

## Радиолокационные и радионавигационные системы

УДК 621.396.96

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СУММАРНО-ДАЛЬНОМЕРНОЙ СИСТЕМЫ РАЗНЕСЁННОГО ПРИЁМА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТРЁХ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ КООРДИНАТ НИЗКОЛЕТАЮЩИХ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ

**Первушин Радислав Валентинович**

кандидат технических наук, доцент Муромского института (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»<sup>1</sup>.

**Терсин Владимир Владимирович**

кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер АО «Муромский завод радиоизмерительных приборов» (АО «МЗ РИП»)<sup>2</sup>.

*E-mail:* vvtersin@yandex.ru

<sup>1</sup>Адрес: 602267, Российская Федерация, Владимирская обл., г. Муром, ул. Орловская, д. 23.

<sup>2</sup>Адрес: 602267, Российская Федерация, Владимирская обл., г. Муром, Карачаровское шоссе, д. 2.

**Аннотация:** Исследован суммарно-дальномерный алгоритм оценки положения воздушных объектов в трёхмерном пространстве для географической системы координат. Приёмники отражённого сигнала располагаются не ниже плоскости, касающейся поверхности Земли в центральной (передающей) позиции. Диаграммы направленности антенн передающей и приёмных позиций должны быть изотропными. После проведения экспериментов с имитационной моделью было выяснено, что оценка высоты является смещённой. С ростом полосы излучаемого сигнала и высоты полёта низколетящего воздушного объекта смещение и среднеквадратическая ошибка оценки высоты уменьшаются, а с ростом расстояния от передающей позиции — увеличиваются. Эксперименты показывают, что для получения приемлемых оценок высоты полоса сигнала не должна быть меньше 20 МГц. Угловые координаты низколетящего воздушного объекта (долгота и широта) измеряются с гораздо более высокой точностью и существенно меньшим смещением. Высота полета объекта измеряется также точно, как его долгота и широта, если воздушный объект находится над передающей или приёмной позицией.

**Ключевые слова:** разнесённый приём, суммарно-дальномерный алгоритм, географическая система координат, смещение оценки, среднеквадратическая ошибка, долгота, широта, высота, полоса сигнала.

Для измерения долготы, широты и высоты полёта воздушных объектов система разнесённого приёма должна состоять, как минимум, из одной передающей и трёх приёмных позиций, трёхмерные координаты которых должны быть известны точно [1, 2]. Точное измерение координат наземных позиций может производиться с помощью многократного использования системы глобального позиционирования ГЛОНАСС во время развертывания позиций. Любая из трёх антенн приёмных позиций должна располагаться не ниже плоскости, проходящей

через антенны двух оставшихся приёмных позиций и касающейся поверхности Земли в точке расположения антенны передающей позиции.

Диаграммы направленности антенн приёмных позиций должны быть изотропными по азимуту и углу места. Диаграмма направленности антенны передающей позиции может быть как изотропной по обоим углам, так и узконаправленной по азимуту и косекансной по углу места. Последний вариант позволяет существенно снизить количество единовременных измерений.

менно облучаемых воздушных объектов и, следовательно, облегчить их отождествление. При этом параллельный просмотр пространства заменяется последовательным, что, в свою очередь, ограничивает время облучения цели и, следовательно, энергию отражённого сигнала.

Для определения долготы, широты и высоты воздушного объекта его географические координаты должны быть связаны с географическими координатами передающей и приёмных позиций, а также с измеренными суммарными дальностями от передающей позиции до объекта и от объекта до каждой из приёмных позиций.

Излучатель активной позиции располагается на поверхности Земли, приёмные антенны пассивных позиций — либо на стационарных мачтах высотой 50 м, либо на мобильных мачтах высотой 12,5 м. В первом случае приёмные позиции располагаются на окружности радиусом 30 км, а во втором — на окружности радиусом 15 км, образуя равносторонние треугольники. Количество пассивных позиций может быть увеличено до шести с целью увеличения точности измерения координат.

Для оценки координат измеряются времена запаздывания эхо-сигналов по всем трём путям: центральная позиция — цель — очередная приёмная позиция — центральная позиция. Из запаздываний эхо-сигналов, прошедших через пассивные каналы, вычитаются времена распространения сигнала между каждой пассивной позицией и передатчиком. На основе трёх рассчитанных запаздываний эхо-сигнала определяются три суммарные дальности: от передатчика через цель до каждого приёмника. Далее вычисляются трёхмерные географические координаты воздушного объекта, т.е. его долгота, широта и высота, для чего необходимо аналитически выразить через эти координаты суммы расстояний от передатчика до объекта и от объекта до каждого из приёмников.

На рис. 1 таким расстоянием будет длина отрезка  $A'D$ . Поскольку при наземных измере-

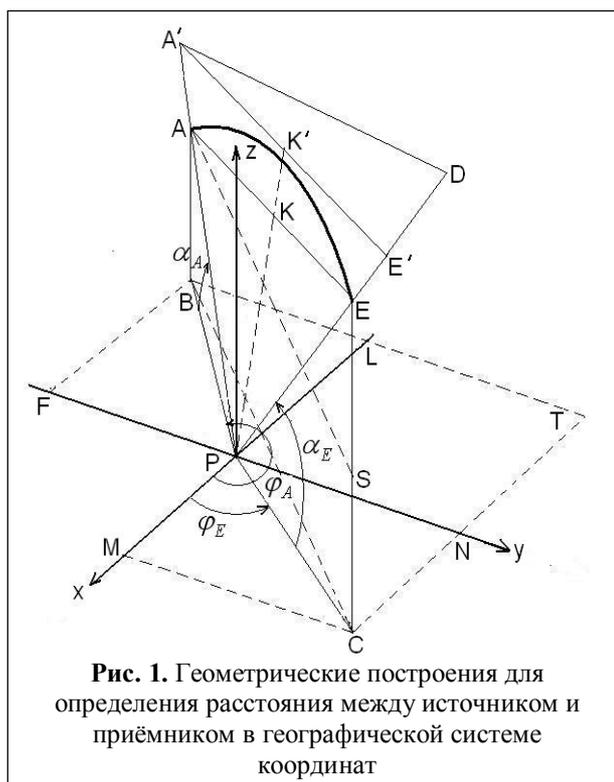


Рис. 1. Геометрические построения для определения расстояния между источником и приёмником в географической системе координат

ниях приёмник располагается ниже источника излучения сигнала, отражённого от цели, то будем считать, что источник излучения находится в точке  $D$ , а приёмник — в точке  $A'$ . Проекции этих точек на поверхность Земли располагаются в точках  $E$  и  $A$  соответственно. Поверхность Земли представляет собой сферу радиусом  $R_T$  с центром в точке  $P$ , следовательно  $\overline{AP} = \overline{EP} = R_T$ .

Точно так же, как это сделано в [3], с целью упрощения тригонометрических преобразований вместо непосредственного вычисления расстояния  $A'D$  определим сначала длину отрезка  $\overline{AE}$ , зависящую только от угловых координат, то есть долготы и широты, как источника, так и приёмника излучения. Преобразуя полярные координаты точек  $A$  и  $E$  в декартовы, получаем искомые значения координат:

$$\begin{aligned} x_A &= \overline{LP} = \overline{BP} \cos \phi_A = R_T \cos \alpha_A \cos \phi_A, \\ y_A &= \overline{FP} = \overline{BP} \sin \phi_A = R_T \cos \alpha_A \sin \phi_A, \\ z_A &= \overline{AB} = R_T \sin \alpha_A, \end{aligned}$$

для точки  $A$ , а также:

$$\begin{aligned}x_E &= \overline{MP} = \overline{CP} \cos \varphi_E = R_T \cos \alpha_E \cos \varphi_E, \\y_E &= \overline{NP} = \overline{CP} \sin \varphi_E = R_T \cos \alpha_E \sin \varphi_E, \\z_E &= \overline{EC} = R_T \sin \alpha_E,\end{aligned}$$

для точки  $E$ .

Здесь угол  $\varphi$  — долгота, угол  $\alpha$  — широта источника или приёмника излучения, а

$$\overline{BP} = R_T \cos \alpha_A, \quad \overline{CP} = R_T \cos \alpha_E.$$

Вычисляя расстояние между точками  $A$  и  $E$  как евклидову норму в трёхмерном пространстве, после тригонометрических преобразований получаем зависимость длины отрезка  $\overline{AE}$  от искоемых угловых координат источника и приёмника излучения, представленную выражением (1):

$$\begin{aligned}\overline{AE} &= \sqrt{(\overline{MP} - \overline{LP})^2 + (\overline{NP} - \overline{FP})^2 + (\overline{EC} - \overline{AB})^2} = (1) \\&= \sqrt{2R_T^2 \sqrt{1 - \cos \alpha_E \cos \alpha_A \cos(\varphi_E - \varphi_A) - \sin \alpha_E \sin \alpha_A}}.\end{aligned}$$

Для нахождения расстояния между источником  $D$  и приёмником  $A'$  излучения перейдем в плоскость треугольника  $A'PD$ . Здесь  $\overline{AA'} = \overline{EE'} = h_A$ ,  $\overline{ED} = h_E$ ,  $\overline{E'D} = h_E - h_A$ , где  $h_E$  — высота подъёма (над уровнем моря) источника излучения в точке  $E$ ,  $h_A$  — высота подъёма приёмника излучения в точке  $A$ .

Отрезок  $\overline{A'E'}$  является стороной треугольника  $A'PE'$ , подобного треугольнику  $APE$  со стороной  $\overline{AE}$ , поэтому

$$\overline{A'E'} = \left(1 + \frac{h_A}{R_T}\right) \overline{AE}. \quad (2)$$

Расстояние между источником  $D$  и приёмником  $A'$  излучения, определяется из треугольника  $A'DE'$  по теореме косинусов [4]:

$$\begin{aligned}\overline{A'D}^2 &= \overline{A'E'}^2 + \overline{E'D}^2 - \\&- 2 \cdot \overline{A'E'} \cdot \overline{E'D} \cdot \cos(\angle A'E'D),\end{aligned} \quad (3)$$

где  $\overline{A'D}$ ,  $\overline{A'E'}$  и  $\overline{E'D}$  стороны треугольника, а

$$\cos(\angle A'E'D) = -\cos(\angle KEP) = -\frac{1}{2R_T} \overline{AE}.$$

Подставляя в (3) выражения для  $\overline{A'E'}$  и

$\overline{E'D}$ , а также для  $\cos(\angle A'E'D)$ , получаем:

$$\overline{A'D} = R_T \left\{ \left( \frac{h_E - h_A}{R_T} \right)^2 + 2 \left( 1 + \frac{h_E}{R_T} \right) \left( 1 + \frac{h_A}{R_T} \right) \times \right. \quad (4)$$

$$\left. \times \left[ 1 - \cos \alpha_E \cos \alpha_A \cos(\varphi_E - \varphi_A) - \sin \alpha_E \sin \alpha_A \right] \right\}^{\frac{1}{2}}.$$

Рассуждая аналогично относительно расстояний от источника  $D$  до передающей позиции  $A'_0$ , а также от источника до каждой из  $n$  приёмных позиций  $A'_1, \dots, A'_n$ , получаем в итоге систему уравнений (5).

$$\begin{aligned}\frac{D\hat{R}_{ij}}{R_T} &= \left\{ \left( \frac{h_A^0 - h_E}{R_T} \right)^2 + 2 \left( 1 + \frac{h_A^0}{R_T} \right) \left( 1 + \frac{h_E}{R_T} \right) \times \right. \\&\times \left. \left[ 1 - \cos \alpha_A^0 \cos \alpha_E \cos(\varphi_A^0 - \varphi_E) - \sin \alpha_A^0 \sin \alpha_E \right] \right\}^{\frac{1}{2}} + \\&+ \left\{ \left( \frac{h_A^i - h_E}{R_T} \right)^2 + 2 \left( 1 + \frac{h_A^i}{R_T} \right) \left( 1 + \frac{h_E}{R_T} \right) \times \right. \quad (5) \\&\times \left. \left[ 1 - \cos \alpha_A^i \cos \alpha_E \cos(\varphi_A^i - \varphi_E) - \sin \alpha_A^i \sin \alpha_E \right] \right\}^{\frac{1}{2}}.\end{aligned}$$

Эта система связывает результаты измерений каждой суммарной дальности  $\Sigma \hat{R}_i$  от передающей 0-ой позиции до источника излучения и от источника до  $i$ -той приёмной позиции, географические координаты  $\varphi_A^0, \alpha_A^0, h_A^0$  и  $\varphi_A^i, \alpha_A^i, h_A^i$ , которых известны, с неизвестными географическими координатами источника сигнала: долготой —  $\varphi_E$ , широтой —  $\alpha_E$  и высотой над уровнем моря —  $h_E$ .

Система из  $n$  уравнений (5), которые получены с помощью измерений суммарных дальностей от центральной позиции с номером 0 до каждой из  $n$  приёмных позиций, является трансцендентной и не решается аналитически. Для ее решения необходимо использовать численные методы, например, метод Ньютона [5], который потребует модифицировать так же, как указано в [6].

Для проверки качества работы алгоритма, вычисляющего оценку трёх географических координат воздушных объектов, сначала рас-

положим три приёмные позиции на окружности радиусом 30 км в точках В, С, D, а позицию передатчика в точке А центра окружности так, как показано на рис. 2. Антенны приёмных позиций расположены на мачтах высотой 50 м, тогда как передатчик расположен на высоте равной 0. Будем предполагать, что долгота центральной позиции составляет 30 град, а широта — 50 град.

Проверка точности работы алгоритма, вычисляющего оценку географических координат источников излучения с помощью решения системы (5) методом Ньютона, выполнялась с помощью имитационного моделирования. Было сделано по 10000 экспериментов для каждого из 7-и источников.

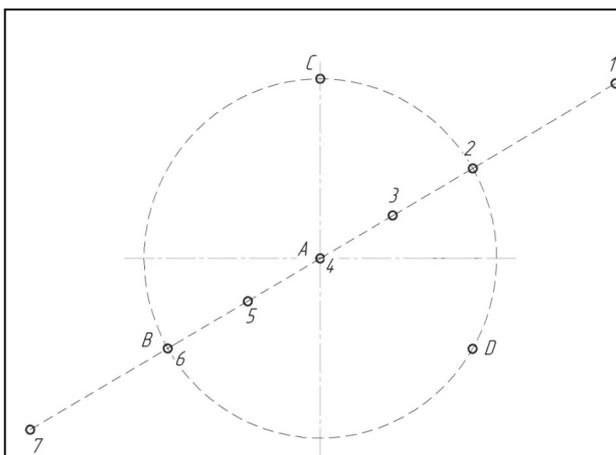


Рис. 2. Отображение проекций координат передающей позиции (А) и 3-х приёмных позиций (В, С, D), а также целей (1–7) на сферическую поверхность

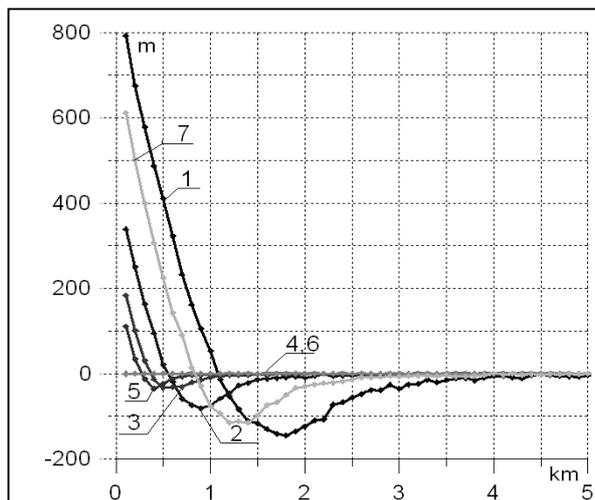


Рис. 3. Смещение оценок высоты 7 разных целей при полосе сигнала 10 МГц

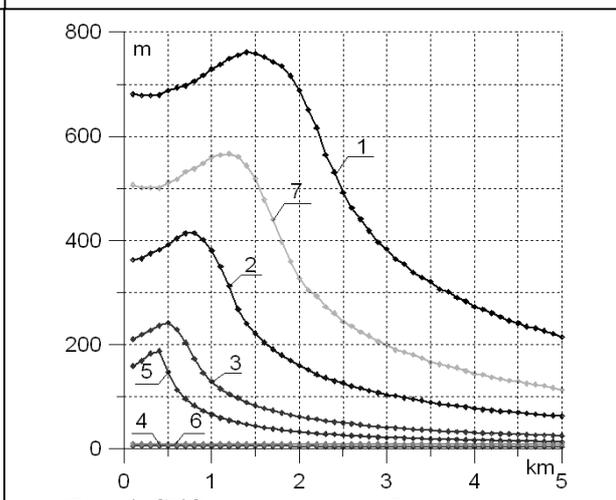


Рис. 4. SKO оценок высоты 7 разных целей при полосе сигнала 10 МГц

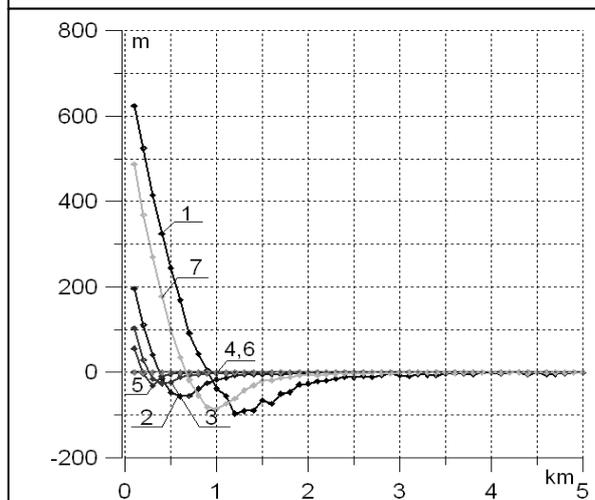


Рис. 5. Смещение оценок высоты 7 разных целей при полосе сигнала 20 МГц

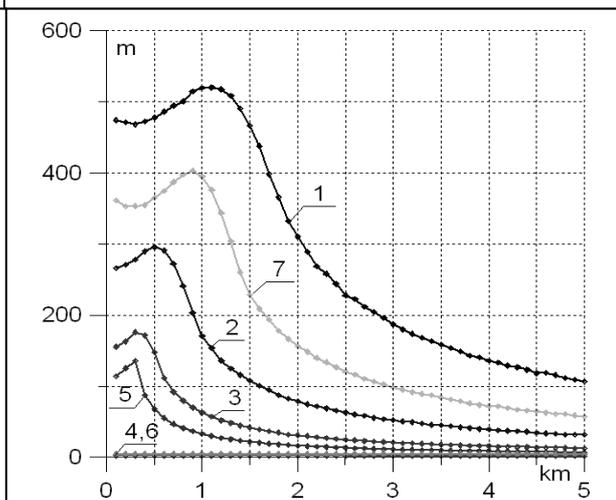
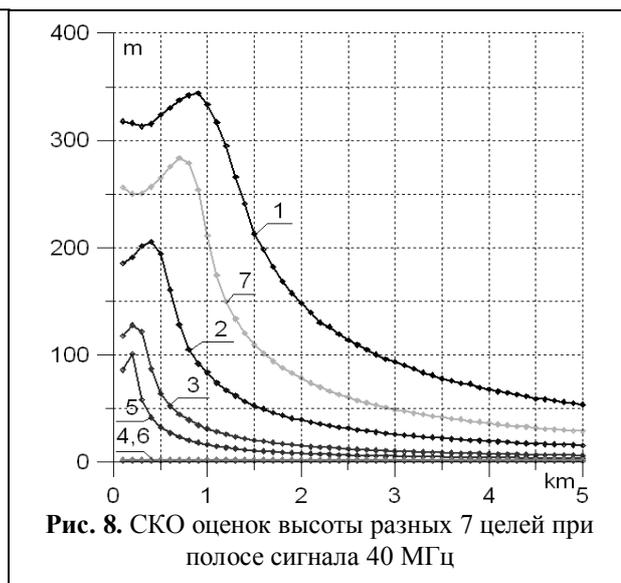
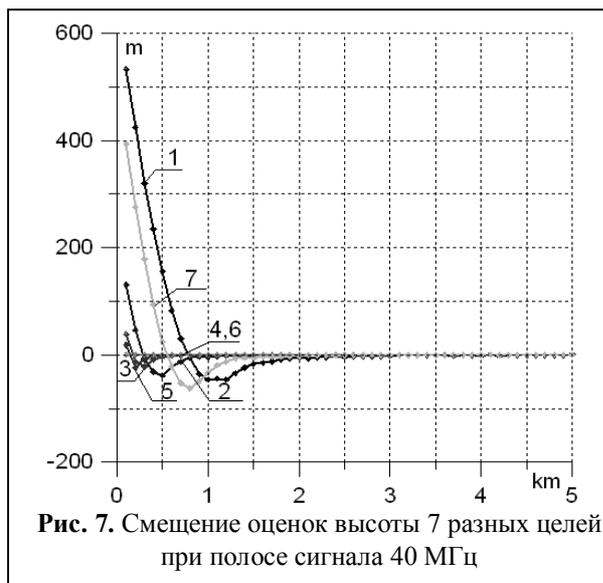


Рис. 6. SKO оценок высоты 7 разных целей при полосе сигнала 20 МГц



Полученные зависимости смещения и среднеквадратической ошибки (СКО) оценки высоты полёта воздушных объектов от ширины полосы излучаемого сигнала и высоты их полёта при размещении 3-х приёмных позиций на окружности радиусом 30 км приведены на рис. 3–8. Заметим, что все расстояния измеряются длинами дуг на поверхности Земли (на уровне моря) как и в [7].

Из приведённых зависимостей следует, что для всех целей с уменьшением высоты полёта смещение оценки высоты сначала уменьшается до отрицательных, а затем увеличивается до положительных значений. Величина СКО оценки высоты, наоборот, сначала растёт, а затем уменьшается. Высота полёта цели, которой соответствует максимальное значение среднеквадратической ошибки, практически совпадает с высотой, соответствующей максимальному отрицательному значению смещения. Причем, с уменьшением полосы излучаемого сигнала эти максимумы смещаются в сторону больших значений высоты.

Заметим, что для тех целей, которые находятся над передающей и приёмной позициями, то есть для 4-ой, и 6-ой целей, величина смещения и СКО оценки высоты существенно меньше, чем для остальных целей, причём смещение практически не начинает возрастать и не достигает положительных значений, а

среднеквадратическая ошибка не начинает убывать. Причиной такого результата является то, что при расположении цели над приёмной позицией или передатчиком высота цели является частью измеряемой суммарной дальности.

Из анализа приведённых зависимостей следует, что при достаточно больших высотах цели, когда смещение оценки высоты будет малым, расширение полосы в 2 раза приводит к уменьшению СКО оценки высоты также в 2 раза. Однако в области малых высот и больших смещений при том же расширении полосы СКО уменьшается не более чем в 1,5 раза. Необходимо отметить, что максимальное положительное смещение оценки высоты при увеличении полосы в 2 раза уменьшается не более чем в 1,25 раза для целей, расположенных за окружностью, на которой находятся приёмные позиции, и почти в 2 раза для целей, которые попали внутрь неё.

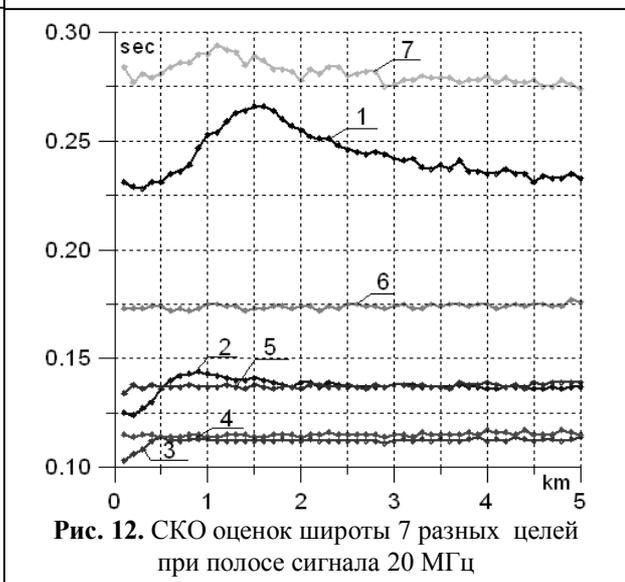
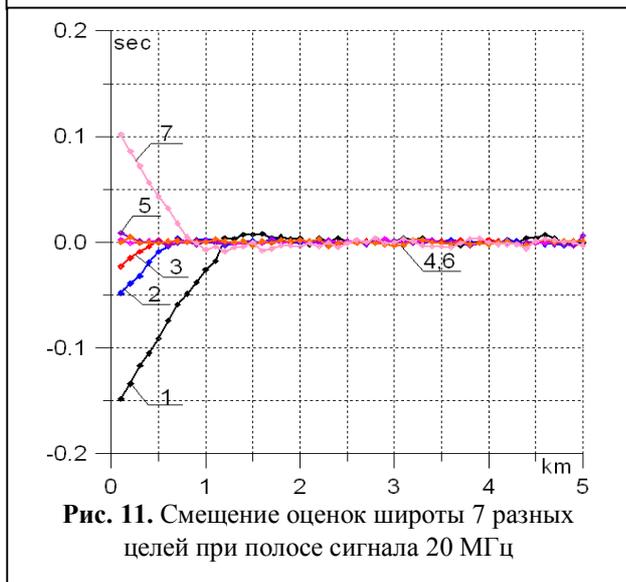
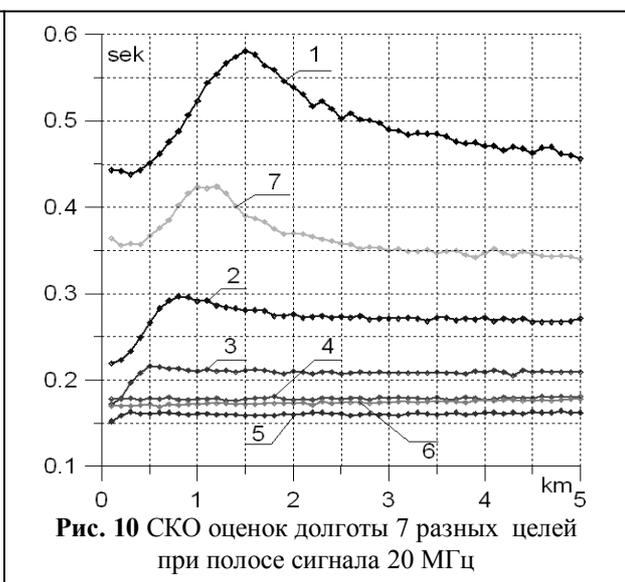
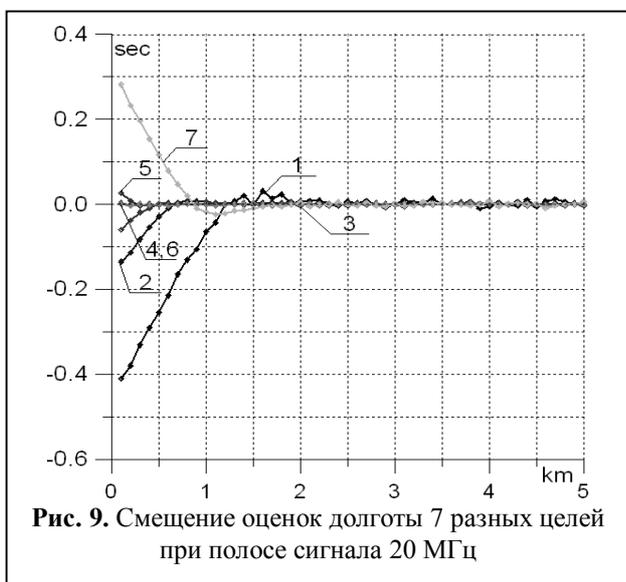
Изменение полосы оказывает существенное влияние не только на величину положительного смещения, но и на размеры области и величину отрицательного смещения. Так при 4-х кратном расширении полосы (с 10-ти до 40-ти МГц) высота цели, для которой отрицательное смещение будет максимальным, и уровень этого максимального отрицательного смещения уменьшается в 2 раза.

На смещение оценки высоты и её СКО существенное влияние оказывает расстояние цели от передающей позиции, а также близость расположения приёмной позиции к цели. Так, точность оценки высоты 7-ой и 5-ой цели выше, чем для симметрично расположенных 1-ой и 3-ей целей, поскольку 5-ая и 7-ая цель расположены около приёмной позиции В. При изменении расстояния от передатчика до цели в 2 раза, СКО оценки высоты цели растет в 2,5 раза внутри окружности (для 3-ей и 2-ой целей) и около 4-х раз за ней (для 2-ой и 1-ой).

При увеличении расстояния от цели до передающей позиции в 2 раза величина максимального положительного смещения, которое

измеряется для высоты целей равной 100 м, также увеличиваются в 2 раза при перемещении от 3-ей ко 2-ой цели и в 3 раза при перемещении от 2-ой к 1-ой. Величины отрицательных смещений оценок частоты при двукратном увеличении дальности до цели от центра окружности (от передатчика) возрастают в 2 раза и перемещаются в область больших в 2 раза высот, что в 2 раза меньше, чем при расширении полосы.

Зависимости смещения и СКО оценки долготы и широты воздушных объектов от ширины полосы излучаемого сигнала и высоты полёта объектов приведены на рис. 9–12 только для полосы 20 МГц. Из этих рисунков следу-



ет, что точность оценки долготы и широты примерно одинакова и почти на 2 порядка выше точности оценки высоты, хотя в секундах оценки отличается в 2 раза. Однако 1 сек долготы для широты 60 град примерно равна 15 м, а 1 сек широты — 30 м. Максимальное смещение горизонтальных координат также может быть как положительным, так и отрицательным.

Смещение оценок долготы и широты воздушных объектов, расположенных за окружностью, на которой размещены приёмники, наблюдается до высоты 1,5 км, для внутренних объектов — до 0,5 км, кроме тех, которые расположены над приёмной или передающей позициями. СКО долготы и широты объектов возрастает с увеличением дальности до передатчика в тех же пропорциях, что и СКО высоты.

Размещение приёмников на окружности радиусом 30 км обусловлено использованием стационарной мачты высотой 50 м. При использовании собственной мобильной мачты приёмной позиции высотой 12,5 м, радиус прямой видимости приёмников и передатчика уменьшается до 15 км, как показано на рис. 13. По сравнению с рис. 2 добавлены ещё два воздушных объекта между центральной позицией и окружностью, где размещены приёмники.

Полученные экспериментальные зависимости смещения и среднеквадратической ошибки

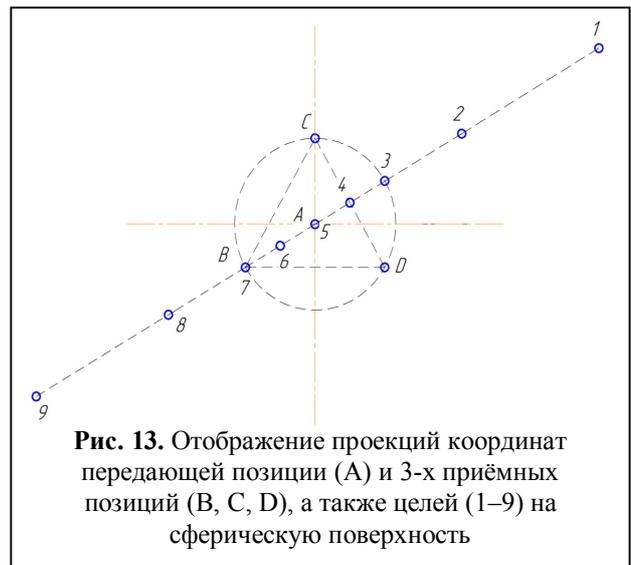


Рис. 13. Отображение проекций координат передающей позиции (A) и 3-х приёмных позиций (B, C, D), а также целей (1–9) на сферическую поверхность

оценки высоты полёта воздушных объектов от ширины полосы сигнала, излучаемого передатчиком, и высоты полёта объектов при размещении трёх приёмных позиций на окружности радиусом 15 км приведены на рис. 14–19.

Из сравнения приведенных зависимостей с зависимостями, представленными на рис. 2.2–2.7 и 2.12–2.13, следует, что при уменьшении расстояния от передающей до приёмных позиций в 2 раза, величина максимального положительного смещения, получаемое при высоте цели равной 100 м, а также величина максимума СКО увеличивается не более чем на треть, тогда как высота цели, при которой получается максимальное отрицательное смещение, увеличивается в 1,5 раза.

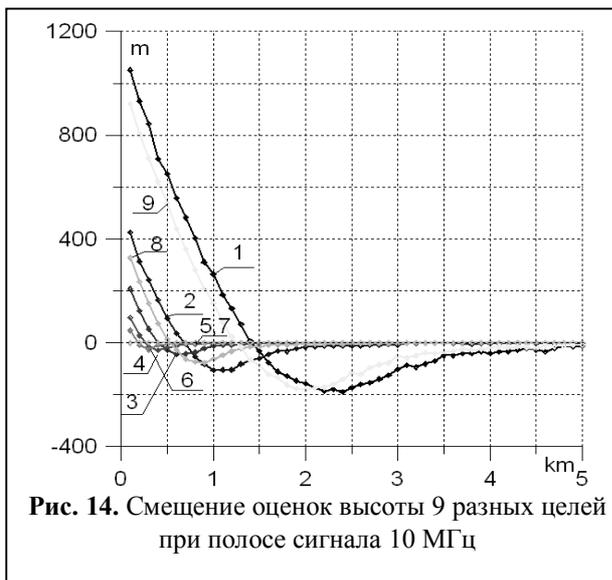


Рис. 14. Смещение оценок высоты 9 разных целей при полосе сигнала 10 МГц

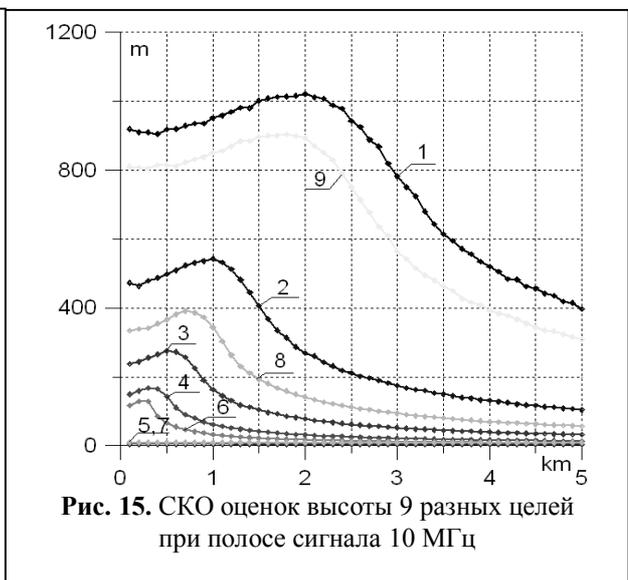


Рис. 15. СКО оценок высоты 9 разных целей при полосе сигнала 10 МГц

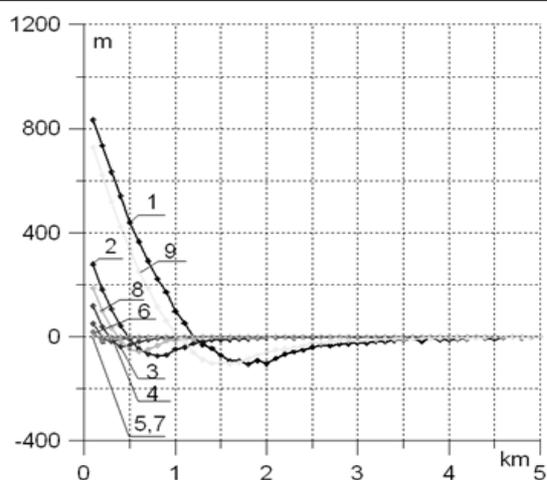


Рис. 16. Смещение оценок высоты 9 разных целей при полосе сигнала 20 МГц

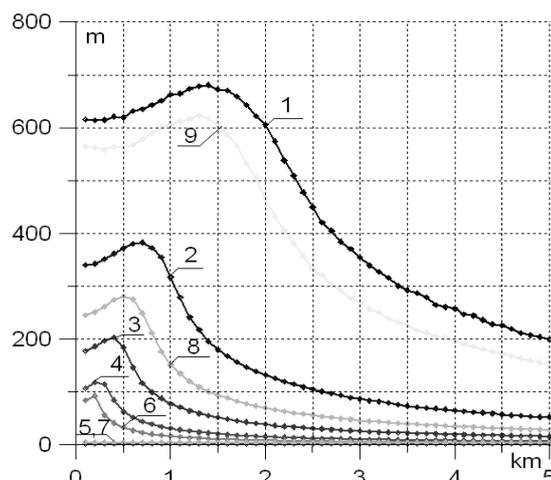


Рис. 17. SKO оценок высоты 9 разных целей при полосе сигнала 20 МГц

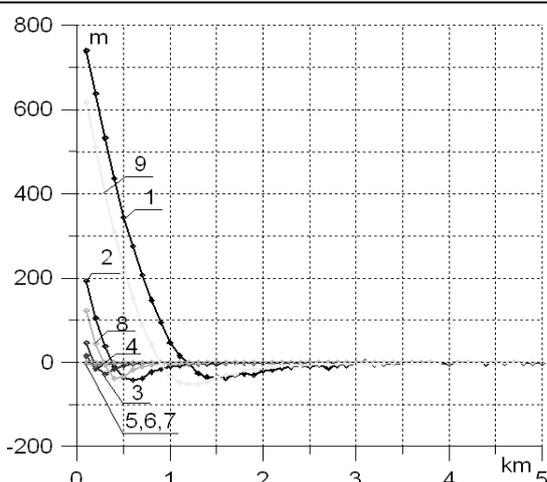


Рис. 18. Смещение оценок высоты 9 разных целей при полосе сигнала 40 МГц

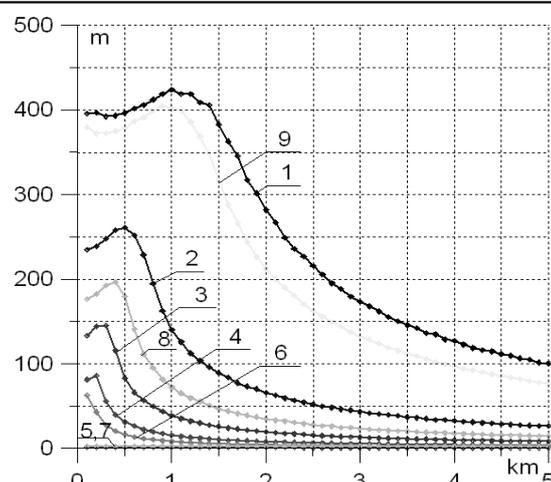


Рис. 19. SKO оценок высоты разных 9 целей при полосе сигнала 40 МГц

После уменьшения расстояния от передающей позиции до каждой из приёмных в 2 раза, влияние расширения полосы на величину смещения и SKO практически не изменяются, единственным отличием, которое является следствием того, что за окружностью прямой видимости теперь расположены не 2, а 4 цели (1, 2, 8, 9 цели), величины отрицательного смещения оценок высоты для этих целей выравниваются при расширении полосы и при ширине полосы равной 40 МГц становятся практически одинаковыми.

Уменьшение расстояния от передающей до приёмных позиций, практически не приводит к изменению влияния расстояния от цели до пе-

редающей позиции на смещение оценки высоты и её SKO. Так при увеличении расстояния от передатчика до цели в 2 раза, SKO оценки высоты возрастет не в 2,5, а в 3 раза внутри окружности (при переходе от 4-ой к 3-ей цели) и более 4-х раз вне неё (при переходе от 3-ей к 2-ой, а также от 2-ой к 1-ой).

Для проверки того, как двукратное увеличение количества приёмных позиций влияет на качество работы алгоритма, вычисляющего оценку трёх географических координат воздушных объектов, расположим 6 приёмных позиций на окружности радиусом 30 км в точках В, С, D, E, F, G, сохранив позицию передатчика в центре окружности в точке А так,

как показано на рис. 20.

Полученные зависимости смещения и среднеквадратической ошибки (СКО) оценки высоты полёта воздушных объектов от ширины полосы излучаемого сигнала и высоты их полёта при размещении 6-ти приёмных позиций на окружности радиусом 30 км приведены на рис. 21–26.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что при увеличении количества приёмных позиций в 2 раза, с трёх до шести, для целей, расположенных на прежних позициях (5-ая и 7-ая цели) смещение и СКО оценки высоты воздушного объекта уменьшается только при значениях ширины сигнала меньше 20 МГц. Так, для полосы 10 МГц смещение и СКО оценки высоты уменьшается в 1,1 раза.

В свою очередь, точность измерения высоты целей (1-ой, 2-ой, 3-ей), расположенных между приёмными позициями, существенно увеличивается. Так, смещение и СКО оценки высоты 1-ой и 3-ей цели уменьшаются в 2 раза и становятся такими же, как смещение и СКО оценки высоты 7-ой и 5-ой целей, что приводит к практическому совпадению зависимостей смещений и СКО оценок высоты 1-ой и 7-ой, а также 3-ей и 5-ой целей на рис. 21–26.

При увеличении количества приёмных позиций в 2 раза смещение оценки высоты 2-ой цели, расположенной на окружности на равном

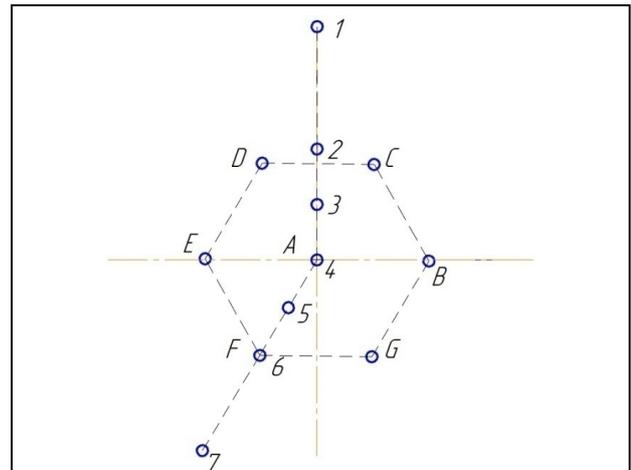


Рис. 20. Отображение проекций координат передающей позиции (А) и 6-и приёмных позиций (В, С, D, E, F, G), а также целей (1–7) на сферическую поверхность

удалении между приёмными позициями, уменьшается в 1,5 раза, а СКО оценки высоты в 3 раза. Различие в изменении СКО оценки цели между 2-ой целью и 1-ой и 3-ей целями, обусловлено тем, что при добавлении новых приёмных позиций расстояние до них для 2-ой цели уменьшается сильнее, чем для 1-ой и 3-ей. И вообще, добавление новых позиций влияет на точность измерения координат только тех целей, расстояние от которых до приёмных позиций уменьшается.

Необходимо отметить, что при использовании суммарно-дальномерных систем разнесённого приёма с целью образования радиолока-

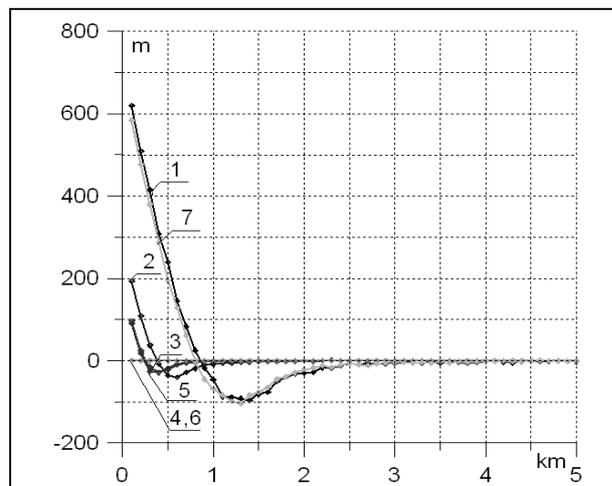


Рис. 21. Смещение оценок высоты 7 разных целей при полосе сигнала 10 МГц

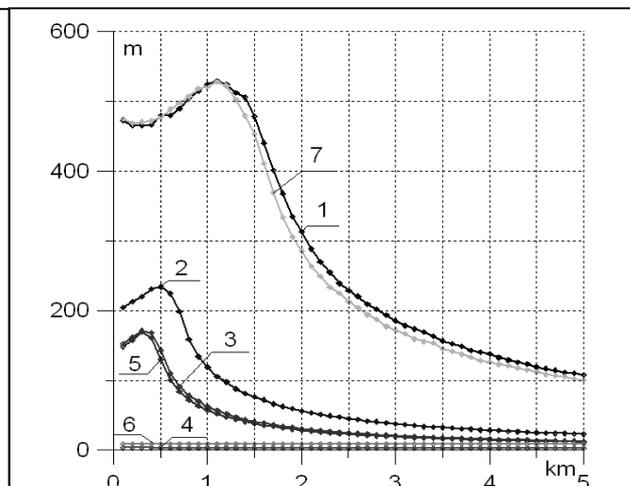


Рис. 22. СКО оценок высоты 7 разных целей при полосе сигнала 10 МГц

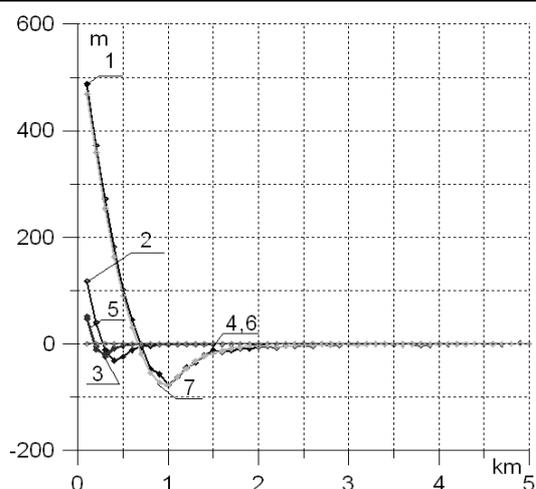


Рис. 23. Смещение оценок высоты 7 разных целей при полосе сигнала 20 МГц

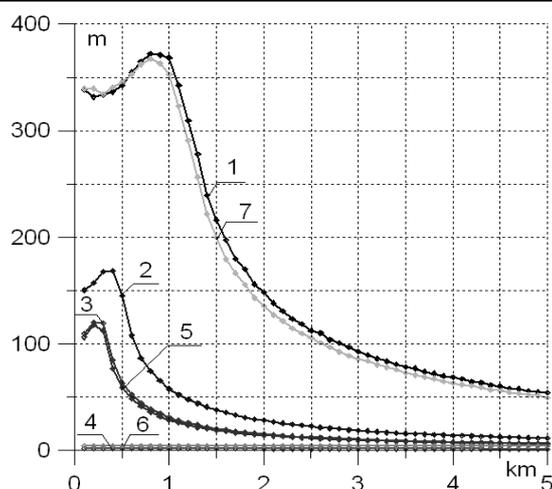


Рис. 24. SKO оценок высоты 7 разных целей при полосе сигнала 20 МГц

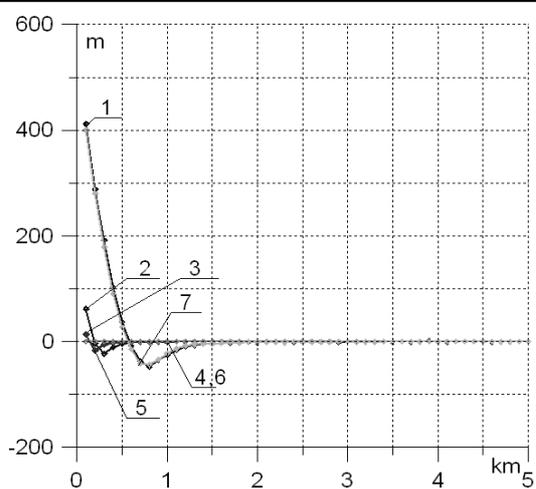


Рис. 25. Смещение оценок высоты 7 разных целей при полосе сигнала 40 МГц

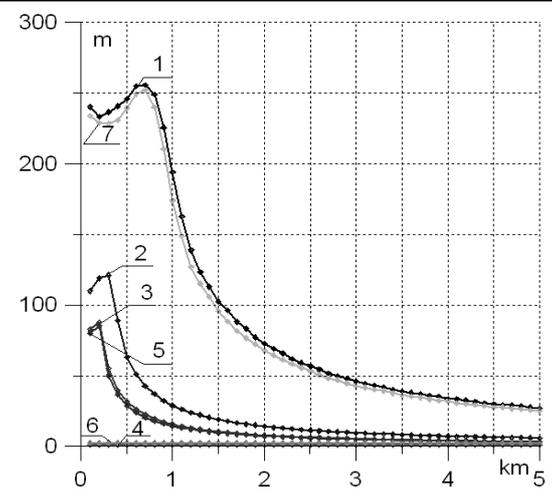


Рис. 26. SKO оценок высоты разных 7 целей при полосе сигнала 40 МГц

ционного поля [6] не требуется измерять координаты воздушных объектов вне окружности радиусом 30 км, на которой располагаются приемные позиции. Такие измерения становятся необходимыми только при автономном использовании суммарно-дальномерных систем. На расстоянии 60 км от центральной позиции высота прямой видимости для наземной системы будет больше 209 м, что чуть более чем в 4-е раза превышает высоту мачты приёмной позиции. SKO оценки высоты воздушного объекта для такого расстояния в наихудшем случае также увеличивается в 4-е раза.

Преимуществом систем разнесённого приема по сравнению с однопозиционными является

возможность измерения полного вектора скорости с помощью трёх и более частот Доплера [6, 8], что облегчает отслеживание маневров воздушных объектов при построении трёхмерных трасс их движения. Так, знание вектора скорости, то есть производной траектории движения такого объекта, как артиллерийский снаряд, должно повысить точность определения координат артиллерийской позиции, откуда он был выпущен.

Для увеличения мощности отраженного сигнала можно повысить КНД передающей антенны, заменив параллельное сканирование пространства последовательным. Как было указано ранее, это приводит дополнительно к

упрощению отождествления и ограничению энергии сигнала. Кроме того, уменьшается до одного периода время обработки отражённой пачки сигналов, так как из-за сканирования по азимуту обработка пачки становится инвариантной во времени и производится в скользящем окне.

Суммарно-дальномерная система разнесённого приёма может быть не только наземной. При размещении её на воздушных объектах следует учитывать ошибки измерения координат центральной и периферийных приёмных позиций в реальном времени системой глобального позиционирования. Если 4-е самолета звена расположить в соответствии с рис. 13, то к 4-м сантиметровым радиолокаторам переднего обзора добавится обзорный радиолокатор метрового диапазона с соответствующими возможностями в обнаружении малозаметных целей. Из-за имеющегося с большой вероятностью заметного различия в высотах полета приёмопередающих объектов и обнаруживаемых целей точность измерения высоты этих целей должна быть хорошей.

Поступила 10 апреля 2021 г.

### Литература

1. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. М.: Радио и связь, 1993. 744 с.
2. Кондратьев В.С., Котов А.Ф., Марков Л.Н. Многопозиционные радиотехнические системы; под ред. В.В. Цветнова. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.
3. Терсин В.В. Использование разнесённого приема для измерения географических координат околосреднего источника излучений космическими аппаратами // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2017. №1. С. 39–47.
4. Выгодский М.Я. Справочник по элементарной математике. М.: Наука, 1965. 424 с.
5. Дьяконов В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭВМ: Справочник. М.: Наука, 1987. 240 с.
6. Терсин В.В. Особенности измерения трехмерных координат и вектора скорости воздушных объектов в поле суммарно-дальномерных станций // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2020. № 3. С. 5–14.
7. Терсин В.В. Применение разнесённого приема для измерения третьей координаты в поле двухкоординатных радиолокационных станций // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2012. №4. С.39–46.
8. Терсин В.В. Измерение дальности и частоты Доплера суммарно-дальномерными станциями разнесённого приема при воздействии активных и пассивных помех // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2020. № 4. С. 24–33

English

## USING OVERALL RANGE-FINDING SYSTEM OF DIVERSITY RECEPTION FOR MEASUREMENT OF THREE GEOGRAPHICAL COORDINATES OF LOW-FLYING AIR OBJECTS

**Radislav Valentinovich Pervushin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of “Murom Institute (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”<sup>1</sup>.

E-mail: vvtersin@yandex.ru

**Vladimir Vladimirovich Tersin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Lead Engineer, JSC “Murom Plant of Radio Measuring Instruments” (JSC “MP RMI”)<sup>2</sup>.

E-mail: vvtersin@yandex.ru

<sup>1</sup>Address: 602264, Russian Federation, Vladimir region, Murom, Orlovskaya Street, 2.

<sup>2</sup>Address: 602267, Russian Federation, Vladimir region, Murom, Karacharovskoe Highway, 2.

*Abstract:* There was investigated an overall range-finding algorithm to estimate air target position in three-dimensional space for geographical coordinate system. Reflected signal receivers are located not lower than the plane touching the Earth surface in the central (transmitting) position. Antenna directive patterns of transmitting and receiving positions should be isotropic. Directive pattern of transmitting position can also be either isotropic, or narrow-beam in azimuth and cosecant in elevation position. The latter directive pattern enables to significantly reduce the number of irradiated air objects and, consequently, to facilitate their identification. It was found after performing experiments with simulation model that altitude estimate is bi-

ased. Altitude bias and its root-mean-square error diminish alongside with increase of emitted signal band and they rise alongside with distance increasing to transmitting position. Experiments manifest that the signal bandwidth should not be less than 20 MHz to obtain acceptable altitude estimates. Angular coordinates of low-flying air object (longitude and latitude) are measured with much higher accuracy and significantly less bias. It was found that object altitude is measured as accurately as its longitude and latitude if the air object is above the transmitting or receiving position. Then the height is part of measured total range, which, evidently, is the reason for significant accuracy enhancement of the height estimate. The number of receiving positions should be increased, for example, doubled to increase point density of coverage area, where the height of a low-flying air object is measured quite accurately.

*Keywords:* diversity reception, overall range-finding algorithm, geographical coordinate system, estimate bias, root-mean-square error, longitude, latitude, altitude, signal band.

### References

1. *Chernyak V.S.* Multi-position radar. Moscow: Radio i svyaz, 1993. 744 p.
2. *Kondratiev V.S., Kotov A.F., Markov L.N.* Multipositional radio engineering systems; edited by *V.V. Tsvetnov*. Moscow: Radio i svyaz, 1986. 264 p.
3. *Tersin V.V.* The use of a spaced reception for measuring the geographical coordinates of a near-Earth radiation source by spacecraft. *Radio and Telecommunications Systems*. 2017. No. 1. Pp. 39–47.
4. *Vygodsky M.Ya.* Handbook of Elementary Mathematics. Moscow: Nauka, 1965. 424 p.
5. *Diakonov V.P.* Handbook of algorithms and programs in basic for personal computers: Handbook. Moscow: Nauka, 1987. 240 p.
6. *Tersin V.V.* Features of measuring three-dimensional coordinates and the velocity vector of air objects in the field of total range-measuring stations. *Radio and Telecommunications Systems*. 2020. No. 3. Pp. 5–14.
7. *Tersin V.V.* Application of a spaced device for measuring the third coordinate in the field of two-coordinate radar stations. *Radio and Telecommunications Systems*. 2012. No. 4. Pp. 39–46.
8. *Tersin V.V.* Measurement of the Doppler range and frequency by total-rangefinder stations of different reception under the influence of active and passive interference. *Radio and telecommunications systems*. 2020. No. 4. Pp. 24–33.