
**КӨЛІК, КӨЛІКТІК ИНЖЕНЕРИЯ
ТРАНСПОРТ, ТРАНСПОРТНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ
TRANSPORT, TRANSPORT ENGINEERING**

УДК 624.942.5

DOI 10.52167/1609-1817-2022-123-4-19-28

Г.М. Имашева[✉], Е.А. Болатов

Академия гражданской авиации, Алматы, Казахстан
E-mail: gulnar1507@mail.ru

СПУТНИКОВАЯ НАВИГАЦИЯ ДЛЯ АВИАЦИИ

Аннотация. В этой статье мы прогнозируем состояние спутниковой навигации на ближайшие годы. Рассмотрим проблемы, которые необходимо решать с помощью спутниковой навигации для наведения самолетов. Затем мы опишем современные методы, позволяющие использовать спутниковую навигацию в авиации, и уровень производительности, которого они достигли сегодня.

Ключевые слова. Авиация, спутниковые системы, навигация.

Введение.

В этой статье мы кратко опишем проблемы, которые должна решить спутниковая навигация, чтобы стать жизнеспособным решением для авиации. Затем мы опишем системы, которые были разработаны для преодоления этих проблем, и производительность, которую они предлагают сегодня или будут предлагать очень скоро. В настоящее время наблюдается бурный рост спутниковой навигации: до конца этого десятилетия будет более чем в три раза больше спутников, предлагающих гражданские сигналы на двух разных частотах (в отличие от одной сегодня). Эти улучшения еще не используются для спутниковой навигации для самолетов, поэтому после более точного описания происходящих изменений мы обрисовываем планы по их использованию и их влиянию на производительность. Мы закончим замечанием о радиочастотных помехах, которые представляют собой самую большую проблему для спутниковой навигации в целом.

Материалы и методы.

Для использования спутниковой навигации, для наведения воздушных судов необходимо решить четыре основные задачи. Первые две проблемы в основном влияют на целостность (т.е. безопасность) позиционного решения, в то время как две последние влияют на доступность сервиса.

Неисправности могут возникать внутри Глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). В последние годы серьезные сбои в обслуживании Глобальной системы позиционирования (GPS) происходили менее трех раз в год. Многие из них можно отнести к тактовому сбросу, когда сигнал, передаваемый данным спутником, должным образом не синхронизирован с сигналами от других спутников на орбите. Другие были вызваны загрузкой ошибочных навигационных данных из сегмента управления GPS на спутники GPS для трансляции пользователям или из-за необъявленных маневров, которые делают местоположение спутника вещания недействительным. Любой из этих типов неисправностей может привести к ошибкам позиционирования, которые представляют опасность для пользователей авиации, как показано на рис. 1. Более того, при нормальной

работе GPS может не обнаруживать и не предупреждать об этих угрозах в течение нескольких часов [2].



Рисунок 1 - Неотмеченный маневр в апреле 2007 г. вызвал ошибки эфемерид на одном спутнике GPS. Эта эфемеридная ошибка вызвала зависящие от местоположения ошибки определения местоположения до 500 м на приемниках без возможности обнаружения

Влияние космической погоды.

Неблагоприятная космическая погода может вызвать ионосферные бури. Эти штормы могут сохраняться в течение нескольких часов, внося большие ошибки псевдодиапазона, которые могут привести к опасным ошибкам наведения. На рисунке 2 показаны задержки в диапазоне, которые могут возникнуть в результате экстремальной ионосферной бури. Беспокойство по поводу возможности необнаруженных ионосферных аномалий создает самые большие ограничения в отношении рабочих регионов и времени для современных одночастотных пользователей систем на основе GPS. Кроме того, ионосфера может вызывать мерцание, что влияет на доступность сигналов, особенно в высоких широтах и вблизи экватора.

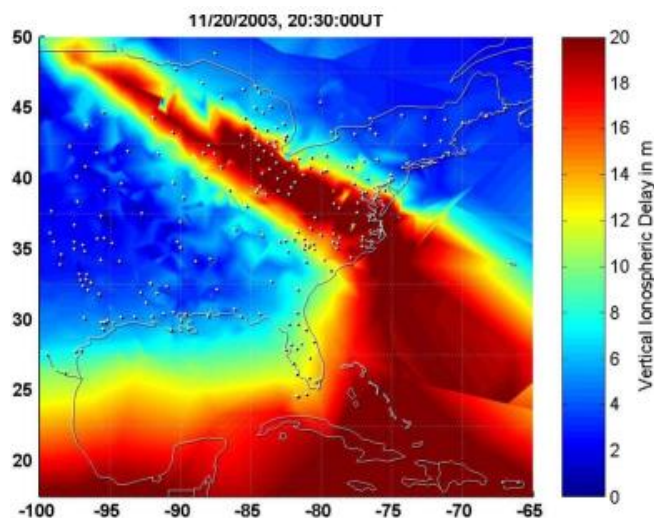


Рисунок 2 - Ионосферные бури, вызывающие большие задержки псевдодальности

Слабость группировки.

Слабость группировки означает, что в группировке ГНСС работает слишком мало хорошо позиционированных спутников по сравнению с количеством, необходимым для поддержки ключевых операций воздушных судов. Сила группировки означает, что группировка ГНСС должным образом пополняется и что все ключевые операции воздушных судов постоянно поддерживаются надлежащим образом. В принципе, пользователям GPS требуется всего четыре спутника, чтобы оценить свое местоположение. Однако самолетам при заходе на посадку обычно требуется семь или более спутников, чтобы гарантировать производительность, необходимую для обеспечения безопасности полетов. Череда отказов спутников в этой стареющей группировке может привести к ослаблению пользовательской геометрии, а на устранение неполадок могут потребоваться годы. Излишне говорить, что аналогичные трудности могут затронуть любую из группировок ГНСС [1].

Радиочастотные помехи.

Радиочастотные помехи (РП), будь то запланированные, случайные или преднамеренные, могут легко привести к перебоям в работе ГНСС. Спутниковые сигналы ГНСС исходят со средней околоземной орбиты, примерно в 20 000 км от поверхности Земли. Сигналы GPS принимаются ниже уровня фонового теплового шума пользователя. Следовательно, эти сигналы слабы и легко подавляются любым из множества сигналов, исходящих от наземных источников. РП могут возникать из-за запланированных мероприятий (например, тестирования Министерства обороны). Они могут быть случайными или непреднамеренными, вызывая ухудшение качества канала (например, использование устройств личной конфиденциальности (рис. 3), которые предназначены только для глушения ГНСС в непосредственной близости от человека, но могут повлиять на все приемники в радиусе сотен метров). Наконец, РП могут быть преднамеренными и направлены на отказ в обслуживании. За последние несколько лет участились непреднамеренные инциденты с радиочастотными помехами, и на их исключение уходили дни или недели.

Эти проблемы ограничивают производительность современных систем на базе GPS СДРЕ. Любая из этих четырех проблем может привести к перерывам в обслуживании, иногда на длительные периоды, и может помешать воздушному судну начать или завершить процедуру захода на посадку.



Рисунок 3 - Устройства личной конфиденциальности, хотя и незаконные, стали широко доступными

Спутниковая навигация для авиации сегодня.

GPS в настоящее время является единственной группировкой ГНСС, широко используемой авиацией. Использование GPS в авиации сегодня обеспечивается тремя технологиями. Во-первых, автономный контроль целостности приемника (АКЦП)- это механизм обнаружения неисправностей, который содержится в авионике. АКЦП требует большого количества спутников, поскольку он оценивает согласованность каждого спутникового измерения с другими доступными спутниковыми измерениями. Две другие технологии используют внешние мониторы самолета, которые сравнивают измерения GPS с наземной правдой и передают информацию об ошибках воздушным пользователям в режиме реального времени: спутниковые системы усиления и наземные системы усиления. Все три метода представлены в следующих кратких разделах.

Автономный контроль целостности приемника (АКЦП)

АКЦП назван так потому, что бортовой приемник выполняет автономное обнаружение неисправностей. АКЦП сравнивает каждое измерение GPS с согласованным результатом других доступных измерений GPS. Таким образом, АКЦП обнаруживает наличие неисправного спутника в текущем наборе видимых спутников и, при определенных обстоятельствах, изолирует его (фиг. 4). Существуют варианты АКЦП, которые включают интеграцию с барометрическим высотомером или инерциальными измерениями. АКЦП используется с середины 1990-х годов для поддержки дополнительной навигации на этапах полета по маршруту и в районе терминала, а также используется для поддержки бокового наведения на этапе захода на посадку [при заходе на посадку в режиме боковой навигации (LNAV)]. Однако в настоящее время АКЦП не может поддерживать вертикальную навигацию по крайней мере по двум причинам. Во-первых, сегодняшний АКЦП не может поддерживать границы вертикальной погрешности, необходимые для вертикального наведения, и, во-вторых, он еще не имеет требуемого уровня надежности проектирования. Позже мы расскажем, что потребуется для включения вертикальной навигации с помощью АКЦП [2].

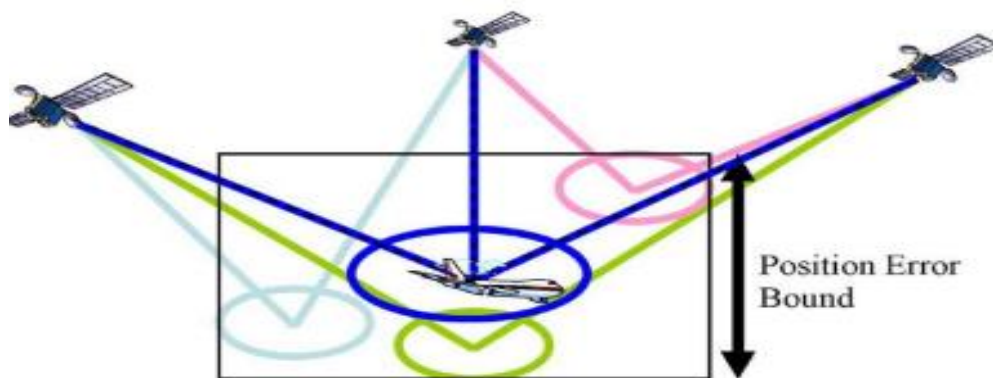


Рисунок 4 - Метод, используемый в приемнике/процессоре GNSS для определения целостности его навигационных сигналов, используя только сигналы GPS или сигналы GPS, дополненные абсолютной высотой (баро-средство)

Спутниковая система дифференциальной коррекции (ССДК).

ССДР основана на сетях стратегически расположенных опорных приемников, разбросанных по континенту. Эти опорные приемники измеряют сигнал GPS в пространстве, и эти измерения передаются обратно на резервные главные станции. Ведущие станции вычисляют ошибки в сигнале GPS, которые используются для создания поправок к измерениям GPS и данных об ограничении ошибок в реальном времени для этих поправок (рис. 5).

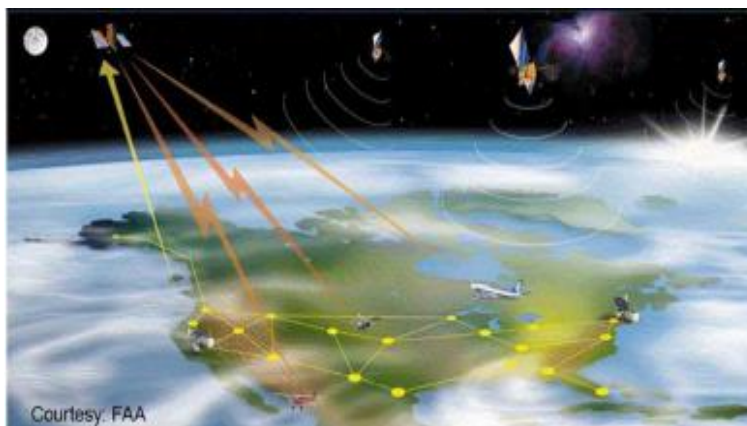


Рисунок 5 - ССДК сеть опорных станций отслеживает работу спутников GPS в режиме реального времени. Поправки и границы ошибок для поправок отправляются через спутник на геостационарной орбите Земли (GEO). Аномалии помечаются пользователям в течение 6 с

Результаты.

Данные о поправках и ошибках действительны на континентальной территории, охватываемой опорной сетью, и передаются на спутники, использующие геостационарную околоземную орбиту (ГЕО). Эта геотрансляция данных ССДР использует сигналы с расширенным спектром в пределах того же диапазона L1 (1575,42 МГц), который используется GPS, и может обеспечить дополнительную возможность определения дальности, подобную GPS.

Поправки ССДР повышают точность GPS примерно с 4 до 1 м. Данные об ограничении ошибок позволяют авионике ССДР вычислять верхнюю границу ошибки определения местоположения в режиме реального времени и обновляются достаточно часто, чтобы поддерживать время в 6 секунд для предупреждения о любой потенциально опасной навигационной информации.

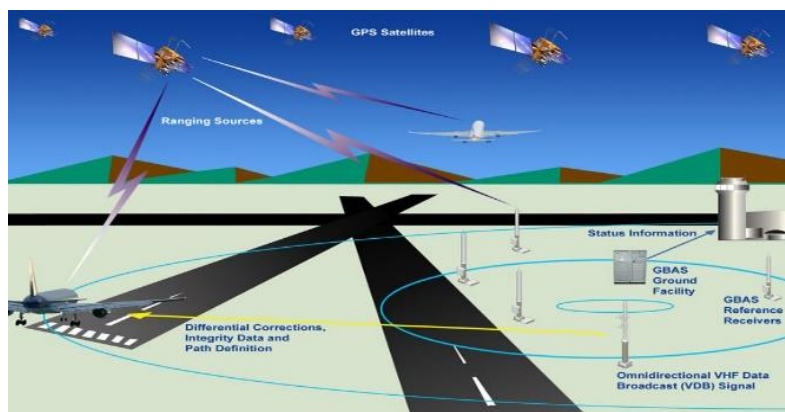


Рисунок 6 - В наземных системах функционального дополнения (GBAS) эталонные приемники размещаются вблизи одного аэропорта. Передача данных на УКВ распространяет исправления и границы ошибок в пределах 45 км от аэропорта (изображение предоставлено Федеральным авиационным управлением)

Наземная система функционального дополнения (НСФД).

Как и в случае ССДР, ГНСС основан на измерениях с опорных приемников GPS в обследованных местах. В отличие от ССДР, ГНСС использует небольшое количество

опорных приемников с антеннами, расположенными близко друг к другу на территории одного аэропорта. Таким образом, одна установка ГНСС обслуживает один аэропорт и прилегающую к нему территорию терминала, передавая поправки GPS и границы ошибок на воздушное судно через ультравысокочастотную передачу данных (УПД) из принимающего аэропорта. Это обеспечивает надежное покрытие в пределах 45 км от аэропорта (рис. 6). Поправки GPS, передаваемые ГНСС, повышают точность GPS примерно с 4 м до более чем 0,5 м. Границы ошибок ГНСС обновляются каждые 0,5 с и, таким образом, потенциально могут соответствовать требованиям времени до предупреждения для всех категорий точного захода на посадку. Авиатранспортная отрасль усердно работала над разработкой ГНСС по следующим причинам. Во-первых, данные УПД включают в себя точки траектории для процедур посадки ГНСС в заданном аэропорту. Это позволяет избежать необходимости в отдельной базе данных, содержащей точки пути. Кроме того, ГНСС нацелена на поддержку посадок по категории II и III, в то время как это настоящее время не предусмотрена в ССДР. По этим и другим причинам Boeing и Airbus планируют установить авионику ГНСС на B-737NG, B-787, B747-8, A-320 и A-380. Системы ГНСС категорий II и III планируется ввести в эксплуатацию в течение этого десятилетия [4].

Краткое описание текущих возможностей, предлагаемых систем

Сегодня спутниковая навигация поддерживает во всем мире наведение по маршруту, аэродрому и боковое наведение на этапе неточного захода на посадку в полете. (рис. 7).

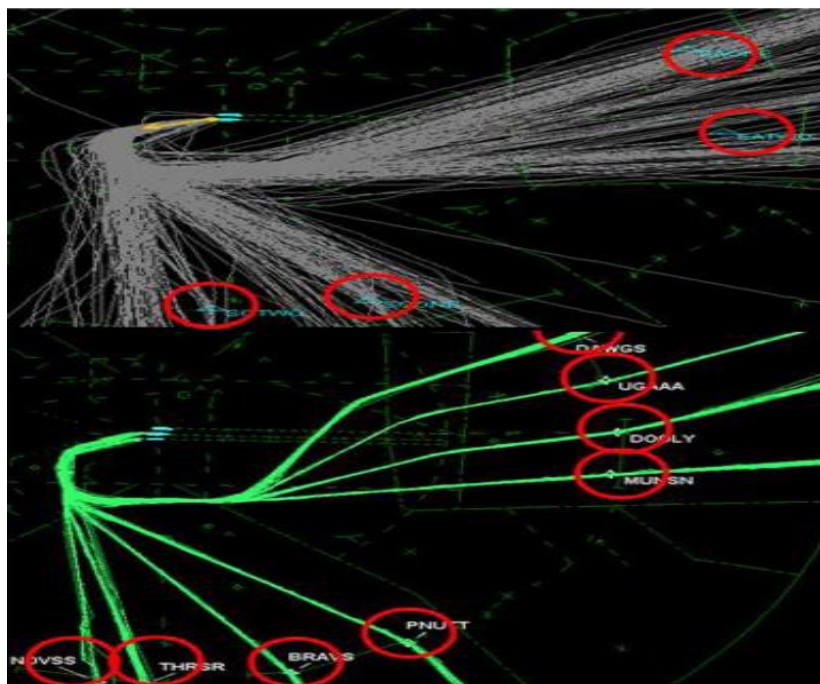


Рисунок 7 - Использование зональной навигации (RNAV), показанное на рисунке, позволяет вдвое увеличить пропускную способность по сравнению с радиолокационными векторами, что приводит к гораздо менее эффективному использованию воздушного пространства (верхний рисунок). RNAV в основном обеспечивается спутниковой навигацией. (Рисунок предоставлен Федеральным авиационным управлением)

На данный момент это достигается с помощью АКЦП. Однако эта услуга доступна не всегда, поскольку АКЦП требует очень строгой геометрии спутников. Напротив, приемники с поддержкой ССДР имеют 100% доступность боковой навигации вплоть до

неточного захода на посадку в пределах и вокруг основных областей обслуживания WAAS, EGNOS и MSAS (которые включают большую часть северного полушария). ССДР также поддерживает вертикальное наведение в Северной Америке, Европе и Японии. Точнее, WAAS обеспечивает вертикальное наведение до 200 футов в Соединенных Штатах, на Аляске, в некоторых частях Канады, Мексики и Карибского бассейна [5].

EGNOS в Европе сертифицирован для обеспечения наведения до высоты принятия решения 250 футов; а MSAS в Японии предлагает более ограниченную доступность вертикального наведения. Как ССДР, так и ГНСС чувствительны к космической погоде. Ионосферные бури включают пространственные градиенты, которые могут привести к тому, что эталонные наблюдения ССДР и ГНСС будут декоррелированы от измерений в воздухе. Современные ССДР и ГНСС должны застраховаться от этой возможности с большими границами ошибок, и, следовательно, вертикальное наведение подвержено сбоям. К счастью, боковая навигация и неточный заход практически не затрагиваются.

В течение последнего десятилетия в среде ГНСС произошли три важных изменения: внедрение нового гражданского сигнала в диапазоне L5 (1176,45 МГц), запуск новых основных группировок ГНСС и повышение целостности, обеспечиваемой основными группировками ГНСС.

С 2010 года все недавно запущенные спутники GPS передают сигналы дальности для гражданского использования в диапазонах частот L1 и L5. Оба сигнала попадают в зону пересечения двух радиодиапазонов: авиационной радионавигационной службы (АРНС) и радионавигационной спутниковой службы (РНСС), что делает их пригодными для навигации воздушных судов. Это двухчастотное разнообразие почти устранит самый неприятный аспект космической погоды: ионосферные бури. При использовании сигналов дальности в двух различных частотных диапазонах авионики будет автономно устранять ионосферную задержку, а потенциальные градиенты ионосферы не будут влиять на измерения дальности ГНСС.

Новые Глобальные Навигационные Спутниковые Системы.

Новые спутниковые навигационные системы находятся в стадии разработки и должны дополнить GPS. К ним относятся системы из Европы, России и Китая. Как и GPS, эти три системы основаны на 24-30 спутниках на средней околоземной орбите. Они будут транслировать сигналы вблизи частот GPS L1 и L5. Эти сигналы будут попадать в полосы, выделенные как для АРНСС, так и для РНСС, и, таким образом, будут полезны для пользователей авиации. Эти системы кратко описаны в следующих трех параграфах. Первые два орбитальных проверочных спутника европейской ГНСС Галилео были запущены 21 октября 2011 года, и еще несколько был запущены в последующие годы. Галилео будет предлагать множество услуг, основанных на четырех сигналах в L-диапазоне микроволновой части радиочастотного спектра. Как и GPS и Галилео, ГЛОНАСС будет излучать сигналы L1 и L2. Вскоре следующее поколения ГЛОНАСС должен добавить сигналы на L5. Таким образом, планируемая структура сигналов удовлетворит стремление авиации к двухчастотному разнесению на основе сигналов в спектре АРНСС/РНСС. Более того, эти новые сигналы будут основаны на множественном доступе с кодовым разделением, таком как GPS и Галилео, а не на множественном доступе в частотной области, который в настоящее время используется ГЛОНАСС [3].

Повышенная целостность основных группировок.

В дополнение к двум предыдущим крупным изменениям все поставщики ГНСС выразили большую заинтересованность в повышении безопасности использования своих базовых спутниковых навигационных систем. Соединенные Штаты нацелены на спутники GPS III поколения для первоначальных служб обеспечения целостности. В случае Галилео, европейской ГНСС, концепция безопасности жизнедеятельности была неотъемлемой частью проектирования с самого начала проекта. Хотя проектная гарантия

этих служб целостности может не соответствовать строгим требованиям гражданской авиации, повышенная точность основных группировок ГНСС в сочетании с двойной частотой может позволить расширить АКЦП до вертикального наведения.

Двухчастотный ССДР.

Пользователи двухчастотных ССДР не будут страдать от ошибок из-за космической погоды, поскольку пользователь непосредственно измеряет вызванную ионосферой задержку на пути к каждому спутнику GPS. Таким образом, пользователь избегает снижения производительности из-за пространственной декорреляции, присущей наземным коррекциям ионосферы. Это сделает возможным распространение системы вертикального наведения с поддержкой ССДР на более низкие широты и сделает ССДР более надежной во время ионосферных штормов, где она уже доступна. Если двойная частота сочетается с расширением наземных сетей на южное полушарие, то все наземные массивы могут иметь полный охват вертикального наведения вплоть до высоты принятия решения 200 футов. Это проиллюстрировано на рис. 8. Включение L5 в ССДР – это немалое дело. Как наземные, так и воздушные системы, включая аппаратное и программное обеспечение, должны быть обновлены. Потребуется двухчастотная авионика ССДР, и поэтому необходимо будет обновить соответствующие Минимальные стандарты эксплуатационных характеристик (МСЭХ)

Двухчастотный ГНСС.

Как упоминалось ранее, ГНСС поддерживает навигацию для полета в районе терминала, точного захода на посадку и посадки. Все эти возможности основаны только на GPS L1. Двухчастотная работа принесет ГАЗУ те же преимущества, что и ССДР. Включение L5 в наземные и воздушные системы уменьшит проблемы непрерывности, связанные с ионосферными штормами и радиочастотными помехами. Что наиболее важно, значительно возрастет доступность операций посадки категорий II и III, поскольку использование двух частот для смягчения пространственных аномалий в ионосфере намного превосходит методы, доступные для одночастотных (только для L1) систем.

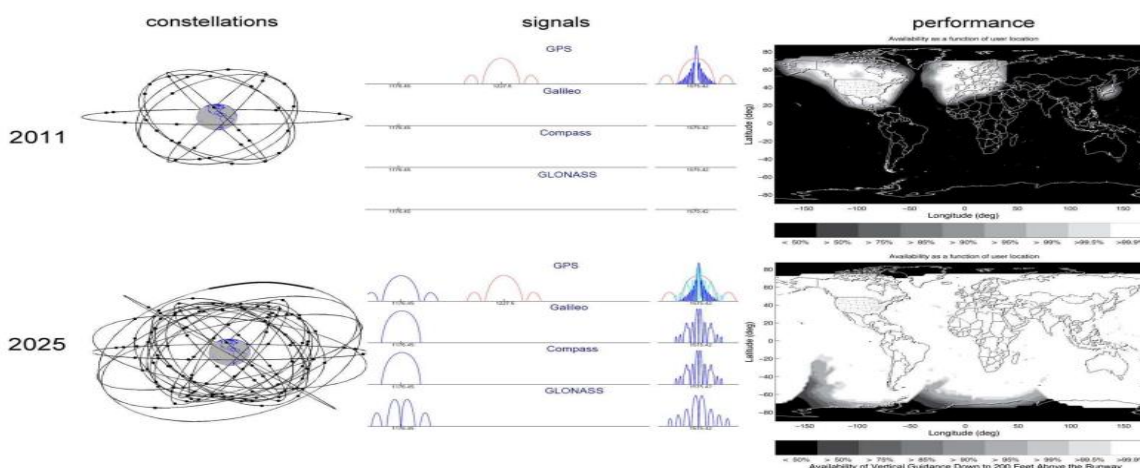


Рисунок 8 - Новые созвездия и сигналы позволят распространить вертикальное наведение по всему миру на основе спутниковой навигации. Это может быть достигнуто либо путем расширения спутниковых систем расширения, либо с помощью усовершенствованного

RAIM

Продвинутый АКЦП.

Усовершенствованный АКЦП (УАКЦП) для вертикального наведения является возможным расширением одночастотного АКЦП только для горизонтального наведения. УАКЦП будет полагаться на увеличение числа спутников и группировок, на повышение

надежности сигналов ГНСС и на двухчастотные сигналы. УАКЦП основан на том же принципе, что и АКЦП, но обнаруживает ошибки псевдодиапазона на гораздо меньшем уровне. Он мог бы вместить несколько группировок, что сделало бы его менее чувствительным к размеру любого из них. Это было бы особенно верно, если бы использовались три или более созвездий. УАКЦП вызвал большой интерес, поскольку он мог бы обеспечить глобальный охват вертикального наведения (рис. 8) без дорогостоящей наземной инфраструктуры и без затрат на ССДР ГЕО. Однако сила УАКЦП также является его слабостью: без наземной информации в реальном времени УАКЦП полагается на производительность основных группировок и, следовательно, гораздо больше зависит от их производительности [5].

Заключение и обсуждение.

Возможно, самым важным событием в ближайшем будущем станет реализация всего потенциала спутниковой навигации для авиации. Воздушное пространство по-прежнему организовано вокруг навигационных средств, поддерживающих двухточечную навигацию, и не использует в полной мере преимущества точности и целостности, предлагаемые АКЦП и ССДР. Спутниковая навигация позволит прокладывать маршруты, которые будут гораздо более эффективными с точки зрения пропускной способности и расхода топлива. Эти процедуры будут включать в себя криволинейные подходы и подходы с непрерывным спуском. Однако внедрение таких изменений в воздушном пространстве выходит за рамки спутниковой навигации как датчика и вовлекает множество заинтересованных сторон, включая авиакомпании, пилотов, авиадиспетчеров и поставщиков навигационных услуг. Конечно, этот переход станет проще, поскольку ограничения спутниковой навигации будут лучше поняты и смягчены.

Спутниковые навигационные сигналы слабы и могут быть легко перегружены помехами, передаваемыми с земли на частоте GPS. Среди видов РЧ-помех надвигающейся угрозой является преднамеренное вмешательство. Расследование Федерального управления гражданской авиации (FAA) было начато во время установки ГНСС в Международном аэропорту Нью-Джерси. Как описано выше, ГНСС использует GPS-приемники в аэропорту для помощи GPS-приемникам на приближающемся самолете. Антенны ГНСС были размещены рядом с магистралью Нью-Джерси, и наземные приемники часто прерывались во время тестового периода. Эти перерывы были вызваны так называемыми устройствами личной конфиденциальности (УЛК).

Преимущества спутниковой навигации для воздушных судов, которые были продемонстрированы за последнее десятилетие, дают лишь намек на изменения, которые она принесет в воздушное пространство. Даже при нынешних характеристиках спутниковой навигации потенциал улучшения воздушного пространства огромен. И эта производительность будет только увеличиваться с добавлением новых группировок ГНСС и новых навигационных сигналов в течение этого десятилетия. Субметровая точность и целостность определения местоположения ГНСС сделают спутниковую навигацию основным навигационным средством для самолетов. Однако, поскольку спутниковая навигация по своей сути уязвима для РЧ-помех, другие датчики в самолете остаются незаменимыми, и необходимо поддерживать резервные навигационные средства на земле для обеспечения обратной навигации.

ЛИТЕРАТУРА

[1] П. Аксельрад и Б. У. Паркинсон, Автономный мониторинг целостности GPS с использованием остаточного псевдодиапазона, [Навигация, том 35, № 2, стр. 255-274, 1988.

[2] Дж. Бланч, Т. Уолтер, П. Энге, С. Уоллнер, Ф. Амарило Фернандес, Р. Деллаго, Р. Иоаннидес, Б. Перван, И. Фернандес Эрнандес, Б. Белаббас, А. Сплеттер и М. Риппл, предложение ВА по усовершенствованному RAIM с несколькими созвездиями для вертикального наведения, Портленд, Орегон, сентябрь 2011 г., стр. 2665.

[3] Р. Г. Браун, BGPS RAIM: Вычисление порога и радиуса защиты с использованием методов хи-квадрат и геометрического подхода, [Навигация, т. V. Фэрфакс, Вирджиния: Институт навигации, 1998, сер. Красная книга.

[4] Т. Крил, А. Дж. Дорси, П. Дж. Мендики, Дж. Литтл, Р. Г. Мах и Б. А. Ренфро, Обзор улучшений точности в рамках Инициативы по повышению точности GPS Legacy (L-AII).

[5] С. Датта-Баруа, Биосферные угрозы целостности бортовых пользователей GPS, [Кандидатская диссертация, кафедра. Аэронавт. Астронавт, Стэнфордский университет, Стэнфорд, Калифорния, 2007.

Гүлнар Имашева, т.ғ.д., профессор, Азаматтық авиация академиясы, Алматы, Қазақстан, gulnar1507@mail.ru

Ержан Болатов, магистрант, Азаматтық авиация академиясы, Алматы, Қазақстан, erzhan_bolatov@bk.ru

АВИАЦИЯ ҮШІН СПУТНИКТІК НАВИГАЦИЯ

Аңдатпа. Бұл мақалада біз алдағы жылдардағы спутниктік навигацияның жағдайын болжаймыз. Әуе кемелерін басқару үшін спутниктік навигацияны пайдалану арқылы шешуді қажет ететін мәселелерді қарастырыңыз. Содан кейін біз авиацияда спутниктік навигацияны пайдалануға мүмкіндік беретін ең заманауи әдістерді және олардың бүгінгі күні қол жеткізген өнімділік деңгейін сипаттаймыз.

Түйінді сөздер. Авиация, спутниктік жүйелер, навигация.

Gulnar Imasheva, doctor of technical sciences, professor, Academy of Civil Aviation, Almaty, Kazakhstan, gulnar1507@mail.ru

Erzhan Bolatov, master's student, Academy of Civil Aviation, Almaty, Kazakhstan, erzhan_bolatov@bk.ru

SATELLITE NAVIGATION FOR AVIATION

Abstract. In this article, we forecast the state of satellite navigation for the coming years. Let's consider the problems that need to be solved with the help of satellite navigation for aircraft guidance. Then we will describe modern methods that allow the use of satellite navigation in aviation, and the level of performance that they have achieved today.

Keywords. Aviation, satellite systems, navigation.
