

УДК 621.396.551.553

В.Н. Ткаченко<sup>1</sup>, В.В. Коротков<sup>2</sup>, Р.Л. Пантеев<sup>2</sup><sup>1</sup> ИПММ НАН України, Донецьк<sup>2</sup> Публичное акционерное общество «СКБ РТУ», Донецьк

## АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЕ СИСТЕМЫ ПАССИВНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ И АКТИВНОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ

В статье проводится анализ точности определения координат источников излучения (ИРИ) системой «комплекс пассивного радиомониторинга – активная радиолокационная станция (РЛС)» на основе экстремальной постановки разностно-дальномерного метода (РДМ) совместно с выражениями, учитывающими данные активной радиолокационной станции. Координаты ИРИ определяются путем минимизации квадратичного функционала, что позволяет учесть информационную избыточность системы и тем самым значительно повысить точность определения координат ИРИ. Кроме того, в статье приводится схема статистического моделирования, а также анализ статистических характеристик вышеуказанной системы.

**Ключевые слова:** пассивный радиомониторинг, активная радиолокация, экстремальная постановка, квадратичный функционал, точность вычислений ИРИ, метод Монте-Карло, статистическая характеристика.

### Введение

Одним из важных критериев эффективности работы пассивных комплексов контроля радиоэлектронной обстановки, является точность определения координат источников радиоизлучения. В реальных условиях существенное влияние на точность измерения координат, при работе РДМ, оказывают погрешности измерения времени прихода сигнала на каждой из станций, входящих в состав комплекса.

При этом необходимо отметить, что погрешности измерения обусловлены многими факторами, не всегда поддающимися учёту [1 – 3].

В настоящее время перспективным направлением повышения эффективности систем противовоздушной обороны (ПВО) является объединение активных и пассивных средств радиолокации в единую систему. Совместное использование активных и пассивных средств радиолокации позволяет получить интегрированную систему, обладающую информативной избыточностью.

Для оценки влияния информативной избыточности такой системы на точность определения координат ИРИ, рассмотрим комплекс, в состав которого входят 4 пространственно-разнесенных станции С, R, L и Q и активная радиолокационная станция S (рис. 1). Для определения координат объекта в текущий момент времени комплексом пассивной радиолокации разностно-дальномерным методом, необходимо решить систему гиперболических уравнений [4].

$$D_1 = \overline{LC}; \quad D_2 = \overline{RC}; \quad D_3 = \overline{QC},$$

$$F_1 = \sqrt{(x_1 - x_1^1)^2 + (x_2 - x_2^1)^2 + (x_3 - x_3^1)^2} + D_1 - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} - \tau_1 \cdot c = 0;$$

$$F_2 = \sqrt{(x_1 - x_1^2)^2 + (x_2 - x_2^2)^2 + (x_3 - x_3^2)^2} + D_2 - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} - \tau_2 \cdot c = 0; \quad (1)$$

$$F_3 = \sqrt{(x_1 - x_1^3)^2 + (x_2 - x_2^3)^2 + (x_3 - x_3^3)^2} + D_3 - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} - \tau_3 \cdot c = 0,$$

где  $x_1, x_2, x_3$  - координаты ИРИ, рассчитываемые комплексом пассивной радиолокации,  $x_1^1, x_2^1, x_3^1$  - координаты станции L,  $x_1^2, x_2^2, x_3^2$  - координаты станции R,  $x_1^3, x_2^3, x_3^3$  - координаты станции Q,  $\tau_{1,2,3}$  - задержки времен прихода сигнала на соответствующие станции комплекса,  $c$  - скорость распространения сигнала.

Ввиду отсутствия возможности учета данных активной РЛС при нахождении координат ИРИ в системе уравнений (1), переформулируем задачу нахождения координат, заменив ее эквивалентной задачей о нахождении минимума квадратичного функционала [3], точка минимума которого будет совпадать с координатами ИРИ, определяемыми системой, состоящей из комплекса пассивной радиолокации и активной РЛС. Расположение ИРИ и активной РЛС в принятой в принятой на системе координат приведено на рис. 2.

Квадратичный функционал, оценивающий величину суммарной ошибки системы, состоящей из комплекса пассивной радиолокации и активной РЛС, можно записать в виде

$$J(x_1, x_2, x_3) = \sum_{j=1}^3 (F_j^2 + \tilde{D}_j^2), \quad (2)$$

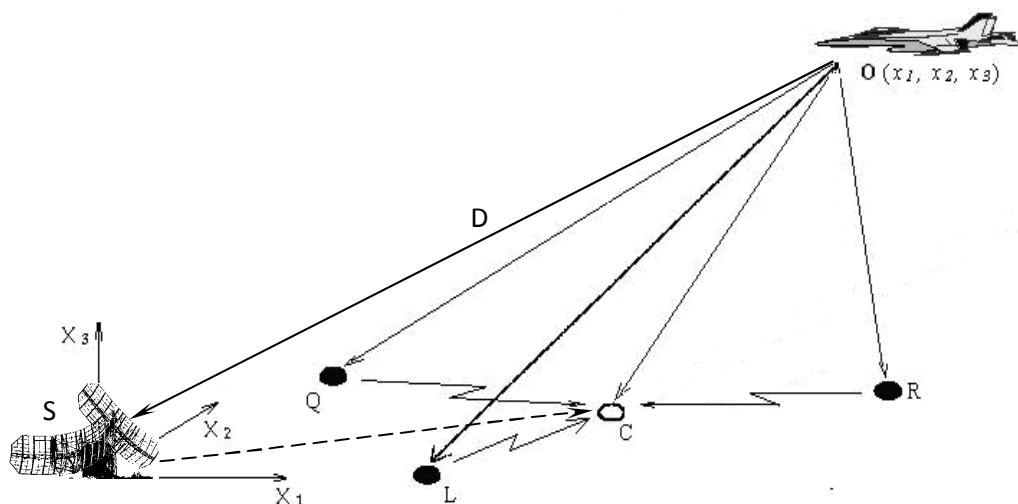


Рис. 1. Система: комплекс пассивной радиолокации – активная РЛС

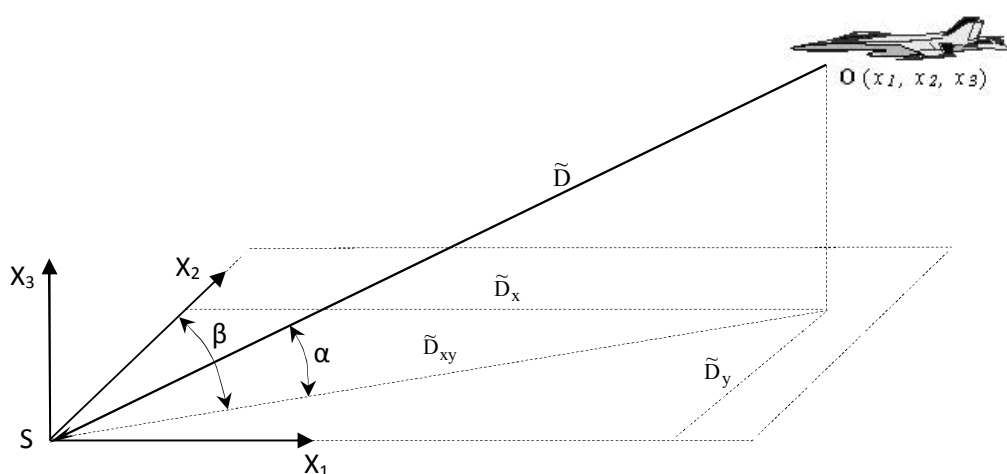


Рис. 2. Расположение ИРИ и активной РЛС в принятой системе координат.

где  $F_j = \sqrt{(x_1 - x_1^j)^2 + (x_2 - x_2^j)^2 + (x_3 - x_3^j)^2} + D_j - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} - \tau_j \cdot c;$   
 $\tilde{D}_1 = x_1 - \tilde{D} \cos \alpha \sin \beta = x_1 - \tilde{x}_1;$   
 $\tilde{D}_2 = x_2 - \tilde{D} \cos \alpha \cos \beta = x_2 - \tilde{x}_2;$   
 $\tilde{D}_3 = x_3 - \tilde{D} \sin \alpha = x_3 - \tilde{x}_3,$

при этом приняты обозначения:

$x_1^j, x_2^j, x_3^j$  - соответствующие координаты станций,

$\tilde{D}$  - дальность от ИРИ до активной РЛС, находящейся в начале координат (рис. 2).

$\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3$  - координаты ИРИ, измеренные при помощи активной РЛС.

Функционал  $J(x_1, x_2, x_3)$  состоит из суммы квадратичных функций  $F_j^2$ , связывающих задержки времени прихода сигнала на станции комплекса пассивной радиолокации с координатами ИРИ, и квадратичных функций  $\tilde{D}_j^2$ , учитывающих данные о координатах ИРИ, полученные от активной РЛС.

Сформулируем необходимые условия определения минимума функционала (3) в покомпонентном представлении [4]:

$$\frac{\partial J(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_1} = 0; \quad \frac{\partial J(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_2} = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial J(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_3} = 0,$$

где

$$\frac{\partial J(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_i} = 2 \left\{ \sum_{j=1}^3 F_j(x_i) \cdot \frac{\partial F_j(x_i)}{\partial x_i} \right\} + \frac{\partial D_1^2}{\partial x_i} + \frac{\partial D_2^2}{\partial x_i} + \frac{\partial D_3^2}{\partial x_i} = 0, \quad i = 1..3; \quad (4)$$

при этом

$$\frac{\partial D_j^2(x_i)}{\partial x_i} = 2(x_i - \tilde{x}_i) \quad (5)$$

$$\frac{\partial F_j(x_i)}{\partial x_i} = \frac{x_i - x_1^j}{\sqrt{(x_i - x_1^j)^2 + (x_i - x_2^j)^2 + (x_i - x_3^j)^2}} - x_i / \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}; \quad (6)$$

## Основная часть

В целях определения эффективности предлагаемого метода информационной избыточности произведем анализ влияния данных активной РЛС на повышение точности измерения координат системой «комплекс пассивной радиолокации – активная РЛС» в случае, когда система пассивной радиолокации и активная РЛС имеют некоторую погрешность измерения времени задержки прихода сигнала на станции комплекса и координат  $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3$  соот-

ветственно. Этот случай максимально соответствует реальной ситуации на практике. Результаты расчетов приведены в табл. 1, в которой приняты следующие обозначения:  $x_1, x_2, x_3, D$  - координаты и дальность до ИРИ, рассчитанные методом минимизации квадратичного функционала (2),  $\delta x_1, \delta x_2, \delta x_3, \delta D, \delta \tilde{x}_1, \delta \tilde{x}_2, \delta \tilde{x}_3, \delta D$  - относительные погрешности вычисления координат и дальности до ИРИ,  $\delta \tilde{x}_1, \delta \tilde{x}_2, \delta \tilde{x}_3$  - относительные погрешности активной РЛС.

Таблица 1

Совместная работа системы пассивной радиолокации и активной РЛС: погрешность измерения имеют как комплекс пассивной радиолокации, так и активная РЛС.

Условия вычислительного эксперимента							
Относительные погрешности измерения времени задержки прихода сигнала станциями: $\delta\tau_1=0,5\%$ ; $\delta\tau_2=3\%$ ; $\delta\tau_3=2\%$ ; Истинные координаты ИРИ, км: $x=100$ ; $y=55$ ; $z=8$ ;							
Расстояние от начала координат до ИРИ, км: $D=114.407$ ;							
$x_1$ , км	$x_2$ , км	$x_3$ , км	$\delta x_1$ , %	$\delta x_2$ , %	$\delta x_3$ , %	$D$ , км	$\delta D$ , %
без активной РЛС (только комплекс пассивной радиолокации)							
107.038	59.06	6.219	7.038	7.382	22.262	122.409	6.994
$\delta\tilde{x}_1 = 0,04\%$ $\delta\tilde{x}_2 = 0,04\%$ $\delta\tilde{x}_3 = 0,04\%$							
100.345	55.478	7.579	0.345	0.869	5.263	114.91	0.44
$\delta\tilde{x}_1 = 0,4\%$ $\delta\tilde{x}_2 = 0,4\%$ $\delta\tilde{x}_3 = 0,4\%$							
100.683	55.652	7.629	0.683	1.185	4.638	115.293	0.774
$\delta\tilde{x}_1 = 1,4\%$ $\delta\tilde{x}_2 = 1,4\%$ $\delta\tilde{x}_3 = 1,4\%$							
101.627	56.137	7.767	1.627	2.067	2.912	116.36	1.707
$\delta\tilde{x}_1 = 2,4\%$ $\delta\tilde{x}_2 = 2,4\%$ $\delta\tilde{x}_3 = 2,4\%$							
102.58	56.628	7.9	2.58	2.96	1.25	117.438	2.65

На основе данных табл. 1 можно сделать вывод о том, что комплекс пассивной радиолокации является крайне чувствительной системой в отношении точности измерения времен задержек прихода сигнала на станции – даже относительно небольшие погрешности измерения приводят к значительным погрешностям измерения координат ИРИ. Это, как видно из таблицы, особенно касается высоты ИРИ. Координаты  $x_1, x_2$  отклоняются от своих истинных значений в меньшей степени, однако их изменения также существенны и находятся в пределах 7%. Работа комплекса пассивной радиолокации без активной РЛС показывает, что погрешности измерения времени задержки прихода сигнала в пределах 2% могут приводить к недопустимым погрешностям измерения координаты  $x_3$  ИРИ.

Работа комплекса совместно с активной РЛС в значительной степени компенсирует столь высокую погрешность измерения высоты – при погрешности активной РЛС по координате  $x_3$  равной 2,4%, погрешность измерения высоты системой «комплекс пассивной радиолокации – активная РЛС» составляет 1,25%. Погрешности определения координат  $x_1, x_2$ , а также дальности до ИРИ  $D$ , как видно из табл. 2, невелики и находятся в допустимых пределах (меньше 4%).

Как видно, в отличие от классического решения системы гиперболических уравнений РДМ, экстремальная постановка этого метода позволяет учесть погрешность измерения времени задержки прихода сигнала на каждую из станций и, как следствие, анализировать влияние этой погрешности на точность вычисления координат ИРИ комплексом пассивного радиомониторинга.

Экстремальная постановка РДМ позволяет решать переопределенную систему уравнений, то есть систему, учитывающую возможную информационную избыточность измерений одной или нескольких координат;

Для случая массовых вычислений, то есть реальных условий работы радиолокационных комплексов, рассмотрим работу комплекса пассивной радиолокации и системы «комплекс пассивной радиолокации – активная РЛС» на основе статистической модели, структурная схема которой представлена на рис. 3. В обоих этих случаях определение координат будем производить на основе поиска минимума квадратичного функционала (2) и с использованием метода статистических испытаний Монте-Карло [5].

Схема рис. 3 показывает, что статистические характеристики: матожидание ( $m_{x_1}, m_{x_2}, m_{x_3}, m_D$ )

для каждой из координат и дальности, дисперсия ( $d_{x_1}, d_{x_2}, d_{x_3}, d_D$ ), СКО ( $\sigma_{x_1}, \sigma_{x_2}, \sigma_{x_3}, \sigma_D$ ), асимметрия ( $s_{x_1}, s_{x_2}, s_{x_3}, s_D$ ) и эксцесс ( $\gamma_{x_1}, \gamma_{x_2}, \gamma_{x_3}, \gamma_D$ ) формируются из выборки координат, получаемых, в свою очередь, в результате минимизации квадра-

точного функционала. Входными данными функционала являются случайные значения времен задержек прихода сигнала на станции комплекса, а также данные активной РЛС, распределенные по нормальному закону [6].



Рис. 3. Функциональная схема статистического моделирования вычисления координат ИРИ методом Монте-Карло

Результаты моделирования представлены на рис. 4, 5, а условия соответствующих вычислитель-

ных экспериментов и полученные статистические результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты статистического моделирования

Условия вычислительного эксперимента:						
Истинные координаты ИРИ, км: $x = 100$ ; $y = 55$ ; $z = 8$ ;						
Расстояние от начала координат до ИРИ, км: $D = 114.407$ ;						
Количество статистических испытаний, $N = 2000$ ;						
СКО ошибки определения времени задержки прихода сигнала, %:						
1-й станции, $\sigma_1 = 0,15$ ; 2-й станции, $\sigma_2 = 0,2$ ; 3-й станции, $\sigma_3 = 0,25$ ;						
СКО ошибки активной РЛС, % ( $\sigma_{\tilde{x}_1}, \sigma_{\tilde{x}_2}, \sigma_{\tilde{x}_3}$ )	Координата, дальность, км	Математическое ожидание, км	СКО координаты (дальности), км	Дисперсия, км <sup>2</sup>	Асимметрия	Эксцесс
(без активной РЛС)	$x_1$	99.997	0.924	0.854	-0.858	3.282
	$x_2$	54.995	0.434	0.188	-0.482	1.596
	$x_3$	7.881	1.18	1.398	-3.491	21.41
	D	114.4	1.056	0.844	-0.844	3.212
0,01	$x_1$	100.0	0.044	$1.959 \cdot 10^{-3}$	$-4.975 \cdot 10^{-3}$	0.17
	$x_2$	55.0	0.055	$3.07 \cdot 10^{-3}$	-0.121	0.069
	$x_3$	8.0	0.031	$9.432 \cdot 10^{-4}$	$-7.936 \cdot 10^{-3}$	0.085
	D	114.41	0.031	$9.426 \cdot 10^{-4}$	$-5.375 \cdot 10^{-3}$	0.146
0,1	$x_1$	100.0	0.099	$9.895 \cdot 10^{-3}$	-0.052	-0.089
	$x_2$	55.0	0.067	$4.482 \cdot 10^{-3}$	-0.018	0.097
	$x_3$	8.0	0.032	$1.022 \cdot 10^{-3}$	-0.083	0.08
	D	114.41	0.092	$8.452 \cdot 10^{-3}$	-0.026	-0.154
0,2	$x_1$	100.0	0.179	0.032	0.018	0.024
	$x_2$	55.0	0.098	$9.575 \cdot 10^{-3}$	-0.046	-0.24
	$x_3$	8.0	0.036	$1.282 \cdot 10^{-3}$	0.031	0.135
	D	114.4	0.173	0.03	0.026	0.053
0,3	$x_1$	100.0	0.269	0.073	-0.01	-0.102
	$x_2$	55.0	0.129	0.017	$-5.438 \cdot 10^{-3}$	0.046
	$x_3$	8.0	0.042	$1.736 \cdot 10^{-3}$	0.023	-0.043
	D	114.4	0.261	0.068	-0.017	-0.102

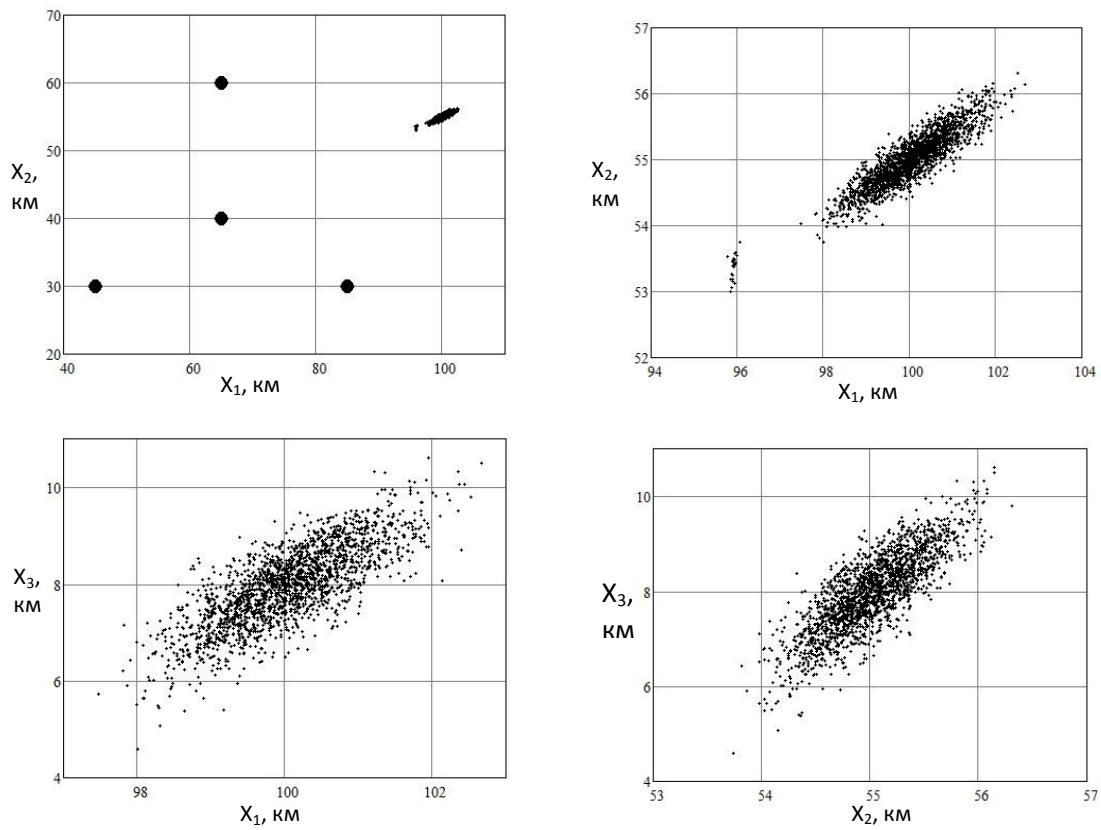


Рис. 4. Эллипс ошибок комплекса пассивной радиолокации

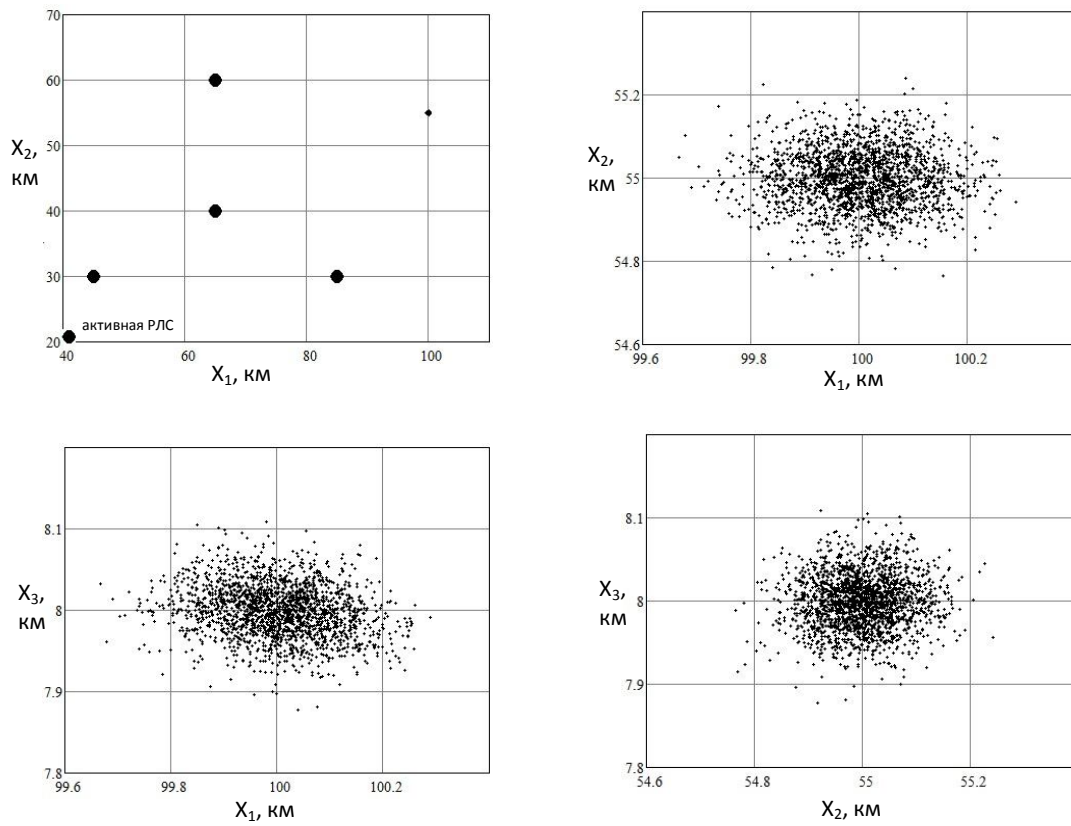


Рис. 5. Эллипс ошибок комплекса пассивной радиолокации при совместной работе с активной РЛС

$$(\sigma_{\tilde{x}_1}, \sigma_{\tilde{x}_2}, \sigma_{\tilde{x}_3} = 0,1\%)$$

## Выводы

По результатам статистического моделирования можно сделать следующие выводы:

При совместной работе комплекса пассивного радиомониторинга и высометра эллипс ошибок в координатах  $(X_1, X_2)$  значительно уменьшается, причем его полуоси становятся практически равными (рис. 4, 5), т.е. эллипс ошибок вырождается в окружность.

Эллипсы ошибок в координатах  $(X_1, X_3)$  и  $(X_2, X_3)$  не только уменьшаются, но и изменяют свое положение с наклонного на горизонтальное (рис. 4) и полуоси их также становятся примерно одинаковыми, что в сильной степени повышает точность определение высоты радиолокационной системой в том числе и из-за того, что направление малой оси эллипса ошибок в этом случае совпадает с осью  $X_3$ .

При работе системы «комплекс пассивной радиолокации – активная РЛС» когда  $\sigma_{\tilde{x}_1}, \sigma_{\tilde{x}_2}, \sigma_{\tilde{x}_3} \leq 0,2$ , СКО координат  $x_1$  и  $x_2$  уменьшается практически на порядок, СКО координаты  $x_3$  уменьшается примерно на два порядка, СКО расстояния  $D$  от ИРИ начала координат также уменьшается практически на два порядка. Как видно из табл. 2, при

$$0,2 \leq \sigma_{\tilde{x}_1}, \sigma_{\tilde{x}_2}, \sigma_{\tilde{x}_3} \leq 0,3,$$

т.е. когда СКО ошибки активной РЛС в пределах или превышает СКО ошибки определения времени задержки прихода сигнала каждой из станций СКО координат  $x_1$  и  $x_2$  уменьшается в 4 раза, СКО координаты  $x_3$  уменьшается на два порядка, а СКО расстояния  $D$  от ИРИ начала координат также уменьшается примерно в 4 раза. Значения математического ожидания остаются в тех же пределах, т.е. средние значения вычисляемых координат, и дальности до ИРИ остаются неизменными.

Дисперсия по координатам  $x_1, x_2$ , дальности  $D$  уменьшается, в зависимости от СКО координат ИРИ, получаемых от активной РЛС, на 1-2 порядка. По координате  $x_3$  – на 3 порядка соответственно.

Асимметрия и эксцесс также уменьшаются практически на 1-2 порядка, то есть отклонение от нормального закона распределения становятся значительно меньше.

Все рассчитанные статистические характеристики указывают на то, что интеграция активных и пассивных систем радиолокации позволяет существенно снизить погрешность измерения координат ИРИ и тем самым повысить эффективности систем радиомониторинга в целом.

## Список литературы

1. Кринецкий Е.И. Основы испытаний летательных аппаратов : Учебник для ВТУЗов / Е.И. Кринецкий, Л.Н. Александровская, В.С. Мельников, Н.А.Максимов. – М.: Машиностроение, 1989. – 312 с.
2. Румицкий Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л.З. Румицкий. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
3. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента / Н. Джонсон, Ф. Лион. – К.: Мир, 1980. – 610 с.
4. Найденов В.Г. Оптимальная фильтрация многомерных случайных процессов траекторных измерений с несинхронными во времени компонентами / В.Г. Найденов // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2007. – Т. 5, № 9. – С. 3-9.
5. Розанов Ю.А. Теория вероятностей, случайные процессы и математическая статистика: Учебник для вузов. – 2-е изд., доп. / Ю.А. Розанов. – М.: Наука, 1989. – 320 с.
6. Налимов В.В. Теория эксперимента / В.В. Налимов. – М.: Наука, 1971. – 171 с.

Поступила в редколлегию 16.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.О. Каргин, Донецкий национальный университет, Донецк.

## АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ДЖЕРЕЛ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ ПРИ СПІЛЬНІЙ РОБОТІ СИСТЕМИ ПАСИВНОЇ РАДІОЛОКАЦІЇ І АКТИВНОЇ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ СТАНЦІЇ

В.Н. Ткаченко, В.В. Коротков, Р.Л. Пантєєв

У статті проводиться аналіз точності визначення координат джерел радіовипромінювання (ДРВ) системою «комплекс пасивного радіомоніторингу - активна радіолокаційна станція (РЛС)» на основі екстремальної постановки різницево-дальномерного методу (РДМ) спільно з виразами, що враховують дані активної радіолокаційної станції. Координати ДРВ визначаються шляхом мінімізації квадратичного функціоналу, що дозволяє врахувати інформаційну надмірність системи і тим самим значно підвищити точність визначення координат ДРВ. Крім того, у статті наводиться схема статистичного моделювання, а також аналіз статистичних характеристик вищезгаданої системи.

**Ключові слова:** пасивний радіомоніторинг, активна радіолокація, екстремальна постановка, квадратичний функціонал, точність обчислень координат ДРВ, метод Монте-Карло, статистична характеристика.

## ANALYSIS OF COORDINATES DETERMINATION ACCURACY OF THE RADIO EMISSION SOURCES IN THE SYSTEM OF RADAR-LOCATION COMPLEX AND ACTIVE RADAR

V.N. Tkachenko, V.V. Korotkov, R.L. Pantyeyev

Determination accuracy analysis of the radio emission sources (RES) coordinates in the system "passive radio monitoring complex – active radar" on the basis of extreme statement of the time-difference of arrival (TDoA) method together with the expression considering active radar data is carried in the article. RES-coordinates are defined by the minimization of square functional that allows to consider information redundancy of the system and by that considerably to raise the RES-coordinates determination accuracy. Statistical modeling scheme, and also the statistical characteristics analysis of the above-named system is provided.

**Keywords:** passive radio monitoring, active radar, extreme statement, square functional, RES coordinates calculations accuracy, Monte-Carlo method, statistical characteristic.