

УДК 621.396.96

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОЦЕНИВАНИЯ КООРДИНАТ ОБЪЕКТА В МНОГОПОЗИЦИОННОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ С ПРИЕМНЫМ ПУНКТОМ ВОЗДУШНОГО БАЗИРОВАНИЯ

В.В. ЛЕГКОСТУП, В.Э. МАРКЕВИЧ

ОАО «АЛЕВКУРП», Республика Беларусь

Поступила в редакцию 6 ноября 2017

**Аннотация.** Исследована зависимость точности оценки координат объекта от взаимного расположения передающего и приемных пунктов суммарно-разностно-дальномерной многопозиционной радиолокационной системы (МПРЛС). Предложен способ повышения точности оценивания координат для малых углов места за счет расположения одной из позиций на летательном средстве.

**Ключевые слова:** многопозиционная радиолокация, многопозиционная радиолокационная система, суммарно-дальномерный метод, разностно-дальномерный метод.

**Abstract.** The dependence of the accuracy of the object's coordinates estimation on the relative position of transmitting and receiving points of the multi-position radar system was studied. A way to increase of the accuracy of the object's coordinates estimation for small elevation angles by placement of the one receiving positions on the aerial vehicle was proposed.

**Keywords:** multistatic radar system, multiposition radar system, ToA, TDoA

**Doklady BGUIR. 2018, Vol. 112, No. 2, pp. 5-11**

**Increase of the coordinate measurement accuracy in the multi-static radar  
in case of the receiving position placement on the aerial vehicle**

**V.V. Legkostup, V.E. Markevich**

### Введение

Как известно [1], многопозиционные радиолокационные системы в сравнении с традиционными совмещенными РЛС позволяют получить потенциально более высокую точность измерений, помехоустойчивость, скрытность за счет использования нескольких пространственно разнесенных приемопередающих устройств. Однако МПРЛС не получили достаточного распространения в связи с различными техническими или тактическими трудностями [2–4]. Разработанные системы в основном располагаются на поверхности Земли, за исключением различных спутниковых систем навигации и локации, звенья которых базируются на околоземных орбитах.

Современный уровень развития летательных средств позволяет создать пространственно-распределенную МПРЛС с воздушными позициями, обладающую более высокой точностью измерения координат объектов и большей зоной действия в сравнении с МПРЛС, рассредоточенной на поверхности Земли. Размещаться приемопередающие пункты могут как на земле, так и на самолетах, вертолетах, различных беспилотных летательных аппаратах, вплоть до малоразмерных мультикоптеров. Подобные исследования проводятся американским агентством DARPA в рамках программы «Gremlins». Росту интереса к данной области также способствует внедрение аналогичных технологий в гражданский сектор (например, системы поддержки водителя, экстренного торможения и предотвращения столкновения (collision avoidance system)) [5].

## Математическая модель

В теории радиолокации доказано, что для обеспечения максимальной точности измерения координат объекта необходимо, чтобы получаемые в результате измерений параметров радиосигналов поверхности положения цели пересекались под прямыми углами. В активной локации предпочтительными с точки зрения оптимальности углов пересечения оказываются две комбинации методов [1, 4]. Первая – суммарно-дальномерный метод (СДМ) и угломерный метод (УМ), когда измерению подлежит сумма времен распространения сигнала от передатчика до цели, от цели до приемника и направление на цель. Вторая комбинация – СДМ и разностно-дальномерный метод (РДМ), когда измерению подлежит разность времен распространения сигнала от цели до двух приемников, а также направление на цель. Использование первой комбинации методов присуще классическим однопозиционным дальномерно-угломерным РЛС, в которых передатчик и приемник располагаются на одной позиции. В данной работе исследовалась вторая комбинация методов, в большей степени присущая многопозиционной радиолокации. Для использования выбранного метода необходимо измерять суммы и разности времен распространения радиосигналов от измеряемого объекта до двух позиций МПРЛС. Считается, что все пункты работают синхронно, при этом один из них является передающим, а все остальные – принимающими. Измеренные на приемных позициях временные задержки передаются центральному вычислительному устройству для оценки координат цели.

В трехмерном случае для СДМ поверхностью положения является эллипсоид вращения, а для РДМ – гиперboloид вращения, фокусы которых находятся в местах расположения станций. Наличие трех пересекающихся в одной точке поверхностей положения позволяет определить координаты объекта в пространстве. Для этого с учетом применяемых в работе методов нужно иметь не меньше трех приемных и одной передающей станции, причем передатчик может располагаться на одном из приемных пунктов.

Математическая модель системы основана на получении суммы  $t_{\Sigma}$  и разности  $t_{\Delta}$  времен распространения сигналов [4] в соответствии с формулами

$$\begin{aligned} t_{\Sigma} &= \frac{1}{c}(R_0 + R_1), \\ t_{\Delta} &= \frac{1}{c}(R_0 - R_1), \end{aligned} \tag{1}$$

где  $R_0, R_1$  – расстояния от объекта измерения до передающего и до приемного пунктов соответственно.

Координаты объекта  $\mathbf{x}_ц$  находятся в результате решения уравнений, связывающих  $\mathbf{x}_ц$ , координаты приемо-передающих пунктов  $\mathbf{x}_0, \dots, \mathbf{x}_i$  и измеренные временные интервалы  $\hat{\mathbf{t}}$  (суммы  $t_{\Sigma}$  и разности  $t_{\Delta}$  задержек распространения) принятых сигналов:  $\mathbf{x}_ц = \mathbf{f}(\mathbf{x}_0, \dots, \mathbf{x}_i, \hat{\mathbf{t}})$ .

Точность определения линии положения для суммарного ( $\sigma_u$ ) и разностного ( $\sigma_v$ ) методов можно оценить соответствующими формулами:

$$\sigma_u = \frac{\sigma_{\Sigma}}{2\cos(\psi/2)}; \quad \sigma_v = \frac{\sigma_{\Delta}}{2\sin(\psi/2)}, \tag{2}$$

где  $\sigma_{\Sigma}, \sigma_{\Delta}$  – точность измерения суммы и разности времен распространения сигналов;  $\psi$  – угол, под которым наблюдается база с места расположения цели.

На основании полученных в (2) точностей линий положения можно определить точность определения местоположения цели по формуле

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + 2\rho\sigma_u\sigma_v\cos\gamma} / \sin\gamma, \tag{3}$$

где  $\rho$  – коэффициент корреляции ошибок оценивания временных параметров на пунктах;  $\gamma$  – острый угол, под которым пересекаются две линии положения.

В случае равноточных измерений и при отсутствии корреляции между ними формула (3) упрощается до вида

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma_u^2 + \sigma_v^2} / \sin \gamma. \quad (4)$$

Из анализа формул точности линий положения (2) видно, что СДМ и РДМ по точностным характеристикам ортогональны. Так, для СДМ максимальная точность обеспечивается в том случае, когда измеряемый объект находится на линии базы, а минимальная – на перпендикуляре к этой линии. Для РДМ, наоборот: максимальная точность соответствует расположению объекта на линии, проходящей через центр базы и перпендикулярной к ней. При смещении объекта от этой линии точность снижается, а при нахождении на линии базы метод перестает работать. Из формулы (3) видно, что потенциально достижимой точностью измерения координат обладают комбинации методов, дающие пересечение поверхностей положения в требуемой области пространства под прямыми углами.

В наиболее распространенном случае все станции радиолокационного измерительного комплекса располагаются на поверхности Земли. Поверхностями положения для РДМ являются гиперboloиды, главные оси которых параллельны соответствующим линиям баз и приближенно располагаются вдоль поверхности Земли. Таким образом, при малых углах места цели точность оценки ее местоположения оказывается относительно низкой. Данную проблему можно решить расположением базы перпендикулярно поверхности Земли, путем установки приемного и/или передающего оборудования на средство воздушного базирования.

### Методика проведения численного эксперимента

Для сравнения влияния распределения позиций в пространстве на точность определения координат объекта использовались три конфигурации, приведенные на рис. 1. Координаты передающего и трех приемных пунктов соответствовали следующим значениям:

- а)  $A(0,0,0)$ ;  $B(0,0,-200)$ ;  $C(0,0,200)$ ;  $D(-200,0,0)$ ;
- б)  $A(0,0,0)$ ;  $B(0,0,-200)$ ;  $C(0,0,200)$ ;  $D(0,200,0)$ ;
- в)  $A(-200,0,0)$ ;  $B(0,0,-200)$ ;  $C(0,0,200)$ ;  $D(0,200,0)$ .

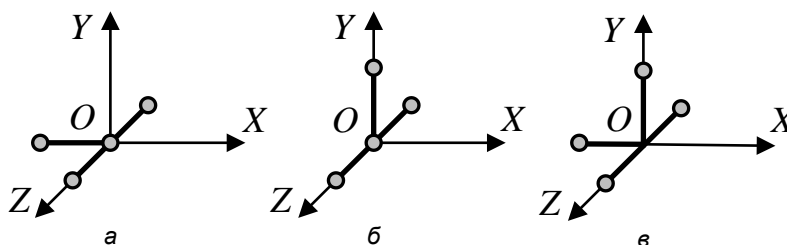


Рис. 1. Исследуемые конфигурации МПРЛС: а – распределенная на поверхности Земли; б – распределенная в плоскости, перпендикулярной поверхности Земли; в – пространственно-распределенная. Во всех случаях ось  $OX$  направлена в центр исследуемой области пространства

Точность измерений временных интервалов каждой станцией устанавливалась равной 0,33 нс (подразумевается отфильтрованное значение на выходе устройства первичной обработки параметров принимаемого радиосигнала). Таким образом, в вычислении координат участвовали оценки трех разностей дальностей и трех сумм дальностей передатчик–цель и приемник–цель.

Вычисление координат проводилось методом наименьших квадратов (МНК) [4]. Данную задачу можно решить через систему трех уравнений, использующую три временных параметра. Однако при наличии избыточного количества измерений возникает потребность каким-либо образом комплексировать получаемые результаты, к примеру, тем же МНК. Вычисление координат при помощи МНК с одновременным использованием всех измерений является удобным при компьютерном моделировании благодаря независимости вычислительного алгоритма от конкретного вида уравнений, связывающих координаты цели

и измеряемые параметры радиосигналов. Необходимо отметить, что речь идет только о вычислении координат объекта без фильтрации, что позволяет оценить качество единичных измерений и распределения ошибок измерений.

Измеряемые величины  $t_{\Sigma}$  и  $t_{\Delta}$  связаны с координатами передающего и приемного пунктов уравнениями:

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_{\Sigma}(\mathbf{x}_{\text{ц}}, \mathbf{x}_0, \mathbf{x}_i) &= \frac{1}{c} \left( \sqrt{(x_{\text{ц}} - x_0)^2 + (y_{\text{ц}} - y_0)^2 + (z_{\text{ц}} - z_0)^2} + \sqrt{(x_{\text{ц}} - x_i)^2 + (y_{\text{ц}} - y_i)^2 + (z_{\text{ц}} - z_i)^2} \right); \\ \mathbf{f}_{\Delta}(\mathbf{x}_{\text{ц}}, \mathbf{x}_0, \mathbf{x}_i) &= \frac{1}{c} \left( \sqrt{(x_{\text{ц}} - x_0)^2 + (y_{\text{ц}} - y_0)^2 + (z_{\text{ц}} - z_0)^2} - \sqrt{(x_{\text{ц}} - x_i)^2 + (y_{\text{ц}} - y_i)^2 + (z_{\text{ц}} - z_i)^2} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\mathbf{x}_0$ ,  $\mathbf{x}_i$ ,  $\mathbf{x}_{\text{ц}}$  – координаты передатчика,  $i$ -го приемника и цели соответственно;  $c$  – скорость света.

Данные уравнения связи позволяют составить функционал для МНК, наименьшему значению которого соответствуют координаты цели  $\mathbf{x}_{\text{ц}}$ :

$$J = 0,5 \sum_i^n \left[ (\mathbf{f}_{\Sigma}(\hat{\mathbf{x}}_0, \mathbf{x}_0, \mathbf{x}_i) - \hat{t}_{\Sigma})^2 + (\mathbf{f}_{\Delta}(\hat{\mathbf{x}}_0, \mathbf{x}_0, \mathbf{x}_i) - \hat{t}_{\Delta})^2 \right], \quad (6)$$

где  $n$  – количество приемных пунктов.

В общем случае каждый член суммы в (6) необходимо снабжать весовым множителем, характеризующим точность измерения временных интервалов конкретной позицией [4]. Однако в данном случае все измерители считались одинаковыми по своим точностным характеристикам.

Несмотря на то, что существует большое количество методов оптимизации, некоторые из них (метод наискорейшего спуска, Ньютона, сопряженных градиентов) находят минимум лишь при выборе начальной точки поиска достаточно близко к минимуму, что может быть использовано только в задаче фильтрации. Это связано как со сложным видом минимизируемого функционала, так и с существованием ложных минимумов. В случае поиска при первом появлении цели, когда начальная точка не может быть выбрана оптимально, лучшим образом справились методы случайного поиска, особенно метод дифференциальной эволюции (differential evolution) [6]. Однако эти методы требуют большого количества вычислений. Из методов неслучайного поиска лучшие результаты дали метод внутренней точки (Interior Point Method) [7], метод Нелдера-Мида (Nelder-Mead Method) [8] и метод последовательного квадратичного программирования (Sequential Quadratic Programming) [9]. Числовые показатели эффективности работы опробованных алгоритмов не приводятся ввиду их сильной зависимости от конкретной реализации и выбора внутренних параметров. В данной работе все приведенные результаты были получены с использованием метода внутренней точки для минимизации с ограничениями, чтобы предотвратить попадание в ложный минимум.

### Результаты компьютерного моделирования

Исследовалась область пространства перед измерителем в направлении оси  $OX$  с дальностью 20 км, высотой 20 км и шириной 20 км, в которой находился измеряемый объект. Точность измерений оказывается симметричной относительно плоскости  $OXY$  ввиду симметрии МПРЛС. Количество оценок местоположения каждой цели для получения статистики было принято равным 1000.

На рис. 2 графически изображены в виде полупрозрачных сфер полные точности оценивания координат объекта, последовательно располагающегося в каждом узле равномерной пространственной сетки для приведенных выше трех конфигураций МПРЛС. Центры сфер совпадают с истинным местом положения целей, а их диаметры соответствуют норме среднеквадратического отклонения (СКО) ошибок оценки координат конкретной цели.

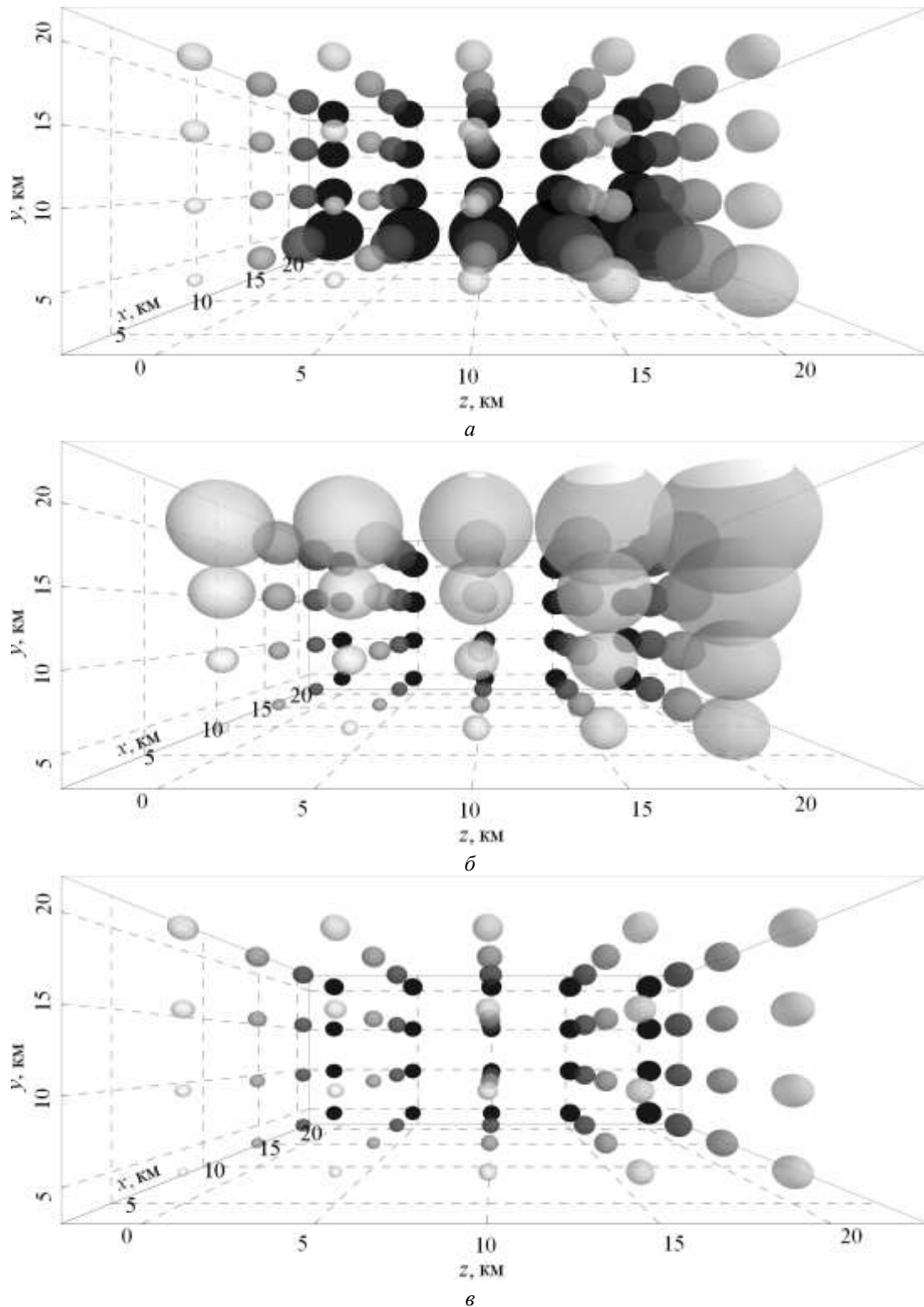


Рис. 2. Пространственное распределение ошибок для трех конфигураций МПРЛС, соответствующих рис. 1

На этих рисунках видно, что в первом и втором случаях точность оценки координат заметно падает при удалении от измерителя вдоль поверхности Земли и вверх соответственно. На последнем рисунке, полученном для пространственной конфигурации, видно, что погрешность измерений становится равномерной в различных направлениях. Более детально оценить точность можно с помощью рис. 3, на котором приведены зависимости модуля точности измерения координат от угла места  $\epsilon$  и азимута  $\beta$  для тех же конфигураций МПРЛС.

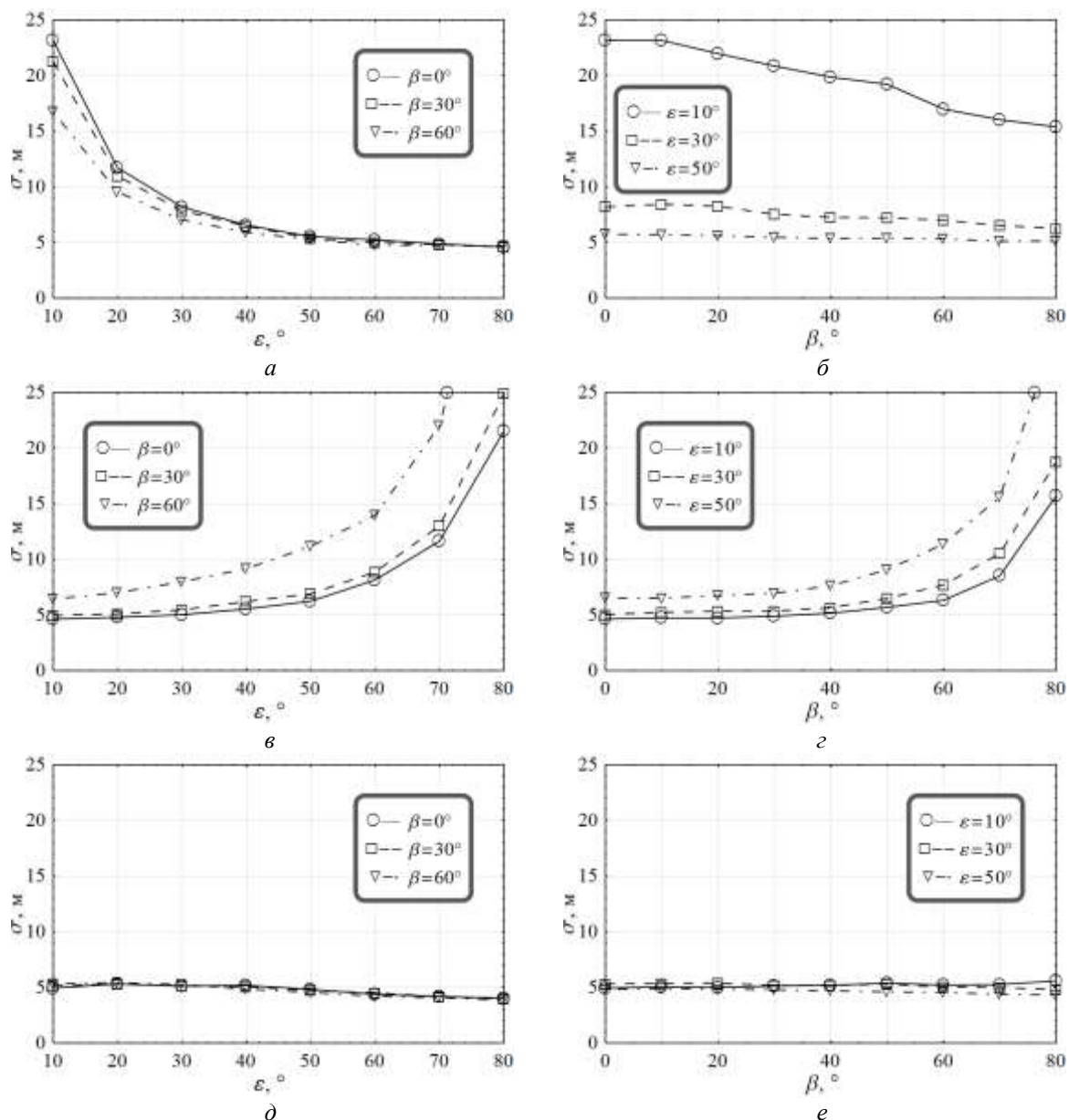


Рис. 3. Модуль СКО погрешности оценки координат объекта, находящегося на дальности 10 км в зависимости от угла места  $\epsilon$  и азимута  $\beta$ , полученный для: а, б – плоскостной конфигурации на рис. 1, а; в, г – плоскостной конфигурации на рис. 1, б; д, е – пространственной конфигурации на рис. 1, в.

### Заключение

Приведенные результаты моделирования подтверждают возможность увеличения зоны действия МПРЛС для малых углов места за счет поднятия одной из позиций. Дисперсия ошибок разовых оценок координат может быть уменьшена с помощью введения угломерных измерений, а также за счет добавления дополнительных позиций и выбора оптимальной пространственной конфигурации измерительной системы.

### Список литературы

1. Аверьянов В.Я. Разнесенные радиолокационные станции и системы. Минск: Наука и техника, 1978. 148 с.
2. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. М.: Радио и связь, 1993. 416 с.
3. Черняк В.С., Заславский Л.П., Осипов Л.В. Многопозиционные радиолокационные станции и системы // Зарубежная радиоэлектроника. 1987. № 1. С. 9–69.

4. Кондратьев В.С., Котов А.Ф., Марков Л.Н. Многопозиционные радиотехнические системы / Под ред. В.В. Цветнова. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.
5. Report # DOT HS 811 817. Radar Measurements of NHTSA's Surrogate Vehicle "SS\_V." / Monitored by Garrick Forkenbrock, National Highway Traffic Safety Administration. August 2013.
6. Storn R., Price K. Differential Evolution – a Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces // J. of Global Optimization. 1997. № 11. P. 341–359.
7. Wright Margaret H. The interior-point revolution in optimization: History, recent developments, and lasting consequences // Bulletin of the American Mathematical Society. 2004.
8. Nelder J.A., Mead R. A Simplex Method for Function Minimization // The Computer Journal. 1965. № 7. P. 308–313.
9. Tech. Rep. DFVLR-FB 88-28. A software package for sequential quadratic programming / DLR German Aerospace Center – Institute for Flight Mechanics. Koln, Germany, 1988.

### References

1. Aver'janov V.Ja. Raznesennye radiolokacionnye stancii i sistemy. Minsk: Nauka i tehnika, 1978. 148 s. (in Russ.)
2. Chernjak V.S. Mnogopozicionnaja radiolokacija. M.: Radio i svjaz', 1993. 416 s. (in Russ.)
3. Chernjak V.S., Zaslavskij L.P., Osipov L.V. Mnogopozicionnye radiolokacionnye stancii i sistemy // Zarubezhnaja radioelektronika. 1987. № 1. S. 9–69. (in Russ.)
4. Kondrat'ev V.S., Kotov A.F., Markov L.N. Mnogopozicionnye radiotekhnicheskie sistemy / Pod red. V.V. Cvetnova. M.: Radio i svjaz', 1986. 264 s. (in Russ.)
5. Report # DOT HS 811 817. Radar Measurements of NHTSA's Surrogate Vehicle "SS\_V." / Monitored by Garrick Forkenbrock, National Highway Traffic Safety Administration. August 2013.
6. Storn R., Price K. Differential Evolution – a Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces // J. of Global Optimization. 1997. № 11. P. 341–359.
7. Wright Margaret H. The interior-point revolution in optimization: History, recent developments, and lasting consequences // Bulletin of the American Mathematical Society. 2004.
8. Nelder J.A., Mead R. A Simplex Method for Function Minimization // The Computer Journal. 1965. № 7. P. 308–313.
9. Tech. Rep. DFVLR-FB 88-28. A software package for sequential quadratic programming / DLR German Aerospace Center – Institute for Flight Mechanics. Koln, Germany, 1988.

### Сведения об авторах

Легкоступ В.В., аспирант кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Маркевич В.Э., к.т.н., ведущий научный сотрудник научно-исследовательского сектора ОАО «АЛЕВКУРП».

### Information about the authors

Legkostup V.V., PG student of the information radiotechnologies department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Markevich V.E., PhD, leading researcher of the Research Sector of JSC «ALEVKURP».

### Адрес для корреспонденции

220043, Республика Беларусь,  
г. Минск, пр-т Независимости, 95, к. 7  
ОАО «АЛЕВКУРП»  
тел. +375-25-532-27-25;  
e-mail: legkostupvv@gmail.com  
Легкоступ Виктор Валерьевич

### Address for correspondence

220043, Republic of Belarus,  
Minsk, Nezavisimosti ave. 95, building 7  
JSC «ALEVKURP»  
tel. +375-25-532-27-25;  
e-mail: legkostupvv@gmail.com  
Legkostup Viktor Valeryevich