

С. Н. Лосев, специалист, В. И. Макаренко, специалист,

Н. Н. Подольская, специалист, podolsky47@inbox.ru, ЗАО "ВНИИРА-ОВД", г. Санкт-Петербург

## Вероятностно-геометрический метод среднесрочного обнаружения конфликтов между воздушными судами

*Представлен метод обнаружения конфликтов между воздушными судами в воздухе на интервале прогнозирования до 20 минут, основанный на сопоставлении текущих планов полета и реализованный в составе системы управления воздушным движением. Метод является комбинированным, сочетающим в себе геометрический и вероятностный алгоритмы.*

**Ключевые слова:** управление воздушным движением, среднесрочное обнаружение конфликтов, безопасность полетов, режим реального времени

### Введение

Несмотря на то что полеты воздушных судов (ВС) выполняются в соответствии с расписаниями, столкновения в воздухе все же случаются. Обеспечение безопасных дистанций между ВС усложнено в современных условиях роста интенсивности воздушного движения. Заблаговременное автоматическое выявление опасности нежелательных сближений является весьма актуальным.

Предположение о конфликте или о недопустимом сближении траекторий ВС, возможном в рамках обозреваемого диапазона времени, базируется на конструировании предполагаемых траекторий. Предполагаемые же траектории ВС подвержены влиянию множества факторов и носят вероятностный характер.

Известные методы обнаружения конфликтов различаются между собой способами манипулирования погрешностями прогнозирования значений параметров движения ВС. Как справедливо отмечается, например, в кратком их обзоре, приведенном в работе [1], вычислительная сложность препятствует практическому использованию этих методов.

В данной работе представлен метод среднесрочного обнаружения конфликтов, который, сочетая подходы к решению задачи как детерминированного, так и вероятностного характера, обеспечивает возможность реализации программы реального времени.

### Этапы обнаружения конфликтов между ВС

На земле обнаружение конфликтов между ВС выполняется в три этапа, соответствующих различным интервалам прогнозирования [1, 2]. Для каждого этапа наиболее информативным является специфический набор данных, соответственно, специфически являются и методы обработки этих данных.

На этапе обнаружения долгосрочных конфликтов (интервал прогнозирования 20...60 мин), когда системе управления воздушным движением (УВД) известен только стратегический (пассивный) план полета ВС, по этому плану строится номинальная траектория. Совокупность таких траекторий анализируется на бесконфликтность. Реальный полет происходит с отклонениями от стратегического плана, и отклонения настолько велики, что учесть их при обнаружении долгосрочных конфликтов невозможно.

На другом полюсе находится этап обнаружения краткосрочных конфликтов (интервал прогнозирования до 2 мин). Здесь движение ВС предполагается равномерным прямолинейным, и для определения области вероятного местоположения ВС важен только текущий вектор путевой скорости и пределы его возможного изменения за малое время. Область неопределенности прогнозирования местоположения имеет вид веера, тем более узкого, чем больше модуль скорости. Плановая информация при этом бесполезна.

На среднесрочном же интервале прогнозирования (2...20 мин) сведения о плановой траектории не учитывать нельзя. В то время, когда ВС уже находится в зоне управления системы или через несколько минут войдет в нее из смежной зоны на известных условиях, или готово к взлету с аэродрома зоны управления, стратегический план полета является устаревшим. В это время его заменяет тактический (активный), динамически обновляемый план полета.

Траектория ВС представляется, в соответствии с планом, в виде ломаной линии, для точек излома которой рассчитаны пространственно-временные координаты. Метод среднесрочного обнаружения конфликтов, базируясь на этих данных, должен учитывать допуски на пространственно-временные координаты траектории. При этом метод должен обеспечивать возможность программной реализации практически непрерывного мониторинга воздушной обстановки.

### Особенности среднесрочного этапа обнаружения конфликтов

Прогнозируемая пространственно-временная траектория ВС постоянно поддерживается в состоянии соответствия новейшей информации об условиях передачи управления ВС от одного субъекта управления к другому, о текущих оценках параметров движения, основанных на обработке радиолокационной информации, и о погоде (о ветре и температуре, влияющих на путевую скорость). Однако ошибки прогнозирования местоположения ВС в наперед заданный момент времени, обусловленные различными физическими процессами, вызывают отклонения от прогнозируемой траектории.

Боковое отклонение от номинальной траектории подчиняется нормальному закону распределения и характеризуется постоянным на всем интервале прогнозирования значением среднеквадратической погрешности, равным примерно 920 м (0,5 морской мили).

Ошибка прогнозируемой путевой скорости также подчиняется нормальному закону распределения и постоянна на всем интервале прогнозирования. Поэтому ошибка прогнозирования продольного местоположения, проистекающая, в основном, из неопределенности оценки путевой скорости и тоже подчиняющаяся нормальному закону распределения, растет с ростом интервала прогнозирования по линейному закону. Если среднеквадратическая погрешность прогнозирования путевой скорости составляет 2,57 м/с (5 узлов), то продольный интервал неопределенности положения ВС  $\pm 3\sigma$  через 10 мин составит примерно 9250 м, через 15 мин — 13 880 м, через 20 мин — 18 500 м.

Этим объясняется 20-минутный потолок области решения задачи среднесрочного обнаружения конфликтов. При этом известно [3], что снижение верхней временной границы с 20 до 15 мин может сократить число ложных тревог на величину до 66 % (при нижней временной границе 8 мин), существенно повышая эффективность обнаружения.

Задачу среднесрочного обнаружения конфликтов нельзя решать при игнорировании неопределенности прогнозирования [2]. Предположим, что сопоставление номинальных траекторий показало, что через 20 мин два ВС окажутся на расстоянии 18 км друг от друга. Такая дистанция сближения может считаться безопасной (стандартное эшелонирование на трассах в Европе составляет 5 морских миль, или 9260 м), и метод, основанный только на сопоставлении номинальных траекторий, покажет, что через 20 мин конфликт не ожидается. Однако области возможного местоположения ВС, размер которых вдоль траектории движения составляет  $\pm 3\sigma$ , могут пересекаться, следовательно, опасное сближение сможет произойти. Поэтому применение такого "метода фиксированных порогов" не корректно, хотя он и используется в некоторых инструментах типа Medium Term Conflict Detection (MTCDD) Евроконтроля<sup>1</sup> [4].

Вместе с тем, можно построить горизонтальные области неопределенности позиций ВС, окружающие их номинальные позиции в рассматриваемый момент времени, и найти минимальное расстояние между областями, после чего сопоставить это расстояние с пороговым. Результатом сопоставления будет декларация либо наличия, либо отсутствия конфликта. Несмотря на то что области неопределенности строятся по принципам теории вероятностей, такой подход к решению задачи, тяготеющий к детерминированному, называется *геометрическим* [5]. Можно сказать, что вероятность конфликта в этом случае принимается равной либо 1, либо 0.

<sup>1</sup> Евроконтроль — Европейская организация по безопасности воздушной навигации.

Подход же, называемый *вероятностным* [5], предполагает конструирование функций плотности вероятности местоположений ВС и обработку этих функций для расчета вероятности сближения ВС на дистанцию, меньшую пороговой.

Предлагаемый метод решения задачи включает два алгоритма, названных нами в соответствии с принадлежностью к указанным подходам геометрическим и вероятностным. По своей роли в решении задачи алгоритмы представляют, соответственно, "базис" метода и его "надстройку".

Геометрический алгоритм обнаружения конфликтов позволяет минимизировать число пропусков конфликтов, ведь, рассматривая области вероятного нахождения ВС в горизонтальной проекции как эллипсы [6], окружающие номинальные местоположения и имеющие оси, длина которых как в продольном, так и поперечном направлениях выбрана в соответствии с Правилом трех сигм, мы охватываем рассмотрение практически всех возможных позиций. А ложные тревоги, с точки зрения безопасности воздушного движения, не так вредны, как пропуски конфликтов.

Вероятностный же алгоритм вычисления вероятности сближения на дистанцию, меньшую пороговой, служит для выработки дополнительной информации, характеризующей меру критичности ситуации [2] и предоставляемой диспетчеру.

Таким образом, метод соответствует требованиям Евроконтроля к системе среднесрочного обнаружения конфликтов [7]:

1. Система должна допускать динамическую эволюцию неопределенности, которая добавляется к параметрам эшелонирования для отражения роста неопределенности по каждой размерности фазы полета при увеличении времени прогнозирования.
2. Система может вычислять вероятность нарушения норм эшелонирования на основе неопределенностей траекторий и их геометрии.

Важным достоинством предлагаемого метода является то, что на его основе создана программа, работающая в режиме реального времени.

### **Геометрический алгоритм среднесрочного обнаружения конфликтов**

Мы сознательно, ради упрощения (подразумеваемая повышение быстродействия), применили адаптацию описанного ранее геометрического подхода, сопровождающуюся увеличением ожидаемой доли ложных обнаружений [8]. Во-первых, вместо эллипса мы рассматриваем описанный прямоугольник. Во-вторых, мы "раздвигали" этот прямоугольник, смещая его стороны параллельно самим себе на величину минимально допустимой дистанции. Теперь не надо искать расстояние между прямоугольниками. Достаточно обнаружить их пересечение, что проще.

Базируясь как на вероятностном, так и на геометрическом подходах, можно было бы рассчитывать номинальные позиции ВС, относящиеся к последовательным моментам времени, отстоящим друг от друга, скажем, на 20 с. Такое пошаговое мо-

делирование, однако, требовало бы большого объема вычислений, который неприемлем при высокой плотности воздушного движения. Кроме того, возможен был бы пропуск самой критической ситуации из-за дискретности "шага". Мы для обнаружения конфликтов применили аналитический расчет.

Траектория ВС в горизонтальной плоскости рассматривается как совокупность отрезков прямых — сегментов. Конфликт пары ВС в горизонтальной плоскости считается, в рамках реализованного геометрического алгоритма, предварительно обнаруженным, если выявлена хотя бы одна пара сегментов траекторий, для которой пересекаются специально построенные области.

Для конструирования области, окружающей сегмент, вначале строится прямоугольник, две стороны которого, перпендикулярные сегменту, проходят через его концы, а две другие, параллельные сегменту, отстоят от него на расстояние  $d$ . Затем строятся полуокружности с центрами в концах сегментов и радиусами, равными  $d$ , дополняющие прямоугольники (рис. 1). При этом  $d$  равно утроенной погрешности бокового отклонения плюс минимально допустимая дистанция горизонтального эшелонирования.

Дальнейшему анализу подвергаются лишь те пары сегментов, которые характеризуются пересечением рассмотренных областей.

Что касается вертикальной плоскости, то если на некотором сегменте траектории запланировано изменение высоты, то точно не известно, как оно будет выполнено. Даже учитывая рекомендуемые принципы возможно более позднего снижения и раннего набора высоты, мы не можем построить определенный вертикальный профиль полета, так как значения вертикальной скорости могут варьироваться. Поэтому в предположении, что для любой точки такого сегмента возможно любое значение высоты в границах планового диапазона, мы для дальнейшего анализа выделяем пары сегментов с пересекающимися диапазонами, предварительно расширенными снизу и сверху на полдистанции между эшелонами.

Считаем, что пара сегментов траектории имеет общий временной интервал, если пересекаются диапазоны времени полета вдоль обоих сегментов: [плановое время пролета начала сегмента минус неопределенность этого времени, плановое время пролета конца сегмента плюс неопределенность этого времени].

Для точки маршрута интервалом прогнозирования времени пролета является разность планового времени пролета и текущего времени. Эта разность умножается на утроенную величину погрешности оценки прогнозируемой путевой скорости и делится на расчетную скорость по плану. Полученный результат составляет неопределенность времени пролета точки.

Если общий временной интервал для пары сегментов найден, то в его пределах можно рассчитать горизонтальные координаты и время наибольшего сближения в горизонтальной плоскости (рис. 2).

Среди зафиксированных в рамках отдельных пар сегментов "наибольших сближений" ищется ис-

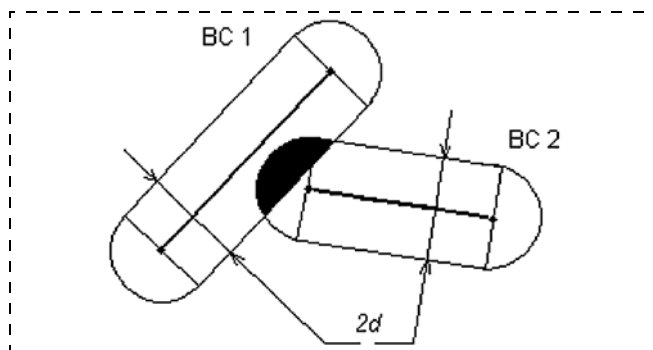


Рис. 1. Обнаружение конфликта в горизонтальной плоскости

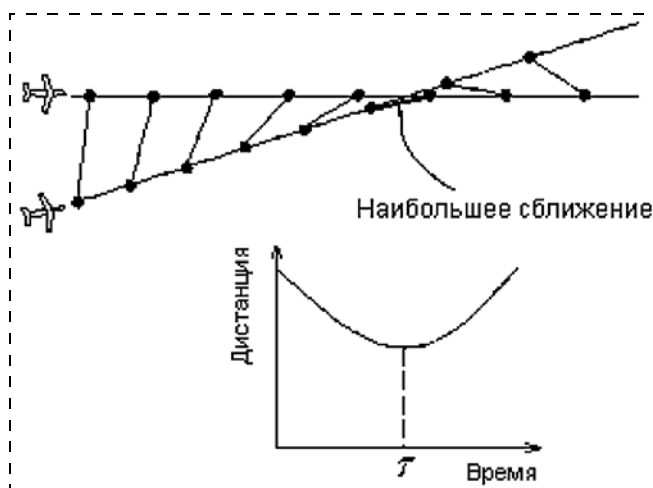


Рис. 2. Определение наибольшего сближения

тинно наибольшее. Его номинальное время считается моментом наибольшего сближения. Такому наибольшему сближению ставится в соответствие положение символа конфликта в окне потенциальных проблем на экране диспетчера.

Для момента наибольшего сближения определяется тип геометрии конфликта. Относительный курс пары ВС в точке наибольшего сближения является базой для классификации взаимодействия как "лобовое сближение" (относительный курс в диапазоне  $135...225^\circ$ ), "догон" ( $\pm 45^\circ$ ) или "пересечение" ( $45...135^\circ$  или  $225...270^\circ$ ) [9]. Индикация геометрии в символе конфликта в окне потенциальных проблем помогает диспетчеру как в построении мысленной картины воздушного движения, так и в принятии решения о действиях. Диспетчер может учесть, к примеру, тот факт, что ВС, движущееся "в лоб", приблизится к опасности быстрее, и поэтому такое сближение требует самых срочных действий.

Момент наибольшего сближения, определенный описанным способом, выбирается для дальнейшего анализа ситуации с применением вероятностного алгоритма.

#### Два алгоритма вычисления вероятности обнаруженного конфликта

Из изложенного ранее следует, что для одного и того же будущего момента времени эллипсы неопределенности местоположения любых ВС в горизон-

тальной плоскости равны по размеру независимо от скоростей.

Следовательно, можно однозначно определить вероятность конфликта (сближения на дистанцию, меньшую пороговой) для

- определенного времени прогноза;
- определенного угла пересечения номинальных траекторий на момент прогноза;
- определенной номинальной дистанции между ВС на момент прогноза.

Эта проблема решена аналитически в работе [10] и развита в работах [11] и [1].

Нашей задачей было построение алгоритма определения вероятности  $P$  сближения на дистанцию, меньшую пороговой  $D$ , для программы МТСД, встроенной в систему УВД как систему реального времени.

Более или менее строгий алгоритм расчета вероятности сближения двух ВС в момент  $t$  на дистанцию, меньшую пороговой дистанции  $D$  (*Алгоритм 1*, проиллюстрированный на рис. 3), включает:

1) вычисление параметров нормальных функций плотности вероятности местоположения каждого ВС на момент  $t$  (среднеквадратические отклонения обеих функций одинаковы);

2) построение областей возможных позиций ВС (таких областей, где ВС могут находиться с вероятностью, близкой к 1);

3) выделение среди всех пар возможных позиций двух ВС (образующих полную группу событий) таких пар, в которых расстояние между позициями меньше  $D$ ;

4) для каждой выделенной пары взвешивание позиции каждого ВС с применением своей функции плотности вероятности и перемножение результатов;

5) суммирование произведений для получения искомой вероятности  $P$ .

Погрешность *Алгоритма 1* обусловлена тем, что области возможного местоположения, во-первых, берутся ограниченными и, во-вторых, дискретизируются.

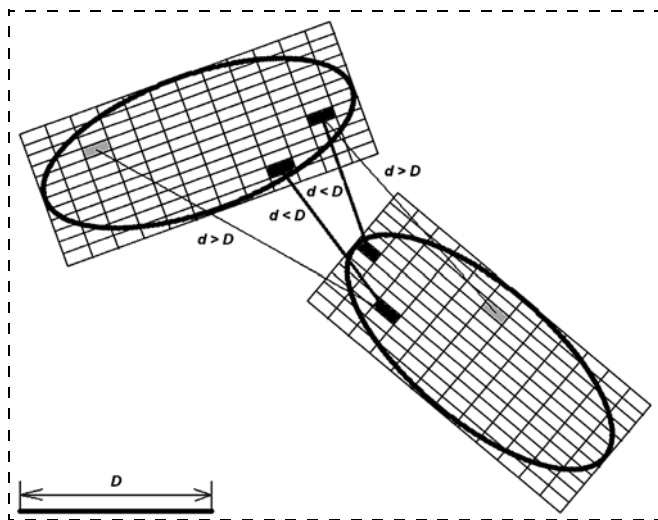


Рис. 3. Пояснение к расчету вероятности конфликта

Что касается размера областей, то если эллипс имеет оси, длина которых в продольном и поперечном направлениях соответствует Правилу трех сигм, то вероятность нахождения объекта в его пределах равна [6]

$$1 - \exp((-3)^2/2) = 0,9889,$$

к тому же, ради простоты вычислений, эллипсы заменены описывающими их прямоугольниками. Шаг дискретизации выбран равным  $\sigma/2$  как для продольного, так для поперечного направлений.

Необходимая для расчетов таблица  $12 \cdot 12$  "весов", базирующаяся на значениях нормальной функции распределения, готовится программой на этапе, предшествующем режиму реального времени работы системы.

Если значение  $D$  задать соизмеримым с размерами ВС, то получим вероятность столкновения.

Другой алгоритм (*Алгоритм 2*) при условии обнаружения конфликта дает завышенное значение вероятности, промежуточное между результатами *Алгоритма 1* и геометрического алгоритма (для последнего  $P = 1$ , если конфликт обнаружен).

Пункты 3—5 *Алгоритма 2* отличаются от одноименных пунктов *Алгоритма 1*:

3) для каждой области из п. 2 определение наибольшей подобласти, для каждой точки которой найдется точка в области вероятного нахождения другого ВС, отстоящая от первой точки ближе, чем на  $D$ ;

4) взвешенное суммирование позиций каждого ВС с применением своей функции плотности вероятности по своей подобласти из п. 3;

5) перемножение сумм для получения искомой вероятности  $P$ .

Произведение в п. 5 в этом случае дает вероятность того, что оба ВС одновременно будут находиться в зонах (упоминаемых как подобласти), которые характеризуются тем, что:

а) нахождение хотя бы одного ВС вне соответствующей ему зоны влечет отсутствие прогнозируемого конфликта;

б) иначе (при нахождении обоих ВС в соответствующих им зонах) для каждого местоположения первого ВС существует некоторая часть зоны второго ВС, где при нахождении там этого второго ВС прогнозируется конфликт, и наоборот.

*Алгоритм 2* пользуется условиями, достаточными для реализации события, но не обязательно необходимыми. *Алгоритм 1* же опирается на необходимые и достаточные условия.

### Выбор алгоритма вычисления вероятности обнаруженного конфликта

Результаты двух разработанных алгоритмов существенно расходятся для "пограничных" конфликтов — таких, где прогнозируемая минимальная дистанция близка к требуемому эшелонированию.

Предположим, что области, где оба ВС могут находиться с вероятностью, близкой к 1, совпадают. Тогда, если параметр  $D$  явно превосходит линейный размер такой области (что характерно для рас-

чета вероятности нарушения норм эшелонирования), то оба алгоритма дадут одинаковый результат, близкий к 1. Если же параметр  $D$  существенно меньше линейного размера области (что характерно для расчета вероятности столкновения), то условие близости позиций в ходе выполнения *Алгоритма 1* будет выполняться не всегда, и его результат окажется точнее результата *Алгоритма 2*.

Например, при размере диагонали ячейки (каждой из 144) 0,54 км вычислялась вероятность столкновения строго встречных ВС. Параметр  $D$ , исходя из здравого смысла, принимался равным не размеру ВС, а превосходящему его размеру диагонали ячейки. Нашлось 938 из 20 736 пар ячеек, которые внесли вклад в результат *Алгоритма 1*. Сама результирующая вероятность оказалась равной 0,13. В то же время *Алгоритм 2* дал вероятность столкновения 0,99.

Мы сочли целесообразным выбрать для практического применения *Алгоритм 2*, чтобы избежать тонкой обработки грубой исходной информации.

В окне потенциальных проблем, по требованию диспетчера, символы потенциальных проблем маркируются в соответствии либо с уровнями вероятности сближения на дистанцию, меньшую пороговой (сама дистанция задается при настройке конфигурации системы), либо с уровнями угрозы столкновения. Каждому виду маркировки соответствуют три уровня.

### Заключение

Представленный метод среднесрочного обнаружения конфликтов является комбинированным. Использование геометрического алгоритма практически исключает пропуски конфликтов. Анализ возможных конфликтов с применением вероятностного алгоритма дает дополнительные показатели критичности ситуации.

Соответствующая программа функционирует в составе действующей системы УВД в аэропорту Минска, Республика Беларусь, предоставляя дис-

петчеру посредством окна потенциальных проблем большой набор сведений о прогнозируемой воздушной обстановке.

### Список литературы

1. Wang J., Wang B., Zhao Y. A probabilistic algorithm to Medium-Term Conflict Detection with multi-waypoints // Applied Mechanics and Materials. 2013. V. 411–414. P. 2763–2769.
2. Prandini M., Watkins O. J. Probabilistic aircraft conflict detection // Distributed Control and Stochastic Analysis of Hybrid Systems Supporting. Safety Critical Real-Time Systems Design (HYBRIDGE). May 2005. URL: <http://web.maths.unsw.edu.au/~peterdel-moral/aircraft-conflict.pdf> (дата обращения 19.01.2015).
3. Alam S., Abbass H. A., Lokan C. J., Ellejmi M., Kirby S. Computational red teaming to investigate failure patterns in Medium Term Conflict Detection // Proceedings of 8th Eurocontrol Innovative Research Workshop (Brétigny-sur-Orge, France, December 2009). URL: [http://www.eurocontrol.int/ecc/gallery/content/public/documents/Innovative\\_Studies/grants/Computational%20Red%20Teaming%20to%20Investigate%20Failure%20Patterns%20in%20Medium%20Term%20Conflict%20Detection.pdf](http://www.eurocontrol.int/ecc/gallery/content/public/documents/Innovative_Studies/grants/Computational%20Red%20Teaming%20to%20Investigate%20Failure%20Patterns%20in%20Medium%20Term%20Conflict%20Detection.pdf) (дата обращения 19.01.2015).
4. GRAFFICA eDEP Development Project. DETAILED DESIGN DOCUMENT. 26 March 2010. URL: [http://www.eurocontrol.fr/projects/edep/documents/9.1/eDEP\\_GRD\\_DDD.pdf](http://www.eurocontrol.fr/projects/edep/documents/9.1/eDEP_GRD_DDD.pdf) (дата обращения 19.01.2015).
5. Bakker G. J., Kremer H. J., Blom H. A. P. Probabilistic Approaches Toward Conflict Prediction // NLR-TP-2001-634. National Aerospace Laboratory, NLR. 2001. URL: <http://reports.nlr.nl:8080/xmlui/bitstream/handle/10921/804/TP-2001-634.pdf?sequence=1> (дата обращения 19.01.2015).
6. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969.
7. Eurocontrol Specification for Medium-Term Conflict Detection // EUROCONTROL-SPEC-0139. Edition Number: 1.0. Edition Date: 15.07.2010. URL: <http://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/20100715-mtcd-spec-v1.0.pdf> (дата обращения 19.01.2015).
8. Подольская Н. Н. Метод обнаружения среднесрочных конфликтов между воздушными судами на основе планов полета // Проблемы качества, безопасности и диагностики в условиях информационного общества: Матер. Науч.-практ. конф. КБД-Инфо—2004 (Сочи, 1—10 окт. 2004 г.). М.: МИЭМ, 2004. С. 114.
9. Pember S. J., Roberts A. L. U. Air traffic control // EP 2372672 A2. EUROPEAN PATENT APPLICATION. Date of publication: 05.10.2011. Bulletin 2011/40.
10. Irvine R. A Geometrical approach to conflict probability estimation // Air Traffic Control Quarterly. 2002. V. 10, N. 2. P. 85–113.
11. Irvine R. Target miss distance to achieve a required probability of conflict // ATM 2003 R & D Conference (Budapest, June 2003). URL: [http://www.atm-seminar.org/past-seminars/5th-seminar-budapest-hungary-iune-2003/papers/paper\\_075](http://www.atm-seminar.org/past-seminars/5th-seminar-budapest-hungary-iune-2003/papers/paper_075) (дата обращения 19.01.2015).

## Probabilistic-Geometric Method for a Medium Term Conflict Detection in Air Traffic Control

S. N. Losev, V. I. Makarenko, N. N. Podolskaya, podolsky47@inbox.ru  
VNIIRA-OVD Co., St. Petersburg, 199106, Russian Federation

Received on December 26, 2014

*The authors present a method for detection of conflicts in airspace within look-ahead time of 20 minutes, based on analysis of the current flight plans. It combines both geometric and probabilistic approaches, and contains, respectively, geometric and probabilistic algorithms. The geometric conflict detection algorithm is the basis of the method. It views an aircraft trajectory as a series of straight line segments between the route points. In addition, it handles the dynamic evolution of the trajectory uncertainty with increasing look-ahead time. This algorithm ensures minimization of the number of conflicts due to estimation of the distances in almost entire areas of the predicted aircraft positions. The algorithm for calculation of conflict probability forms a superstructure of the method. It estimates the probability level of an event, when the distance between the two conflict aircraft is less than the threshold value of the minimal approach time. This algorithm produces a supplementary indicator of a situation criticality. Two algorithms of probabilistic kind were developed and tested. Their results differ only in case when*

the predicted minimal approach distance is approximately equal to the threshold value. The algorithm, which gives greater value to the probability level, is chosen. The method is fully analytical, so it does not need step-by-step simulation. The appropriate computer program is used as a part of the Air Traffic Control system in the airport of Minsk, Belarus, providing to the controllers a considerable amount of information on the predicted air situations.

**Keywords:** air traffic control, medium term conflict detection (MTCD), flight safety, aircraft conflict probability, real-time mode

For citation:

Losev S. N., Makarenko V. I., Podolskaya N. N. Probabilistic-Geometric Method for a Medium Term Conflict Detection in Air Traffic Control, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 4, pp. 277–282.

DOI: 10.17587/mau.16.277-282

### References

1. Wang J., Wang B., Zhao Y. A probabilistic algorithm to Medium-Term Conflict Detection with multi-waypoints, *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 411–414, pp. 2763–2769.
2. Prandini M., Watkins O. J. Probabilistic aircraft conflict detection, *Distributed Control and Stochastic Analysis of Hybrid Systems Supporting. Safety Critical Real-Time Systems Design (HYBRIDGE)*, May 2005, available at: <http://web.maths.unsw.edu.au/~peterdelmoral/aircraft-conflict.pdf> (date of access 19.01.2015).
3. Alam S., Abbass H. A., Lokan C. J., Ellejmi M., Kirby S. Computational red teaming to investigate failure patterns in Medium Term Conflict Detection, *Proc. of 8th Eurocontrol Innovative Research Workshop* (Bretigny-sur-Orge, France, December 2009), available at: <http://www.eurocontrol.int/eec/gallery/content/public/documents/InnovativeStudies/grants/Computational%20Red%20Teaming%20to%20Investigate%20Failure%20Patterns%20in%20Medium%20Term%20Conflict%20Detection.pdf> (date of access 19.01.2015).
4. GRAFFICA eDEP Development Project. DETAILED DESIGN DOCUMENT. 26 March 2010, available at: [http://www.eurocontrol.fr/projects/edep/documents/9.1/eDEP\\_GRD\\_DDD.pdf](http://www.eurocontrol.fr/projects/edep/documents/9.1/eDEP_GRD_DDD.pdf) (date of access 19.01.2015).
5. Bakker G. J., Kremer H. J., Blom H. A. P. Probabilistic Approaches Toward Conflict Prediction. NLR-TP-2001-634. National

Aerospace Laboratory, NLR. 2001, available at: <http://reports.nlr.nl:8080/xmlui/bitstream/handle/10921/804/TP-2001-634.pdf?sequence=1> (date of access 19.01.2015).

6. Wentzel E. S. *Teoriya veroyatnosti* (Probability theory), Moscow, Nauka, 1969 (in Russian).

7. Eurocontrol Specification for Medium-Term Conflict Detection, EUROCONTROL-SPEC-0139. Edition Number: 1.0. Edition Date: 15.07.2010, available at: <http://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/20100715-mtcd-spec-v1.0.pdf> (date of access 19.01.2015).

8. Podolskaya N. N. Metod obnaruzheniya srednesrochnykh konfliktov mezhdru vozdushnymi sudami na osnove planov poleta (A medium term conflict detection method using flight plans), *Problems of quality, safety and diagnostics in the of information society environment, materials of sci.-pract. conference KBD-Info—2004* (Sochi, Russia, 1–10 Oct. 2004), Moscow, published by MIEM, 2004, p. 114 (in Russian).

9. Pember S. J., Roberts A. L. U. Air traffic control, EP 2372672 A2. EUROPEAN PATENT APPLICATION. Date of publication: 05.10.2011. Bulletin 2011/40.

10. Irvine R. A Geometrical approach to conflict probability estimation, *Air Traffic Control Quarterly*, 2002, vol. 10, no. 2, pp. 85–113.

11. Irvine R. Target miss distance to achieve a required probability of conflict, *ATM 2003 R & D Conference* (Budapest, June 2003), available at: [http://www.atm-seminar.org/past-seminars/5th-seminar-budapest-hungary-june-2003/papers/paper\\_075](http://www.atm-seminar.org/past-seminars/5th-seminar-budapest-hungary-june-2003/papers/paper_075) (date of access 19.01.2015).

Corresponding author:

Nonna Podolskaya, specialist, "VNIIRA-OVD" JSC, St. Petersburg, 199106, Russian Federation, e-mail: podolsky47@inbox.ru

УДК 626.02.008

**В. Ф. Филаретов**<sup>1, 2</sup>, д-р техн. аук., проф., зав. лаб., [filaret@pma.ru](mailto:filaret@pma.ru),

**А. В. Зуев**<sup>1, 2</sup>, канд. техн. наук, мл. науч. сотр., [zuev@iacp.dvo.ru](mailto:zuev@iacp.dvo.ru),

**А. Н. Жирабок**<sup>2, 3</sup>, д-р техн. аук., проф., [zhirabok@mail.ru](mailto:zhirabok@mail.ru),

**А. А. Проценко**<sup>2</sup>, инженер, [pro293133@gmail.com](mailto:pro293133@gmail.com), **В. Subudhi**<sup>4</sup>, Professor, [bidyadharnitrkl@gmail.com](mailto:bidyadharnitrkl@gmail.com)

<sup>1</sup> Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, 690041, г. Владивосток

<sup>2</sup> Дальневосточный федеральный университет, Владивосток,

<sup>3</sup> Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток,

<sup>4</sup> National Institute of Technology Rourkela, India

## Метод синтеза систем непрерывной аккомодации к дефектам в навигационно-пилотажных датчиках автономных подводных роботов

Обсуждается метод синтеза высококачественных систем непрерывной аккомодации к дефектам, возникающим в навигационно-пилотажных датчиках движущихся автономных подводных роботов. Предложенный метод основан на использовании кинематических моделей этих роботов и специального комплексирования данных, получаемых от их бортовых датчиков. Достоинством метода является простота реализации и высокая точность компенсации выявляемых дефектов в условиях неопределенности и существенной переменности параметров окружающей среды.

Представлены результаты моделирования, подтверждающие высокую эффективность функционирования синтезированной системы аккомодации.

**Ключевые слова:** автономный подводный робот, дефект, навигационно-пилотажные датчики, диагностирование, аккомодация