

УДК621.396.97

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ФАКТОРА НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ МНОГОПОЗИЦИОННЫМИ ПАССИВНЫМИ КОМПЛЕКСАМИ В УСЛОВИЯХ ИЗБЫТОЧНОСТИ

<sup>1)</sup>Поздняков Е. К., <sup>2)</sup>Ткаченко В. Н., <sup>2)</sup>Коротков В. В.

<sup>1)</sup>Институт прикладной математики и механики НАНУ, г. Донецк, Украина;

<sup>2)</sup>ПАО «СКБ РТУ», г. Донецк, Украина

*Недостатком существующих методов определения координат в многопозиционных пассивных комплексах является влияние геометрического фактора на точность результатов. Целью данной статьи является исследование влияния геометрического фактора на метод определения координат, основанного на разностно-дальномерном методе (РДМ) и решение задачи в условиях избыточности. Приведено обоснование математического аппарата рассматриваемого метода, выполнено имитационное моделирование определения координат цели при различных вариантах взаимного расположения станций пассивного комплекса и источников радиоизлучения. Проведенный сравнительный анализ статистических характеристик результатов моделирования доказывает, что геометрический фактор не оказывает существенного влияния на точность определения координат в рассматриваемом методе.*

**Ключевые слова:** источник радиоизлучения, геометрический фактор, избыточность, имитационное моделирование

### Постановка проблемы

В пассивной локации для определения координат источника радиоизлучения (ИРИ) широко применяется разностно-дальномерный метод (РДМ), преимущества и недостатки которого достаточно полно описаны в [1]. Погрешность определения координат РДМ зависит от точности определения временных задержек прихода сигнала на станции комплекса. На величину ошибок определения временных задержек существенно влияют условия распространения радиоволн [2], влияние которых особенно заметно на больших дальностях до цели. В зависимости от диапазона частот, погрешность определения временных задержек может достигать 25 мкс, что существенно ограничивает возможности РДМ.

При построении рабочей зоны многопозиционного пассивного комплекса (МПК) вводят понятие геометрического фактора системы, связывающего точность местоопределения цели с взаимным расположением станций и излучающего объекта [3]. Недостатком существующих методов определения координат ИРИ (в том числе РДМ) является значительное влияние геометрического фактора на точность определения координат ИРИ. Данный недостаток особенно критичен для систем пассивной локации, имеющих круговой сектор обзора (360 градусов). Таким образом, разработка метода определения координат, позволяющего снизить влияние геометрического фактора на точность определения координат пассивными комплексами, является важной задачей пассивной локации.

### Анализ последних исследований и публикаций

Рассматриваемый в данной статье метод определения координат ИРИ основан на использовании результатов РДМ и решения задачи в условиях избыточности. Тема использования избыточных измерений для увеличения точности определения координат ИРИ не является принципиально новой в теории пассивной локации. Например, наличие четвертой станции в комплексе пассивной локации повышает устойчивость результатов к погрешностям определения временных задержек. В рассматриваемом методе в качестве избыточных данных предлагается использование дальностей от боковых станций комплекса до ИРИ, которые могут вычисляться с использованием метода, описанного в [4]. Как показало имитационное моделирование, результаты метода определения координат ИРИ на основе использования РДМ и решения задачи в условиях избыточности обладают существенно лучшими статистическими характеристиками в сравнении с результатами РДМ. Однако влияние геометрического фактора на результаты метода не было изучено.

Целью данной работы является исследование влияния геометрического фактора на точность определения координат ИРИ методом на основе РДМ и решения задачи в условиях наличия избыточной информации о пространственном положении цели.

### Сущность метода

На рис. 1 показано схематическое представление многопозиционного пассивного комплекса (МПК) и ИРИ в пространстве.

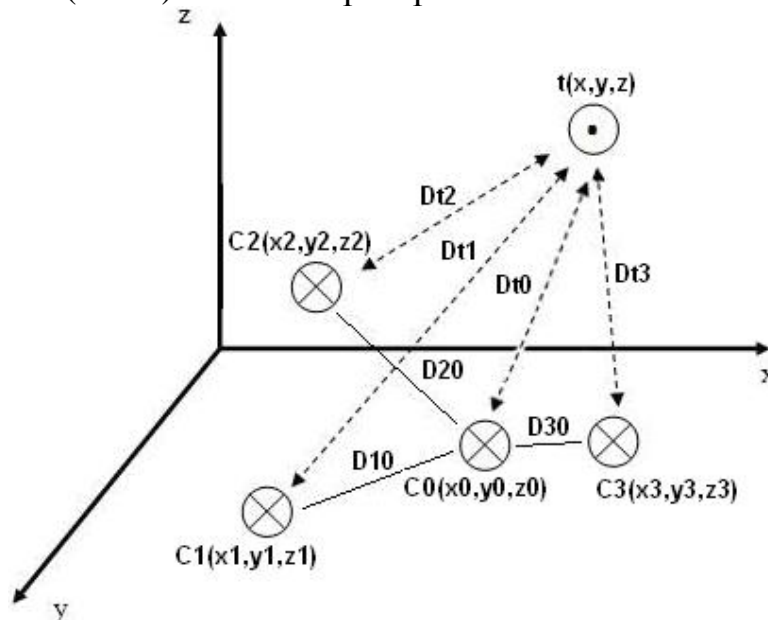


Рис. 1. Схематическое представление МПК и ИРИ

На рис. 1 приняты следующие условные обозначения:  $C_0-C_3$  – принимающие станции пассивного комплекса,  $t(x,y,z)$  – ИРИ,  $D_{10}, D_{20}, D_{30}$  – расстояния от боковых станций до центральной,  $D_{t0}$  – расстояние от ИРИ до центральной станции  $C_0$ ,  $D_{t1}, D_{t2}, D_{t3}$  – расстояния от боковых станций до ИРИ.

Более подробно РДМ изложен в [1] и [5].

Для решения задачи определения координат ИРИ в условиях избыточности необходимо дополнить стандартную систему уравнений РДМ избыточными уравнениями. В рассматриваемом методе избыточные уравнения будут содержать информацию о дальностях от боковых станций комплекса до ИРИ (см. рис. 1).

Таким образом, избыточная система уравнений для определения координат ИРИ имеет вид:

$$\left[ \begin{array}{l} \varepsilon_1(x, y, z) = \frac{1}{c} \cdot \left( \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} + D_{10} - D_{t0} \right) - \tau_1 = 0 \\ \varepsilon_2(x, y, z) = \frac{1}{c} \cdot \left( \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2} + D_{20} - D_{t0} \right) - \tau_2 = 0 \\ \varepsilon_3(x, y, z) = \frac{1}{c} \cdot \left( \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2} + D_{30} - D_{t0} \right) - \tau_3 = 0 \\ \varepsilon_4(x, y, z) = \frac{\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} - D_{t1}}{c} = 0 \\ \varepsilon_5(x, y, z) = \frac{\sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2} - D_{t2}}{c} = 0 \\ \varepsilon_6(x, y, z) = \frac{\sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2} - D_{t3}}{c} = 0 \end{array} \right], \quad (1)$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  – стандартные уравнения РДМ;  $\varepsilon_4, \varepsilon_5, \varepsilon_6$  – дополнительные уравнения системы, полученные на основе избыточной информации о дальностях до ИРИ.

Решение системы (1) представляет собой вектор координат ИРИ, определенный с учетом избыточных дальностей до цели. В общем случае система (1) может не иметь точного решения  $\varepsilon_i(x, y, z) = 0, i = 1, 6$ . В этом случае необходимо найти некоторый "оптимальный" вектор значений  $(x, y, z)$ . Под оптимальностью здесь понимается минимум ошибки (невязки) уравнений, оцениваемый величинами  $\varepsilon_i(x, y, z), i = 1, 6$  системы (1). Нахождение «оптимального» вектора значений  $(x, y, z)$  может быть выполнено путем решения экстремальной задачи для квадратичного функционала, равного сумме квадратов уравнений  $\varepsilon_i(x, y, z), i = 1, 6$ .

В реальных условиях относительная погрешность определения дальностей  $D_{t1}, D_{t2}, D_{t3}$  существенно выше погрешности определения временных задержек. Исходя из анализа технических характеристик комплекса пассивной локации, были определены следующие значения среднего квадратического отклонения (СКО) относительной погрешности определения входных параметров:

$$\left[ \begin{array}{l} \sigma_{\delta_{\tau}} = 0,2\% \\ \sigma_{\delta_d} = 3,5\% \end{array} \right],$$

где  $\sigma_{\delta-\tau}$ ,  $\sigma_{\delta-d}$  – СКО соответственно относительной погрешности определения временной задержки  $\delta_\tau$  и избыточной дальности  $\delta_d$ .

Из-за высокой погрешности определения избыточной информации, погрешность определения координат при решении задачи в условиях избыточности (решение системы (1)) значительно выше погрешности определения координат в РДМ.

Был предложен следующий метод увеличения точности определения координат ИРИ на основе РДМ и решения задачи в условиях избыточности. Данный метод состоит из следующих этапов.

Выполняется расчет координат ИРИ согласно РДМ. Далее, на основе избыточной информации о дальности, выполняется решение задачи в условиях избыточности путем нахождения корней системы уравнений (1).

Для уточнения координат ИРИ на основе РДМ и решения задачи в условиях избыточности необходимо выполнить решение следующей системы уравнений:

$$\left[ \begin{array}{l} \frac{x-x_{RDM}}{x_{c0}-x_{RDM}} = \frac{y-y_{RDM}}{y_{c0}-y_{RDM}} = \frac{z-z_{RDM}}{z_{c0}-z_{RDM}} \\ (x-x_{c0})^2 + (y-y_{c0})^2 + (z-z_{c0})^2 = D^2 \end{array} \right], \quad (2)$$

где  $x_{c0}$ ,  $y_{c0}$ ,  $z_{c0}$  – координаты центральной станции  $C_0$ ;  $x_{RDM}$ ,  $y_{RDM}$ ,  $z_{RDM}$  – координаты ИРИ, определенные согласно РДМ;  $D$  – дальность от центральной станции до ИРИ, определенная в результате решения задачи в условиях избыточности;  $x, y, z$  – искомые координаты ИРИ.

Решение системы уравнений (2) является результатом определения координат ИРИ на основе РДМ и решения задачи в условиях избыточности.

Увеличение точности определения координат происходит за счет того, что результаты РДМ распределяются вдоль линии положения (пеленга) ИРИ. Первое уравнение системы (2) представляет собой уравнение линии пеленга в пространстве, проходящей через центральную станцию  $C_0$  и точку местоположения ИРИ, определенную согласно РДМ. Результаты решения задачи определения координат ИРИ в условиях избыточности распределены вдоль поверхности сферы, центр которой лежит в центральной станции комплекса, и радиусом  $R$  равным значению дальности до ИРИ, полученному в результате решения задачи в условиях избыточности. Второе уравнение системы (2) описывает данную сферу. Нахождение точки пересечения линии пеленга со сферой даст уточненные координаты ИРИ.

### Исследование геометрического фактора

Рабочая зона (РЗ) МПК – часть пространства, в пределах которого обеспечивается нахождение координат объекта с погрешностью, не превышающей максимально допустимую [3]. При построении РЗ необходимо учитывать геометрический фактор системы. Геометрический фактор включает в себя геометрию размещения станций на плоскости, а также положение ИРИ относительно

станцій МПК. Положение ИРИ относительно станций МПК определяется азимутом, а также углом места [5].

Учет влияния геометрического фактора позволяет обеспечить наиболее рациональное расположение станций комплекса для контроля заданного сектора пространства. Для четырехпозиционного пассивного комплекса вариант взаимного расположения станций считается идеальным, если боковые станции находятся в вершинах равностороннего треугольника, а центральная станция является равноудаленной от боковых станций на расстояние, называемое базой. Исследование оптимального расположения станций пассивного комплекса с точки зрения уменьшения влияния геометрического фактора для РДМ широко освещено в литературе, например в [1] и [5].

В качестве начальных условий примем, что комплекс пассивной разведки имеет сектор обзора  $360^\circ$ , истинная дальность до ИРИ  $D_{i0}$  постоянна и равна 100 км. Взаимное расположение станций комплекса соответствует идеальному для РДМ (равносторонний треугольник). Значение угла пеленга (азимута) на ИРИ изменяется в диапазоне от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  с шагом  $8^\circ$ . Выполним исследование влияния положения ИРИ относительно МПК на точность определения координат. Для каждого из значений пеленга проведем имитационное моделирование определения координат ИРИ при помощи метода статистических испытаний (метод Монте-Карло) [6].

Предположим, что погрешности входных параметров методов определения координат (временных задержек и дальностей) распределены по нормальному закону распределения [3].

Для генерации относительных погрешностей определения значений  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$  используется генератор случайных чисел, имеющий следующие статистические параметры:

$$\left[ \begin{array}{l} M_{\delta_\tau} = 0\% \\ \sigma_{\delta_\tau} = 0,2\% \end{array} \right],$$

где  $M_{\delta_\tau}, \sigma_{\delta_\tau}$  – математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение (СКО) соответственно относительной погрешности  $\delta_\tau$  определения временной задержки  $\tau$ .

Значение временной задержки с учетом сгенерированной относительной погрешности определяется по формуле:

$$\tilde{\tau} = \tau_r + \Delta\tau, \tag{3}$$

где  $\tau_r$  – значение временной задержки, соответствующее истинному положению цели;  $\Delta\tau$  – величина абсолютной погрешности определения временной задержки, вычисленная на основе случайного значения относительной погрешности;  $\tilde{\tau}$  – значение временной задержки, определенное с учетом сгенерированной погрешности.

Число испытаний  $N$  для каждого положения ИРИ принято равным 500. Для всех значений угла пеленга ИРИ используется одинаковый набор сгенериро-

ванных относительных погрешностей определения временных задержек. На основании наборов вычисленных временных задержек (3) выполняется нахождение координат ИРИ с помощью РДМ для каждого значения угла пеленга. Результаты определения координат представлены на рис. 2, который выполнен в двумерной декартовой проекции (без учета координаты  $z$ ).

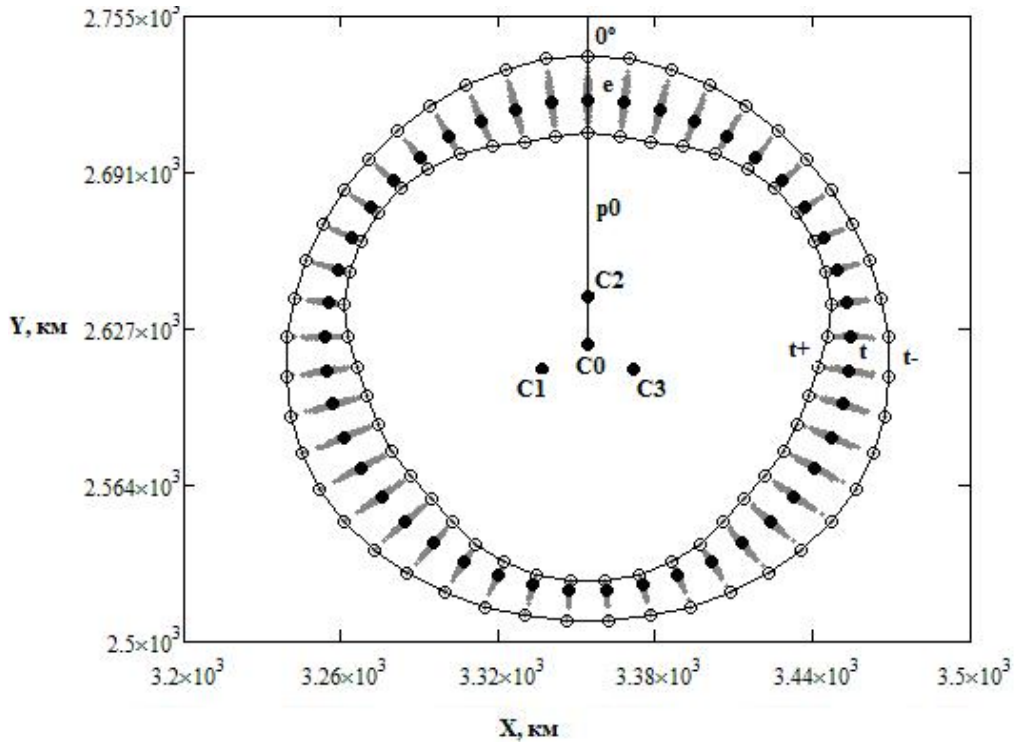


Рис. 2. Исследование геометрического фактора в РДМ

На рис. 2 приняты следующие условные обозначения:  $C_0-C_3$  – станции пассивного комплекса;  $t$  – истинные положения ИРИ для каждого значения угла пеленга;  $e$  – область определенных координат ИРИ для каждого значения угла пеленга;  $t+$  и  $t-$  – линии максимального отклонения определенных координат ИРИ от истинного положения;  $p_0$  – линия нулевого пеленга на ИРИ от центральной станции.

Проведем аналогичное моделирование для метода определения координат ИРИ на основе РДМ и решения задачи в условиях избыточности. Входными параметрами данного метода являются временные задержки и избыточные дальности.

Статистические характеристики генератора случайных чисел для относительных погрешностей определения избыточных дальностей имеют вид:

$$\left[ \begin{array}{l} M_{\delta_d} = 0\% \\ \sigma_{\delta_d} = 3,5\% \end{array} \right].$$

Используя временные задержки, рассчитанные по формуле (3) при моделировании РДМ, а также определенные по аналогичной формуле с учетом сгенерированных погрешностей значения избыточных дальностей  $D_{t1}$ ,  $D_{t2}$ ,  $D_{t3}$ , вы-

полным определением координат ИРИ методом на основе РДМ и решения задачи в условиях избыточности для каждого значения угла пеленга. Результаты моделирования данного метода представлены на рис. 3.

Проведем анализ статистических характеристик, полученных в результате проведенного моделирования для каждого из методов. Важным метрологическим параметром, характеризующим точность работы системы пассивной локации, является относительная погрешность определения дальности до ИРИ. Поэтому, на рис. 4 представлены оценки математического ожидания определения дальности до ИРИ ( $M_d$ ) для каждого значения угла пеленга.

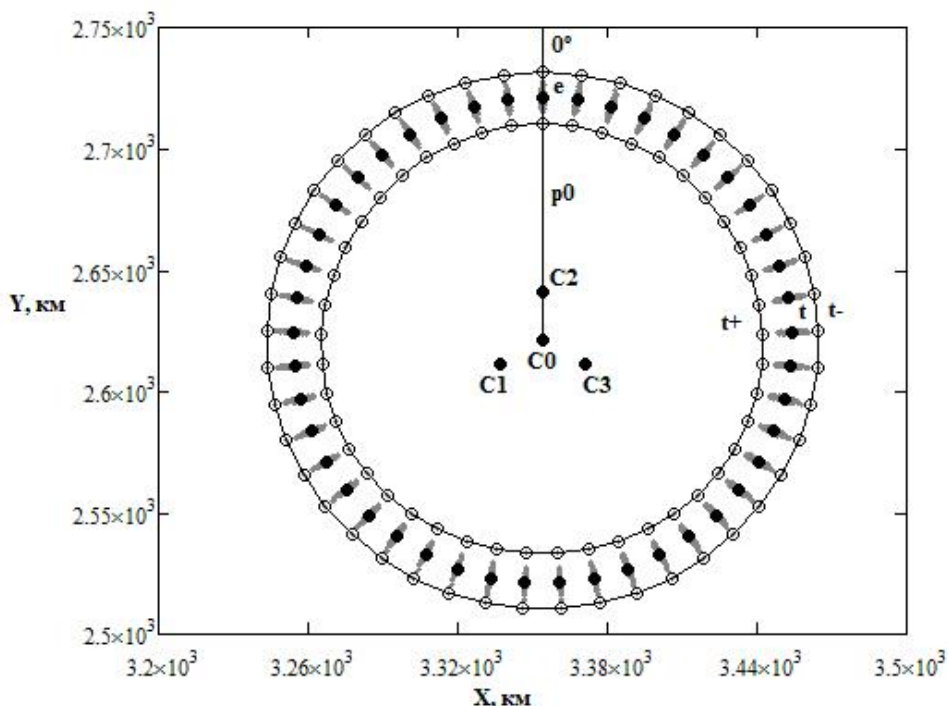


Рис. 3. Исследование геометрического фактора в рассматриваемом методе

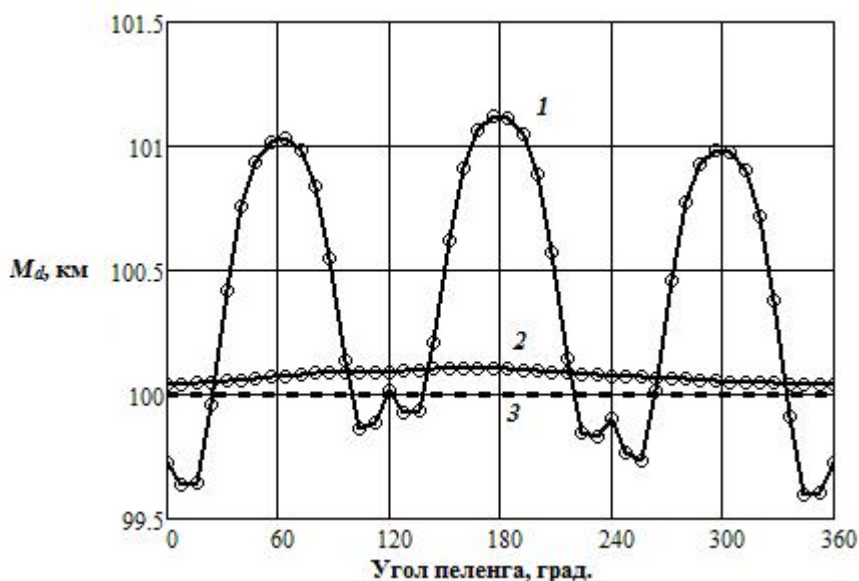


Рис. 4. Оценки мат. ожидания ( $M_d$ ) результатов определения дальности

На рис. 4 приняты следующие обозначения: 1 – мат. ожидания определения дальности при использовании РДМ; 2 – мат. ожидания определения дальности при использовании рассматриваемого метода; 3 – истинное значение дальности до ИРИ.

В качестве характеристики рабочей зоны для каждого значения угла пеленга можно использовать оценки среднего квадратического отклонения (СКО) результатов определения дальности до ИРИ ( $\sigma_d$ ), которые представлены на рис. 5.

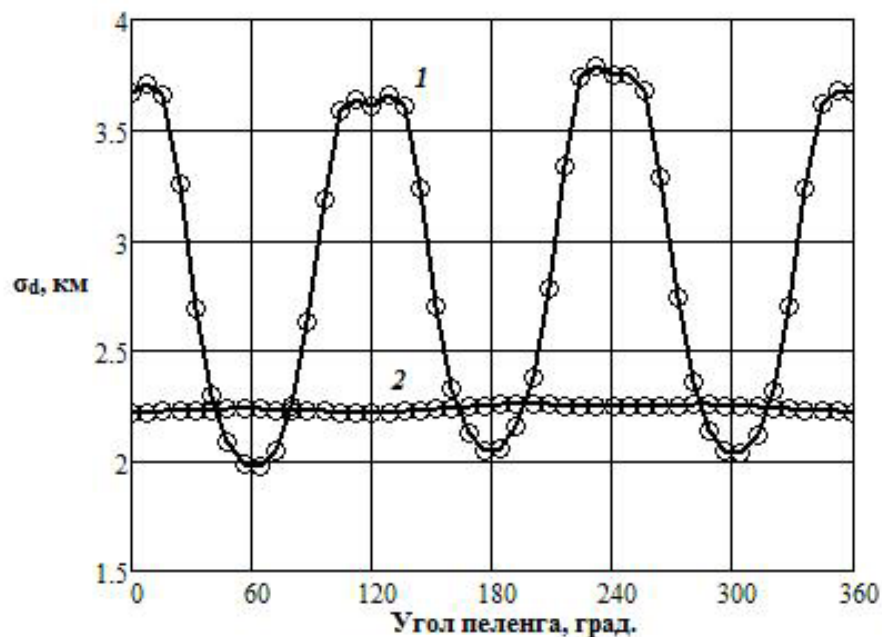


Рис. 5 Оценки СКО ( $\sigma_d$ ) результатов определения дальности

Как следует из рис. 4, в большинстве случаев мат. ожидание результатов определения дальности при использовании метода на основе РДМ и решения задачи в условиях избыточности ближе к истинному значению, чем мат. ожидание результатов при использовании РДМ. Однако при использовании обоих методов оценки мат. ожидания результатов лежат в допустимых пределах отклонения от истинного значения дальности ( $\sim \pm 1\%$ ).

Как следует из рис. 5, геометрический фактор оказывает незначительное влияние на СКО результатов определения дальности при использовании рассматриваемого метода. В данном методе, независимо от значений углов пеленга до ИРИ СКО  $\sigma_d$  остается постоянной ( $\sim 2,25$  км) и лежит в допустимых пределах. При использовании РДМ СКО  $\sigma_d$  существенно зависит от значения угла пеленга, что согласуется с [1] и [5]. При значениях угла пеленга  $0^\circ$ ,  $120^\circ$  и  $240^\circ$  наблюдается значительный рост СКО  $\sigma_d$  результатов РДМ. При указанных значениях углов пеленга использование рассматриваемого метода на основе РДМ и решения задачи в условиях избыточности обеспечит меньшую погрешность определения координат ИРИ (примерно в 1,5 раза).



## **Выводы**

Проведенные в данной статье исследования доказывают, что геометрический фактор оказывает незначительное влияние на результаты метода определения координат на основе РДМ и решения задачи в условиях избыточности. Проведенное имитационное моделирование при разных значениях угла пеленга подтвердило, что в отличие от РДМ, предлагаемый метод имеет стабильные статистические характеристики во всем диапазоне сектора обзора МПК. Как следует из рис. 5, лишь в небольших интервалах сектора обзора пассивного комплекса СКО  $\sigma_d$  результатов определения дальности до ИРИ рассматриваемого метода превышает аналогичную величину результатов РДМ.

Предметом дальнейшего исследования может стать анализ влияния геометрического фактора на решение задачи определения координат ИРИ в условиях избыточности при использовании весовых коэффициентов в квадратичном функционале.

Таким образом, метод определения координат на основе РДМ и решения задачи в условиях избыточности является перспективным направлением для систем пассивной локации. Данный метод может быть особенно эффективным для систем, имеющих круговой сектор обзора, поскольку влияние геометрического фактора на результаты метода незначительно.

## **Литература**

1. Аверьянов В. Я. Разнесенные радиолокационные станции и системы. – М.: Наука и техника, 1978. – 184 с.
2. Арсеньян Т. И. Распространение электромагнитных волн в тропосфере: учебн. пособие. – Томск: ТУСУР, 2006. – 170 с.
3. Гришин Ю. П. Радиотехнические системы: учеб. для вузов / Ю. П. Гришин, В. П. Ипатов, Ю. М. Казаринов и др. – М.: Высш. шк., 1990. – 496 с.
4. Ткаченко В. Н. Повышение точности определения координат ИРИ пассивными системами при помощи измерения периода вращения АФС РЛС / В. Н. Ткаченко, В. В. Коротков, Е. К. Поздняков // Сборник статей «Радиотехника». – 2012. – № 170. – С. 162 – 169.
5. Сайбель А. Г. Основы теории точности радиотехнических методов местоопределения. – М.: Гос. изд-во оборонной промышленности, 1960. – 112 с.
6. Советов Б. Я. Моделирование систем : учебн. пособие – М.: Высш. шк., 2001. – 343 с.

*Надійшла до редакції  
11 листопада 2013 року*

© Поздняков Е. К., Ткаченко В. Н., Коротков В. В., 2013