

**Б. В. Лежанкин<sup>1</sup>, В. В. Ерохин<sup>1</sup>, В. С. Марюхненко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Иркутский филиал Московского государственного технического университета гражданской авиации, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого, г. Серпухов, Московская область, Российская Федерация

## **СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ВОЗДУШНОГО СУДНА В МНОГОПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМЕ НАБЛЮДЕНИЯ**

**Аннотация.** Процесс организации и оперативного управления воздушным движением (УВД) при обслуживании воздушного движения (ОВД) возможен на основе получения необходимой информации путем декомпозиции общего процесса измерения-наблюдения. Одним из перспективных направлений совершенствования наблюдения является разработка и внедрение многопозиционной системы наблюдения (MLAT – Multilateration – мультилатерация), позволяющая определять местоположение воздушных судов (ВС), передавая при этом минимальный объем информации. Для обмена данными в системе УВД предлагается использовать радиовещательное автоматическое зависимое наблюдение (АЗН-В), будет осуществляться в автоматическом режиме на протяжении всего полета ВС. Процесс определения местоположения ВС основан на разнице во времени прихода сигнала, излученного объектом и декодированном на приемных станциях. Для определения момента поступления сигнала на принимающие станции, системе требуется единое опорное время, поэтому часы на всех приемниках предлагается по глобальным навигационным спутниковым системам GNSS (Global Navigation Satellite Systems – Глобальная навигационная спутниковая система).

Выполнено имитационное моделирование системы MLAT, приведены характеристики системы с вариантом размещения с целью перекрытия зоны воздушного пространства Иркутского Регионального центра и удовлетворяющие факторам по реализации системы MLAT. Показано, что применение многопозиционной системы наблюдения на основе мультилатерационной технологии позволяет повысить точность определения местоположения воздушного судна благодаря высокоточным псевдодальномерным измерениям, обусловленным высоким качеством синхронизации приемных пунктов системы по сигналам навигационных спутников GNSS и структурой сигнала АЗН-В. Подтверждена целесообразность применения системы MLAT в качестве средства наблюдения для решения задач высокоточного определения местоположения ВС.

Предложено направление структурного синтеза такой сложной информационно-управляющей системы как MLAT, основанное на принципе иерархической ассоциативно-сетевой обработки информации, а также методика расчета эффективности.

**Ключевые слова:** мультилатерация, наблюдение, синхронизация, конфигурация, рабочая зона, местоположение, иерархия, ассоциативность, нейросеть, эффективность .

**B.V. Lezhankin<sup>1</sup>, V. V. Erokhin<sup>1</sup>, V.S. Mariukhnenko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Irkutsk branch of the Moscow State Technical University of Civil Aviation (IB MSTU CA), Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> Military Academy of Strategic Rocket Troops after Peter the Great, Serpukhov, Moscow region, Russia

## **SYSTEM ANALYSIS OF THE PROBLEM OF DETERMINING THE LOCATION OF THE AIRCRAFT IN THE MULTIPOSITAL OBSERVATION SYSTEM**

**Abstract.** Process of the organization and the operational management of air traffic (ATM) at the service of air traffic (АТБ) is possible on the basis of obtaining necessary information by decomposition of the general process of measurement observation. One of the perspective directions of improvement of observation is development and deployment of multiposition system of observation (MLAT – Multilateration), allowing to define location of the aircrafts, transferring at the same time the minimum volume of information. For data exchange in the system of the ATM it is offered to use automatic dependent surveillance broadcast (ADS-B), it will be carried out in the automatic mode throughout all flight of aircraft. Process of positioning of aircraft is based on time difference of arrival of the signal radiated by an object and decoded at reception stations. For definition of the moment of receipt of a signal on the accepting stations, the system needs uniform basic time therefore hours on all receivers it is offered on the GNSS (Global Navigation Satellite Systems).

It is executed imitating modeling of the MLAT system, characteristics of system with placement option for the purpose of overlapping of a zone of airspace of the Irkutsk Regional center and satisfying to factors on realization of the MLAT system are provided. It is shown that use of multiposition system of observation on the basis of multilateration technology allows to increase the accuracy of positioning of the aircraft thanks to the high-precision pseudo-ranging measurements caused by high quality of synchronization of places of acceptance of system on signals of the navigation GNSS satellites and structure of a signal of ADS-B. the expediency of use of the MLAT system as the watch facility for the solution of problems of high-precision positioning of aircraft is confirmed.

The direction of structural synthesis of a complex information-control system MLAT, based on the principle of hierarchical associative-network information processing, is proposed. The methodology for calculating MLAT efficiency is considered.

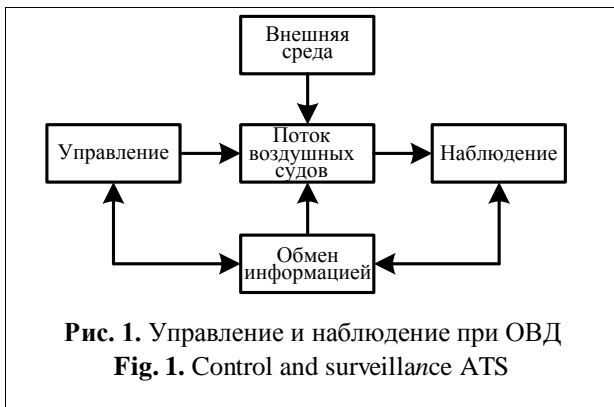
**Keywords:** multilateration, surveillance, synchronization, configuration, working zone, location, hierarchy, associativity, neural network, efficiency.

**Введение.** В соответствии со стратегией развития организации воздушного движения среди приоритетных направлений международной организацией гражданской авиации (International Civil Aviation Organization – ICAO) важное место занимает разработка новых принципов УВД и организации воздушного пространства с наиболее полным учетом навигационного обеспечения воздушных судов. Эти принципы призваны обеспечить высокую пропускную способность сети маршрутов и возможность выполнять полеты по наиболее эффективным траекториям при гарантированном уровне безопасности, как того требуют современные авиационные стандарты. Формирование способности выполнять полеты по траекториям, близким к оптимальным, и повышение пропускной способности сети маршрутов расширит возможности маршрутизации, уменьшит вероятность перегруженности магистральных маршрутов и пунктов пересечения с интенсивным движением и приведет к уменьшению протяженности маршрутов и потребления топлива [1, 2].

Воздушные суда различного назначения выполняют поставленные задачи в рамках выделенного воздушного пространства. Современное ВС – это сложнейшее техническое устройство, имеющее высокую стоимость изготовления и эксплуатации. Для планомерного, безопасного и экономически выгодного использования воздушного пространства в интересах всех пользователей авиационной транспортной системы (АТС) создаются системы самолетовождения и УВД. Управление воздушным движением заключается в постоянном контроле и регулировании процесса выполнения полетов в целях поддержания установленного порядка движения ВС на аэродромах и воздушном пространстве. Самолетовождение и УВД от взлета до посадки представляет собой непрерывный последовательный и взаимосвязанный процесс, обеспечиваемый сложным комплексом автоматизированных средств пилотирования и навигации, наземных, спутниковых и других средств управления [3, 4]. Глубокая взаимосвязь задач решаемых объектами авиационной транспортной системы в процессе самолетовождения

и УВД по обеспечению безопасности воздушного движения позволяет выделить в составе АТС единый комплекс УВД. При этом к навигационному обеспечению предъявляются следующие требования:

- точность навигационной системы должна соответствовать нормам эшелонирования;
- навигационная система должна быть работоспособна в любое время года, суток, при всякой погоде, на различных высотах независимо от характеристик местности;
- надежность системы навигации должна быть такой, чтобы совместно с системой УВД обеспечивался требуемый уровень безопасности полетов по каждой из трех координат;
- навигационная система должна обладать возможностью обеспечения системы УВД навигационной информацией о местоположении ВС;
- навигационная информация должна представляться экипажем в форме, позволяющей легко согласовывать ее с информацией диспетчера, для быстрого и точного выполнения указаний диспетчера.



Процесс организации и оперативного УВД при ОВД возможен на основе получения необходимой информации путем декомпозиции общего процесса измерения-наблюдения, общая схема иллюстрируется рисунком 1.

Обмен данными в системе УВД, базирующейся на использовании возможностей АЗН-В, будет осуществляться в автоматическом режиме на протяжении всего полета ВС. Это позволяет непрерывно отслеживать текущие координаты местоположения ВС. Организация обмена данными в АЗН-В позволяет любому из абонентов системы, зафиксировав момент прихода сообщения, переданного другим объектом, измерить задержку распространения сигнала. Полученное значение задержки отличается от истинного на величину, определяемую рас-

согласованием временных шкал передающего и принимающего объектов, а также внутренними шумами устройства измерения задержки [5–8]. При определении отклонений, превышающих допустимые пределы, или наличии систематического отклонения ВС от заданного профиля полета на земле вырабатываются команды управления, позволяющие устранить несоответствие. Такой подход позволяет реализовать многопозиционную систему наблюдения на основе радиолокационных станций и АЗН-В. Для реализации АЗН-В используются УКВ линии передачи данных (ЛПД) (VDL – Very High-frequency Digital Link) или 1090 ES в составе транспондера системы [4, 9, 10]

Воздушное судно с информационно-управляющей системой MLAT, содержащей бортовые и внебортовые сегменты, представляет собой большую (сложную) систему. Исследование больших систем целесообразно с позиций системного анализа – через декомпозицию, через анализ системы в целом и каждого декомпозиционного элемента в отдельности, через разработку модели системы – к структурному и параметрическому синтезу системы с последующей оценкой её эффективности.

Оценка эффективности синтезированной большой системы одновременно и важный элемент самого синтеза, и сложная самостоятельная задача – завершающий этап системного анализа. Поэтому для принятия решения так важно иметь методику расчета эффективности сложных систем адекватную ситуации её применения.

**Цель статьи:** решение актуальной научной задачи повышения точности определения местоположения воздушного судна путем построения многопозиционной системы наблюдения и исследование особенностей функционирования, возможности её синтеза и оценки эффективности.

**Многопозиционная система наблюдения.** Многопозиционная система наблюдения (MLAT – Multilateration) – это технология, позволяющая определять местоположение само-

летов или иных транспортных или служебных средств без использования специального, дополнительного к имеющемуся оборудованию, передавая при этом минимальный объем информации [11].

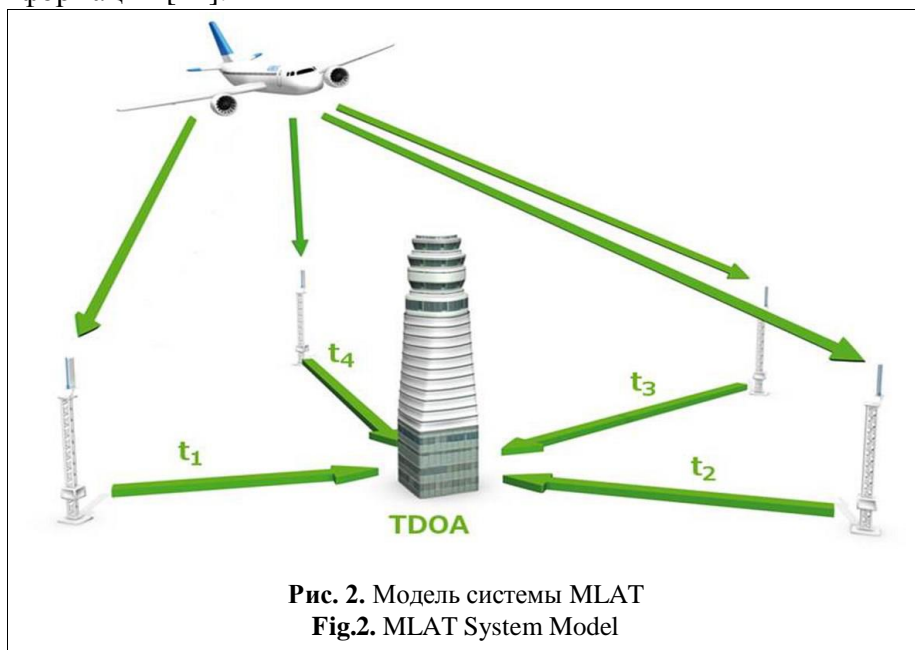


Рис. 2. Модель системы MLAT  
Fig.2. MLAT System Model

Процесс определения местоположения ВС основан на разнице во времени прихода сигнала, излученного объектом (ВС) в направлении приемных станций системы MLAT (TDOA - Time Difference of Arrival – разница во времени прихода) (рис.2).

Системы мультilaterации MLAT могут использоваться для наблюдения за воздушным пространством в зоне аэродрома, на трассе, а также возможно осуществлять

наблюдение за движением воздушных судов по рулежным дорожкам, ВПП на аэродроме.

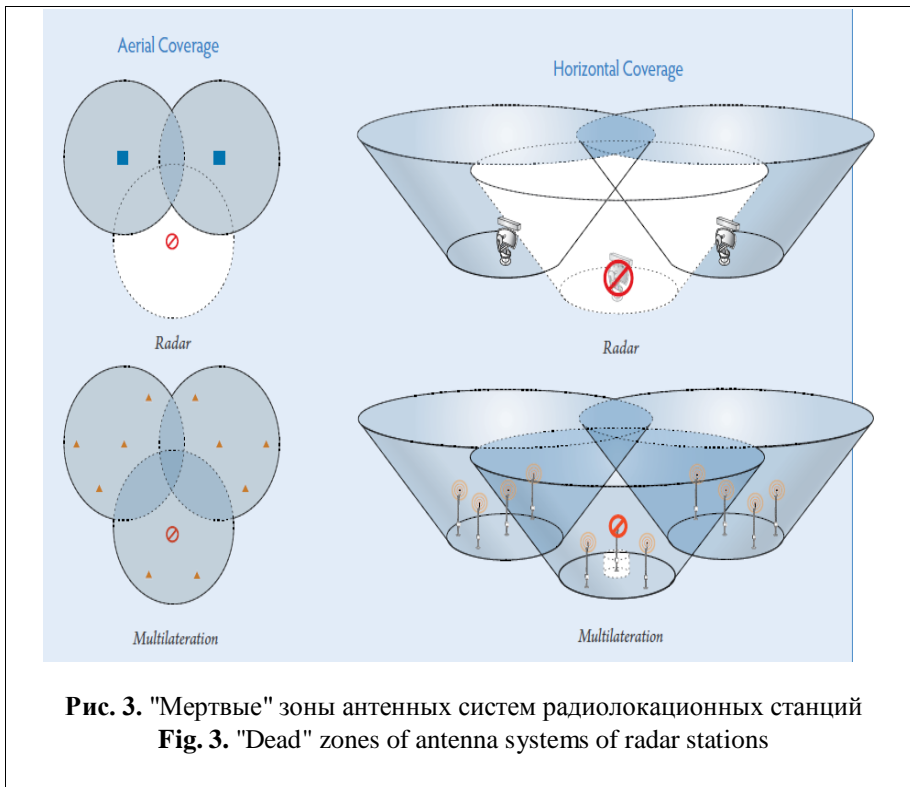
Система MLAT может служить альтернативой классической радиолокационной станции, так как решает задачу перекрытия большой территории с помощью приемных станций, которые можно расставить на местности и увеличивая их количество. Помимо этого система адаптируема в местах со сложным рельефом, при низких затратах на ее установку и обслуживания. Информация о координатах ВС обновляется каждую секунду, что повысит ситуационную осведомленность диспетчеров, а это в свою очередь повышает безопасность полетов, пропускную способность и эффективность.

Также система MLAT обеспечивает высокую точность определения местоположения ВС и обладает таким достоинством, как отсутствие "мертвых" зон, которые присущи классическим радиолокационным станциям (рис. 3).

При реализации системы MLAT необходимо учитывать следующие факторы:

- конфигурация (расположение приемных станций и их количество) влияет на точность определения местоположения ВС;
- размещение приемных станций должно осуществляться с учетом возможности обеспечения электропитанием и техническим обслуживанием.

По принципу построения, системы MLAT можно разделить на активные и пассивные. Пассивная система включает в себя только приемники, а активная плюс к приемникам имеет одну или несколько передающих станций для запроса бортового ответчика вторичной радиолокации (ВРЛ). Основное преимущество активной системы заключается в том, что она не зависит от других источников инициирования передачи данных с борта ВС.



Приемные станции многопозиционной системы наблюдения принимают сигналы ответчиков ВС, декодируют их и передают на сервер-концентратор сообщения, содержащие декодированный ответ и время получения сигнала. Для того чтобы определить местоположение ВС необходимо зафиксировать время получения сигнала на каждой станции. Для определения момента поступления сигнала на принимающие станции, системе требуется единое опорное время. Обычно это достигается одним из двух способов:

1. Все полученные сигналы направляются в центральную обрабатывающую станцию для получения временной отметки по общим часам. В этом случае система должна вычислить время прохождения сообщения между каждой принимающей станцией и центральной станцией и внести соответствующие коррективы. Система передает сообщения между центральной и принимающими станциями для контроля и корректировки времени прохождения;
2. Часы на всех приемниках синхронизируют по общему опорному времени в частности, по глобальным навигационным спутниковым системам GNSS (Global Navigation Satellite Systems) или с использованием передатчика в известном месте [12]. Расстояние между таким передатчиком и принимающими станциями известно, так что с помощью отслеживания времени поступления сигналов от этого передатчика на каждую принимающую станцию можно вносить коррективы в целях поддержания синхронизации часов приемников.

Задача определения расположения объекта на плоскости или в пространстве заключается в вычислении геометрических величин, характеризующих его местоположение. К этим величинам относятся длина пути распространения радиоволн от объекта или дальность и направление на этот объект (ВС). Для определения координата используется разностно-дальномерный метод. Координаты определяются по разностям моментов прихода сигнала в разнесенные приемные пункты. В этом случае определение местоположения ВС можно осуществлять по совокупности имеющихся измерений.

Определение параметров траекторного движения ВС В осуществляется при решении уравнений, описывающих дальность, которые можно представить в виде

$$D_i = c \tau_i(t) = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}, \quad (1)$$

где  $D_i$  – геометрическая дальность от местоположения ВС до  $i$ -й приемной станции;  $x, y, z$  – координаты местоположения ВС;  $\tau_i(t) = t_2 - t_1$  – длительность временного интервала между моментами времени  $t_1$  и  $t_2$  (время задержки сигнала);  $c$  – скорость распространения радиоволн.

Измеренное значение дальности (1) содержит ошибку, поэтому можно представить  $D_i$  следующим образом

$$D_i = D_{ист,i} + \Delta D_i,$$

где  $D_{ист,i}$  – истинное значение дальности от ВС до  $i$ -й наземной станции;  $\Delta D_i$  – ошибка измерения дальности, которую можно представить уравнением

$$\Delta D_i = \Delta D_{синхр,i} + \Delta D_{сл,i} + \Delta D_{трон,i}, \quad (2)$$

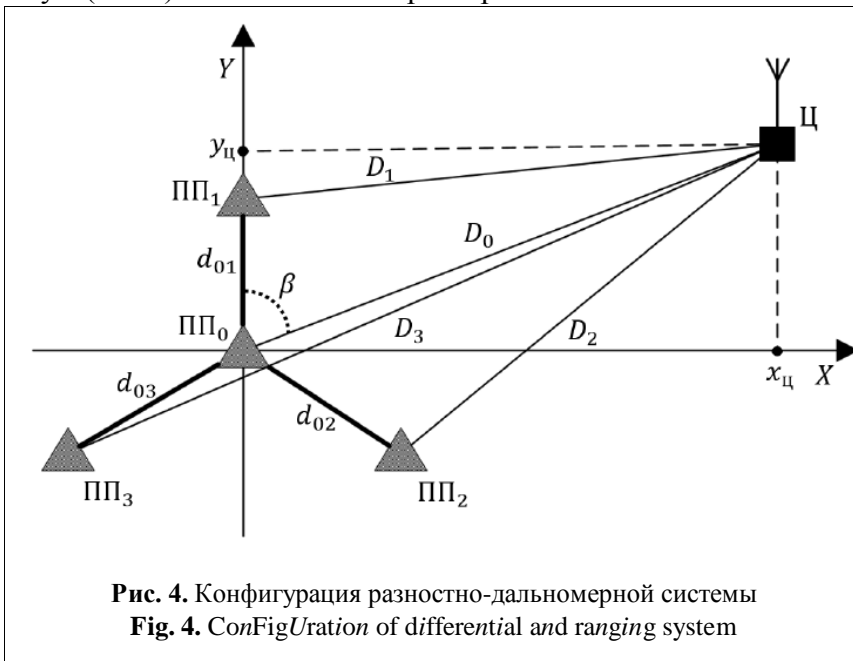
где  $\Delta D_{синхр,i}$  – систематическая погрешность, обусловленная нестабильностью бортового эталона времени и частоты (БЭВЧ);  $\Delta D_{сл,i}$  – случайная составляющая ошибки измерения дальности;  $\Delta D_{трон,i}$  – погрешность, обусловленная рефракцией сигналов в тропосфере.

Погрешность измерений (2) можно представить следующим образом:

$$\Delta D_i = \Delta D_{посм,i} + \Delta D_{фл,i};$$

$$\Delta \dot{D}_{посм,i} = 0; \quad \Delta \dot{D}_{фл,i} = -\frac{1}{\tau_{D_i}} \Delta D_{фл,i} + \frac{1}{\tau_{D_i}} w_{D_i};$$

где  $\Delta D_{посм,i}$  – постоянная составляющая погрешности;  $\Delta D_{фл,i}$  – флуктуационная составляющая погрешности;  $\tau_{D_i}$  – время корреляции;  $w_{D_i}$  – формирующий белый гауссовский шум (БГШ) с известными характеристиками.



В многопозиционное системе наблюдения (рис. 4) измеряют независимые значения  $\Delta \tau_{01}$ ,  $\Delta \tau_{02}$ ,  $\Delta \tau_{03}$  разности времени распространения сигналов от ВС до центрального (опорного) пункта через разнесенные (периферийные) пункты приема (ПП<sub>1</sub>, ПП<sub>2</sub>, ПП<sub>3</sub>).

Для определения положения объекта (ВС) необходимо вычислить две координаты  $x_{ц}$ ,  $y_{ц}$ . Исходной информацией для вычисления координат ВС являются координаты периферийных станций  $x_i$ ,  $y_i$  и разность

дальностей  $\Delta D$  на независимых базах  $d_{01}$ ,  $d_{02}$ ,  $d_{03}$ .

$$\Delta D_{1,2} = \sqrt{(x_2 - x_{ц})^2 - (y_2 - y_{ц})^2} - \sqrt{(x_1 - x_{ц})^2 - (y_1 - y_{ц})^2}.$$

Координаты периферийных станций получаем с помощью карты, а именно: геодезические долготу  $L$  и широту  $B$ . Геодезические координаты переводятся из геодезической в прямоугольную декартовую геоцентрическую систему координат (СК):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (N+h) \cos B \cos L & 0 & 0 \\ 0 & (N+h) \cos B \sin L & 0 \\ 0 & 0 & (N+h-e^2 N) \sin B \end{pmatrix},$$

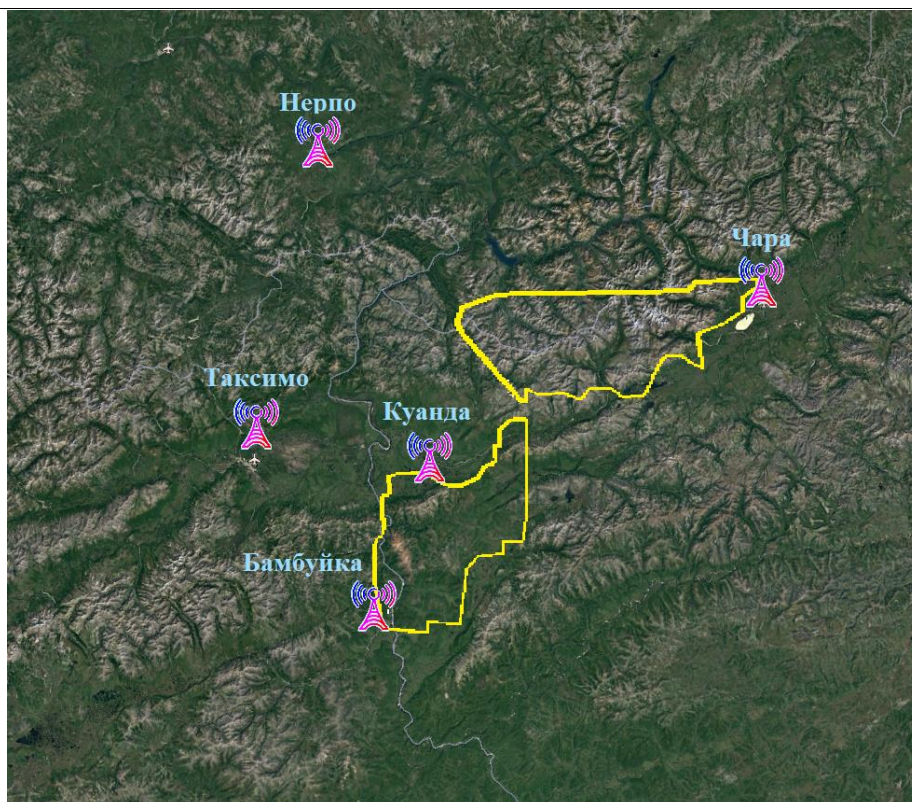


где  $x, y, z$  – координаты станции в прямоугольной геоцентрической СК;  $h$  – высота над поверхностью эллипсоида;  $e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$  – эксцентриситет земного эллипсоида;

$N = a(1 - e^2 \sin^2 B)^{-1/2}$  – радиус кривизны первого вертикала;  $a = 6\,378\,136$  м,  $b = 6\,356\,777$  м.

Тем самым получены прямоугольные координаты для получения пространственного местоположения станций.

**Вариант размещения многопозиционной системы наблюдения в Бодайбинском районе.** При помощи географической карты выбраны пять позиции, в которых располагаются населенные пункты, наиболее подходящие для перекрытия зоны воздушного пространства Иркутского Регионального центра единой системы (ЕС) организации воздушного движения (ОРВД) и удовлетворяющие факторам по реализации системы MLAT. Приемопередающая

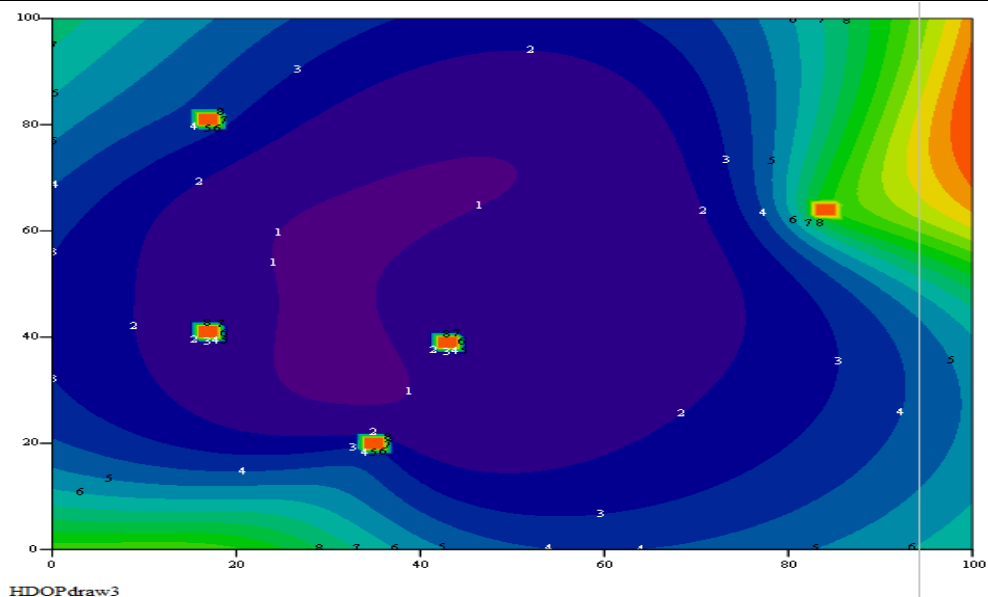


**Рис. 5.** Расположение станций системы MLAT на географической карте

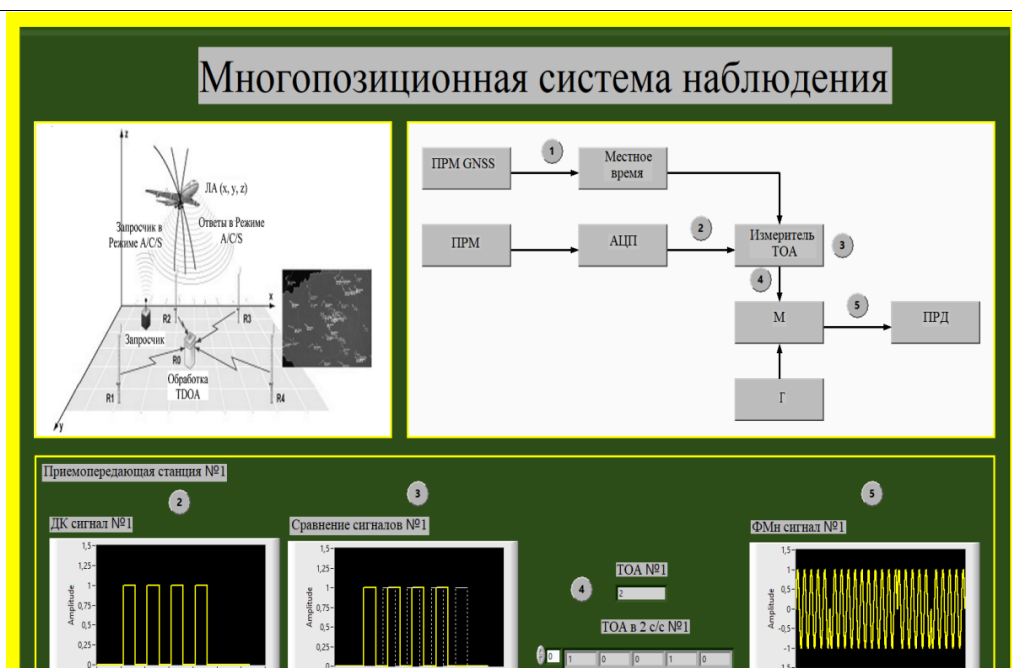
**Fig. 5.** Arrangement of stations of the MLAT system on the map

станция разместится в позиции Таксимо (N56 2133; E1145520), приемные станции - Нерпо (N57 28 13; E115 18 39), Чара (N56 54 27; E118 15 29), Бамбуйка (N55 46 40; E115 46 51) и Куанда (N56 19 39; E116 7 14), которая является опорной (рис. 5). По координатам позиций определяется расстояние между ними.

Для предложенного варианта расположения приемопередающей и приемных станций системы WAM (Wide Area Multilateration – широкозонная система мультilaterации) была построена рабочая зона с учетом высоты полета 5000 м (рис. 6). Она представляет собой область пространства, в пределах которой обеспечивается устойчивый прием сигналов, а погрешность определения местоположения ВС не превышает допустимых значений.



**Рис. 6.** Рабочие зоны системы MLAT для пяти станций на высоте 5000 м  
**Fig. 6.** Working zones of the MLAT system for five stations at the height of 5000 m



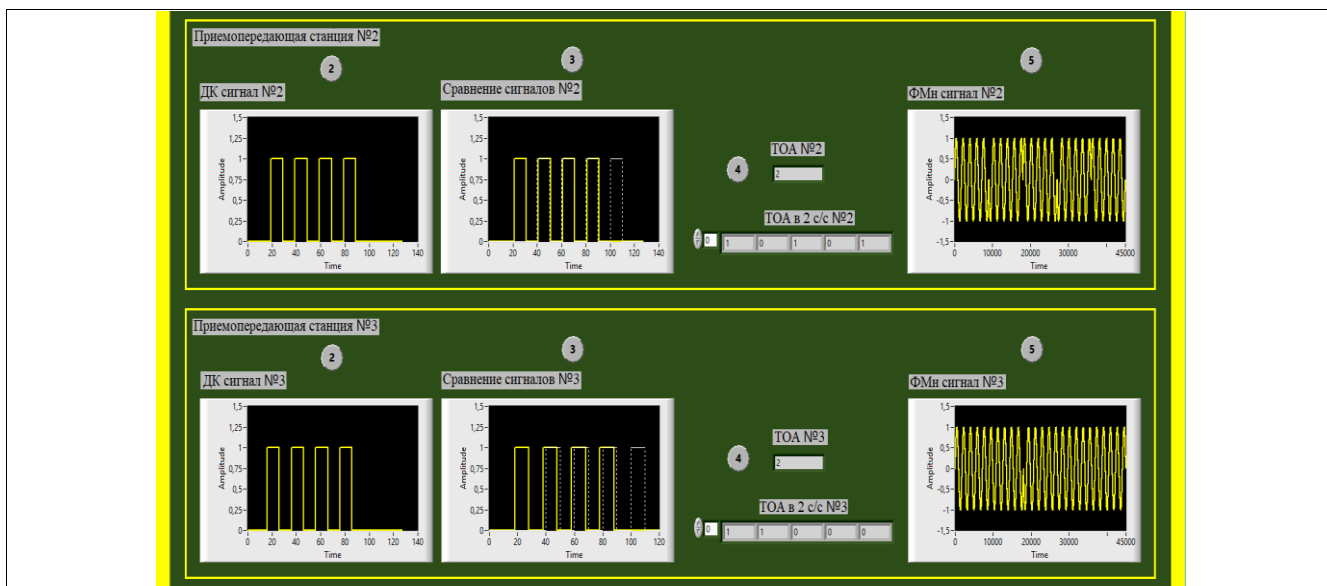
**Рис. 7.** Модель системы WAM в среде графического программирования LABVIEW: геометрическая интерпретация и структурная схема приемопередающей станции  
**Fig. 7.** WAM system model in the environment of graphic programming of LABVIEW: geometrical interpretation and block diagram of the send-receive station

Построенная рабочая зона системы WAM охватывают необходимую территорию, где отсутствует радиолокационный контроль с геометрическим фактором  $HDOP < 4$  ( $HDOP$  Horizontal Delution of Precision), что свидетельствует о хорошей точности определения местоположения ВС. С увеличением высоты полета воздушного судна геометрический фактор  $HDOP$  уменьшается.

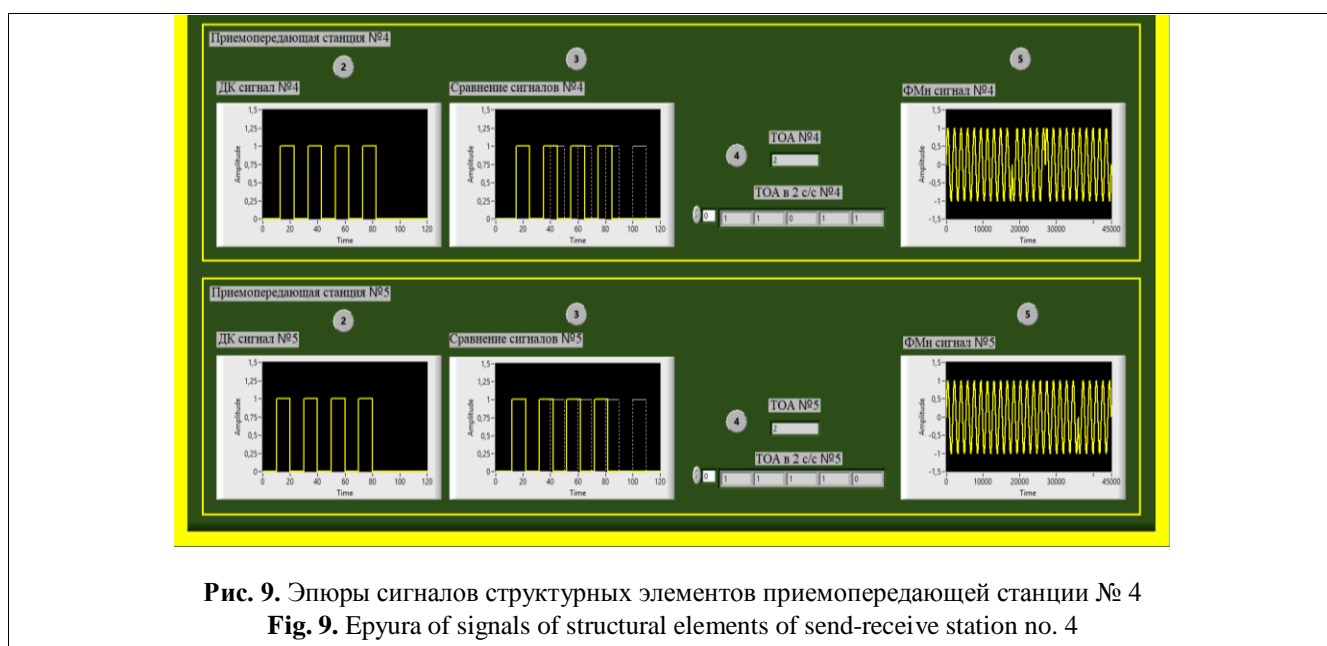
**Моделирование многопозиционной системы наблюдения в среде графического программирования LABVIEW.** Методами имитационного моделирования система WAM



для Бодайбинского района была смоделирована в среде графического программирования LABVIEW (рис. 7).



**Рис. 8.** Эпюры сигналов структурных элементов приемопередающей станции № 2  
**Fig. 8.** Epyura of signals of structural elements of send-receive station No. 2



**Рис. 9.** Эпюры сигналов структурных элементов приемопередающей станции № 4  
**Fig. 9.** Epyura of signals of structural elements of send-receive station no. 4

Ответный сигнал от воздушного судна поступает на приемопередающие станции, после чего преобразуется в цифровую форму и далее поступает на измеритель временной задержки (Измеритель TOA- Time of Arrival). Помимо этого на него поступает единое опорное время, получаемое от навигационных спутников GNSS (Приемник GNSS). Далее происходит сравнение этих сигналов и на выходе выдает измеренное время задержки, которое преобразуется в двоичную систему счисления. После чего моделируется фазовой манипуляцией и передается посредством спутниковой связи в центр УВД Иркутска, где находится сервер-концентратор. Его задача заключается в вычислении координат ВС методом мультilaterации по разнице времен их детектирования приемными станциями.

Анализ результатов имитационного моделирования системы MLAT, показал: при выполнении процесса синхронизации по сигналам навигационных спутников GNSS благодаря высокой точности измерения времени прихода, обусловленной структурой сигнала АЗН-В,



достигается требуемая точность определения координат ВС. Подтверждена целесообразность применения многопозиционной системы наблюдения для определения местоположения ВС.

**Ассоциативно-сетевое структурирование процесса обработки навигационной информации.** Рассмотренная многопозиционная система наблюдения MLAT по всем показателям относится к большим системам с несколькими информационными, управляющими системами и множеством взаимосвязанных элементов. Отдельные элементы и подсистемы обладают конечной надежностью. Между тем сложные системы – системы с резервированием и комплексированием обработки информации. Для них характерна способность сохранять работоспособность при полном или частичном отказе даже нескольких элементов. Модель этого процесса описывается переходной матрицей [13]. При каждом изменении состояния сложной системы изменяются показатели качества так, что выполнить в объеме требования к ним невозможно.

Поэтому целесообразно создать такую систему наблюдения, которой была бы присуща инвариантность эффективности функционирования при изменениях её состояния. Эту задачу позволяет решить применение ассоциативно-сетевой технологии с многоуровневой иерархической обработкой информации [14].

Ассоциативно-сетевое построение системы обработки информации базируется на преобразовании по закону  $F(A)$  некоторого класса  $A$  исходных сигналов из внешней среды в состоянии вершин информационного куба хранения и считывания информации, тем самым формируя некоторый словарь  $\hat{A}$ :

$$\hat{A} = F(A).$$

В общем случае информационный куб многомерный (гиперкуб). В вершинах гиперкуба хранится, а при необходимости считывается, предварительно записанная информация. Запись и считывание информации производится последовательным во времени переходом от вершине к вершине. Последовательность обхода вершин при этом называется траекторией считывания. Траектории считывания могут быть непересекающимися и пересекающимися.

Непересекающиеся траектории с детерминированным выбором вершин гиперкуба позволяют по их словарю  $\hat{A}$  воссоздать исходный массив сигналов единственным образом. Обход вдоль траектории со случайным выбором очередной вершины позволяет получить из словаря  $\hat{A}$  различные фрагменты вектора сигналов  $A$ .

В случае обхода точек пересекающейся траектории воссоздать из массива состояний вершин куба  $\hat{A}$  исходный массив сигналов  $A$  можно множеством вариантов. Такой гиперкуб называется динамическим ассоциативным запоминающим устройством (ДАЗУ).

ДАЗУ с элементами согласования по входу и выходу, коммутаторами траектории, промежуточными преобразователями составляет модуль. Модуль ДАЗУ является топологической основой иерархической структуры (рис. 10).

Каждый модуль ДАЗУ топологической иерархической структуры взаимодействует с внешней для него средой через вход и выход. На вход модуля поступает множество обрабатываемых сигналов в виде синтаксической последовательности  $A$ , которая в ДАЗУ нижнего уровня преобразуется в словарь  $\hat{A}$  (рис. 11).

На выходе ДАЗУ нижнего уровня из словаря  $\hat{A}$ , образуется множество последовательностей  $B$ , являющихся входными для ДАЗУ верхнего уровня. Входная, для ДАЗУ верхнего уровня, синтаксическая последовательность  $B$  преобразуется в словарь  $\hat{B}$ , который в свою очередь генерирует множество выходных синтаксических последовательностей  $C$ . Тем са-

мым происходит информационное согласование последовательностей с задачами обработки на каждом уровне и их распределение на последующие модули.

При функционировании ДАЗУ в иерархических структурах анализ информации осуществляется обработкой словарей снизу вверх – последовательно с нижнего уровня до верхнего. Формирование поуровневых словарей предполагает обработку на каждом уровне всей информации, поступающей на вход иерархической структуры.

Информация свертывается по мере поднятия с низких иерархических уровней, на более высокие, так как выделение на каждом уровне словарей способствует освобождению от часто встречающихся (по заданному порогу встречаемости) фрагментов последовательностей. Одновременно на верхнем уровне происходит запоминание признаков отбрасываемых на текущем уровне фрагментов информации из нижнего уровня, что способствует её восстановлению при пропадании часто встречающихся (основных) фрагментов.

Потребитель информации верхнего уровня формирует целенаправленное воздействие на среду, т.е. – происходит синтез управления.

Структура, синтезирующая управление аналогична анализирующей, только информация распространяется с верхнего уровня. При этом она от модуля к модулю преобразуется и обогащается подробностями. И достаточно «зацепиться» за фрагмент навигационной обстановки, записанной в одной из вершин гиперкуба, чтобы, поиском перекрывающихся фрагментов в иных вершинах, восстановить всю информационную картину.

Такой подход к обработке информации в многопозиционной системе наблюдения позво-

ляет применять модули ДАЗУ и структуру гиперкуба для синтеза навигационного обеспечения подвижных объектов транспорта с эффективностью инвариантной физической структуре КНС.

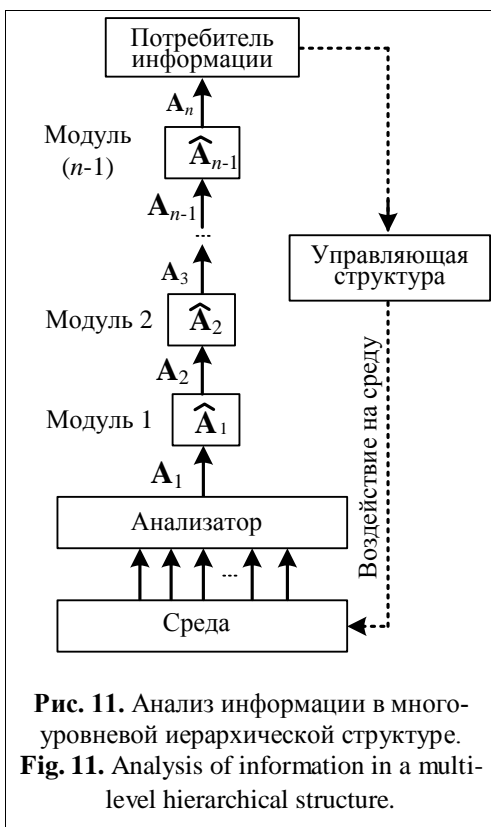
Таким образом, концептуально разработанный нейросетевой подход к структурированию обработки навигационной информации в многопозиционной системе наблюдения обеспечивает непрерывность и инвариантность эффективности решения основной задачи навигации от состояния системы [15].

Вместе с тем такой подход усугубляет требования к разработке конкретных алгоритмов комплексирования и ставит новые задачи по их детализации в конкретных условиях и для конкретных целей с целью достижения независимости эффективности функционирования MLAT.

**Эффективность многопозиционной системы наблюдения.** Воздушное судно с информационно-управляющей системой MLAT, содержащей бортовые и внебортовые сегменты, представляет собой большую (сложную) систему. Исследование больших систем целесообразно с позиций системного анализа – через декомпозицию, через анализ системы в целом и каждого декомпозиционного элемента в отдельности, через разработку модели системы – к структурному и параметрическому синтезу системы с последующей оценкой её эффективности.

Оценка эффективности информационно-управляющей системы MLAT, которая имеет существенные признаки сложной системы, – это одновременно и важный элемент самого синтеза, и сложная самостоятельная задача – завершающий этап системного анализа.

Поэтому для принятия решения при выборе структуры, состава и алгоритмов функционирования MLAT так важно иметь методику расчета эффективности сложных систем, адекват-



ватную ситуации применения системы.

Для информационной системы, которая имеет больше одного показателя качества, целесообразным является применение в качестве критерия эффективности произведения

$$W = \prod_{i=1}^N k_i \hat{U}_i, \quad (3)$$

где  $0 < \hat{U}_i \leq 1$  – безразмерное нормированное к единице значение показателя качества системы  $U_i$  относительно нормирующего значения  $U_{н.i}$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ :

$$\hat{U}_i = U_i / U_{н.i}; \quad 0 < \hat{U}_i \leq 1; \quad (4)$$

$k_i \leq 1$  – весовые коэффициенты соответствующих показателей;  $N$  – количество показателей, принятых для формирования критерия эффективности.

Сложная система может находиться в одном из  $M$  состояний, которые зависят от режимов, особенностей работы и показателей надежности как системы в целом, так и её элементов. Каждому  $m$ -му состоянию системы,  $m = \overline{1, M}$ , соответствует эффективность, оцениваемая частным критерием  $W_m$ , вычисляемым в соответствии с формулой (3). С учетом этих замечаний предлагается выражение для общего критерия эффективности сложной системы записать в виде

$$W_c = C_0 + \sum_{m=1}^M [20 \lg(q_m W_m)], \quad (5)$$

где  $W_m$  – определяемый по формуле (3) частный критерий эффективности системы в состоянии  $m$ ;  $q_m \leq 1$  – положительные весовые коэффициенты частных критериев эффективности;  $C_0$  – постоянная составляющая, которая вводится для исключения отрицательных значений эффективности:

$$C_0 = \left| \min_{m=1}^M [20 \lg(q_m W_m)] \right|. \quad (6)$$

Функция логарифма, принятая в выражении (5), позволяет сжать диапазон изменений искомой величины при сохранении наглядности и придать ей размерность – *децибелы эффективности* (дБ/э).

Основными методами построения функций (3) и (5) являются: метод главных компонент, метод задания весовых коэффициентов, метод ранжировки. Метод главных компонент предполагает, что в формулах (3) и (5) числа  $N \leq 3$  и/или  $M \leq 3$ , соответственно  $k_i \equiv 1$  и  $q_m \equiv 1$ , а остальные частные критерии отбрасываются, как оказывающие малое влияние [16].

Метод задания весовых коэффициентов заключается в придании, например методом экспертных оценок, весовым коэффициентам  $k_i$  и  $q_m$  определенных значений.

Метод ранжировки (метод задания плавающих весовых коэффициентов) предполагает «выстраивание» показателей по рангу. При этом показатели низкого ранга учитываются, если показатель более высокого ранга нулевой.

Выражение (5) соответствует требованиям, которые предъявляются к вычислению критерия эффективности, а именно [16]:

а) представляет собой определенную, однозначную и монотонную функцию аргументов;

б) является удобным для продуктивного вычисления показателя;

в) отражает физический смысл влияний показателей качества и частных критериев.

После преобразований формулы (5) с учетом выражения (3) уравнение для вычисления общего критерия эффективности принимает вид:

$$W_{но} = C_0 + C_q + C_k + 20 \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^{N_m} [\lg(\hat{U}_{mi})], \quad (7)$$

где  $C_q$  и  $C_k$  – постоянные, зависящие от весовых коэффициентов:

$$C_q = 20 \sum_{m=1}^M [\lg(q_m)]; \quad C_k = 20 \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^{N_m} \lg(k_{mi});$$

$N_m$  – количество тождественно ненулевых показателей качества информационной системы в её  $m$ -м состоянии.

В случае, если весовые коэффициенты  $k_{mi}=q_m=1$ , формула (7) упрощается:

$$W_{\text{но}} = C_{0,\text{мин}} + 20 \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^{N_m} [\lg(\hat{U}_{mi})], \quad (8)$$

где [см. формулу (6)]

$$C_{0,\text{мин}} = \left| \min_{m=1}^M \left\{ \min_{i=1}^{N_m} [20 \lg(\hat{U}_{mi})] \right\} \right|. \quad (9)$$

Таким образом, получены формулы [(7) и (8)], которые предлагается использовать для вычисления общего критерия эффективности сложных (больших) систем, изначально характеризующихся множеством возможных состояний  $M > 1$  и множеством  $N_m \geq 1$  показателей качества в каждом из состояний.

**Заключение.** Анализ приведенных зависимостей и характеристик, полученных методом имитационного моделирования в среде графического программирования, позволяет сделать вывод о возможности использования система MLAT в качестве средства наблюдения для решения задач высокоточного определения местоположения ВС. При этом система MLAT сможет обеспечить высокую, по сравнению с радиолокационными станциями, точность определения местоположения ввиду отсутствие "мертвых" зон. Основой для структурного синтеза MLAT может стать нейросетевой подход к обработке навигационной информации, а приведенная методика – адекватным подходом к расчету эффективности применения многопозиционной системы наблюдения.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Глобальный аэронавигационный план на 2013-2028 гг. Международная организация гражданской авиации. Doc 9750-AN/963. 4-е изд., – 2013г. – 147 с.
2. Крыжановский Г.А. Концепция и системы CNS/ATM в гражданской авиации. – М.: Академкнига, 2003. – 415 с.
3. Анодина Т.Г., Кузнецов А.А., Маркович Е.Д. Автоматизация управления воздушным движением / под ред. А.А. Кузнецова. – М.: Транспорт, 1992. – 280 с.
4. Ахмедов Р.М., Бибутов А.А., Васильев А.В. Автоматизированные системы управления воздушным движением: Новые информационные технологии в авиации / под ред. С.Г. Пятко и А.И. Красова. – СПб.: Политехника, 2004. – 446 с.
5. Strohmeier M., Lenders V., Martinovic I. On the Security of the Automatic Dependent Surveillance-Broadcast Protocol. IEEE Communications Surveys & Tutorials 17 (2): 04-2014. – P. 1066-1087.
6. Chen Y-H, Lo S, Akos D.M., Wong G, Enge P.A. Testbed for Studying Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) Based Range and Positioning Performance to Support Alternative Position navigation and Timing (APNT). *Proceedings of the 26th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of navigation (ION GNSS+ 2013)*, Nashville, TN: 09-2013, pp. 263-273
7. Cho T., Lee C., Choi S. Multi-Sensor Fusion with Interacting Multiple Model Filter for Improved Aircraft Position Accuracy. *Sensors* 2013, 13, 4122-4137; doi:10.3390/s130404122.
8. Doukas D., Berends J., Rees M., Kerkhofs G. CnS/ATM Ground Station and Service Status Reports; SuR.ET1.ST05.2000-STD-16-01; European Air Traffic Management: Brussels, Belgium.
9. Межетов М.А., Туринцев С.В. Выделение сигналов тактовой синхронизации в системах передачи информации режима VDL-2. *Crede Experto: транспорт, общество, образование,*

10. Межетов М.А., Туринцев С.В., Серебрянников Е.А., Никитич П.Т. Increase of efficiency of airdrome traffic control on the base of receiving the differential corrections by mobile airdrome vehicles. *Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык*. 2017. № 2. С. 288–298.

11. Mantilla-Gaviria I. A., Leonardi M., Galati G., Balbastre-Tejedor J. V. Localization algorithms for multilateration (MLAT) systems in airport surface surveillance. *Signal, Image and Video Processing*. 2015, Volume 9, Issue 7, pp. 1549-1558.

12. Шестаков И.Н., Крыжановский Г.А. Расширение поля СРНС с помощью наземных станций АЗН-В // *Научный вестник МГТУ ГА*. – 2014 (210). – С. 114–117.

13. Ярлыков, М. С. Статистическая теория радионавигации / М.С. Ярлыков. — М.: Радио и связь, 1985. — 344 с.

14. Харламов А.А. Нейросетевая технология представления и обработки информации (естественное представление знаний). Кн. 19. Монография / Под ред. Галушкина. – М.: Радиотехника, 2006. – 88 с.

15. Марюхненко В.С., Ерохин В.В. Синтез ассоциативно-сетевой структуры комплексной навигационной системы с оптимальной обработкой информации / *Успехи современной радиоэлектроники*. 2017, №4. – С.18–29

16. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / Дмитриев [и др.]; под ред. В. С. Шебшаевич. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Радио и связь, 1993. — 408 с.

#### REFERENCES

1. *Global'nyy aeronavigatsionnyy plan na 2013-2028 gg. Mezhdunarodnaya organizatsiya grazhdanskoy aviatsii*. [The Global Air Navigation Plan for 2013-2028. International Civil Aviation Organization]. Doc 9750-AN / 963. 4 th ed., - 2013. - 147 pp. (in Russian).

2. Kryzhanovskiy G.A. *Kontseptsiya i sistemy CNS/ATM v grazhdanskoy aviatsii* [The concept and systems of CNS / ATM in civil aviation]. - Moscow: Akademkniga, 2003. - 415 p. (in Russian).

3. Anodina T.G., Kuznetsov A.A., Markovich Ye.D. *Avtomatizatsiya upravleniya vozдушным движением* [Automation of air traffic control] / Ed. A.A. Kuznetsov. - Moscow: Transport, 1992. - 280 p. (in Russian).

4. Akhmedov R.M., Bibutov A.A., Vasil'yev A.V. *Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya vozдушным движением: novyye informatsionnyye tekhnologii v aviatsii* [Automated air traffic control systems: new information technologies in aviation] / Ed. S.G. Pyatko and A.I. Krasova. - St. Petersburg: Politechnica, 2004. - 446 p. (in Russian).

5. Strohmeier M., Lenders V., Martinovic I. On the Security of the Automatic Dependent Surveillance-Broadcast Protocol. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 17 (2): 04-2014. – P. 1066-1087.

6. Chen Y-H, Lo S, Akos DM, Wong G, Enge PA Testbed for Studying Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) Based Range and Positioning Performance to Support Alternative Position Navigation and Timing (APNT). *Proceedings of the 26th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2013)*, Nashville, TN: 09-2013, pp. 263-273

7. Cho T, Lee C, Choi S Multi-Sensor Fusion with Interacting Multiple Model Filter for Improved Aircraft Position Accuracy. *Sensors* 2013, 13, 4122-4137; doi:10.3390/s130404122.

8. Doukas D., Berends J., Rees M., Kerkhofs G. CNS/ATM Ground Station and Service Status Reports; SUR.ET1.ST05.2000-STD-16-01; *European Air Traffic Management: Brussels, Belgium*.

9. Mezhjetov M.A., Turintsev S.V. *Vydeleniye signalov taktovoy sinkhronizatsii v sistemakh peredachi informatsii rezhima VDL-2* [Isolation of clock synchronization signals in VDL-2 mode



information transfer systems] Crede Experto: transport, society, education, language. 2017. № 2. P. 191-200. (in Russian).

10. Mezhetov M.A., Turintsev S.V., Serebrennikov Ye.A., Nikitich P.T. Increase of efficiency of airdrome traffic control on the base of receiving the differential corrections by mobile airdrome vehicles. Crede Experto: transport, society, education, language. 2017. № 2. P. 288-298.

11. Mantilla-Gaviria I. A., Leonardi M., Galati G., Balbastre-Tejedor J. V. Localization algorithms for multilateration (MLAT) systems in airport surface surveillance. Signal, Image and Video Processing. 2015, Volume 9, Issue 7, pp. 1549-1558.

12. Shestakov I.N., Kryzhanovskiy G.A. Rasshireniye polya SRNS s pomoshch'yu nazemnykh stantsiy AZN-V [Expansion of the SRNS field by means of ground stations ADS-B]. Scientific Bulletin of MGTU GA No. 210, Moscow, 2014 - p. 114-117. (in Russian).

13. Yarlykov, M. S. Statisticheskaya teoriya radionavigatsii / M. S. Yarlykov. – M.: Radio i svyaz, 1985. – 344 p.

14. Kharlamov A.A. Neyrosetevaya tekhnologiya predstavleniya obrabotki informatsii (estestvennoe predstavleniye znaniy). Kn. 19. Monografiya / Pod.red. Galushkina. – M.: Radio-tekhnika, 2006. – 88 p.

15. Mariukhnenko, V. S., Erokhin V.V. Sintez assotsiativno-setevoy struktury kompleksnoy navigatsionnoy sistemy s optimal'noy obrabotkoy informatsii / Uspekhi sovremennoy radioelektroniki. 2017, №4. – P.18–29

16. **Setevyye** sputnikovyye radionavigatsionnyye sistemy / Dmitriyev [i dr.]; pod red. V. S. She-bshayevich. – 2-ye izd., pererab. i dop. – M.: Radio i svyaz', 1993. – 408 p.

#### Информация об авторах

*Лежанкин Борис Валентинович* – к. т. н., доцент, заведующий кафедрой «Авиационное радиоэлектронное оборудование» ИФ МГТУ ГА, e-mail: lezhbor@mail.ru

*Ерохин Вячеслав Владимирович* – к. т. н., доцент, доцент кафедры «Авиационное радиоэлектронное оборудование» ИФ МГТУ ГА, e-mail: [ww\\_erohin@mail.ru](mailto:ww_erohin@mail.ru)

*Марюхненко Виктор Сергеевич* – д. т. н., профессор, Военная академия РВСН им. Петра Великого (филиал в г. Серпухов, Московская область, Россия), e-mail: viktor.maryuhnenko@yandex.ru

#### Authors

*Lezhankin Boris Valentinovich* – candidate of technical sciences, associate professor, head of the department «Aviation Radioelectronic Equipment» of the IB MSTU CA, e-mail: lezhbor@mail.ru

*Erokhin Vyacheslav Vladimirovich* – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the department «Aviation Radioelectronic Equipment» of the IB MSTU CA, e-mail: [ww\\_erohin@mail.ru](mailto:ww_erohin@mail.ru)

*Mariukhnenko Viktor Sergeevich* – doctor of technical sciences, professor, The Military Academy of Strategic Rocket Troops after Peter the Great (a branch in Serpukhov, Moscow region, Russia), e-mail: [viktor.maryuhnenko@yandex.ru](mailto:viktor.maryuhnenko@yandex.ru)

#### Для цитирования

Б. В. Лежанкин, В. В. Ерохин, В. С. Марюхненко Системный анализ задачи определения местоположения воздушного судна в многопозиционной системе наблюдения // «Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами»: электрон. науч. журн. – 2019. – №1. – С. 46-61 – Режим доступа: <http://ismm-irgups.ru/toma/12-2019>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. (дата обращения: 25.03.2019)

**For citation**

Lezhankin B.V., Erokhin V.V., Mariukhnenko V.S. Sistemnyy analiz zadachi opredeleniya mestopolozheniya vozdušnogo sudna v mnogopozitsionnoy sisteme nablyudeniya [System analysis of the problem of determining the location of the aircraft in the multiposital observation system] // Informacionnye tehnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal [Information technology and mathematical modeling in the management of complex systems: electronic scientific journal], 2019. No. 1. P. 46-61. [Accessed 25/03/19]