

УДК 621 396 96

В.В. Куценко<sup>1</sup>, Г.В. Ермаков<sup>1</sup>, С.Н. Телюков<sup>1</sup>, Г.М. Дементюк<sup>2</sup><sup>1</sup>Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков<sup>2</sup>в/ч А2167, Белая Церковь

## ОЦЕНИВАНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ РАДИОИЗЛУЧАЮЩИХ ЦЕЛЕЙ ТРИАНГУЛЯЦИОННЫМ МЕТОДОМ В ПОДВИЖНОЙ СИСТЕМЕ ПАССИВНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ ЗЕНИТНЫХ КОМПЛЕКСОВ БЛИЖНЕГО ДЕЙСТВИЯ

*В статье проведена оценка точности определения местоположения радиоизлучающих целей триангуляционным методом в подвижной системе пассивной радиолокации (СПРЛ) на базе зенитных комплексов ближнего действия.*

**Ключевые слова:** триангуляция, пассивная радиолокация.

### Введение

**Постановка проблемы.** Одной из главных задач, стоящих на современном этапе перед информационными средствами ПВО Сухопутных войск, является обеспечение требуемой точности определения координат целей, действующих в условиях широкого применения сил и средств радиоэлектронной борьбы. Поэтому актуален поиск теоретических и технических решений, которые позволят зенитным комплексам войсковой ПВО уверенно функционировать в таких условиях. К таким решениям относится использование информационных средств пассивной радиолокации (СПРЛ).

**Анализ литературы.** Отметим, что анализ точности функционирования подобных систем хорошо известен и достаточно подробно рассмотрен в [1 – 4]. В этих работах вопросы точности рассматриваются в основном применительно к задаче определения дальности до радиоизлучающих целей в полярной системе координат, в то время как в СПРЛ на базе зенитных комплексов ближнего действия целесообразно определять местоположение цели в прямоугольной системе координат относительно продольной оси пунктов наблюдения, а не относительно линии базы. В этом случае основные зависимости для определения точности измерения координат приобретают несколько иной вид. Очевидно, что задача оценивания точности радиолокационного наблюдения воздушных объектов с учетом указанных особенностей представляет собой практический интерес.

**Цель статьи.** Провести оценку точности определения местоположения радиоизлучающих целей триангуляционным методом в подвижной СПРЛ на базе зенитных комплексов ближнего действия

Для практического применения системы пассивной радиолокации необходимо знание количественных показателей точности местоопределения при различных пространственных положениях двухпозиционной системы пассивной радиолокации отно-

сительно цели, поскольку в этих системах точность местоопределения зависит не только от точности устройств пеленгации, но и от «геометрии» системы местоопределения. В двухпозиционной системе можно управлять точностью оценивания координат целей за счет изменения положения БМ, образующих эту систему. Кроме этого, возможно последовательно использовать различные методы пеленгации.

В простейшем случае при наличии двух БМ, перемещающихся в горизонтальной плоскости, достаточно измерить азимуты  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  в двух пунктах и угол места  $\Theta_1$  в одном либо, наоборот, углы места  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$  в двух пунктах и азимут в одном (рис. 1).

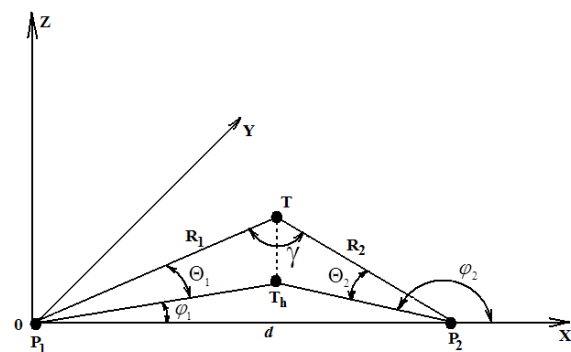


Рис. 1. Геометрия задачи определения местоположения цели триангуляционным методом в трехмерном пространстве

На рисунке точка Т характеризует положение цели в пространстве, а точки  $P_1$  и  $P_2$  показывают положение двух БМ в момент измерения углов. Положение точки  $P_1$  совпадает с положением начала координат, точка  $T_h$  – это проекция точки Т на горизонтальную плоскость, проходящую через базу  $P_1P_2$ .

Так как точность пеленгации ограничена, то при определении местоположения вместо линий и поверхностей положения приходится иметь дело с областями положения.

Для полной характеристики точности работы двухпозиционной пассивной системы необходимо

иметь представление о размерах и форме той области, в пределах которой может действительно оказаться источник излучения по отношению к найденной по данным измерений расчетной точке местоположения. Обычно точность местонахождения бортовой РЭС оценивается расстоянием (линейной ошибкой), которое определяет его истинное положение по отношению к тому, которое было найдено как результат обработки радиолокационных наблюдений.

Очевидно, что ошибки оценивания пеленгов на интервале наблюдения могут быть двух типов: постоянные и случайные во времени. Первые определяются конечной шириной ДН антенной системы пассивного пеленгатора, ошибками топопривязчика, системы единого времени. Причинами появления ошибок второго рода являются внутренние шумы приемников, угловые шумы, нестабильность источников питания и сигналов, излучаемых бортовыми РЭС, и т.д.

## Основная часть

### 1. Оценивание точности определения местоположения радиоизлучающих целей для триангуляционного метода при постоянных ошибках пеленга

Мерой постоянной ошибки пеленга может служить наибольшая линейная ошибка, зависящая от ширины ДН антенной системы пассивного канала (рис. 2).

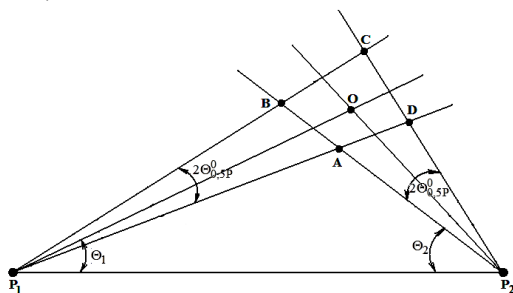


Рис. 2. Иллюстрация нахождения максимальной линейной ошибки определения местоположения

Считая заданной ширину ДН антенной системы пассивного канала, можно полагать, что источник радиоизлучения, засеченный в точке О, будет находиться в пределах четырехугольника ABCD. При этом максимальное значение линейной погрешности определяется наибольшим из отрезков: OA, OB, OC или OD. В [5] отмечается, что графическое решение этой задачи, сводящееся к простому построению, дает недостаточно точные результаты. В то же время применение приемов дифференциальной геометрии приводит к довольно простым формулам для определения наибольшей линейной погрешности  $\Delta L$ . Эти формулы приобретают тот или иной вид в зависимости от того, где лежит точка, для которой отыскивается величина линейной погрешности.

Границей между двумя областями служит окружность, построенная на базе  $P_1P_2$ , как на диаметре.

Для точек, выходящих за пределы этой окружности, имеем [5]:

$$\Delta L = 0,00875 \frac{d \cdot 2\Theta_{0,5P}^0}{\sin(\Theta_1 + \Theta_2)}, \quad (1)$$

где  $d$  – база, измеряемая в км,  $2\Theta_{0,5P}^0$  – ширина ДН.

На рис. 3 представлен график для фиксированного расстояния до пеленгуемого объекта, рассчитанный в соответствии с (1) при  $2\Theta_{0,5P}^0 = 3^\circ$ . Углы места цели для первой и второй БМ и база между БМ менялись. График 1 соответствует  $\Theta_1=10^\circ$ ,  $d=1000$  м; 2 –  $\Theta_1=20^\circ$ ,  $d=1000$  м; 3 –  $\Theta_1=40^\circ$ ,  $d=1000$  м; 4 –  $\Theta_1=10^\circ$ ,  $d=1500$  м; 5 –  $\Theta_1=20^\circ$ ,  $d=1500$  м; 6 –  $\Theta_1=40^\circ$ ,  $d=1500$  м; 7 –  $\Theta_1=10^\circ$ ,  $d=2000$  м; 8 –  $\Theta_1=20^\circ$ ,  $d=2000$  м; 9 –  $\Theta_1=40^\circ$ ,  $d=2000$  м.

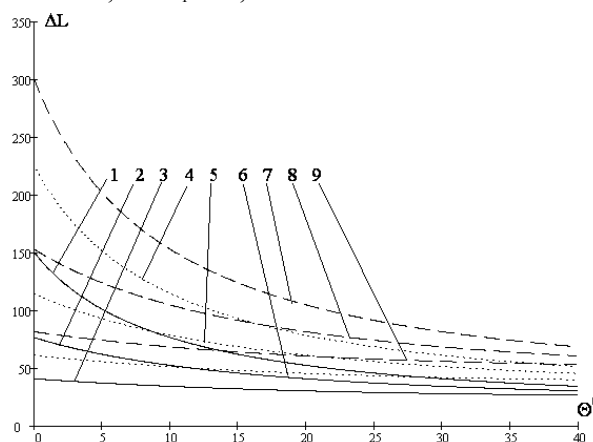


Рис. 3. Зависимость линейной погрешности для точек вне окружности при изменяющихся углах места и базах

Как следует из рис. 3 с увеличением углов места  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$ , т.е. с удалением от базы, при фиксированном расстоянии до цели величина линейной погрешности уменьшается. С приближением точки О к базе линейная погрешность пеленгатора возрастает, стремясь к бесконечно большим значениям. Это объясняется тем, что угол пересечения обоих направлений, т.е. угол  $\Theta$  (рис. 2), стремится к нулю, и угловая погрешность пеленгации любой малой величины может быть причиной погрешности, превосходящей сколь угодно большое число.

По мере приближения точки О к окружности линейная погрешность падает, достигая минимума для точек, лежащих на самой окружности. Причина состоит в том, что в этом случае линии  $P_1O$  и  $P_2O$  пересекаются под прямым углом. Для точек, лежащих внутри этой окружности, имеем [5]:

$$\Delta L = 0,00875 \cdot d \cdot 2\Theta_{0,5P}^0 \times \frac{\sqrt{\sin^2 \Theta_1 + \sin^2 \Theta_2 - 2 \sin \Theta_1 \sin \Theta_2 \cos(\Theta_1 + \Theta_2)}}{\sin^2(\Theta_1 + \Theta_2)}. \quad (2)$$

На рис. 4 представлений графік для фіксованого відстані до пеленгуемого об'єкта, розрахований відповідно до (2) при тих же умовах, що і на рис. 3. Обозначення аналогічні рис. 3.

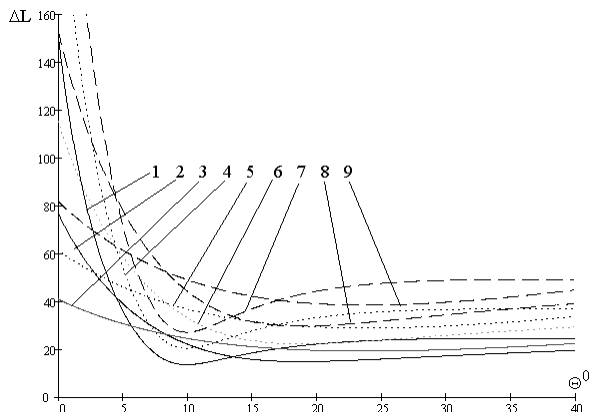


Рис. 4. Залежність лінійної погрешності для точок, лежачих всередині кола при змінюваних кутах місця і баз

Аналіз графіків рис. 3 і 4 показує, що при однаковій ширині ДН  $2\Theta_{0,5P}^0$  лінійна погрешність для точок, лежачих поза вказаним колом, буде більшою, ніж для внутрішніх точок. Отримані залежності дозволяють передбачити оптимальне з точки зору розташування бойових машин з пасивними каналами для отримання мінімальних помилок вимірювання координат при триангуляційному методі пеленгації.

## 2. Оцінювання точності визначення місцеположення радіоізлучаючих цілей для триангуляційного методу при випадкових помилках пеленга

Існує два основні способи оцінювання точності визначення місцеположення джерела радіоізлучення на площині: її можна характеризувати або еліпсом помилок (при заданній ймовірності знаходження джерела всередині еліпса), або середньої квадратичної помилкою місцезнаходження.

Як відзначалося вище, процес вимірювання кутів координат супроводжується випадковими помилками. В [6] відзначається, що залежність між величиною помилки і ймовірністю її виникнення може бути описана нормальним законом розподілу:

$$p(\Delta)\delta\Delta = \frac{h}{\sqrt{\pi}} \exp(-h^2\Delta^2)\delta\Delta, \quad (3)$$

де  $\Delta$  — кут пеленгації, визначена шириною ДН антенної системи,  $\delta\Delta$  — мале приростання цієї погрешності,  $h = 1/(\sigma_\Theta\sqrt{2})$  — міра точності пеленгації,  $p(\Delta)\delta\Delta$  — ймовірність того, що кут пеленгації лежить в межах від  $\Delta$  до  $\Delta+\delta\Delta$ ,  $\sigma_\Theta$  — середнькватратична помилка вимірювання кутів координат.

Якщо відомо відстань від пеленгатора до об'єкта пеленгації, то може бути розрахована лінійна погрешність бокового відхилення за формулою [6]:

$$\Delta l = 0,00875R \cdot 2\Theta_{0,5P}^0, \quad (4)$$

де  $R$  — відстань до ІРИ.

На рис. 5 представлена залежність лінійної погрешності бокового відхилення від відстані для розглянутої антенної системи пасивного пеленгатора. З рис. 5 випливає, що величина лінійної погрешності бокового відхилення, що описує розміри еліпса помилок вимірювання координат цілі, повинна порівнюватися з розмірами еліпса розсіяння снарядів зенітних автоматів ЗК БД для визначення спроможності триангуляційного методу пеленгації.

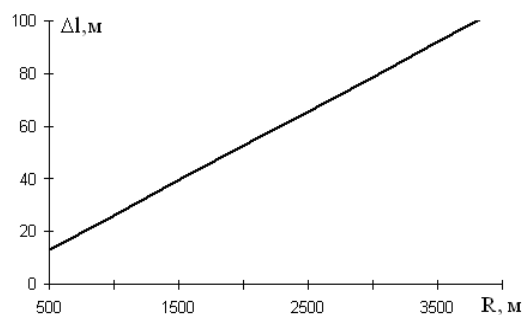


Рис. 5. Залежність лінійної погрешності бокового відхилення від відстані для розглянутої антенної системи пасивного пеленгатора

В результаті засечки цілі визначається точка, в якій повинна знаходитися повітряна ціль. Ця точка є центром фігури, в межах якої може в дійсності знаходитися ціль з заданою ймовірністю. В [5] доведено, що подібна фігура має еліптичну форму. Визначення розмірів половин еліпса (з яких більша є найбільшим значенням лінійної погрешності), а також їх орієнтація можуть бути пояснені з рис. 6.

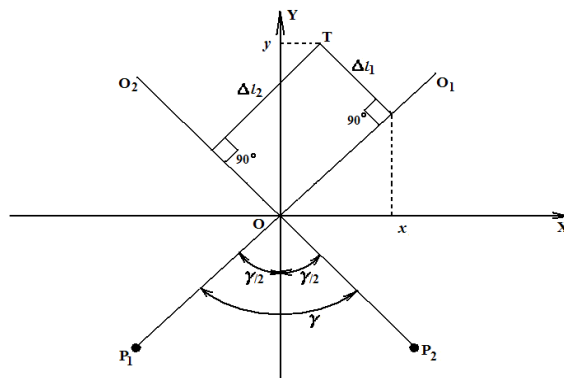


Рис. 6. Лінійні погрешності ліній положення

Відбувається, що напрямки обох пеленгів перетинаються в точці O під кутом  $\gamma$ . Ортогональна система координат орієнтована так, що ось ординат

ОУ совпадает с биссектрисой угла  $\gamma$ . Истинное положение объекта пеленгации соответствует некоторой точке Т с координатами  $x, y$ , а линейная погрешность – величине радиус-вектора ОТ. Опустив перпендикуляры из точки Т на прямые  $P_1O_1$  и  $P_2O_2$ , определим угловые ошибки первого и второго пеленгаторов:

$$\Delta_1 = \Delta l_1 / R_1, \Delta_2 = \Delta l_2 / R_2, \quad (5)$$

где  $\Delta_1, \Delta_2$  – угловые ошибки первого и второго пеленгаторов, расположенных в точках  $P_1$  и  $P_2$  соответственно;  $R_1, R_2$  – расстояния от точки О до первого и второго пеленгаторов;  $\Delta l_1, \Delta l_2$  – линейные смещения измеренных линий положения относительно истинных.

Равенства (5) имеют приближенный характер, но они обладают достаточной точностью вследствие того, что  $\Delta l_1 \ll R_1, \Delta l_2 \ll R_2$ .

Соотношения (3), (5) используются для определения вероятности нахождения объекта пеленгации в окрестности некоторой точки с координатами  $(\Delta l_1, \Delta l_2)$  и отыскания уравнения для кривой равной вероятности. Под этой кривой понимают линию, обладающую тем свойством, что каждому элементу поверхности, к ней примыкающему, соответствует одна и та же вероятность нахождения в ее пределах объекта пеленгации [6]. Уравнению кривой равной вероятности, имеющему вид [5]:

$$\Delta_1^2 + \Delta_2^2 = \tilde{N}^2, \quad (6)$$

соответствует эллипс с полуосями

$$a_0 = \frac{C\sqrt{R_1R_2} \sin 2\varepsilon}{\sqrt{1 \pm \sqrt{1 - \sin^2 \gamma \sin^2 2\varepsilon}}}, \quad (7)$$

$$b_0 = \frac{C\sqrt{R_1R_2} \sin 2\varepsilon}{\sqrt{1 \mp \sqrt{1 - \sin^2 \gamma \sin^2 2\varepsilon}}},$$

где  $C$  – константа определяющая размеры эллипса,

$$\varepsilon = \arctg R_1/R_2. \quad (8)$$

Полуось  $b_0$  составляет с осью ОУ, т.е. с биссектрисой угла  $\gamma$ , угол определяемый равенством [6]:

$$\gamma_e = 0,5 \arctg(\tg \gamma \cos 2\varepsilon). \quad (9)$$

При выборе знаков в знаменателе (7) следует руководствоваться следующим правилом: если угол  $\gamma$  меньше  $90^\circ$ , то выбирают верхние знаки, если больше – нижние.

Равенство (9) показывает, что угол  $\gamma_e$ , по абсолютной величине всегда остается меньшим половины угла  $\gamma$ . Отсюда следует, что большая ось эллипса всегда лежит внутри острых углов пересечения  $P_1O_1$  и  $P_2O_2$  (рис. 6).

Из анализа равенств (8) и (9) вытекает следующее общее правило ориентации эллипса: при неодинаковых расстояниях от точки засечки до пеленгаторов оси эллипса повернуты относительно биссектрис углов пересечения пеленгов и эллипса приближается к линии, соединяющей точку засечки с бли-

жайшим пеленгатором.

Если направления пеленгов пересекаются под прямым углом, т.е. если угол  $\gamma = 90^\circ$ , то, как показывает формула (9), угол поворота осей эллипса  $\gamma_e = 45^\circ$  и они совпадают с направлениями обоих пеленгов.

Выражения (7) позволяют вычислить значения полуосей эллипса через параметр  $C$ , дальности и угол пересечения пеленгов. Если проинтегрировать выражение для совместной вероятности ошибок местоопределения, из которого вытекает уравнение кривой равной вероятности, по всей площади эллипса, то получим вероятность нахождения объекта пеленгации в пределах этой площади [5]:

$$P_e = 1 - \exp(-h^2 C^2). \quad (10)$$

Решая (10) относительно  $C$  и подставляя найденное выражение в (7), получим размеры полуосей эллипса, выраженные через вероятность  $P_e$ :

$$a_0 = \frac{\sqrt{-\ln(1 - P_e)} R_1 R_2 \sin 2\varepsilon}{h \sqrt{1 \pm \sqrt{1 - \sin^2 \gamma \sin^2 2\varepsilon}}}, \quad (11)$$

$$b_0 = \frac{\sqrt{-\ln(1 - P_e)} R_1 R_2 \sin 2\varepsilon}{h \sqrt{1 \mp \sqrt{1 - \sin^2 \gamma \sin^2 2\varepsilon}}}.$$

Большая полуось эллипса является одновременно и наибольшей линейной погрешностью, что позволяет переписать последнее равенство в несколько ином виде:

$$\Delta L = \frac{\sqrt{-\ln(1 - P_e)} R_1 R_2 \sin 2\varepsilon}{h \sqrt{1 - \sqrt{1 - \sin^2 \gamma \sin^2 2\varepsilon}}}. \quad (12)$$

На рис. 7 представлены эллипсы ошибок для различных положений ИРИ при базе  $d = 2$  км.

При этом следует помнить, что каждая цель отождествляется по виду излучаемого ею сигнала. В случае засечки цели двумя или более пассивными каналами БМ она может сопровождаться до тех пор, пока размеры эллипсоидов ошибок измерений не станут сопоставимыми с размерами эллипсоида рассеяния снарядов, т.е. до момента времени, когда можно будет вести прицельную стрельбу зенитными автоматами. Для повышения скрытности позиций расположения БМ возможно использование дымов, используемых как маскировочное средство против высокоточного оружия. Более того, триангуляционный метод пеленгации может использоваться и при движении БМ, поскольку при решении задачи обнаружения не требуется высокая точность топопривязки в каждый момент времени. В данном случае более важным является сам момент засечки цели и ее отождествление.

Из рис. 7 следует, что ошибки измерения координат при триангуляционном методе пеленгации являются существенными. Они уменьшаются по мере приближения пеленгуемой цели к базе и в случае, когда цель находится под одинаковыми углами места по отношению к БМ (рис. 8).

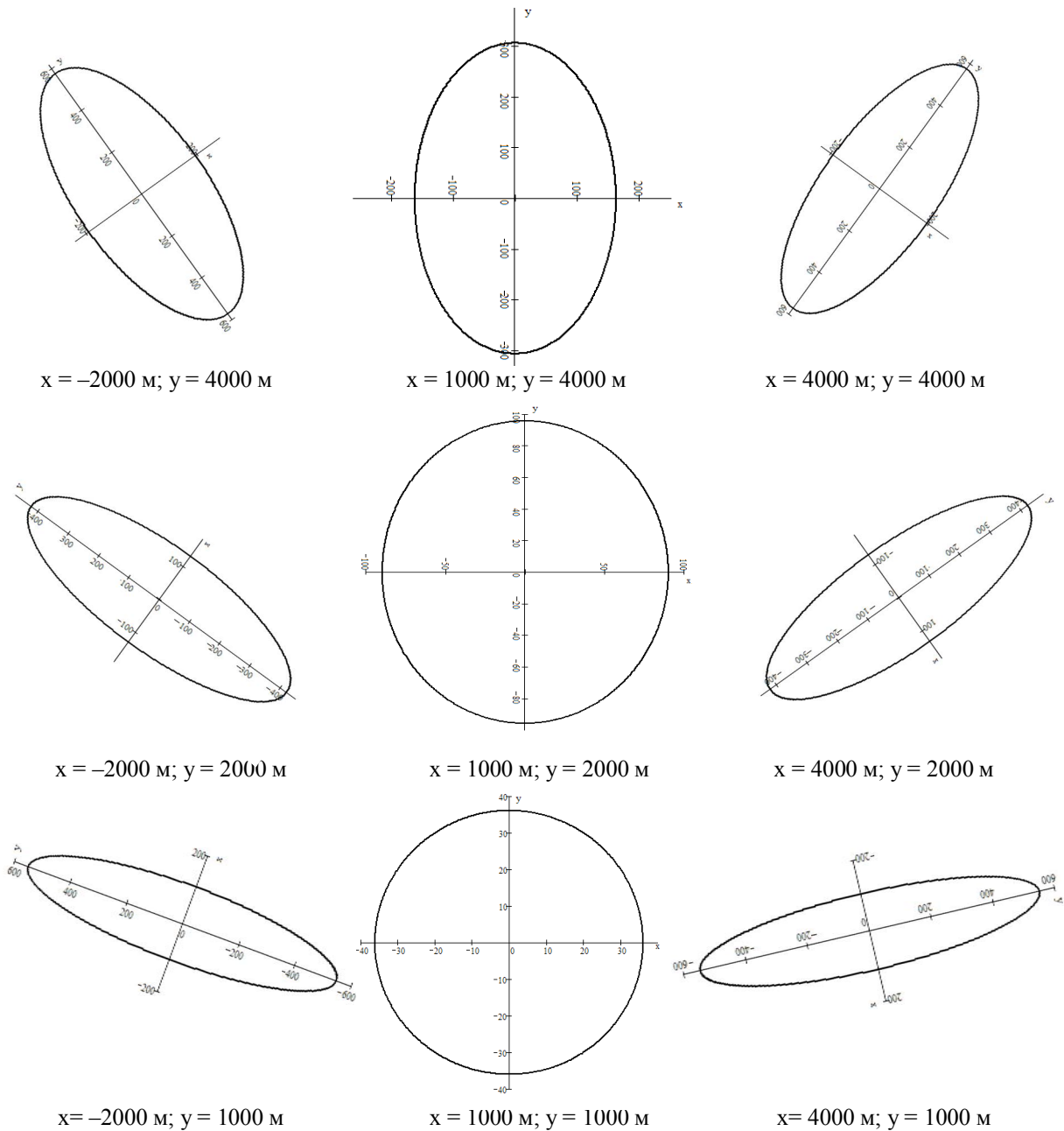


Рис. 7. Эллипсы ошибок измерения координат пеленгуемого объекта в различных точках

Анализ рис. 8 позволяет говорить, что достаточные для стрельбы зенитными автоматами точности возможны при малых расстояниях до ИРИ, что не всегда оправдано при ведении боевых действий. Поэтому после того, как цель была обнаружена и взята на сопровождение, в том числе и при движении БМ с использованием триангуляционного метода пеленгации, в последующем для проведения стрельб целесообразно прекратить движение, решить навигационные задачи и применять разностно-дальномерный метод пеленгации, основанный на базово-корреляционных алгоритмах.

### Выводы

Оценивание точности определения местоположения радиоизлучающих целей для триангуляцион-

ного метода при постоянных ошибках пеленга РЛС пассивных каналов для разных баз и углов места цели, измеряемых на разных позициях, показывает, что с увеличением углов места  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$ , при фиксированном расстоянии до цели величина линейной погрешности уменьшается. А при случайных ошибках пеленгации для разных баз и расстояниях до точки пеленгации на дальней границе зоны поражения артиллерийским каналом для базы  $d=2$  км большая полуось эллипса имеет значение от 300 м до 600 м при разном положении точки пеленгации. Эти ошибки уменьшаются по мере приближения пеленгуемой цели к базе и в случае, когда цель находится под одинаковыми углами места по отношению к БМ. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют в пользу выбора разностно-дальномерного метода пеленга-

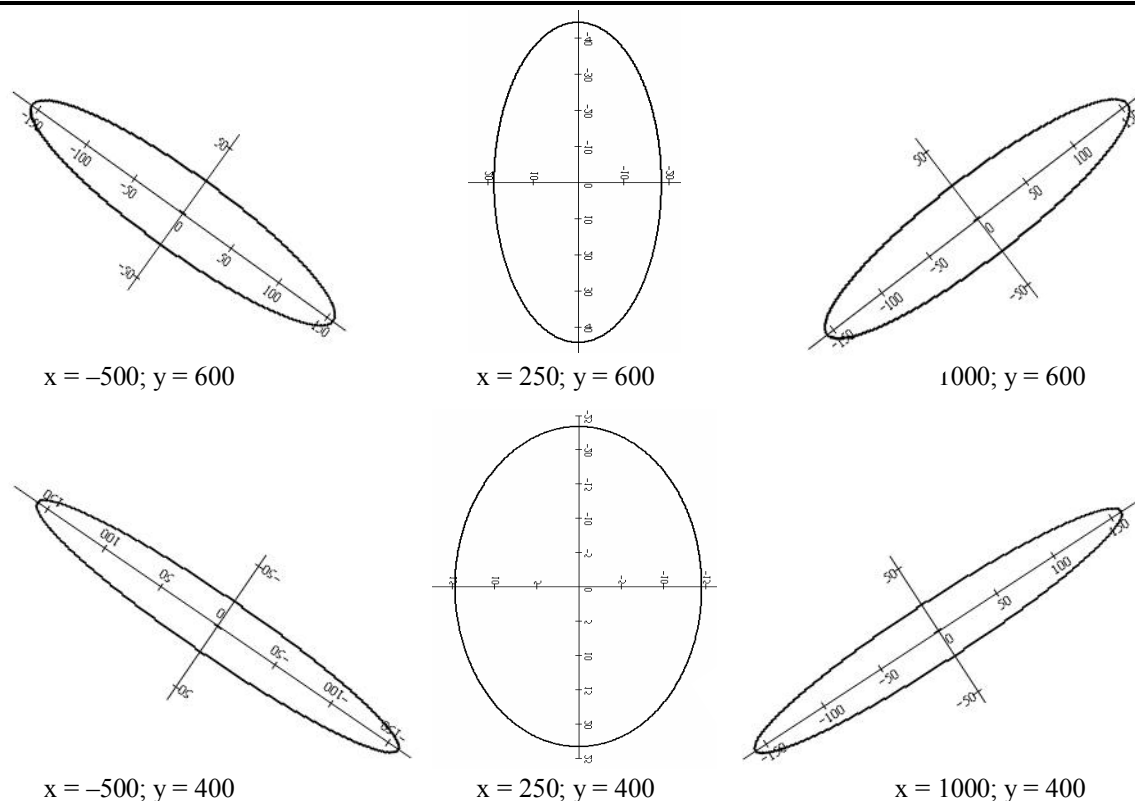


Рис. 8. Еллипсы ошибок измерения координат пеленгуемого объекта при уменьшении расстояния до пеленгуемого объекта

ции, который при определенном порядке построения БМ в батарее позволяет поразить цель огнем зенитных автоматов на дальней границе зоны поражения артиллерийскими снарядами ЗПРК "Тунгуска". Как показали результаты исследований целесообразно использовать указанный метод после обнаружения ВЦ в движении, ее отождествления и оценки координат триангуляционным методом, который не требует точной настройки шкалы СЕВ.

### Список литературы

1. Сайбель А.Г. Основы теории точности радиотехнических методов местоопределения / А.Г. Сайбель. – М.: Оборонгиз, 1958. – 560 с.
2. Ярлыков М.С. Статистическая теория радионавигации / М.С. Ярлыков. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.

3. Сосулин Ю.Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации / Ю.Г. Сосулин. – М.: Радио и связь, 1992. – 480 с.

4. Ярлыков М.С. Авиационные радионавигационные устройства и системы / М.С. Ярлыков, В.А. Болдин, В.С. Богачев. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1980. – 245 с.

5. Радиотехнические системы: Основы построения и теория. Справочник / Я.Д. Ширман, Ю.И. Лосев и др. / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: ЗАО "МАКВИС", 1998. – 828 с.

6. Способы оценивания точности определения местоположения источников радиоизлучения пассивной угломерной двухпозиционной бортовой радиолокационной системой / В.В. Дрогалин, В.А. Ефимов, А.И. Канащенков, В.И. Меркулов и др. // Успехи современной радиоэлектроники. – 2003. – № 5. – С. 22-38.

Поступила в редколлегию 2.12.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.И. Обод, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

### ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЯ РОЗТАШУВАННЯ РАДІОВИПРОМІНЮЮЧИХ ЦІЛЕЙ ТРИАНГУЛЯЦІЙНИМ МЕТОДОМ У РУХЛИВІЙ СИСТЕМІ ПАСИВНОЇ РАДІОЛОКАЦІЇ ЗЕНІТНИХ КОМПЛЕКСІВ БЛИЖНЬОЇ ДІЇ

В.В. Куценко, Г.В. Єрмаков, С.М. Телюков, Г.М. Дементіюк

У статті проведена оцінка точності визначення місця розташування радіовипромінюючих цілей триангуляційним методом у рухливій системі пасивної радіолокації (СПРЛ) на базі зенітних комплексів ближньої дії.

**Ключові слова:** триангуляція, пасивна радіолокація.

### ESTIMATION ACCURACY OF THE DETERMINATION OF THE LOCATION RADIO TRANSMITTER INTEGER BY TRIANGULATION METHOD IN ROLLING SYSTEM PASSIVE RADIO-DETECTION ZENITHAL COMPLEX OF THE NEAR ACTION

V.V. Kutsenko, G.V. Yermakov, S.N. Telyukov, G.M. Dementiyuk

In article is organized estimation to accuracy of the determination of the location radio transmitter integer by triangulation method in rolling system passive radio-detection (SPRD) on the base zenithal complex near action.

**Keywords:** triangulation, passive radio-detection.