как можно точнее отслеживать некоторую номинальную траекторию посадки, формируя управляющие воздействия по принципу обратной связи. Такое движение достаточно точно может быть описано решением линейной системы дифференциальных уравнений

$$\frac{dy(t)}{dt} = A_1(t)y(t) + A_2(t)h(t), \quad (3)$$

где $h(t)$ – реализация m -мерного случайного процесса возмущений $H(t) = \{H_1(t), \dots, H_m(t)\}^T$, $y(t)$ – соответствующая реализация процесса $Y(t) = \{Y_1(t), \dots, Y_n(t)\}^T$, описывающего движение самолета; $A_1(t)$ – детерминированная матрица размера $n \times n$, $A_2(t)$ – детерминированная матрица размера $n \times m$. Не ограничивая общности рассуждений, можно считать, что $Y(t)$ и $H(t)$ имеют тождественно нулевые математические ожидания. Тогда, если предположить, что все случайные процессы $H_i(t), i = 1, \dots, m$, являются взаимно независимыми и их спектральные плотности допустимо аппроксимировать дробно-рациональными

выражениями, можно, как известно [4], подобрать такие матрицы A_3 размера $(m+l) \times (m+l)$ и A_4 размера $(m+l) \times k$, что $H(t)$ будет решением системы стохастических дифференциальных уравнений

$$d(H(t) R(t))^T = A_3(H(t) R(t))^T dt + A_4 dQ(t), \quad (4)$$

где $R(t) = \{R_1(t), \dots, R_l(t)\}^T$ – l -мерный вспомогательный случайный процесс; $Q(t) = \{Q_1(t), \dots, Q_k(t)\}^T$ – k -мерный вектор независимых винеровских процессов, для которых

$$MQ_i(t) \equiv 0, \quad M\{[Q_i(t_1) - Q_i(t_2)][Q_j(t_1) - Q_j(t_2)]\} = \delta_{ij}|t_1 - t_2|.$$

Здесь M – знак операции математического ожидания, δ_{ij} – символ Кронекера: $\delta_{ij} = 0$

при $i \neq j$ и $\delta_{ij} = 1$ при $i = j$. Объединяя системы (3) и (4), получим

$$d(Y(t) H(t) R(t))^T = A(Y(t) H(t) R(t))^T + BdQ(t),$$

где A и B – соответствующие блочные матрицы, составленные из нулевых матриц и матриц A_1, A_2, A_3 и A_4 . Рассматривая теперь $Y(t)$ как решение этой объединенной системы, по известной теореме о замкнутости класса нормальных процессов относительно любого линейного преобразования, можно сделать вывод, что плотность распределения ρ_t будет нормальной.

Опираясь на этот результат, можно предложить следующую схему апостериорной оценки вероятности успешного приземления.

Характеристики процесса $Y(t)$ зависят от типа воздушного судна, характера случайных возмущений и манеры пилотирования воздушного судна летчиком. Различные манеры пилотирования (законы управления) соответствуют разным

пилотам или даже одному пилоту, но в разное время. Процессы $Y(t)$, описывающие посадку конкретного воздушного судна при одних и тех же случайных возмущениях, но при различных манерах пилотирования, будут иметь, вообще говоря, различные характеристики. Поскольку процесс $Y(t)$ является нормальным, и его плотность распределения полностью определяется моментами первого и второго порядков, то это различие будет проявляться лишь в значениях указанных моментов. Моменты же могут быть оценены с помощью известных методов (см., например, [5-20]) по реализации процесса $Y(t)$, получаемой в результате расшифровки записи МСРП.

Таким образом, чтобы оценить искомую вероятность, нужно выполнить следующую последовательность действий. Сначала по данным МСРП расшифровать реализацию процесса $Y(t)$, описывающего движение воздушного судна при посадке. Затем по этой реализации определить моменты первого и второго порядков процесса $Y(t)$, причем, как правило, моменты первого порядка характеризуют номинальную траекторию и известны заранее. После этого однозначно определяется плотность распределения ρ_i компонентов процесса $Y(t)$, что позволяет по формуле (1) оценить искомую вероятность, а по формуле (2) – погрешность этой оценки.

4. Заключение

В работе предложена схема, позволяющая по расшифровке записи МСРП конкретной реализации посадки апостериори оценить вероятность успешного

приземления, что дает возможность оценить качество пилотирования (ручного или автоматического) воздушного судна для уже совершённой посадки и при необходимости внести в характер пилотирования нужные корректировки, обеспечив тем самым профилактику авиационных происшествий.

Библиографический список

1. Инструкция по организации на предприятиях гражданской авиации систематического сбора, обработки, обобщения и анализа полетной информации. - М.: Воздушный транспорт, 1984. – 184 с.
2. Овчаров В.Е. А инструктор лучше // Гражданская авиация. 1992. № 1. С. 20 - 21.
3. Семаков С.Л. Применение известного решения одной задачи о достижении границ немарковским процессом к оценке вероятности успешного приземления самолета // Известия РАН. Теория и системы управления. 1996. № 2. С. 139 - 145.
4. Пугачев В.С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. - М.: Физматгиз, 1962. – 883 с.
5. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. - М.: Мир, 1989. - 542 с.
6. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов, прогноз и управление. - М.: Мир, 1974. - 406 с.
7. Brown R.G. Smoothing forecasting and prediction of discrete time series. N.Y., Prentice-Hall, 1963, 468 p.
8. Хенан Э. Анализ временных рядов. - М.: Наука, 1964. - 217 с.

9. Кильдишев Г.С., Френкель А.А. Анализ временных рядов и прогнозирование. - М.: Статистика, 1973. - 104 с.
10. Семаков С.Л., Семаков И.С. Простейшая прогнозная модель временного ряда и ее реакция на линейное и параболическое входные воздействия // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=93446>
11. Гончаренко В.И., Кобзарь А.А., Кучерявенко Д.С. Идентификация параметров движения летательных аппаратов на активном участке траектории с использованием дискретного вейвлет-преобразования // Труды МАИ. 2011. № URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=25995>
12. Therrien C.W. Discrete random signals and statistical signal processing. N.Y., Prentice Hall, 1992, 727 p.
13. Otnes R.K., Enochson L. Applied time series analysis, vol. 1, N.Y., Wiley, 1978, 428 p.
14. Naykin S. Nolinear methods of spectral analysis. N.Y., Springer, 1983, 263 p.
15. Кендалл М., Стюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды. - М.: Наука, 1976, 736 с.
16. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. - М.: Физматлит, 2006. - 816 с.
17. Ван дер Варден Б.Л. Математическая статистика. - М.: ИЛ, 1960. – 435 с.
18. Уилкс С. Математическая статистика. - М.: Наука, 1967. – 632 с.
19. Боровков А.А. Математическая статистика. - М.: Физматлит, 2007. – 704 с.
20. Бендат Дж., Пирсол А. Приложения корреляционного и спектрального анализа. - М.: Мир, 1982. – 312 с.

Статья поступила в редакцию 06.12.2018