

УДК 656.7.052:351.814.335.1

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА КОНТРОЛЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЭШЕЛОНИРОВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЗН-В

Б.В. ЛЕБЕДЕВ, В.В. СОЛОМЕНЦЕВ, А.Н. СТРАТИЕНКО

Проведен анализ методов контроля вертикального эшелонирования. Рассматривается новый метод мониторинга вертикального эшелонирования воздушных судов на основе использования АЗН-В. Построена математическая модель метода и план имитационного эксперимента. Приводятся результаты моделирования и оценка точности предложенного метода. Показана возможность использования метода при достаточной оснащенности воздушных судов средствами АЗН-В. Определены дальнейшие направления исследований.

Ключевые слова: мониторинг, вертикальное, эшелонирование, аэронавигация, АЗН-В.

Введение

В последние годы во многих регионах мира и в Российской Федерации осуществлен переход на сокращенные до 1000 футов (приблизительно 300 м) нормы вертикального эшелонирования (RVSM) на высотах более 29 000 футов (приблизительно 9 000 м) [1]. Переход потребовал не только модернизации высотомерного оборудования воздушных судов (ВС), но и контроля (мониторинга) характеристик измерения и выдерживания высоты в эксплуатационных полетах с пассажирами [2].

Наиболее сложным и важным элементом этого процесса является мониторинг погрешностей бортовых приемников статического давления. Погрешность приемника статического давления никак не проявляет себя при наземных проверках и не ощущается экипажем в полете, но существенно влияет на безопасность полетов в условиях RVSM. Эта погрешность мало изменяется со временем и, единожды возникнув (из-за дефектов приемника или деформации фюзеляжа), будет влиять на безопасность полетов на протяжении значительного промежутка времени, а в случае непринятия корректирующих мер – всю оставшуюся жизнь ВС.

На основании обширных статистических исследований выяснено, что погрешность изменяется в определенных пределах относительно некоторого среднего значения, характерного для каждого отдельного воздушного судна в данных эксплуатационных условиях. Это среднее характерное значение в основном остается неизменным на протяжении многих полетов до того момента, пока не произойдет, например, поломка, или не будет выполнен ремонт, в результате чего изменяются характеристики погрешности. Период времени, в течение которого погрешность остается относительно постоянной в отсутствие какого-либо вмешательства, точно неизвестен, но данные и опыт свидетельствуют о некотором незначительном увеличении абсолютной величины по мере старения системы измерения высоты.

Оценка ошибок пилотирования не представляет технических трудностей. Поэтому основное внимание уделяется контролю погрешностей измерения высоты.

Существующие методы мониторинга

Основной метод, обеспечивающий наибольшую производительность в условиях плотного воздушного движения, использует специальную наземную станцию (НМУ) для измерения геометрической высоты полета с земли. Этот метод не предполагает специального оборудования ВС и какого-либо сотрудничества с экипажем. ВС должно только летать в зоне действия измерителя НМУ (расположенного, как правило, в местах интенсивного воздушного движения). НМУ представляет собой дорогостоящую наземную станцию, обеспечивающую точное изме-

рение высоты с использованием принципов мультилатерации (MLAT).

В другом методе (GMU) используется дифференциальный режим спутниковой навигации. Предполагается, что в полете участвует экспериментатор, который приносит на борт ВС специальный приемник GNSS. Принцип работы следующий: антенны приемника прикрепляются изнутри к иллюминаторам; в полете регистрируются псевдодалности и время; после полета в зарегистрированные псевдодалности вносятся дифференциальные поправки, полученные от специальной наземной инфраструктуры, и вычисляется геометрическая высота.

Также известен метод зондирования атмосферы по давлению – установление связи между геометрической высотой и давлением воздуха (барометрической высотой).

Все применяемые методы сложны и дороги, поэтому ИКАО ставится вопрос о разработке более совершенных методов.

В [3] предложен метод мониторинга вертикального эшелонирования, осуществление которого возможно с использованием данных автоматического зависимого наблюдения (АЗН-В) на борту ВС в интересах эксплуатантов.

Предложения по новому методу мониторинга вертикального эшелонирования с использованием средств АЗН-В

Отметим, что в России реализуются планы внедрения автоматического зависимого наблюдения вещательного типа (АЗН-В). АЗН-В предусматривает передачу с борта ВС и прием наземными станциями различной навигационной информации, включая барометрическую и геометрическую высоту от спутникового навигационного приемника. Эта информация может быть положена в основу существенно нового принципа мониторинга.

Предлагаемый способ основан на том, что при эксплуатации ВС будут часто возникать ситуации, когда два ВС, оборудованные аппаратурой АЗН-В, находятся на относительно небольшом расстоянии друг от друга и обмениваются информацией с наземными станциями. При этом возникают два обстоятельства, упрощающие выполнение мониторинга:

1. Требуется не полная картина о разрезе атмосферы по давлению как в случае НМУ, а только информация о температуре воздуха на высоте полета для пересчета разности геометрических высот двух ВС в разность их барометрических высот.

2. Практически без дополнительных затрат можно получить информацию при обработке большого количества пар, включающих оцениваемое ВС и каждый из встречных, и существенно повысить точность за счет осреднения полученных результатов.

По предлагаемому способу на ВС регистрируется информация о геометрической и барометрической высотах, измеренных штатными высотомерами собственного (оцениваемого) ВС и встречных ВС, а также температура наружного воздуха. Данные регистрируются применительно к парам самолетов. Каждая пара состоит из оцениваемого самолёта и одного из встречных самолётов.

Для i -й пары вычисляется величина δ_i , $i=1, \dots, n$, характеризующая предварительную i -ю оценку погрешности измерения барометрической высоты на оцениваемом самолёте

$$\delta_i = (H_{Гi0} - H_{Гi1}) \frac{T_{cm1}}{T_{\phi1}} - (H_{Би0} - H_{Би1}), \quad i=1, \dots, n, \quad (1)$$

где $H_{Гi0}$, $H_{Гi1}$ – геометрическая высота оцениваемого и i -го встречного самолёта (i -й пары); $H_{Би0}$, $H_{Би1}$ – барометрическая высота по штатному высотомеру оцениваемого и i -го встречного самолёта (i -й пары); T_{cm1} , $T_{\phi1}$ – стандартное и фактическое (измеренное бортовыми приборами) значения температуры наружного воздуха в момент регистрации высот i -й пары.

Величина δ_i будет искажена погрешностями измерений $H_{Гi0}$, $H_{Гi1}$, $H_{Би1}$, $T_{\phi1}$. Важно отметить, что для различных пар, включающих один и тот же оцениваемый ВС, все погрешности, кроме искомой систематической погрешности измерения барометрической высоты на оцениваемом

ВС, можно считать независимыми случайными величинами с нулевым математическим ожиданием. Поэтому для уменьшения влияния случайных погрешностей измерения данные регистрируются применительно к n встречным самолётам (i изменяется от 1 до n).

Полученные по формуле (1) n значений δ_i , $i=1, \dots, n$ осредняются, и осреднённая величина δ принимается за окончательную оценку искомой величины погрешностей штатного измерителя барометрической высоты, что и является целью мониторинга.

Погрешности пересчета разностей геометрических высот в разности барометрических высот непосредственно вычисляются по зарегистрированным данным. Это позволяет повысить точность конечного результата, применяя осреднение с весом ρ_i , $i=1, \dots, n$, зависящим от прогнозируемого уровня погрешностей измерения геометрической высоты и относительного расположения ВС в момент регистрации применительно к каждой паре ВС

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i \rho_i}{\sum \rho_i}. \quad (2)$$

Применение предлагаемого способа позволит сократить расходы на мониторинг в России и в тех странах, где применяются существующие методы. Его единственным недостатком является то, что его применение может быть начато, когда существенная часть парка ВС будет оборудована аппаратурой АЗН-В.

Математическое моделирование метода мониторинга с использованием средств АЗН-В

С целью оценки характеристик метода мониторинга проведено математическое моделирование. Для моделирования использован математический пакет MaplesoftMaple 13. При моделировании использованы следующие входные параметры и допущения:

- ВС является материальной точкой;
- все ВС находятся на одинаковой высоте 11000 м;
- рассматриваемая пара ВС находится в одинаковых атмосферных условиях (давление на высоте полета).

При проведении математического моделирования принято, что систематическая ошибка измерения барометрической высоты оцениваемого ВС является постоянной (рассмотрено 2 случая: $-\Delta H_{\text{сист}} = 50 \text{ м}$ и $\Delta H_{\text{сист}} = -70 \text{ м}$).

При моделировании используется нормальный закон распределения погрешности измерений.

Моделируется случайная ошибка определения барометрической высоты бортового высотомера оцениваемого ВС со среднеквадратическим отклонением (СКО) $\delta_{\text{Бор}} = 20 \text{ м}$.

Систематические ошибки измерения барометрической высоты встречных ВС полагаются случайными. Случайные и систематические ошибки определения барометрической высоты встречных ВС моделируются генератором случайных чисел с СКО $\delta_{\text{в}} = 20 \text{ м}$.

В рамках математической модели рассмотрены два случая случайной ошибки измерения геометрической высоты бортовыми системами встречных и оцениваемого ВС с нулевым математическим ожиданием (МО) и СКО, равными $\delta_{\text{Г}} = 10 \text{ м}$ и $\delta_{\text{Г}} = 50 \text{ м}$.

Процедура моделирования

С помощью генераторов случайных чисел с заданными распределениями формируются массивы показаний барометрической высоты по штатному высотомеру и геометрической высоты по бортовому навигационному приемнику GNSS оцениваемого ВС для каждой анализируемой встречи, а также показаний барометрической высоты по штатным высотомерам

и геометрической высоты по бортовым навигационным приемникам каждого встречного ВС.

Для навигационных приемников задаются случайные погрешности измерения. Для барометрических высотомеров встречных ВС задаются случайные погрешности измерения высоты, а также систематические ошибки.

Для барометрического высотомера оцениваемого ВС задается случайная погрешность измерения высоты. Систематическая ошибка измерения барометрической высоты оцениваемого ВС задается отдельно (как отмечалось выше, рассмотрено 2 случая систематической ошибки – $\Delta H_{\text{сист}} = -50 \text{ м}$ и $\Delta H_{\text{сист}} = 70 \text{ м}$).

Далее для каждой i -й пары ВС $i=1, \dots, n$ вычисляется величина δ_i , характеризующая частную i -ю оценку погрешности измерения барометрической высоты на оцениваемом самолёте.

Полученные значения δ_i $i=1, \dots, n$ осредняются, и осреднённая величина δ принимается за окончательную оценку искомой погрешности штатного измерителя барометрической высоты.

Затем строится зависимость среднеквадратического отклонения оценки погрешностей измерения барометрической высоты бортовым высотомером от количества обработанных встреч.

В процессе математического моделирования получены результаты, которые приведены на рис. 1, 2.

Из рис. 1, 2 видно, как по мере увеличения количества обработанных встреч K оценка погрешности измерения высоты приближается к величине, заданной в качестве исходной систематической ошибки.

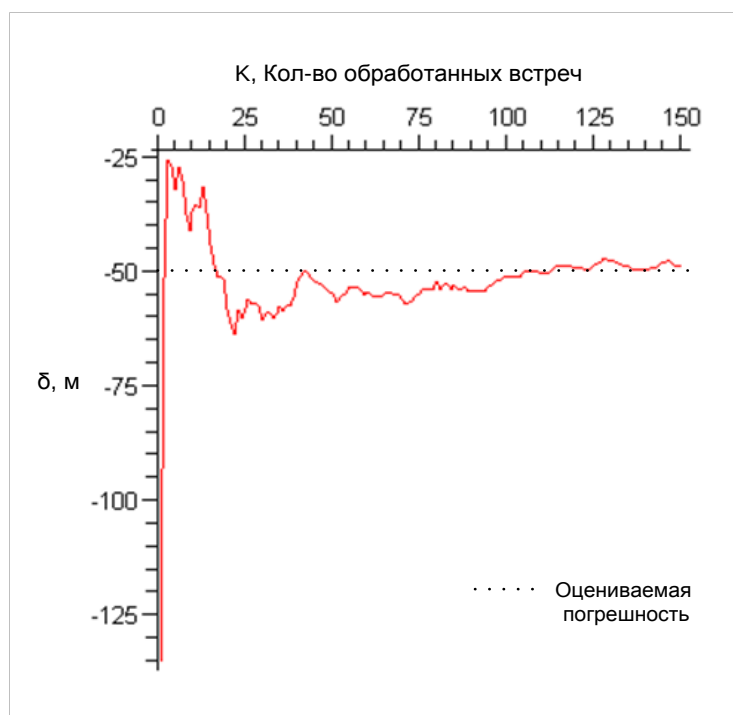


Рис. 1. Повышение точности оценки погрешностей измерения барометрической высоты бортовым высотомером при увеличении количества обработанных встреч при

$$\delta_F = 10 \text{ м} \text{ и } \Delta H_{\text{сист}} = -50 \text{ м}$$

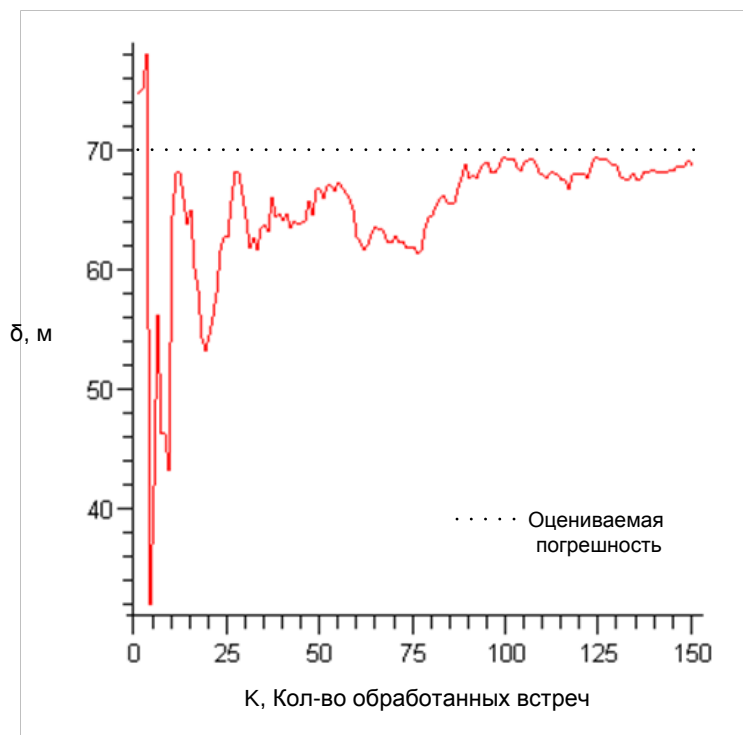


Рис. 2. Повышение точности оценки погрешностей измерения барометрической высоты бортовым высотомером от количества обработанных встреч при $\delta_r = 10$ м и $\Delta H_{\text{сист}} = 70$ м

Анализ результатов моделирования

Анализ результатов моделирования показывает, что по мере увеличения числа встреч погрешность определения систематической составляющей погрешности барометрического высотомера уменьшается.

Количество необходимых встреч зависит от СКО погрешности спутникового навигационного приемника. Так при СКО погрешности навигационного приемника $\delta_r = 10$ м требуемая точность (10 м) обеспечивается уже после 25 обработанных встреч. Погрешность будет уменьшаться примерно обратно пропорционально квадратному корню от количества пар. Учитывая, что количество пар может быть доведено до сотен, то добиться доведения погрешности до требуемой величины (менее 10 м) не представляется проблематичным.

В дальнейшем необходимо исследовать предложенный метод с учетом изменения условий атмосферы для встречающихся ВС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мастер-план Евразия RVSM. Программа внедрения сокращенного минимума вертикального эшелонирования в воздушном пространстве государств Евразии (Казахстан, Кыргызстан, Монголия, Российская Федерация, Таджикистан, Туркменистан, Узбекистан) / *Материалы Целевой группы Евразия RVSM*. М., 2009.
2. ICAO Doc 9574, AN/934. *Руководство по применению минимумов вертикального эшелонирования в 300 м (1000 ft) между ЭП 290 и ЭП 410 включительно*. 2-е изд. Монреаль: ИКАО, 2002.
3. Лебедев Б.В. Мониторинг средств вертикального эшелонирования на основе использования автоматического зависимого наблюдения вещательного типа // *Авиакосмическое приборостроение*. 2003. С. 130.
4. Лебедев Б.В., Лысенко А.А., Соломенцев В.В. Моделирование системы контроля соблюдения сокращенных интервалов вертикального эшелонирования на базе автоматического зависимого наблюдения / *Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества: сб. тезисов докладов*. М.: МГТУ ГА, 2011. С. 185.

ANALYSIS METHOD OF CONTROL VERTICAL SEPARATION OF AIRCRAFT ON THE BASE OF ADS-B

Lebedev B.V., Solomentchev V.V., Stratienko A.N.

The vertical separation monitoring methods have been analyzed. A new method of the aircraft vertical separation monitoring base on ADS-B is considered. Mathematical model of the method and simulation plan are presented. Experimental data are results of the method simulation and evaluates the accuracy of the proposed method. Presented method may be used under conditions of sufficient number ADS-B equipped aircrafts. Future investigations are defined.

Keywords: monitoring, vertical, separation, air navigation, ADS-B.

REFERENCES

1. Master-plan Evrazija RVSM. Programma vnedrenija sokrashhennogo minimuma vertikal'nogo jeshelonirovaniya v vozdušnom prostranstve gosudarstv Evrazii (Kazahstan, Kyrgyzstan, Mongolija, Rossijskaja Federacija, Tadzhikistan, Turkmenistan, Uzbekistan). *Materialy Celevoj gruppy Evrazija RVSM*. M. 2009. (In Russian).
2. ICAO Doc 9574, AN/934. *Rukovodstvo po primeneniju minimumov vertikal'nogo jeshelonirovaniya v 300 m (1000 ft) mezhdu JeP 290 i JeP 410 vključitel'no*. 2-e izd. Monreal': ICAO. 2002. (In Russian).
3. Lebedev B.V. Monitoring sredstv vertikal'nogo jeshelonirovaniya na osnove ispol'zovaniya avtomaticheskogo zavisimogo nabljudenija veshhatel'nogo tipa. *Aviakosmicheskoe priborostroenie*. 2003. P. 130. (In Russian).
4. Lebedev B.V., Lysenko A.A., Solomencev V.V. Modelirovanie sistemy kontrolja sobljudenija sokrashhennyh intervalov vertikal'nogo jeshelonirovaniya na baze avtomaticheskogo zavisimogo nabljudenija. *Grazhdanskaja aviacija na sovremennom jetape razvitija nauki, tehniki i obshhestva: sb. tezisev dokladov*. M.: MGTU GA. 2011. P. 185. (In Russian).

Сведения об авторах

Лебедев Борис Васильевич, 1941 г.р., окончил МЭИ (1967), кандидат технических наук, ведущий специалист ООО «НИК», автор более 10 научных работ, область научных интересов – аэронавигация.

Соломенцев Виктор Владимирович, 1957 г.р., окончил МИЭМ (1980), профессор, доктор технических наук, заместитель генерального директора ОАО «Азимут», заведующий кафедрой вычислительных машин, комплексов, систем и сетей МГТУ ГА, автор более 150 научных работ, область научных интересов – аэронавигация.

Стратиенко Артем Николаевич, 1991 г.р., окончил МГТУ ГА (2014), аспирант МГТУ ГА, область научных интересов – аэронавигация.