

УДК 656.7.081

ПРИМЕНИМОСТЬ ИНФОРМАЦИИ ПРИБОРОВ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ ПРИ РАССЛЕДОВАНИИ АВИАЦИОННЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ

В.М. РУХЛИНСКИЙ, С.В. ЗАЙКО, А.С. ДЯЧЕНКО

В данной статье рассматривается проблема оценки достоверности данных, получаемых в процессе обработки информации приемников спутниковой навигации в рамках расследований авиационных происшествий, связанных с отсутствием штатных средств объективного контроля. Разработаны и внедрены соответствующие рекомендации по совершенствованию вновь разрабатываемых приемников спутниковой навигации.

Ключевые слова: спутниковая навигация, траектория, рекомендации, эксперимент.

Введение

В рамках обеспечения расследований авиационных происшествий (АП), преимущественно с воздушными судами (ВС) 3-го и 4-го класса в авиации общего назначения (АОН), комиссия по расследованию часто сталкивается с отсутствием штатных средств объективного контроля. В таких случаях единственным источником объективной информации о ходе выполнения последнего полета ВС может явиться информация, регистрируемая портативными приемниками спутниковой навигации (ППСН) [1]. Однако данное оборудование не является штатным и на него не распространяются какие-либо требования по обеспечению точности и сохранности информации.

Приемники спутниковой навигации регистрируют траекторную информацию в виде матрицы

$$\begin{pmatrix} T_1 & Lat_1 & Lon_1 & ALT_1 \\ T_2 & Lat_2 & Lon_2 & ALT_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ T_{N-1} & Lat_{N-1} & Lon_{N-1} & ALT_{N-1} \\ T_N & Lat_N & Lon_N & ALT_N \end{pmatrix},$$

где T_i – время момента регистрации данных; Lat_i , Lon_i , ALT_i – широта, долгота и высота местонахождения приемника в момент регистрации данных; $1 \leq i \leq N$, N – количество зарегистрированных точек.

Наличие данной информации (данные точного местоположения ВС в определенные моменты времени) делает возможным расчет ряда нерегистрируемых параметров полета, таких как: путевая скорость полета, приборная скорость полета, путевой угол полета, истинная высота полета, угол наклона траектории, вертикальная скорость полета, угол крена [2; 3]. Одним из наиболее значимых вопросов при использовании такой информации является степень ее достоверности и соответствия фактическим параметрам полета.

Погрешности в определении своего местоположения приборами спутниковой навигации можно разделить на три основные группы факторов. Первая группа факторов связана с принципом работы системы спутниковой навигации и характеризуется параметрами распространения радиосигнала (ионосферные и тропосферные задержки распространения сигнала, многолучевость сигнала, наводки на радиосигнал, геометрическое взаиморасположение спутников относительно абонентской аппаратуры и т.д.). Вторая группа факторов связана с несовершенством элементной базы, применяемой в приемниках спутниковой навигации, т.к., например, в отличие от космических спутников портативные приемники спутниковой навигации оснащаются простыми микросхемами часов, точность которых несравнимо ниже точности спутниковых часов.

Третья группа факторов возникновения погрешности обусловлена логикой работы абонентского оборудования в условиях ухудшения приема спутниковых сигналов.

На сегодняшний день факторы первой и второй группы достаточно хорошо изучены, более того, приборы спутниковой навигации производят расчет и индикацию параметра – расчетная погрешность определения местоположения. Тем не менее ни одна модель ППСН не производит его регистрацию, таким образом, специалисты, выполняющие анализ траекторных данных в ходе расследований АП, не имеют информации о расчетной точности определения местоположения в определенные моменты времени.

Эксперимент определения точности статических измерений местоположения

Основным производителем приборов спутниковой навигации является фирма Garmin. В руководствах по эксплуатации своих приборов точность определения местоположения описывается в степени вероятности попадания 95% производимых измерений в окружность определенного радиуса. Моделям приборов, оснащенных устаревшей элементной базой, присваивается радиус, равный 15 метрам, современным моделям присваивается радиус 5-10 метров.

В целях изучения фактических характеристик работы ППСН авторами было проведено 3 эксперимента, позволивших установить фактические параметры и алгоритмы работы подобных устройств.

В ходе первого эксперимента была оценена достоверность регистрации координат неподвижного объекта. Для осуществления эксперимента оборудование было размещено в месте с заранее известными координатами, после чего в течение 12 часов прибор производил измерения своего местоположения. Всего было произведено 4336 измерений (рис. 1). Имея значения определенных координат в каждый момент времени и значения точных координат места, в котором размещалось оборудование, было построено распределение вероятности величины погрешности измерений (рис. 2).

Подтверждено, что современные модели приемников спутниковой навигации обеспечивают заявленные производителем характеристики точности определения своего местоположения и даже превосходят их, т.к. из графика распределения видно, что 95% измерений попадают в круг радиусом 5,5 метров.

Помимо абсолютного значения мгновенной величины погрешности определения местоположения, важной характеристикой является закон ее изменения. Так как если такое изменение носит хаотичный характер и величина погрешности сопоставима с длиной отрезка траектории ВС, то значения относительной погрешности превысили бы 100%, вследствие чего расчет параметров полета воздушного судна был бы невозможен.



Рис. 1. Графическое представление распределения погрешности определения местоположения абонентской аппаратуры

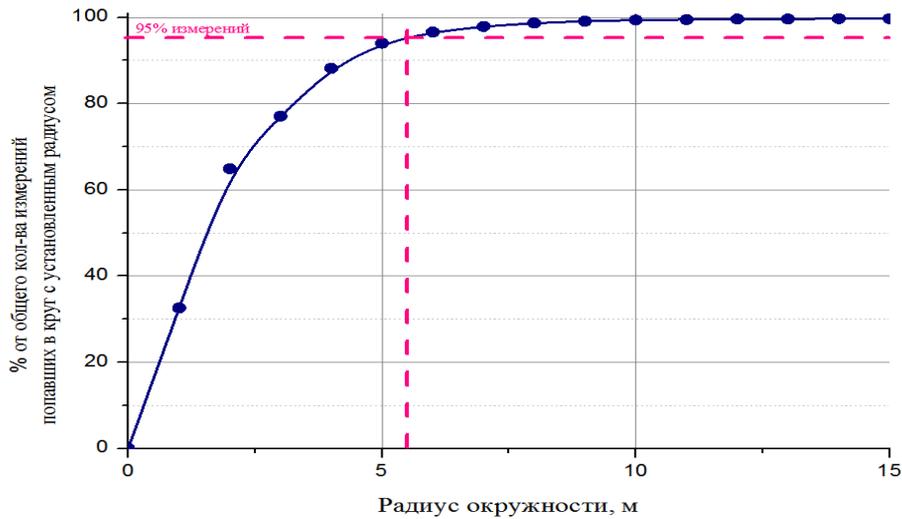


Рис. 2. Распределение величины погрешности определения местоположения в горизонтальной плоскости

На рис. 3. приведен график изменения двух параметров, характеризующих динамику изменения погрешности определения местоположения в горизонтальной плоскости: азимут и дальность до опорной точки (места установки оборудования). Исходя из формы графика видно, что изменение указанных параметров во времени не носит хаотичный характер, т.к. факторы возникновения погрешностей первой и второй группы связаны с физическими законами распространения радиосигналов в атмосфере Земли и связаны с взаимным расположением абонентской аппаратуры и видимых спутников. Изменение данных параметров носит медленно меняющийся характер, что в общем случае не приводит к возникновению скачкообразных изменений погрешностей определения местоположения (не более примерно $\pm 1\text{ м}$ по дальности, $\pm 2^\circ$ по азимуту за измерение). Обычно ППСН настроены таким образом, что регистрация траекторных данных осуществляется с дискретностью в 3-4 с. Таким образом, если ВС движется со скоростью 200 км/ч, относительная погрешность определения путевой скорости составит менее 1% ($< 2\text{ км/ч}$).

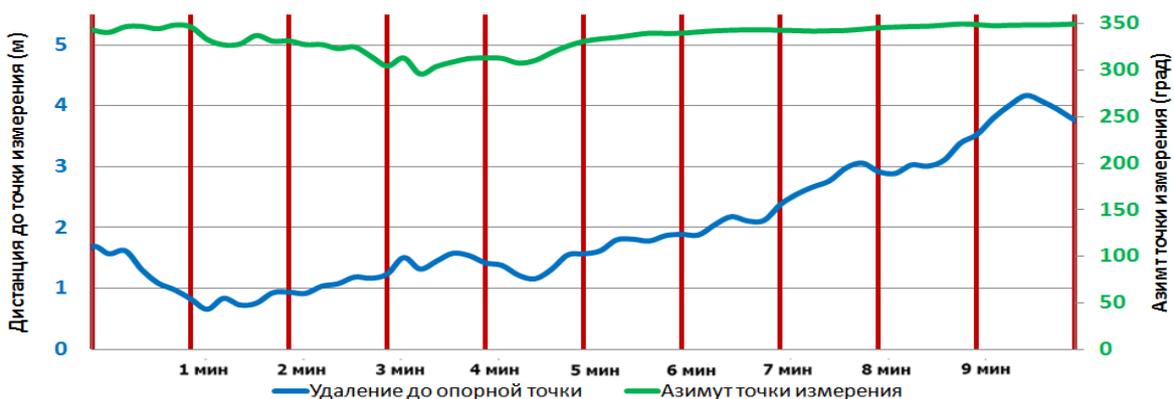


Рис. 3. Изменение характера погрешности определения местоположения во времени

Летный эксперимент оценки достоверности расчетных данных

Рассчитываемыми параметрами полета также являются вертикальная скорость ВС и угол крена. С целью определения достоверности производимых расчетов этих параметров был проведен летный эксперимент, в ходе которого на борту вертолета Robinson R44 была установлена

видеокамера, осуществляющая съемку показаний приборов (высотомера, авиагоризонта, вариометра), и два приемника спутниковой навигации: GARMIN 60CSx и GPSmap 695. По окончании полета по видеозаписи была произведена оцифровка показаний приборов. Выполнен расчет тех же параметров полета по данным приемников спутниковой навигации.

В результате обработки полученной информации выяснено, что в ~ 90% осуществленных измерений (180 из 200) разница расчетных и оцифрованных показаний вертикальной скорости не превысила ± 3 м/с (рис. 4).

Такое же распределение было построено и для расчетных значений угла крена. Установлено, что в ~90% измерений расчетные значения отличались от фактических на величину не более чем 5° (рис. 5). Таким образом, учитывая погрешность оцифровки крена по видеозаписи, расчетные значения достаточно точно соответствуют фактическим.

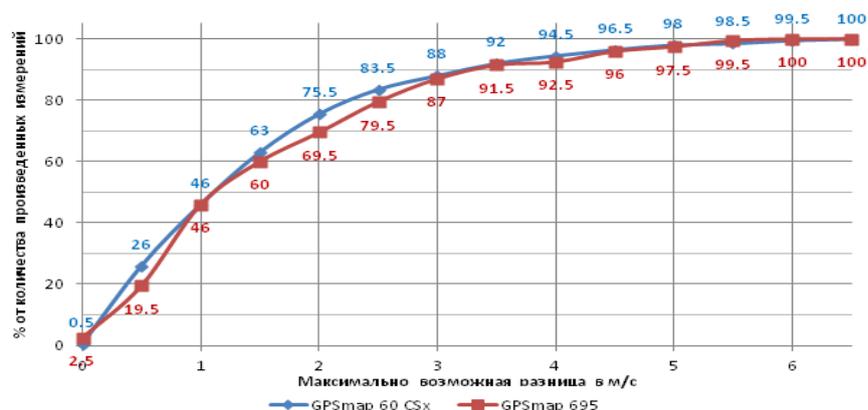


Рис. 4. Распределение величины погрешности расчета вертикальной скорости полета



Рис. 5. Распределение величины погрешности расчета угла крена

Стоит отметить, что расчетные углы крена полета стоит рассматривать только при допущении о том, что на рассматриваемом фрагменте траектории ВС совершало полет без скольжения и изменения высоты, т.к. такие изменения будут увеличивать погрешность такого расчета, производимого по формуле

$$\gamma = \arctan\left(\frac{V^2}{g * R_B}\right),$$

где γ – расчетный угол крена; V – скорость полета ВС; g – ускорение свободного падения; R_B – радиус правильного виража.

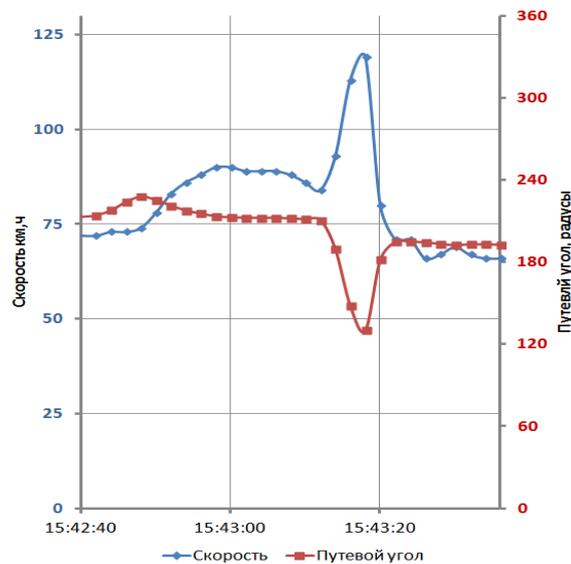
Эксперимент по определению режимов работы приемников спутниковой навигации

Третья группа факторов возникновения погрешностей обусловлена особенностями работы приемников в условиях частичной или полной потери приема спутниковых сигналов. Напри-

мер, при анализе расчетных полетных данных ВС, в ходе выполнения полетов которых антенна ППСН затенялась элементами конструкции, приборы все равно продолжали регистрировать полетные данные, получаемые прибором за счет прогнозирования своего местоположения. С целью исключения подобных фрагментов полетной информации из анализа в ходе расследований авиационных происшествий авторами был произведен эксперимент, демонстрирующий принцип работы оборудования на режимах потери и последующего захвата спутниковых сигналов. На транспортное средство,двигающееся в горизонтальной плоскости, был установлен приемник спутниковой навигации. В определенные моменты времени, соответствующие началу изменения путевого угла движения транспортного средства, антенна прибора демонтировалась и устанавливалась вновь на свое место через определенные интервалы времени. При последующей расшифровке информации приемника было установлено, что в моменты времени отсутствия захвата спутниковых сигналов прибор все же продолжал регистрировать данные своего местоположения (рис. 6а).



а



б

Рис. 6. Режим регистрации траекторных данных при потере и захвате спутниковых сигналов: а – траектория в плане; б – график изменения параметров движения

Упрощенным математическим описанием вычислений, производимых приемниками, является следующая система уравнений

$$\begin{cases} R_1 = Cdt_1 \\ R_2 = Cdt_2 \\ R_3 = Cdt_3 \\ R_4 = Cdt_4 \end{cases} ; \quad \begin{cases} (x_1 - U_x)^2 + (y_1 - U_y)^2 + (z_1 - U_z)^2 = (R_1 - C_B)^2 \\ (x_2 - U_x)^2 + (y_2 - U_y)^2 + (z_2 - U_z)^2 = (R_2 - C_B)^2 \\ (x_3 - U_x)^2 + (y_3 - U_y)^2 + (z_3 - U_z)^2 = (R_3 - C_B)^2 \\ (x_4 - U_x)^2 + (y_4 - U_y)^2 + (z_4 - U_z)^2 = (R_4 - C_B)^2 \end{cases} ,$$

где R_i – псевдодальность до i -го спутника; dt_i – временная задержка полученного сигнала от i -го спутника; U_x, U_y, U_z – координаты приемника; x_i, y_i, z_i – координаты местоположения i -го спутника; C_B – погрешность в определении времени приемником.

Из уравнения следует, что для определения своего точного местоположения приемники рассчитывают псевдодальность до как минимум 4-х объектов - космических спутников с известными координатами. Спутники транслируют два вида радиосигналов: навигационные сообщения (НС), описывающие параметры местоположения спутников на космической орбите, точное время системы и сигналы расчета времени (СРВ). Приемники, получив НС и согласовав свои внутренние часы со временем системы, способны произвести расчет времени, затраченно-

го на прием СРВ. Точность встроенных часов приемников не позволяет рассчитать длительность передачи СРВ с необходимой точностью. Для определения ошибки встроенных часов приемника прибору необходимы сигналы как минимум четырех спутников, за счет чего удается рассчитать дополнительный параметр – погрешность в определении времени приемником.

В ходе анализа различной технической документации установлено, что, помимо непосредственных расчетов для окончательного определения своего местоположения, приемники спутниковой навигации используют ту или иную реализацию фильтра Калмана, выполняющего расчет в две фазы: предсказания координат местоположения в следующий момент времени и корректировку предсказанных на первом этапе значений (в момент времени следующего измерения). Таким образом, при приеме четырех и более спутниковых сигналов прибор корректирует предсказываемые значения вновь рассчитанными (режим 3d-fix). В случае приема сигнала от трех спутников приемник упрощает решаемую систему уравнений и исключает одну переменную – высоту полета ВС, рассчитывая двумерные координаты движения ВС (режим 2d-fix) и прогнозируя значения высоты. При полной потере спутниковых сигналов прибор выполняет только первую фазу расчета координат по фильтру Калмана, выполняя их предсказание (режим предсказания).

Идентификация фрагментов записи, сопровождаемых регистрацией прогнозируемых значений координат местоположения ВС может быть выполнена экспертным путем за счет анализа расчетных параметров, так как в моменты времени захвата спутниковых сигналов и последующей корректировки прогнозируемого местоположения на графиках параметров движения наблюдается скачкообразное изменение расчетных параметров (рис. 6б).

Выводы

1. Проведенные эксперименты, наряду с анализом опыта использования информации ППСН при расследованиях авиационных происшествий, позволяют сделать заключение о том, что расчетные параметры полета, получаемые в процессе обработки траекторной информации, регистрируемой приемниками, в достаточной степени согласуются с фактическими и позволяют соответствующим специалистам производить анализ хода выполнения полетов ВС.

2. В процессе выполнения полета в связи с изменением пространственного положения антенна прибора может затеняться элементами конструкции ВС. В ходе эксперимента выявлено, что в таких случаях оборудование не прерывает регистрацию траекторных данных, а продолжает регистрацию прогнозируемых. Выявлены критерии, позволяющие идентифицировать участки записи полетных данных, сопровождаемые регистрацией прогнозируемых данных о местоположении ВС.

3. Авторами совместно с другими рекомендациями ведущих мировых органов по расследованию АП (NTSB, BEA, AAIB и др.) были сформированы требования к производителям приемников спутниковой навигации по расширению минимального перечня регистрируемой информации данными, позволяющими идентифицировать режимы работы спутниковых приемников. Информация была представлена международной комиссии RTCA (Radio Technical Commission for Aeronautics), занимающейся стандартизацией радиотехнических средств морской и воздушной навигации.

4. Внедрение указанной спецификации производителями приборов спутниковой навигации позволит существенно снизить трудоемкость исследований информации приемников спутниковой навигации в рамках расследований АП в будущем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Приложение 13 к Конвенции о международной гражданской авиации «Расследование авиационных происшествий и инцидентов». - 10-е изд. - Монреаль: ИКАО, 2010.

2. Дяченко А.С. Восстановление и использование информации спутниковых навигационных систем при расследовании авиационных происшествий // 21-й сборник ОРАП. - М., 2009.

3. Рухлинский В.М., Дяченко А.С. Новые методы исследования информации портативных приемников спутниковой навигации при расследовании авиационных происшествий // Научный Вестник МГТУ ГА. - 2011. - № 174 (12). - С.144 – 150.

RELIABILITY OF FLIGHT DATA PROVIDED BY PORTABLE GPS RECEIVERS DURING AIR ACCIDENT INVESTIGATION

Rukhlinskiy V.M., Zayko S.V., Dyachenko A.S.

This article considers the problem of assessment of data authenticity related to reliability of the flight data obtained in processing the information of portable GPS receivers' during air accident investigations, which are characterized by the lack of standard flight data recording systems. Appropriate recommendations the improvement improving of the newly developed GPS receivers have been developed and implemented.

Key words: satellite navigation, trajectory, recommendations, tests.

Сведения об авторах

Рухлинский Виктор Михайлович, 1946 г.р., окончил МАИ им. Орджоникидзе (1973), доктор технических наук, председатель Комиссии по связям с ИКАО, международными и межгосударственными организациями Межгосударственного авиационного комитета, автор более 120 научных работ, область научных интересов - безопасность полетов, эксплуатационно-технические характеристики гражданской авиационной техники и поддержание летной годности самолетов ГА.

Зайко Сергей Владимирович, 1972 г.р., окончил МАИ им. Орджоникидзе (1995), заместитель председателя Комиссии по научно-техническому обеспечению расследований авиационных происшествий Межгосударственного авиационного комитета, президент Общества независимых исследователей авиационных происшествий, автор более 10 научных работ, область научных интересов – безопасность полетов, расследование авиационных происшествий, разработка программно-аппаратного обеспечения обработки информации бортовых регистраторов, анализа динамики полёта ВС.

Дяченко Александр Сергеевич, 1983 г.р., окончил МАИ им. Орджоникидзе (2006), КАЛТУ (2003), начальник отдела Комиссии по научно-техническому обеспечению расследований авиационных происшествий Межгосударственного авиационного комитета, автор 8 научных работ, область научных интересов – безопасность полетов, разработка программно-аппаратных комплексов по восстановлению информации средств объективного контроля, моделирование авиационных происшествий.