

УДК 621.39

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ
ИССЛЕДОВАНИИ ТОЧНОСТИ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ
ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПО
СИГНАЛАМ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ***И. И. Дроздова, А. Д. Обухова,
Д. В. Синочкин, О. А. Сафарьян*

Донской государственный технический
университет, г. Ростов-на-Дону, Российская
Федерация

irina_23011995@mail.ruAngel_7v@mail.ruVezon4ik@gmail.comsafari_2006@mail.ru

Рассматривается проблема передачи информации в пилотажно-навигационном комплексе (авиатакси), связанная с зависимостью точности передаваемых данных от стабильности частоты генераторов. Выявлена актуальность темы, проведен ее анализ и предложены возможные варианты решения данной задачи, один из которых состоит в повышении точности оценивания частоты генераторов. Выявлена зависимость стабильности частоты генераторов от их количества. Предложено решение проблемы приземления авиатакси на взлетно-посадочные полосы с использованием сигналов базовых станций. Составлена система уравнений, определяющая положение авиатакси, и показано, что при использовании большего числа генераторов их нестабильность может быть уменьшена и соответственно повышена точность и безопасность приземления авиатакси.

Ключевые слова: базовая станция, авиатакси, сигнал, генераторы, радиосвязь, стабильность частоты.

Введение. В настоящее время инфокоммуникационные технологии все шире применяются в различных отраслях. В связи с этим повышаются требования к качеству радиосвязи и точности

UDC 621.39

**MATHEMATICAL MODELING IN THE
STUDY OF DETERMINATION ACCURACY
OF THE POSITION OF AN AIRCRAFT BY
THE SIGNALS FROM BASE STATIONS***I. I. Drozdova, A. D. Obukhova,
D. V. Sinochkin, O. A. Safaryan*

Don State Technical University, Rostov-on-Don,
Russian Federation

irina_23011995@mail.ruAngel_7v@mail.ruVezon4ik@gmail.comsafari_2006@mail.ru

This paper considers the problem of transmission of information in flight-navigation complex (air taxi) related to the dependence of accuracy of data transmitted on the frequency stability of the generators. It identifies the relevance of the topic. The authors have conducted the analysis and proposed possible solutions to this problem. One of these solutions is to increase the accuracy of estimation of generators frequency. The dependence of the stability of generators frequency on this amount is determined. The solution to the problem of air taxi landing, taxiing on the runway using signals of base stations is proposed. The system of equations that determines the position of the air taxi is made. It is shown that in using a larger number of generators, their instability can be reduced and, accordingly, it improves the accuracy and safety of air taxi landing.

Keywords: base station, air taxi, signal, generators, radio communication, frequency stability.

определения координат, что связано с улучшением таких показателей, как надежность генераторов, стабильность частот, время установки частоты, уровень фазовых шумов.

Широкое применение высокостабильные генераторы находят в составе базовых станций (БС) систем сотовой связи. При этом в пределах городской застройки обеспечивается высокая плотность размещения.

Кроме того, повышение стабильности частоты колебаний генераторов представляет значительный теоретический и практический интерес для развития пилотажно-навигационного комплекса перспективных летательных аппаратов. Такими летательными аппаратами являются авиатакси [1]. Это средство передвижения набирает популярность, так как представляет собой удобный способ путешествия на малые и средние расстояния. Зачастую в качестве летательного аппарата, осуществляющего перевозку пассажиров из пункта отправки в пункт назначения, выступают вертолеты малой и средней грузоподъемности, а также малолитражные одно- или двухдвигательные самолеты.

Постановка задачи. В настоящее время авиатакси не находит широкого распространения. Одна из причин — отсутствие необходимого количества аэродромов или иная взлетно-посадочных площадок. Однако современные города быстро превращаются в крупные мегаполисы с большим количеством небоскребов. Это позволяет использовать крыши зданий в качестве взлетно-посадочных площадок.

Примеры создания взлетно-посадочных площадок на крышах сооружений различного назначения приведены на рис. 1–3.

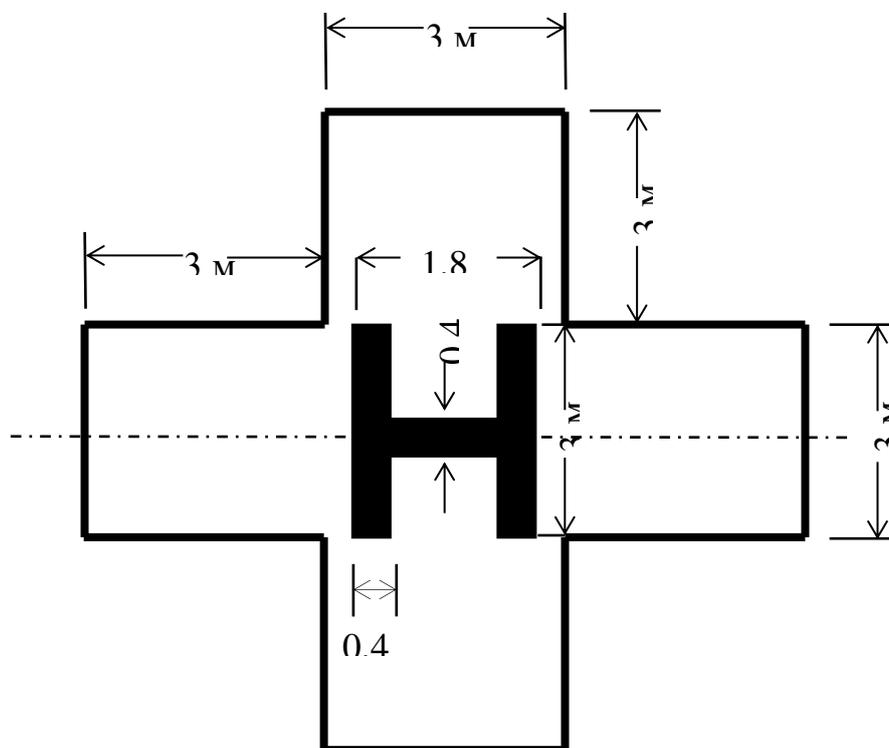


Рис. 1. Рабочая площадь посадочной площадки

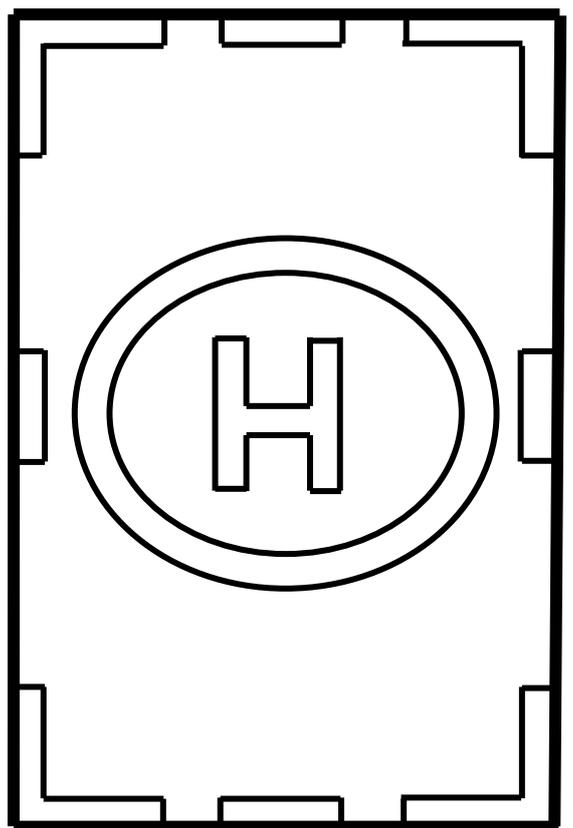


Рис. 2. Схема взлетно-посадочной площадки

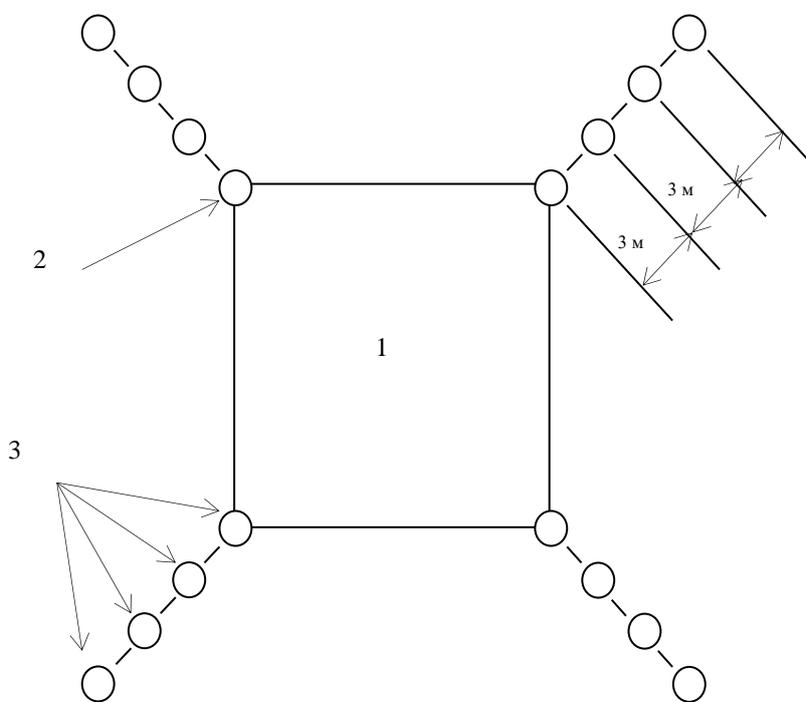


Рис. 3. Общая схема взлетно-посадочной площадки: 1 — рабочая площадь посадочной площадки; 2 — усеченный конус или призма; 3 — флажки-ориентиры, или дорожный сигнальный конус, или автопокрышки

Как видно на представленных выше рисунках, взлетно-посадочная площадка имеет небольшие размеры. Если учитывать особенности ее размещения на крыше небоскреба в мегаполисе, то задача точной передачи информации с земли на воздушное судно представляется чрезвычайно важной.

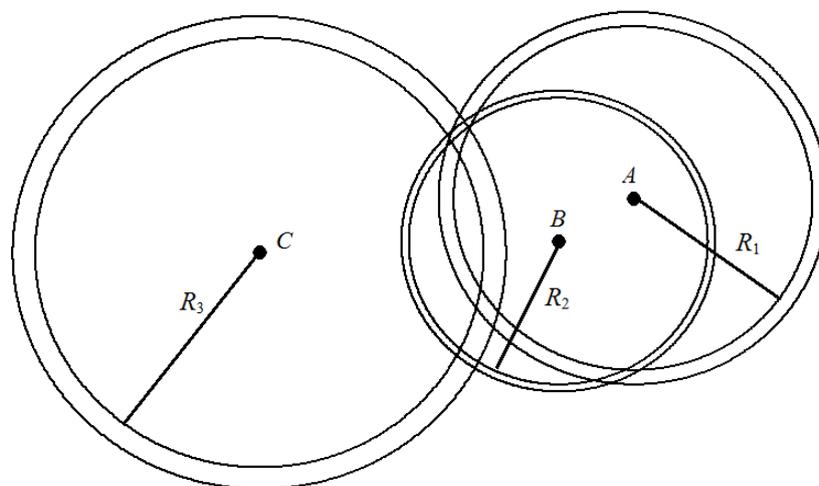
Проведенный анализ показывает, что развитие авиатаксы невозможно без высокой точности определения положения летательного аппарата в условиях плотной городской застройки. Данная задача может быть решена с использованием сигналов базовых станций, положение которых известно с высокой точностью.

Целью представленного исследования является разработка метода повышения точности определения положения авиатаксы на местности или в пространстве за счет использования высокостабильных сигналов базовых станций системы сотовой связи.

Теоретическая часть. Точное определение координат объекта на местности — востребованная и активно предлагаемая услуга. Широко распространен спутниковый мониторинг, изначально разработанный для морского флота, авиации и других транспортных систем, нуждающихся в определении местонахождения в реальном времени. Для оптимального построения маршрута используется система ГЛОНАСС. Системы мониторинга транспорта позволяют повысить безопасность перевозок и избежать сбоев в графиках поставок. Достигаемая с использованием указанных услуг точность определения положения объекта во многих случаях является достаточной. Однако для авиатаксы с учетом размеров взлетно-посадочных площадок эта точность недостаточна.

Внедрение радиотехнических систем позволяет снизить себестоимость процесса определения местоположения. Например, услуги по определению координат абонента предлагают операторы сотовой связи [2, 3]. Это предполагает автоматическое определение местоположения объекта в зоне доступа сотовых сетей. Под «местоположением» в данном случае следует понимать не нахождение географических координат (что тоже возможно), а однозначную идентификацию нахождения абонента на электронной карте.

Реализация данной услуги основана на постоянном обмене информацией между мобильным устройством и БС [4]. Аналогичным образом происходит определение местоположения авиатаксы. Общий случай взаимного расположения определяемого объекта и БС представлен на рис. 4.



a)



б)

Рис. 4. Геометрическое представление способа определения координат: взаимное расположение определяемого объекта и БС (а); местоположение объекта (б)

Для определения координат в сотовых сетях с использованием БС существует достаточно эффективный способ, называемый «время прибытия» (*Up Link Time Of Arrival, UL-TOA*), основанный на расчете времени прохождения сигнала сразу от трех БС [5]. Геометрическое объяснение способа показано на рис. 4, где точки *A*, *B* и *C* обозначают БС. Расстояние между двумя концентрическими окружностями определяет точности измерения расстояний ΔR_1 , ΔR_2 и ΔR_3 соответственно.

Синхронность времени на всех трех БС является основным условием работы. При получении запроса от авиатакси три БС одновременно передают время его получения в центр расчета координат [6]. Чтобы получить текущее местонахождение объекта, достаточно решить систему уравнений. Используемая система определения местоположения получила название «наблюдаемая разница во времени» (*Enhanced Observed Time Difference, E-OTD*). При ее использовании измеряется время одновременного прохождения сигнала от БС до авиатакси, а также до другой известной точки БС, называемой «точка измерения местоположения» (*Location Measurement Unit, LMU*).

Для точного расчета координат на плоскости необходимо как минимум три БС.

Существуют два метода определения координат: дальномерный (на основе измерения дальности до источника) и разностно-дальномерный (на основе определения разности расстояний). Их отличие заключается в степени погрешности определения координат, заложенных в расчет, а также изначальном положении объекта относительно БС. Для дальнейшей работы выбран дальномерный метод определения координат (*E — OTD — C*). При расчетах используются перечисленные ниже величины.

— *Aviataxi Observed Time (AOT)* — время, за которое сигнал приходит от БС до авиатакси. Время рассчитывается согласно показаниям часов объекта.

— *Location Observed Time (LOT)* — время, за которое сигнал приходит от БС до контрольной точки измерений. Время рассчитывается согласно показаниям часов точки измерения (БС).

— *Distance from AS to BTS (DAB)* — геометрическое расстояние от авиатакси до БС.

— *Distance from LMU to BTS (DLB)* — геометрическое расстояние от контрольной точки измерений до БС.

Эти величины связаны между собой следующим образом:

$$DAB - DLB = v \cdot (AOT - LOT + \varepsilon),$$

где v — скорость распространения радиоволн; ε — величина смещения времени между внутренними часами авиатакси и часами контрольной точки [7].

Такое уравнение составляется для каждой из БС ввиду того, что в системе присутствует три неизвестные величины: координаты авиатакси (x , y) и величина смещения. Таким образом, получается, что для решения системы уравнений необходимым и достаточным условием является наличие именно трех БС. Приблизительное положение объекта определяется пересечением трех

окружностей, в каждой из которых центром является БС. Радиусы окружностей определяются как время прохождения сигнала от БС до объекта и обратно.

В заключение необходимо отметить, что для внедрения данной технологии требуются затраты лишь на сетевую часть инфраструктуры, замена терминалов авиатранспорта не является необходимым условием. Все это позволяет считать *E-OTD* достаточно взвешенным решением, которое наверняка будет пользоваться спросом.

Для уменьшения степени погрешности определения координат необходимо уменьшение ошибки измерения расстояния от терминала до БС. В этом случае для определения координат объекта на плоскости возможен переход к трем БС.

На основе результатов измерений запишем систему уравнений для определения координат объекта на плоскости:

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = (R_1)^2, \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = (R_2)^2, \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = (R_3)^2. \end{cases}$$

Влияние отклонения частот генераторного оборудования проявляется в точности измерения дальностей R_1 , R_2 и R_3 [8]. Для установления взаимосвязи ошибки определения координат объекта на местности и точности измерения дальности необходимо учесть, что:

$$\begin{aligned} \Delta x &= v \left[\left(\frac{\delta x}{\delta R_1} \right)^2 + \left(\frac{\delta x}{\delta R_2} \right)^2 + \left(\frac{\delta x}{\delta R_3} \right)^2 \right]^{1/2} \cdot \Delta t, \\ \Delta y &= v \left[\left(\frac{\delta y}{\delta R_1} \right)^2 + \left(\frac{\delta y}{\delta R_2} \right)^2 + \left(\frac{\delta y}{\delta R_3} \right)^2 \right]^{1/2} \cdot \Delta t. \end{aligned}$$

Для проведения расчетов были выбраны три базовые станции в г. Ростове-на-Дону, находящиеся в Ворошиловском и Октябрьском районах. Взаимный расчет между БС составляет:

- БС 1–2 — 1,67 км,
- БС 1–3 — 1,78 км,
- БС 2–3 — 2,19 км.

Расчеты проводились с использованием программы MathCad. Точность определения положения объекта на местности составила: $\Delta x = 0,21$ м, $\Delta y = 0,18$ м при среднеквадратичном отклонении от истинного положения $\Delta R = 0,28$ м. Указанная точность определения местоположения объекта на местности позволяет посадить летательный аппарат (авиатакси) на площадку, расположенную на крыше здания.

Заключение. Проведенное исследование показало взаимосвязь стабильности частот генераторов и характеристик передачи информации в радиотехнических системах. Использование способов стабилизации частоты позволяет добиться указанных значений стабильности даже для генераторов с собственной относительной нестабильностью 10^{-6} . В этом случае стабильность генераторов при использовании второго способа будет повышена в \sqrt{N} раз (N — число генераторов в системе) и соответственно снижена вероятность битовой ошибки при передаче цифровой информации по каналу связи системы передачи данных. При этом требуемая для системы связи стабильность частоты генераторов будет достигаться в системе из 100 одновременно и независимо работающих генераторов. В системах сотовой связи число генераторов совпадает с числом абонентов и составляет тысячи в пределах каждой соты. Таким образом, предложенный способ позволяет без использования сложных и дорогих высокостабильных опорных генераторов значительно повысить качество передачи данных, в том числе и качество связи.

Библиографический список

1. Дугин, Г. С. Перспективы использования деловой авиации и авиатакси в России / Г. С. Дугин // Вестник транспорта. — 2006. — № 5. — С. 33–35.
2. Алгоритм оценки частот генераторов в системах телекоммуникаций / Д. Д. Габриэльян [и др.] // Современные проблемы радиоэлектроники : мат-лы III Междунар. науч.-техн. конф. — Ростов-на-Дону : РТИСТ ЮРГУЭС, 2010. — С. 29–32.
3. Сафарьян, О. А. Метод статистической стабилизации частоты независимо работающих генераторов в инфокоммуникационных системах : дис. ... канд. техн. наук / О. А. Сафарьян. — Ростов-на-Дону, 2014. — С. 151.
4. Сафарьян, О. А. Алгоритм оценивания длительности временного интервала с использованием совокупности генераторов / О. А. Сафарьян, А. Ю. Сафарьян // Наука и образование в жизни современного общества : сб. науч. тр. по мат-лам Междунар. науч.-практ. конф. : в 12 ч. Ч. 6. — Тамбов : Консалтинговая компания «Юком», 2012. — С. 136–138.
5. Сафарьян, О. А. Метод оценки частоты генераторов в условиях непрогнозируемого изменения длительности интервала измерений / О. А. Сафарьян // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2014. — Т. 14, № 4 (79), ч. 2. — С. 142–149. 6. Сафарьян О. А. Моделирование процесса стабилизации частоты генераторов в инфокоммуникационных системах / О. А. Сафарьян // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2016. — Т. 16, № 4 (87), ч. 2. — С. 150–154.
7. Управление устройством стабилизации частот генераторов : св-во о гос. регистрации программ для ЭВМ 2014660828 Рос. Федерация / О. А. Сафарьян, Д. Д. Габриэльян; Дон. гос. техн. ун-т. — № 2014618604 ; заявл. 27.08.2014 ; зарег. 16.10.2014. — 20 с.
8. Сафарьян, О. А. Погрешность оценки частот генераторов в нестационарном случае при использовании статистического метода стабилизации частот [Электронный ресурс] / О. А. Сафарьян // Современные проблемы науки и образования. — 2013. — № 4. — Режим доступа: www.science-education.ru/110-9904 (дата обращения: 19.07.17).