

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ «БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
АКАДЕМИЯ АВИАЦИИ»

Факультет гражданской авиации
Кафедра организации движения и обеспечения безопасности на воздушном
транспорте

КОНКУРСНАЯ РАБОТА

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ В РАЙОНЕ
АЭРОДРОМА КУЛЯБ (ТАДЖИКИСТАН) НА ОСНОВЕ
ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕЩЕНИЯ СЕТИ СТАНЦИЙ MLAT**

Автор: Табаров Саидмумин Киёмудинович
очная форма обучения
специальность
3 курс гр.У218

Научный руководитель
Доктор технических наук, профессор

Скрыпник О.Н.

Минск 2021

Содержание

Введение.....	3
1 Роль наблюдения в обеспечении безопасности полетов.....	4
2 Анализ характеристик технических средств наблюдения и особенностей их применения в горной местности.....	6
3. Анализ поля наблюдения, создаваемого средствами РТОП аэродрома Куляб.....	11
3.1 Общие сведения об аэродроме.....	11
3.2 Средства связи и РТО полетов аэродрома Куляб.....	13
4 Особенности поля наблюдения сети станций MLAT.....	15
4.1 Принцип работы системы мультилатерации MLAT.....	15
4.2 Факторы, влияющие на точность MLAT.....	17
4.3 Проблемы синхронизации станций MLAT.....	20
5 Оптимизация размещения наземных станций MLAT в зоне аэро- дрома для повышения точности поля наблюдения.....	23
5.1 Характеристика системы MLAT аэродромной зоны Куляб.....	23
5.2 Методика оптимизации размещения станций MLAT.....	24
Заключение	26
Литература.....	27

Введение

Авиация играет важную роль в обеспечении экономического и социального развития как отдельных государств, так и мировой экономики в целом. Выступая в качестве очевидного признака прогресса, высокие темпы роста воздушного движения могут привести к снижению безопасности полетов, если они будут опережать темпы роста нормативных и инфраструктурных процессов, необходимых для их поддержки.

Для решения этих проблем необходима всесторонне согласованная глобальная аэронавигационная система (АНС), представляющая собой единую систему организации использования воздушного пространства (ВП) и аэронавигационного обслуживания пользователей ВП. Система должна быть основана на широком внедрении современных систем CNS/ATM – технологий и технических средств связи, навигации и наблюдения.

Для поддержания развития и функционирования АНС определены несколько стратегических направлений развития, основанных на совершенствовании технологий и технических средств наблюдения за воздушными судами (ВС).

Применение современных и эффективных систем наблюдения, способных обеспечить высокий уровень контроля на всех этапах полёта ВС, позволит обеспечивать необходимую пропускную способность ВП при применении эффективных траекторий полёта. Перспективные системы наблюдения способны решать задачу управления аэродромным движением, что позволяет более эффективно использовать возможности аэропорта и повысить безопасность аэропортовых операций.

Системы наблюдения являются не только источником данных о местоположении ВС, но и важным поставщиком данных в систему организации воздушного движения (ОрВД), повышая её общую эффективность и создавая основу для построения более развитых систем автоматизации. Совершенствование систем наблюдения также важно для оптимизации затрат на аэронавигационное обслуживание, что может быть обеспечено при использовании перспективных систем наблюдения.

Однако появление новых технологий и технических средств наблюдения приводит к необходимости решения новых задач, связанных с их эффективным применением, прежде всего с повышением точности, надежности и целостности поля наблюдения. Эти решения могут основываться на оптимизации размещения наземной инфраструктуры средств в заданном районе воздушного пространства.

1 Роль наблюдения в обеспечении безопасности полетов

Безопасность полётов - это состояние авиационной системы или организации, при котором риски, связанные с авиационной деятельностью, относящейся к эксплуатации ВС или непосредственно обеспечивающей такую эксплуатацию, снижены до приемлемого уровня и контролируются.

Безопасность полётов определяется способностью авиационной транспортной системы (АТС) осуществлять воздушные перевозки без угрозы для жизни и здоровья людей. АТС включает ВС, экипаж, службу подготовки и обеспечения полёта, службу управления воздушным движением (УВД) [1].

На исход полёта влияет большое число факторов, закономерности возникновения которых весьма сложны и во многих случаях ещё недостаточно изучены. Оценка состояния безопасности полетов проводится по количественным показателям, в качестве которых ИКАО (Международная организация гражданской авиации) использует уровень безопасности полетов, определяемый абсолютными (число авиационных происшествий) и относительными (число происшествий, приходящихся на 100 тыс. ч. налёта или на 100 тыс. полётов) и другими показателями. Согласно имеющимся оценкам уровень безопасности авиаперевозок весьма высок, и авиационный транспорт является более безопасным, чем железнодорожный и автомобильный транспорт. Вероятность авиационного происшествия для пассажира в среднем не превышает 1 на 500 тысяч полётов.

Для обеспечения безопасности полетов требуется высокая степень ситуационной осведомленности всех участников воздушного движения. Важная роль при этом отводится средствам наблюдения, которые предоставляют такую информацию о ВС, как, например, местоположение, опознавание или намерения. Эти данные характеризуются следующими требованиями:

точность - степень соответствия полученного значения элемента данных его фактическому значению на момент использования;

целостность данных - степень необнаруженного (на уровне системы) несоответствия значения элемента данных на входе его значению на выходе. В таком случае система лишь выполняет функцию передающей среды и не должна изменять значение соответствующего элемента данных;

готовность - вероятность того, что требуемая информация наблюдения будет предоставлена конечным пользователям;

непрерывность - вероятность того, что служба наблюдения будет выполнять назначенную функцию без незапланированных перерывов в течение установленного времени работы;

надежность - вероятность того, что система будет выполнять свою функцию в рамках установленных пределов характеристик в течение определенного периода при заданных эксплуатационных условиях;

частота обновления - разница во времени между двумя информационными сообщениями, касающимися одного и того же типа данных;

целостность (системы) - вероятность необнаруженного отказа функционального элемента в течение установленного периода, приводящего к предоставлению пользователю ошибочной информации наблюдения.

целостность (данных) - определяется по отношению к вероятности того, что ошибка в данных, превышающая определенный пороговый уровень, не будет обнаружена (отсутствие предупреждения) в течение периода времени, превышающего пороговый период предупреждения;

зона действия - район воздушного пространства, который будет охватывать данная система наблюдения и в пределах которого параметры характеристик системы наблюдения отвечают требованиям.

Система авиационного наблюдения представляет данные о местоположении ВС и другую информацию в службу ОрВД и/или авиационным пользователям. В большинстве случаев система авиационного наблюдения дает пользователю информацию о том, "кто" находится "где" и "когда". Могут также представляться данные о горизонтальной и вертикальной скорости, идентифицирующих характеристиках ВС или намерениях. Требуемые данные и параметры технических характеристик зависят от конкретных видов применения. Минимальным критерием системы авиационного наблюдения является предоставление информации о воздушных судах или транспортных средствах в установленное время.

Требования к системам наблюдения ОВД содержатся в главах 6 и 8 документа *"Правила аэронавигационного обслуживания. Организация воздушного движения"* (PANS-ATM, Doc 4444). [2]

Система авиационного наблюдения состоит из нескольких элементов, использование которых определяется требованиями к конкретным видам применения. На рис.1 показана типичная функциональная система наблюдения. Границей системы наблюдения является прикладной интерфейс, т.е. точка, в которой система наблюдения предоставляет информацию наблюдения для использования и в которой оценивается работа системы.

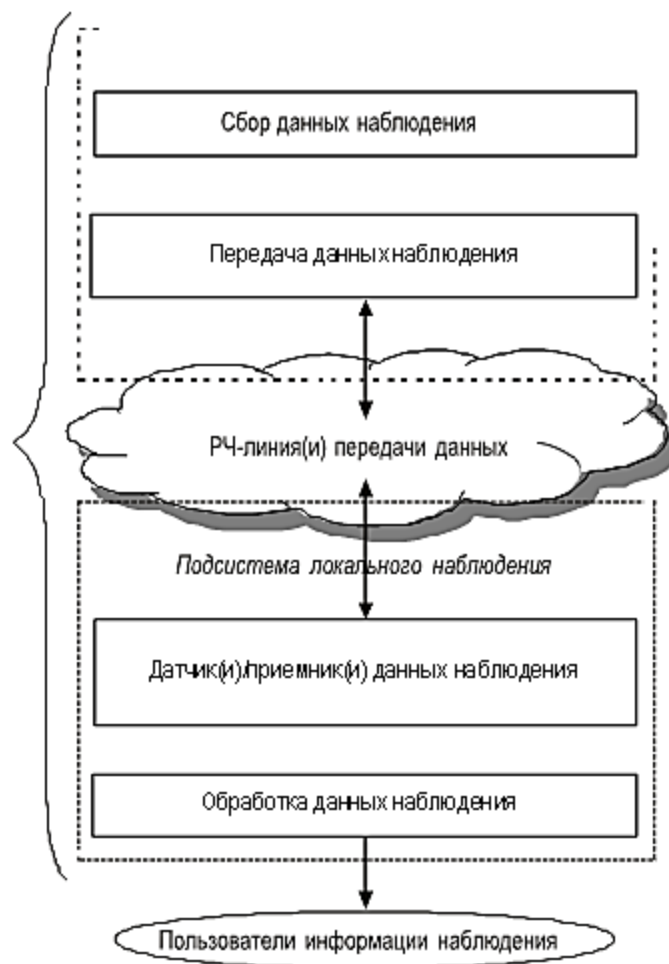


Рис.1. Границы системы наблюдения

2. Анализ характеристик технических средств наблюдения и особенностей их применения в горной местности

В соответствии с классификацией ИКАО к техническим средствам наблюдения относятся:

- первичный радиолокатор (PSR);
- вторичный радиолокатор (SSR);
- автоматический радиопеленгатор (DF);
- транспондер автоматического зависимого наблюдения (ADS);
- многопозиционная (мультилатерационная) система (MLAT).

Первичный (пассивный) радиолокатор, в основном, служит для обнаружения целей по отраженному от них сигналу, излученного через сканирующую антенну радиолокатора. При этом определяются азимут и дальность до цели. В основе устройства радиолокационной станции лежат три компонента: передатчик, антенна и приёмник.

Вторичная радиолокация используется в авиации для опознавания ВС. Основная особенность - использование активного ответчика на самолётах.

Принцип действия вторичного радиолокатора несколько отличается от принципа первичной радиолокации. В основе устройства вторичной радиолокационной станции лежат компоненты: передатчик, антенна, генераторы азимутальных меток, приёмник, сигнальный процессор, индикатор и самолётный ответчик с антенной.

Передатчик служит для формирования импульсов запроса на частоте 1030 МГц. Антенна служит для излучения запросного и приёма отражённого сигнала. По стандартам ИКАО для вторичной радиолокации антенна излучает на частоте 1030 МГц и принимает на частоте 1090 МГц.

Генераторы азимутальных меток служат для генерации азимутальных меток (АСР) и генерации метки Севера (АРР). За один оборот антенны РЛС генерируется 4096 малых азимутальных меток (для старых систем) или 16384 таких меток (для новых систем, их ещё называют улучшенными малыми азимутальными метками IАСР), а также одну метку Севера. Метка Севера приходит с генератора азимутальных меток при таком положении антенны, когда она направлена на Север, а малые азимутальные метки служат для отсчёта угла разворота антенны.

Приёмник служит для приёма импульсов на частоте 1090 МГц.

Сигнальный процессор служит для обработки принятых сигналов.

Индикатор служит для индикации обработанной информации.

Самолётный ответчик служит для передачи импульсного радиосигнала, содержащего дополнительную информацию о параметрах ВС обратно в сторону РЛС при получении радиосигнала запроса.

Принцип действия вторичного радиолокатора заключается в использовании энергии самолётного ответчика для определения положения ВС. РЛС облучает окружающее пространство запросными импульсами P1 и P3, а также импульсом подавления P2 на частоте 1030 МГц. Оборудованные ответчиками ВС, находящиеся в зоне действия луча запроса, при получении запросных импульсов, если действует условие $P1, P3 > P2$ отвечают запросившей РЛС серией кодированных импульсов на частоте 1090 МГц, в которых содержится дополнительная информация о номере борта, высоте и так далее.

Ответ самолётного ответчика зависит от режима запроса РЛС, а режим запроса определяется интервалом времени между запросными импульсами P1 и P3, например, в режиме запроса А (mode А) интервал времени между запросными импульсами P1 и P3 равен 8 мкс.

Дальность до ВС определяется по задержке пришедшего ответа.

Принятый от ответчика сигнал обрабатывается приёмником РЛС, затем поступает на сигнальный процессор, который проводит обработку сигналов и выдачу информации конечному потребителю и (или) на контрольный индикатор. Достоинства вторичной РЛС:

более высокая точность;

дополнительная информация о воздушном судне (номер борта, высота);

малая по сравнению с первичными РЛС мощность излучения;

большая дальность обнаружения.

Наземные радиопеленгаторы (АРП – автоматический радиопеленгатор) измеряют направление на самолетную УКВ радиостанцию относительно северного истинного или магнитного меридиана, проходящего через антенную систему радиопеленгатора. Измеряемым навигационным параметром является истинный или магнитный пеленг радиостанции (самолета).

Автоматическое зависимое наблюдение используется двух типов.

Наблюдение в режиме вещания (АЗН-В) - это технология, которая позволяет наземным службам УВД (диспетчеру) знать координаты ВС, которое он сопровождает. Эта же информация доступна и другим ВС, находящимся в пределах зоны действия системы,

Отличие АЗН-В от традиционных видов наблюдения (ВРЛ или ПРЛ) заключается в том, что координаты ВС не определяются наземными средствами, как это происходит в случае с радиолокаторами. Радиолокатор является *независимым* средством наблюдения, потому что определяет координаты ВС самостоятельно. В отличие от ВРЛ и ПРЛ, технология АЗН-В является *зависимой*. Это означает, что ВС определяет свои координаты самостоятельно, с помощью бортового оборудования, и уже потом передает их наземным службам. Координаты ВС определяются с помощью приемника спутниковой системы навигации GNSS. Полученные GNSS приемником координаты, вместе с бортовым номером и другой информацией, передаются на землю.

Технология АЗН-В упрощает процедуру наблюдения. Все, что требуется - это приемник GPS на борту и средства передачи данных по радиолинии земля -борт. На земле не требуется никаких локаторов и радиомаяков, нужно только принять данные по радиолинии и отобразить их диспетчеру.

Радиолиния в случае вещательного АЗН-В не является двухточечной - с борта только до определенного наземного оборудования. Данные с борта передаются в широковещательном режиме на частоте 1090 МГц, и любой, у кого есть приемник этого диапазона и средства обработки данных в соответствии с протоколом АЗН, может получить координаты всех ВС в зоне действия бортового передатчика 1090. Этим АЗН-В отличается от контрактного

АЗН-К, в котором сообщения передаются строго тому, для кого они предназначены (в соответствии с заключенным контрактом на обмен данными) [3].

В соответствии с концепцией ICAO технология АЗН в перспективе должна заменить вторичные радиолокаторы - SSR.

В условиях возрастающей плотности воздушного движения увеличивается вероятность пропуска цели или отображения ложной цели, обусловленной недостатками существующей системы вторичной радиолокации, такими как:

наложение ответных сигналов от близкорасположенных самолетов;

взаимные помехи;

избыточность сеансов связи и перегрузка в каналах запроса/ответа.

Таким образом, требовалась новая технология наблюдения, в которой не было бы этих недостатков.

Более совершенная *дискретно-адресная система вторичной радиолокации режима S* снимает большинство проблем, связанных с применением традиционных систем вторичной радиолокации.

Под режимом S подразумевается адресный запрос, т.е. на запрос отвечает самолет (приемоответчик), адрес которого указан в запросном сигнале наземного ВОРЛ (вторичный обзорный радиолокатор). ВОРЛ при этом получает такую же информацию от самолетного ответчика, что и традиционный ВРЛ, но так как идет общение только с приемоответчиком *S* того ВС, которое в данный момент находится в направленном луче, то:

снижается до минимума появление ложных целей из-за переотражений и взаимных помех;

обеспечивается высокая разрешающая способность, т.е. потеря цели вследствие наложения ответов (перекрытия друг друга по времени) в принципе невозможна;

появляется возможность регулирования мощности передатчика ВОРЛ в соответствии с расстоянием до самолета, с которым идет общение;

появляется возможность изменения частоты следования запросных кодов, например, для ВС, находящегося в зоне аэродрома частота запросов может быть увеличена;

увеличивается количество кодов идентификации ВС – адрес ВС состоит из 24 бит (16777216 вариантов адресов), присваивается каждому ВС на международной основе и является уникальным именем ВС.

Система MLAT предусматривает обнаружение сигналов приемоответчика ВС сетью принимающих наземных станций. В системах MLAT используется разностно-дальномерный метод (TDOA) для установления поверхностей положения, представляющих постоянную разность расстояний между

целью и парами принимающих наземных станций. Местоположение ВС определяется как точка пересечения таких поверхностей (гиперболоидов).

Теоретически мультилатерация может выполняться с использованием любых сигналов, периодически передаваемых с ВС. Однако системы, используемые для гражданских целей, основаны только на сигналах приемоответчиков ВОРЛ. Система MLAT требует наличия, по крайней мере, четырех принимающих станций для расчета местоположения ВС. Если известна барометрическая высота ВС, то его местоположение можно определить при наличии трех принимающих станций. Тем не менее, на практике системы MLAT используют намного больше принимающих станций для обеспечения требуемых характеристик точности и зоны действия.

Точность MLAT не имеет линейной зависимости от размеров зоны действия. Она зависит от расположения ВС относительно принимающих станций и точности, с которой можно определить относительное время получения сигнала на каждой станции. Типичная архитектура системы MLAT для наблюдения в целях УВД приведена на рис.2.

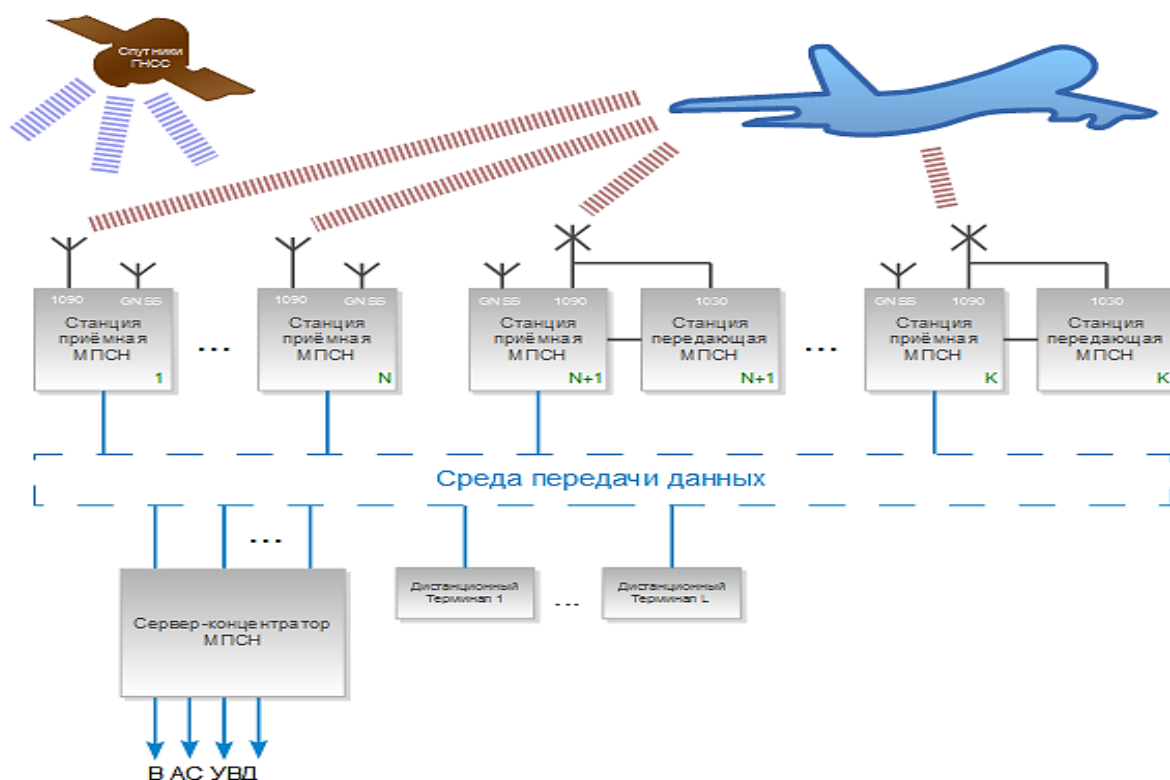


Рис.2. Типичная архитектура системы MLAT

Все средства наблюдения, рассмотренные выше, работают в диапазонах УКВ и СВЧ. В этих диапазонах дальность действия систем зависит от высоты полета ВС и определяется дальностью прямой видимости. Поэтому

при полете ВС на малых высотах поле наблюдения может отсутствовать. Кроме этого, при расположении аэродрома в горной местности, могут появляться сектора затенения (см. рис.3) [4], поскольку неровности земной поверхности являются экранирующими для радиоволн УКВ и СВЧ диапазонов. Это также приводит к отсутствию поля наблюдения в определенных секторах излучения и для определенных высот полета ВС.

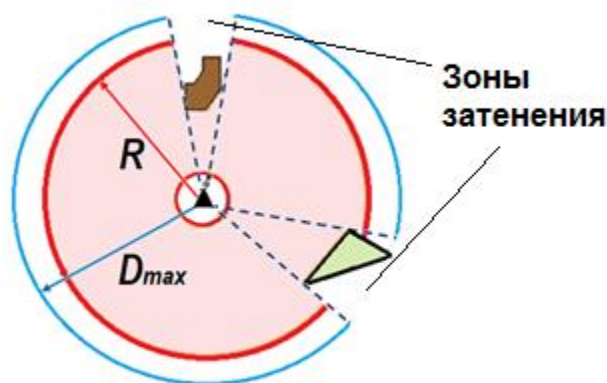


Рис.3. Поле наблюдения с зонами затенения

На рис.3 D_{max} – максимальная дальность действия системы, R - дальность действия системы, в пределах которой точность поля наблюдения будет не хуже заданной, поскольку для систем первичной, вторичной радиолокации и АРП точность определения координат ВС ухудшается с увеличением расстояния до него.

От указанных недостатков свободна система MLAT, поскольку проблема затенений и отсутствия по этой причине поля наблюдения решается путем размещения в этих секторах дополнительных наземных станций.

3. Анализ поля наблюдения, создаваемого средствами РТОП аэродрома Куляб

3.1. Общие сведения об аэродроме

Аэродром Куляб (Республика Таджикистан) относится к аэродромам класса «В».

Аэродром горный, является аэродромом круглосуточного действия, имеет одну ВППТ с искусственным покрытием и обеспечивает прием ВС ACN (Aircraft Classification Number), масса которых не превышает значения, опубликованного PCN (Pavement Classification Number) по установленным минимумам.

Аэродром Куляб может использоваться для ВС, размах крыла которых не превышает 50.5 м.

Аэродром Куляб расположен в 8 километрах севернее г. Куляб, географические координаты КТА (контрольная точка аэродрома): с.ш. 37° 59,9, в.д. 069° 48.37. Абсолютная высота КТА 677.34 м, порога ВПП 01- 655.42 м, порога ВПП 19 - 699.39 м.

Номер часового пояса - V:

Магнитное склонение - +3° 20:

Летное поле имеет прямоугольную форму размером 3500х300м. Грунт – галечник, суглинок, подвержен размоканию. Травянистый покров незначительный, выгорает в летние месяцы.

На аэродроме имеется одна ИВПП. Покрытие - асфальтобетонное.

ВПП 01/19 размером 3000х45 м имеет укрепленные обочины по 7 м в обе стороны. Ширина ВПП 19 у порога с уширением 65 м.

Посадка производится только на ВПП 01, а взлёт - с ВПП 19. Спланированная часть лётного поля простирается по обе стороны от боковых границ ВПП на 70 м. Концевые полосы торможения отсутствуют. Длина свободной зоны у порога ВПП 01 - 250м.

Истинный азимут ВПП 01/19 -15°59 59/196° 00 19 соответственно. Магнитные курсы ВПП - 12° 40 / 192° 40.

Высота опорной точки над порогом ВПП01 - 15м. Профиль ВПП двускатный, с уклоном 0,010. К торцам ВПП примыкают укрепленные участки размером 46Х60М каждый. Удаление места исполнительного старта от порога ВПП 100 м. Схема аэродрома с таблицами располагаемых дистанций и минимумами аэродрома для взлёта показана на рис.4.

Запасная ВПП отсутствует. Для ВС на аэродроме имеются восемь стоянок. На аэродроме имеются три соединительные РД – А, В, С и одна магистральная РД М. Общая ширина РД с учетом укрепленных обочин составляет: РД А, РД В 29 м и РД С - 40.5 м. Ширина РД-М составляет 26м.

Расстояние между осями параллельных РД А и РД В -330м.

Минимальные безопасные высоты пролета препятствий для захода на посадку приведены в табл.1.

Таблица 1. Минимальные безопасные высоты пролета препятствий

Категория ВС	РМС	ОСП
А	721,8(66,4)	785,1(129,7)
В	724,8(69,4)	785,1(129,7)
С	727,8(72,4)	785,1(129,7)
Д	730,8(75.4)	785,1(129,7)

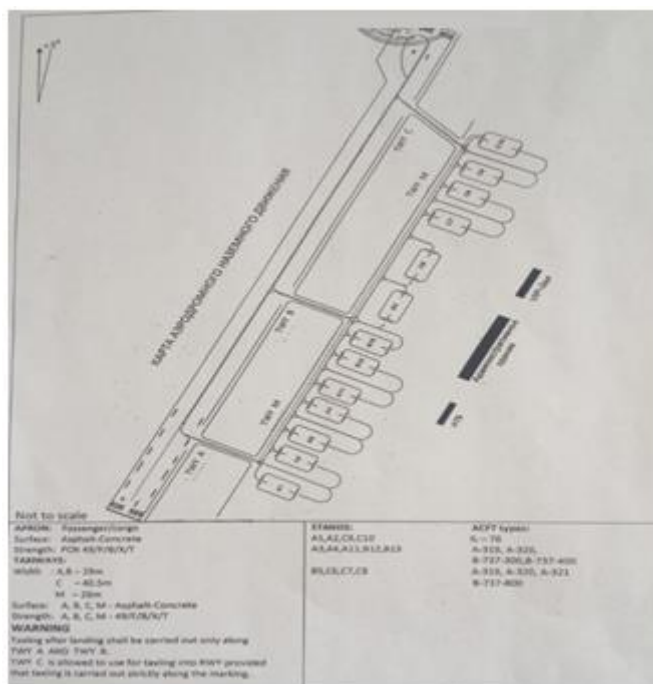


Рис.4. Схема аэродрома Куляб

3.2. Средства связи и РТО полетов аэродрома Куляб

В состав средств связи и РТО полетов аэродрома входят:

- радиостанции ультракоротковолновые для связи с экипажами ВС;
- радиостанции коротковолновые для связи экипажами и смежными диспетчерскими пунктами;
- громкоговорящая связь;
- телефонная и телеграфная связь;
- оборудование «VAISAI.A», которое автоматически передает метеоинформацию в ОПП и через громкоговорящую связь или телефонную связь передается на диспетчерские пункты;
- диспетчерский радиолокатор ДРЛ-7СМ и система MLAT для самолетовождения и построения схемы захода по правилам полетов по приборам;
- автоматический УКВ-радиопеленгатор АРП-75;
- система посадки ОСП в составе дальнего приводного радиомаяка (ДПРМ) и ближнего приводного радиомаяка (БПРМ) для обеспечения снижения и захода на посадку ВС;
- курсогладная система посадки СП-80М.

Аэродром оборудован светотехническими средствами типа «1 MAN».

Средства связи и РТО на аэродроме Куляб работают круглосуточно. При больших перерывах в производстве полетов РТС обеспечения полётов включаются только по указанию руководителя полетов:

средства района аэродрома (ДРЛ-7СМ, ДИРМ, АРП-75) - за 30 минут расчетного посадки (пролета) ВС:

системы посадки (РМС, ОСП) не позднее чем за 15 минут до расчетного времени посадки ВС

средства электросвязи должны работать круглосуточно:

Средства электросвязи, работающие на частоте аварийно-спасательных работ 121.5МГц находятся в постоянной готовности:

Все средства связи и РТО полетов имеют 100% резерв готовый к использованию в любое время.

Все резервные средства связи и РТО полетов аэродрома Куляб в случае необходимости могут быть приведены в действие в сроки, указанные в инструкции по резервированию средств РТО и связи, утвержденной Генеральным директором ГУП «ТАН».

На рис.5 показаны зоны покрытия района аэродрома Куляб полем наблюдения, создаваемым традиционными средствами наблюдения (АРП-75 и ДРЛ-7СМ).

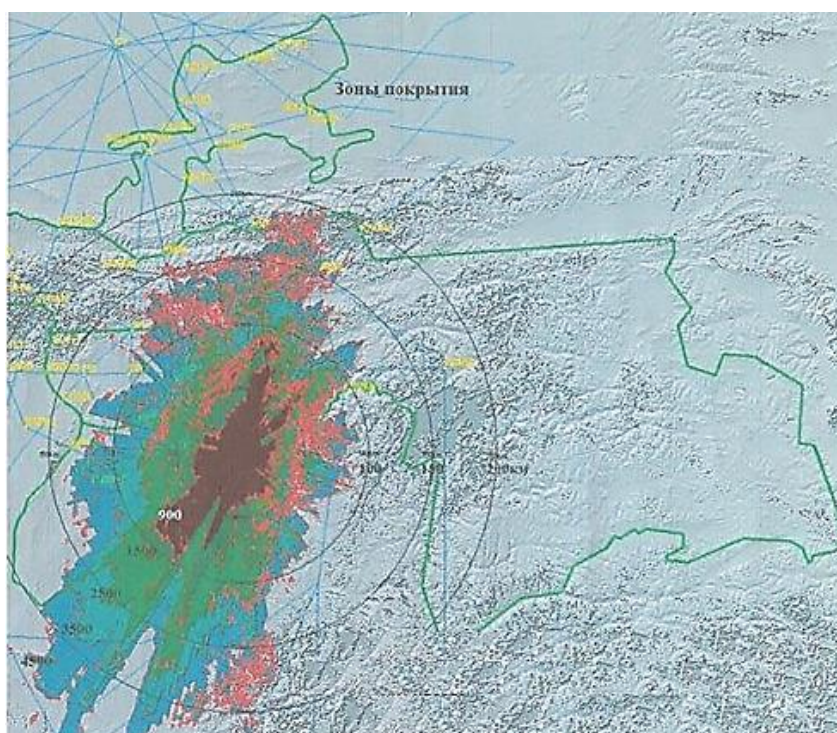


Рис.5. Зоны покрытия полем наблюдения

Как видно из рис.5, поле наблюдения, создаваемое традиционными средствами наблюдения, имеет изрезанный и несимметричный характер, что

обусловлено значительным влиянием рельефа местности. Такая конфигурация поля наблюдения не обеспечивает требуемый контроль за ВС при заходах в достаточно широких секторах. Аналогичная картина поля наблюдения имеет место в зонах других аэродромов и в воздушном пространстве республики Таджикистан.

В целях улучшения характеристик поля наблюдения в воздушном пространстве авиационными властями Республики Таджикистан было принято решение о развертывании сети наземных станций системы MLAT. Часть таких станций размещена в районе аэродрома Куляб.

4 Особенности поля наблюдения сети станций MLAT

4.1 Принцип работы системы мультилатерации MLAT

Система MLAT состоит из нескольких наземных станций (пунктов приема), объединенных в сеть и принимающих сигнал от ВС, и центрального процессора, вычисляющего местоположение ВС по значениям TDOA сигналов в этих пунктах. В зависимости от размера зоны действия различают аэродромные MLAT и широкозонные (WAM) системы.

Математически TDOA между двумя приемниками соответствует гиперболоиду (в трех координатах пространства), на котором находится ВС. В том случае, когда сигнал ВС принимается в четырех пунктах, можно определить все три координаты ВС, рассчитав пересечение результирующих гиперболоидов (рис.6).

Когда имеется только три приемных пункта, три координаты ВС невозможно определить непосредственно, однако, если из другого источника (например, по данным режима C или при нахождении ВС на земле) известна его абсолютная высота, то можно рассчитать координаты ВС в пространстве. Такая ситуация называется 2-D решением. Следует отметить, что использование барометрической высоты (режим C) может стать причиной менее точного определения местоположения ВС, так как барометрическая высота может значительно отличаться от геометрической относительной высоты.

При наличии более четырех приемников дополнительная информация может использоваться либо для проверки правильности других измерений, либо для расчета среднего местоположения по всем измерениям, которое должно иметь меньшую суммарную погрешность.

Приведенный на рис.6 пример поясняет принцип размещения наземных станций MLAT. Показана система, включающая пять приемных станций.

Предполагая, что сигнал ВС принимается всеми станциями, первые три диаграммы на рис.6 представляют собой гиперboloиды, соответствующие TDOA сигнала на станциях 0 и 2, 0 и 3, 0 и 4 (рис.7) соответственно [5].

Центральная вычислительная станция (т.0) рассчитывает пересечение всех гиперboloидов. Связанные с мультilaterацией вычисления могут иметь более одного решения, поскольку гиперboloиды могут пересекаться в двух местах. Правильное решение обычно легко определяется.

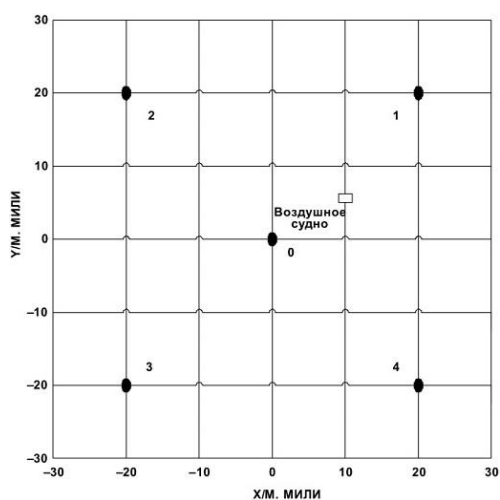


Рис.6. Схема из пяти станций

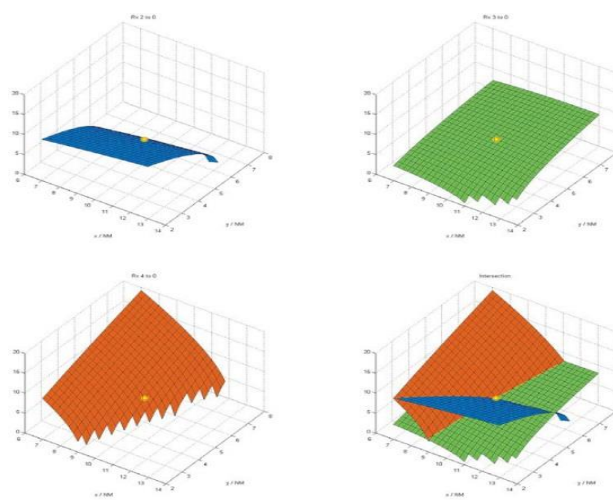


Рис.7. Пересекающиеся гиперboloиды

В общем случае геометрия системы оказывает большое влияние на получаемую точность. Если ВС находится внутри 2-мерной зоны вокруг наземных приемных станций, рассчитываемое местоположение будет наиболее точным; за пределами этой зоны точность будет быстро ухудшаться.

Системы MLAT можно разделить на активные и пассивные. Пассивная система включает только приемники, а активная система имеет одну или несколько передающих антенн для запроса бортового приемопередчика ВОРЛ.

Основное преимущество активной системы заключается в том, что она не зависит от других источников инициирования передачи данных с борта воздушного судна. Главный ее недостаток связан с тем, что она создает дополнительные помехи на каналах 1030 МГц и 1090 МГц.

Функциональные возможности и преимущества системы MLAT:

а) использование любых сигналов (режимы A/C, ответы и самогенерируемые сигналы режима S), передаваемых существующими приемопередчиками, при этом не требуется установки на борту дополнительного оборудования для определения местоположения воздушного судна;

б) возможности режима A/C, режима S и ADS-B;

в) обеспечение зоны действия на пересеченной местности. MLAT является модульной системой в том смысле, что зону действия можно расширить за

счет включения дополнительных станций, если это не выходит за технические ограничения и возможности системы;

d) высокие показатели точности и частоты обновления. Точность системы можно также в определенной степени контролировать путем размещения принимающих станций.

Недостатки системы мультilaterации:

a) ВС должны быть оборудованы работоспособным приемопередатчиком;

b) передаваемый сигнал должен быть правильно обнаружен многими принимающими станциями. В этой связи могут возникать проблемы, связанные с поиском подходящих мест для установки приемников, особенно при предоставлении обслуживания на маршруте;

c) требуются линии связи между удаленными установками приемников/передатчиков и главным центром обработки данных.

4.2 Факторы, влияющие на точность MLAT

Точность позиционирования в MLAT зависит от целого ряда факторов, основными из которых являются точность измерения *TDOA*, расположение и количество наземных приемных станций и положение ВС относительно этих станций.

Точность измерения *TDOA* зависит от используемого метода измерений, точности синхронизации шкал времени, параметров сигнала ответа, характеристик приемных устройств (внутренние шумы, нестабильность групповой задержки сигнала в трактах обработки), состояния радиоканалов распространения сигналов ответа и передачи данных между станциями MLAT (нестабильность скорости распространения радиоволн).

Указанные составляющие результирующей погрешности измерения *TDOA* имеют случайный характер. Для снижения результирующей погрешности, кроме мер, направленных на уменьшение каждой из составляющих, используется структурная избыточность системы (число приемников больше минимальных трёх). Это также позволяет расширить зону действия системы. Однако при этом точностные характеристики MLAT будут зависеть от высоты полета ВС, поскольку число наземных станций, способных принимать сигналы ответа, определяется условиями прямой радиовидимости ВС.

Для оценки влияния на точность позиционирования ВС его положения относительно приемных станций MLAT, также как и в спутниковых РНС, используется понятие геометрического фактора - *Geometric Dilution of Precision (GDOP)* или *DOP*. *GDOP* является коэффициентом, который связывает точность позиционирования с точностью измерения *TDOA*.

Выражение для $GDOP$ применительно к MLAT системе имеет вид

$$GDOP = \sqrt{\text{tr} \left[\left(H^T H \right)^{-1} \right]}$$

где H - матрица направляющих косинусов линий дальностей наземный приемник-ВС в прямоугольной декартовой системе координат $OXYZ$, которая имеет вид [4]

$$H = \begin{bmatrix} \left[\frac{x^0 - x_1}{D_1} \quad \frac{x^0 - x_0}{D_0} \right] & \left[\frac{y^0 - y_1}{D_1} \quad \frac{y^0 - y_0}{D_0} \right] & \left[\frac{z^0 - z_1}{D_1} \quad \frac{z^0 - z_0}{D_0} \right] \\ \left[\frac{x^0 - x_2}{D_2} \quad \frac{x^0 - x_0}{D_0} \right] & \left[\frac{y^0 - y_2}{D_2} \quad \frac{y^0 - y_0}{D_0} \right] & \left[\frac{z^0 - z_2}{D_2} \quad \frac{z^0 - z_0}{D_0} \right] \\ \left[\frac{x^0 - x_3}{D_3} \quad \frac{x^0 - x_0}{D_0} \right] & \left[\frac{y^0 - y_3}{D_3} \quad \frac{y^0 - y_0}{D_0} \right] & \left[\frac{z^0 - z_3}{D_3} \quad \frac{z^0 - z_0}{D_0} \right] \end{bmatrix}.$$

где x_i, y_i, z_i - координаты i -й наземной станции; D_1, D_2, D_3 - дальности от станций 1, 2 и 3 до ВС; x^0, y^0, z^0 - координаты ВС.

Начало система координат $OXYZ$ совмещено с мастер-станцией MLAT (той, на которой выполняется обработка $TDOA$), а плоскость OXY совмещена с поверхностью аэродрома.

Различают следующие составляющие $GDOP$ для MLAT:

горизонтальный (HDOP) - характеризует точность определения местоположения ВС в горизонтальной плоскости;

вертикальный (VDOP) - характеризует точность определения положения ВС в вертикальной плоскости;

пространственный (PDOP) - характеризует точность определения положения ВС в пространстве.

Значение $GDOP$ зависит от расположения ВС относительно наземных станций MLAT и геометрии системы – размеров баз (расстояний между станциями) и базовых углов. При этом распределение поля точности определения горизонтальных координат ВС (значений HDOP) и поля точности определения его высоты (значений VDOP) существенно отличаются. В качестве примера на рис.8 показаны поля точности MLAT, наземные станции которой образуют квадрат, в центре которого находится опорная станция [6].

Особенность MLAT состоит в том, что, если поле точности определения горизонтальных координат достаточно равномерно (рис. 8, а), то конфигурация поля точности определения высоты зависит от высоты полета ВС (рис.8, б), количества и размещения наземных станций (рис.9, рис.10).

Наилучшая точность позиционирования наблюдается при нахождении ВС внутри фигуры, образованной наземными станциями MLAT и их базами. При удалении от базовых линий во внешнем направлении точность значи-

тельно снижается. Однако распределение поля точности MLAT намного лучше, чем при определении местоположения ВС по данным РЛС, когда точность значительно ухудшается по мере удаления от антенны РЛС.

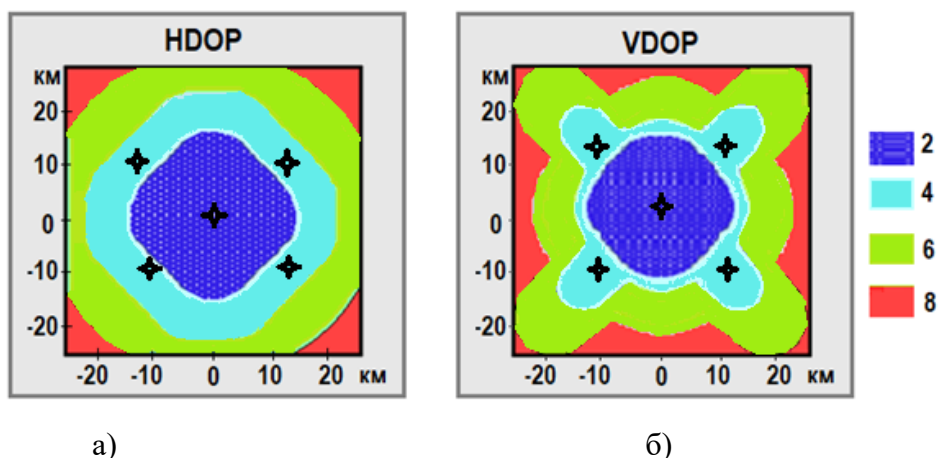


Рис.8. Поля точности MLAT, состоящей из пяти станций:
а) - определение горизонтальных координат; б) – определение высоты.

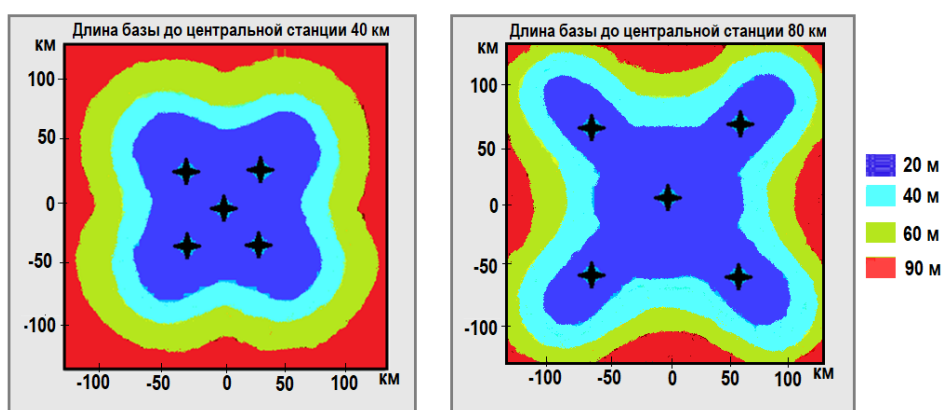


Рис.9. Поля точности измерения высоты в зависимости от размера баз MLAT.

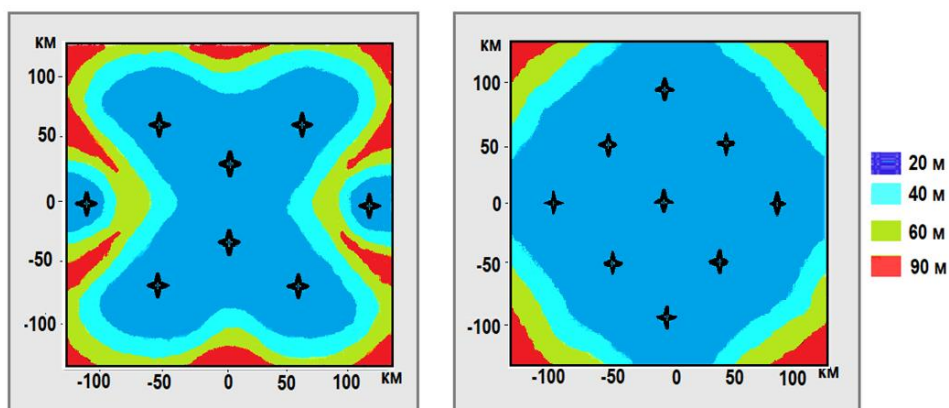


Рис.10. Поля точности измерения высоты в зависимости от количества станций MLAT

В качестве конкретного примера, характеризующего конфигурацию рабочей зоны и распределение полей точности, приведем данные для MLAT «МЕРА» в составе пяти станций (аэропорт Пулково, рис.11). Как видно из представленных рисунков, конфигурация и размер поля точности MLAT существенно зависят также и от режима работы системы.

В MLAT ввиду относительно небольших размеров баз возможно использование для решения навигационной задачи избыточного числа измерений *TDOA* практически от всех пар наземных станций.

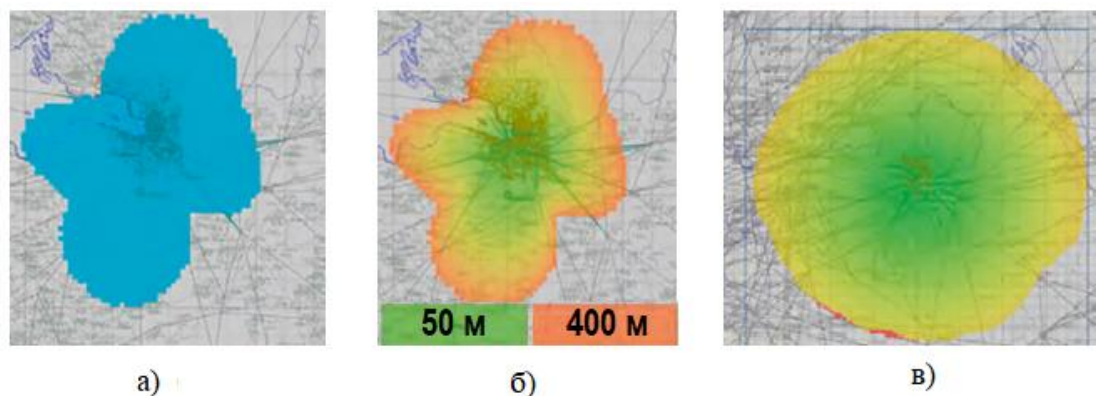


Рис.11. Конфигурация рабочей зоны и поля точности MLAT
а) – рабочая зона; б) – поле точности при работе в пассивном режиме;
в) – поле точности при работе в активном режиме.

4.3 Проблемы синхронизации станций MLAT

В MLAT навигационная информация о координатах ВС содержится в разности моментов приема ответных сигналов наземными станциями системы. Для ее извлечения необходимо приведение этих моментов к единой шкале времени, т.е. синхронизация измерений. При этом необходимо учитывать дополнительные задержки сигналов при их обработке в трактах приемников и при передаче информации от приемных к центральной станции.

Приведение измерений, выполняемых в MLAT, к единой (опорной) шкале времени может быть обеспечено следующими способами [4]:

1. Опорная шкала времени создается на одной станции (Master Station), на которую для последующей обработки в MLAT-контроллере передаются сигналы, принятые остальными станциями (рис.12). По этой шкале фиксируется время их приема с учетом задержки, обусловленной расстоянием от каждой из станций сети до центральной станции (размером баз системы).

Нестабильность опорной шкалы времени, создаваемой на Master Station с помощью кварцевого генератора, составляет не более 1 нс.

При использовании единой шкалы времени аппаратура приемников MLAT достаточно проста, и ее функция сводится к приему и ретрансляции принятых сигналов ответа на центральную станцию, а весь процесс привязки измерений к времени, формирование *TDOA* и их обработка осуществляется на Master Station. Однако при этом существенное влияние на точность позиционирования ВС оказывает задержка сигналов от станций при их передаче по каналам связи и при обработке в процессоре Master Station.

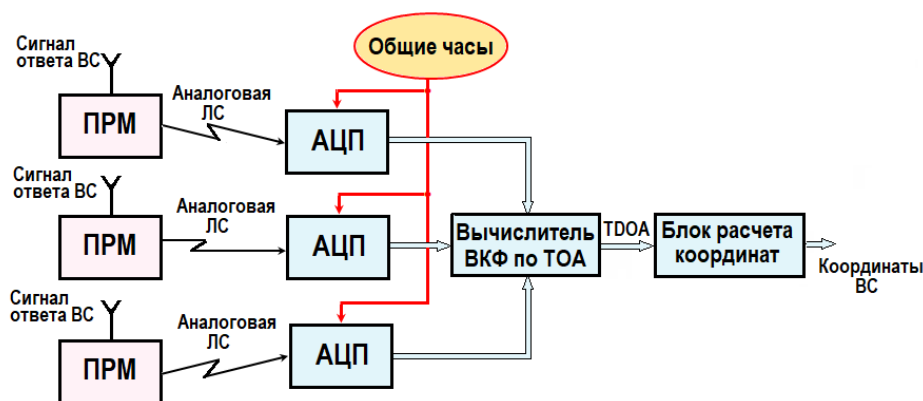


Рис.12. Архитектура MLAT с общей опорной шкалой времени.

2. Распределенные шкалы времени создаются на каждой станции сети, но при этом обеспечивается их взаимная синхронизация, например, по времени GNSS, или другими способами. Однако и в этом случае обработка информации выполняется на Master Station и с учетом размеров баз системы.

Необходимость синхронизации распределенных шкал времени приводит к усложнению схем приемников, поскольку в каждом из них происходит обработка принимаемых сигналов ответа с целью получения информации о задержке (*TOA*).

В настоящее время для синхронизации шкал времени используются такие способы, как синхронизация по приемоответчику и внешняя синхронизация по GNSS.

При *внешней синхронизации по GNSS* она является внешним источником единого опорного времени для каждого приемника, поскольку время в GNSS поддерживается достаточно точно (расхождение с UTC не более 100 нс) (рис.13). При этом представляется возможным использовать на каждой станции синхронизируемый по GNSS опорный кварцевый генератор и синхронизировать приемники MLAT с точностью до 10–20 нс.

Поскольку в MLAT измеряется разность между моментами приема сигналов станциями, то одинаковая на всех приемниках ошибка синхронизации с временем UTC при вычитании *TOA* компенсируется.

Метод внешней синхронизации по GNSS намного проще, чем создание общей шкалы времени или синхронизация по опорному приемопередатчику. Здесь можно использовать любые цифровые каналы для передачи сигнала синхронизации и не требуется выполнение условия прямой видимости опорного приемопередатчика и синхронизируемых приемников.

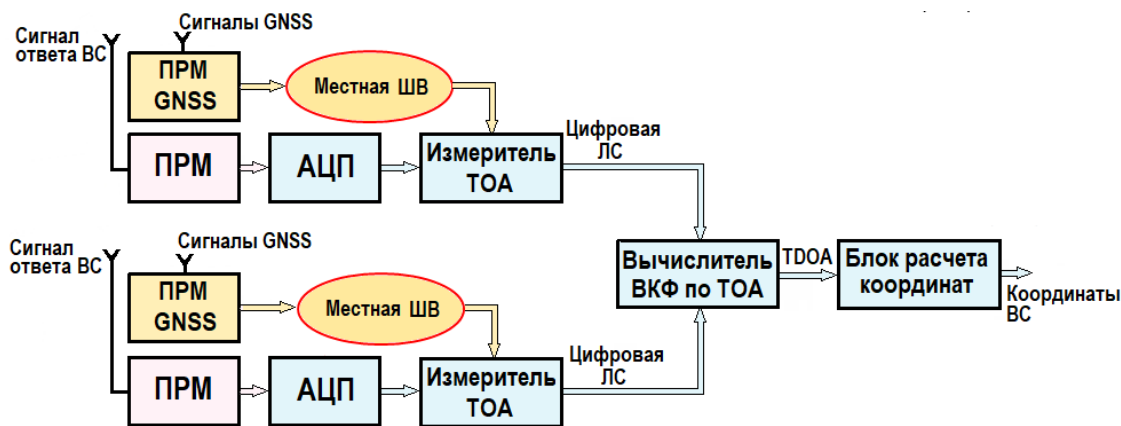


Рис.13. Архитектура MLAT с внешней синхронизацией по GNSS.

5 Оптимизация размещения наземных станций MLAT в зоне аэродрома для повышения точности поля наблюдения

5.1 Характеристика системы MLAT аэродромной зоны Куляб

В Таджикистане используется MLAT производства компании ERA (Чехия) [7]. Всего на территории Республики Таджикистан размещено 17 станций MLAT, работающих в пассивном режиме. В районе аэропорта Куляб и окрестностях установлена цепочка из 5-ти станций MLAT (точки GS13, GS14, GS15, GS16, GS17) (рис.14).

Станция GS13 находится в Шурабаде, станция GS14 в Дангаре, станция GS15 в Ходжа Сартезе, станция GS16 установлена на территории аэропорта Куляб, она же является Master Station (оборудована MLAT-контроллером для определения TDOA и осуществления их обработки), и станция GS17 в Хавалинге. Все пять станций синхронизируют свои шкалы времени по GNSS.

Наилучшая точность позиционирования ВС по данным компании ERA составляет 40 м в воздушном пространстве и 7,5 метров при заходе на посадку и посадке ВС.

На рис.15 показано распределения поля точности позиционирования MLAT на территории Таджикистана для высоты полета ВС 10000 м MSL, представленное в эксплуатационной документации системы. Поставщик обо-

рудования гарантирует сплошное поле наблюдения на этой высоте с точностью позиционирования не хуже 250 м. При этом информация о конфигурации поля наблюдения и точности позиционирования на высотах круга аэродрома Куляб и в зонах заходов на посадку отсутствует.

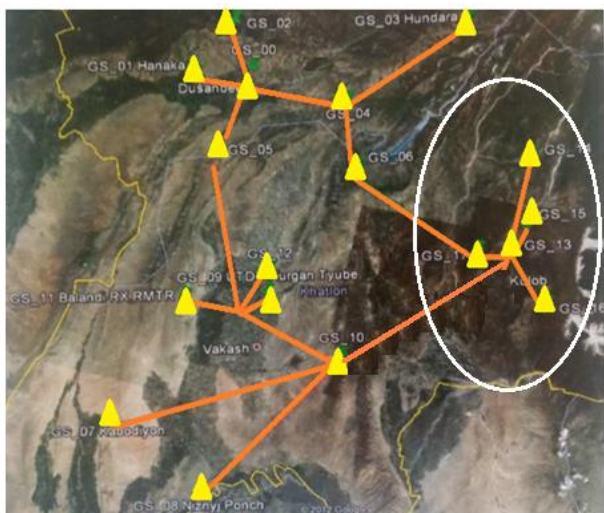


Рис.14. Размещение станций MLAT

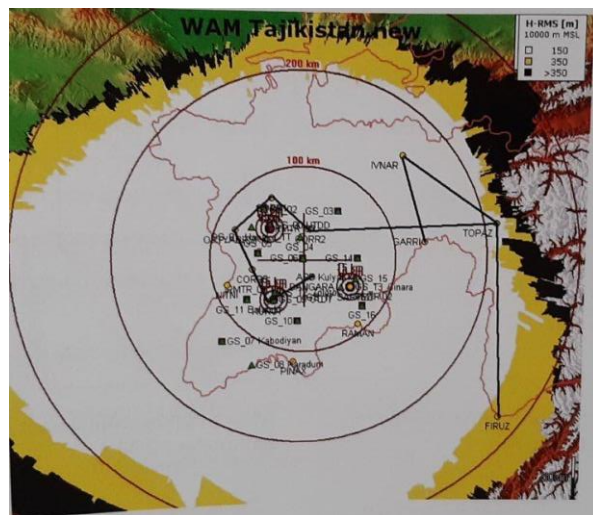


Рис.15. Поле точности (10000 м MSL)

5.2 Методика оптимизации размещения станций MLAT

Представленные на рис.14, 15 данные о размещении станций MLAT и характеристиках поля наблюдения не позволяют оценить характеристики этого поля в зоне аэродрома Куляб в полном объеме для различных высот и секторов воздушного пространства.

При этом следует ожидать возможное снижение точности позиционирования ВС из-за снижения точности синхронизации шкал времени станций, поскольку из-за затенений сигналов спутников GNSS горами, наблюдаемые на станциях созвездия навигационных спутников будут отличаться. Затенения сигнала от ВС может привести к отсутствию поля наблюдения MLAT на малых высотах в некоторых секторах воздушного пространства зоны аэродрома.

Задача создания сплошного поля MLAT и обеспечения требуемой точности определения координат ВС может быть решена путем оптимизации размещения станций в зоне аэродрома Куляб и определения их необходимого количества путем математического моделирования с учетом затенений сигналов неровностями рельефа местности.

В качестве критерия оптимизации в такой постановке задачи необходимо использовать комплексный критерий, обеспечивающий максимум площади поля наблюдения на заданной высоте полета ВС и минимум геометри-

ческого фактора системы в зоне аэродрома. Решение задачи оптимизации размещения станций MLAT и определения их необходимого количества может быть выполнено методами теории оптимизации [8]. Однако получение математического выражения для комплексного коэффициента оптимизации с учетом затенений сигналов представляет собой сложную задачу.

Поэтому на практике для предварительных расчетов размещения станций MLAT предлагается использовать следующую методику пошагового решения задачи.

1) Задать зону наблюдения, внутри которой необходимо обеспечивать требуемую точность.

2) Выбрать область наблюдения, включающую заданную зону наблюдения, и определить её размер. Пример области наблюдения показан на рис.15, белым цветом выделена заданная зона наблюдения. Для удобства моделирования область наблюдения должна иметь квадратную форму.

3) Расположить станции в подходящих точках и определить их координаты в прямоугольной системе координат с началом отсчёта в центре заданной области наблюдения. Расположение станций показано на рис.16.

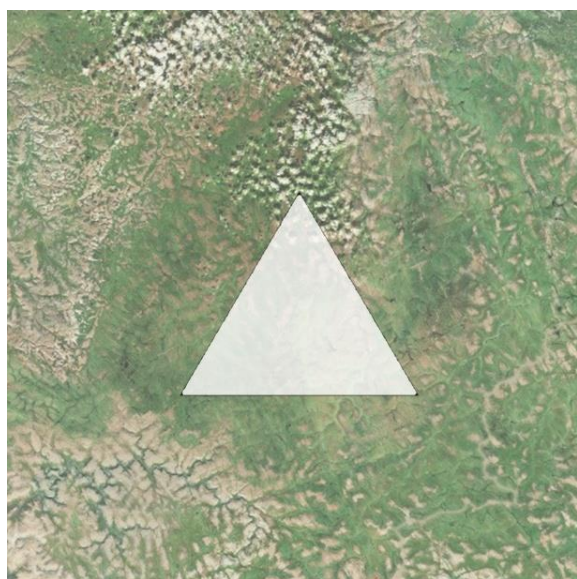


Рис. 16. Область наблюдения

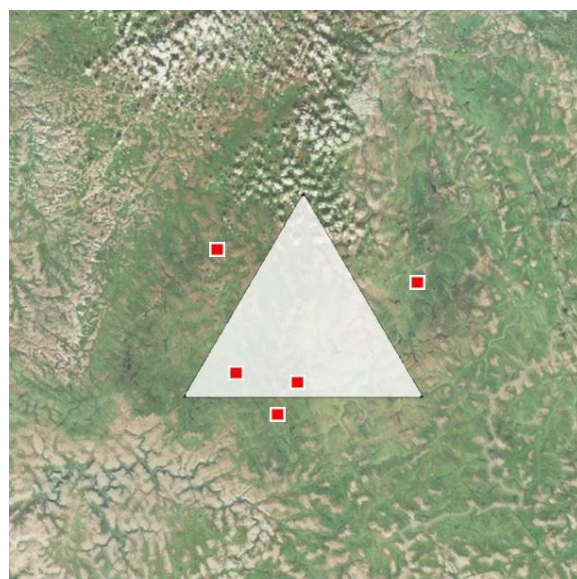


Рис.17. Расположение станций

4) Для завершения сбора начальных данных необходимо задаться высотой наблюдения (полета ВС). Данные, полученные на предыдущих этапах, заносятся в интерфейс ввода данных расчетной модели.

5) После завершения ввода данных получаем поле распределения ГФ. На рис.18 показано поле распределения горизонтальной составляющей (*HDOP*) геометрического фактора для выбранного размещения станций.

6) Для использования поля распределения *HDOP* для оценки поля распределения точности позиционирования MLAT необходимо задаться значением погрешности, связанной с ошибкой определения *TDOA* для конкретной системы. Для удобства полученное поле распределение *HDOP* и изображение области наблюдения на карте можно свести в любом удобном графическом редакторе (рис.19).

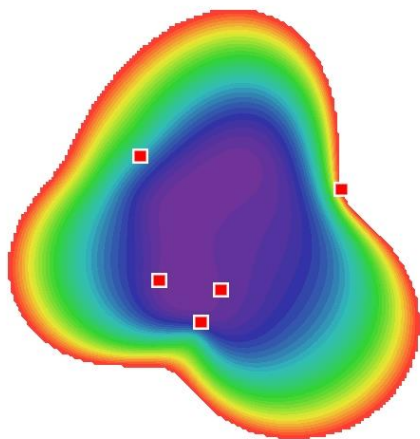


Рис.18. Поле распределения ГФ

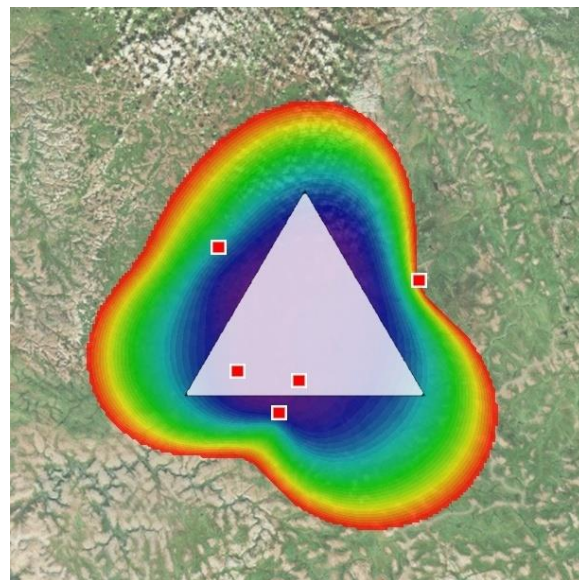


Рис.19. Поле распределения ГФ на карте

7) Финальным этапом является оценка полученных результатов. При необходимости коррекции положения поля наблюдения алгоритм следует повторить, начиная с п.3.

Недостатком предложенной методики является отсутствие учёта рельефа местности. Однако делать подобный учёт для каждого из предварительных вариантов является весьма трудоёмкой и сложной задачей. Поэтому подобное применение данной модели может оказаться довольно полезным для начальной оценки применимости, а также возможностей, обеспечиваемых при реализации системы MLAT.

Заключение

В результате выполненных исследований проведен анализ проблем создания поля наблюдения в воздушном пространстве Республики Таджикистан. Проведен анализ принципов функционирования системы MLAT и проблем ее использования для создания высокоточного и надежного поля наблюдения в горной местности. Рассмотрены характеристики системы MLAT, развернутой в Республике Таджикистан. Предложена методика опти-

мизации размещения станций MLAT в заданной зоне воздушного пространства, например, в зоне аэродрома Куляб, для определения размещения и требуемого количества станций, при которых поле наблюдения в этой зоне будет соответствовать предъявленным требованиям по точности и конфигурации поля наблюдения.

Список литературы

- 1 Ахмедов Р.М., Бибутов А.А., Васильев А.В. Автоматизированные системы управления воздушным движением. СПб.: Политехника, 2004.
- 2 Правила аэронавигационного обслуживания. Организация воздушного движения. (PANS-ATM, Doc 4444).
3. Doc 9924-AN/474. Руководство по авиационному наблюдению - Изд. 2-е, 2017. 332 с.
4. Скрыпник О.Н. Радионавигационные системы аэропортов и воздушных трасс. - М.: Инфра-М, 2020, 325 с.
5. Multilateration (MLAT) Concept of use. International Civil Aviation Organization. Asia And Pacific Office. Edition 1.0 – September 2007. P.19. Download from https://www.icao.int/APAC/Documents/edocs/mlat_concept.pdf.
6. Скрыпник О.Н., Шегидевич А.А. Особенности рабочих зон многопозиционных систем наблюдения Авиационный вестник, №1, Минск: Белорусская государственная академия авиации. 2019. С.10-17
7. Multilateration. Executive reference guide. CREATIVERGE. ERA corporation. Download from <http://www.multilateration.com/downloads/MLAT-ADS-B-Reference-Guide.pdf>.
8. Арефьев Р.О., Арефьева Н.Г., Скрыпник О.Н. Совершенствование аэронавигационного обеспечения этапа посадки путем оптимизации размещения псевдоспутников ГЛОНАСС. //Труды МАИ. 2017. №92. С.28.