

УДК 621.396.98

И.В. БАРЫШЕВ, А.В. МАЗУРЕНКО, РАДВАН М. ДЖАВАД

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ВЛИЯНИЕ МАНЕВРЕННОСТИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
НА РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СЛЕДЯЩИЕ СИСТЕМЫ.
ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Рассматривается влияние сверхманевренности летательных аппаратов на радиотехнические системы слежения и сопровождения воздушных объектов, анализируются факторы, приводящие к срыву сопровождения. Рассматриваются общие направления решения задачи бессрывного сопровождения высокоманевренных воздушных объектов. Осуществлена постановка частных задач перспективных исследований и выбор методов их решения.

сверхманевренные летательные аппараты, радиотехнические следящие системы, траекторное управление наблюдением, оценивание высших производных дальности и угловых координат, многоконтурные системы радиуправления

Введение

Развитие теории нестационарной динамики и применение более совершенных систем автоматического управления, обладающих более высокой степенью адаптации к условиям полета, привели к существенному прогрессу авиационной техники и созданию нового типа летательных аппаратов (ЛА), так называемых сверхманевренных летательных аппаратов (СМЛА) [1 – 3].

Сверхманевренными могут считаться самолеты, в которых за счет развитой механизации крыла, специальных органов непосредственного управления подъемной и боковой силами и применения высокоэнергетических двигателей с управляемым вектором тяги возможно выполнение маневров с чрезвычайно сложными пространственными эволюциями [4].

Следует отметить, что свойством сверхманевренности обладают не только самолеты боевой авиации, но и беспилотные летательные аппараты (БПЛА), используемые, в том числе, и для решения различных народно-хозяйственных задач (например, дистанционного зондирования Земли, картографирования, экологического мониторинга и т.д.).

СМЛА имеют возможность совершать качест-

венно новые элементарные движения в процессе полета (рис. 1). Использование органов непосредственного управления аэродинамическими силами дает возможность практически скачкообразно менять пространственное положение ЛА, без изменения ориентации его строительных осей (рис. 1, а). С другой стороны СМЛА могут изменять положение строительных осей в пространстве без изменения направления полета (рис. 1, б). СМЛА также способны осуществлять полет с углами атаки до 90° без сваливания в штопор (рис. 1, в). Высокая тяга двигателей позволяет быстро набирать скорость в любом пространственном положении (рис. 1, г). Совокупность этих элементарных движений позволяет реализовать большое число маневров с очень сложными пространственными эволюциями [3, 4].

Качественное улучшение маневренных свойств современных летательных аппаратов приводит к существенному влиянию на показатели эффективности не только радиотехнических следящих систем (РТСС), осуществляющих сопровождение СМЛА, но и бортовых РТСС, установленных на сверхманевренных воздушных носителях [5, 6]. РТСС, основой которых являются радиолокационные следящие измерители, как правило, являются составной

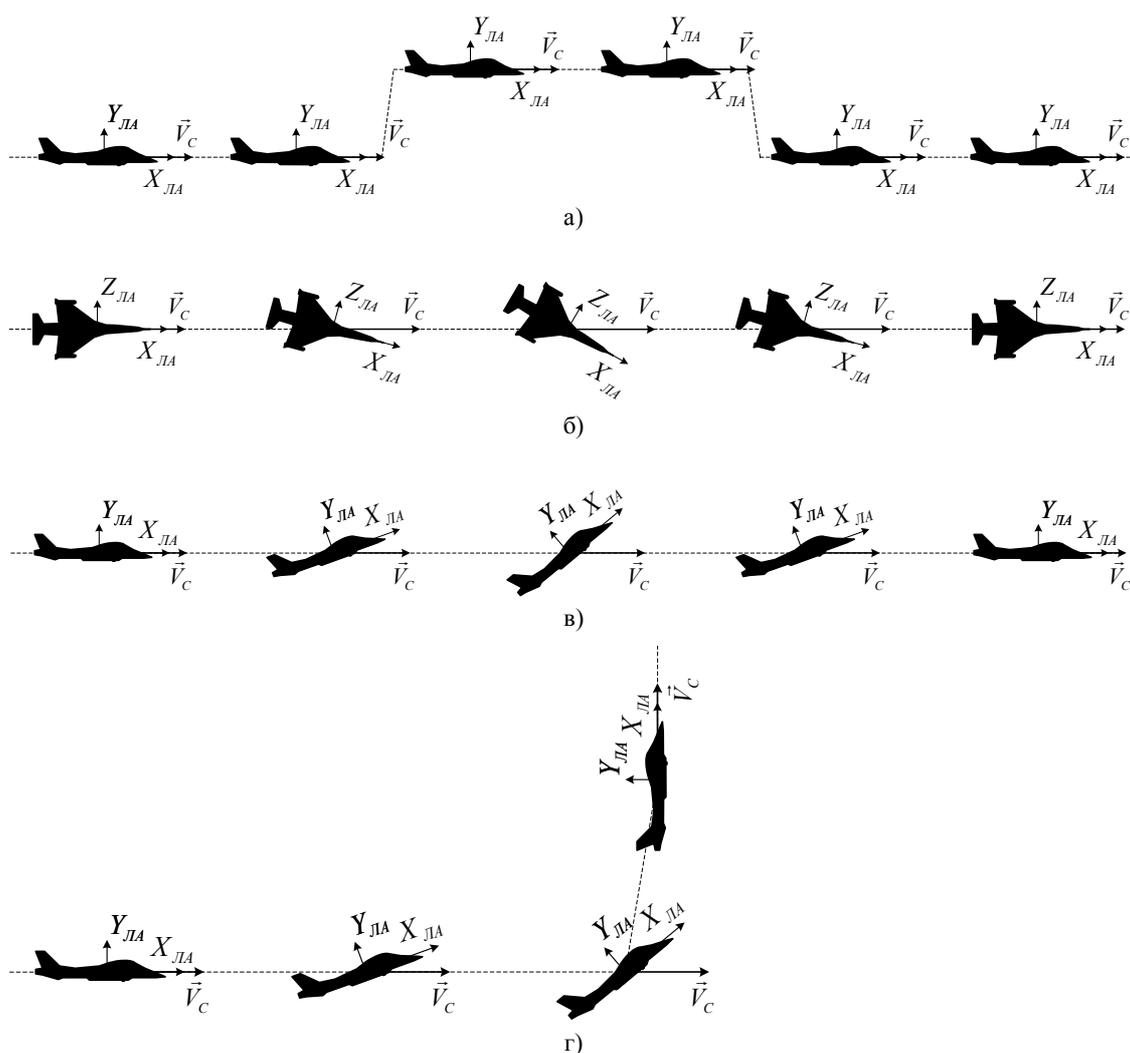


Рис. 1. Элементарные движения сверхманевренных летающих аппаратов

частью более сложных иерархических систем: радиотехнических систем управления и наведения летательных аппаратов, систем управления воздушным движением, систем обнаружения и других. Основное назначение РТСС это осуществление траекторных измерений – формирование оценок дальности, скорости, угловых координат объекта слежения (цели).

Пространственные эволюции СМЛА могут как ухудшать, когда они являются непрогнозируемыми [7], так и улучшать показатели эффективности РТСС, реализуя концепцию траекторного управления наблюдением [8, 9].

Непредсказуемое (не учитываемое) выполнение маневра, при котором появляется третья и более

высокие производные дальности, скорости и угловых координат, а также сброс скорости до околонулевых значений и зависание в воздухе приводят к срыву сопровождения СМЛА.

Полет с регулярными скачкообразными изменениями пространственного положения (рис. 1, а) приводит к появлению эффекта мерцания, по своему смыслу аналогичному наличию мерцающих помех. Следует, однако, отметить, что такой полет в течение длительного времени приводит к дискомфорту экипажа и на практике может применяться лишь в БПЛА.

При реализации концепции траекторного управления наблюдением выполнение специальных программируемых маневров позволяет улучшить усло-

вия радиолокационного наблюдения объектов сопровождения за счет увеличения зоны обзора, улучшения разрешающей способности объектов в группе, повышения помехозащищенности от разнесенных в пространстве источников помех [8, 9] и т.д.

Цель настоящей статьи – осуществить анализ влияния сверхманевренности современных ЛА на радиотехнические следящие системы и постановку задач перспективных исследований для повышения эффективности РТСС и систем более высокого уровня иерархии, в составе которых они используются.

Влияние сверхманевренности летательных аппаратов на радиотехнические следящие системы

В общем случае сверхманевренность влияет как на этап первичной, так и на этап вторичной обработки сигналов [4].

Под этапом первичной обработки будем понимать совокупность процедур поиска, обнаружения, распознавания объектов и формирование первичных измерений дальности, скорости сближения (доплеровской частоты) и угловых координат.

Под этапом вторичной обработки – совокупность алгоритмов формирования оценок всех фазовых координат, в зависимости от назначения РТСС, необходимых для управления (наведения) СМЛА или управления исполнительными устройствами РТСС СМЛА.

Поскольку, как отмечалось выше, основой РТСС являются радиолокационные следящие измерители, рассмотрим влияния сверхманевренности ЛА на показатели эффективности систем первичной и вторичной обработки сигналов РЛС.

Структура радиолокационных измерителей РТСС зависит от их назначения, вида и характеристик используемых радиолокационных сигналов, а также методов обработки принятых сигналов. Большинство из схем все же имеют общие принципы построения, поэтому влияние сверхманевренности на РЛС можно обобщить на примере импульсной когерентной РЛС (рис. 2).

Пространственные эволюции СМЛА, осуществляемые, в основном, в неустановившемся движении, сопровождаются появлением поперечных и продольных ускорений со сложными законами их изменений, что приводит к дополнительной частотной

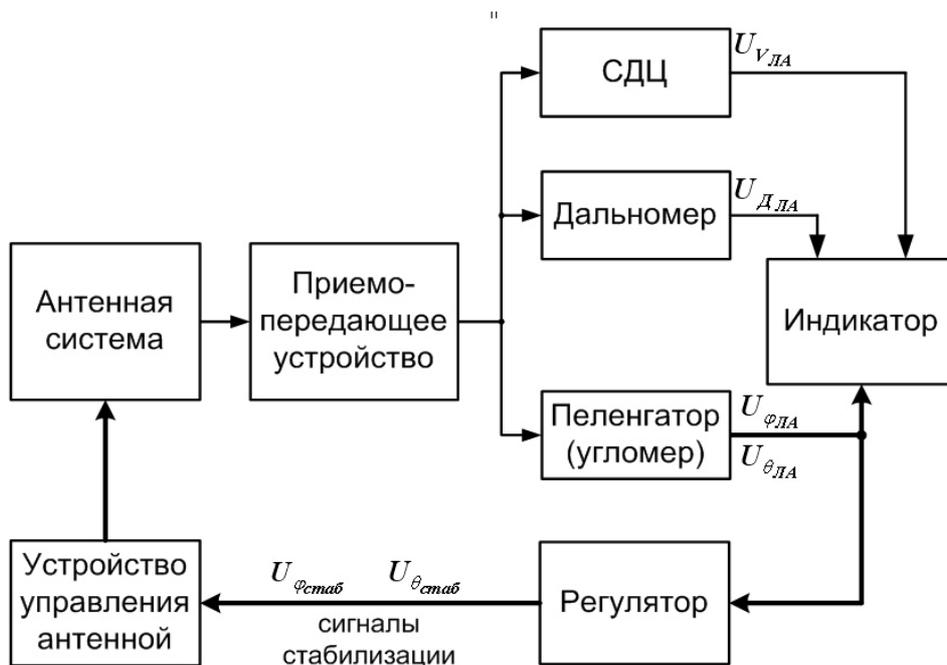


Рис. 2. Обобщенная структурная схема импульсной когерентной РЛС

модуляции (ЧМ) отраженных сигналов и расширению их спектров с соответствующим уменьшением спектральной плотности. В результате ухудшаются условия согласованной фильтрации в процессе первичной обработки сигналов. Даже движение с постоянным ускорением приводит к появлению линейной ЧМ с достаточно большой девиацией частоты [10, 11]. Поступление сигналов с расширенным спектром в схему селекции движущихся целей (СДЦ) приводит к его попаданию в несколько доплеровских фильтров. С учетом уменьшения спектральной плотности это приводит к ухудшению условий обнаружения и снижению отношения сигнал/шум (С\Ш) со всеми вытекающими последствиями: снижению вероятности правильного обнаружения и возрастанию вероятности пропуска объекта. Кроме того, при небольшой дальности до объекта, когда отраженный сигнал имеет большую мощность, размывание спектра по нескольким фильтрам может привести к принятию ложного решения о наличии нескольких объектов. В свою очередь, при обнаружении группы объектов факт размывания спектра приводит к ухудшению разрешающей способности по скорости и снижению достоверности правильного определения количественного состава группы.

Влияние сверхманевренности цели на этапе вторичной обработки может приводить к срыву сопровождения. При интенсивном маневрировании появляются производные отслеживаемых фазовых координат (дальности, скорости, углового положения), порядок которых превышает порядок астатизма следящих измерителей. Это обстоятельство обуславливает нарастание динамических ошибок. В такой ситуации при ограниченной ширине дискриминационных и пеленгационных характеристик радиолокационных измерителей срыв сопровождения становится достаточно вероятным. Поскольку в существующих одноконтурных стационарных следящих системах, в которых чувствительный элемент, регулятор

(фильтр) и исполнительные органы включены последовательно, требования точности противоречат требованиям устойчивости, то разрешить при их использовании проблему высокоточного бесрывного сопровождения СМЛА практически невозможно.

Для устранения указанного недостатка нужно использовать более сложные законы управления подсистемами следящих систем, требующие для своей реализации информацию большего объема. Анализ алгоритмов траекторного управления показывает, что в рассматриваемом случае наряду с традиционными оценками дальности, скорости сближения и углов нужно как минимум формировать и оценки ускорений цели по дальности и углу [6].

Таким образом, для уменьшения влияния сверхманевренности воздушных целей на алгоритмы вторичной обработки информации в РТСС требуется расширение вектора измеряемых первичных параметров, что в свою очередь приводит к изменению алгоритмов первичной обработки сигналов и требует совместной оптимизации процедур первичной и вторичной обработки.

Постановка задач исследований и выбор методов их решения

В общем случае РТСС, как замкнутую систему, можно рассматривать с позиций теории управления (рис. 3).

Здесь дискриминатор – это устройство, осуществляющее оценивание вектора фазовых координат системы $x = [U_{\dot{A}}, U_{\ddot{A}}, U_{\dot{\varphi}_A}, U_{\ddot{\varphi}_A}]$ по сигналу $z(t)$, который связан с измеряемым вектором параметров λ уравнением:

$$z(t) = s(\lambda, t) + \varepsilon(t), \quad (1)$$

где $\varepsilon(t)$ – помеха; $\lambda = C^T x$;

C^T – некоторая матрица преобразования информационных параметров сигнала в фазовые координаты системы.

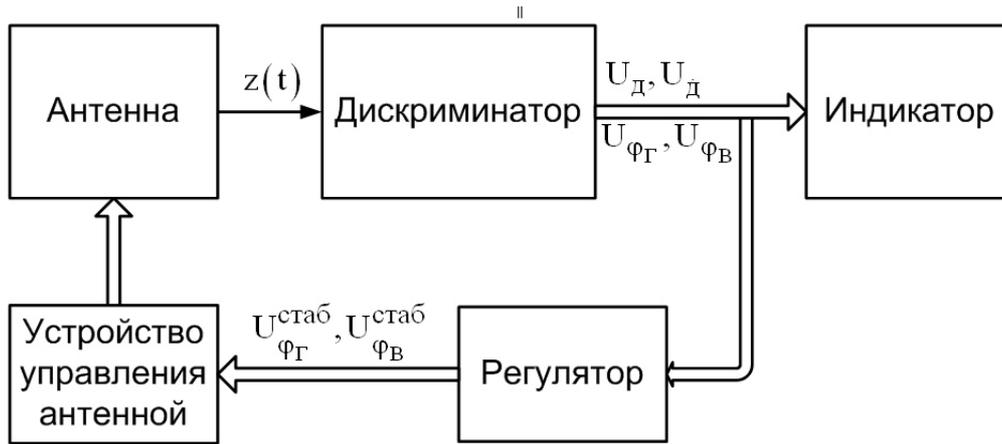


Рис. 3. Обобщенная структура РТСС

Из анализа влияния сверхманевренности воздушных объектов на РТСС следует, что для повышения их эффективности нужно решить две основные задачи: совершенствование алгоритмов управления на основе расширенного вектора измеряемых параметров (этап вторичной обработки), а также повышение точности основных и получение дополнительных (расширенного вектора) оценок фазовых координат объекта.

Из-за большого числа оцениваемых фазовых координат системы совместное решение оптимизационных задач одновременно на всех этапах обработки наталкивается на трудности аналитического характера. Решение нам видится в плоскости квазиоптимальных систем, когда оптимизационные задачи решаются на каждом этапе отдельно. Таким образом, всю задачу можно разбить на несколько подзадач (провести декомпозицию задачи синтеза): оценивание дальности до цели и ее производных, оценивание угловых координат объекта и их производных, синтез алгоритмов управления и прогнозирования для подсистем РТСС, синтез алгоритмов траекторного управления (для случая когда РТСС используется в составе более сложной иерархической системы – системы управления или наведения, например).

Нужно подчеркнуть, что в силу случайного характера рассмотренных выше ускорений практиче-

ски не возможно создать адаптивные системы первичной обработки сигналов, основанные на использовании согласованных фильтров. Перспективным направлением снижения этих недостатков, на наш взгляд, является переход к следящим измерителям первичных фазовых параметров. В этом случае можно предложить следующую схему дискриминатора (рис. 4).

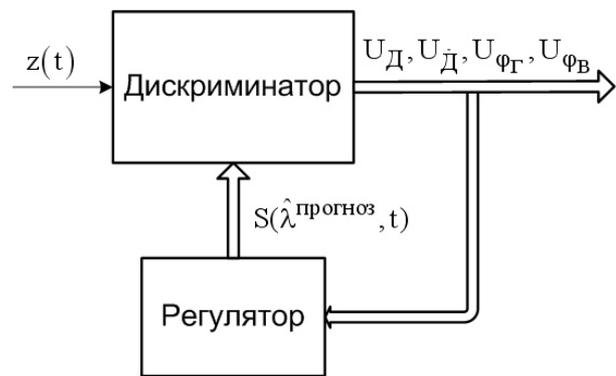


Рис. 4. Структура следящего дискриминатора РТСС

Дискриминатор вырабатывает величину невязки между информационными параметрами принимаемого сигнала λ в текущий момент времени и прогнозом $\hat{\lambda}^{\text{прогноз}, t}$, выработанным регулятором в предыдущий момент времени. Невязка в свою очередь является входным сигналом регулятора. Оптимальное оценивание величины невязки может осуществляться, например, по методу максимального правдоподобия [12].

Устранение динамических ошибок управления и прогнозирования, которые имеют место в случае использования одноконтурных схем регуляторов, возможно за счет перехода к так называемым многоконтурным измерителям, в которых требования точности и устойчивости обеспечиваются различными контурами, реализуя высокие показатели систем в целом. Перспективным направлением синтеза многоконтурных систем является использование алгоритмов статистической теории оптимального управления [13] на основе квадратичных критериев качества вида:

$$I = M \left\{ \left[x_T(t_k) - x_y(t_k) \right]^T Q \left[x_T(t_k) - x_y(t_k) \right] + \int_0^{t_k} \left[x_T(t) - x_y(t) \right]^T L \left[x_T(t) - x_y(t) \right] dt + \int_0^{t_k} u^T(t) K u(t) dt \right\}. \quad (2)$$

Здесь x_T и x_y – соответственно n -мерные векторы требуемых и управляемых фазовых координат системы управления в текущий момент времени t и в момент окончания управления t_k ; u – r -мерный вектор сигналов управления ($r \leq n$); L и Q – неотрицательно определенные матрицы штрафов за текущую точность $x_T(t) - x_y(t)$ и точность в момент окончания управления; K – положительно определенная матрица штрафов за величину сигналов управления; M – оператор математического ожидания (необходимость выполнения этой операции обусловлена тем, что компоненты векторов x_T и x_y в общем случае могут представлять собой случайные величины).

Первое слагаемое в (2) называется терминальным членом. Оно представляет собой сумму взвешенных дисперсий ошибок сопровождения в момент окончания работы системы.

Второе слагаемое представляет интегральную взвешенную квадратичную оценку точности функ-

ционирования системы за все время работы. При прочих равных условиях система сопровождения функционирует тем точнее, чем меньше первое и второе слагаемые.

Третье слагаемое представляет собой взвешенную энергию, затрачиваемую для реализации сигналов управления $u(t)$ за все время работы. Это слагаемое позволяет оценить экономичность системы сопровождения. Чем оно меньше, тем экономичнее система.

Коэффициенты всех матриц штрафов назначаются исходя из важности соответствующих ошибок или энергоемкости сигналов управления для всего процесса сопровождения.

Использование такого критерия позволяет оценить эффективность следящей системы за все время ее функционирования [13].

К вышесказанному можно добавить и еще одно направление, позволяющее решить задачу бесрывного высокоточного сопровождения СМЛА, основанное на использовании адаптивных следящих измерителей. В таких измерителях в зависимости от ситуации могут изменяться как структура, так и параметры следящих подсистем [14].

Заключение

В системах автоматического сопровождения воздушных объектов выполнение интенсивного маневра приводит к появлению ошибок на всех этапах работы: при формировании первичных измерений; при завязке траекторий; экстраполяции положения объектов в промежутке между поступлениями отраженных сигналов, идентификации результатов радиолокационных измерений; коррекции результатов экстраполяции по идентифицированным измерениям и ранжированию объектов по степени их важности.

В настоящей статье авторы попытались проанализировать состояние вопроса и отразить свой взгляд на пути повышения эффективности радио-

технических следящих систем применительно к задаче сопровождения высокоманевренных летательных аппаратов.

На наш взгляд перспективными направлениями исследований являются: решение задачи оценивания расширенного вектора состояний системы с использованием следящих адаптивных измерителей, синтез алгоритмов управления подсистемами и прогнозирования состояний системы, а также синтез алгоритмов траекторного управления летательными аппаратами на основе многоконтурных систем управления. Решению указанных задач будут посвящены дальнейшие исследования в этой области.

Литература

1. Бабич В.К. Сверхманевренность истребителя // Зарубежное военное обозрение. – 1994. – № 2. – С. 53-65.
2. Баранов Н., Ивенин И., Каневский М. и др. Сверхманевренность – средство побеждать // Авиационная панорама. – 1999. – № 1. – С. 35-49.
3. Бабич В.К., Баханов Л.Е. и др. Авиация ПВО России и научно-технический прогресс. Боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра / Под ред. Е.А. Федосеева. – М.: Дрофа, 2001. – 182 с.
4. Канащенков А.И., Меркулов В.И., Самарин О.Ф. Облик перспективных бортовых радиолокационных систем. Возможности и ограничения. – М.: ИПРЖР, 2002. – 176 с.
5. Максимов М.В., Горгонов Г.И. Радиоэлектронные системы самонаведения. – М.: Радио и связь, 1982. – 295 с.
6. Авиационные системы радиоуправления. Т. 2. Радиоэлектронные системы самонаведения / Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2003. – 391 с.
7. Викулов О.В., Добыкин В.Д., Дрогагин В.В. и др. Современное состояние и перспективы развития авиационных средств радиоэлектронной борьбы // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 1998. – № 12. – С. 81-89.
8. Григорьев Ф.Н., Кузнецов Н.А., Серебровский Л.П. Управление наблюдением в автоматических системах. – М.: Наука, 1986. – 256 с.
9. Викулов О.В. Траекторное управление наблюдением в активной радиолокационной системе самонаведения. // Научно-техническая серия «Радиолокация и радиометрия». – 1999. – № 1. – С. 12-17.
10. Аганин А.Г. Способ обнаружения маневрирующей воздушной цели // Радиотехника. – 1999. – № 4. – С. 26-33.
11. Кузьменков В.Ю. Способы и устройства современного измерения радиальной скорости и радиального ускорения // Радиотехника и электроника. – 1997. – Т. 42, № 12. – С. 22-29.
12. Фалькович С.Е. Оценка параметров сигнала. – М.: Сов. радио, 1979. – 336 с.
13. Авиационные системы радиоуправления. В 3-х томах. Т.1. Принципы построения систем радиоуправления. Основы синтеза и анализа / Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2003. – 192 с.
14. Первачев С.В., Перов А.И. Адаптивная фильтрация сообщений. – М. Радио и связь, 1991. – 160 с.

Поступила в редакцию 7.12.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.В. Печенин, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.