

УДК 629.7.05

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА ПОСАДКИ МОРСКОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

В. А. Небылов,¹

аспирант, м. н. с.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Предложен достаточно сложный и адекватный практическим требованиям критерий выбора оптимальной траектории посадки в зависимости от текущих характеристик морского волнения. Разработан новый алгоритм определения генерального направления распространения морских волн по цифровым фотоизображениям морской поверхности.

Ключевые слова — морской летательный аппарат, морское волнение, посадка, критерий оптимизации.

Введение

Ключевой проблемой для морских летательных аппаратов (ЛА) является взлет и посадка при интенсивном морском волнении. В идеале транспортное средство должно быть всепогодным, однако и экранопланы, и гидросамолеты не могут эксплуатироваться при штормовой погоде, когда ветровое морское волнение имеет большую балльность. Чем больше размеры, прочность и энерговооруженность ЛА, тем выше граница разрешенных режимов полета (балльности морского волнения) для взлета и посадки в штормовом море. Однако слишком большие размеры аппарата не только увеличивают его стоимость, но часто не соответствуют имеющимся грузопотокам на большинстве реальных грузопассажирских линий. Поэтому очень важно максимизировать возможность взлета и посадки малых и средних аппаратов в штормовом море. Эффективным способом решения этой проблемы является оптимизация направления захода на посадку по отношению к генеральному направлению распространения морских волн. При этом генеральное направление может определяться автоматически путем обработки показаний бортовых датчиков. В этом случае реализация оптимального режима захода на посадку и сама посадка требуют использования результатов численного анализа характеристик волновых возмущений.

¹ Научный руководитель — доктор техн. наук, профессор А. П. Шенета.

Критерий оптимизации посадки морского ЛА

Посадка морского ЛА на взволнованную морскую поверхность отличается от приземления обычного самолета на конкретную взлетно-посадочную полосу. Пилот или автоматическая система управления может выбрать любое направление посадки, поскольку область для возможной посадки не ограничена полосой и может принадлежать любому подходящему месту в открытом море недалеко от места назначения. Естественно, направление вектора ветра должно быть принято во внимание при выборе направления захода на посадку. Посадка против ветра позволяет снизить посадочную скорость относительно поверхности. При ветровых морских волнах главное направление совпадает с направлением ветра, т. е. аэродинамически нужно приземлиться по направлению, обратному общему направлению распространения морских волн. Но при сильном ветре, когда волны существенны, посадка против ветра дает значительные волновые нагрузки, поскольку ЛА сталкивается с гребнями морских волн, которым соответствуют максимальные отклонения водной поверхностной. Поэтому в соответствии с гидродинамикой это направление исключительно невыгодно из-за частоты встреч с морскими волнами и максимальным изгибом волн, и вероятность крушения транспортного средства из-за чрезмерной нагрузки является большой. Гидродинамически лучше производить посадку перпендикулярно генеральному направлению распространения морских волн. Посадка перпендикулярно ветру не может

обеспечить минимальную скорость посадки относительно поверхности, но уклон морских волн в этом направлении может быть умеренным, и гидродинамическое торможение будет не столь тяжелым. Именно поэтому оптимизация направления посадки — очень важная задача, и контроль движения при посадке должен быть выполнен на основании текущей информации относительно особенностей морской поверхности. Профиль и составные характеристики морских волн могут быть рассчитаны вместе с параметрами полета морского ЛА [1].

Посадка морского ЛА в условиях интенсивного морского волнения должна соответствовать требованию минимизации механических нагрузок при гидродинамическом торможении. Ключевым фактором является автоматизация выбора направления захода на посадку по отношению к генеральному направлению распространения морских волн. После рассмотрения нескольких вариантов формального критерия автором был выбран достаточно простой критерий «мягкости» посадки в виде среднеквадратического значения вертикальной скорости погружения днища ЛА в воду $\sigma_V = V\sigma_\alpha$, где V — посадочная путевая скорость; σ_α — среднеквадратическое значение уклона волновой поверхности вдоль траектории посадки.

При выводе расчетного выражения для критерия σ_V необходима достаточно адекватная математическая модель полностью развитого трехмерного ветрового морского волнения, поскольку именно этот общий случай морского волнения представляет наибольший интерес и позволяет сделать наиболее широкие обобщения. Были использованы формулы для энергетического спектра морского волнения по Нейману и по Пирсону—Мошковицу и формула для среднеквадратического значения уклона волновой поверхности вдоль траектории посадки [2–6].

Результирующая расчетная формула имеет вид

$$\sigma_V = (V_l - v \cos \psi) \times \sqrt{\int_0^\infty \left[\int_0^{\pi/2} (\cos^2 \psi \cos^4 \chi P(\chi, k) d\chi + \sin^2 \psi \cos^2 \chi \sin^2 \chi P(\chi, k) d\chi) \right] dk},$$

где V_l — воздушная скорость; v — скорость ветра; ψ — угол по отношению к направлению ветра; k — пространственная частота;

$$P(\chi, k) = \frac{1,03 \cdot 10^{-2}}{k} \exp \left[- \frac{0,112 \cos^2 \chi}{\left(k(3,95_{\text{м.с}^{-5/2}})(v/g)^{5/2} \right)^2} \right]$$

и

$$P(\chi, k) = \frac{1,03 \cdot 10^{-2}}{k} \exp \left[- \frac{0,112 \cos^2 \chi}{\left(k(0,391)(v^2/g) \right)^2} \right]$$

— для спектров Неймана и Пирсона—Мошковица соответственно.

Полученное выражение позволяет исследовать зависимость показателя «мягкости» посадки от многих факторов, прежде всего — от направления захода на посадку по отношению к направлению ветра, совпадающему с генеральным направлением распространения морских волн. При умеренном волнении, соответствующем скорости ветра 2–10 м/с, наиболее благоприятная траектория посадки при $\psi = 90^\circ$. При более развитом ветровом волнении, соответствующем скорости ветра 10–14 м/с, все направления в интервале $0-90^\circ$ пригодны для совершения посадки, которая происходит при незначительных механических нагрузках. В штормовом море при скорости ветра 14 м/с и выше ситуация резко меняется, и наиболее благоприятная траектория посадки будет против ветра ($\psi = 0$). Разница в нагрузках при благоприятном и неблагоприятном направлениях посадки может превышать один порядок. Нагрузки при посадке снижаются примерно в два раза в случае выбора направления $\psi = 0$ или 30° по сравнению со случаем 90° . При любой скорости ветра самое неблагоприятное направление 180° . Любое направление между 90 и 180° считается нежелательным для избегания больших механических нагрузок, направленных на корпус ЛА. Интересно, что направление $\psi = 60^\circ$ примерно одинаково для любых скоростей ветра. Разница в нагрузках при благоприятном и неблагоприятном направлениях посадки может превышать один порядок.

Цифровая обработка фотоизображений водной поверхности

Для реализации рекомендаций в отношении направления посадки морского ЛА желательно иметь на борту комплекс приборных средств для определения интенсивности морского волнения (высоты морских волн) и генерального направления распространения морских волн. В последнее время в связи с быстрым совершенствованием цифровых фотокамер появилась возможность использовать наиболее простой способ определения характеристик морской поверхности, заключающийся в обработке фотоизображений водной поверхности. Конечно, в условиях штилевого моря информативность даже высококачественного изображения водной поверхности невелика, но при этом проблема оптимизации захода на посадку и не стоит, а возникает лишь при существенном

морском волнении, когда структуру морских волн легко проанализировать по фотографиям. Необходимо также учитывать другие сложности, которые могут возникнуть при фотографировании водной поверхности, такие как солнечные блики, затуманенность, малая освещенность при ночной съемке и т. п.

При рассмотрении волновой поверхности как трехмерного случайного поля, анизотропного по направлению, генеральное направление может быть определено как такое, вдоль которого интервал пространственной корреляции между возвышениями волновой поверхности минимален. Соответственно, в перпендикулярном направлении интервал корреляции должен быть максимален.

Вместо определения интервала корреляции фактически можно подсчитывать число переходов n_0 черное—белое вдоль разных направлений при анализе черно-белого изображения. Это число должно быть пропорционально среднеквадратической частоте пространственного спектра волновой поверхности $k_{ск}$ и, следовательно, обратно пропорционально интервалу пространственной корреляции. Для нормального случайного поля, каковым являются возвышения волновой поверхности, величина n_0 при рассмотрении особенностей изображения волновой поверхности вдоль определенного направления выражается формулой

$$n_0 = \frac{k_{ск}}{\pi} \exp\left(-\frac{C_0^2}{2D_\xi}\right),$$

где D_ξ — дисперсия волновой ординаты, а уровень C_0 зависит от адаптируемой контрастности изображения.

В общем виде алгоритм определения генерального направления распространения морских волн может быть реализован в виде следующей последовательности операций.

1. RGB-изображение преобразуется в серое изображение с 256 уровнями яркости. Значение

серого находится как среднее арифметическое по трем цветовым каналам RGB, при этом сохраняются общая яркость и контрастность изображения, но теряются данные о цвете.

2. Устанавливается некий порог яркости и осуществляется переход к черно-белому изображению. Возможны несколько вариантов выбора этого порога. К примеру, пороговое значение может быть определено как среднее арифметическое значений яркости всех точек изображения. В другом варианте находится минимум и максимум яркости на конкретной фотографии и их средняя величина признается пороговой. Фактический интервал яркости полезно растянуть до максимально возможного интервала в 256 градаций путем масштабирования с плавающим адаптивным масштабным коэффициентом. При этом повышается качество черно-белого изображения, что важно для последующей обработки [7].

3. Подсчитывается число переходов черное-белое вдоль выбранного направления (по умолчанию начальное направление принимается за 0°).

4. Изображение пошагово (шаг выбирается в зависимости от необходимой точности и быстроты действия бортового компьютера, например в 1°) поворачивается для определения направления с максимальным числом черно-белых переходов на отрезке выбранной длины.

Определенное направление признается генеральным.

Заключение

В результате проведенных исследований разработана методика оптимизации посадочного режима морского ЛА в целях гарантирования безаварийной посадки в условиях штормового моря. Реализация разработанной методики позволяет повысить характеристики всепогодности морских ЛА.

Литература

1. Волков Г. Основы гидроавиации. — М.: Военное издательство НКО СССР, 1940. — 248 с.
2. Nebylov A. V., Wilson P. Ekranoplane — Controlled Flight close to Surface. — Southampton, UK: WIT-Press, 2002. — 220 p.
3. Ambrosovsky V. M., Nebylov A. V. Flight Parameters Monitoring System for Small WIG-Craft: III International Conf. on Ground-Effect Machines / The RSME, Russian Branch. Saint-Petersburg, 2000. P. 15–25.
4. Nebylov A. V. Structural Optimization of Motion Control System Close to the Rough Sea // 13th IFAC World Cong. San Francisco, 1996. Vol. Q. P. 375–380.
5. Небылов А. В. Измерение параметров полета вблизи морской поверхности. СПб. гос. академия аэрокосмического приборостроения, 1994. — 307 с.
6. Nebylov A. V., Nebylov V. A., Panferov A. I., Shepeta A. P. WIG-craft Marine landing control at rough sea // 17th IFAC Symp. on Automatic Control in Aerospace. Toulouse, 2007.
7. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений. — М.: Техносфера, 2005. — 1072 с.