

УДК 621.396.96

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ АДАПТИВНЫХ ДИСКРЕТНЫХ ФИЛЬТРОВ КАЛМАНА ПРИ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

П.А. ХМАРСКИЙ, А.С. СОЛОНАР

*Военная академия Республики Беларусь
Минск, 220057, Беларусь**Поступила в редакцию 5 июня 2012*

Рассмотрены особенности реализации адаптивных дискретных фильтров Калмана для первичных измерений от двухкоординатной РЛС кругового обзора. Перечислены рекомендации по практическому применению модификаций адаптивных дискретных фильтров Калмана.

Ключевые слова: модель движения, маневр, адаптация, коррекция параметров, результирующая оценка, коммутируемая структура.

Введение

Важный этап обработки радиолокационной информации – дискретная фильтрация координат и параметров движения воздушных объектов. Для решения задачи дискретной фильтрации наиболее часто применяют линейные и квазилинейные дискретные фильтры Калмана (ФК).

На показатели качества ФК существенное влияние оказывает соответствие моделей задающего и возмущающего воздействия моделям, положенным в основу синтеза фильтра. Динамическая ошибка может появиться в ФК в процессе фильтрации координат и параметров маневрирующей цели в том случае, когда порядок полинома регулярной части модели задающего воздействия выше порядка полинома, заложенного в алгоритм экстраполяции фильтра. Для компенсации возникающих динамических ошибок применяются различные алгоритмы адаптивной фильтрации.

Из публикаций отечественных и зарубежных авторов можно выделить разнообразное количество одноканальных и многоканальных алгоритмов адаптации [1–6]. Наиболее распространенными из них являются [4]: фильтр с коррекцией полосы пропускания; фильтр с коррекцией результирующей оценки параметра; многомодельный фильтр с коммутируемой структурой по моделям движения (ПМД).

Примеры реализации данных алгоритмов рассмотрены либо для моделей регулярной части задающего воздействия 0-го порядка [5], либо на примере фильтрации по радиальной дальности и скорости [2]. Применение данных алгоритмов для ФК при косвенных измерениях (наблюдении полярных координат и фильтрации прямоугольных) позволило выявить ряд особенностей, которые будут представлены в статье.

Целями статьи являются: рассмотрение особенностей расчетов и построений модификаций адаптивных дискретных ФК и сопоставительный анализ результатов фильтрации данных модификаций.

Постановка задачи

Будем считать, что в вектор наблюдаемых параметров θ входят разовые оценки радиальной дальности r и азимута β . Ошибки наблюдения некоррелированы и характеризуются корреляционной матрицей ошибок измерения:

$$R_{\theta} = \begin{bmatrix} \sigma_r^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{\beta}^2 \end{bmatrix},$$

где σ_r^2 , σ_{β}^2 – СКО гауссовских ошибок наблюдения радиальной дальности и азимута.

Интервал обновления данных равен T . Данные наблюдения соответствуют выходу устройства разовых оценок двухкоординатной РЛС кругового обзора. Наблюдается аэродинамический летательный аппарат (ЛА). Возможны следующие типы движения ЛА: прямолинейное движение с постоянной скоростью; равноускоренное движение; разворот.

Задача: рассмотреть особенности расчетов и построений модификаций адаптивных дискретных ФК при наблюдении полярных координат и фильтрации прямоугольных координат – ФК с коррекцией полосы пропускания; ФК с коррекцией результирующей оценки параметра; многомодельный ФК с коммутируемой структурой ПМД; провести сопоставление их суммарных ошибок измерения местоположения ЛА методами математического моделирования.

Модификации адаптивных дискретных фильтров Калмана

1. *Адаптивный дискретный ФК с коррекцией полосы пропускания.* В данном фильтре текущая подстройка полосы пропускания снижает динамические ошибки на этапе маневрирования, приводя к некоторому возрастанию флуктуационных ошибок в отсутствие маневрирования. Полоса пропускания фильтра определяется коэффициентом усиления фильтра $\mathbf{K}_{k+1}$, зависящего от ошибок экстраполяции и текущего оценивания.

Умножая матрицу ошибок экстраполяции $\mathbf{R}_{0(k+1)}$ на скалярный коэффициент $\gamma > 1$ [2], увеличивают коэффициент усиления $\mathbf{K}_{k+1}$. Тем самым минимизируют разность между прогнозируемой $(\mathbf{R}_{0(k+1)} - \mathbf{R}_{\theta(k+1)})$ и усредненной оценочной $\bar{\Delta}_{\theta(k+1)} \bar{\Delta}_{\theta(k+1)}^T$ корреляционной матрицей невязок

$$\bar{\Delta}_{\theta(k+1)} = \hat{\theta}_{k+1} - \mathbf{H} \hat{\alpha}_{0(k+1)}, \quad (1)$$

где $\hat{\theta}_{k+1}$ – текущая оценка, $\hat{\alpha}_{0(k+1)}$ – оценка прогноза вектора состояния.

Приближение по величине следа матрицы [1]. Приравняется нулю линейная комбинация следов $\text{tr}\{\bar{\Delta}_{\theta(k+1)} \bar{\Delta}_{\theta(k+1)}^T\} - \text{tr}\{\mathbf{H} \mathbf{R}_{0(k+1)} \mathbf{H}^T + \mathbf{R}_{\theta(k+1)}\} = 0$, откуда корректирующий коэффициент

$$\gamma = \hat{\gamma}_{k+1} = \frac{\text{tr}\{\bar{\Delta}_{\theta(k+1)} \bar{\Delta}_{\theta(k+1)}^T - \mathbf{R}_{\theta(k+1)}\}}{\text{tr}\{\mathbf{H} \mathbf{R}_{0(k+1)} \mathbf{H}^T\}}. \quad (2)$$

Коэффициент усиления после коррекции будет иметь вид:

$$\mathbf{K}_{k+1} = \hat{\gamma}_{k+1} \mathbf{R}_{0(k+1)} \mathbf{H}^T [\hat{\gamma}_{k+1} \mathbf{H} \mathbf{R}_{0(k+1)} \mathbf{H}^T + \mathbf{R}_{\theta(k+1)}]^{-1}.$$

Особенностями реализации данного адаптивного ФК являются:

1) невязки координат для обнаружения маневра необходимо определять в прямоугольной системе координат (СК). Для этого при пересчете оценки вектора наблюдения $\hat{\theta}_{(k+1)}$ из полярной СК в прямоугольную $\hat{\theta}_{xz(k+1)}$ применяется вектор-функция $\mathbf{h}_{\theta_{xz}}(\theta)$ [5]:

$$\hat{\theta}_{(k+1)} = \hat{\theta}_{x_{(k+1)}} = \left\| \begin{matrix} \hat{x}_{f(k+1)} \\ \hat{z}_{f(k+1)} \end{matrix} \right\| = \mathbf{h}_{\theta_{xz}}(\theta) = \left\| \begin{matrix} \hat{r}_{(k+1)} \cos(\hat{\beta}_{(k+1)}) \\ \hat{r}_{(k+1)} \sin(\hat{\beta}_{(k+1)}) \end{matrix} \right\|.$$

Отсюда вектор невязок (1) будет иметь вид:

$$\bar{\Delta}_{\theta_{(k+1)}} = \bar{\Delta}_{x_{(k+1)}} = \left\| \begin{matrix} \hat{x}_{f(k+1)} - \hat{x}_{0(k+1)} \\ \hat{z}_{f(k+1)} - \hat{z}_{0(k+1)} \end{matrix} \right\|, \quad (3)$$

где $\hat{x}_{0(k+1)}$, $\hat{z}_{0(k+1)}$ – экстраполированные значения координат ЛА;

2) матрицу ошибок наблюдения $\mathbf{R}_{\theta_{(k+1)}}$ необходимо определять в прямоугольной СК.

Для этого используют выражения [5]:

$$\mathbf{R}_{\theta_{(k+1)}} = \mathbf{R}_{x_{(k+1)}} = \left\| \begin{matrix} \sigma_r^2 \cos^2(\beta) + r^2 \sigma_\beta^2 \sin^2(\beta) & \sin(\beta) \cos(\beta) (\sigma_r^2 - r^2 \sigma_\beta^2) \\ \sin(\beta) \cos(\beta) (\sigma_r^2 - r^2 \sigma_\beta^2) & \sigma_r^2 \sin^2(\beta) + r^2 \sigma_\beta^2 \cos^2(\beta) \end{matrix} \right\|, \quad (4)$$

здесь матрица $\beta = \hat{\beta}_{(k+1)}$, $r = \hat{r}_{(k+1)}$.

В выражении (2) матрица статического пересчета $\mathbf{H}$ будет равна [3]:

$$\mathbf{H} = \left\| \begin{matrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{matrix} \right\|;$$

3) для обеспечения реакции чувствительности фильтра к маневру длина окна анализа не должна превышать 5...7 обзоров.

2. *Адаптивный дискретный ФК с коррекцией результирующей оценки параметра.* В данной модификации к результирующей оценке вектора состояния $\hat{\alpha}_{u_{(k+1)}}$ вводится *аддитивная поправка* $u_{(k+1)}$ [1, 5, 7]:

$$\hat{\alpha}_{u_{(k+1)}} = \hat{\alpha}_{k+1} + \mathbf{u}_{k+1}. \quad (4)$$

Поправка $u_{(k+1)}$ минимизирует невязку $\eta_{k+1} = \hat{\theta}_{k+1} - \mathbf{H} \hat{\alpha}_{u_{(k+1)}}$ текущей и результирующей оценок вектора измеряемых параметров на $(k+1)$ -м шаге фильтрации.

Оптимизация выбора поправки [2, 7, 8, 9]. С целью оптимизации выбора поправки $u_{(k+1)}$ вводят:

- матрицу стоимости невязок коррекции $\mathbf{S}_{\eta_{(k+1)}}$
- матрицу стоимости затрат на коррекцию $\mathbf{S}_{u_{(k+1)}}$
- сумму квадратичных стоимостей невязок коррекции и затрат на коррекцию на $(k+1)$ -м шаге $\mathbf{r}_{k+1} = \eta_{(k+1)}^T \mathbf{S}_{\eta_{(k+1)}} \eta_{(k+1)} + \mathbf{u}_{(k+1)}^T \mathbf{S}_{u_{(k+1)}} \mathbf{u}_{(k+1)}$.

Можно минимизировать определяемые суммарные потери, для этого приравнивают к нулю производную по $\mathbf{u}_{(k+1)}^T$ и находят: $\mathbf{u}_{(k+1)} = \Delta \mathbf{K}_{u_{(k+1)}} (\mathbf{E} - \mathbf{H} \mathbf{K}_{k+1}) (\hat{\theta}_{k+1} - \mathbf{H} \hat{\alpha}_{0(k+1)})$, где $\Delta \mathbf{K}_{u_{(k+1)}} = (\mathbf{H}_{k+1}^T \mathbf{S}_{\eta_{(k+1)}} \mathbf{H}_{(k+1)} + \mathbf{S}_{u_{(k+1)}})^{-1} \mathbf{H}_{k+1}^T \mathbf{S}_{\eta_{(k+1)}}$.

Корректирующая поправка прямо пропорциональна величине невязки. Матричный весовой коэффициент $\Delta \mathbf{K}_{u_{(k+1)}}$ учитывает соотношение стоимостей погрешности измерения и управления, неодинаковое для различных составляющих вектора состояния $\alpha_{(k+1)}$ на разных шагах фильтрации.

Особенности реализации данного адаптивного ФК:

1) матрица стоимости невязок коррекции соответствует матрице ошибок наблюдения в прямоугольной СК [5]:

$$\mathbf{S}_{\eta(k+1)} = \begin{bmatrix} \sigma_r^2 \cos^2(\beta) + r^2 \sigma_\beta^2 \sin^2(\beta) & \sin(\beta) \cos(\beta) (\sigma_r^2 - r^2 \sigma_\beta^2) \\ \sin(\beta) \cos(\beta) (\sigma_r^2 - r^2 \sigma_\beta^2) & \sigma_r^2 \sin^2(\beta) + r^2 \sigma_\beta^2 \cos^2(\beta) \end{bmatrix};$$

где $\beta = \hat{\beta}_{(k+1)}$, $r = \hat{r}_{(k+1)}$.

2) матрица стоимости затрат на коррекцию будет иметь вид:

$$\mathbf{S}_{u(k+1)} = \begin{bmatrix} S_u & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_u & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_u & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_u \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}_{u(k+1)} = \begin{bmatrix} S_u & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_u & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_u & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_u \end{bmatrix},$$

где S_u – некоторое фиксированное число (при моделирование оно составляло 0,0017);

3) корректировка осуществляется только по положению.

3. *Адаптивный многомодельный ФК ПМД с коммутируемой структурой.* В зарубежной литературе обозначается как Tracking scheme with Input Estimation (IE) [1, 10]. Элементами фильтров с коммутируемой структурой (рис. 1) являются обнаружители (распознаватели) маневра, основанные как на использовании не только его траекторных [2–5], но и сигнальных признаков [11, 12].

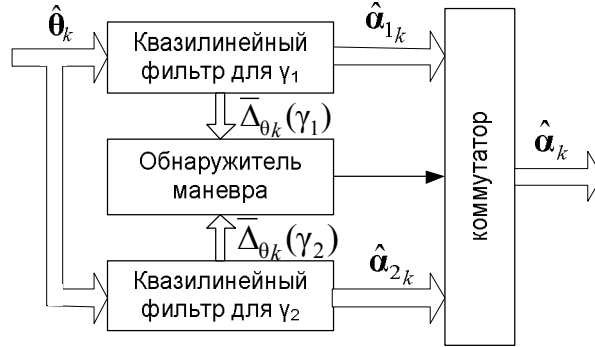


Рис. 1. Структурная схема адаптивного многомодельного ФК ПМД с коммутируемой структурой

Траекторными признаками маневра являются: невязка прогноза параметра (соответствует (1)); оценки составляющих ускорений [5]; скалярные коэффициенты вида (2); элементы оценочного вектора корректирующих поправок $\mathbf{u}_{(k+1)}$ вида (4); апостериорные вероятности гипотез моделей движения ЛА [1, 3, 4].

Сигнальные признаки маневра включают: ширину спектра флуктуаций при квазинепрерывном и непрерывном когерентном излучении, изменяющемся в процессе поворота ЛА [12]; интервал между элементами («гармониками») спектра при квазинепрерывном и непрерывном когерентном излучении, изменяющемся при изменении скорости вращения вала турбины или компрессора двигателя [11, 12]; форму дальностного портрета при широкополосном когерентном излучении, быстро изменяющемся при повороте ЛА [13].

Коммутация структуры позволяет избежать постоянного включения цепей коррекции, что снижает флуктуационные ошибки в отсутствие маневра цели, хотя одновременно снижает и оперативность коррекции [14].

Особенности реализации адаптивного многомодельного ФК ПМД с коммутируемой структурой:

- 1) каждый ФК настроен на свою модель входного воздействия;
- 2) в обнаружителе маневра сопоставляются усредненные невязки фильтров вида (3); в качестве результата измерения используется выход фильтра с наименьшей невязкой;
- 3) не рекомендуется увеличивать число ФК, работающих параллельно более 4.

Для моделирования было синтезировано устройство, в коммутации которого находилось два ФК – первого и второго порядков с СКО случайного маневра равными 0,001 м/с² и

0,00077 м/с³. Обнаружитель маневра переключался на ФК с наименьшим значением усредненной невязки, вычисленной согласно выражению (3).

Математическое моделирование

Комплекс математического моделирования. Для проведения сопоставительного моделирования ошибок измерений рассмотренных модификаций адаптивных ФК был разработан комплекс математического моделирования. Данный комплекс позволяет: сформировать входное воздействие в виде суммы задающего и возмущающего воздействия. Задающее воздействие представляло собой различные виды движения ЛА: равномерное прямолинейное, равноускоренное прямолинейное и разворот. Возмущающее воздействие соответствовало ошибкам первичных измерений в двухкоординатной РЛС кругового обзора с периодом обзора 5 с. Вектор наблюдаемых параметров θ включал разовые оценки радиальной дальности и азимута ЛА ($\sigma_r^2=50$ м, $\sigma_\beta^2=15^\circ$).

Показатели качества. В качестве показателя качества модификаций ФК была выбрана СКО суммарной ошибки измерения местоположения $\Delta_\Sigma(k)$, которое на каждом обзоре вычислялось согласно выражению [2, 3]:

$$\Delta_\Sigma(k) = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{оп}} - 1} \sum_{j=1}^{N_{\text{оп}}} ([x_{Tj}(k) - x_{\Phi j}(k)]^2 + [z_{Tj}(k) - z_{\Phi j}(k)]^2)},$$

где $N_{\text{оп}}$ – количество проведенных опытов (опыт – результат наблюдения всей траектории), j – номер опыта, $x_{Tj}(k), z_{Tj}(k)$ – истинные значения координат ЛА, k – номер шага наблюдения, $x_{\Phi j}(k), z_{\Phi j}(k)$ – фильтрованные значения координат.

В ходе моделирования проведено 5000 опытов для каждого модельного эксперимента.

Результаты моделирования. Было проведено два модельных эксперимента.

Модельный эксперимент №1 (см. рис. 2). ЛА находился на дальности 100 км от РЛС (начальные значения курса и азимута – $\alpha=30^\circ$; $\beta=60^\circ$ соответственно). ЛА двигался с 1-го по 30-ый и с 61-го по 100-ый шаг прямолинейно с постоянной скоростью равной 720 км/ч. С 30-го по 60-ый шаг ЛА совершал разворот в горизонтальной плоскости с нормальной перегрузкой $n_y = 1,4$. Для ФК при косвенных измерениях 1-го порядка такое изменение модели движения приведет к увеличению динамической ошибки и, как результат, к срыву сопровождения. Как видно из рис. 2, все рассматриваемые модификации адаптивных ФК позволяют избежать данного эффекта. Наиболее эффективными в таких условиях наблюдения являются ФК с коммутлируемой структурой и ФК с коррекцией полосы пропускания. Худшие показатели в точности (проигрыш до 50%) имеет ФК с коррекцией результирующей оценки.

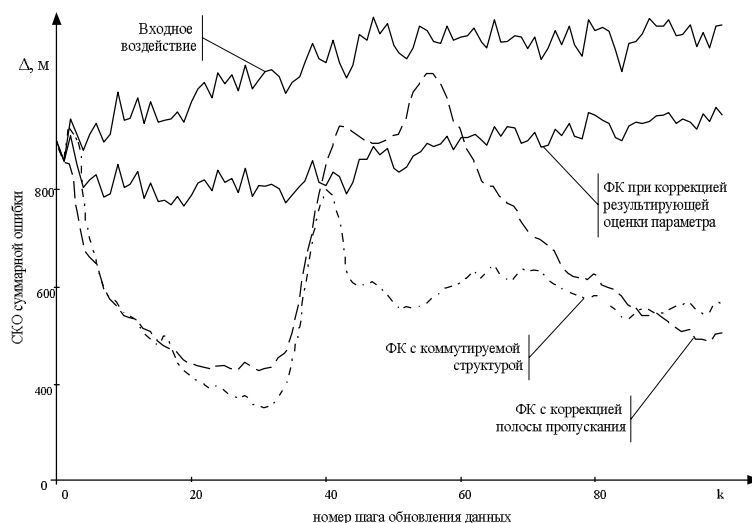


Рис. 2. Результаты моделирования 1-го модельного эксперимента

Модельный эксперимент №2 (см. рис. 3). Начальные координаты ЛА соответствуют модельному эксперименту 1. Моделировалось прямолинейное равноускоренное движение ЛА на всем участке трассы с ускорением 1 м/с^2 . При таких условиях наблюдения наиболее эффективной является модификация ФК с коммутируемой структурой, до 25% точности ей проигрывает ФК с коррекцией полосы пропускания, до 40% – ФК с коррекцией результирующей оценки.

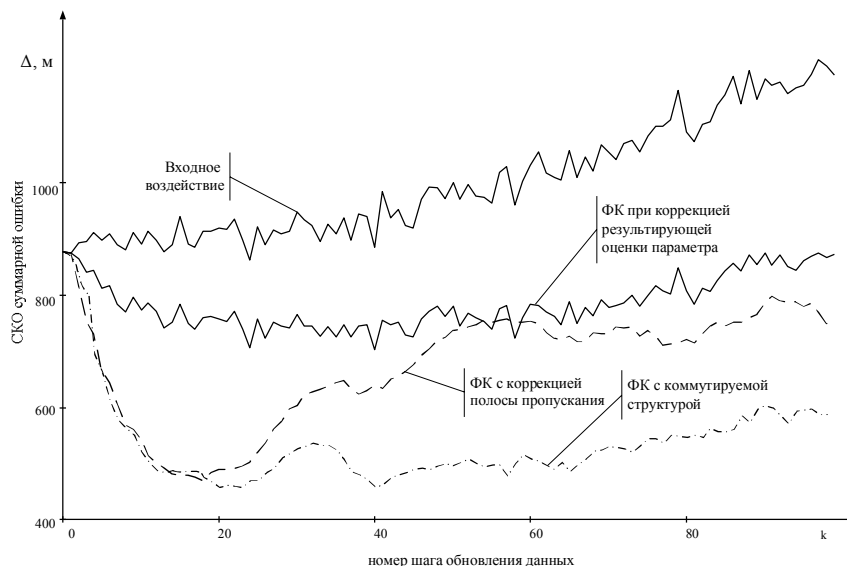


Рис.3. Результаты моделирования 2-го модельного эксперимента

Заключение

В ходе проведенных исследований были выявлены особенности расчетов и построений модификаций адаптивных дискретных ФК при наблюдении полярных координат и фильтрации прямоугольных. Все особенности перечислены в первой части статьи, отдельно для каждого ФК. Во второй части проанализировано качество измерения координат ЛА в различных модификациях адаптивных дискретных ФК. Все алгоритмы адаптивной фильтрации позволяют снизить значение динамической ошибки при маневре ЛА.

На основании проведенного математического моделирования можно выработать следующие рекомендации по практическому применению рассмотренных модификаций адаптивных ФК:

- для предотвращения срыва сопровождения при возникновении динамической ошибки необходимо введение коррекции (адаптации);
- наиболее эффективными являются ФК с коррекцией полосы пропускания и ФК с коммутируемой структурой;
- использование ФК с коррекцией результирующей оценки параметра целесообразно лишь при интенсивном маневрировании.

FEATURES OF ADAPTIVE EXTENDED KALMAN FILTER IMPLEMENTATIONS

P.A. KHMARSKI, A.S. SOLONAR

Abstract

Features of adaptive extended Kalman filter implementations are considered. Recommendations about practical application of adaptive extended Kalman filter modifications are listed.

Список литературы

1. Бар-Шалом Я., Ли Х.Р. Траекторная обработка. Принципы, способы и алгоритмы. М., 2011.
2. Канашенков А.И., Меркулов В.И. Авиационные системы радиоуправления. Принципы построения систем радиоуправления. Основы синтеза и анализа. М., 2003.
3. Кузьмин С.З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. М., 1974.
4. Фарина А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей. М., 1993.
5. Ширман Я.Д., Гориков С.А., Москвитин С.В., и др. // Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Издание 2-е переработ. и доп. М., 2007.
6. Blackman S., Popoli R. // Design and Analysis of Modern Tracking Systems. Boston&London. Artech House, 1999.
7. Меркулов В.И. // М. Радиотехника. №8. 2001. С. 88–93.
8. Меркулов В.И. // М. Радиотехника. 1999. №2. С. 79–80.
9. Меркулов В.И., Дрогалин В.В. // М. ИПРЖР. Вып.1. 1999.
10. Kirubarajan T., Bar-Shalom Y., Pattipati K.R., et.al. // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. Vol. 36, №1. 2000. P. 26–45.
11. Гориков С.А., Крикливый М.В., Солонар А.С., и др. //М. Радиотехника. 2005. №10. С. 42–48.
12. Слюсарь Н.М. Эффект вторичной модуляции радиолокационных сигналов. Минск: ВА РБ, 2005.
13. Chen V., Ling H. Time-Frequency transform for radar imaging and signal analysis. Boston&London, 2002.
14. Гориков С.А., Солонар А.С. // М. Радиотехника. 2006. №6. С. 73–77.