

УДК 621.311.22

**Е.К. Поздняков**

Институт прикладной математики и механики НАНУ

E-mail: us\_work@bk.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ МЕТОДА  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ В МНОГОПОЗИЦИОННЫХ ПАССИВНЫХ  
СИСТЕМАХ ПРИ ПОМОЩИ ФУНКЦИЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ**

*Выполнен анализ входных параметров метода определения дальности до источников радиоизлучения (ИРИ) в многопозиционных пассивных комплексах с использованием функций параметрической чувствительности. Приведено обоснование математического аппарата для определения семейств коэффициентов чувствительности, на основе которого получены аналитические выражения и проведен расчет семейств коэффициентов чувствительности для экспериментальной трассы. Показан характерный вид семейств коэффициентов чувствительности для рассматриваемого метода определения дальности до ИРИ.*

**Ключевые слова:** радиолокационная станция, источник радиоизлучения, входные параметры, функция чувствительности, относительная погрешность.

**Общая постановка проблемы**

Точность определения положения цели в пространстве является важнейшим критерием качества работы многопозиционных пассивных комплексов (МПК). В современных МПК широко используются два основных метода измерения координат: триангуляционный метод и разностно-дальномерный метод (РДМ). Данные методы являются известными, широко используемыми в пассивных системах, однако они имеют недостатки, описанные в [1, 2, 3]. Поэтому, разработка методов увеличения точности определения координат ИРИ является актуальной задачей современной радиолокации.

**Анализ последних исследований и публикаций**

С целью повышения точности вычисления координат, а также времени наблюдения за целью, был разработан метод определения дальности ИРИ, основанный на измерении периода вращения антенно-фидерной системы радиолокационной станции (АФС РЛС). Подробно данный метод описан в [4, 5]. Преимуществом метода является более высокая точность в сравнении с триангуляционным методом, поскольку уменьшено влияние погрешности определения пеленга на итоговый результат. Вторым важным преимуществом в сравнении с РДМ является возможность определения дальности ИРИ при облучении только двух станций комплекса. Возникает

Для применения данного метода необходимо оценить влияние погрешностей входных параметров метода на погрешность результата. Данный анализ можно провести с использованием теории параметрической чувствительности. Применение функций чувствительности позволяет сформулировать рекомендации касательно требуемой точности входных параметров и определить принципиальную возможность применения метода в измерительной системе МПК.

**Постановка задач исследования**

Целью данной работы является:

1. Обоснование математического аппарата функций параметрической чувствительности для метода определения дальности до ИРИ.
2. Исследование входных параметров метода определения дальности до ИРИ с помощью функций параметрической чувствительности.

### Сущность метода определения дальности до ИРИ

Геометрия расположения двух станций комплекса и ИРИ показана на рисунке 1.

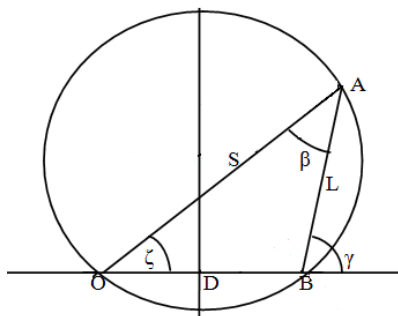


Рисунок 1 - Геометрия расположения станций комплекса и ИРИ

На рисунке 1 приняты следующие обозначения: O – положение левой станции комплекса; B – положение правой станции комплекса; A – положение ИРИ с вращающейся АФС;  $\gamma$  – угловое направление на РЛС из точки B;  $\zeta$  – угловое направление на РЛС из точки O; L – расстояние между правой станцией и РЛС; S – расстояние между левой станцией и РЛС;  $OB = d$  – расстояние (база) между станциями комплекса;  $\beta$  – угол под которым видны станции комплекса из точки стояния РЛС;

Из рисунка 1 следуют следующие соотношения:

$$S = \frac{d}{\sin \beta} \cdot \sin \gamma = \frac{d}{\sin \beta} \cdot \sin(\zeta + \beta), \quad (1)$$

$$L = \frac{d}{\sin \beta} \cdot \sin \zeta = \frac{d}{\sin \beta} \cdot \sin(\gamma - \beta), \quad (2)$$

Выражения (1)-(2) позволяют в полярной системе координат при известных  $\gamma$ ,  $\zeta$  и  $\beta$  рассчитать дальность от станций комплекса до ИРИ. Углы  $\gamma$  и  $\zeta$  измеряются станциями комплекса. Значение угла  $\beta$  можно рассчитать, измерив, период вращения АФС РЛС ( $T_C$ ) и разницу времени прихода сигнала на станции комплекса ( $\Delta t$ ) за счет вращения АФС РЛС, по следующей формуле:

$$\beta = \frac{\Delta t}{T_C} \cdot 2\pi. \quad (3)$$

Очевидно, что для данного метода погрешность определения координат в значительной степени зависит от точности измерения угла  $\beta$ , которая определяется точностью измерения временных параметров  $T_C$  и  $\Delta t$ .

В условиях дальнего тропосферного распространения радиоволн точное измерение временных параметров  $T_C$ , и  $\Delta t$  является достаточно сложной задачей. Сложность обусловлена существенными искажениями, которым подвергается сигнал в процессе прохождения через тропосферу [6, 7]. Искажениям подвергаются форма и длительность импульса, амплитуда и период повторения [8].

Поэтому представляется важной задача исследования влияния погрешностей входных параметров на погрешность результата метода. Данный анализ позволит определить требуемую точность определения входных параметров метода.

#### Построение и анализ функций чувствительности.

Из (1)-(3) окончательно получаем следующее соотношение для дальности L:

$$L = \frac{d}{\sin(2\pi \cdot \frac{\Delta t}{T})} \cdot \sin(\gamma - 2\pi \cdot \frac{\Delta t}{T}). \quad (4)$$

Таким образом, точность определения дальности  $L$  зависит от точности измерения четырех параметров:  $d$ ,  $\gamma$ ,  $\Delta t$ ,  $T$ . Запишем вектор параметров  $p$  в общем виде [9]:

$$p^T = \{d, \gamma, \Delta t, T\}$$

Дальность  $L$  до ИРИ вычисляется по формуле (4). При условии точного определения всех параметров вектора  $p_0$ , получим точное значение дальности  $L_0$ . Необходимо оценить погрешность определения положения ИРИ при ошибочных величинах компонентов вектора  $p$ . С этой целью разложим величину  $L$  в ряд Тейлора в окрестности точного значения дальности ИРИ  $L_0$ , ограничиваясь его линейной частью. В общем случае дальность  $L$  до ИРИ получит соответствующее приращение в связи с ошибками измерения параметров, а именно:

$$L(p_0 + \Delta p) = L(p_0) + \sum_{j=1}^4 \frac{\partial L}{\partial p_j} \Delta p_j,$$

Величина смещения значения дальности ИРИ  $\Delta L$ , обусловленная измерением компонентов вектора параметров  $p$  с некоторой погрешностью  $\Delta$ , определяется через коэффициенты чувствительности следующими соотношениями:

$$\Delta L(d_0 + \Delta d) = \left. \frac{\partial L}{\partial d} \right|_{d=d_0} \cdot (\Delta d), \quad (5)$$

$$\Delta L(\gamma_0 + \Delta \gamma) = \left. \frac{\partial L}{\partial \gamma} \right|_{\gamma=\gamma_0} \cdot (\Delta \gamma), \quad (6)$$

$$\Delta L(\Delta t_0 + \Delta t_\Delta) = \left. \frac{\partial L}{\partial \Delta t} \right|_{\Delta t=\Delta t_0} \cdot (\Delta t_\Delta), \quad (7)$$

$$\Delta L(T_0 + \Delta T) = \left. \frac{\partial L}{\partial T} \right|_{T=T_0} \cdot (\Delta T). \quad (8)$$

Соотношения (5)-(8) содержат величины ошибок определения дальности до ИРИ, которые пропорциональны величине ошибок измерений соответствующих параметров, входящих в вектор  $p$ . Коэффициентами пропорциональности являются значения функции чувствительности дальности  $L$  к изменению компонентов вектора  $p$ , представляющие собой частные производные [10]. Исследование свойств функций параметрической чувствительности в задаче определения дальности ИРИ в воздушном пространстве, контролируемом станциями пассивной локации, представляет интерес для определения таких оптимальных значений входных параметров, при которых влияние параметрической погрешности на итоговую погрешность определения дальности будет минимальным. Важно также определить суммарную погрешность конечного результата метода.

Исходя из соотношений (5)-(8) запишем соответствующие формулы влияния погрешности входных параметров на определение абсолютной ошибки дальности до ИРИ с использованием функции чувствительности.

Дифференцируя соотношение (4) по компонентам вектора параметров  $p$ , получим аналитические выражения для вычисления значений коэффициентов чувствительности в виде функции других параметров:

$$\left. \frac{\partial L}{\partial d} \right|_{d=d_0} = \frac{\sin(\gamma - \frac{2\pi \cdot \Delta t}{T})}{\sin(\frac{2\pi \cdot \Delta t}{T})}, \quad (9)$$

$$\left. \frac{\partial L}{\partial \gamma} \right|_{\gamma = \gamma_0} = d \cdot \frac{\cos(\gamma - \frac{2\pi \cdot \Delta t}{T})}{\sin(\frac{2\pi \cdot \Delta t}{T})}, \quad (10)$$

$$\left. \frac{\partial L}{\partial \Delta t} \right|_{\Delta t = \Delta t_0} = -\frac{2\pi \cdot d \cdot \cos(\gamma - \frac{2\pi \cdot \Delta t}{T})}{T \cdot \sin(\frac{2\pi \cdot \Delta t}{T})} - \frac{2\pi \cdot d \cdot \cos(\frac{2\pi \cdot \Delta t}{T}) \cdot \sin(\gamma - \frac{2\pi \cdot \Delta t}{T})}{T \cdot \sin(\frac{2\pi \cdot \Delta t}{T})^2}, \quad (11)$$

$$\left. \frac{\partial L}{\partial T} \right|_{T = T_0} = \frac{2\pi \cdot d \cdot \Delta t \cdot \cos(\gamma - \frac{2\pi \cdot \Delta t}{T})}{T^2 \cdot \sin(\frac{2\pi \cdot \Delta t}{T})} + \frac{2\pi \cdot d \cdot \Delta t \cdot \cos(\frac{2\pi \cdot \Delta t}{T}) \cdot \sin(\gamma - \frac{2\pi \cdot \Delta t}{T})}{T^2 \cdot \sin(\frac{2\pi \cdot \Delta t}{T})^2}. \quad (12)$$

Соотношения (9)-(12) позволяют построить и исследовать графики изменения коэффициентов чувствительности при разных параметрах, определить области значений компонентов вектора  $p$ , где коэффициенты чувствительности минимальны.

Таким образом коэффициент чувствительности описывает влияние погрешности входного параметра на погрешность результата. Очевидно, что чем меньше коэффициент чувствительности, тем меньше итоговая погрешность при одинаковой погрешности входных параметров.

Покажем некоторые характерные семейства коэффициентов чувствительности при разных значениях входных параметров и произведем первичный анализ полученных зависимостей.

На рисунке 2 приведено семейство по параметру  $T$  зависимостей коэффициента  $\partial L / \partial d$  при изменении угла  $\gamma$ .

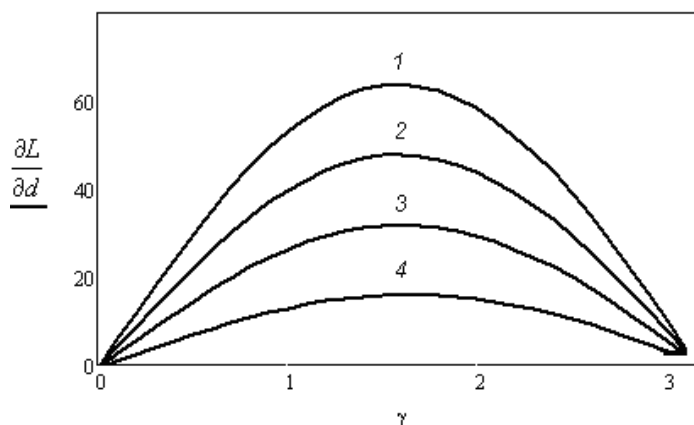


Рисунок 2 - Семейство по параметру  $T = \text{const}$  зависимостей коэффициентов чувствительности дальности  $L$  к базе  $d$  при изменении угла пеленга  $\gamma$

На рисунке 2 приняты следующие условные обозначения: 1 -  $T=20$ , 2 -  $T=15$ , 3 -  $T=10$ , 4 -  $T=5$ .

В соответствии с (9), зависимости, представленные на рисунке 2, изменяются по синусоидальному закону и достигают максимума при значениях  $\gamma = \pi/2$ . Увеличение периода  $T$  также ведет к увеличению коэффициента чувствительности.

На рисунке 3 приведено семейство по параметру  $T$  зависимостей коэффициента  $\partial L / \partial \Delta t$  при изменении времени задержки  $\Delta t$ .

На рисунке 3 приняты следующие условные обозначения: 1 -  $T=5$ , 2 -  $T=10$ , 3 -  $T=20$ .

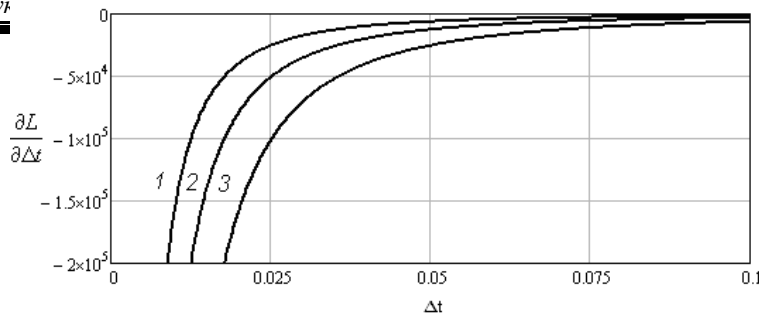


Рисунок 3 Семейство по параметру  $T=\text{const}$  зависимостей коэффициента чувствительности дальности  $L$  к  $\Delta t$  при изменении времени задержки  $\Delta t$

Как следует из рисунка 3, при увеличении значений  $\Delta t$ , зависимость стремительно затухает, образуя область значений  $\Delta t$ , в которой погрешность определения временной задержки не окажет серьезного влияния на погрешность определения дальности ИРИ.

На рисунке 4 приведено семейство по параметру  $\gamma$  характерных зависимостей коэффициентов чувствительности  $\partial L / \partial T$  при вариации значений базы  $d$ .

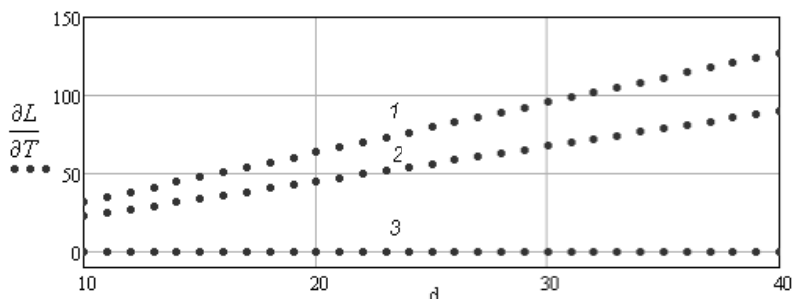


Рисунок 4 Семейство по параметру  $\gamma=\text{const}$  зависимостей коэффициентов чувствительности дальности  $L$  к периоду  $T$  при изменении базы  $d$

На рисунке 4 приняты следующие условные обозначения: 1 -  $\gamma=\pi/2$ , 2 -  $\gamma=\pi/4$ , 3 -  $\gamma=\pi$ .

**Пример использования коэффициентов чувствительности**

Покажем, как можно использовать коэффициенты чувствительности на примере анализа трассы источника радиоизлучения (ИРИ). Возьмем некоторую произвольную трассу ИРИ и определим коэффициенты чувствительности в разных точках пространства на дальностях  $L$ . Значение базы  $d=20\text{км}$ , период вращения АФС РЛС  $T=3\text{с}$ . В соответствии с формулами (9)-(12), вычислим соответствующие значения коэффициентов чувствительности в точках рассматриваемой трассы. Результаты вычислений сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты вычисления коэффициентов чувствительности на различных дальностях

№ п/п	Дальность $L$ , км	$\Delta t$ , с	$\gamma$ , град.	$\frac{\partial L}{\partial d}$	$\frac{\partial L}{\partial \Delta t}$ , км/с	$\frac{\partial L}{\partial T}$ , км/с	$\frac{\partial L}{\partial \gamma}$ , км/рад.
1	91	0,075	55	4,60	$-1,402 \cdot 10^3$	35,05	88,81
2	199	0,042	65	9,94	$-4,998 \cdot 10^3$	69,41	114,0
3	226	0,038	67	11	$-6,167 \cdot 10^3$	77	125,5
4	351	0,025	70	17,5	$-14,37 \cdot 10^3$	119	149,3
5	434	0,021	74	21,7	$-21,16 \cdot 10^3$	146,9	145,5
6	548	0,017	75	27,4	$-33,22 \cdot 10^3$	185,5	167,55

Как следует из таблицы 1, значения коэффициентов чувствительности  $\partial L / \partial d$  существенно ниже значений коэффициентов чувствительности к другим параметрам. Погрешность определения величины базы  $d$  в современных технических средствах также незначительна, поэтому влиянием погрешности определения величины базы можно пренебречь. С учетом этого, абсолютную погрешность результата вычисления дальности по методу АФС РЛС на основе коэффициентов чувствительности можно записать как:

$$\Delta L = \frac{\partial L}{\partial T} \cdot \Delta T + \frac{\partial L}{\partial \Delta t} \cdot t_{\Delta t} + \frac{\partial L}{\partial \gamma} \cdot \Delta \gamma, \quad (13)$$

где  $\frac{\partial L}{\partial T}$ ,  $\frac{\partial L}{\partial \Delta t}$ ,  $\frac{\partial L}{\partial \gamma}$  - коэффициенты чувствительности,  $\Delta T$ ,  $t_{\Delta t}$ ,  $\Delta \gamma$  - абсолютные погрешности измерений входных параметров.

Наиболее важным параметром, характеризующим качество работы пассивной системы локации, является отношение погрешности к дальности или относительная погрешность измерения  $\delta$ , которую можно определить по формуле:

$$\delta = \frac{\Delta L}{L}, \quad (14)$$

где  $\Delta L$  - абсолютная погрешность измерения дальности,  $L$  - дальность до цели.

Предположим, что относительная погрешность  $\delta$  определения входных параметров метода не должна превышать 1%. Рассчитаем значения абсолютной и относительной погрешности определения дальности в соответствии с формулами (13)-(14).

Таблица 2 – Относительная и абсолютная погрешности результатов метода на различных дальностях до ИРИ

№, п/п	1	2	3	4	5	6
L, км	91	199	226	351	434	548
$\Delta L$ , км	2,95	5,5	6	9	10,5	13,2
$\delta$ , %	3,2	2,75	2,68	2,56	2,46	2,42

Как следует из таблицы 1, значения коэффициентов чувствительности  $\frac{\partial L}{\partial \Delta t}$ ,  $\frac{\partial L}{\partial T}$ ,  $\frac{\partial L}{\partial \gamma}$  растут с увеличением дальности  $L$ , что ведет к росту абсолютной погрешности  $\Delta L$  определения дальности в таблице 2

Таким образом, используя коэффициенты чувствительности можно оценить влияние погрешности входных параметров метода на погрешность результата.

### Выводы

В данной статье произведено исследование входных параметров метода определения дальности ИРИ на основе вращения АФС РЛС при помощи функций параметрической чувствительности. Обоснован математический аппарата функций параметрической чувствительности, получены практические формулы для расчета коэффициентов чувствительности входных параметров предложенного метода определения дальности до ИРИ. Показано, что коэффициенты чувствительности являются эффективным средством, позволяющим описывать зависимость погрешности результатов метода от погрешности входных параметров. Коэффициенты чувствительности могут применяться в различных информационных системах для определения оптимальных входных параметров с точки зрения уменьшения влияние входных погрешностей на результат.

### Список использованной литературы

1. Казаринов Ю.М. Радиотехнические системы: Учеб. для вузов по спец. / Гришин Ю.П., Ипатов В.П., Казаринов Ю.М. и др. Под ред. Казаринова Ю.М. - М.: Высш. шк., 1990. - 496 с.
2. Сайбель А.Г. Основы теории точности радиотехнических методов местоопределения / Сайбель А.Г. - М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1958. - 54с.
3. Башков Е.А. Методы и средства идентификации источников радиоизлучения / Башков Е.А., Воронцов А.Г., Гришко Н.М. и др. под ред. проф. Зори А.А. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2010. – 344 с.
4. Поздняков Е.К. Алгоритм расчета координат цели на основе измерения периода вращения РЛС / Поздняков Е.К., Пантеев Р.Л., Коротков В.В., Ткаченко В.Н. // Материалы 16-го международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». – Харьков, 2012. – Т. 3. - С. 134-135.
5. Ткаченко В.Н. Повышение точности определения координат ИРИ пассивными системами при помощи измерения периода вращения АФС РЛС / Ткаченко В.Н., Коротков В.В, Поздняков Е.К. // Сборник статей «Радиотехника». – 2012. - №170. – С. 162-169.
6. Арманд Н.А. Дальнее тропосферное распространение ультракоротких радиоволн / Арманд Н.А., Введенский Б.А., Гусятинский И.А. и др. – М.: Сов. радио, 1965. - 415 с.
7. Гусятинский И.А. Дальняя тропосферная радиосвязь / Гусятинский И.А., Немировский А.С., Соколов А.В., Троицкий В.Н. – М: Связь, 1968. - 248 с.
8. Арсеньян Т.И. Распространение электромагнитных волн в тропосфере: Учеб. пособие / Арсеньян Т.И. - Томск: ТУСУР, 2006. - 170 с.
9. Розенвассер Е.Н. Чувствительность систем управления / Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М. - М.: Наука, 1981.- 208 с.
10. Томович Р. Общая теория чувствительности / Томович Р., Вукобратович М. - М.: Советское радио, 1972. – 235 с.

### References

1. Grishin, U.M., Ipatov, V.P. and Kazarynov, U.M. (1990), *Radiotekhnicheskie sistemy* [Radio systems], in Kazarynov, U.M. (ed.), *Vysshaja shkola*, Moscow, Russia.
2. Sajbel', A.G. (1958) *Osnovy teorii tochnosti radiotekhnicheskikh metodov mestoopredelenija* [Fundamentals of the precision's theory of the radio position determination's methods], Gosudarstvennoe izdatel'stvo oboronnoj promyshlennosti, Moscow, Russia.
3. Bashkov, E.A., Voroncov, A.G., Grishko, N.M. and others (2010) *Metody i sredstva identifikacii istochnikov radioizlucheniya* [Methods and tools for the sources of radio emission identifying], in Zori A.A. (ed.), GVUZ «DonNTU», Donetsk, Ukraine.
4. Pozdnyakov, E.K., Panteev, R.L., Korotkov, V.V. and Tkachenko, V.N. (2012) “Algorithm of the radio source position determination based on the calculation of radar rotation period”, *Proceedings of the 16-th international youth forum «Radioelectronics and youth in XXI age»*, Kharkiv, 2012 vol. 3, pp. 134-135.
5. Tkachenko, V.N., Korotkov, V.V and Pozdnyakov, E.K. (2012) “Increasing accuracy of the radio sources coordinates determination in the passive systems with help of the radar rotation period measuring” *Radiotechnics*, vol. 170, pp. 162-169.
6. Armand, N.A., Vvedenskij, B.A., Gusjatinskij, I.A. and others (1965), *Dal'nee troposfernoe rasprostranenie ul'trakorotkih radiovoln* [Far tropospheric propagation of ultrashort radio waves], Sovetskoe radio, Moscow, Russia.
7. Gusjatinskij, I.A., Nemirovskij, A.S., Sokolov, A.V. and Troickij, V.N. (1968) *Dal'nijaja troposfernaja radiosvjaz'* [Far tropospheric radio], Svjaz', Moscow, Russia.

8. Arsen'jan, T.I. (2006) *Rasprostranenie jelektromagnitnyh voln v troposphere* [The propagation of electromagnetic waves in the troposphere], TUSUR, Tomsk, Russia.
9. Rozenvasser, E.N., Jusupov, R.M. (1981) *Chuvstvitel'nost' sistem upravlenija* [Sensitivity of the control systems], Nauka, Moscow, Russia.
10. Tomovich, R., Vukobratovich, M. (1972) *Obshhaja teorija chuvstvitel'nosti* [General theory of sensitivity] Sovetskoe radio, Moscow, Russia.

Надійшла до редакції:  
08.04.2014 р.

Рецензент:  
докт. техн. наук, проф. Ткаченко В.М.

**Є.К. Поздняков**

*Інститут прикладної математики та механіки НАНУ*

**Дослідження вхідних параметрів методу визначення дальності в багатопозиційних пасивних системах за допомогою функцій чутливості.** Виконано аналіз вхідних параметрів методу визначення дальності до джерел радіовипромінювання в багатопозиційних пасивних комплексах з використанням функцій параметричної чутливості. Наведено обґрунтування математичного апарату для визначення сімейств коефіцієнтів чутливості, на основі якого отримано аналітичні вирази і проведено розрахунок сімейств коефіцієнтів чутливості для експериментальної траси. Показано характерний вигляд сімейств коефіцієнтів чутливості для розглянутого методу визначення дальності до джерел радіовипромінювання.

**Ключові слова:** радіолокаційна станція, джерело радіовипромінювання, вхідні параметри, функція чутливості, відносна похибка.

**Y.K. Pozdnyakov**

*Institute of applied mathematics and mechanics NASU*

**Research of the input parameters from the target distance determination method in the multiposition passive system by using the sensitivity function.** The main aim of this article is the analysis of the method's input parameters of the radio source's distance determination in the passive multiposition systems with the parametric sensitivity functions using. There is shown the method of the radio source's distance determination on the basis of determining the rotation period of the antenna-feeder system of the radar station, which is situated on the radio source. In this work the mathematical apparatus of the computing the sensitivity coefficients' sets is shown, which is used in definition of the analytical expressions and calculating the characteristic form of the sensitivity coefficients' sets for the experimental lane. There is shown a characteristic view of the sensitivity coefficients sets in the method of radio source distance determination. Using the obtained values of the sensitivity coefficients studied the effect of the input parameters' errors on the resulting error in the radio source distance determining. Thus, on the basis of the sensitivity coefficients the effect of the input parameters' errors on the result method accuracy is shown. Analysis of the sensitivity coefficients' sets allows making recommendations to the required accuracy of the method input parameters determination.

**Keywords:** radar station, radio source, input parameters, sensitivity function, relative error.



**Поздняков Евгений Константинович**, Украина, закончил Донецкий национальный технический университет. На данный момент - заочный аспирант ИПММ НАНУ (ул. Розы Люксембург, 74, г. Донецк, 83114, Украина), программист ПАО «СКБ РТУ» (ул. Соколиная, 1а, г. Донецк, 83012, Украина). Основное направление научной деятельности – моделирование информационных систем, средства радиотехнической разведки.