

УДК 629.7.05

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ НИЗКОЛЕТЯЩЕГО ВБЛИЗИ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ АППАРАТА

А.Ю. Княжский

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А
E-mail: knjagskij@mail.ru

А.В. Небылов

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А
E-mail: iaat@aanet.ru

В.А. Небылов

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А
E-mail: iaat@aanet.ru

Ключевые слова: низковысотный полет, морское волнение, оценивание, измерительная система, оптимизация.

Аннотация: к системам измерения параметров движения низколетящих аппаратов предъявляются повышенные точностные требования. Даже небольшая ошибка оценки параметра движения может привести к аварии. Морское волнение добавляет к погрешности измерителя волновую составляющую. В работе предлагается архитектура системы измерения высоты низколетящего аппарата и проводится комплексирование измерительных устройств, снижающее влияние волновой составляющей погрешности.

1. Введение

При низковысотном полете вблизи морской поверхности достаточную для безопасного движения точность оценки параметров полета аппарата можно обеспечить только за счет комплексирования датчиков с различными спектрами погрешностей. Оценивать высоту низколетящего аппарата с высокой точностью особенно необходимо при движении в режимах оптимизации 3D траектории, учитывающей рельеф взволнованной морской поверхности [1]. Наиболее важными информационными параметрами движения аппарата являются его точечные высоты [2]. Для их оценивания желательно максимально полно использовать имеющееся на борту оборудование, поскольку добавление новых датчиков может негативно сказаться на аэродинамических и массогабаритных характеристиках аппарата. В стандартный состав приборного оборудования низколетящего аппарата обычно входит три локационных высотомера и три акселерометра. В рассматриваемой конструктивной схеме акселерометры с вертикальной осью чувствительности располагаются над локационными высотомерами. Каждая пара локационный высотомер – акселерометр оценивает свою истинную и абсолютную высоты. По точным оценкам высот, полученных тремя парами измерителей, оцениваются ис-

тинная и абсолютная высоты центра масс аппарата, его углы наклона и параметры морского волнения.

В работе проводится оптимизация передаточных функций каналов радиовысотометра и акселерометра в интегрированном измерителе и предлагается методика оценки параметров морского волнения. Оптимизация проводится по критерию наивысшей точности оценки истинной геометрической высоты.

Методы оптимизации передаточных функций и анализа навигационной информации описаны в [3, 4].

2. Измерители высоты

2.1. Локационные высотомеры

Характеристики локационных высотомеров и принципы их работы описаны в [5]. Водная поверхность имеет свойство отражать электромагнитные и ультразвуковые волны. Основным преимуществом ультразвукового локатора является простота его построения и высокая точность на малых скоростях движения. Но ультразвуковой локатор не способен точно работать на скоростях, соизмеримых со скоростью звука, и выделять полезный ультразвуковой сигнал из помех, вызываемых работой двигателей. Поэтому на быстро движущихся низколетящих аппаратах устанавливают локационные высотомеры, использующие электромагнитное излучение: радиовысотометры, световые (лазерные), гамма-высотометры (изотопные), рентгеновские высотомеры. Радиовысотометры и лазерные и рентгеновские высотомеры определяют высоту по запаздыванию отраженного от поверхности сигнала. Изотопные высотомеры измеряют изменение интенсивности отраженного сигнала.

Поскольку на большинстве НЛА установлены радиовысотометры, они будут рассматриваться в качестве измерителей высоты. При использовании радиовысотометров необходимо уменьшать влияние переотражений сигнала от корпуса аппарата. Радиовысотометры бывают импульсные и непрерывного излучения. В импульсных радиовысотометрах затруднительно реализовать принцип разделения зондирующего и отраженного импульсных радиосигналов. Поэтому на НЛА наиболее целесообразно использовать радиовысотометры непрерывного излучения с частотной модуляцией по пилообразному, синусоидальному или случайному законам.

Фазовый радиовысотометр позволяют радиовысотометрам измерять высоту над взволнованной водной поверхностью от 0 до 10 м. Радиовысотометр может работать в сантиметровом и миллиметровом диапазонах. При сильно взволнованной морской поверхности погрешность радиовысотометра, работающего в сантиметровом диапазоне, значительно увеличивается из-за угловых колебаний подстилающей поверхности. Радиовысотометры, работающие в миллиметровом диапазоне, имеют большую точность и меньшие размеры антенны. Однако их точность снижается водяными брызгами, из-за чего требуется более технологичный и дорогостоящий волновой тракт, например из диодов Ганна.

В работе в качестве измерителей рассматриваются радиовысотометры непрерывного излучения, работающие в миллиметровом диапазоне.

Выходной сигнал радиовысотометра низколетящего аппарата можно представить в виде

$$h_{ps}(t) = h(t) + v_{ps}(t) = h(t) + \xi(t) + \Delta h(t),$$

где $h(t)$ – истинная высота аппарата относительно среднего уровня поверхности; $v_{ps}(t)$ – результирующая погрешности измерения истинной высоты $h(t)$; $\xi(t)$ – ордината точ-

ки профиля волны, находящейся в центре облучаемой радиовысотометром области; $\Delta h(t)$ – собственная погрешность радиовысотометра;

$\Delta h(t)$ радиовысотометра можно с достаточной точностью представить экспоненциально-коррелированным шумом со спектральной плотностью

$$G_{\Delta h}(\omega) = \frac{G_{\Delta h}(0)}{[1 + \omega^2 T_{p\epsilon}^2]}.$$

Дисперсия $\sigma_{p\epsilon}^2$ и максимальная погрешность Δh_{\max} радиовысотометра вычисляются по следующим формулам

$$\sigma_{p\epsilon}^2 = G_{\Delta h}(0)/(2T_{p\epsilon}), \Delta h_{\max} \approx 3\sigma_{p\epsilon},$$

где $T_{p\epsilon}$ – постоянная времени.

При пятибалльном морском волнении уровень спектральной плотности волновой составляющей погрешности достигает $0.1 \text{ м}^2/\text{с}$. $T_{p\epsilon}$ будем считать равной $0,1 \text{ с}$. В таком случае $\Delta h_{\max} = 0,3 \text{ м}$. Собственная погрешность современных локационных высотометров составляет $0,1 \text{ м}$ и ниже. Волновая составляющая погрешности при пятибалльном морском волнении имеет величину $3,5 \text{ м}$, т.е. несравненно больше собственной. Это позволяет пренебречь собственной погрешностью высотометра.

2. Акселерометры с вертикальной осью чувствительности

Некоторые характеристики акселерометров описаны в [6]. Погрешность акселерометра состоит из погрешности $\delta_1(t)$ медленного ухода нуля шкалы датчика, погрешности $\delta_2(t)$, вызываемой неточностью коэффициента передачи датчика, и погрешности $\delta_3(t)$, вызываемой неточностью стабилизации оси чувствительности в требуемом направлении. Результирующая погрешность имеет вид

$$\delta(t) = \delta_1(t) + \delta_2(t) + \delta_3(t).$$

Все составляющие погрешности можно представить некоррелированными случайными процессами со стационарными централизованными вторыми производными. Зона нечувствительности акселерометров составляет примерно $5 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2$ и перекрывается вибрационным ускорением. Одной из основных точностных характеристик акселерометра является максимальная величина ухода нуля его шкалы $\delta_{1,m}^{(2)}(t) = (1 - 20) \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2$. Максимальная скорость ухода акселерометра $\delta_{1,m}^{(3)} = \delta_{1,m}^{(2)}/T_\delta$, где $T_\delta \approx 4 \cdot 10^3 \approx 1 \text{ ч}$.

$$\delta_{2,m}^{(2)} = \epsilon_m \alpha_m, D_{22} = D_\epsilon \cdot D_{aB(II)},$$

$$\delta_{2,m}^{(1)} = \epsilon_m V_m, D_{21} = D_\epsilon \cdot D_{aB(I)},$$

где $\epsilon_{\max} = 10^{-3}$ и $D_\epsilon = 10^{-7}$.

Вторая производная погрешности $\delta_3(t)$ выражается формулой

$$\delta_3^{(2)}(t) = a_{B(II)}(t) \cdot \alpha(t).$$

Ее максимальное значение составит $\delta_{3,\max}^{(2)}(t) = a_{B(II)\max} \cdot \alpha_{\max}$, а дисперсия

$$D_{32} = D_{aB(II)} \cdot D_\alpha$$

3. Оптимизация передаточной функции измерительной системы

Учитывая, что $\lim_{s \rightarrow \infty} H_1(s) = 0$, проведем параметрическую оптимизацию передаточных функций каналов локационного высотомера $H_1(s)$ и акселерометра $H_2(s)$

$$\begin{cases} H_1(s) = (b_{10} + b_{11}s + b_{12}s^2) / A(s) \\ H_2(s) = (b_{22}s^2 + a_3s^2) / A(s) \\ H_1(s) + H_2(s) = 1 \end{cases},$$

где $A(s) = 1 + a_1s + a_2s^2 + a_3s^3$.

Спектральная плотность входного сигнала[7]

$$S_{ex}(\omega) = \frac{\alpha}{2\omega^3} \exp\left[-\frac{\beta g^2}{U^4 \omega^2}\right],$$

где $\alpha = 8.1 \cdot 10^{-3}$, $\beta = 0.74$, g – ускорение свободного падения, U – скорость ветра. Максимальная ошибка акселерометра $e_{max2} = 10^{-3}$ м.

Семь неизвестных параметров функции $P = \{a_1, a_2, a_3, b_{10}, b_{11}, b_{12}, b_{13}\}$ оптимизируются по критерию минимума максимальной ошибки измерительной системы.

Численная оптимизация передаточных функций дала следующие результаты:

$a_1 = 11.9$, $a_2 = 76.9$, $a_3 = 92.7$, $b_{10} = 0.991$, $b_{11} = 11.8$, $b_{12} = 75.7$, $b_{22} = 0.230$.

6. Заключение

В работе проведена параметрическая оптимизация передаточных функций интегрированной системы измерения высоты, состоящей из трех локационных высотомеров и трех акселерометров с вертикальной осью чувствительности. Оптимизация передаточных функций измерительной системы позволила увеличить точность измерительной системы на 30%.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (18-08-00234) и фонда 16-19-10381.

Список литературы

1. Княжский А.Ю., Небылов А.В., Небылов В.А. Способ управления продольным и боковым движением экраноплана // Авиакосмическое приборостроение. 2017. № 4. С. 18-24.
2. Княжский А.Ю., Небылов А.В., Небылов В.А. Анализ точности системы измерения высоты низколетящего аппарата в условиях морского волнения // Авиакосмическое приборостроение. 2018. № 10. С. 3-10.
3. Бабкин Н.В., Макшанов А.В., Мусаев А.А. Робастные методы статического анализа навигационной информации / Под ред. И.Б. Челпанова. Л.: ЦНИИ «Румб», 1985.
4. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975, 768 с.
5. Небылов А.В. Измерение параметров полета вблизи морской поверхности. СПб.: СПбГААП, 1994, 307 с.
6. Koleda A.N., Barbin E.S., Nesterenko T.G. Three-component microelectromechanical accelerometer // 22nd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems ICINS 2015. Proceedings. State Research Center of the Russian Federation, 2015. P. 338-342.

7. Княжский А.Ю. Синтез и анализ точности системы измерения параметров морского волнения, используемой на низколетящем аппарате // Информационно-управляющие системы. 2018. № 2. С. 91-95.