

УДК 621.396.551.553

В.Н. Ткаченко¹, В.В. Коротков², Р.Л. Пантеев²¹ *ІПММ НАН України, Донецьк*² *Публічне акціонерне товариство «СКБ РТУ», Донецьк*

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЕ СИСТЕМЫ ПАССИВНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ И ВЫСОТОМЕРА

В статье проводится анализ точности определения координат источников излучения (ИРИ) системой «комплекс пассивного радиомониторинга - высотомер» на основе экстремальной постановки разностно-дальномерного метода совместно с выражением, учитывающим данные высотомера. 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, экстремальная постановка, квадратичный функционал, точность вычислений, высотомер, метод Монте-Карло, статистическая характеристика.

Введение

Одним из важных критериев эффективности работы пассивных комплексов контроля радиоэлектронной обстановки, является точность определения координат источников радиоизлучения (ИРИ). В реальных условиях существенное влияние на точность измерения координат, при работе разностно-дальномерным методом (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 четыре пространственно-разнесенных станции С, R, L и Q и высотомер V (рис. 1). Для определения координат объекта в текущий момент времени комплексом пассивной радиолокации разностно-дальномерным методом (РДМ), необходимо решить систему гиперболических уравнений (1) [4].

$$F_1 = \sqrt{(x_1 - x_{1L})^2 + (x_2 - x_{2L})^2 + (x_3 - x_{3L})^2} + D_L - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} - \tau_L \cdot c = 0;$$

$$F_2 = \sqrt{(x_1 - x_{1R})^2 + (x_2 - x_{2R})^2 + (x_3 - x_{3R})^2} +$$

$$+ D_R - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} - \tau_R \cdot c = 0;$$

$$F_3 = \sqrt{(x_1 - x_{1Q})^2 + (x_2 - x_{2Q})^2 + (x_3 - x_{3Q})^2} +$$

$$+ D_Q - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} - \tau_Q \cdot c = 0;$$

$$D_L = \overline{LC}, D_R = \overline{RC}, D_Q = \overline{QC},$$

где x_1, x_2, x_3 – координаты ИРИ, x_{1L}, x_{2L}, x_{3L} – координаты станции L, x_{1R}, x_{2R}, x_{3R} – координаты станции R, x_{1Q}, x_{2Q}, x_{3Q} – координаты станции Q, $\tau_{L,R,Q}$ – задержки времен прихода сигнала на соответствующие станции комплекса, c – скорость распространения сигнала.

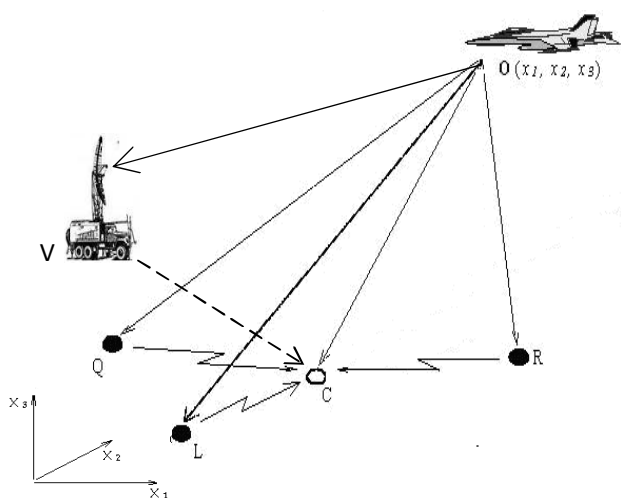


Рис. 1. Система: комплекс пассивной радиолокации – радиовысотомер

Ввиду отсутствия возможности учета данных высотомера при нахождении координат ИРИ в системе уравнений (1), переформулируем задачу нахож-

дения 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 высотомера. Примем: $\tau_1 = \tau_L$, $\tau_2 = \tau_Q$, $\tau_3 = \tau_R$, $\vec{\tau} = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]$, $\vec{x} = [x_1, x_2, x_3]$. Квадратичный функционал, оценивающий величину суммарной ошибки системы, состоящей из комплекса пассивной радиолокации и радиовысотомера, можно записать в виде:

$$J(x_1, x_2, x_3) = (x_3 - h)^2 + \sum_{j=1}^3 \left[\sqrt{(x_1 - x_1^j)^2 + (x_2 - x_2^j)^2 + (x_3 - x_3^j)^2} + D_j - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} - \tau_j \cdot c \right]^2, \quad (2)$$

где x_1^j, x_2^j, x_3^j – соответствующие координаты станций, h – высота ИРИ, измеренная при помощи радиовысотомера.

Пользуясь обозначениями системы (1), квадратичный функционал (2) перепишем в более компактном виде:

$$J(x_1, x_2, x_3) = \sum_{j=1}^3 F_j^2 + (x_3 - h)^2, \quad j = 1..3. \quad (3)$$

Функционал $J(x_1, x_2, x_3)$ состоит из суммы квадратичных функций, связывающих задержки времени прихода сигнала на станции комплекса пассивной радиолокации с координатами ИРИ, и квадратичной функции, учитывающей данные о координате x_3 (высоте), полученные от радиовысотомера.

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

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

$$\text{где } \frac{\partial J(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_i} = 2 \left\{ \sum_{j=1}^3 F_j(x_i) \cdot \frac{\partial F_j(x_i)}{\partial x_i} \right\} + \frac{\partial (x_3 - h)^2}{\partial x_i} = 0, \quad i = 1..3, \quad (5)$$

при этом

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

Основная часть

Для оценки влияния высотомера на систему «комплекс пассивной радиолокации - высотомер», а именно на вычисляемые значения координат ИРИ, предположим, что комплекс пассивной радиолокации имеет точные значения координат ИРИ, а погрешность измерения имеет только высотомер. 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 (3), $\delta x_1, \delta x_2, \delta x_3, \delta D, \delta x_1, \delta x_2, \delta x_3, \delta D$ – относительные погрешности вычисления координат и дальности до ИРИ, δh – относительная погрешность высотомера.

Из табл. 1 видно, что наибольшее влияние погрешность высотомера оказывает на значение координаты x_3 , то есть высоты. Координаты x_1, x_2 подвержены влиянию незначительно. Ошибка определения дальности возрастает с увеличением погрешности высотомера, однако значения всех погрешностей как по координатам, так и по дальности невелики и находятся в технически допустимых пределах (ниже 4%).

В целях определения эффективности предлагаемого метода информационной избыточности произведем анализ влияния данных высотомера на повышение точности измерения координат системой пассивной радиолокации и высотомера в случае, когда и система пассивной радиолокации, и высотомер имеют некоторую погрешность измерения времени задержки прихода сигнала на станции комплекса и высоты соответственно. Этот случай максимально соответствует реальной ситуации на практике. Результаты расчетов приведены в табл. 2. В ней приняты те же обозначения, что и в табл. 1, δh – относительная погрешность высотомера, координаты ИРИ также рассчитываются методом минимизации квадратичного функционала (3).

На основе данных табл. 2 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 довольно слабо отклоняются от своих истинных значений, однако их изменения также заметны. Работа комплекса пассивной радиолокации без высотомера показывает, что погрешности измерения времени задержки прихода сигнала в пределах 1% могут приводить к погрешности измерения координаты x_3 ИРИ до 30,5%.

Таблиця 1

Совместная работа системы пассивной радиолокации и высотомера:
погрешность измерения имеет только высотомер

<u>Условия вычислительного эксперимента</u>							
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	δx_1 , %	δx_2 , %	δx_3 , %	D , км	δD , %
$\delta h = 0,7\%$							
100.048	55.021	8.056	0.048	0.038	0.7	114.463	0.049
$\delta h = 1\%$							
100.068	55.03	8.08	0.068	0.055	1	114.487	0.07
$\delta h = 2\%$							
100.137	55.061	8.159	0.137	0.111	1.988	114.567	0.14

Таблиця 2

Совместная работа системы пассивной радиолокации и высотомера:
погрешность измерения имеют как комплекс пассивной радиолокации и высотомер

<u>Условия вычислительного эксперимента</u>							
Относительные погрешности измерения времени задержки прихода сигнала станциями: $\delta\tau_1=0,4\%$; $\delta\tau_2=0,6\%$; $\delta\tau_3=0,8\%$;							
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	δx_1 , %	δx_2 , %	δx_3 , %	D , км	δD , %
без высотомера (только комплекс пассивной радиолокации)							
100.347	55.113	5.558	0.347	0.205	30.525	114.62	0.187
$\delta h = 0,7\%$							
102.303	55.972	8.049	2.303	1.767	0.612	116.891	2.171
$\delta h = 1\%$							
102.325	55.981	8.073	2.325	1.784	0.913	116.916	2.193
$\delta h = 2\%$							
102.398	56.014	8.153	2.398	1.844	1.913	117.002	2.268

Напротив, работа комплекса совместно с высотомером в значительной степени компенсирует столь высокую погрешность измерения высоты - при погрешности высотомера равной 2%, погрешность измерения высоты системой «комплекс пассивной радиолокации - высотомер» составляет всего 1,85%. Погрешности определения координат x_1 , x_2 , а также дальности до ИРИ D , как видно из табл. 2, невелики и находятся в допустимых пределах.

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 информацион-

ную избыточность измерений одной или нескольких координат.

Рассмотрим также работу комплекса пассивной радиолокации и системы «комплекс пассивной радиолокации - высотомер» на основе статистической модели, структурная схема которой представлена на рис. 2. В обоих этих случаях определение координат будем производить на основе ПОИСКА минимума квадратичного функционала (3) с использованием метода статистических испытаний Монте-Карло [5].

Схема рис. 2 показывает, что статистические характеристики:

математическое ожидание ($m_{x_1}, m_{x_2}, m_{x_3}, m_D$)

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 ($s_{x_1}, s_{x_2}, s_{x_3}, s_D$);

эксцесс ($\gamma_{x_1}, \gamma_{x_2}, \gamma_{x_3}, \gamma_D$)

формируются из выборки координат, получаемых, в свою очередь, в результате минимизации квадратичного функционала.

Входными данными функционала являются случайные значения времен задержек прихода сигнала на станции комплекса, а также данные

высотомера, распределенные по нормальному закону [6].

Результаты моделирования представлены на рис. 3, 4, а условия соответствующих вычислительных экспериментов и полученные статистические результаты приведены в табл. 3.



Рис. 2. Функциональная схема статистического моделирования вычисления координат ИРИ методом Монте-Карло

Таблица 3

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 точек для моделирования, $N = 2000$;						
СКО ошибки определения времени задержки прихода сигнала, %:						
1-ой станции, $\sigma_1 = 0,15$; 2-ой станции, $\sigma_2 = 0,2$; 3-ей станции, $\sigma_3 = 0,25$						
СКО ошибки высотомера, %	Координата, дальность, км	СКО координаты (дальности), км	Математическое ожидание, км	Дисперсия, км ²	Асимметрия	Экссесс
-	x_1	0.924	99.997	0.854	-0.858	3.282
	x_2	0.434	54.995	0.188	-0.482	1.596
	x_3	1.18	7.881	1.398	-3.491	21.41
	D	1.056	114.4	0.844	-0.844	3.212
$\sigma_h = 0,1$	x_1	0.497	100.0	0.247	0.114	0.101
	x_2	0.221	55.008	0.049	0.098	0.172
	x_3	$8.756 \cdot 10^{-3}$	8.0	$7.67 \cdot 10^{-5}$	-0.046	0.15
	D	0.509	114.4	0.259	0.118	0.16
$\sigma_h = 0,2$	x_1	0.497	99.998	0.247	0.113	0.096
	x_2	0.221	55.008	0.049	0.095	0.155
	x_3	0.017	7.999	$2.723 \cdot 10^{-4}$	-0.013	-0.068
	D	0.509	114.41	0.259	0.116	0.15
$\sigma_h = 0,3$	x_1	0.498	99.998	0.248	0.113	0.108
	x_2	0.221	55.008	0.049	0.101	0.175
	x_3	0.024	7.999	$5.723 \cdot 10^{-4}$	0.017	-0.101
	D	0.51	114.41	0.26	0.118	0.169

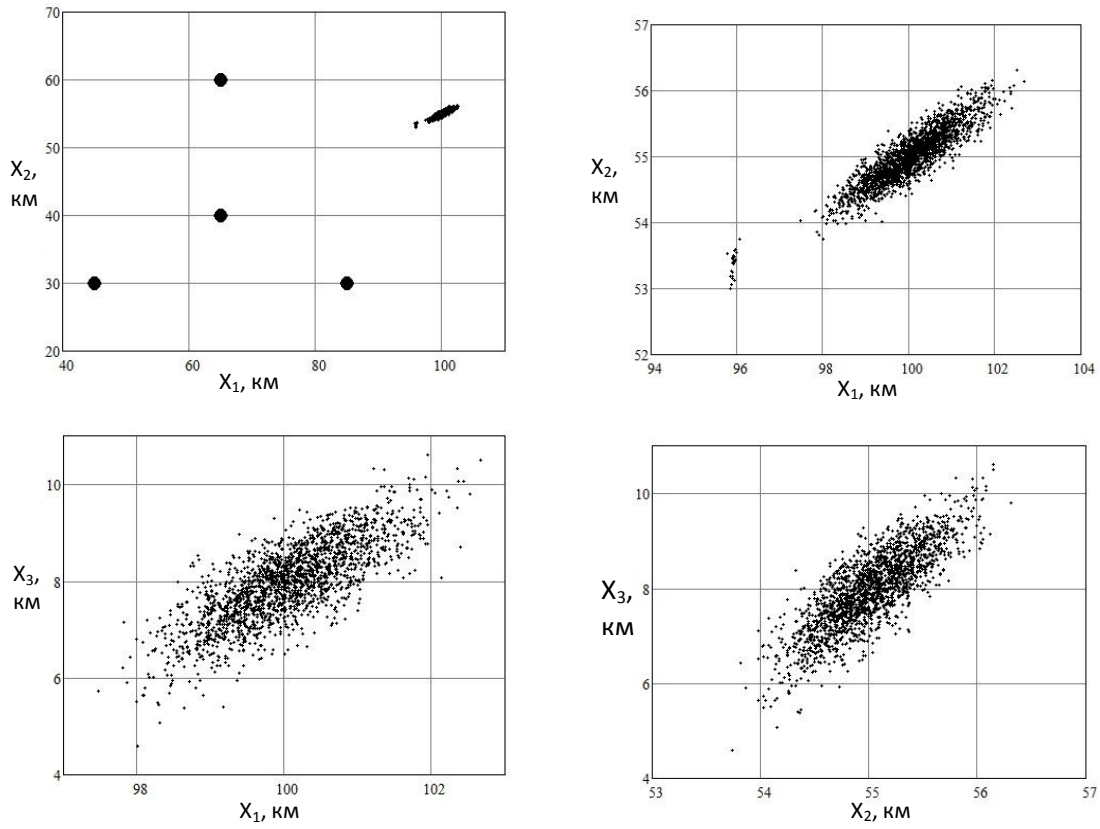


Рис. 3. Эллипс ошибок комплекса пассивной радиолокации

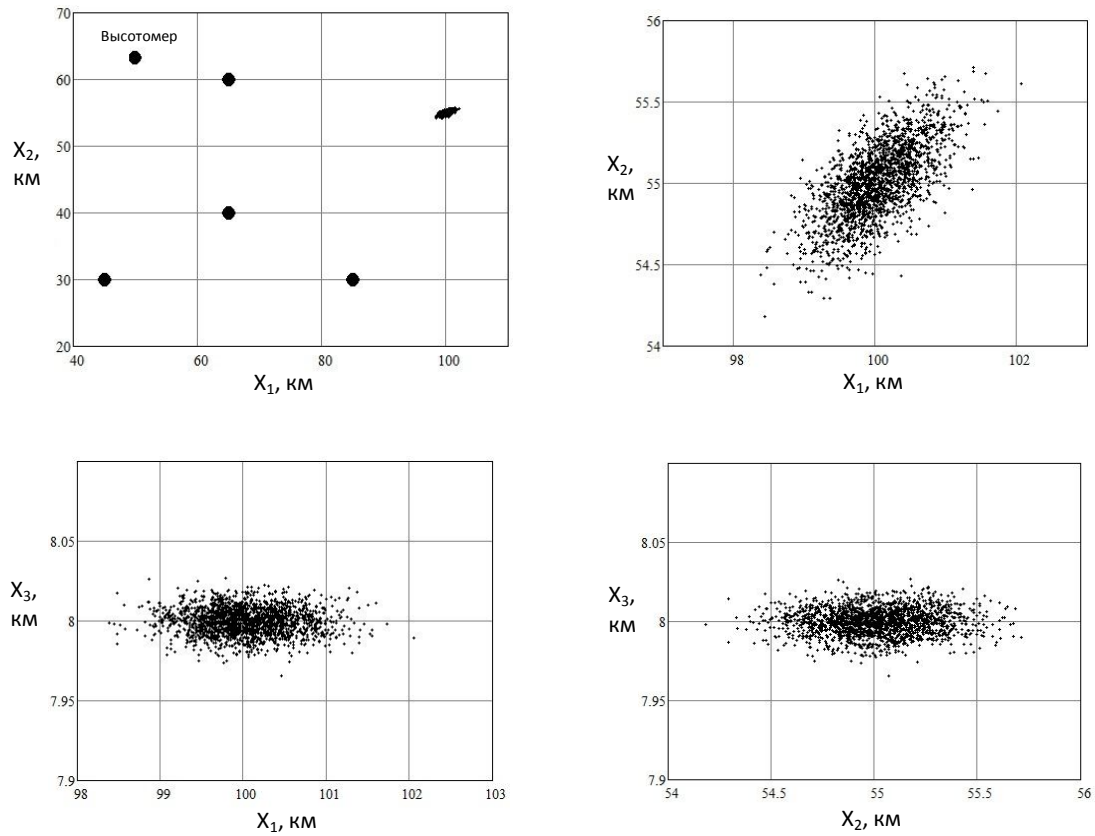


Рис. 4. Эллипс ошибок комплекса пассивной радиолокации при совместной работе с высотомером ($\sigma_n = 0,1\%$)

По результатам статистического моделирования можно сделать следующие выводы:

При совместной работе комплекса пассивного радиомониторинга и высотомера эллипс ошибок в координатах (X_1, X_2) значительно уменьшается (рис. 3,4), а эллипсы ошибок в координатах (X_1, X_3) и (X_2, X_3) не только уменьшаются, но и изменяют своё положение с наклонного на горизонтальное (рис. 4), что в сильной степени повышает точность определение высоты радиолокационной системой также и вследствие того, что направление малой оси эллипса ошибок в этом случае совпадает с осью X_3 .

При работе системы «комплекс пассивной радиолокации - высотомер» СКО координат x_1 и x_2 уменьшается практически в два раза, СКО координаты x_3 уменьшается на два порядка, СКО расстояния D от ИРИ начала координат также уменьшается в два раза. Эта закономерность, как видно из таблицы, сохраняется даже в том случае, когда СКО ошибки высотомера ($\sigma_h = 0,3\%$) больше СКО ошибки определения времени задержки прихода сигнала каждой из станций.

Значения математического ожидания остаются в тех же пределах, то есть средние значения вычисляемых координат, и дальности до ИРИ остаются неизменными.

Дисперсия по координате x_1 уменьшается в 3,5 раза, по координатам x_2 и x_3 – в 3,8 и 4500 раз соответственно. Асимметрия и эксцесс уменьшаются практически на порядок.

Вывод

Таким образом, интеграция активных и пассивных систем радиолокации позволяет существенно снизить погрешность измерения координат ИРИ и тем самым повысить эффективности систем ПВО в целом.

Список литературы

1. Кринецкий Е.И. Основы испытаний летательных аппаратов / Е.И. Кринецкий, Л.Н. Александровская, В.С. Мельников, Н.А. Максимов: Учебник для ВТУЗов. – 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. – М.: Мир, 1980. – 610 с.
4. Найденев В.Г. Оптимальная фильтрация многомерных случайных процессов траекторных измерений с несинхронными во времени компонентами / В.Г. Найденев // 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 20.05.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Г. Воронцов, Донецкий национальный технический университет, Донецк.

АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ДЖЕРЕЛ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ ПРИ СПІЛЬНІЙ РОБОТІ СИСТЕМИ ПАСИВНОЇ РАДІОЛОКАЦІЇ І ВИСОТОМІРА

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

У статті проводиться аналіз точності визначення координат джерел випромінювання (ДРВ) системою «комплекс пасивного радіомоніторингу - висотомір» на основі екстремальної постановки різницево-далекомірною методу спільно з вираженням, що враховує дані висотоміра. Координати ДРВ визначаються шляхом мінімізації квадратичного функціонала, що дозволяє врахувати інформаційну надмірність системи і тим самим значно підвищити точність визначення координат ДРВ. Крім того, в статті приводиться схема статистичного моделювання, а також аналіз статистичних характеристик вищезазначеної системи.

Ключові слова: пасивний радіомоніторинг, екстремальна постановка, квадратичний функціонал, точність обчислень, висотомір, метод Монте-Карло, статистична характеристика.

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

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 - altimeter" on the basis of extreme statement of the time-difference of arrival (TDoA) method together with the expression considering altimeter 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, extreme statement, square functional, calculations accuracy, altimeter, Monte-Carlo method, statistical characteristic.