

К. ф.-м. и. В. А. ТАРАСОВ, Д. А. КРОПАЧЕВ

Украина, г. Одесса, СКБ "Молния"
E-mail: kpmo@farlep.net

Дата поступления в редакцию
14.08 2001 г.

Оппонент
к. т. и. В. В. ДАНИЛОВ (ДонГУ, г. Донецк)

РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ ПАССИВНОЙ ЗВУКОВОЙ ЛОКАЦИИ

Рассмотрены наиболее перспективные структуры алгоритмов первичной обработки сигналов в системах ПЗЛ. Представлена практически реализованная квазиоптимальная структура.

Традиционно в системах пассивной звуковой локации (ПЗЛ) [1] под алгоритмами первичной обработки (ПО) сигналов понимаются алгоритмы обнаружения и оценивания параметров полезных сигналов. Практически реализованные на сегодняшний день алгоритмы ПО сигналов в системах ПЗЛ, работающих в реальном масштабе времени, являются квазиоптимальными [2], т. е. классические оптимальные алгоритмы обнаружения и оценивания параметров полезных сигналов (или, в обобщенном виде, оптимальные алгоритмы различения сигналов) [3] упрощаются разработчиком с целью обеспечения их практической реализуемости в условиях ограниченности аппаратных и вычислительных ресурсов. При этом разработчики, как правило, жертвуют оптимальностью алгоритмов обнаружения. Это приводит к снижению вероятности правильного обнаружения и разрешающей способности. Алгоритмы же оценивания параметров полезных сигналов стремятся реализовать оптимальным образом.

Снижение вероятности правильного обнаружения и разрешающей способности ради практической реализуемости всегда принималось пользователем систем ПЗЛ, ибо изначальное предназначение систем ПЗЛ — разведка местоположения артиллерийских орудий, а выполнение боевой задачи, как правило, решается артиллерийской батареей или дивизионом (только в исключительных случаях — отдельным орудием), причем расход снарядов на одно орудие составляет 6 — 10. Снижение точности оценки параметров полезных сигналов недопустимо, ибо это приводит к снижению точности определения координат цели.

Главной задачей разработчика, создающего практически реализуемые алгоритмы ПО сигналов в системах ПЗЛ, остается эволюционное (по мере увеличения аппаратных и вычислительных ресурсов) приближение квазиоптимальных алгоритмов к оптимальным. На этом пути эволюционного развития в связи с быстрым ростом производительности универсальных вычислителей представляется целесообразным минимизировать аппаратную обработку, ограничив ее

задачи приемом сигналов, преобразованием их в цифровой вид, передачей их по линии связи и вводом в универсальный вычислитель. В связи с этим появляется возможность основной объем ПО сигналов в системе ПЗЛ переложить на универсальный вычислитель и реализовать ПО в основном на программном уровне. При таком подходе появление в распоряжении разработчика более мощных вычислительных средств позволяет реализовать новые структуры алгоритмов ПО, все более приближающиеся к оптимальным, путем изменения, в основном, только программно-математического обеспечения (ПМО) ПО сигналов в системах ПЗЛ.

В данной работе выделены перспективные для практической реализации структуры квазиоптимальных алгоритмов ПО сигналов в системах ПЗЛ и представлена практическая реализация квазиоптимальной ПО сигналов, реализованная, главным образом, в виде комплекса ПМО, работающего в реальном масштабе времени на универсальном вычислителе IBM PC 486.

Классическая теория обнаружения сигналов на фоне шумов однозначно определяет алгоритмы работы оптимальных обнаружителей, однако при этом случайные сигнальный и шумовой процессы должны описываться полностью априорно известными (вплоть до параметров) законами распределения. Рассматриваемый акустический сигнальный процесс — случайный нестационарный процесс, который пока не удастся описать полностью априорно известными законами распределения из-за сильной вариативности акустического канала распространения и недостаточности экспериментальных данных. Шумовой процесс в системах ПЗЛ — это ветровая помеха, которая близка к нормальной на участках ее стационарности, но не является белым шумом.

Обобщение классической теории оптимальных обнаружителей на случай априорной неопределенности, которое выполнено на основе результатов статистической теории распознавания образов, в итоге приводит к адаптивному обнаружению сигналов на фоне шумов [4], включающему процедуру обучения, которая в параметрическом случае сводится к оценке параметров сигнала и шума (а в общем, непараметрическом случае — к оценке законов их распределения), и процедуру собственно обнаружения, в которой вместо самих параметров сигнала и шума ис-

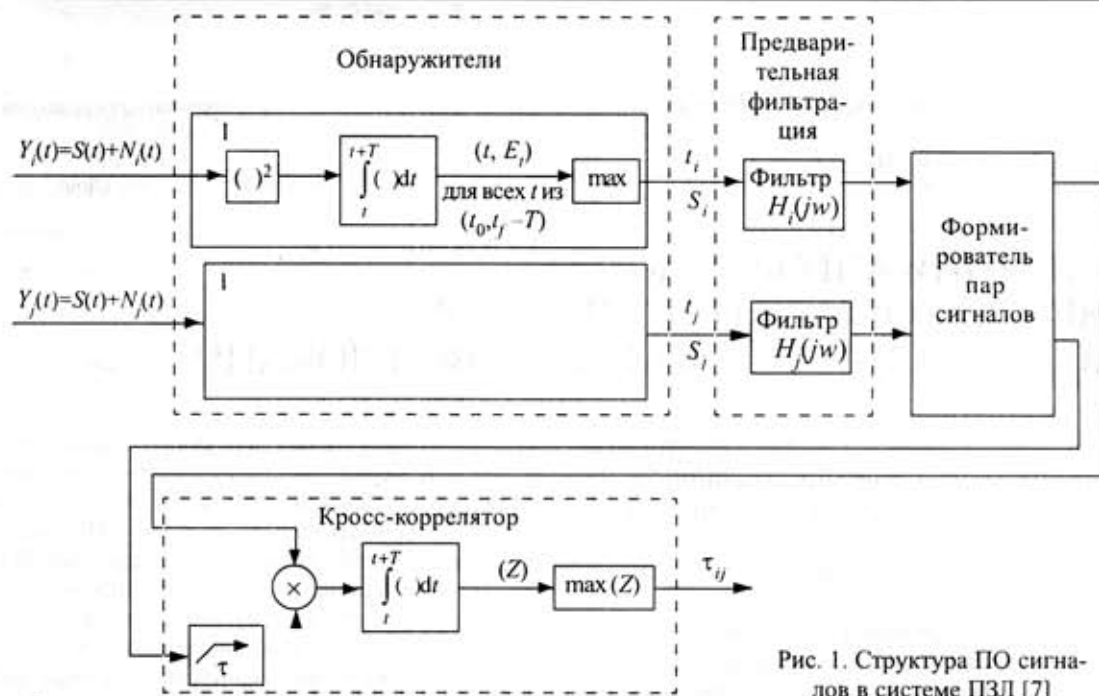


Рис. 1. Структура ПО сигналов в системе ПЗЛ [7]

пользуются их оценки, полученные во время обучения. Однако известные авторам практические реализации алгоритмов ПО сигналов в системах ПЗЛ представляют собой структуры алгоритмов, вытекающие из модификаций алгоритмов классических оптимальных обнаружителей (максимум функции правдоподобия (МФП)) при упрощающих предположениях относительно законов распределения сигнального и шумового процессов.

Так как главными оцениваемыми параметрами полезных сигналов для алгоритмов ПО сигналов в системах ПЗЛ являются моменты прихода и задержки сигналов на акустической базе, образуемой двумя пространственно разнесенными звукоприемниками, то наиболее содержательными представляются структуры алгоритмов, основанные на попытках разработчиков применить в системах ПЗЛ алгоритмы оценителя задержки сигналов по МФП либо их модификации, впервые представленные в работах [5, 6]. Основопологающей работой в этом направлении является [7], причем автор ограничился ссылкой на работу [5] как основу для построения структуры алгоритмов и, мотивируя необходимость упрощений отсутствием необходимых для реализации ресурсов, представил упрощенную практически реализуемую структуру алгоритмов (рис. 1). Представленная структура алгоритмов ПО сигналов в системах ПЗЛ основана на комбинации процедур обнаружителя (применен энергетический обнаружитель в скользящем временном окне, причем обнаружение ведется по максимуму полученных оценок энергии), предварительной фильтрации и кросс-коррелятора. (Здесь Y_i, \dots, Y_j — входные информационные потоки, E_i — оценки энергии в скользящем временном окне, S_i — выделенные сигналы, t_i — оценки моментов их прихода, t_{ij} — оценки их задержек на акустической базе).

Однако проведенные авторами статьи исследования показали, что главной принципиальной проблемой, с которой сталкивается разработчик, придерживающийся этого направления, является следующее.

Представленные в [5, 6] структуры алгоритмов оценителя задержки являются обобщенным кросс-коррелятором, основанным на комбинации процедур выбеливающей предварительной фильтрации и кросс-коррелятора (рис. 2, S — сигнал, N_1 и N_2 — шумы, τ — оценка задержки). Можно исключить из структур



Рис. 2. Оценитель задержки сигналов на основе обобщенного коррелятора

оптимального обнаружителя случайного сигнального процесса априорную информацию о сигнальном процессе путем совместной обработки приемной информации двух пространственно-разнесенных приемных каналов при основополагающем предположении, что сигнальный процесс одинаков на обоих приемниках, а также при предположениях, что сигнальный процесс не коррелирован с шумовыми процессами на приемниках, которые, в свою очередь, полагаются взаимно некоррелированными белыми шумовыми процессами. Однако это приводит к структуре обнаружителя на основе кросс-коррелятора. Обобщение структуры обнаружителя на основе кросс-коррелятора на случай небелых нормальных шумовых процессов приводит к структуре обнаружителя на основе комбинации процедуры выбеливающей предварительной фильтрации и кросс-коррелятора (рис. 3, Z_{Π} — пороговый уровень, H_1 — гипотеза, при кото-



Рис. 3. Обнаружитель сигналов на основе комбинации процедур предварительной фильтрации и кросс-коррелятора

рой $Y_1=S(t)+N_1(t)$ и $Y_2=S(t)+N_2(t)$, H_0 — гипотеза, при которой $Y_1=N_1(t)$ и $Y_2=N_2(t)$. Таким образом, структура оптимального обнаружителя отличается от структуры оптимального оценщика задержки наличием в структуре оптимального обнаружителя пороговых процедур, реализующих алгоритмы принятия решения об обнаружении. Пороговый уровень обнаружения определяется априорно ожидаемой энергией полезных сигналов, если не акцентировать внимания на непринципиальной для обсуждаемого случая необходимости приведения порогового уровня в соответствие с реализацией процедуры выбеливающей предварительной фильтрации.

Если строго придерживаться предположения об априорной неопределенности случайного сигнального процесса, из которой, в частности, следует априорная неопределенность энергий полезных сигналов, то становится ясным, что для оптимального обнаружителя на основе комбинации процедур предварительной фильтрации и кросс-коррелятора для рассматриваемого сигнального процесса нельзя определить пороговый уровень, обеспечивающий оптимальные характеристики обнаружителя. Поэтому разработчику приходится исключать из структуры алгоритмов ПО сигналов в системах ПЗЛ пороговые процедуры и вести обнаружение по максимуму взаимно корреляционной функции (ВКФ), при этом резко возрастает вероятность ложных обнаружений. Выход может быть найден либо на пути дополнения концепции комбинации процедур предварительной фильтрации и кросс-корреляции какой-либо новой идеей, либо на пути поиска допустимого упрощения априорного описания сигнального процесса.

Отметим, что в работе [7] автор отказался даже от проведения обнаружения по максимуму ВКФ и применил энергетический обнаружитель в скользящем временном окне, причем в обнаружителе отсутствуют пороговые процедуры (по тем же причинам, что описаны выше) и обнаружение ведется по максимуму полученных оценок энергии (рис. 1).

Как известно, структура энергетического обнаружителя вытекает из классических оптимальных алгоритмов обнаружения при следующих предположениях о сигнальном и шумовом процессах:

- случайный сигнальный процесс является стационарным нормальным с нулевым средним, он не коррелирован с шумовым процессом, достаточно широкополосен, и спектр его мощности допускает равномерную аппроксимацию;

шумовой процесс представляет собой белый шум.

Эти предположения о сигнальном и шумовом процессах применительно к системам ПЗЛ не соответствуют реальности, а исключение из структуры энергетического обнаружителя порогового устройства и ведение обнаружения по максимуму оценок энергии в скользящем временном окне приводит к росту ложных обнаружений.

В СКБ «Молния» были разработаны алгоритмы ПО сигналов в системах ПЗЛ на основе комбинации процедур предварительной фильтрации и кросс-коррелятора, реализованных в скользящем временном окне. Эти алгоритмы были воплощены в макете, представляющем собой многопроцессорный специализированный вычислитель. Проведенные исследования и испытания макета показали, что проблему ложных обнаружений можно решить дополнением концепции комбинации процедур предварительной фильтрации и кросс-корреляции идеей так называемой «пространственной» фильтрации ложных обнаружений, заключающейся в последовательном просеивании обнаружений на нескольких пространственно разнесенных независимых акустических базах (АБ) (рис. 4). Однако это приводит к резкому увеличению необходимых аппаратных и вычислительных ресурсов.

Анализ основных структур алгоритмов ПО сигналов в системах ПЗЛ позволил выделить наиболее перспективные структуры: структуру ПО на основе комбинации процедур предварительной фильтрации, кросс-корреляции и пространственной фильтрации ложных обнаружений (рис. 4) и структуру ПО на основе комбинации процедур адаптивного обнаружения сигналов, предварительной фильтрации и кросс-корреляции (рис. 5). Для практической реализации на универсальном вычислителе была выбрана структура квазиоптимальных алгоритмов ПО сигналов в системах ПЗЛ, основанная на комбинации процедур адаптивного к уровню шума обнаружителя и кросс-коррелятора.

Разработанная структура квазиоптимальных алгоритмов ПО сигналов в системах ПЗЛ, реализованная в виде комплекса программно-математического обеспечения, работающего в реальном масштабе времени на универсальном вычислителе IBM PC 486, представлена на рис. 6. В разработанной структуре можно выделить следующие основные этапы обработки:

- прием акустических сигналов звукоприемником (ЗП) на линейной АБ, преобразование сигналов ЗП в цифровой вид в частотном диапазоне 5—120 Гц, передача сигналов ЗП по линиям связи и буферизованный ввод их в вычислитель (блоки 1 и 2 на рис. 6);

- фильтрация фильтром с полосой пропускания 5—40 Гц (блок 3), оценка уровней шумов и адаптации к ним уровней обнаружительных порогов (блок 4), обнаружение, оценка момента прихода и выделение полезных сигналов в частотной полосе 5—40 Гц (блок 5);

- отсеивание помеховых сигналов баллистической волны, использующее сигнальные фрагменты в диапазоне 5—120 Гц (блоки 6 и 7), и отсеивание других мешающих сигналов (блоки 8 и 9);

- накопление заданного числа выделенных полезных сигналов и временная остановка ввода входной информации (блок 10);

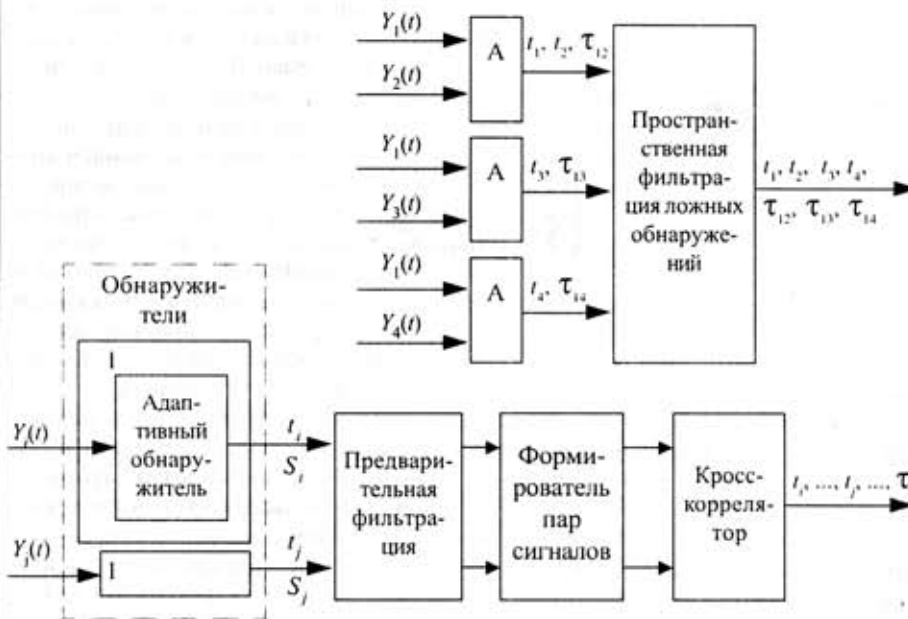


Рис. 4. Структура ПО сигналов в системе ПЗЛ, основанная на комбинации процедур предварительной фильтрации, кросс-корреляции и пространственной фильтрации ложных обнаружений (блок А раскрыт на рис. 3)

Рис. 5. Структура ПО сигналов в системе ПЗЛ, основанная на комбинации процедур адаптивного обнаружения, предварительной фильтрации и кросс-корреляции

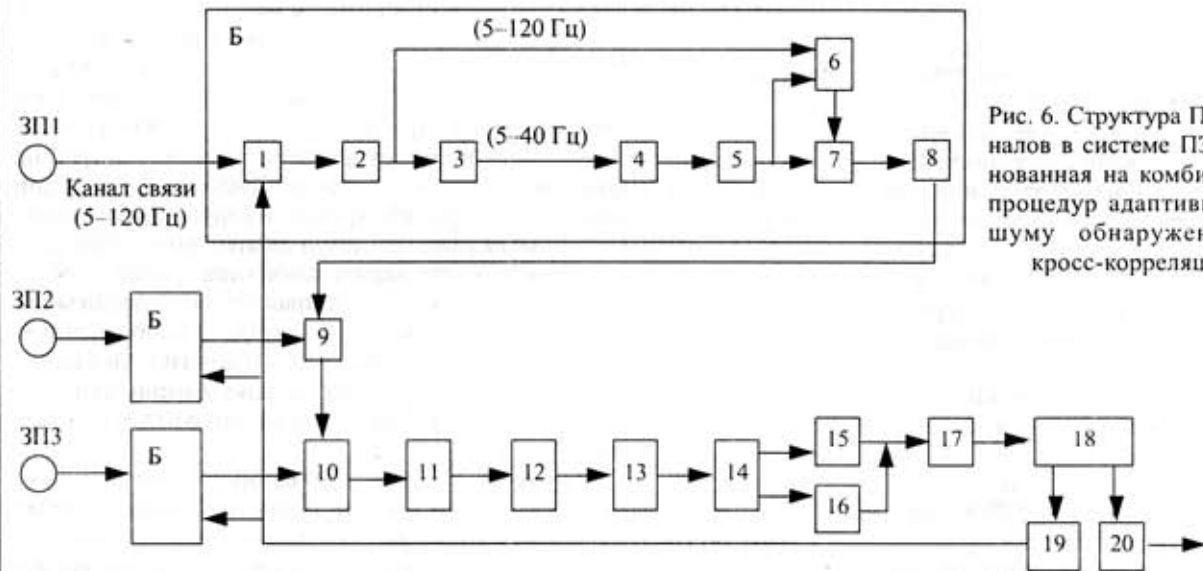


Рис. 6. Структура ПО сигналов в системе ПЗЛ, основанная на комбинации процедур адаптивного к шуму обнаружения и кросс-корреляции

— формирование возможных пар сигналов, соответствующих одному и тому же источнику (блок 11), определение класса выделенных полезных сигналов по их временной и частотной структуре (блок 12), определение класса пары сигнала (блок 13), выделение наиболее вероятной пары сигналов из сформированных пар и определение необходимости взаимнокорреляционной обработки сигналов пары (блок 14);

— оценивание параметров сигналов и взаимнокорреляционное оценивание задержки сигналов (блоки 15 и 16), формирование выходных кодограмм (блок 17) и передача их через выходной буфер (блок 18) на ЭВМ вторичной обработки (блок 20);

— очистка рабочих массивов памяти и инициализация дальнейшего ввода входной информации (блок 19).

Адаптивный обнаружитель реализован на основе измерителя случайных процессов. Уровень обнаружительного порога выбирался на основе критерия Неймана—Пирсона. (Рассмотрение алгоритмов из-

мерителя случайных процессов и обнаружителя составляет предмет отдельной статьи.)

Макет, реализующий представленную структуру алгоритмов квазиоптимальной ПО сигналов в системе ПЗЛ, был испытан в полевых условиях. Результаты испытаний показали, что по основным тактико-техническим параметрам макет удовлетворяет предъявляемым к нему требованиям.

Таким образом, анализ основных структур алгоритмов первичной обработки сигналов в системах пассивной звуковой локации позволил выделить наиболее перспективные структуры: структуру ПО на основе комбинации процедур предварительной фильтрации, кросс-корреляции и пространственной фильтрации ложных обнаружений и структуру ПО на основе комбинации процедур адаптивного обнаружения сигналов, предварительной фильтрации и кросс-корреляции.

Предложенная авторами структура квазиоптимальных алгоритмов ПО сигналов, основанная на комбинации процедур адаптивного к шуму обнаружителя и кросс-коррелятора и осуществленная в виде комплекса программно-математического обеспечения, работающего в реальном режиме времени на универсальном вычислителе, на сегодняшний день является наиболее приемлемой для практической реализации. Дополнение разработанных алгоритмов в системе пассивной звуковой локации процедурами предварительной фильтрации может быть проведено с переходом на более производительный вычислитель.

В перспективе просматривается доработка обнаружителя представленной структуры ПО сигналов в системе ПЗЛ, т. е. адаптация обнаружителя не только к шумовому, но и к сигнальному процессу, и, таким образом, эволюционный переход к полноценному адаптивному обнаружителю.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Болтенков В. А., Чариков А. Н., Шевченко Ю. В. Аппаратура пассивной звуковой локации: состояние, пробле-

мы, перспективы // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 1997.— № 3.— С. 58—61.

2. Tarasov V., Boltenkov V., Kropachev D. Algorithms of signal processing in passive sound ranging systems and their practical realization // Proceedings of the Fourth ALL-Ukrainian International Conference "Signal/Image Processing and Pattern Recognition-UkrOBRAZ'98", Kyjiv.— 1998.— P. 141—142.

3. Сосулин Ю. Г. Теория обнаружения и оценивания стохастических сигналов.— М.: Сов. радио, 1978.

4. Репин В. Г., Тартаковский Г. П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем.— М.: Сов. радио, 1977.

5. Knapp C. H., Carter G. C. The generalized correlation method for estimation of time delay // IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing.— August 1976.— Vol. ASSP-24, N 4.— P. 320—326.

6. Carter G. C. Time delay estimation for passive sonar signal processing // Ibid.— June 1981.— Vol. ASSP-29.— P. 463—470.

7. Ludeman L. C. Multisignal time difference estimator with application to the sound ranging problem // Proceedings of ICASSP-90.— 1990.— P. 800—803.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ. СИМПОЗИУМЫ

17—20 апреля 2002 · Москва · СК «Олимпийский»



mera 2002

Measuring & Automation

Факс: (095) 935-7351

**3-я Московская международная выставка
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ**

- в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции
- Статистическая оценка трудозатрат изготовления коммутационных плат радиоэлектронных средств. *А. А. Ефименко, А. В. Голубев, А. С. Кондрашов (Украина, г. Одесса)*
 - Акустооптическое устройство управления потоком данных систем оптической памяти с побитовым представлением информации. *В. В. Данилов (Украина, г. Донецк)*
 - Некоторые перспективные технологии производства полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии. *В. В. Курак, В. В. Цыбуленко, В. Л. Азбомассу (Украина, г. Херсон)*
 - Особенности разработки датчиков давления на ПАВ для АЭС. *Я. И. Летиш, В. К. Лопушненко, Н. Г. Черняк, Ю. Е. Николаенко (Украина, г. Одесса, г. Киев)*
 - Технология изготовления красителей для лазеров с перестраиваемой длиной волны в диапазоне 472—600 нм. *В. П. Кругленко, И. Е. Марончук, М. В. Повстяной (Украина, г. Херсон)*
 - Размерно-геометрические параметры моделей микроструктуры толстых резистивных пленок. *А. В. Стерхова (Россия, г. Ижевск)*
 - Исследование методов построения вычислительных устройств на основе FPGA. *В. И. Жабин, Н. А. Ковалев (Украина, г. Киев)*
- в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции