

Методика экспериментальной проверки пригодности навигационных датчиков для микронавигационного обеспечения РСА

О.А. Карпов, М.П. Титов, О.Е. Цветков

ГУП НПП «Спурт», Москва, Зеленоград, 4-й западный проезд, д.8, E-mail: titovmp@mail.ru

Рассматривается методика оценки точности навигационных измерений и пригодности навигационных датчиков для использования в РЛС с фокусированным синтезированием апертуры антенны. В качестве эталонных измерений предлагается использовать данные алгоритмов автофокусировки, полученные с использованием отраженных сигналов РЛС.

The technique of an estimation of the accuracy of the navigation measurements and the suitability of the navigation sensors for use in radar focused synthesis aperture antenna is considered. As a reference measurement is proposed to use these algorithms of auto focus, obtained with the use of the reflected radar signals.

Введение

Проблема использования инерциальных навигационных измерителей для обеспечения работы радиолокатора с синтезированной апертурой антенны (РСА) воздушного базирования, достаточно подробно обсуждалась в специальной литературе [1,2,3], однако остаются некоторые вопросы научного и технического характера, которые не позволяют считать эту проблему полностью решенной.

В частности, остается открытым вопрос о возможности и диапазоне условий использования штатной инерциальной навигационной системы (ИНС) самолета, а также о требованиях к дополнительным инерциальным датчикам, используемым для комплексирования со штатной ИНС [1], и (или) к специальной измерительной системе, работающей автономно и расположенной вблизи фазового центра антенны (ФЦА) бортовой радиолокационной станции (БРЛС).

В настоящее время остроту проблемы навигационного (микронавигационного) обеспечения РСА несколько снимает использование алгоритмов автофокусировки [4,5,6,7], однако эти алгоритмы, во-первых, не могут решать задачу во всех условиях полета (например, они плохо работают по морской и другой однородной поверхности). Во-вторых, для обеспечения высокого (до 1 м и выше) разрешения режимов с фокусированным синтезированием апертуры (ФСА), по-видимому, необходимо использовать как данные инерциальных и спутниковых измерений, так и алгоритмы автофокусировки (АФ).

В настоящей работе предлагается методика проверки пригодности навигационных измерителей для решения задачи микронавигационного обеспечения режимов ФСА, основанная на сравнении навигационных измерений с данными алгоритмов АФ, и приводятся экспериментальные данные, иллюстрирующие ее.

1. Условия эксперимента и экспериментальные данные

Для проведения исследований использовались данные измерений параметров движения инерциального центра (ИЦ) штатной ИНС SIGMA95NAA самолета и параметров режима БРЛС в экспериментальном полете 9 сентября 2010 г., которые регистрировались в системе объективного контроля (СОК) БРЛС с частотой 100 Гц. Эти данные были представлены в виде текстовых файлов (таблиц значений параметров), в которых описаны изменения

- пилотажных углов (истинный курс ψ , тангаж ϑ , крен γ);
- составляющих вектора земной скорости (W_e , W_n , W_h);

- составляющих ускорения в связанных осях (a_x, a_y, a_z);
- составляющих угловой скорости в связанных осях ($\omega_x, \omega_y, \omega_z$);
- азимута α и угла места ε центра зоны картографирования (ЦЗК);
- начального курса ψ_0 ;
- наклонной дальности до ЦЗК (дальности выставки строка приемника) r_3 ;
- периода повторения зондирующих импульсов БРЛС T_{Π}

в течении примерно 8,1 мин полетного времени (в общей сложности 48992 такта регистрации длительностью 10 мс).

Дополнительно к навигационным данным в расширенную память сигнального процессора на том же интервале времени осуществлялась запись радиоголограмм (реальных отраженных сигналов) БРЛС. Эти данные представлены в виде 370 бинарных файлов с именами 0305466.rds ... 0512347.rds в специальном формате RDS. Привязка навигационных данных к данным радиоголограмм осуществлялась по значению машинного времени 136_Time , фиксируемому как в таблицах *.tbl, так и заголовках файлов радиоголограмм *.rds формата RDS.

Из всего набора записанных радиоголограмм для анализа были выбраны 32 файла с наибольшими временами накопления сигналов.

Каждая из выбранных для анализа радиоголограмм содержит сигнал в 2108 периодах зондирования длительностью $T_{\Pi} = 870...3027$ мкс, так что общая длительность интервала накопления сигнала составляет 1,78...6,2 с или 178...620 тактов регистрации навигационной информации длительностью $\Delta t = 10$ мс.

Экспериментальный полет осуществлялся на высоте 2...4 км на скорости 120...160 м/с как по плавной траектории (без всякого преднамеренного маневра), так и с использованием маневра типа «змейка». Во время полета величина нормальной перегрузки не превышала 1,2...1,5 g, при маневрировании носителя угол крена изменялся в пределах $\pm 20^\circ$, скорость изменения курса до 1 град/с. БРЛС работала в режиме ФСА с параметрами: угол карты $\Psi_k \approx -50^\circ \dots +50^\circ$, начальная дальность ЦЗК $r_{i0} \approx 4 \dots 95$ км.

Кроме перечисленных выше исходных навигационных данных ИНС SIGMA95NAA использовались полученные на основании параметров $a_x, a_y, a_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z$ и автономных расчетов по стандартному алгоритму инерциальной навигации данные в виде радиальных перемещения r , скорости v_r и ускорения a_r относительно ЦЗК. Причем эти данные были рассчитаны для вектора ИЦ-ЦЗК.

2. Методика проверки

Для оценки пригодности данных ИНС при решении задачи фокусировки радиолокационных изображений (РЛИ) РСА необходимы эталонные параметры, с которыми можно было бы сравнить параметры, полученные из экспериментальных навигационных измерений.

За исходный критерий качества решения задачи микронавигации примем фокусировку РЛИ, которую при визуальном анализе можно оценить по степени «размазанности» изображений точечных объектов и границ (контуров) протяженных образований по азимутальной координате. Численные значения параметров, при которых формируется РЛИ с удовлетворительным качеством фокусировки, могут быть получены с помощью алгоритмов АФ [5,6], которые используются в режимах ФСА.

Эти алгоритмы по отраженному сигналу БРЛС измеряют среднее приращение доплеровской частоты $\overline{\omega}'_D$ на некотором интервале времени T , которое может быть пересчитано к среднему радиальному ускорению ФЦА БРЛС на этом интервале: $\overline{a}_r = \lambda \overline{\omega}'_D / (4\pi)$, где λ – длина волны РЛС.

Ввиду необходимости анализа относительно длинных (от 2 до 6,2 с) интервалов когерентного накопления сигналов (интервалов синтезирования) T_c , измерения с помощью алгоритмов АФ параметра \overline{a}_r целесообразно проводить на более коротких интервалах времени $T < T_c$, разбивая интервал синтезирования (ИС) на подинтервалы. Точность (среднее квадратическое отклонение – СКО $\sigma_{\overline{a}}$) оценки \overline{a}_{ri} на i -ом подинтервале можно рассчитать по формуле

$$\sigma_{\overline{a}} = \frac{\lambda}{T^2 \sqrt{q_0 k_A k_D N}}.$$

Здесь q_0 – отношение сигнал-шум по мощности на входе системы обработки, k_A – коэффициент сжатия сигнала по азимуту, k_D – коэффициент сжатия сигнала по дальности, N – число усреднений по стробам дальности.

В процессе обработки данных в этом эксперименте использовались следующие значения параметров: $T = 0,2 \dots 0,4$ с, $q_0 \geq 4$, $k_A = 128 \dots 256$, $k_D = 13$, $N = 512$. При этом СКО оценки ускорения в точке ФЦА с помощью алгоритмов АФ составляло $\sigma_{\overline{a}} \leq 10^{-4} \dots 3 \times 10^{-4}$ м/с², а фокусировка РЛИ по этим данным для всех исследованных радиоголограмм давала либо удовлетворительный, либо хороший результат.

Пример РЛИ, полученный по одной из радиоголограмм, с использованием данных АФ показан на рис. 1, а.

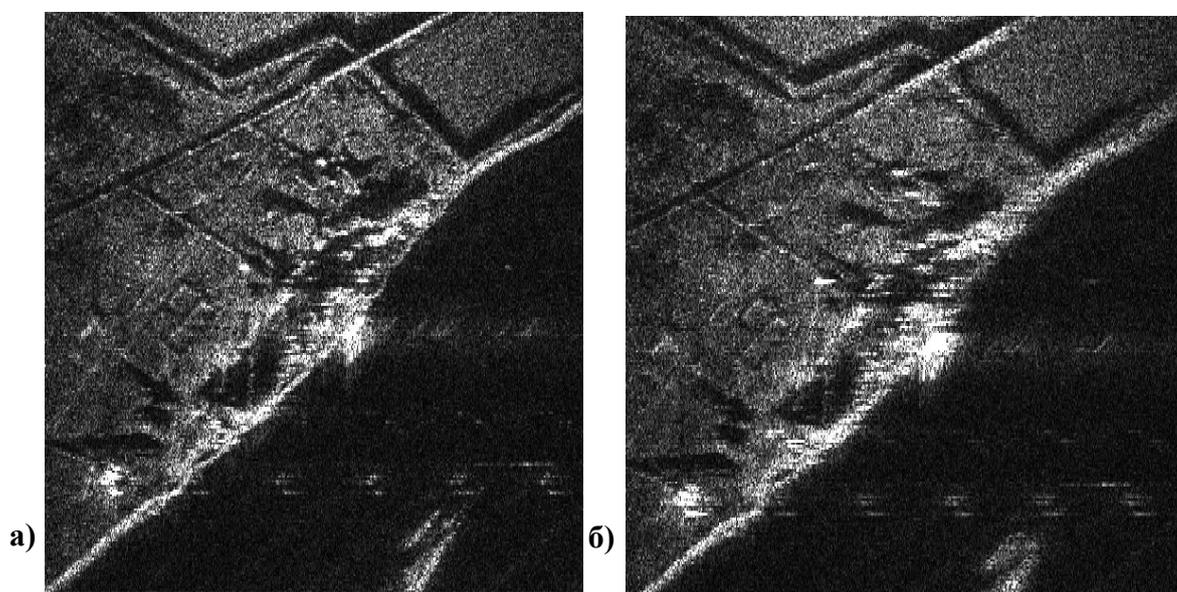


Рис. 1. Пример РЛИ, полученных с использованием данных автофокусировки (а) и по навигационным данным (б)

Ввиду отсутствия каких-либо других более точных измерений, будем траекторные измерения, полученные с помощью алгоритмов АФ считать эталонными и сравнивать с ними навигационные измерения.

3. Обработка экспериментальных данных

Обработка экспериментальных данных заключалась в расчете на основе записанных в СОК навигационных параметров изменения текущего расстояния между ИЦ ИНС и ЦЗК (ИЦ – ЦЗК) $r_1(t)$, а также ФЦА – ЦЗК $r_2(t)$ для всех исследуемых ИС. После этого полученные функции $r_1(t)$, $r_2(t)$ сравнивались с $r_0(t)$, вычисленной для этих же ИС с помощью алгоритмов АФ.

При расчетах и сравнительном анализе функций $r_1(t)$, $r_2(t)$, $r_0(t)$ предполагалось, что эти функции на исследуемых ИС длительностью от 2 до 6,2 с могут быть представлены [3] степенным рядом третьего порядка и флуктуационной составляющей в виде случайного процесса $\Delta\tilde{r}(mT_{II})$:

$$r(m) = \bar{r} + \bar{v}_r(m - M/2)T_{II} + \frac{1}{2}\bar{a}_r(m - M/2)^2T_{II}^2 + \frac{1}{6}\bar{b}_r(m - M/2)^3T_{II}^3 + \Delta r(mT_{II}),$$

где \bar{r} , \bar{v}_r , \bar{a}_r и \bar{b}_r – коэффициенты разложения в степенной ряд, имеющие смысл среднего значения наклонной дальности, радиальной скорости, радиального ускорения и производной радиального ускорения ($\bar{b}_r = \bar{a}'_r$), M – число периодов зондирования на ИС.

Причем известно [3], что ошибка в оценке параметра \bar{r} не влияет на качество РЛИ, ошибка в оценке \bar{v}_r приводит к его азимутальному смещению и, в конечном счете, к ошибкам в оценке координат объектов (что здесь не рассматривается). И только ошибки в оценке параметров \bar{a}_r , \bar{a}'_r и $\Delta\tilde{r}(mT_{II})$ приводят к расфокусировке РЛИ.

Оценка эталонной функции $r_0(t)$ осуществлялась с помощью алгоритмов АФ, встроенных в программный пакет синтеза РЛИ «КУВ». При этом параметры АФ и подбирались для каждой исследуемой радиоголограммы таким образом, чтобы получить РЛИ с максимально возможным качеством фокусировки. В результате фокусировка РЛИ по этим данным для всех исследованных радиоголограмм давала либо хороший, либо удовлетворительный результат.

Дальнейшая обработка данных заключалась в расчете по $r_1(t)$, $r_2(t)$, $r_0(t)$ средних параметров \bar{r} , \bar{v}_r , \bar{a}_r , \bar{a}'_r и флуктуационной составляющей измерений $\Delta\tilde{r}(mT_{II})$. Полученные таким образом для $r_1(t)$, $r_2(t)$ параметры \bar{a}_{r1} , \bar{a}'_{r1} , $\Delta\tilde{r}_1(mT_{II})$ и \bar{a}_{r2} , \bar{a}'_{r2} , $\Delta\tilde{r}_2(mT_{II})$ сравнивались с эталонными \bar{a}_{r0} , \bar{a}'_{r0} , $\Delta\tilde{r}_0(mT_{II})$, что позволяло судить о точностных характеристиках навигационных измерений, а именно об ошибке вычисления среднего на интервале T_c радиального ускорения $\delta a_{r1} = \bar{a}_{r1} - \bar{a}_{r0}$, $\delta a_{r2} = \bar{a}_{r2} - \bar{a}_{r0}$, его производной $\delta a'_{r1} = \bar{a}'_{r1} - \bar{a}'_{r0}$, $\delta a'_{r2} = \bar{a}'_{r2} - \bar{a}'_{r0}$, и СКО измерения флуктуационной составляющей

$$\begin{aligned}\tilde{\sigma}_{r1} &= \langle \Delta\tilde{r}_1(mT_{II}) - \Delta\tilde{r}_0(mT_{II}) \rangle, \\ \tilde{\sigma}_{r2} &= \langle \Delta\tilde{r}_2(mT_{II}) - \Delta\tilde{r}_0(mT_{II}) \rangle.\end{aligned}$$

Результаты сравнения контролировались визуальной оценкой качества формируемых по этим параметрам РЛИ.

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы и предложения.

1. На интервалах времени до 6,2 с допустима аппроксимация движения ЦМ ЛА и ФЦА БРЛС степенным рядом третьего порядка и флуктуационной составляющей в виде случайного процесса. Любая реализация этого процесса, в свою очередь, может быть аппроксимирована кусочно-квадратичной функцией с шагом 0,2...0,4 с. Этот

вывод подтверждается тем, что представленная таким образом и измеренная алгоритмами АФ траектория движения ФЦА во всех исследованных случаях дает хорошее или удовлетворительное качество фокусировки РЛИ.

2. Система АФ, основанная на кусочно-квадратичной аппроксимации движения ФЦА, во всех случаях обеспечивает лучшее качество выходного РЛИ, чем навигационные данные. Поэтому результат измерения траектории относительного движения ФЦА с ее помощью можно считать эталонным по отношению к навигационным измерениям.

3. Сравнение измерений реализаций относительно высокочастотной (флуктуационной) составляющей перемещений на всех анализируемых интервалах времени, выполненных с помощью ИНС и алгоритмом АФ, показывает схожесть их формы при различиях в амплитуде и начальной фазе (смещении по времени) измеренных колебаний. С большой долей вероятности можно предположить, что указанные отличия вызваны, прежде всего, тем, что измерения проводились для разных точек конструкции ЛА. Для ИНС это точка ее установки вблизи центра масс (ЦМ), для алгоритмов АФ – ФЦА БРЛС.

4. В связи с тем, что измерения проводились в разных точках конструкции ЛА, нельзя достоверно определить какую долю в их отличие вносят ошибки измерения ИНС. Можно только констатировать, что на интервалах времени до 4 с при прямолинейном движении ЛА и до 2...2,5 с при маневре навигационные данные ИНС могут быть использованы для фокусировки РЛИ без всякого пересчета параметров движения из точки установки ИНС в ФЦА БРЛС. Т.е. в этом случае разница в траекториях движения ЦМ и ФЦА, а также ошибки измерения ИНС не превышают четверти длины волны БРЛС.

5. В частности, согласно полученным экспериментальным данным, при ограничениях на движение ЛА в виде заданного прямолинейного равномерного полета ИНС SIGMA95NAA, расположенная в ЦМ, может обеспечить разрешающую способность БРЛС на уровне 3 – 4 м на дальности 92 км, при путевой скорости 150 м/с и угле карты 40° .

6. При маневрировании ЛА и (или) на интервалах времени более 4,5 с данные измерений ИНС становятся непригодными для использования в режимах с ФСА. Причиной этого, прежде всего, следует считать отличия в законах движения ЦМ и ФЦА, которые достигают величин, больших половины длины волны. Попытка пересчета данных ИНС из ЦМ в ФЦА не дает желаемого результата.

7. Пересчет данных из ЦМ ЛА (ИЦ ИНС) в точку ФЦА БРЛС возможен только в предположении жесткой конструкции планера ЛА. Одной из причин неэффективности пересчета данных из ЦМ в ФЦА могут быть изгибные и другие упругие колебания конструкции, учесть которые не представляется возможным.

8. Очевидно, что для расширения условий использования данных ИНС при решении задач микронавигации необходимо расположить ее как можно ближе к ФЦА БРЛС. Это сведет к минимуму различия в траекториях движения инерциального центра ИНС и ФЦА и позволит в полной мере использовать ее измерительные возможности.

Литература

1. Богачев А.С., Толстов Е.Ф. Компенсация траекторных искажений сигналов в радиолокаторах с синтезированной апертурой антенны // Зарубежная радиоэлектроника. – № 3. – 1981.
2. Богачев А.С., Толстов Е.Ф. Современные радиолокационные станции с синтезированной апертурой антенны: Итоги науки и техники. – М.: ВИНТИ, 1986.

3. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В.И. Антипов, В.Т. Горяинов, А.Н. Кулин и др.; Под ред. В.Т. Горяинова. – М.: Радио и связь, 1988.
4. Бабокин М.И., Карпов О.А. Алгоритм автофокусировки РСА по оценке приращения фазы траекторного сигнала. Научно-методические материалы. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1995.
5. Бабокин М.И., Карпов О.А., Толстов Е.Ф. Адаптивная обработка сигналов при синтезировании апертуры антенны в многофункциональных РЛС // Радиотехника. – 2000. – №8.
6. Карпов О.А. Двухэтапная схема автофокусировки в радиолокационной станции с синтезированной апертурой антенны при телескопическом обзоре земной поверхности // Информационно-измерительные и управляющие системы. – № 9. – 2007.
7. Карпов О.А., Вашкевич С.А. Оптимальная адаптивная обработка сигналов в РЛС с цифровым синтезированием апертуры антенны. – Смоленск: Изд. ВА ВПВО ВС РФ, 2005.