

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.396.96

**АЛГОРИТМ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЮСТИРОВКИ
ИСТОЧНИКОВ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ**

В.А. АПОРОВИЧ, Т.В. ПРОКОФЬЕВА, К.С. ГАПЕЕВ

*НИИ средств автоматизации
пр. Независимости, 117, 220600, Минск**Поступила в редакцию 21 августа 2008*

Приведен алгоритм динамической юстировки источников радиолокационной информации в большой территориально распределенной системе. Главным принципом динамической юстировки является постоянный пересчет поправок для каждого источника, сопровождающего каждый воздушный объект. Проведено моделирование предложенного алгоритма и определено его место в системе обработки радиолокационной информации.

Ключевые слова: юстировка, динамическая юстировка, обработка радиолокационной информации.

Введение

При наблюдении за воздушной обстановкой в большой территориально распределенной системе местоположение одного и того же объекта, как правило, определяется с помощью двух и более источников радиолокационной информации (РЛИ) [1]. При приведении к единой системе координат и к единому моменту времени координаты объекта, выдаваемые разными источниками, не будут совпадать, что вызвано случайными ошибками и систематическими отклонениями. В общем случае несоответствие РЛИ, вызванное систематическими отклонениями, обусловлено многочисленными факторами [2–4]:

- ошибками ориентирования и горизонтирования антенн радиолокационных станций (РЛС);
- ошибками определения местоположения РЛС;
- ошибками определения моментов времени поступления эхо-сигналов воздушных объектов в РЛС (которые могут быть обусловлены как разницей моментов определения запуска "часов" для разных РЛС, так и разницей темпа часов) [3];
- отсутствием измеренного значения высоты воздушного объекта или ошибками ее определения (последние могут возникать вследствие различия используемых формул пересчета, разницы в учете рефракции радиоволн и т.д.);
- периодическими колебаниями конструкции РЛС при вращении массивной антенны;
- периодической ошибкой измерения угла (как правило, азимута) объекта при вращении антенны (возникает при неточностях и дефектах электромеханической системы вращения антенны и съема значения угла).

Юстировка источников РЛИ предполагает определение и использование поправок, уменьшающих систематические отклонения. Известные методы и способы юстировки предполагают определение юстировочных поправок, связанных с причинами систематических отклонений, например, поправок к углам ориентирования и горизонтирования, ошибок определения местоположения источника РЛИ и т.д. [5–7]. При этом известные методы юстировки направлены на компенсацию действия одного или нескольких факторов, неучитываемые факторы могут

все равно вызывать рассогласование поступающих от разных источников данных. Реализовать систему, компенсирующую действие всех существующих факторов, технически невозможно; более того, всегда возможно появление новых непредвиденных факторов, искажающих поступающую информацию. Другим существенным недостатком существующих методов является то, что они требуют проведения специальной процедуры, во время которой основная работа прекращается. Обобщая сказанное, можно считать, что задача юстировки системы остается актуальной.

В патенте ФРГ [8] предложено в ходе юстировки использовать только поступающую от источников информацию без учета вызвавших рассогласование причин. Радиус-вектор положения объекта определяется как сумма радиус-векторов положения, поступивших от всех источников, взятых с некоторым весом. Однако в описании патента присутствует только "идея" и не приведены пути практической реализации метода.

Реализацию метода [8] предложено назвать динамической юстировкой (ДЮ), так как она осуществляется уже в ходе сопровождения воздушных объектов ("в динамике"), при этом юстировочные поправки постоянно корректируются. Параметры алгоритма находятся с целью достижения минимума суммарной среднеквадратической ошибки оценки координат сопровождаемых воздушных объектов. Данная ошибка получается при объединении координатной информации от разных источников РЛИ, т.е. в ходе третичной обработки РЛИ (ТОРЛИ) [1].

ДЮ позволяет:

- повысить точность оценки координат, отказавшись от привязки к причинам появления систематических отклонений;
- проводить юстировку, не останавливая работу системы.

Предложено определять положение воздушного объекта с учетом накопленной в предыдущие моменты времени информации, что обеспечивает стабилизацию выходных данных. К входным значениям координат добавляются усредняющие поправки. Для их расчета в текущий момент времени предполагается применять экспоненциальное сглаживание поправок с учетом их значений для предыдущего момента времени. Параметр сглаживания рассчитывается, исходя из минимизации среднеквадратической ошибки значений координат, полученных с учетом усредняющих поправок.

Теоретический анализ

Пусть в каждый момент времени t_n от m источников поступают измеренные значения координаты X ; $X_n^{(j)}$ — измеренное значение координаты X , поступившее от j -го источника в n -й момент времени, $j = 1, 2, \dots, m$; смещенные трассы объектов от всех источников проходят параллельно друг другу; случайные ошибки измерения для каждого источника распределены по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением $\sigma_{X^{(j)}}$ (здесь "смещенными" назовем трассы с нулевыми случайными ошибками, только с ошибками рассогласования).

Обозначим:

$$X_{C_n} = \frac{1}{m} \sum_j X_n^{(j)} \quad (1)$$

– среднее арифметическое поступивших значений координаты от m источников в n -й момент времени;

$$\Delta X_n^{(j)} = X_{C_n} - X_n^{(j)} \quad (2)$$

– разность между средним арифметическим измеренных значений координаты от всех источников и измеренным значением координаты от j -го источника.

В каждый момент времени t_n для каждого номера j рассчитывается поправка к значениям $X_n^{(j)}$ по формуле экспоненциального сглаживания:

$$\tilde{\Delta x}_n^{(j)} = (1 - \xi_j) \Delta x_n^{(j)} + \xi_j \tilde{\Delta x}_{n-1}^{(j)}, \quad (3)$$

где ξ_j — коэффициент сглаживания [1], $\xi_j \in (-1; 1)$, начальное значение $\tilde{\Delta x}_0^{(j)} = \Delta x_0^{(j)}$.

Усредненные значения координаты X от j -го источника $\tilde{X}_n^{(j)}$ получаются добавлением поправки к поступившим значениям координаты:

$$\tilde{X}_n^{(j)} = X_n^{(j)} + \tilde{\Delta x}_n^{(j)} = X_n^{(j)} + (1 - \xi_j) \Delta x_n^{(j)} + \xi_j \tilde{\Delta x}_{n-1}^{(j)}. \quad (4)$$

Пусть $Xe_n^{(j)}$ — смещенные значения координаты X для j -го источника в n -й момент времени. Считаем, что эталонные значения усредненных координат Xce_n можно оценить как среднее арифметическое смещенных значений координаты в момент времени t_n по всем источникам:

$$Xce_n = \frac{1}{m} \sum_j Xe_n^{(j)}. \quad (5)$$

Значения $X_n^{(j)}$ можно представить в виде

$$X_n^{(j)} = Xe_n^{(j)} + \delta X_n^{(j)}, \quad (6)$$

где $\delta X_n^{(j)}$ — ошибка измерения для j -го источника в n -й момент времени.

Значения $\tilde{X}_n^{(j)}$ представим в виде

$$\tilde{X}_n^{(j)} = Xce_n + \delta \tilde{X}_n^{(j)}, \quad (7)$$

где $\delta \tilde{X}_n^{(j)}$ — ошибка усреднения для j -го источника в n -й момент времени.

Таким образом,

$$\delta \tilde{X}_n^{(j)} = \tilde{X}_n^{(j)} - Xce_n. \quad (8)$$

Подставляя в это выражение (4) и (5), получим

$$\delta \tilde{X}_n^{(j)} = \delta \tilde{X}_{n \text{ din}}^{(j)} + \delta \tilde{X}_{n \text{ rand}}^{(j)}, \quad (9)$$

где $\delta \tilde{X}_{n \text{ din}}^{(j)}$ — динамическая составляющая ошибки усреднения, появляющаяся вследствие применения экспоненциального сглаживания:

$$\delta \tilde{X}_{n \text{ din}}^{(j)} = \sum_{i=0}^n (1 - \xi_j) \xi_j^i \left(\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m Xe_{n-i}^{(k)} - Xe_{n-i}^{(j)} \right) - \left(\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m Xe_n^{(k)} - Xe_n^{(j)} \right); \quad (10)$$

$\delta \tilde{X}_{n \text{ rand}}^{(j)}$ — случайная составляющая ошибки усреднения:

$$\delta \tilde{X}_{n \text{ rand}}^{(j)} = \frac{1}{m} \sum_{k \in \Omega} \left(\sum_{i=0}^n (1 - \xi_j) \xi_j^i \delta X_n^{(k)} \right) - \frac{m-1}{m} \sum_{i=1}^n (1 - \xi_j) \xi_j^i \delta X_{n-i}^{(j)} + \frac{1 + \xi_j(m-1)}{m} \delta X_{n-i}^{(j)}; \quad (11)$$

$$\Omega = \{ \dots, j-1, j+1, \dots, m \};$$

В случае, когда смещение $\left(\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m Xe_n^{(k)} - Xe_n^{(j)} \right) = \text{const} = d_j$, т.е. когда смещенные трассы всех источников проходят параллельно друг другу,

$$\delta \tilde{X}_{n \text{ din}}^{(j)} = -d_j \xi_j^{n+1}; \quad (12)$$

следовательно, при $\xi_j < 1$ динамическая ошибка стремится к нулю.

Из (4) находим выражение для дисперсии случайной ошибки усреднения при $n \rightarrow \infty$:

$$\sigma_{rand}^{(j)} = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{(1-\xi_j) \sum_{k=1}^m \sigma_{X^{(k)}}^2 + (2m(m-1)\xi_j^2 + 2m\xi_j) \sigma_{X^{(j)}}^2}{1+\xi_j}}, \quad (13)$$

ξ_j рассчитывается таким образом, чтобы минимизировать $\sigma_{rand}^{(j)}$. Для этого вычисляется производная выражения (13), приравняется к нулю и рассматриваются промежутки ее положительности и отрицательности. Было получено следующее выражение для ξ_j :

$$\xi_j = \sqrt{\frac{m(m-2) + \frac{1}{\sigma_{X^{(j)}}^2} \sum_{k=1}^m \sigma_{X^{(k)}}^2}{m(m-1)}} - 1. \quad (14)$$

Если найденное $\xi_j \geq 1$, то динамическая ошибка усреднения не будет стремиться к нулю при $n \rightarrow \infty$, поэтому выбирается близкая к единице константа $\xi_{max} < 1$ и, если выполняется условие $\xi_j > \xi_{max}$, коэффициенту ξ_j присваивается значение ξ_{max} .

Алгоритм

Схема взаимодействия алгоритма динамической юстировки с системой третичной обработки радиолокационной информации приведена на рис. 1.

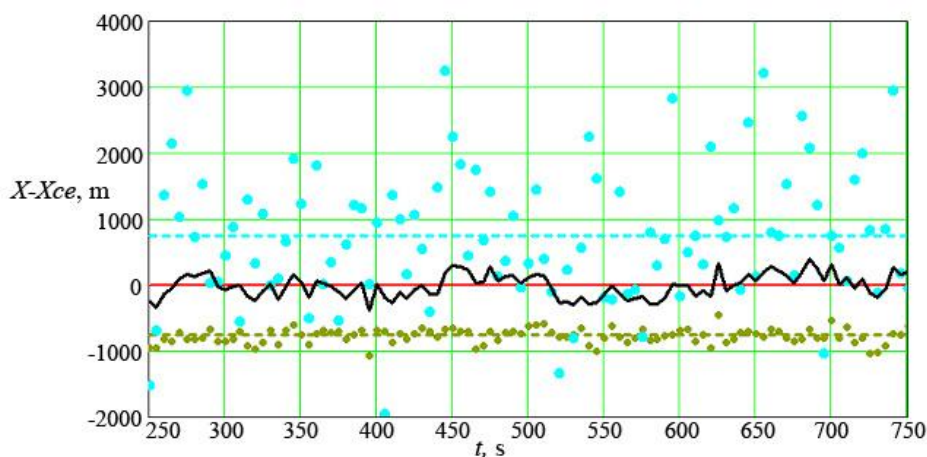


Рис. 1. Схема взаимодействия алгоритма динамической юстировки с системой третичной обработки радиолокационной информации

РЛИ поступает по L_{max} каналам; структура входных параметров в общем случае учитывает координаты воздушного объекта (ВО), составляющие скорости, ковариационные матрицы для координат и составляющих скорости. Если в блоке ТОРЛИ принято решение о принадлежности поступившей по нескольким каналам информации к одному объекту [1], осуществляется расчет параметров пересчета в соответствии с алгоритмом ДЮ; проводятся пересчеты для соответствующих каналов в соответствии с алгоритмом ДЮ. Пересчитанные координатные параметры передаются на вход системы ТОРЛИ.

Для компенсации систематических ошибок при третичной обработке радиолокационной информации предложено использовать следующий алгоритм: для источника с номером j вычисляется ξ_j по (14); ξ_j сравнивается с ξ_{\max} , и если $\xi_j > \xi_{\max}$, то ξ_j присваивается значение ξ_{\max} . Рассчитывается X_{c_n} по (1). Вычисляется $\Delta x_n^{(j)}$ по (2). Рассчитывается поправка $\tilde{\Delta x}_n^{(j)}$ по (3). Находится усредненное значение координаты по (4).

Результаты моделирования

Первая модель: объект двигался по прямолинейной траектории со скоростью 1000 м/с вдоль координатной оси X ; значения координаты X поступали от двух источников с периодом 5 с в одни и те же моменты времени. Постоянное смещение по X для второго источника составляло 1500 м. От первого источника поступали значения координаты со случайной среднеквадратической ошибкой (СКО) 125 м, от второго — с СКО 1000 м.

Определение усредненных значений производилось в соответствии с описанным выше алгоритмом.

На графиках представлены зависимости ошибки по координате X , поступавшей от первого источника, от времени (малые точки); ошибки по координате X , поступавшей от второго источника, от времени (крупные точки); ошибки усредненных значений для первого источника (рис. 2); ошибки усредненных значений для второго источника (рис. 3). Значения ошибок смещения по координате X для первого и для второго источников отмечены пунктиром.

СКО для усредненных значений координаты от первого источника составила 189 м, от второго источника — 415 м. (Расчет СКО для усредненных значений здесь и далее осуществлялся относительно истинной траектории).

Вторая модель: источники с различающимися периодами обзора; период первого источника составлял 1 с, период второго — 4 с. Объект двигался со скоростью 500 м/с. Смещение составляло 1000 м. От каждого источника поступали значения координат с СКО 1000 м. Значения координат второго источника экстраполировались на время первого источника.

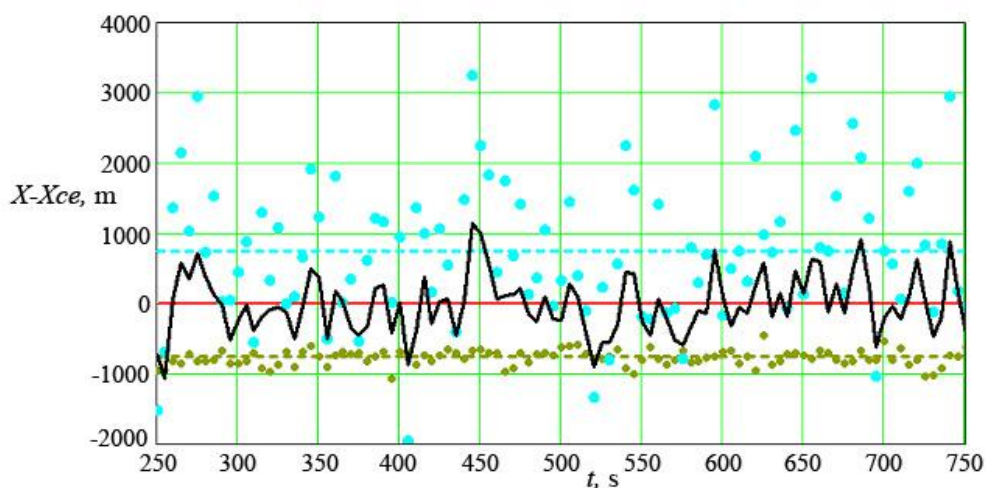


Рис. 2. Зависимости поступивших от первого и второго источников и усредненных для первого источника ошибок по координате X от времени

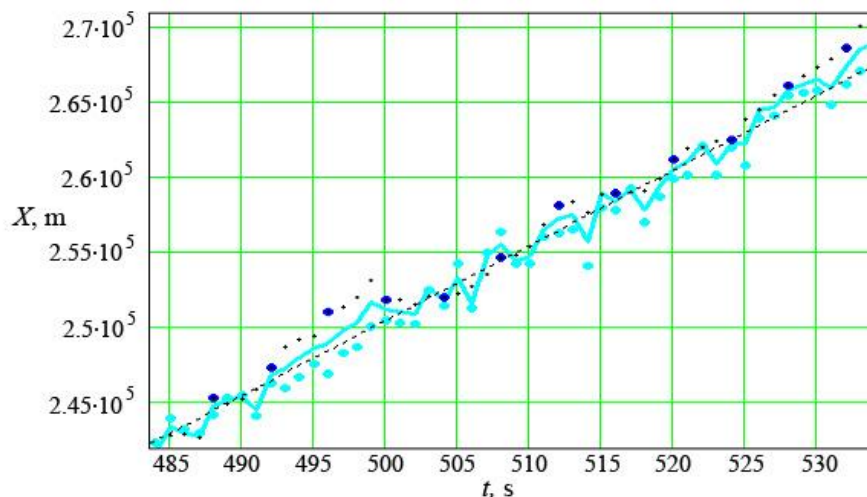


Рис. 3. Зависимости поступивших от первого и второго источников и усредненных для второго источника ошибок по координате X от времени

Результаты моделирования приведены на рис. 4. На графике представлены значения координаты X , поступавшей от первого (светлые точки) и второго (крупные темные точки) источников; экстраполированные значения координаты X для второго источника (малые точки); усредненные значения координаты X для первого источника (сплошная линия); смещенные трассы (пунктир).

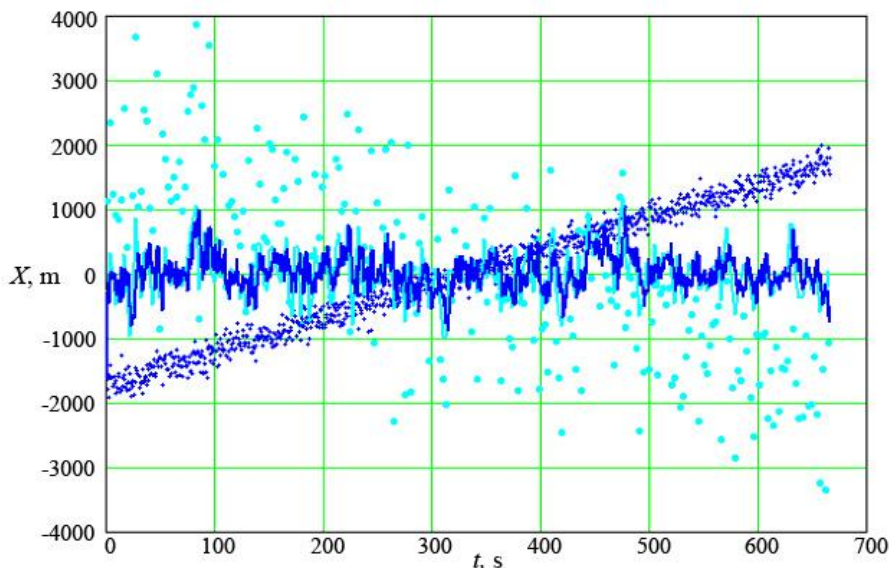


Рис. 4. Результаты моделирования для источников с различающимися периодами обзора

СКО для усредненных значений координаты от первого источника составила 805 м, от второго источника — 702 м.

Также был рассмотрен случай расхождения выдаваемых источниками трасс. Третья модель: угол расхождения составлял 2 град.; объект двигался со скоростью 300 м/с; период обзора первого источника составлял $2/3$ с, второго источника — $8/3$ с; начальный интервал по времени между обзорами источников составлял $1/6$ с. От первого источника поступали координаты с СКО 125 м, от второго — с СКО 1000 м. Значения координат от первого и второго источников экстраполировались на время второго и первого источников соответственно.

Результаты приведены на рис. 5. На графике представлены значения координаты X , поступавшей от первого (светлые точки) и второго (темные точки) источников, а также усредненные значения координаты X для первого (светлая линия) и второго (темная линия) источников.

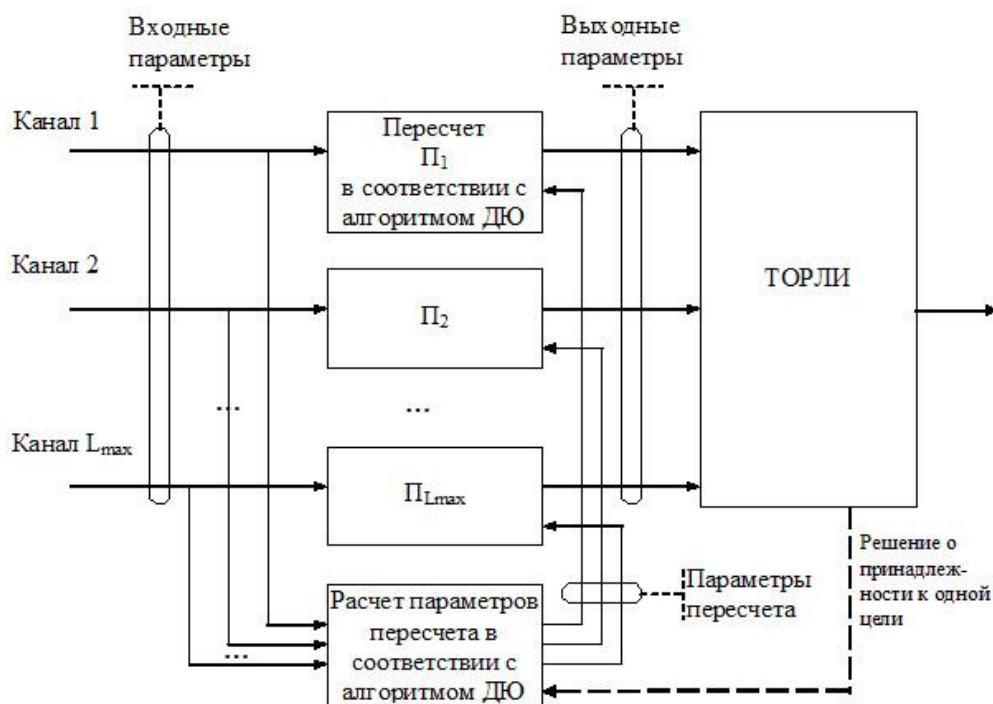


Рис. 5. Результаты моделирования для случая расхождения выдаваемых источниками трасс

СКО для усредненных значений координаты от первого источника составила 271 м, от второго источника — 386 м.

Моделирование также показало, что использование простого усреднения значений координат от разных источников ($\xi_j=0,5$) дает худшие результаты: СКО увеличивается в среднем в 1,2 раза по сравнению с перерасчетом по формуле (14).

Анализ результатов моделирования

При рассмотрении результатов моделирования можно сделать следующие выводы.

Усредненные значения располагаются между данными двух источников, т.е. эффект совмещения очевиден (рис. 2–5).

Значения СКО для источников имеют тенденцию к выравниванию, т.е. для большего СКО происходит уменьшение значения, для меньшего — некоторое увеличение.

Использование перерасчета коэффициента ξ_j по (14) уменьшает СКО усредненных значений по сравнению с фиксированным ξ_j .

Выводы

На основании всего изложенного можно сделать вывод, что предложенный алгоритм обеспечивает совмещение координатной информации, получаемой от различных источников РЛИ, в присутствии взаимных систематических отклонений. Совмещение осуществляется в ходе сопровождения объекта ("в динамике").

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор № Т06М-025 от 01.02.2006 г.).

DYNAMICAL ALIGNMENT ALGORITHM OF RADAR INFORMATION SOURCES

U.A. APAROVICH, T.U. PRAKOFYEVA, K.S. HAPPEYEU

Abstract

Dynamical alignment algorithm of radar information sources in large territorial distributed system is presented. The main principle of dynamical alignment is continuous recalculation of corrections for each source with tracking each air object. Simulation of proposed algorithm was carried out, it was defined its place in radar information processing system.

Литература

1. Кузьмин С.З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. М., 1974.
2. Blackman S., Popoli R. Design and analysis of modern tracking systems. Artech House, 1999.
3. Radar Data Processing. Volume II — advanced topics and applications. A. Farina, F.A. Studer. Research Studies Press Ltd, 1986.
4. Апарович В.А., Васковская Л.Ф., Глобаж В.И. и др. // II Междунар. науч.-техн. конф. по военно-техническим проблемам обороны и безопасности. Минск, 18–19 мая 2005 г. Минск, 2005.
5. Вакуленко Н.Н., Жирков В.М., Мачулин В.М. // Радиосистемы. 2002. № 8. С. 33–36.
6. Гриняк В.М. // Информационные технологии. 2003. № 1. С. 29–36.
7. Абрамович М.С., Сталевская С.Н., Апарович В.А., Ольшанский В.И. // Информационные системы и технологии. Материалы I Междунар. конф. Минск, 2002. Ч. 2. С. 161–166.
8. Патент ФРГ DE3132009A1. Способ коррекции систематических погрешностей при сопровождении цели несколькими РЛС. МКИЗ G01 S 13/04, 1983.