

УДК.621.396.61

Г.В. Ермаков<sup>1</sup>, В.В. Куценко<sup>2</sup>, С.Н. Телюков<sup>2</sup><sup>1</sup>Академия внутренних войск МВД Украины, Харьков<sup>2</sup>Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

## АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ ВОЗДУШНЫХ ЦЕЛЕЙ ПРИ РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНОМ МЕТОДЕ ПАССИВНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

*В работе проанализированы ошибки измерения пространственных координат воздушной цели, определяемых при помощи разностно-дальномерного метода пассивной радиолокации; получены зависимости для определения среднеквадратичной ошибки измерения пространственных координат воздушной цели при разностно-дальномерном методе пассивной радиолокации при приеме одиночных сигналов и последовательности сигналов от бортовых радиолокационных станций.*

**Ключевые слова:** пассивная радиолокация, разностно-дальномерный метод, зенитный комплекс ближнего действия.

### Введение

**Постановка проблемы.** Одним из актуальных теоретических и технических решений обеспечения требуемой точности определения координат воздушной цели (ВЦ), действующих в условиях широкого применения сил и средств радиоэлектронной борьбы, является использование в качестве информационных подсистем средств пассивной радиолокации.

**Анализ литературы.** Анализ точности функционирования подобных систем пассивной локализации хорошо известен и достаточно подробно рассмотрен в [1, 2]. 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 рассматриваемой системе пассивной радиолокации (СПРЛ) на базе зенитных комплексов (ЗК) ближнего действия (БД) целесообразно определять местоположение ВЦ в прямоугольной системе координат относительно продольной оси пунктов наблюдения, а не относительно линии базы. В этом случае основ-

ные зависимости для определения точности измерения координат приобретают несколько иной вид. Очевидно, что задача оценки точности радиолокационного наблюдения воздушных объектов с учетом указанных особенностей представляет собой практический интерес.

**Формулирование цели статьи.** Целью статьи является анализ точности измерения координат ВЦ на основе обработки одиночных или пачек импульсов, накопленных каналом СПРЛ.

### Основной материал

Потенциальная точность измерения дальности до ВЦ зависит от точности измерения времени запаздывания отраженного сигнала. Выражение для расчета среднеквадратического отклонения (СКО) измерения дальности  $\sigma_{r_0}$  имеет вид:

$$\sigma_{r_0} = \frac{c}{2} \sigma_t \quad (1)$$

СКО времени запаздывания  $\sigma_t$  определяется как [3]:

$$\sigma_t = 1/(q\Delta), \quad (2)$$

где  $q = \sqrt{2\dot{Y}/N_0}$  – отношение сигнал/шум;

$$\dot{Y} = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{A}^2(t) dt \text{ – энергия сигнала;}$$

$$\Delta^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |d\dot{A}(t)/dt|^2 dt}{\int_{-\infty}^{\infty} |\dot{A}(t)|^2 dt} \text{ – нормированный второй}$$

временной момент принимаемого сигнала.

Как видно из последнего выражения, точность измерения времени запаздывания зависит от формы принимаемого сигнала, точнее от квадрата первой производной.

Потенциальную точность определения угловых координат ВЦ, работающей с узкополосным сигналом, можно определить по аналогии с определением временного запаздывания [3]:

$$\sigma_{\Theta} = \frac{\lambda}{\xi \Lambda}, \quad (3)$$

$$\text{где } \Lambda = \left[ \frac{\int_S (2\pi\delta)^2 |E(x, y)|^2 dS}{\int_S |E^2(x, y)| dS} \right]^{1/2} \text{ – среднеквадратичная}$$

ширина возбуждения апертуры  $S$ ;  $E(x, y)$  – амплитудное распределение по раскрытию;  $(2\pi\delta)^2$  – весовой коэффициент, учитывающий неравномерность усиления по мощности всей диаграммы направленности (ДН) для прямоугольного раскрытия.

При определении среднеквадратичной ширины облучения раскрытия кроме пространственного амплитудного распределения должно учитываться также и временное распределение:

$$\Lambda = \left[ \frac{\int_S (2\pi\delta)^2 |E(x, y)|^2 dS \int_{-\infty}^{\infty} |d\dot{A}(t)/dt|^2 dt}{\int_S |E^2(x, y)| dS \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{A}(t)|^2 dt} \right]^{1/2}. \quad (4)$$

Из выражения (4) видно, что потенциальная точность определения угловых координат ВЦ зависит как от пространственного амплитудного распределения по раскрытию, так и от вида принимаемого сигнала.

**СКО измерения пространственных координат ВЦ при приеме одиночных сигналов от бортовых радиолокационных станций.** Для определения погрешности измерений пространственных координат при разностно-дальномерном методе рассмотрим приемные позиции, каждая из которых

имеет измерители времени прихода сигнала, излучаемого ВЦ (рис. 1).

В точке  $M$  с полярными координатами  $(r_0, \Theta_0)$  расположен наблюдаемый объект, а в точках с координатами  $(-L/2, 0)$  и  $(L/2, 0)$  – измерители времени прихода сигнала.

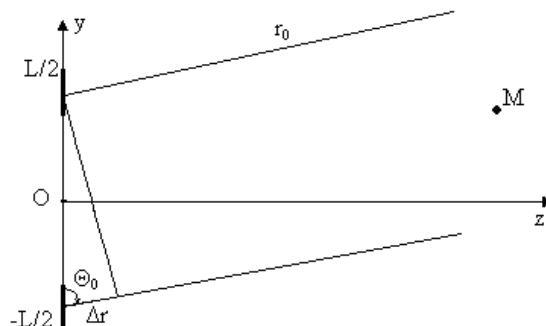


Рис. 1. Разнесенные пункты приема СПРЛ

При условии, что цель находится в дальней зоне, т.е. при  $r_0 \gg L$  разность хода будет составлять:

$$\Delta r = L \sin \Theta_0.$$

Заменяя истинное значение  $\Delta r$  его оценкой  $\hat{\Delta r}$ , для оценки углового положения ВЦ получаем:

$$\hat{\Theta} = \arcsin\left(\frac{\hat{\Delta r}}{L}\right).$$

В предположении, что точность оценки разности хода  $\sigma_{\Delta r}^2$  обладает высокой апостериорной точностью и  $\sigma_{\Delta r}^2 \ll \frac{L}{2}$ , дисперсия оценки угла прихода  $\Theta_0$  будет [4, 5]:

$$\sigma_{\Theta}^2 = \frac{\sigma_{\Delta r}^2}{L^2 \sin^2 \Theta_0}. \quad (5)$$

Предположим, что на вход измерителя времени прихода поступает аддитивная смесь гауссовского белого шума со спектральной плотностью  $N_0$  и сигнала  $\dot{A}(t)$ . Если для оценки времени прихода используются два приемника максимального правдоподобия, то дисперсия разности хода определится как  $\sigma_{\Delta r}^2 = 2c^2 \sigma_t^2$ , а дисперсия оценки угла прихода сигнала  $\dot{A}(t)$  будет [6]:

$$\sigma_{\Theta}^2 = \frac{2\dot{n}^2 \sigma_t^2}{L^2 \sin^2 \Theta_0}. \quad (6)$$

Принимаемый сигнал  $\dot{A}(t)$  может быть представлен в виде:

$$\dot{A}(t) = E_0 f(t/\tau_{\epsilon}), \quad (7)$$

где  $E_0$  – нормировочный множитель;  $f(t/\tau_{\epsilon})$  – функция, описывающая форму принимаемого сиг-

нала длительностью  $\tau_n$ .

Подставляя выражение (7) в (2) после дифференцирования получим формулу для дисперсии оценки времени прихода сигнала бортовых радиолокационных станций (БРЛС):

$$\sigma_t^2 = \frac{\tau_{\epsilon}^2}{q^2 \Delta^2} \tag{8}$$

Выражение (8), как и выражение (2), зависит от квадрата первой производной от формы принимаемого сигнала, определяемой величиной  $\Delta^2$ .

Подставляя (8) в (5) и учитывая, что  $\sigma_{\Delta r}^2 = 2c^2 \sigma_t^2$ , получим дисперсию оценки разности хода при приеме одиночного сигнала, излучаемого БРЛС:

$$\sigma_{\Delta r}^2 = \frac{2(c\tau_{\epsilon})^2}{q^2 \Delta^2} \tag{9}$$

дисперсию оценки дальности:

$$\sigma_{r_0}^2 = \frac{c^2}{4} \sigma_t^2 = \frac{(c\tau_{\epsilon})^2}{4q^2 \Delta^2} \tag{10}$$

и дисперсию оценки угла места объекта:

$$\sigma_{\Theta}^2 = 2 \left( \frac{\tilde{n}\tau_{\epsilon}}{L} \right)^2 \frac{1}{q^2 \Delta^2 \sin^2 \Theta_0} \tag{11}$$

На рис. 2 представлена зависимость СКО измерения дальности до цели для диапазона длительностей типовых сигналов БРЛС для отношения сигнал/шум  $q=10$  (кривая 1),  $q=20$  (кривая 2),  $q=30$  (кривая 3),  $q=40$  (кривая 4),  $q=50$  (кривая 5). При этом предполагается, что поскольку форма принимаемого сигнала не зависит от координат расположения ВЦ, то  $\Delta = 1$ .

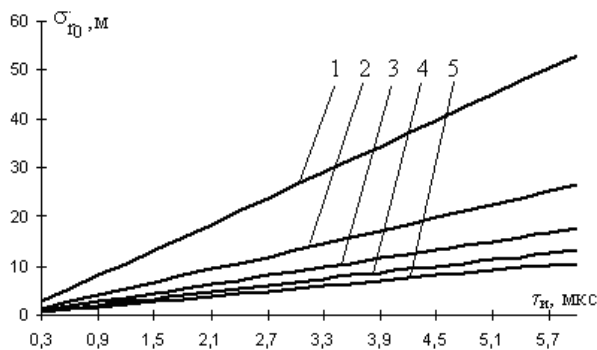


Рис. 2. Зависимость СКО измерения дальности до цели от длительности импульса БРЛС для различных соотношений сигнал/шум

Из анализа рис. 2 следует, что с увеличением длительности сигнала, СКО измерения дальности увеличивается при неизменном отношении сигнал/шум и уменьшается при увеличении этого соотношения. Например, при  $\tau_n=2$  мкс СКО  $\sigma_{r_0}=15$  м ( $q=10$ );  $\sigma_{r_0}=9$  м ( $q=20$ );  $\sigma_{r_0}=6$  м ( $q=30$ );  $\sigma_{r_0}=4$  м ( $q=40$ );  $\sigma_{r_0}=3$  м ( $q=50$ ). Это говорит о том, что существенное увеличение отношения сигнал/шум не приводит к

значительному увеличению точности измерений.

На рис. 3 представлена зависимость СКО измерения угла места в зависимости от углового положения ВЦ при  $q=20$ , базе  $L=2000$  м: кривая 1 соответствует углу места  $\Theta_0=15^\circ$ , кривая 2 –  $\Theta_0=30^\circ$ , кривая 3 –  $\Theta_0=45^\circ$ , кривая 4 –  $\Theta_0=60^\circ$ .

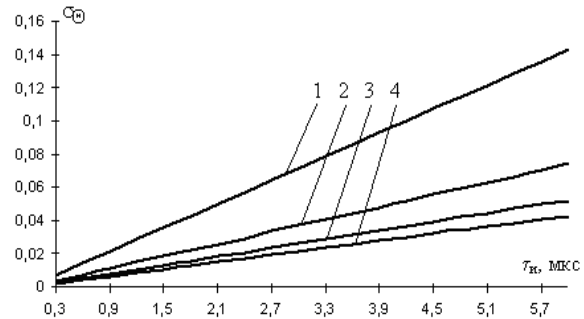


Рис. 3. Зависимость СКО измерения угла места ВЦ от длительности импульса БРЛС для различных углов места ВЦ

Из анализа рис. 3 следует, что с увеличением длительности принимаемого сигнала СКО измерения угла места увеличивается, а при увеличении угла места ВЦ уменьшается.

**СКО измерения пространственных координат ВЦ при приеме последовательности сигналов от БРЛС.** Известно [7], что в случае узкополосного сигнала точность оценки направления угла прихода сигнала зависит от отношения длины волны к базе измерителя – чем это отношение меньше, тем выше точность оценки.

Для обеспечения высокой точности оценки времени прихода сигнала, с целью увеличения соотношения сигнал/шум, целесообразно обрабатывать последовательность сигналов излучаемых БРЛС. При этом предполагается, что задача идентификации наблюдаемой цели уже решена и все измерители времени прихода сигналов работают по одной цели:

$$\hat{A}_N(t) = \sum_{i=1}^N \hat{A}(t - kT_n) \tag{12}$$

где  $T_n$  – период повторения.

При обработке последовательности (12) из  $N$  сигналов с известным периодом повторения  $T_n$  дисперсия оценки максимального правдоподобия времени прихода уменьшается в  $N$  раз по сравнению с дисперсией оценки времени прихода одиночного сигнала [8]. В силу этого, при приеме пачки сигналов уменьшатся также дисперсия оценок разности хода и угла прихода.

Кроме времени прихода у сигналов и их последовательностей (12) могут быть неизвестны некоторые другие параметры, в оценке которых нет необходимости при определении координат ВЦ. В случае, если неизвестен период повторения  $T_n$ , в соот-

ветствии с принципом максимального правдоподобия для получения оценки времени прихода последовательности (12) надо значение неизвестного параметра заменить на его максимально правдоподобную оценку. Последнее равносильно совместному оцениванию времени прихода и периода повторения с последующим использованием только оценки времени прихода. Следовательно, незнание периода повторения может вызвать определенные трудности при аппаратной реализации алгоритма оценки времени прихода.

В [9] для медленно флюктуирующей последовательности получены выражения для совместно эффективных оценок временного положения  $\sigma_{\tau_i}^2$  и периода следования импульсов последовательности  $\sigma_{\Theta_i}^2$  с помощью формулы Фробениуса:

$$\sigma_{\tau_i}^2 = \sigma_{\tau}^2 \frac{N^2 - 1 + 12[\alpha + (N-1)/2]^2}{N(N^2 - 1)}; \quad (13)$$

$$\sigma_{\Theta_i}^2 = \frac{12\sigma_{\tau}^2}{N(N^2 - 1)},$$

где  $\alpha$  – параметр, определяющий импульс последовательности, с которым связано его временное положение;  $N$  – количество сигналов в пачке.

Полагая  $\alpha=0$ , т.е. задавая временное положение первого импульса, выражение (2.16) преобразуется к виду:

$$\sigma_{\tau_i}^2 = \frac{\sigma_{\tau}^2}{N} \left(1 + 3 \frac{N-1}{N+1}\right). \quad (14)$$

Подставляя (14) в формулу (10) и (11), найдем дисперсии оценок дальности и угла места соответственно:

$$\sigma_{r_0(N)}^2 = \frac{(c\tau_{\Theta})^2}{4q^2\Delta^2N} \left(1 + 3 \frac{N-1}{N+1}\right); \quad (15)$$

$$\sigma_{\Theta(N)}^2 = \frac{2\left(\frac{c\tau_{\Theta}}{L}\right)^2 \left(1 + 3 \frac{N-1}{N+1}\right)}{q^2\Delta^2N \sin^2 \Theta_0}. \quad (16)$$

Из сопоставления выражений (10) и (15), (11) и (16) можно оценить проигрыш в определении точности оценок дальности и угла места при неизвестном периоде повторения последовательности (12):

$$\psi = \left(1 + 3 \frac{N-1}{N+1}\right) / N. \quad (17)$$

На рис. 4 представлен проигрыш в определении точности оценок дальности и угла места при использовании пачки сигналов с неизвестным периодом повторения.

В соответствии с (17) дополнительный проигрыш в точности определения дальности и угла места изменяется от  $\psi = 1,5$  при  $N=2$  до  $\psi = 1$  при

$N \gg 1$ . Так, при последовательности в 10 – 15 сигналов, незнание периода повторения приводит к увеличению дисперсии оценки дальности и угла места примерно в 1,2 раза.

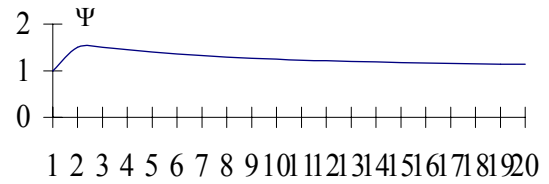


Рис. 4. Проигрыш в определении точности оценок дальности и угла места при использовании пачки сигналов с неизвестным периодом повторения

На рис. 5 представлена зависимость СКО измерения дальности до цели для диапазона длительностей типовых сигналов БРЛС при неизвестном периоде повторения для отношения сигнал/шум  $q=10$  (кривая 1),  $q=20$  (кривая 2),  $q=30$  (кривая 3),  $q=40$  (кривая 4),  $q=50$  (кривая 5), во всех случаях  $N=10$ . При этом предполагается, что поскольку форма принимаемого сигнала не зависит от координат расположения ВЦ, то  $\Delta=1$ .

Из анализа рис. 5 следует, что с увеличением длительности сигнала, СКО измерения дальности увеличивается при неизменном отношении сигнал/шум и уменьшается вследствие приема пачки сигналов. Например, при  $\tau_{\text{и}}=2$  мкс СКО  $\sigma_{r_0}=28$  м ( $q=10$ );  $\sigma_{r_0}=16$  м ( $q=20$ );  $\sigma_{r_0}=9$  м ( $q=30$ );  $\sigma_{r_0}=5$  м ( $q=40$ );  $\sigma_{r_0}=4$  м ( $q=50$ ). Из сопоставления рис. 2 и 5 следует, что ошибка измерения дальности увеличивается в 1,2...1,5 раза при использовании пачки сигналов с неизвестным периодом повторения.

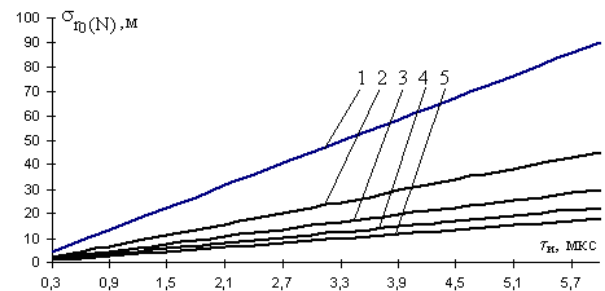


Рис. 5. Зависимость СКО измерения дальности до ВЦ от длительности импульса БРЛС для различных соотношений сигнал/шум при неизвестном периоде повторения

На рис. 6 представлена зависимость СКО измерения угла места в зависимости от углового положения ВЦ при  $q=20$ , базе  $L=2000$  м,  $N=10$ : кривая 1 соответствует углу места  $\Theta_0=15^\circ$ , кривая 2 –  $\Theta_0=30^\circ$ , кривая 3 –  $\Theta_0=45^\circ$ , кривая 4 –  $\Theta_0=60^\circ$ .

Из анализа рис. 6 следует, что ошибка измерения угла места уменьшается при приеме пачки сигналов. Отметим, что предложенный метод позволяет

определить точность измерения координат для любых видов принимаемых сигналов.

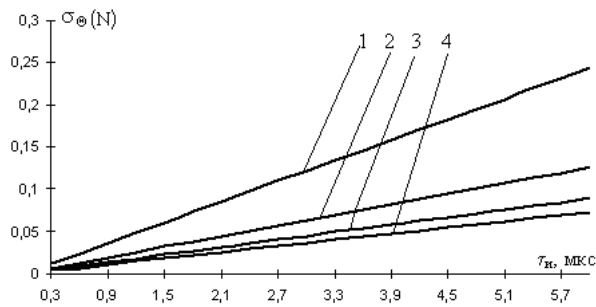


Рис. 6. Залежність СКО измерения угла места ВЦ от длительности импульса БРЛС для различных углов места ВЦ при неизвестном периоде повторения

### Выводы

В результате расчетов, проведенных в статье, получены зависимости для определения СКО измерения пространственных координат ВЦ при разно-стно-дальномерном методе пассивной радиолокации.

1. С увеличением длительности сигнала СКО измерения дальности увеличивается при неизменном отношении сигнал/шум и уменьшается при увеличении этого соотношения. Так, при  $\tau_{п}=2$  мкс СКО  $\sigma_{r0}=15$  м ( $q=10$ );  $\sigma_{r0}=9$  м ( $q=20$ );  $\sigma_{r0}=6$  м ( $q=30$ );  $\sigma_{r0}=4$  м ( $q=40$ );  $\sigma_{r0}=3$  м ( $q=50$ ).

2. При неизвестном периоде повторения импульсов принимаемой последовательности проигрыш в точности определения дальности и угла места изменяется от  $\psi=1,5$  при  $N=2$  до  $\psi=1$  при  $N \gg 1$ . Так, при последовательности в 10 – 15 сигналов, незнание периода повторения приводит к увеличению дисперсии оценки дальности и угла места примерно в 1,2 раза.

### Список литературы

1. Куценко В.В. Методика обеспечения требуемой точности определения координат цели в подвижной системе пассивной радиолокации зенитных комплексов ближнего действия / В.В. Куценко, О.Л. Смирнов, А.А. Наконечный // Зб. наук. пр. Харківського університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба. – Х.: ХУПС, 2005. – Вып. 2(2). – С. 54 – 59.
2. Куценко В.В. Система пассивной радиолокации при выявлении та супроводженні повітряних об'єктів у режимі радіомовчання / В.В. Куценко // Зб. наук. пр. Харківського військового університету. – Х.: ХВУ, 2004. – Вып. 2(48). – С. 83-87.
3. Бартон Д. Справочник по радиолокационным измерениям. / Д. Бартон, Г. Вард. – М.: Сов. радио, 1976. – 392 с.
4. Расчет и проектирование антенн сверхвысоких частот: пособие по дипломному и курсовому проектированию / Я.С. Шифрин, Ю.Г. Гукасов, Л.Г. Корниенко, П.А. Базарнов; под ред. Я.С. Шифрина. – Х.: ВИРТА ПВО, 1971. – 285 с.
5. Сосулин Ю.Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации / Ю.Г. Сосулин. – М.: Радио и связь, 1992. – 480 с.
6. Куликов Е.И. Оценка параметров сигнала на фоне помех / Е.И. Куликов, А.П. Трифонов. – М.: Сов. радио, 1978. – 317 с.
7. Кондратьев В.С. Многопозиционные радиотехнические системы / В.С. Кондратьев, А.В. Котов, Л.Н. Марков. – М.: Радио и связь, 1986. – 249 с.
8. Радзиевский В.Г. Эффективность определения местоположения источника сверхширокополосного сигнала / В.Г. Радзиевский, П.А. Трифонов // Радиотехника. – 2000. – № 6. – С. 39-42.
9. Трифонов А.П. Эффективность совместной оценки временного положения и периода следования импульсов при наличии неинформативных параметров / А.П. Трифонов, М.Б. Беспалова // Радиотехника и электроника. – 1992. – № 6. – С. 1014-1023.

Поступила в редколлегию 8.11.2011

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

### АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ КООРДИНАТ ПОВІТРЯНИХ ЦІЛЕЙ ПРИ РІЗНИЦЕВО-ДАЛЕКОМІРНОМУ МЕТОДІ ПАСИВНОЇ РАДІОЛОКАЦІЇ

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

У роботі проаналізовані помилки виміру просторових координат повітряної цілі, виявлених за допомогою різницево-далекомірного методу пасивної радіолокації; отримані залежності для визначення середньоквадратичної помилки виміру просторових координат повітряної цілі при різницево-далекомірному методі пасивної радіолокації при прийомі одиночних сигналів і послідовності сигналів від бортових радіолокаційних станцій.

**Ключові слова:** пасивна радіолокація, різницево-далекомірний метод, зенітний комплекс ближньої дії.

### ANALYSIS OF AIR AIMS MEASURING COORDINATES ACCURACY AT DIFFERENT-RANGE-FINDER METHOD OF PASSIVE RADIO-LOCATION

G.V. Yermakov, V.V. Kucenko, S.M. Telyukov

The errors of air aims spatial coordinates measuring were analyzed, which define through the different-range-finder method of passive radio-location; dependences are got for determination of middle quadratic error of air aims spatial coordinates measuring at the different-range-finder method of passive radio-location at the reception of single-count and sequence.

**Keywords:** a passive radar-location, different-range-finder method, a missile system of near action.