

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.4.14>  
УДК 621.396.96

## ОБОСНОВАНИЕ ПОДХОДА К СНИЖЕНИЮ ВАРИАТИВНОСТИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ФАКТОРА СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ТЕХНОЛОГИИ MLAT

С. С. Семенюк, Е. В. Христичан, Р. Р. Саниев

Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,  
197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д.13

Статья поступила в редакцию 25 марта 2021 г.

**Аннотация.** Представлены результаты оценивания возможностей технологии MLAT в части, касающейся точности определения местоположения самолетов по сигналам системы ADS-B в зависимости от геометрической конфигурации системы приемных пунктов и их числа. На основании полученных результатов выявлены параметры геометрической конфигурации системы MLAT, наиболее существенно влияющие на точность оценивания координат источников воздушного базирования в зоне контроля. Предложен вариант размещения приемных пунктов в зоне контроля, обеспечивающий снижение уровня неопределенности относительно точности оценивания координат.

**Ключевые слова:** определение местоположения, точность определения местоположения, система ADS-B, технология MLAT.

**Abstract.** Estimating results of the MLAT technology capabilities regarding accuracy of air basing radio sources positioning using ADS-B system signals depending on receiving points system geometric configuration are presented. Based on the obtained results, geometric configuration parameters of the MLAT system which most significantly affect the accuracy of estimating the airborne sources coordinates in the monitoring area are identified. The variant of the receiving points placement in control area which ensures a decrease in uncertainty level regarding coordinate estimation accuracy is proposed.

**Key words:** locating, positioning accuracy, ADS-B system, MLAT technology.

## Введение

В настоящее время широкое распространение и активное развитие получила система ADS-B (от англ. Automatic dependent surveillance-broadcast), предназначенная для обеспечения безопасности воздушного движения. Приемопередающие средства системы ADS-B устанавливаются как на гражданские, так и на военные самолеты. Средства ADS-B, установленные на самолетах, излучают сигналы, содержащие информацию как о текущем положении в пространстве и скорости самолета, так и о других параметрах. Однако даже при наличии передатчиков ADS-B не все самолёты передают свои координаты, при этом существует вероятность передачи ложных координат с целью дезинформации и реализации противозаконных действий. Поэтому в целях верификации и пополнения данных о воздушной обстановке, формируемой системой ADS-B, в настоящее время активно реализуются пассивные методы определения местоположения (ОМП), основанные на измерении координатно-информативных параметров принимаемых сигналов.

Для решения этих задач широко используется технология MLAT (от англ. Multilateration), обеспечивающая расширение возможностей системы ADS-B по формированию ситуационной осведомленности пилотов самолетов и диспетчеров аэродромов. К современным системам, реализующим данную технологию, относятся аэродромная многопозиционная система наблюдения «Альманах» [1], автоматизированные системы радиоконтроля мобильных объектов [2].

Однако, существует сложность обоснования числа и определения геометрической конфигурации приемных пунктов с учетом рельефа местности, различной высоты источников и других факторов, т.к. требования по точности ОМП и задействованным ресурсам могут существенно отличаться в зависимости от целевого назначения системы ОМП [3].

Так в презентации системы «Альманах» [1] указано, что число станций приема не должно быть меньше четырех, а среднеквадратическая ошибка ОМП самолетов в горизонтальной плоскости достигает 3,5 м в зонах максимальной

точности. При этом широко известно, что точность ОМП в рабочих зонах системы распределена неравномерно, более того величины и характер распределения точностей существенно зависят от параметров геометрической конфигурации системы. Массовое оснащение аэропортов системой «Альманах» только начинается, а вопросы рационального размещения пунктов приема для обеспечения высокой точности определения координат самолетов не освящены и являются актуальными.

Цель работы состоит в обосновании геометрической конфигурации системы ОМП, снижающей вариативность точности определения координат воздушных объектов по технологии MLAT в зоне контроля воздушного движения.

## 1. Геометрический фактор ОМП по технологии MLAT

Технология MLAT основана на применении разностно-дальномерного метода ОМП источников радиоизлучений воздушного базирования (ИВБ). Для определения координат самолетов используется несколько разнесенных в пространстве приемных пунктов. При этом в качестве координатно-информативного параметра используется разность времен прихода радиосигналов в приемные пункты.

Пусть положению ИВБ соответствует вектор координат  $S_H = [x \ y \ z]^T$ , а система ОМП состоит из  $N$  приемных пунктов. Тогда расстояние от ИВБ до  $k$ -го приемного пункта с координатами может быть описано выражением вида

$$d^{(k)} = \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2 + (z - z_k)^2}, k = 1(1)N. \quad (1)$$

Паре приемных пунктов с номерами  $i$  и  $j$  соответствует разность дальностей до ИВБ

$$r^{(i,j)} = d^{(i)} - d^{(j)}, i, j \in \{1, 2, \dots, N\}. \quad (2)$$

Представим  $(N-1)$  линейно-независимых разностей дальностей в виде вектора вида

$$R_{\langle N-1 \rangle} = [r^{(1,2)}, r^{(1,3)}, \dots, r^{(1,N)}]^T. \quad (3)$$

Известно, что наиболее существенное влияние на точность определения координат при ОМП источников разностно-дальномерным методом оказывают такие факторы, как погрешность оценивания разностей дальностей и взаимное расположение приемных пунктов системы ОМП относительно друг друга, а также относительно ИВБ [4].

Влияние взаимного расположения элементов системы ОМП и ИВБ характеризуется геометрическим фактором, определяющим, во сколько раз погрешность ОМП больше ошибки определения разностей дальностей в зависимости от той или иной геометрической конфигурации сети приемных пунктов [4, 5].

Геометрический фактор системы ОМП в заданной точке пространства  $S_H$  может быть определен по формуле вида [4, 5]

$$k_G(S_H) = \frac{\sigma}{\sigma_R} = \frac{\sqrt{\text{tr}((G^T G)^{-1})}}{\sigma_R}. \quad (4)$$

где  $\sigma$  – среднеквадратическая ошибка (СКО) ОМП ИВБ;

$\sigma_R$  – СКО определения разностей дальностей;

$G = \left[ \frac{\partial R_{\langle N-1 \rangle}}{\partial S_H} (S_H) \right]^T$  – матрица Якоби размером  $(N-1) \times 3$ , элементами которой

являются все частные производные первого порядка функции  $R(S_H)$  в точке  $S_H$  [4];

$\text{tr}(\cdot)$  – след матрицы.

## 2. Точность оценивания разностей дальностей

Координатно-информативным параметром, позволяющим определить разность дальностей при реализации разностно-дальномерного метода, как правило, является разность времен прихода радиосигналов в пространственно-разнесенные приемные пункты. Указанная величина может быть измерена путем определения максимума взаимокорреляционной функции радиосигналов,

принятых в двух пространственно разнесенных приемных пунктах. В этом случае дисперсия оценки разности времен прихода радиосигнала в приемные пункты определяется выражением вида [6]

$$\sigma_{\Delta t}^2 = \frac{1}{\frac{2E_c}{N_0} (2\pi\Delta f_{\text{экв}})^2}, \quad (5)$$

где  $E$  – энергия сигнала на интервале анализа;

$N_0$  – спектральная плотность средней мощности шума;

$\Delta f_{\text{экв}}$  – эквивалентная ширина спектра сигнала.

Для сигналов с равномерным спектром шириной  $\Delta f_c$  величина  $\Delta f_{\text{экв}}$  постоянна и равна  $\Delta f_c / 2\sqrt{3}$ .

Следует отметить, что выражение (5) применяется в радиолокации к сигналам в виде одиночных радиоимпульсов с высоким отношением сигнал/шум  $q$  (т.е.  $E_c \gg N_0$ ) при наличии на приемной стороне эталонной копии сигналов. Применительно к рассматриваемым сигналам системы ADS-B указанное выражение может быть использовано для определения максимально достижимой точности оценивания временной задержки. Например, величина точности оценивания временной задержки будет близка к максимально достижимой в том случае, когда в качестве опорного будет использован сигнал на входе одного из приемных пунктов, имеющий высокое отношение сигнал/шум, или модель сигнала, сформированная по результатам ремодуляции одного из принятых сигналов.

Радиосигналы системы ADS-B, применяемые в режиме Mode-S, передаются с использованием дискретной амплитудной манипуляцией. Радиосигнал длительностью  $T_c$  содержит  $N$  элементарных амплитудно-модулированных импульсов, в силу чего  $T_c = N\tau_s$ . Тогда для энергии радиосигналов ADS-B справедливо выражение вида

$$E_c = E_0 N = E_0 T_c / \tau_s = E_0 T_c \Delta f_c = E_0 B, \quad (6)$$

где  $E_0$  - энергия одного элементарного амплитудно-модулированного импульса;

$\Delta f_c$  – ширина спектра сигнала;

$B$  – база сигнала.

Допустим, что полоса пропускания приемника соответствует ширине спектра сигнала. Тогда

$$\frac{2E}{N_0} = 2 \frac{E_0 T_c / \tau_3}{N_0} = 2Bq_{\text{ex}}, \quad (7)$$

где  $q_{\text{ex}}$  – отношение сигнал/шум на входе приемника.

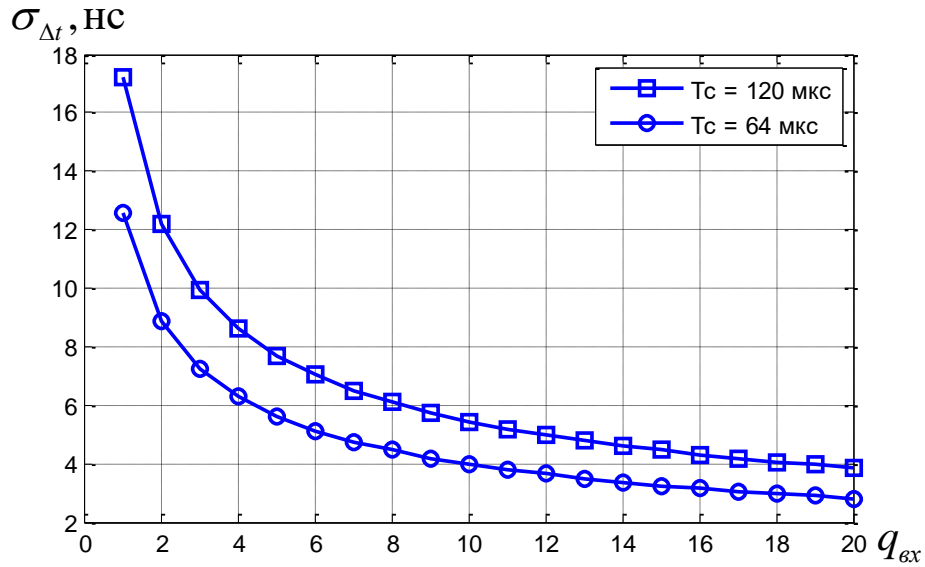
С учетом выражений (5) и (7) величина среднеквадратического отклонения (СКО) ошибки измерения разности времен прихода радиосигнала в приемные пункты может быть вычислена по формуле вида

$$\sigma_{\Delta t} = \frac{1}{\pi \Delta f_c} \sqrt{\frac{3}{2Bq_{\text{ex}}}}, \quad (8)$$

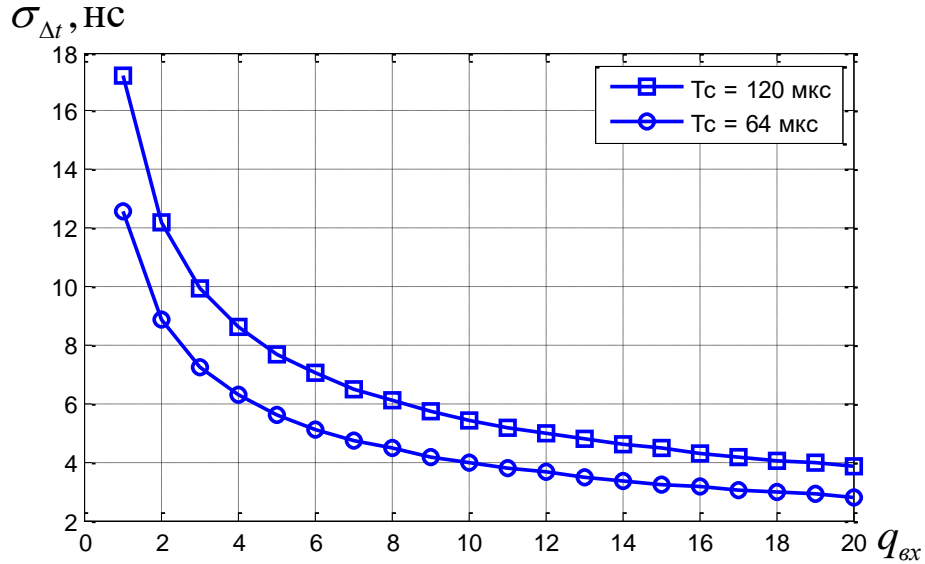
Известно, что длительность  $\tau_3$  элементарного импульса радиосигнала системы ADS-B, передаваемого в режиме Mode-S, составляет величину 0,5 мкс. Длительность  $T_c$  радиосигналов режима Mode-S составляет величины 64 мкс и 120 мкс (короткий и расширенный сквитеры соответственно). С учетом указанных величин в соответствии с выражением (8) рассчитаем потенциально достижимое СКО разности времен прихода радиосигнала в приемные пункты. Результаты расчета в виде зависимостей СКО измерения координатно-информативного параметра от отношения сигнал/шум на входе приемника для короткого и расширенного сквитеров представлены на рис. 1а.

Учитывая, что  $\sigma_R = c\sigma_{\Delta t}$ , рассчитаем зависимость СКО оценивания разности дальностей (параметра местоположения) от отношения сигнал/шум. Результаты расчета в виде зависимостей СКО измерения параметра местоположения от отношения сигнал/шум на входе приемника для короткого и расширенного пакетов (сквитеров) представлены на рис. 1б.

Величина  $\sigma_{\Delta t}$ , рассчитанная по формуле (8), определяет потенциально достижимую точность измерения координатно-информативного параметра и параметра местоположения. Полученные результаты могут быть использованы при расчете потенциально достижимой точности определения координат ИВБ.



а)



б)

Рис. 1. Потенциальная точность измерения координатно-информативного параметра (а) и измерения параметра местоположения (б).

### 3. Рабочие области системы МЛАТ

Для оценивания качества определения координат системой ОМП ИВБ как правило используют так называемые рабочие области. Под рабочей областью системы ОМП понимается ограниченный объем пространства, внутри которого погрешность ОМП не превосходит заданного значения [4]. Таким образом рабочая область может быть охарактеризована поверхностями равной погрешности ОМП, построенными с помощью уравнения (4) при условии  $\sigma = const$  и  $\sigma_R = 1\text{ м}$ .

Рассмотрим вариант системы ОМП, состоящей из минимального набора приемных пунктов, т.е. из четырех, расположенных в вершинах квадрата в одной плоскости  $A$ . Очевидно, что ошибки определения местоположения ИВБ, расположенных на прямой  $D$ , перпендикулярной плоскости  $A$  и проходящей через центр квадрата, стремятся к бесконечности (Рис.2а). Это обусловлено тем, что истинные разности дальностей до ИВБ, расположенных на прямой  $D$ , для всех пар приемных пунктов равны нулю на всем ее протяжении. В качестве размера системы определим радиус  $R_{\text{опт}}$  окружности, описывающей фигуру, которая формируется приемными пунктами.

Вместе с тем, ошибки определения местоположения ИВБ, расположенных на одной из двух плоскостей  $B$  и  $C$ , взаимно перпендикулярных и перпендикулярных плоскости  $A$ , также имеют большие значения (Рис.2б). Это обусловлено тем, что истинные разности дальностей до ИВБ, расположенных на этих плоскостях, имеют равные значения как минимум для одной из используемых для измерения независимых баз (пар приемных пунктов). Так, разности дальностей до ИВБ, расположенных в любой точке на плоскости  $B$ , имеют равные значения для измерительных баз, образуемых парами пунктов 1-2 и 3-4. Форма рабочих областей системы на высоте  $H = 3000$  м с такой геометрической конфигурацией, представленный на рис. 3а, подтверждает наличие указанных «разрывов» рабочих областей.



Для устранения подобных разрывов целесообразно разместить один из приемных пунктов в центре системы ОМП, а остальные – в вершинах треугольника. Рабочая зона такой системы на высоте  $H = 3000$  м представлена на рис. 3б.

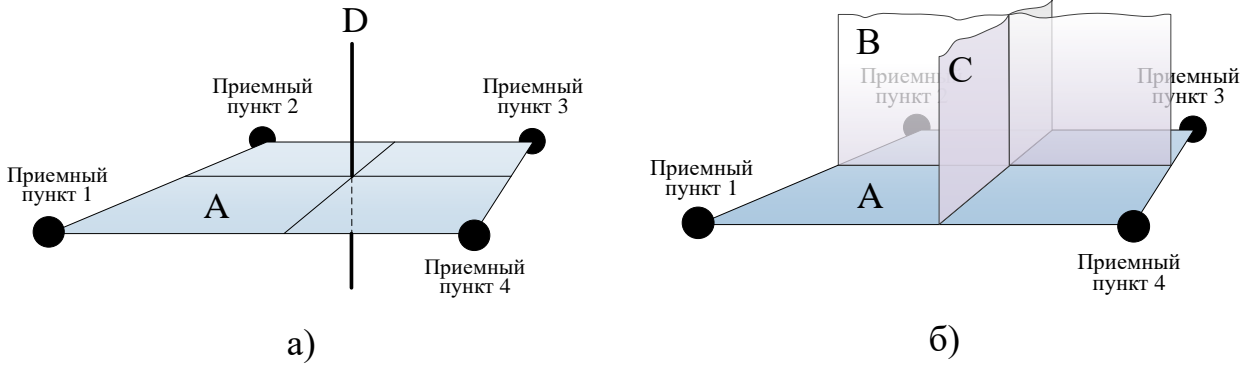


Рис.2. Геометрическое место точек высоких погрешностей ОМП ИВБ в пространстве при расположении приемных пунктов в вершинах квадрата на плоскости:

а) – прямая высоких погрешностей; б) – плоскости высоких погрешностей.

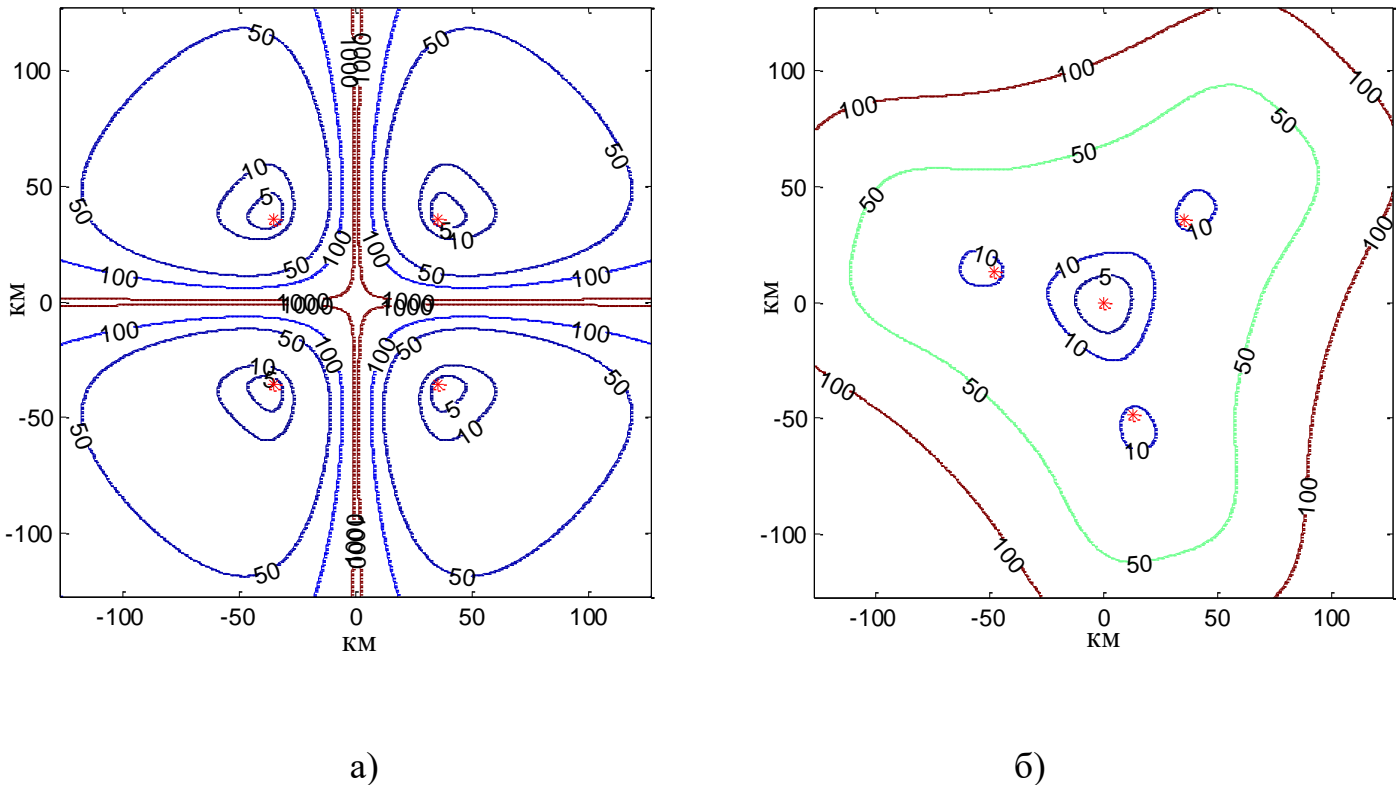


Рис.3. Иллюстрация линий равной погрешности ОМП ИВБ системой из четырех приемных пунктов, размещенных в вершинах квадрата,

при  $R_{омп} = 50000$  м,  $\sigma_R = 1$  м и  $H = 3000$  м.

Погрешности ОМП ИВБ на линиях указаны в метрах.

Следует отметить, что для определения погрешностей ОМП ИВБ, имеющих место при значениях  $\sigma_R$ , отличных от единицы, необходимо умножить значения погрешностей ОМП, представленных на рис.3, на величину  $\sigma_R$ , зависимость которой от отношения сигнал/шум представлена на рис. 1.

#### 4. Пространственная доступность

Известно, что точность ОМП разностно-дальномерным методом тем выше, чем больше размеры системы (базы ОМП) по отношению к дальности до ИРИ [4]. Однако, увеличение расстояний между приемными пунктами ведет к снижению совместной пространственной доступности системы к ИВБ в зоне контроля воздушного движения (ЗКВД).

В ходе наблюдения за ИВБ зона контроля за воздушным движением в зависимости от целевого назначения системы ОМП может быть ограничена прямоугольником, окружностью и другими фигурами. Пусть система из  $N$  приемных пунктов, размещена в центре ЗКВД, которая представляет собой квадрат со стороной  $L$  на поверхности Земли, над которым может находиться ИВБ. Пусть также размер системы ОМП определяется радиусом окружности, на которой находятся приемные пункты. Взаимное расположение ЗКВД и элементов системы ОМП ИВБ представлено на рис. 4а.

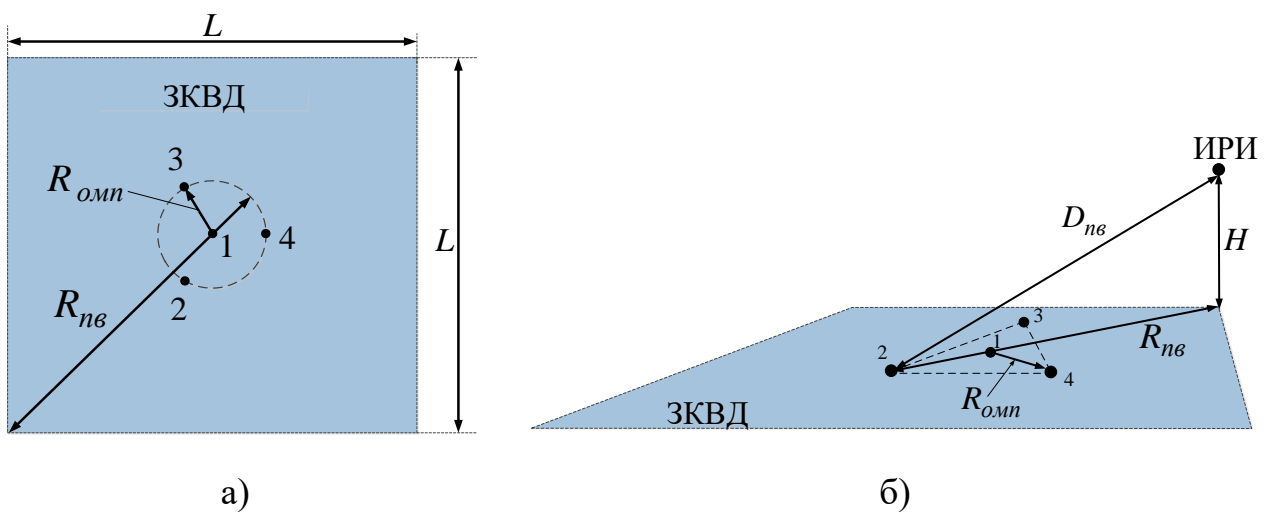


Рис.4. Взаимное расположение ЗКВД и элементов системы ОМП ИВБ.

Для определения взаимных размеров системы ОМП  $R_{омп}$  и зоны контроля  $L$  воспользуемся известной формулой дальности прямой видимости (в км) вида [7]:

$$D_{не} \approx 4,12(\sqrt{H_{np}} + \sqrt{H}), \quad (9)$$

где  $H_{np}$  – высота приемного пункта, м.

Дальность прямой видимости по поверхности Земли оценочно может быть определена с помощью формулы:

$$R_{не} \approx 2R_3 \arcsin\left(\frac{\sqrt{D_{не}^2 - H^2}}{2R_3}\right), \quad (10)$$

где  $R_3$  – радиус Земли.

Очевидно, что для обеспечения пространственной доступности всех элементов системы ОМП к ИВБ в ЗКВД на высоте  $H$  необходимо, чтобы расстояние между приемными пунктами и любой точкой в ЗКВД по поверхности Земли не превышало  $R_{не}$  (рис. 4). Ориентировочные значения линейных размеров  $L$  ЗКВД для различных высот ИВБ и линейных размеров системы ОМП, полученные в соответствии с формулами 9 и 10, представлены в табл. 1.

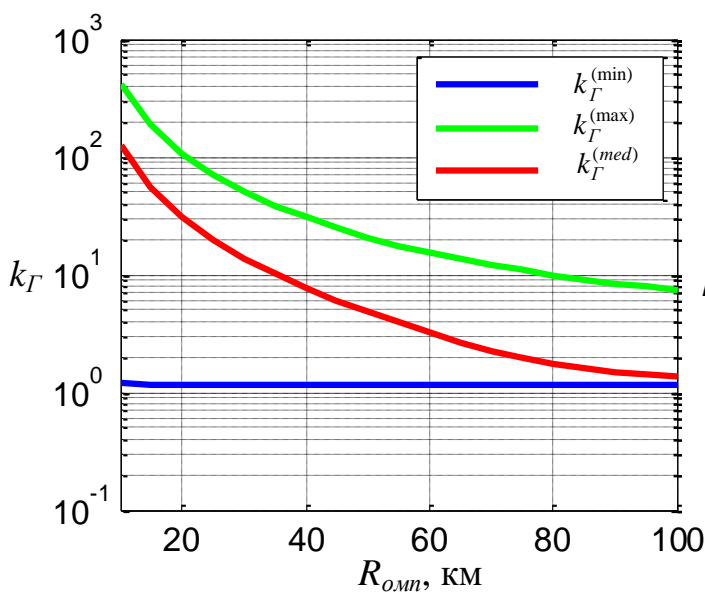
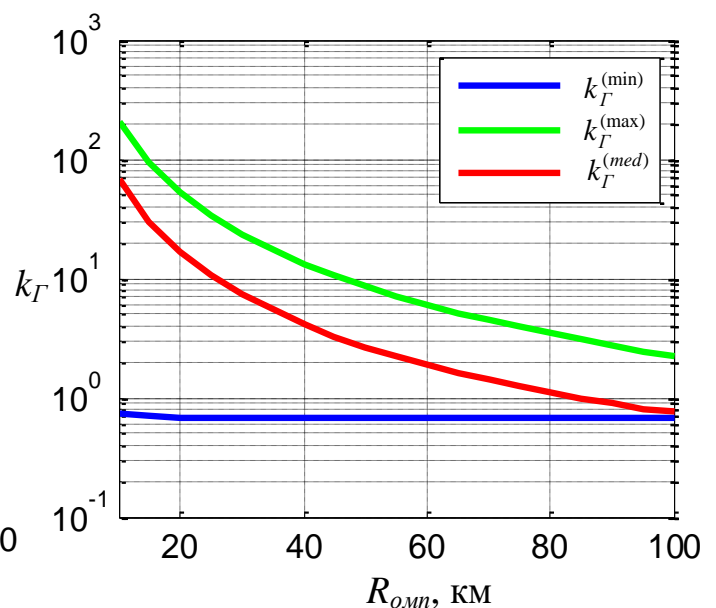
Таблица 1 Оценочные значения линейных размеров  $L$  (км) ЗКВД при различных высотах ИВБ и линейных размерах системы ОМП

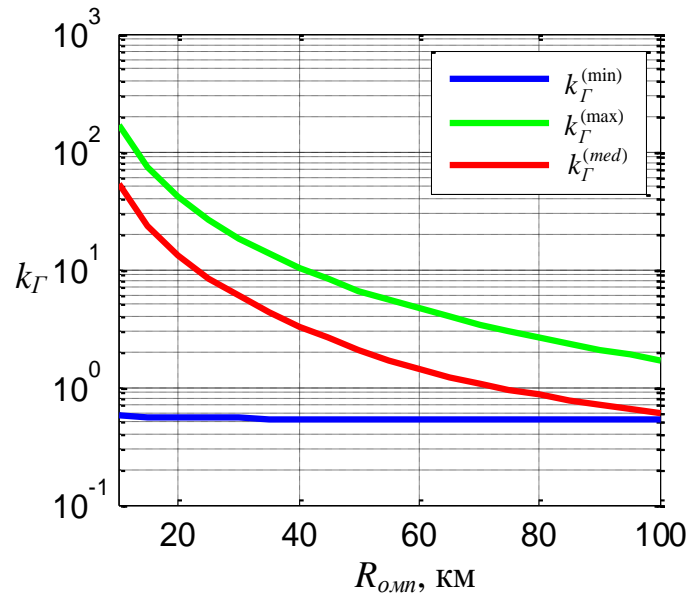
	$H = 100$ м	$H = 3000$ м	$H = 6000$ м	$H = 9000$ м
$R_{омп} = 100$ м	63,95	324,79	456,93	558,30
$R_{омп} = 1000$ м	62,68	323,52	455,66	557,02
$R_{омп} = 5000$ м	57,02	317,86	450,00	551,37
$R_{омп} = 10000$ м	49,95	310,79	442,93	544,30
$R_{омп} = 30000$ м	21,67	282,51	414,64	516,01
$R_{омп} = 50000$ м	0	254,22	386,36	487,73
$R_{омп} = 100000$ м	0	183,51	315,65	417,02

Результаты, представленные в таблице 1, свидетельствуют о том, что размеры ЗКВД  $L$  уменьшаются с ростом размера  $R_{омп}$  системы ОМП. При размерах системы, превышающих 30 км, возможности определения координат ИВБ во время посадки существенно снижаются в случае размещения приемных пунктов на земной поверхности. Полученные значения линейных размеров ЗКВД в зависимости от расстояния между приемными пунктами необходимо учитывать при оценивании возможностей проектируемой системы ОМП на основе технологии MLAT. Например, размещать приемные пункты на высотах, совместную пространственную доступность приемных пунктов в ЗКВД.

## 5. Влияние линейных размеров и числа элементов системы MLAT на точность определения координат

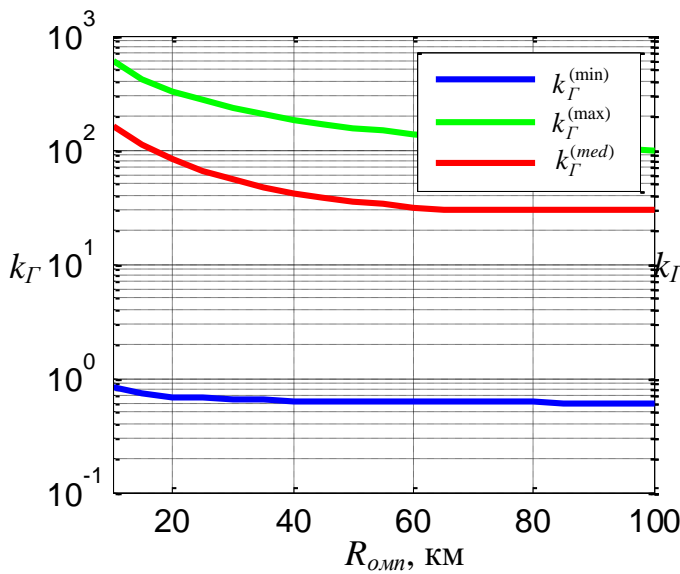
Для оценивания характера зависимости точности ОМП от размеров системы приемных пунктов целесообразно воспользоваться такими параметрами, как минимальный  $k_{\Gamma}^{(min)}$ , максимальный  $k_{\Gamma}^{(max)}$  и медианный  $k_{\Gamma}^{(med)}$  геометрические факторы в ЗКВД. Графики зависимостей горизонтальной и вертикальной составляющих указанных параметров для различного числа используемых приемных пунктов  $N$  представлены для на рис. 5 и 6.

а)  $N = 4$ б)  $N = 8$

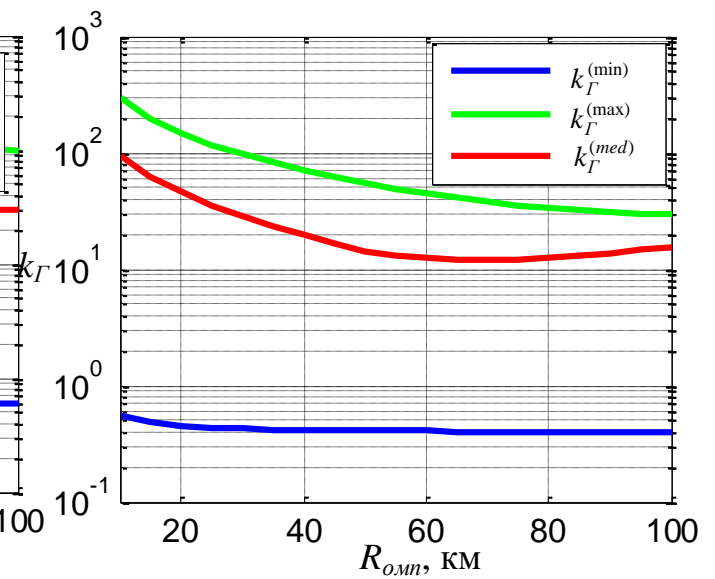


в)  $N = 12$

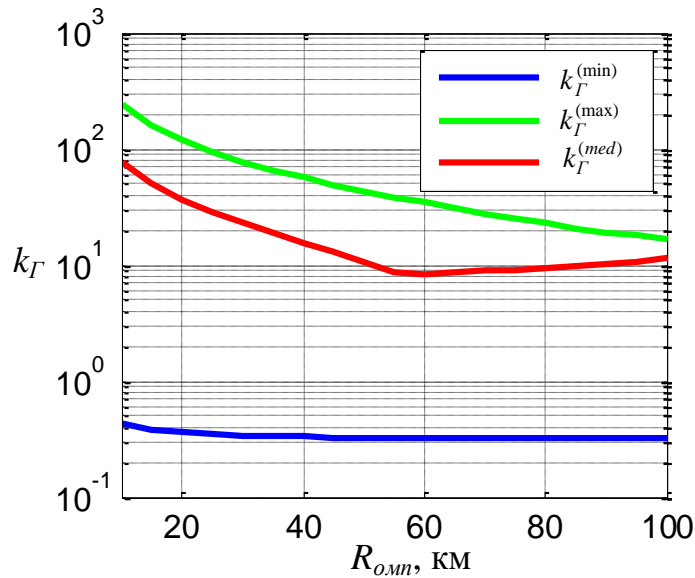
Рис. 5. Зависимость параметров распределения горизонтальной составляющей геометрического фактора в ЗКВД от размера системы ОМП  $R_{omn}$  для различного числа приемных пунктов при  $H = 3000$  м.



а)  $N = 4$



б)  $N = 8$



в)  $N = 12$

Рис. 6. Зависимость параметров распределения вертикальной составляющей геометрического фактора в ЗКВД от размера системы ОМП  $R_{омп}$  для различного числа приемных пунктов при  $N = 3000$  м.

Анализ полученных зависимостей с учетом графика, представленного на рис.1б, показывает, что точность в горизонтальной плоскости, равная 3,5 м, достижима в некоторых точках рабочих зон и при минимальном числе приемных пунктов. Однако, с учетом медианных значений геометрического фактора на представленных графиках, вероятность ее достижения даже при таких оптимистичных параметрах, как  $q_{вх} = 10$  дБ,  $R_{омп} = 50$  км и  $N = 12$ , составляет величину, близкую 0,5. Вероятность достижения такой точности по высоте существенно ниже. Разница между максимальным и минимальными значениями геометрического фактора определяет его вариативность в зоне контроля. В целом разница между максимальным и минимальными значениями геометрического фактора не превышает 10 раз только в горизонтальной плоскости для  $R_{омп} > 80$  км. Это свидетельствует о том, что процесс ОМП ИВБ по технологии MLAT характеризуется высокой вариативностью, а следовательно – высокой неопределенностью относительно точности оценок координат в ЗКВД.

## 6. Снижение вариативности геометрического фактора в ЗКВД

Представленные результаты свидетельствуют, что одна из существенных проблем применения технологии MLAT состоит в большом разбросе значений

геометрического фактора в ЗКВД. Это подтверждается большой разницей между максимальным и минимальным значениями геометрического фактора на графиках, представленных на рис. 5, 6. Данное обстоятельство ведет к высокой неопределённости относительно точности определяемых координат. Чем меньше вариативность геометрического фактора в ЗКВД, тем ниже неопределенность относительно величины погрешности оценок координат ИВБ. Простое увеличение расстояний между приемными пунктами до линейных размеров ЗКВД позволяет снизить погрешности и дисперсию геометрического фактора, однако ведет к значительному снижению совместной пространственной доступности приемных пунктов к ИВБ (табл. 1).

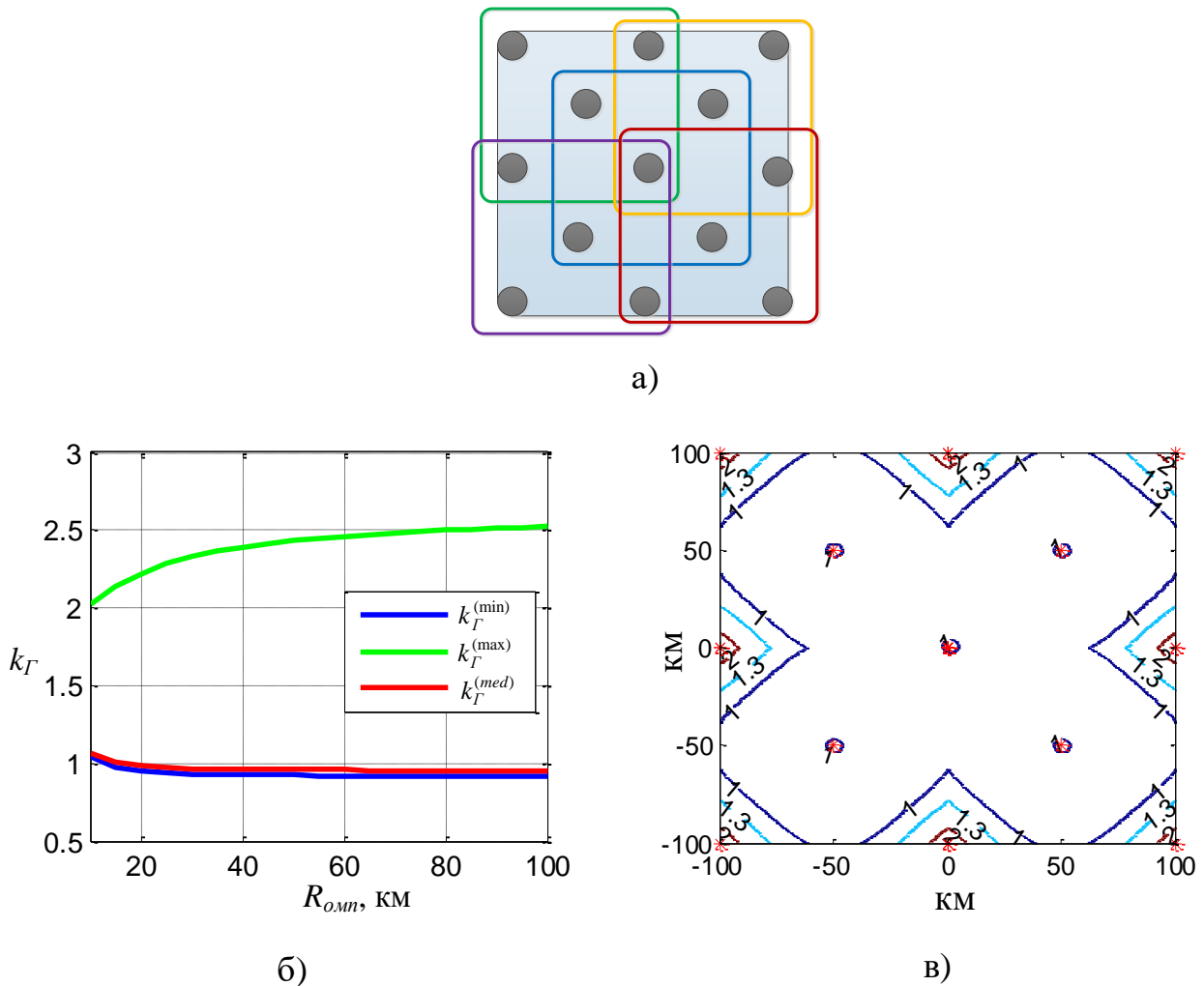


Рис. 7. Вариант размещения приемных пунктов в ЗКВД, обеспечивающий равномерное распределение геометрического фактора (а) и результаты оценивания параметров геометрического фактора при таком размещении (б,в).

С учетом результатов проведенных исследований для решения этой проблемы возможно равномерное распределение приемных пунктов в ЗКВД, как показано на рис. 7 а, и разбиение их на группы, каждая из которых отвечает за свою часть ЗКВД.

Каждая группа приемных пунктов имеет более высокую совместную пространственную доступность к ИВБ в своей зоне ответственности, чем крайние приемные пункты во всей ЗКВД. Вместе с тем в каждой группе обеспечено такое размещение приемных пунктов, при котором отсутствуют разрывы в рабочих областях. Принципы разбиения множества приемных пунктов на группы по критерию допустимой погрешности представлены в [8].

Графики зависимости горизонтальной составляющей максимального, минимального и медианного геометрического фактора в ЗКВД для такого размещения приемных пунктов представлены на рис. 7 б. Распределение горизонтальной составляющей геометрического фактора в ЗКВД на высоте 3000 м для  $R_{омп} = 70$  км представлено на рис. 7 в. Представленные графики свидетельствуют, что равномерное размещение приемных пунктов в ЗКВД и разделение их на группы позволяет снизить дисперсию геометрического фактора, а, значит, снизить неопределенность относительно точности ОМП ИВБ в ЗКВД без существенного снижения уровня совместной пространственной доступности.

## **Заключение**

Применение технологии MLAT позволяет расширить возможности системы ADS-B по формированию и слежению за воздушной обстановкой, а также обеспечить ее верификацию в условиях, когда самолетами не передаются координаты или передаются ложные координаты. Однако существует противоречие в необходимости уменьшения размеров системы MLAT для обеспечения совместной пространственной доступности к ИВБ в ЗКВД (табл.1) с одной стороны и увеличения размеров системы MLAT для повышения точности ОМП (рис.5, 6, 8, 9) с другой стороны. Вместе с тем точность ОМП ИВБ по



технологии MLAT в значительной степени зависит от геометрической конфигурации системы приемных пунктов и их числа (рис. 3, 5, 6, 8, 9).

Проведенные исследования показывают, что:

- при исследовании вариантов размещения приемных пунктов необходимо руководствоваться не наилучшей точностью в ЗКВД, а вариативностью геометрического фактора в ЗКВД, которая характеризует уровень неопределенности процесса ОМП ИВБ относительно точности определения координат;

- равномерное размещение приемных пунктов в ЗКВД и разделение их на группы (рис.10а) позволяет снизить вариативность геометрического фактора и неопределенности относительно точности ОМП ИВБ в ЗКВД без существенного снижения уровня совместной пространственной доступности.

### Литература

1. Презентация интегрированной многопозиционной системы наблюдения: [электронный ресурс]. Научно-производственное предприятие «ЦРТС», СПб. URL: <http://www.npp-crts.ru/production/multilateratsiya/almanakh> (Дата обращения: 23.11.2020).
2. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. *Автоматизированные системы радиоконтроля и их компоненты*. Москва, Горячая линия – Телеком, 2017. 424 с.
3. Скрыпник О.Н. *Радионавигационные системы воздушных судов: учебник*. Москва, Инфра-М. 2014.
4. Семенюк С.С., Уткин В.В., Бердинских Л.Н. Геометрический фактор разностно-дальномерной сети датчиков в пространстве. *Научные технологии*. 2012. №8. С.66–73. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17997685>
5. Абакумов А.Н., Семенюк С.С. Исследование влияния геометрической конфигурации разностно-дальномерной системы на точность определения местоположения абонентских терминалов спутниковых систем связи. *Труды*

*ВКА им. А.Ф. Можайского*. № 634. 2014. С.40-50. URL:  
<https://elibrary.ru/item.asp?id=22968993>

6. Коростелев А.А., Ключев Н.Ф., Мельник Ю.А. и др. *Теоретические основы радиолокации: учебное пособие для вузов*. Москва, Сов. Радио. 1978. 608 с.
7. Смирнов Ю.А. *Радиотехническая разведка*. Москва, Воениздат. 2001. 456 с.
8. Лопатин Е.А., Семенюк С.С. Метод разбиения множества распределенных в пространстве датчиков на разностно-дальномерные группы определения местоположения при оперативном мониторинге радиообстановки. *Доклады ТУСУР*. 2011. №2(24). Ч.1. С.25–33. URL:  
<https://elibrary.ru/item.asp?id=17340548>

**Для цитирования:**

Семенюк С.С., Христиничан Е.В., Саниев Р.Р. Обоснование подхода к снижению вариативности геометрического фактора системы определения координат воздушных объектов по технологии MLAT. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.4.14>